

公益广告

一滴清水 一片绿地 一个地球



国际标准连续出版物号: ISSN 1006-7647 国内统一连续出版物号: CN 32-1439/TV CODEN: SSKJAT 邮发代号: 28-244 国内定价: 15.00元

ISSN 1006-7647



9 771006 764265



水利水电科技进展

ADVANCES IN SCIENCE AND TECHNOLOGY OF WATER RESOURCES

第四十六卷第四期

二〇二六年七月出版

中国科学引文数据库核心期刊

中文核心期刊

中国科技核心期刊

ISSN 1006-7647

CN 32-1439/TV



河海大学 主办
HOHAI UNIVERSITY



水利水电科技进展

ADVANCES IN SCIENCE AND TECHNOLOGY OF WATER RESOURCES



2026年7月

第46卷 第4期

Vol. 46 No. 4

《水利水电科技进展》第七届编辑委员会

主 任 委 员：郑金海

副主任委员：宋翔洲

主 编：苏怀智

副 主 编：冯建刚 窦 智

编 委 （以姓氏笔画为序）：

万伟锋	马金根	马福恒	王天星	王仁坤	王文全	王玉杰	王东栋	王全荣	王兆礼
王进廷	王志亮	王社亮	王环玲	王俊杰	王桂生	王继敏	文 章	方宏远	孔纲强
巴 晶	邓华锋	邓 军	左其亭	左 锐	龙 笛	卢永金	史广泰	付 强	白庆升
冯建刚	冯建军	冯树荣	成 立	华 明	向 衍	刘东海	刘昌军	刘建锋	刘晓丽
刘晓辉	刘海宇	刘 斌	刘新荣	刘耀儒	关铁生	许小华	许月萍	许增光	孙永林
孙永明	贡 力	苏怀智	李云开	李火坤	李书霞	李 伟	李 阳	李明超	李炎隆
李 剑	李洪涛	李晓俊	李高会	李家正	李超顺	李德友	杨 飞	杨威嘉	肖 艳
肖培伟	吴礼舟	岑威钧	佟宏伟	余天堂	邹德高	沈振中	张人会	张 帅	张永进
张宇宁	张 欣	张建伟	张春生	张 挺	张振华	张晓祥	张 婷	张 鹏	张 嘎
张 磊	张德胜	张璐璐	陈文龙	陈立华	陈 波	陈帝伊	陈益峰	陈 静	陈 璐
林鹏智	季 斌	金光球	金 浏	金祖权	金 峰	周玉良	周家文	周 雷	郑天元
郑克勋	郑爱武	练继建	赵明阶	钟启明	侯精明	俞晓东	俞 缙	姚 池	姚志峰
夏文博	徐 旭	高长胜	郭华明	郭进军	郭高贵	郭鹏程	唐立模	黄书岭	黄时锋
黄 彪	黄 铭	崔 博	假冬冬	彭建和	彭 鹏	蒋金洋	韩 伟	程永光	储洪强
雷 冬	雷金波	雷晓辉	窦 智	裴 吉	颜天佑	潘鹏志			

《水利水电科技进展》首届青年编辑委员会

（以姓氏笔画为序）

于福荣	弓扶元	马 韬	王 帆	王茂松	王 珏	王晋伟	王高辉	王海龙	王 娟
王铭明	王 超	王超越	王瑞红	方 正	邓 超	卢加兴	叶长亮	田 威	付晓龙
付晓东	宁逢伟	权 辉	吕兴栋	吕锡芝	朱国俊	乔 伟	任炳昱	刘贝贝	刘 俊
刘 浏	刘 超	关 涛	江 汇	许贝贝	孙世坤	孙龙刚	孙奔博	孙洪亮	孙博闻
李兆恒	李兆峰	李 毅	杨 帆	肖晨光	吴学震	吴 钦	辛建达	沈月千	张启灵
张 君	张雨霆	张 洪	张紫涛	张 楠	张 雷	张雷克	张 睿	张 龔	陈 舟
范向前	欧 斌	明 波	罗 忆	周兴波	周佳庆	周佩剑	周银军	赵志高	段 伟
宫经伟	贺登辉	袁维海	聂利超	桂 跃	顾 昊	秘向丽	徐小蓉	郭文成	郭胜山
郭 涛	唐小松	黄先北	曹学兴	梁 越	葛 巍	蒋水华	韩 勃	程 龙	程勤波
傅中志	焦伟轩	舒 实	鲁 洋	曾永顺	曾献奎	温立峰	谭乔凤	谭 磊	熊 堃
潘坚文	戴云峰	魏博文							

《水利水电科技进展》征稿简则

- 本刊是一份科学技术期刊（ISSN 1006-7647；CN 32-1439 / TV），主要反映国内外水资源开发、利用、配置、节约和保护领域的科技进展和动态，为我国水利水电工程建设及运行管理服务。主要读者对象为水利水电及相关学科的科学研究人员、工程技术人员、科技管理人员和大专院校师生。本刊逢单月出版，国内外公开发行，邮发代号：28-244。
- 本刊主要刊登与水科学、水工程、水资源、水环境、水管理等有关的科技论文，设有研究探讨、工程技术、专题综述、国外动态、科技简讯等栏目。本刊优先发表自然科学基金资助项目及其他重大科技项目的研究(技术)论文。
- 本刊已入选《中国科学引文数据库》《万方数据数字化期刊全文数据库》《中国期刊全文数据库》《中文科技期刊数据库》等数据库或网站。作者投稿时如无特别声明即被视为同意本刊通过上述媒体为读者提供服务；如有异议，请在投稿时说明。
- 来稿要求和注意事项
 - 文稿务求内容正确，应注重技术创新或学术创见；重点突出作者论文的新贡献；要求文字精练，结构严谨，数据可靠(重要数据请注明出处)；避免写成报告、讲义和学位论文的缩写形式。文稿内容不能泄露国家秘密，在政治或涉外问题上符合国家政策。
 - 文稿篇幅 4 000~6 000 字为宜，应提供中英文篇名、作者姓名及单位名称，并编写中英文摘要(约 250 个汉字)和关键词(4~6 个)。简讯类文稿一般不超过 800 字。
 - 文稿请用 A4 篇幅，正文用 5 号字通栏排版；编译稿应尊重原文的版权，注明原文出处(附外文原文或原文复印件)。计量单位一律使用法定计量单位。
 - 文稿中的图表应设计合理，大小适当。请使用三线表。图表应排在正文引用处，先文后图表。
 - 参考文献择作者亲自阅读、本文引用、公开发表或有案可查者列出，采用顺序编码制。中文期刊文献必须用中英文两种文字著录。常用著录格式(常用参考文献类型：期刊文章[J]；专著[M]；会议论文集[C]；学位论文[D]；标准[S]；报告[R]；报纸[N]；专利[P]；电子文献[EB/OL])：
[1] 作者名(外文姓前名后). 论文篇名[J]. 期刊名，年份，卷号(期次)：起止页码。
[2] 编著者(外文姓前名后). 书名[M]. 版次. 出版地：出版者，出版年：起止页码。
[3] 作者. 题名[C] // 文集编者. 文集名. 出版地：出版者，出版年：论文起止页码。
[4] 作者. 学位论文名[D]. 地名(城市名)：学位授予单位，年份。
[5] 作者. 报告名[R]. 收藏地(城市名)：收藏单位，年份。
[6] 作者. 题名[EB/OL]. [引用日期]. 获取和访问路径。
 - 摄影作品以水利水电工程为主题，要求照片清晰、层次丰富，彩照，并附简短说明。
 - 来稿请写明作者姓名、出生年、性别、职称、学位、主要研究方向(或从事的工作)、工作单位全称、邮政编码、通信地址、联系电话及电邮地址。
- 作者投稿，文责自负，本刊只对稿件作文字上的修改。请勿一稿多投。作者投稿满 3 个月未收到本刊编辑部通知者，可将稿件另行处理。
- 本刊对录用发表的文章将按与作者约定的稿酬标准支付稿酬。所付稿酬包括本简则第 3 条所列媒体的著作权使用费；同时向作者赠送当期样刊。
- 本刊对录用发表的文章酌收论文发表费，论文发表费在论文被录用后交纳。另有约定的除外。
- 本刊只接受网上投稿，网络地址：http://jour.hhu.edu.cn。
编辑热线：025-83786335；E-mail：jz@hhu.edu.cn 或 jz1981@vip.163.com。
微信公众号：“水利水电科技进展”或“sksdkjjz”。

水利水电科技进展

(1981 年创刊,双月刊)
第 46 卷第 4 期

2026

2026 年 7 月 10 日出版

SHUILI SHUIDIAN KEJI JINZHAN

中国科学引文数据库核心期刊
中文核心期刊(2004—2026 年)
中国科技核心期刊(2003—2026 年)
中国高校百佳科技期刊
中国高校优秀科技期刊
全国水利系统优秀科技期刊
江苏省优秀期刊

编委会主任 郑金海
主 编 苏怀智
副 主 编 冯建刚 奚 智
编辑部主任 雷 燕

责任编辑 俞云利
英文编辑 俞云利

主 管:中华人民共和国教育部
主 办:河海大学

编辑出版:《水利水电科技进展》编辑部
地 址:210098 南京市西康路 1 号
电 话:025-83786335
电子邮箱:jz@ hhu. edu. cn

网络地址:http://jour. hhu. edu. cn
印 刷:南京千字文印务有限公司
发行范围:公开发行

国内发行:中国邮政集团公司江苏省分
公司

订 阅:全国各地邮局

邮发代号:28-244

国外发行:中国国际图书贸易集团有限
公司 (北京 399 信箱 100048)

国外发行代号:BM2740

广告许可证:苏工商 3200004960327

中国标准连 ISSN 1006-7647

续出版物号:CN 32-1439/TV

CODEN: SSKJAT

国内定价:15.00 元

目 次

· 研究探讨 ·

受限通气条件下滞留气团运动对排水系统井喷的作用机制
..... 徐福军,章 艳(1)

考虑基础流量的输水系统间歇泉现象实验研究
..... 李小亮,何 鑫,陈千寻,周 领(9)

掺气设施射流出射角修正方法
..... 董玉萍,郑林平,李国栋,李 丹(16)

纤维-膨胀剂协同改性混凝土耐硫酸盐侵蚀机理研究
..... 田正宏,颜 伟,胡桂宝,钱长根(21)

细颗粒含量对间断级配土侵蚀的影响
..... 李东锋,许增光,高 惠,王党伟,丁子玥,曹 成(28)

考虑孔隙水饱和度的湿态混凝土弹性模量多尺度预测
..... 杜向琴,刘志龙,陈荣妃,赵振华,李宗利(37)

基于开尔文冲量的单个球形颗粒附近空化泡的移动特性研究
..... 郑潇潇,张广超,杨 玲,郑 斌(45)

· 工程技术 ·

鄱阳湖总氮总磷时空变化的遥感反演分析
..... 李 晓,吴剑邦,薛晨阳,熊丽黎,刘发根,张 奇(50)

雨养条件下地下水埋深对夏玉米产量与水分利用效率的影响
..... 赵子焱,张晓涛,蒋 静(58)

基于博弈论组合赋权和 TOPSIS 法的矿区水资源安全性综合
评价 薛晓强,周雅清,许乐杰,张少坤,王鹏皓(65)

基于 D-S 证据理论的土料压实质量多源信息融合评估方法
..... 杨 钢,刘国庆,李洪飞,丁学赏,常瑞峰,刘东海(72)

平板闸门闭门卡阻原因分析及解决对策
..... 盛传明,练继建,刘 昉,李 蕾(79)

大型混流式水轮机高负荷工况能量特性数值模拟
...乔 鹏,刘昆庭,李 秘,于韵宽,陈典龙,朱文兵,阚 阆(87)

· 大坝安全专栏 ·

基于 VMD-LSTM-VAE 的渗流监测数据异常值检测模型
..... 李梦华,钱胥安,傅蜀燕,赵晗坤,金思彤,欧 斌(93)

基于改进 YOLOv5s 模型的水工建筑物裂缝检测
..... 李怡静,邓佳蕙,袁世虹(100)

大藤峡水利枢纽 摄影:孟 凯(封面)

CONTENTS

Mechanism of trapped air-pocket motion on geyser occurrence in drainage systems under restrictive ventilation conditions Xu Fujun, et al(1)

Experimental study on geyser phenomena in water conveyance systems considering base flow Li Xiaoliang, et al(9)

Correction method of take-off angle of jet from aeration facility Dong Yuping, et al(16)

Study on mechanism of sulfate erosion resistance of concrete modified by synergistic action of fiber and expansive agent Tian Zhenghong, et al(21)

Effect of fine particle content on erosion of gap-graded soils Li Dongfeng, et al(28)

Multi-scale prediction of elastic modulus of wet concrete considering pore water saturation Du Xiangqin, et al(37)

Study on movement characteristics of cavitation bubbles near a single spherical particle based on Kelvin impulse Zheng Xiaoxiao, et al(45)

Remote sensing inversion analysis of spatiotemporal variations in total nitrogen and total phosphorus in Poyang Lake Li Xiao, et al(50)

Effects of groundwater depth on yield and water use efficiency of summer maize under rainfed conditions Zhao Zihan, et al(58)

Comprehensive evaluation of water resources security in mining areas based on game theory combination weighting and TOPSIS method Xue Xiaoqiang, et al(65)

Multi-source information fusion evaluation method of soil compaction quality based on D-S evidence theory Yang Gang, et al(72)

Analysis of causes and countermeasures for plane gate jamming in closing process Sheng Chuanming, et al(79)

Numerical simulation of energy characteristics of a large Francis turbine under high-load conditions Qiao Peng, et al(87)

An outlier detection model for seepage monitoring data based on VMD-LSTM-VAE Li Menghua, et al(93)

Crack detection for hydraulic structures based on an improved YOLOv5s model Li Yijing, et al(100)

受限通气条件下滞留气团运动对排水系统井喷的作用机制

徐福军¹, 章 艳²

(1. 上海浦河工程设计有限公司; 2. 河海大学水利水电学院)

摘要:为了探究井盖约束下竖井受限通气条件对气团运动规律及井喷特性的影响,采用模型试验与数值模拟相结合的方法,系统研究了竖井直径、通气率、外部水头及初始气团体积对气团运动及井喷发生的影响。结果表明:气团释放过程中,竖井水位上升过程可分为气团驱动和压差驱动两个阶段,可能产生未发生井喷、仅发生气团驱动井喷、仅发生压差驱动井喷、气团驱动井喷和压差驱动井喷均发生 4 种典型流态;气团形态受管径比、通气率和气团长度共同影响,小直径竖井中气团整体趋于对称并侵入上游管道,而大直径竖井中气团显著不对称并滞留于下游;小直径竖井中气团头部形态随通气率呈非单调变化,通气率为 0 时近似对称,通气率为 0.01、0.02 时呈不规则形态,通气率为 0.05、0.1 时重新趋于对称,通气率为 1(完全通气)时则呈偏向下流的尖锐不对称形态;气团长度越大,其对自由液面的扰动越强烈,释放位置也越高;竖井内气团头部和自由液面上升速度均随通气率、外部水头、气团长度的增加及竖井直径的减小而显著增大。

关键词:城市排水系统;竖井;井盖;滞留气团;井喷;受限通气

Mechanism of trapped air-pocket motion on geyser occurrence in drainage systems under restrictive ventilation conditions//Xu Fujun¹, Zhang Yan²(1. Shanghai Puhe Engineering Design Co., Ltd.; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University)

Abstract: To investigate the effects of restrictive ventilation conditions in a covered vertical shaft on air-pocket motion and geyser characteristics, a combined approach of physical model tests and numerical simulations was employed to systematically examine the influences of shaft diameter, ventilation ratio, external head, and initial air-pocket volume on air-pocket motion and geyser occurrence. The results show that the water-level rise in the shaft during air-pocket release can be divided into an air-pocket-driven stage and a pressure-difference-driven stage, resulting in four typical flow regimes: no geyser, an air-pocket-driven geyser only, a pressure-difference-driven geyser only, and both an air-pocket-driven geyser and a pressure-difference-driven geyser. The air-pocket morphology is jointly influenced by the shaft-to-pipe diameter ratio, ventilation ratio, and air-pocket length. In small-diameter shafts, the air pocket tends to be symmetric and intrudes into the upstream pipe, whereas in larger-diameter shafts, the air pocket exhibits significant asymmetry and remains trapped in the downstream pipe. For small-diameter shafts, the air-pocket head morphology varies non-monotonically with the ventilation ratio: it is approximately symmetric at a ventilation ratio of 0, becomes irregular at ventilation ratios of 0.01 and 0.02, returns to a nearly symmetric shape at ventilation ratios of 0.05 and 0.1, and develops into a sharply asymmetric shape inclined toward the downstream direction at a ventilation ratio of 1 (fully ventilated condition). A larger air-pocket length results in stronger disturbances to the free surface and a higher release position. The rising velocities of both the air-pocket head and the free surface increase significantly with increasing ventilation ratio, external head, and air-pocket length, and decrease with increasing shaft diameter.

Key words: urban drainage system; shaft; cover; trapped air pocket; geyser; restrictive ventilation

城市排水系统在缓解暴雨内涝和保障排水安全方面发挥着关键作用。强降雨过程中,大量地表径流迅速注入排水管道,形成明满交替流,进而封堵管道中的气体并形成滞留气团^[1-3]。滞留气团经竖井

释放可能诱发排水系统井喷,即竖井内水柱或水气混合体高速喷射的水力现象^[4-6]。井喷现象涉及复杂的气液两相流动^[7],具有高突发性和强破坏性,伴随剧烈压力波动、管道振动及井盖掀飞,威胁结构

与人员安全,还可能导致污染物外泄。Muller 等^[8]发现井喷过程中自由液面最大上升速度可达 2~30 m/s,具有极强的冲击性与破坏力。

现有井喷研究主要针对竖井顶部无井盖条件,即竖井完全通气的情况。Monni 等^[9-12]通过模型试验和数值模拟,分析了管道和竖井内滞留气团的形成与运动,以及井喷类型和流态。当管道内发生明满交替流时,空气受浮力、剪切力、压力波等作用^[13-15],可产生分层流、气泡流、段塞流、环状流^[16-17],其中后三者会产生滞留气团。Wright 等^[18]通过分析美国明尼苏达州实际井喷事故的影像与压力数据,阐明了滞留气团在竖井中释放引发井喷的物理机制。Cong^[19]通过模型试验指出,井喷发生时竖井中气团上升净速度会超过 Taylor 气泡速度。Wang 等^[20-22]通过模型试验与数值模拟,揭示了井喷高度随气团体积、初始水深及外部压力的增大而增大、随竖井直径的减小而增大。王晓升等^[23-24]采用 CLSVOF 方法结合混合 RANS/LES 模型,精细捕捉了井喷过程中气泡形态、速度场与压力场的动态变化,揭示了井喷高度与竖井和隧道直径比呈负相关关系。综上,已有研究表明井喷发生受气团体积、上升速度及竖井几何条件等综合影响,为解释气团运动规律和井喷特性提供了重要依据。然而,这些研究普遍忽略了井盖对竖井通气条件的限制及其对气团运动和井喷特性的影响。

针对受限通气条件下的井喷研究表明,井盖的存在可能会导致竖井排气受限以及竖井内位于自由液面上方的初始空气在气团释放过程中被压缩产生“气垫效应”,进而显著影响井喷高度、压力峰值及井盖位移;Zhou 等^[25]发现不同通气条件下压力波动存在明显差异,受限通气条件下气团释放会引起竖井顶部空气增压;Wang 等^[26-27]采用数值模拟方法研究了不同通气条件下井盖发生位移的可能性,指出当相对通气率不大于 0.02 时,大体积滞留气团释放产生的增压足以掀翻井盖,且气团释放引起的压力增幅大于压力波动本身。相关研究关注了装配井盖竖井在受限通气条件下的压力特性及井喷发生临界条件,但尚未深入分析井喷过程中受限通气竖井内的气团动力学特性,且气团形态、上升速度等随各影响因素的变化规律尚不明确,制约了对井喷现象内在物理机制的认识。为此,本文采用模型试验与数值模拟相结合的方法,研究井盖约束下竖井受限通气条件对排水管道井喷的影响,揭示竖井内滞留气团的形态演化与运动规律,以期为城市排水系统的安全设计与运行提供理论支撑与技术参考。

1 研究方法

1.1 物理模型试验

本文采用概化的排水管道模型,以便于控制变量和研究各变量的影响^[28]。模型结构示意图如图 1 所示,主要由上游压力水箱、水平管道和竖井组成。其中,上游水箱(2.0 m×1.6 m×1.2 m)由水泵供水,水平管道(直径 $D=0.15$ m,总长 $L_1+L_2+L_3=17.0$ m)上游连接水箱,下游末端封闭。在竖井与封闭末端之间设置 3 个阀门,通过关闭不同的阀门,可在阀门与下游密封末端之间形成特定长度的初始滞留气团。气团长度 L_3 分别取 1.2、1.8、2.4 m,其体积 $V_a=\pi D^2 L_3/4$ 。竖井中心至水箱的水平距离 L_1 为 8.3 m,竖井顶部至水平管道底部的垂直高度 H_1 为 2.0 m。试验设置 0.075 m 和 0.15 m 2 种竖井直径(D_r),对应的竖井与管道直径比 D_r/D 分别为 0.5 和 1。竖井内初始液面高度与上游水箱内水头 H_0 保持一致, H_0 分别取 0.7 m 和 0.8 m。本文竖井高度超过 2 倍管道上游初始水头,能够较好地反映井喷强度和发生情况。

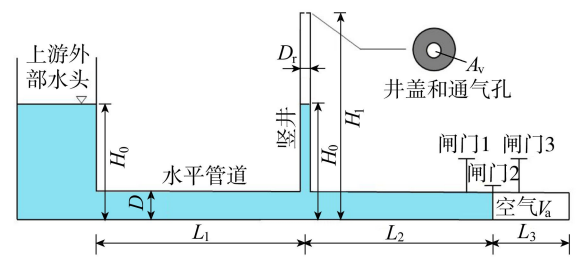


图 1 排水管道模型结构示意图

为模拟竖井受限通气条件,采用有机玻璃制成的井盖,并通过螺栓将其固定于竖井顶部。井盖中心开有通气圆孔,试验设置 6 种不同的通气面积,分别对应 0、0.01、0.02、0.05、0.1、1 共 6 种通气率($A_v^*=A_v/A_s$,其中, A_v 为通气孔面积, A_s 为竖井的横截面积。 $A_v^*=0$ 表示井盖完全不通气; $A_v^*=1$ 表示未设置井盖,即竖井完全通气)。

试验前,所有阀门均处于开启状态,启动水泵并调节上游水箱的液面高度,使系统维持稳定的外部水头 H_0 ;随后根据预设的初始气团长度,关闭相应的阀门并排空阀门与封闭末端之间的水体,从而在系统下游侧形成初始气团,其初始压力等于大气压。试验开始时,通过手动迅速开启对应阀门(平均开阀时间约为 0.25 s)使气团进入管道。试验过程中,使用高速运动相机(GoPro 8)记录竖井中气团释放与井喷的瞬时水气流态,拍摄帧率为 60 帧/s,分辨率为 4 096×2 160 像素。

1.2 数值模拟方法

1.2.1 模型选择

基于物理模型建立三维井喷 CFD 数值模型,并将数值模拟结果与物理模型试验结果进行对比验证,进而利用验证后的数值模型研究不同通气率下竖井直径、外部水头和滞留气团体积对井喷的影响。已有研究表明,VOF 模型能够较为准确地捕捉管道内水气界面的动态演化特征,已广泛用于管道水气两相流动的数值模拟^[29-31]。因此,本文采用 VOF 模型对受限通气条件下的管道水气两相流动过程进行模拟。Chan 等^[21]的研究表明,标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型能够较准确地模拟井喷过程中的压力瞬变及水气相互作用,故本文选用该湍流模型进行求解。

1.2.2 边界条件设置与数值模型验证

基于 Creo 软件构建三维管道模型(图 2)。数值计算边界条件设置如下:水平管道上游端设为压力进口,压力大小为 $\rho_w g H_0$ (ρ_w 为水体密度,取 998.2 kg/m^3 ; g 为重力加速度,取 9.81 m/s^2),该进口处水的体积分数设为 1;井盖通气孔设为表压为 0 的压力出口,其余井盖区域设为无滑移壁面,当 $A_v^* = 0$ 时,竖井顶部全部设为无滑移壁面;水平管道下游封闭端设置长度为 L_3 的初始气团^[32]。

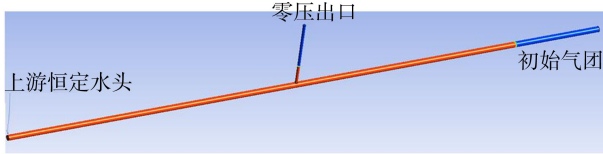


图 2 数值模拟三维模型

采用 ICEM 软件对排水管道井喷计算模型进行六面体结构化网格划分,网格尺寸范围为 $0.03 \sim 0.05 \text{ m}$ 。通过调整单元网格尺寸改变网格数量,对模型进行网格无关性验证。在 $A_v^* = 0.1$ 、 $D_r/D = 0.5$ 、 $H_0 = 0.7 \text{ m}$ 、 $L_3 = 1.8 \text{ m}$ 工况下,测试了 5 套网格划分方案。结果表明,随着网格总数由约 11 万增加至 27 万,数值模拟结果趋近实际值,相对误差由 11.66% 降低至 4.94%,呈现出良好的收敛特性。对比 5 套网格划分方案的计算精度与效率,最终选取网格总数为 192 366 的计算模型(图 3),并采用相同的单元网格尺

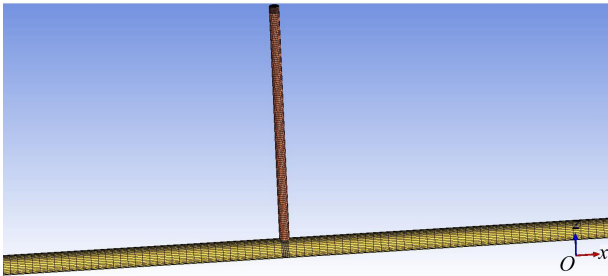


图 3 计算模型网格划分

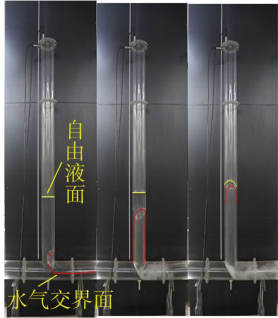
寸对不同竖井直径的三维模型进行网格划分。

固定参数 $D_r/D = 0.5$ 、 $H_0 = 0.8 \text{ m}$ 、 $L_3 = 1.8 \text{ m}$,选取通气率为 0、0.01、0.02、0.05、0.1 共 5 组工况,将数值模拟结果与模型试验结果进行对比验证。结果表明,数值模拟与模型试验在水气流动演变及典型界面运动等方面均保持一致。当通气率为 0、0.01、0.02、0.05、0.1 时,竖井内自由液面高度的相对误差分别为 4.23%、3.80%、4.17%、4.06%、2.89%,表明数值结果与试验结果吻合良好,能够满足本文的精度要求。

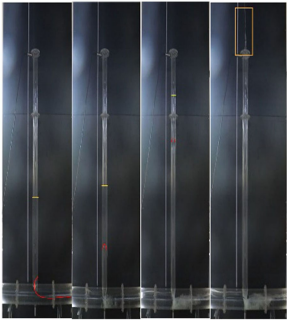
2 结果与讨论

2.1 气团释放过程水气流动现象

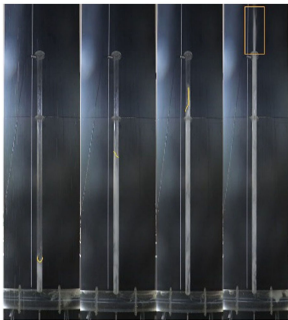
图 4 给出了滞留气团经竖井释放的典型水气流动态。图 4(a) 给出了 $D_r/D = 1.0$ 、 $A_v^* = 0.05$ 、 $H_0 = 0.7 \text{ m}$ 、 $L_3 = 1.8 \text{ m}$ 工况下的气团释放过程,气团进入竖井后,竖井内水气交界面(红线所示)和自由液面(黄线所示)持续上升,当水气交界面在自由液面到达竖井顶部前突破自由液面时,不发生井喷。图 4(b)(c) 给出了 $D_r/D = 0.5$ 、 $A_v^* = 0.1$ 、 $H_0 = 0.7 \text{ m}$ 、 $L_3 = 2.4 \text{ m}$ 工况下发生井喷的典型水气流动态,可划分为气团驱动井喷和压差驱动井喷两个阶段。在自由液面到达竖井顶部前,水气交界面并未突破自由液面,气团将其上方的水柱挤出竖井,并经井盖的孔口喷出,形成气团驱动井喷;随后竖井产生局部低压,在外部压力作用下,水流快速充填到水平管道及连接的竖井中,并冲击管道内未完全释放的滞留



(a) 气团释放未井喷过程



(b) 气团驱动井喷发生过程



(c) 压差驱动井喷发生过程

图 4 气团释放过程典型流态

气团,产生水锤效应,在系统瞬时高压作用下,水平管道内的水流挟带空气从竖井内快速排出,形成压差驱动井喷。

基于气团驱动井喷和压差驱动井喷的发生特征,所有试验工况可归纳为 a 型(未发生井喷)、b 型(仅发生气团驱动井喷)、c 型(仅发生压差驱动井喷)和 d 型(气团驱动井喷与压差驱动井喷均发生) 4 种典型井喷流态,具体结果见表 1。由表 1 可见,当 $D_r/D=1.0$ 或 $A_v^* \leq 0.01$ 时,各工况均未发生井喷现象;当 $D_r/D=0.5$ 时,b 型、c 型及 d 型井喷现象均有发生。井喷发生概率随 A_v^* 、 H_0 和 L_3 的增大而增大;当 L_3 较短时,压差驱动井喷的发生概率显著降低,井喷流态更倾向于 b 型。

表 1 各工况井喷现象的观测结果

D_r/D	A_v^*	H_0/m	L_3/m	井喷类型
1.0	0、0.01、0.02、0.05、0.1、1	0.7、0.8	1.2、1.8、2.4	a 型
	0、0.01	0.7、0.8	1.2、1.8、2.4	a 型
0.5	0.02	0.7	1.2、1.8、2.4	a 型
	0.05	0.7	1.2、1.8	a 型
	0.1、1	0.7	1.2	a 型
	0.02	0.8	1.2、1.8、2.4	b 型
0.5	0.05	0.7	2.4	b 型
	0.05	0.8	1.2、1.8、2.4	b 型
	0.1、1	0.8	1.2	b 型
0.5	0.1、1	0.7	1.8	c 型
0.5	0.1	0.7	2.4	d 型
	1	0.8	1.8、2.4	d 型

2.2 滞留气团形态演变特征

图 5 和图 6 分别为 $D_r/D=0.5, 1.0$ 时, $H_0=$

0.8 m、 $L_3=1.8$ m、 $A_v^*=0.01, 0.02, 0.05, 0.1$ 工况下气团进入竖井时的形态。由图 5 可见,当 $D_r/D=0.5$ 时,气团进入竖井后总体沿竖井中心轴向上发展,整体呈近似对称形态,并有部分气体侵入上游管道。较小的竖井横截面积使竖井内气团的体积占比增大、边壁液膜变薄,气团上方水柱的下泄通道变窄、下泄流量减小,导致水气交界面向上靠近自由液面的速度降低。因此,水气交界面突破自由液面的位置较高,甚至可能在突破自由液面前推动自由液面到达井盖,从而增加气团驱动井喷发生的可能性。相比之下,当 $D_r/D=1.0$ 时(图 6),较大的竖井横截面积导致气团从竖井上游侧进入后呈不对称上升分布(尖端偏向下游侧),气团上方水柱向下流动的流量增大,致使水气交界面在较低高度突破自由液面,井喷高度显著降低,该工况下未观察到井喷发生,与试验结果一致。不同 A_v^* 下, $D_r/D=0.5$ 时气团在进入竖井的同时可侵入上游管道中;而 $D_r/D=1.0$ 时,气团进入竖井后几乎不进入上游管道,主要滞留于下游管道。

图 7 和图 8 分别为 $H_0=0.7, 0.8$ m 时, $D_r/D=0.5$ 、 $L_3=1.8$ m、 $A_v^*=0, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 1$ 工况下气团头部水气交界面即将突破自由液面时的形态。当 $A_v^*=0$ 时,竖井顶部完全封闭导致自由液面几乎不上升且始终接近水平,气团呈对称形态,与经典泰勒气泡较为接近。当 $A_v^*=0.01, 0.02$ 时,井盖强限制通气使得自由液面上方气团增压,自由液面在上升过程中波动加剧,导致气团形态不规则。当

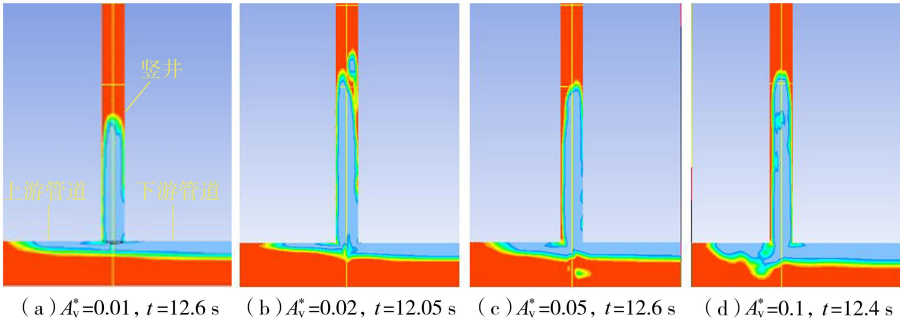


图 5 $D_r/D=0.5$ 时气团进入竖井的形态

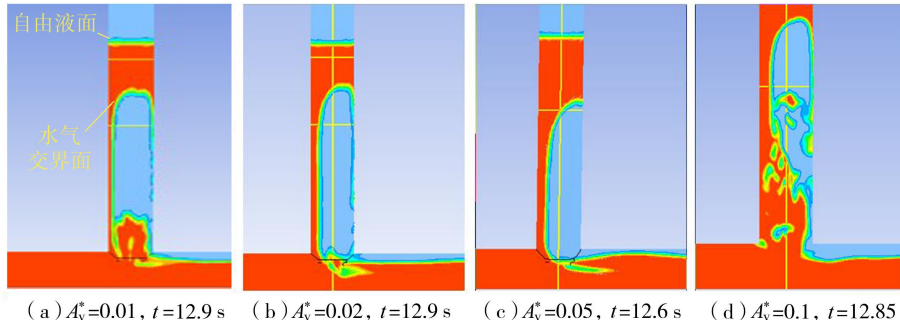


图 6 $D_r/D=1.0$ 时气团进入竖井的形态

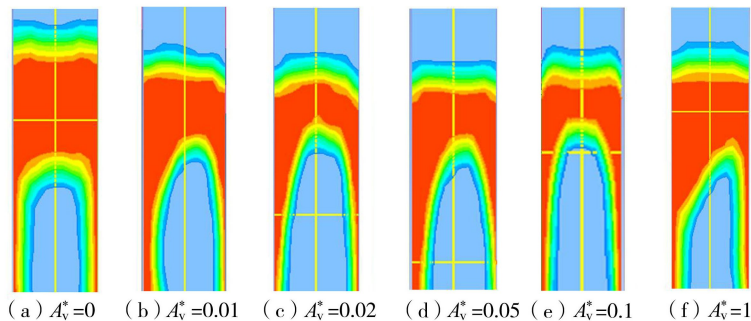


图7 $H_0 = 0.7 \text{ m}$ 时气团即将突破自由液面时的形态

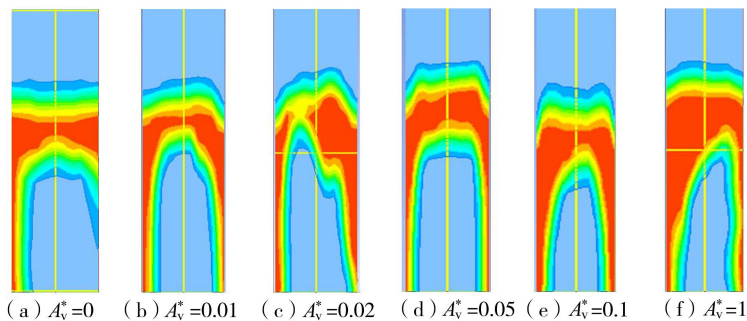


图8 $H_0 = 0.8 \text{ m}$ 时气团即将突破自由液面时的形态

$A_v^* = 0.05, 0.1$ 时,自由液面上方初始气体的增压减弱,气团头部重新趋于对称。当 $A_v^* = 1$ 时,由于通气不受限制,气团进入竖井后上升速度较快,气团头部呈现出偏向下流侧的不对称尖锐状。随着外部水头的增加,井喷高度显著增大。对比图7和图8可见,随着 H_0 增大,竖井内液面波动更为剧烈,同时气团头部形态的不规则性也更为明显。

2.3 竖井中自由液面及水气交界面位移特性

以水平管道底部所在的平面为参照基准平面(基准高度0),定义 H_{fs} 为任意时刻竖井内自由液面高度, H_{int} 为任意时刻竖井内气团头部水气交界面高度, v_{fs} 为竖井内自由液面速度, v_{int} 为气团头部水气交界面速度, H_{net} 为气团头部净位移(即气团释放过程中其上方水柱减小的长度), H_{net} 可表示为:

$$H_{net} = H_{fs,0} - (H_{fs} - H_{int}) \quad (1)$$

式中: $H_{fs,0}$ 为气团刚进入竖井时自由液面的高度。

图9给出了 $H_0 = 0.8 \text{ m}$ 、 $D_r/D = 0.5$ 、 $L_3 = 1.8 \text{ m}$ 、 $A_v^* = 0, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 1$ 工况下气团释放过程中竖井内 H_{fs} 、 H_{int} 及 H_{net} 随时间 t 的变化曲线(将气团刚进入竖井的时刻定义为 $t=0$)。当 $A_v^* = 0$ (顶部密封)时,竖井内自由液面高度几乎无变化,如图9(a)所示,表明气团上升与边壁液膜下降维持水量平衡。随着水气交界面上升,气团头部净位移增大,直至水气交界面突破自由液面完成气团释放,此过程中 H_{int} 与 H_{net} 随时间近似匀速上升。随着 A_v^* 增加,气团释放时 H_{fs} 和 H_{int} 总体呈升高趋势,气团释放位置更接近竖井顶部井盖,井喷的发生概率和

喷射高度显著增大。当 $A_v^* = 0.02, 0.05, 0.1, 1$ 时,气团释放对应的 H_{int} 分别为 $1.64, 1.72, 1.60, 1.85 \text{ m}$,上述工况均出现井喷现象。当竖井顶部通气时, H_{fs} 与 H_{int} 均加速上升,且 H_{int} 的上升速度更快,导致净位移 H_{net} 持续增加,且不同 A_v^* 下 H_{net} 的最大值均稳定在 0.6 m 附近。

图10给出了 $D_r/D = 0.5$ 时 $H_{net,max}/H_{fs,0}$ 与 A_v^* 的关系,其中 $H_{net,max}$ 为气团释放后水气交界面净位移最大值。 $H_{net,max}/H_{fs,0}$ 用于表征气团释放后上方水柱相对初始水柱的缩短程度,其值越大,气团释放后上方水柱的相对缩短程度越大,剩余水柱高度越小。对于不发生气团驱动井喷的工况(如 $A_v^* = 0$), $H_{net,max}/H_{fs,0}$ 均为1。随着 A_v^* 、 H_0 和 L_3 的增大, $H_{net,max}/H_{fs,0}$ 总体呈下降趋势,表明气团驱动井喷越容易发生。

2.4 自由液面与水气交界面运动速度

图11为 $H_0 = 0.8 \text{ m}$ 、 $D_r/D = 0.5$ 、 $L_3 = 1.8 \text{ m}$ 、 $A_v^* = 0, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 1$ 工况下竖井内自由液面运动速度 v_{fs} 、水气交界面运动速度 v_{int} 随时间 t 的变化过程。由图11可见,气团释放过程中 v_{fs} 整体小于 v_{int} 。当 $A_v^* = 0$ 时,自由液面几乎不运动,即 $v_{fs} \approx 0$, v_{int} 在 $0.2 \sim 0.5 \text{ m/s}$ 范围内波动,直至气团释放。当 $A_v^* > 0$ 时, v_{fs} 和 v_{int} 随时间推移逐渐增大。随着 A_v^* 增大, v_{fs} 和 v_{int} 逐渐增大,且随时间增大趋势更明显,增长速度加快,在水气交界面行至竖井顶部临近气体释放时刻, v_{int} 出现突增。随着 A_v^* 增大,竖井顶部受限通气条件逐渐缓解,井盖下方的气垫作用

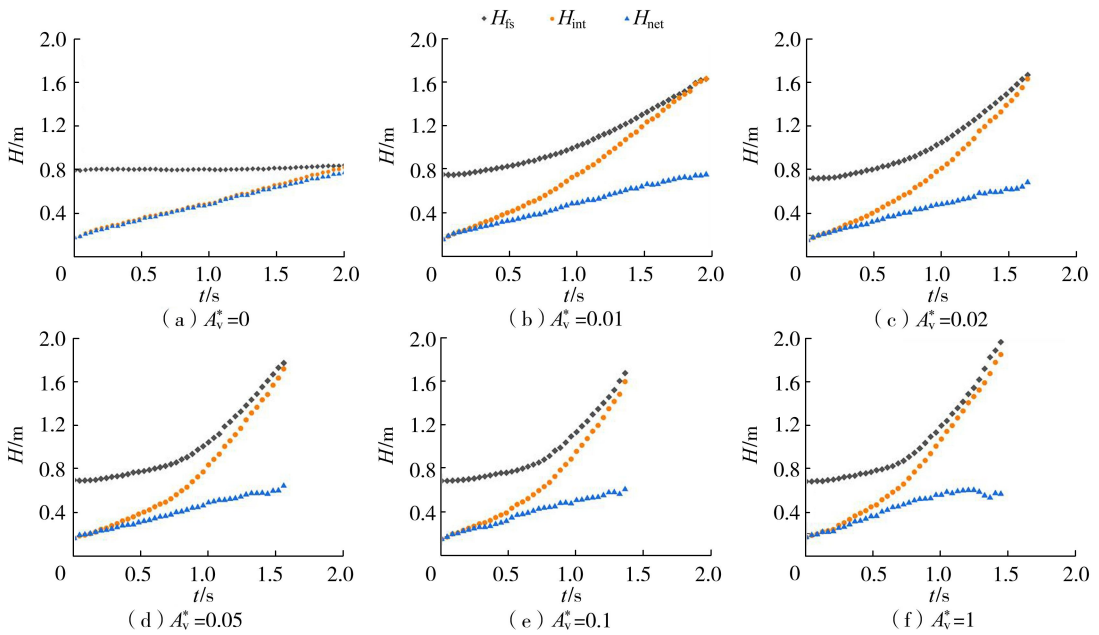


图9 气团释放过程中竖井 H_{fs} 、 H_{int} 、 H_{net} 的变化

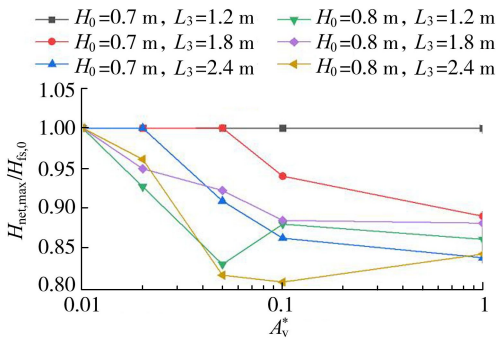


图10 气团上方水柱相对减少值与通气率的关系

减弱,气垫对水柱和气团的向下压力随之减小,导致竖井内水柱和气团所受的向上合力增大,产生的加速度也随之增加,因此 v_{fs} 和 v_{int} 呈更陡峭的上升趋势。

对气团头部水气交界面的最大运动速度 $v_{int,max}$ 进行无量纲化处理,定义 $v_{int,max}^* = v_{int,max} / \sqrt{gD_r}$ 。图12给出了不同试验工况下 $v_{int,max}^*$ 随 A_v^* 的变化规

律。随着 A_v^* 增大, $v_{int,max}^*$ 整体呈上升趋势。当 $0 \leq A_v^* < 0.02$ 、 $0.02 \leq A_v^* < 0.1$ 、 $0.1 \leq A_v^* \leq 1$ 时, $v_{int,max}^*$ 分布范围分别为 $0.5 \sim 2.0$ 、 $1.5 \sim 3.0$ 、 $2.0 \sim 3.5$ 。当 $L_3 = 1.2, 1.8$ m 时,在同一 A_v^* 条件下, $H_0 = 0.8$ m 工况的 $v_{int,max}^*$ 普遍大于 $H_0 = 0.7$ m 工况。当 L_3 增大至 2.4 m 时, $v_{int,max}^*$ 随 H_0 和 A_v^* 的变化表现出不同的趋势:当 $0 \leq A_v^* < 0.02$ 时, $H_0 = 0.8$ m 工况的 $v_{int,max}^*$ 大于 $H_0 = 0.7$ m 工况;而在 $0.05 \leq A_v^* < 0.1$ 时, $H_0 = 0.8$ m 工况的 $v_{int,max}^*$ 小于 $H_0 = 0.7$ m 工况。

2.5 讨论

当 $D_r/D = 1.0$ 时,所有工况均未发生井喷;当 $D_r/D = 0.5$ 时,随着 A_v^* 的增大,根据本文所设置的离散通气率工况,其对井喷的影响可划分为3个区间:

a. 当 $0 \leq A_v^* < 0.02$ 时,气垫作用占据主导地位。气团释放过程中竖井内自由液面高度 H_{fs} 及水

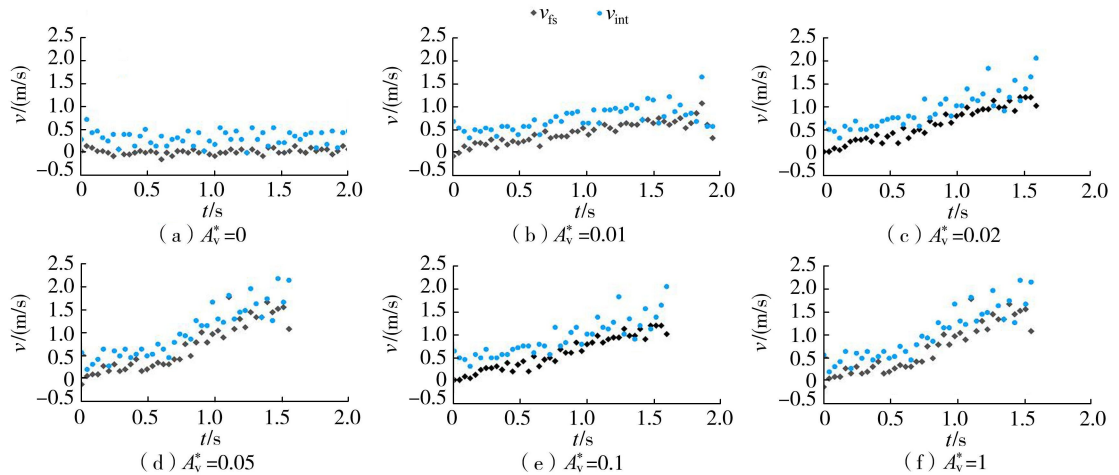


图11 气团释放过程中竖井自由液面及水气交界面的速度变化

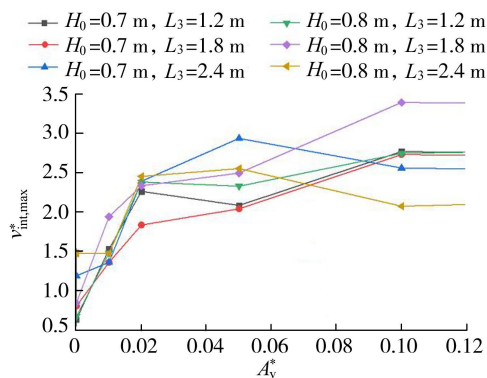


图 12 水气交界面速度最大值与通气率的关系 ($D_i/D=0.5$)

气交界面高度 H_{int} 均维持较低水平,气团头部突破点距井盖的距离超过 $2.67D_r$ 。此区间内所有工况下气团上方水柱相对减少值 $H_{net,max}/H_{fs,0}$ 均为 1,水柱在竖井内发生破碎,无水流喷出。受竖井上部气垫抑制,气团释放后形成的水气混合物无法有效排出,因此压差驱动井喷亦不发生。

b. 当 $0.02 \leq A_v^* < 0.1$ 时,随着 A_v^* 的增大,气垫作用减弱,井盖下方气压降低,气团及液面的运动加速度增大,气团突破高度也相应上升。此区间内是否发生气团驱动井喷与外部水头及初始气团尺寸具有显著相关性。由于气垫阻滞作用仍然存在,压差驱动井喷仍较难发生。

c. 当 $0.1 \leq A_v^* \leq 1$ 时,随着 A_v^* 进一步增大,气垫的影响显著减弱甚至消失。当自由液面升至竖井顶部附近且未被水气界面突破时,井盖孔有水柱射出,形成气团驱动井喷;气团释放后,当气团初始尺寸足够大时,系统增压会驱动白色水气混合物喷出竖井,形成压差驱动井喷。

3 结 论

a. 管径比越小、通气率越大、外部水头越高、初始气团体积越大,井喷现象越易发生,且喷射高度与喷水量显著增大。其中,通气率提高不仅会增强井喷强度,还会降低井喷所需的外部水头与初始气团体积。气团驱动井喷多发生于外部水头较高或初始气团体积较大的工况,在低通气率条件下不会发生;压差驱动井喷仅出现在通气率较大且初始气团体积较大的工况。

b. 当管径比为 0.5 时,竖井内气团易呈对称形态,并侵入上游管道;当管径比为 1.0 时,竖井内气团呈不对称分布,主要滞留于下游管道。通气率变化会显著改变自由液面波动及气团头部形态,进而改变气团释放位置与高度。

c. 随着通气率增大,气团释放时自由液面和水气交界面的高度大幅提高,且自由液面运动速度和

水气交界面运动速度显著增大。气团释放时竖井中液面的位置越接近竖井顶部井盖,水流从井盖中喷出产生井喷的概率越高,井喷高度越大。

参考文献:

- [1] Zhang Shuangqing, Liu Jiachun, Huang Biao, et al. Numerical study of geyser events in rainstorm systems at different scales [J]. Water Science and Engineering, 2023, 16(4): 381-389.
- [2] 周领,刘静,黄坤,等.输水管线启动填充过程含滞留气团瞬变流数值模拟[J].水利水电科技进展,2021,41(5): 1-7. (Zhou Ling, Liu Jing, Huang Kun, et al. Numerical simulation of transient flow with entrapped air pockets during pipeline filling water initiation process[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(5): 1-7. (in Chinese))
- [3] 罗爽,陈奇,刘霞,等.基于 TFM 模型的滞留气团数值模拟方法及 PIV 试验研究[J].排灌机械工程学报,2023, 41(1): 50-55. (Luo Shuang, Chen Qi, Liu Xia, et al. Numerical simulation investigation of entrapped air pocket based on TFM model and PIV test research[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41(1): 50-55. (in Chinese))
- [4] Lewis J W. A physical investigation of air/water interactions leading to geyser events in rapid filling pipelines[D]. Ann Arbor: University of Michigan, 2011.
- [5] 张双庆,刘甲春.竖井及跌水池体形参数对井喷的影响[J].水利水电科技进展,2022,42(6): 98-104. (Zhang Shuangqing, Liu Jiachun. Influence of shaft and chamber shape parameters on storm geysers [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(6): 98-104. (in Chinese))
- [6] 蒯重列,王晓升,孙振海,等.竖井形式对调蓄隧道系统井喷的抑制效果分析[J].水利水电科技进展,2023,43(3): 77-82. (Kuai Zhonglie, Wang Xiaosheng, Sun Zhenhai, et al. Suppression effect on the geyser in storage tunnel system with different shaft forms[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(3): 77-82. (in Chinese))
- [7] Pozos-Estrada O. Influence of entrapped air on hydraulic transients during rapid closure of a valve located upstream and downstream of an air pocket in pressurised pipes[J]. Water, 2025, 17(7): 927.
- [8] Muller K Z, Wang Jue, Vasconcelos J G. Water displacement in shafts and geysering created by uncontrolled air pocket releases[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 143(10): 04017043.
- [9] Monni G, Salve M D, Panella B. Horizontal two-phase flow pattern recognition[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, 59: 213-221.

- [10] Hamam M A, Mccorquodale J A. Transient conditions in the transition from gravity to surcharged sewer flow[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1982, 9(2): 189-196.
- [11] Chanson H. Experimental investigation of dropshaft hydraulics; two-phase flow and acoustics [C]//Proceedings of the 30th IAHR World Congress. Thessaloniki: IAHR, 2003; 353-360.
- [12] Vasconcelos J G, Wright S J. Mechanisms for air pocket entrapment in stormwater storage tunnels [C]//World Environmental and Water Resource Congress 2006: Examining the Confluence of Environmental and Water Concerns. Omaha: American Society of Civil Engineers, 2006; 1-10.
- [13] Malekpour A, Papa F, Radulj D, et al. Understanding hydraulic transients in sewer systems [C]//WEAO 2015 Technical Conference. Toronto: WEAO, 2015; 1-15.
- [14] Chosie C D, Hatcher T M, Vasconcelos J G. Experimental and numerical investigation on the motion of discrete air pockets in pressurized water flows [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 140(8): 04014038.
- [15] 刘德有, 周领, 索丽生, 等. 水流冲击管道内滞留气团现象的VOF模型仿真分析[J]. 计算力学学报, 2009, 26(3): 390-394. (Liu Deyou, Zhou Ling, Suo Lisheng, et al. Simulation and analysis of the rapid filling in pipeline containing trapped air mass with VOF models[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2009, 26(3): 390-394. (in Chinese))
- [16] 喻宇. 有压管道水流冲击气团的局部三维流场数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [17] Li Lin, Zhu D Z, Huang Biao. Analysis of pressure transient following rapid filling of a vented horizontal pipe [J]. Water, 2018, 10(11): 1698.
- [18] Wright S J, Vasconcelos J G, Creech C T, et al. Flow regime transition mechanisms in rapidly filling stormwater storage tunnels [J]. Environmental Fluid Mechanics, 2008, 8(5/6): 605-616.
- [19] Cong Jing. Experimental modeling of air-water interaction in horizontal pipe with vertical riser [D]. Hong Kong: Hong Kong University of Science and Technology, 2016.
- [20] Wang Xiaosheng, Qian Shangtuo, Chen Hongxun. Experimental study on geysers induced by the release of trapped air in storage tunnel systems [J]. Applied Sciences, 2019, 9(24): 5326.
- [21] Chan S N, Cong J, Lee J H W. 3D numerical modeling of geyser formation by release of entrapped air from horizontal pipe into vertical shaft [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 144(3): 04017071.
- [22] Shao Z S. Two-dimensional hydrodynamic modeling of two-phase flow for understanding geyser phenomena in urban stormwater system [D]. Lexington: University of Kentucky, 2013.
- [23] 王晓升, 张健, 钱尚拓, 等. 地下调蓄隧道系统气团释放诱发的井喷特性研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2022, 37(3): 432-439. (Wang Xiaosheng, Zhang Jian, Qian Shangtuo, et al. Characteristics of geysers induced by release of air pocket in storage tunnel system [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2022, 37(3): 432-439. (in Chinese))
- [24] 钱尚拓, 张晗, 陈曜辉, 等. 排水管道井喷过程气团演变特性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(6): 90-100. (Qian Shangtuo, Zhang Han, Chen Yaohui, et al. Evolution characteristics of air pocket during geyser in drainage pipes [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(6): 90-100. (in Chinese))
- [25] Zhou Ling, Liu Deyou, Ou Chuanqi. Simulation of flow transients in a water filling pipe containing entrapped air pocket with VOF model [J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2011, 5(1): 127-140.
- [26] Wang Jue, Vasconcelos J G. Investigation of manhole cover displacement during rapid filling of stormwater systems [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 146(4): 04020022.
- [27] 陈奇, 刘霞, 常正柏, 等. 压力管道局部高点滞留气团排气过程的CFD计算及PIV试验[J]. 武汉大学学报(工学版), 2024, 57(8): 1140-1149. (Chen Qi, Liu Xia, Chang Zhengbai, et al. CFD calculation and PIV test of exhaust process of trapped air mass at local high point of pressure pipeline [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2024, 57(8): 1140-1149. (in Chinese))
- [28] 王晓升. 地下调蓄隧道系统滞留气团释放过程的井喷特性研究[D]. 上海: 上海大学, 2020.
- [29] Vasconcelos J G, Leite G M. Pressure surges following sudden air pocket entrapment in stormwater tunnels [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 138(12): 1081-1089.
- [30] Tijsseling A S, Vasconcelos J G, Hou Qingzhi, et al. Dancing manhole cover: a nonlinear spring-mass system [C]//ASME 2019 Pressure Vessels and Piping Conference. San Antonio: ASME, 2019; V004T04A032.
- [31] Eldayih Y, Cetin M, Vasconcelos J G. Air-pocket entrapment caused by shear flow instabilities in rapid-filling pipes [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 146(4): 04020016.
- [32] Schulz H E, Vasconcelos J G, Patrick A C. Air entrainment in pipe-filling bores and pressurization interfaces [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 146(2): 04019053.

(收稿日期: 2025-12-17 编辑: 雷燕)

考虑基础流量的输水系统间歇泉现象实验研究

李小亮¹,何鑫¹,陈千寻²,周领²

(1. 三峡金沙江云川水电开发有限公司宁南白鹤滩电厂; 2. 河海大学水利水电学院)

摘要:针对输水系统在充水等过程中出现的水气突然喷发、局部压力骤变的间歇泉现象,设计并搭建了间歇泉水气两相瞬变流实验系统,通过上下游水箱的水位差间接控制基础流量,研究了含通气竖井的输水系统在充水过程中的水气两相瞬变过程,探究了间歇泉现象的发生机理与动态特征。实验结果表明:考虑基础流量的间歇泉瞬变过程可分为冲击气团阶段和喷发阶段,在冲击气团阶段,气团反复压缩膨胀,系统压力周期性波动,在喷发阶段,水气运动剧烈,基础流量越大,汇入竖管的气体越少,且如果该部分气体晚于自由液面抵达竖管顶部孔口,则易发生间歇泉现象;间歇泉现象可分为多次喷射型、无喷射型、单次喷射型与缓冲喷射型 4 种类型;间歇泉现象发生时气团破裂与聚合时引发的压力波的传播和叠加是造成不稳定压力波动的重要原因。

关键词:输水系统;间歇泉;基础流量;水气两相流;实验研究

Experimental study on geyser phenomena in water conveyance systems considering base flow//Li Xiaoliang¹, He Xin¹, Chen Qianxun², Zhou Ling² (1. Ningnan Baihetan Power Plant, Three Gorges Jinshajiang Yunchuan Hydropower Development Co., Ltd.; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University)

Abstract: To investigate the geyser phenomenon characterized by sudden water-air eruptions and localized pressure surges during the filling process of water conveyance systems, an experimental system for transient water-air two-phase flow was designed and constructed. By utilizing the water level difference between upstream and downstream water tanks to indirectly control the base flow, the water-air two-phase transient process during the filling of a water conveyance system equipped with a ventilation shaft was investigated, aiming to explore the triggering mechanisms and dynamic characteristics of geyser phenomena. The experimental results indicate that the geyser transient process considering base flow can be divided into the air pocket impact stage and the eruption stage. During the air pocket impact stage, the air pocket undergoes repeated compression and expansion, accompanied by periodic pressure fluctuations. During the eruption stage, violent water-air interactions occur, a higher base flow rate results in less gas entrainment into the riser, and geyser phenomena are more likely to occur if the entrained gas arrives at the top orifice of the riser later than the free water surface. The geyser phenomena can be classified into four types: multiple-eruption type, no-eruption type, single-eruption type, and damped-eruption type. Additionally, the propagation and superposition of pressure waves induced by air pocket rupture and coalescence during geyser events are identified as significant contributing factors to the unstable pressure fluctuations.

Key words: water conveyance system; geyser; base flow; water-air two-phase flow; experimental study

水电站尾水系统^[1]、长距离输水工程^[2]、排水管网泵群^[3-5]等输水系统在充水、停机与工况转换过程中,可能发生流态转换,进而导致明满流、明满含气流、水气两相流等复杂流态的出现。此时,竖井、闸门井与通气孔等水力元件的设置,为复杂水力现象提供了客观条件^[6-8],其与大气连通的出口处可能出现水气喷发并伴有压力骤变的间歇泉现象,导致系统运行失常,甚至损毁设施结构^[9]。另外,实际工程中设置的安全装置(空气阀、井盖等)可能引发孔口效应与气垫效应,对水气运动产生不确定的影响,进一步增加了间歇泉现象发生的可能性^[10-12]。目前,间歇泉现象已成为输水系统水气两相流研究领域的前沿课题,学界对其给予了高度关注,但其发生机理与动态特性尚不明确。

针对水力系统中的间歇泉现象,国内外学者已开展了大量实验与数值模拟研究。在实验研究方面,Guo 等^[13]通过初步研究,认为系统内部的压力振荡是间歇泉发生的主要原因;考虑间歇泉现象发

基金项目:三峡金沙江云川水电开发有限公司宁南白鹤滩电厂科研项目(Z532302021)

作者简介:李小亮(1984—),男,高级工程师,硕士,主要从事电站水工建筑物管理和项目管理工作。E-mail:li_xiaoliang@cypc.com.cn

通信作者:周领(1985—),男,教授,博士,主要从事水利水电工程和水气瞬变流研究。E-mail:zlhhu@163.com

生时输水系统往往处于运行状态,即主管道内通常存在一定的基础流量,Muller^[14]开展了考虑基础流量的间歇泉实验,结果表明竖管中自由液面位移距离减少了约15%。在数值模拟方面,由于简化的一维模型易忽略竖井中水气混掺规律,间歇泉现象的模拟往往需要考虑三维模型^[15]。例如:Chan等^[16]通过计算流体力学(CFD)技术对间歇泉的形成过程开展了数值模拟,预测了压力变化和水气交界面的发展过程,发现垂直管道中液柱的瞬间加速是间歇泉的重要特征;Zhang等^[17]将间歇泉的喷射过程划分为快速充水与空气释放两个阶段,指出减小流出面积并增加出口压力会导致间歇泉更剧烈,并说明了CFD在精确计算水气混合物密度方面存在的困难。在此基础上,刘伟等^[18]总结了气液相互作用的特征,特别指出了物理模型实验在间歇泉研究中的主导作用。

综上所述,输水系统流态转换过程中间歇泉的瞬态特性极其复杂,其机理特性目前尚不明确,在工程设计方面暂无相应的规范和标准,且现有的间歇泉研究通常不考虑管道内的基础流量,忽视了实际工程中可能存在的瞬态变化。为此,本文设计并搭建了考虑基础流量的间歇泉实验系统,通过上下游水箱的水位差间接控制基础流量,详细研究了输水系统启动过程中间歇泉现象的瞬态特性,探究其流态转变、动态特征与形成机理,以期为输水系统的设计及安全运行提供科学依据。

1 实验装置和工况设置

1.1 实验装置

本文研究设计并搭建了一套考虑基础流量的间歇泉实验系统。该系统主要由上下游水箱、电磁流量计、管道、三通管道、气动四分之一球阀和带孔口的法兰盘组成,对应的实验装置如图 1 所示。实验以左侧水箱的水位作为初始水位 H_d (下游水位), 调节右侧水箱水位 H_r (上游水位) 控制管道系统的水位差 ΔH 。从上游水箱出水口至下游水箱进水口的

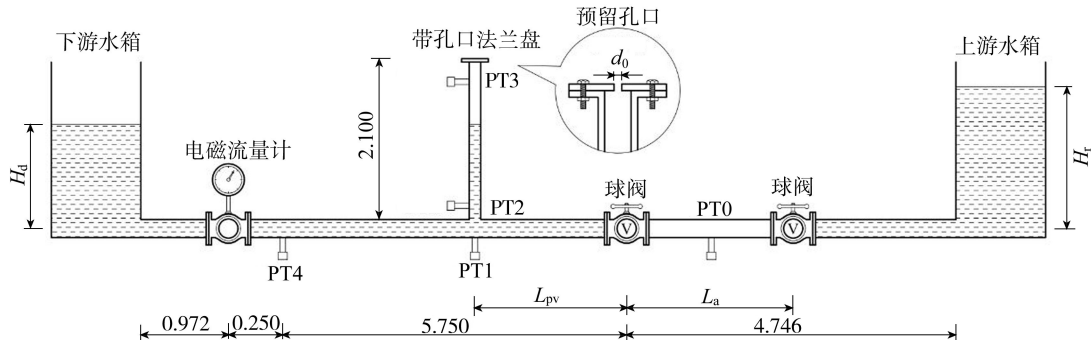


图 1 考虑基础流量的间歇泉实验装置示意图(单位:m)

实验管道总长度 L 为 11.718 m, 内径 d 为 40 mm, 竖直管道长度 L_v 为 2.1 m, 内径 d_v 为 20 mm, 有机玻璃管管壁厚度 e 为 5 mm。竖管顶部安装带孔口的法兰盘, 孔口直径记为 d_0 。气动球阀安装位置为水平段初始储气管道两端, 通过高速摄像机录像与实测数据反推可得其开阀时间为 0.08 s, 关阀时间为 0.05 s。初始储气管道用于提供实验所需的定量体积的无压空气, 其中初始气团的长度记为 L_a 。实验开始时, 同时打开两个球阀以实现水气瞬变, 随后上下游水位差 ΔH 带动水平管道水体裹挟气体向下游侧运动, 进而控制基础流量大小。实验系统共安装 5 个压力传感器 (PT0~PT4), 具体安装位置见图 1。

1.2 实验工况设置

为研究瞬变过程中水气两相流的动态特征以及不同因素的影响,设置考虑基础流量的间歇泉实验方案,包括:6种初始水位($H_d = 0.8, 0.9, 1.0, 1.2, 1.5, 1.8 \text{ m}$)、10种水位差($\Delta H = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.90, 1.20 \text{ m}$)、3种初始气团长度($L_a = 0.50, 1.00, 1.50 \text{ m}$)、8种孔口直径($d_0 = 1, 2, 3, 5, 7, 10, 14, 20 \text{ mm}$)、3种竖管位置(竖管至初始气团下游侧球阀的距离 $L_{pv} = 2.00, 3.00, 4.00 \text{ m}$),共计 692 种工况(工况设置不采用枚举法)。

2 实验结果与分析

2.1 实验参数敏感性分析

2.1.1 初始气团位置最大压力

综合各个压力传感器的实测数据来看,系统内最大压力通常出现在初始气团所在管道的中段位置PT0。图2与图3为 $L_a = 0.50\text{ m}$ 、 $d_0 = 20\text{ mm}$ 、 $L_{pv} = 2.00\text{ m}$ 时不同初始水位 H_d 和水位差 ΔH 情况下初始气团位置最大压力 $P_{0\max}$ 的实验结果。不难发现,初始气团位置最大压力与初始水位基本呈正比关系,与水位差基本呈正比关系,但在低水位差情况下略有偏差,这可能是由于水气运动的不确定性与小尺度实验的局限性(张力等因素)所导致的。

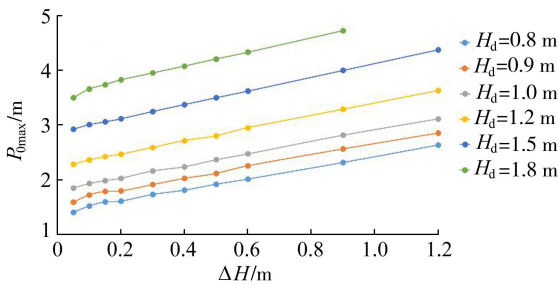


图2 间歇泉初始水位对 P_{0max} 的影响

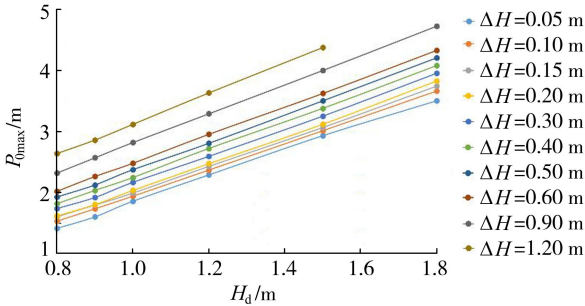


图3 间歇泉水位差对 P_{0max} 的影响

为反映多组数据分布的特征,绘制初始水位和 水位差对初始气团位置最大压力的影响箱线图,如 图 4 所示。图中 19 组数据箱线图所对应的箱体与 箱线较短,即数据集中趋势显著、离群值较少,验证 了实验的准确性,同时也表明其余参数影响较小。 初始气团位置压力最大值随着初始水位和水位差的 增大而增大,均基本呈正比关系。需要注意的是: $H_d=1.2\text{ m}$ 时,数据中存在 7 个异常点,随机性较强, 水气运动较为紊乱; $\Delta H=1.2\text{ m}$ 时,低水位工况下箱 体与箱线较短,表明其数据集中趋势显著,但该组别 中出现的若干离群值降低了结论的普适性,与之相 对的,高水位差工况下数据稍显分散,但未出现离 群值。

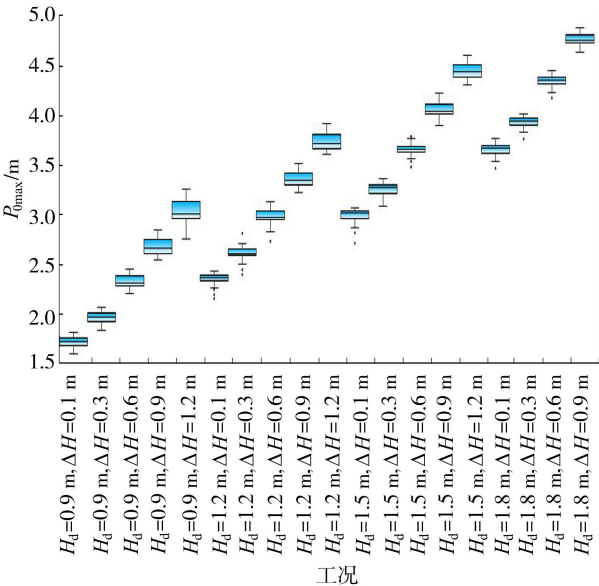


图4 间歇泉初始水位和水位差对 P_{0max} 影响的箱线图

2.1.2 排气孔处最大压力

考虑间歇泉现象发生时往往伴随竖管处的剧烈 压力波动,且排气孔水气喷射时可能出现异常高压, 故取 PT3(排气孔下侧 10 cm 处)的实验数据进行敏 感性分析。图 5 为初始气团长度和排气孔口直径对 该位置的孔口压力最大值 P_{3max} 的影响箱线图。总 体而言,最大压力随着初始气团长度的增大而增大, 随着孔口直径的增大而先增后减,在 $d_0=5\text{ mm}$ 左右 时达到峰值。小孔口工况下,数据分布较为分散,表 明其他参数对孔口压力最大值的影响权重较大;全 开孔口工况下,箱体与箱线均较短,表明数据集中; 小气团工况下,上箱线较长,中位线偏下方,异常点 都在箱体上方,表明存在若干压力异常偏高的离群 值;大气团工况下,箱线分布合理,基本无异常点,表 明样本数据集质量较高且分布集中。

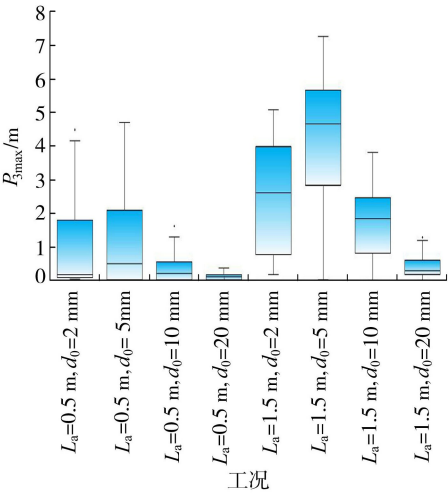


图5 间歇泉初始气团长度和排气孔口直径对 P_{3max} 影响的箱线图

进一步的,图 6 给出了 $d_0>10\text{ mm}$ 时考虑基础流 量的间歇泉初始水位和水位差对孔口压力最大值 P_{3max} 的影响。对比分析表明,孔口压力最大值随着 初始水位的增大而增大,随着水位差的增大而减小, 但当水位差增大到一定程度后($\Delta H>0.9\text{ m}$),间 歇泉现象所导致的剧烈水气喷发会引起孔口处的压 力峰值升高。孔口压力最大值与水位差的反常关系 可能与基础流量相关:当 $\Delta H<0.9\text{ m}$ 时,较大的水 位差赋予了水平管道内较大的基础流量,水流以更 快的速度裹挟气团向下游流动,降低了分流至竖管 的水气混合物比重,减弱了竖管段水气运动的剧烈 程度,最终导致孔口压力最大值随着水位差的增大 而减小;而当 $\Delta H>0.9\text{ m}$ 时,充足的水位差势能 起到了主要推动作用,水位差越大,水气运动越剧 烈,并在竖管孔口处以高速水气混合物的形式释 放,导致高水位差情况下孔口压力最大值增大。

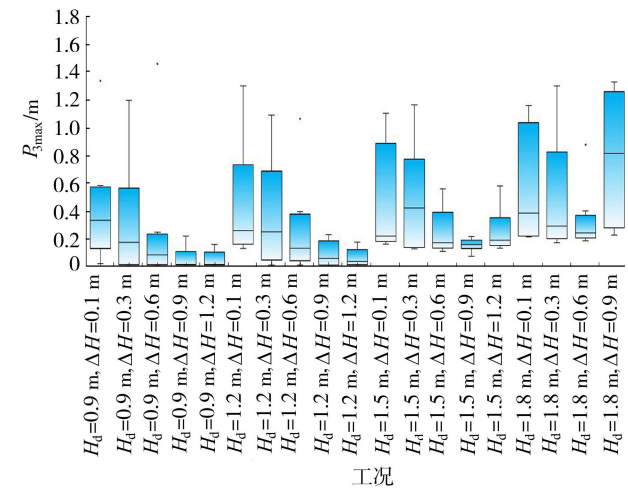


图6 $d_0>10\text{ mm}$ 时间歇泉初始水位和水位差对 $P_{3\max}$ 影响的箱线图

2.2 实验现象描述

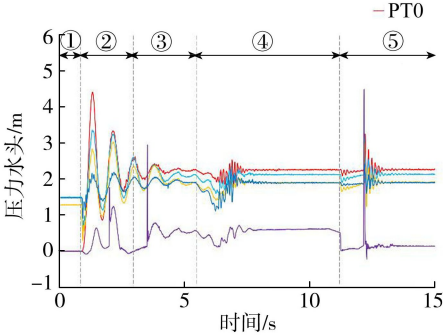
根据实验现象和数据结果选取4个代表性工况,用于实验描述并进行现象分类,如表1所示。图7给出了不同工况下竖管内和水平管道初始气团位置处的压力变化,图8给出了高速摄影机记录的不同时刻水流和气团相互作用的结果。

表1 考虑基础流量的间歇泉实验工况参数

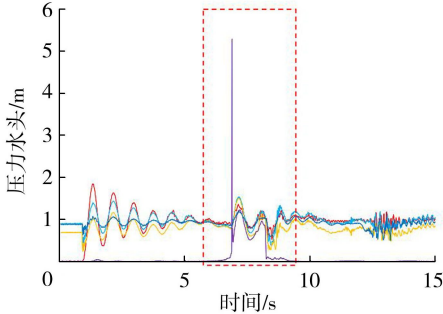
工况	L_{pv}/m	d_0/mm	L_a/m	H_d/m	$\Delta H/\text{m}$
工况1	2	3	1.5	1.5	1.2
工况2	2	10	0.5	0.9	0.1
工况3	2	2	1.5	0.9	0.2
工况4	2	20	1.5	1.5	0.3

2.2.1 工况1水气动态特性

基于实验现象与数据采集结果,工况1可划分



(a) 工况1

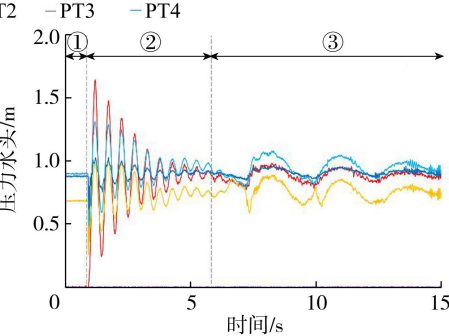


(c) 工况3

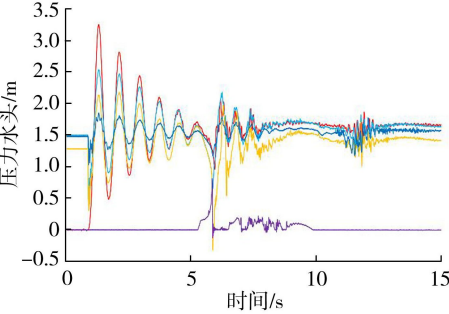
为5个阶段:①初始阶段($t=0\sim0.90\text{ s}$)为静止阶段。②开阀阶段($t=0.90\sim2.84\text{ s}$),阀门瞬间开启,气团首次受压,其压力达到峰值后开始膨胀,经历数次缩胀循环后,压力与体积趋于稳定,直至 $t=1.99\text{ s}$ 时,液面撞击孔口,发生间歇泉现象。③分流阶段($t=2.84\sim5.41\text{ s}$),气团前端抵达三通管道分岔节点,水气混合物中的一部分继续沿水平管道运动,另一部分沿竖管上升。④上升阶段($t=5.41\sim11.19\text{ s}$),气团以气泡流形式沿竖管上升,推动水体向上运动。如图8(a)所示,辅助线*i*、*ii*分别表示首个进入竖管气团的上侧界面与下侧界面,两者均近似呈直线,表明气团匀速上升,且因压力降低而轻微膨胀。 $t=6.00\text{ s}$ 时,水平管中气团到达下游水箱,气体自由上升引起压力振荡。该振荡对大气团形态的影响较小,但促使尾部小气泡聚并;同时,大气团对压力波具有滤波作用,可衰减高频振荡、降低波动频率。⑤二次喷射阶段($t>11.19\text{ s}$),气团继续沿竖管向上运动,气团上侧界面抵达顶部排气孔口,有压气体顺利排出,引起轻微压降与小幅波动,随后气团下侧界面(液面)快速撞击排气孔口,造成二次喷射并伴随剧烈的压力波动。

2.2.2 工况2水气动态特性

工况2全程未发生剧烈喷发,可划分为以下3个阶段:①初始阶段($0\sim0.90\text{ s}$)为静止阶段。②开阀阶段($0.90\sim5.79\text{ s}$),阀门瞬间开启,水平管末端水体冲击气团,管道系统整体压力呈现稳定的周期性变化,且逐渐衰减。③上升阶段($t>5.79\text{ s}$),



(b) 工况2



(d) 工况4

图7 压力水头波动曲线

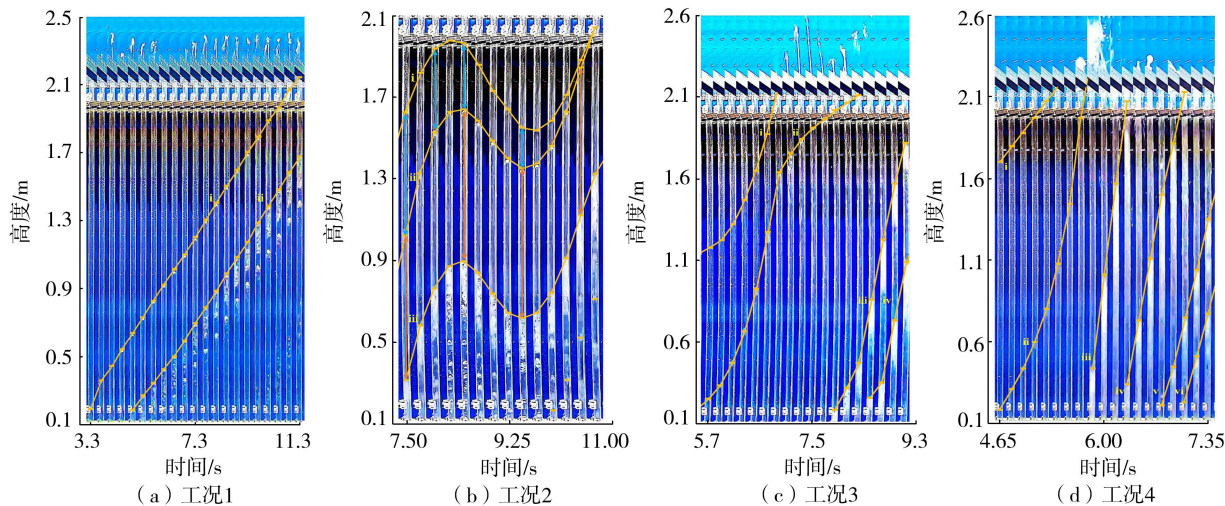


图8 竖管部分摄影图像

气团以气泡流形式沿竖管上升,推动水体向上运动。如图8(b)所示,辅助线 i、ii 分别表示最上端水柱的上侧界面与下侧界面,显示了气团上升时该水柱逐渐缩短直至消失的过程,气团在接触自由液面后破裂;辅助线 iii 表示首个进入竖管气团的下侧界面,在最上端水柱消失后,下方水气混合物仍有上升趋势,但未出现喷射现象。与工况 1 相比,工况 2 开阀后实验系统管道压力的波动周期较短,且处于上升阶段时,气团尾部的絮状水气混合物对管道压力具有显著影响,压力变化曲线接近正弦波形,总体上避免了瞬态高压。

2.2.3 工况 3 水气动态特性

与前两个工况一致,工况 3 管道系统整体压力呈现稳定的周期性变化,液面波动幅度逐渐衰减,仅在喷射阶段液面撞击孔口时产生瞬时高压。在重复实验中观测到单次喷射现象(图 8(c)),对应图 7(c)中红色虚线矩形框选的喷射阶段。如图 8(c)所示,辅助线 i、ii 分别表示最上端水柱的上侧界面与下侧界面,水柱撞击竖管顶部排气孔口后发生喷射;辅助线 iii、iv 表示下方水气混合物的上侧界面,后续未出现喷射现象。作为压力边界的水箱与竖管形成了 U 形管连通器,水气相互作用的压力波动会对水箱压力产生影响,从而影响系统内滞留气团的气压,在喷发阶段易诱发周期性波动。

2.2.4 工况 4 水气动态特性

如图 8(d)所示,辅助线 i 表示最上端水柱的上侧界面,当 $t=5.38\text{ s}$ 时,液面抵达孔口首次喷射;辅助线 ii 表示首个进入竖管气团的上侧界面运动过程,随着气团体积膨胀呈加速上升趋势,此时管道系统压力下降,大体积气团同时分布于竖管与水平管中;辅助线 iii 记录了第一气团尾部的运动状态,气团排空后水体迅速填充竖管,管道压力急剧上升,诱发

间歇泉现象;辅助线 iv、v、vi 分别对应后续气团尾部的运动轨迹,均未发生喷射。几次水气运动过程中的气团上升速度逐次递减,对应系统的能量耗散。值得注意的是,各个气团在竖管中快速上升时,尾部易形成雾状水气混合物,易与后续小体积气团混合,导致气团提前破裂,减少了喷发次数。

2.3 实验结论

2.3.1 规律总结

结合拍摄的照片及同步记录的压力波动曲线,有基础流量情况下的间歇泉过程中气团和压力的动态变化具有以下特点:①考虑基础流量的间歇泉瞬变流过程整体分为两个阶段,即以阀门开启为标志的冲击气团阶段和以气团到达竖管底部为标志的喷发阶段。在冲击气团阶段,竖管液面上下波动,同时水平管内压力(P_{T0})周期变化,气团反复膨胀和压缩;在喷发阶段,气团匀速运动,抵达竖管底部后,只有部分气体分流进入竖管,大部分沿水平管道运动直至下游水箱,并导致持续的压力振荡。②喷发阶段前,气团进入竖管后与水体混掺,可视作气泡流,且气体上升速度快于水体自由液面的上升速度。若自由液面抵达孔口前气团仍被水体包围,则极易顶托上端水体喷射而出,发生间歇泉现象;反之则不发生喷射。③气团在竖管中快速上升时,尾部易形成雾状水气混合物,易与后续小体积气团混合,导致气团提前破裂,减少喷发次数。

2.3.2 间歇泉现象分类

考虑到间歇泉的重要特征是水力元件与大气连通处发生突发性水气喷发,且伴随局部压力骤变乃至瞬态高压,可根据上述代表性工况的水力现象与实验竖井顶部排气孔口处的压力波动变化(图 9)划分间歇泉类别:

a. 多次喷射型。该类间歇泉的最大特征是喷

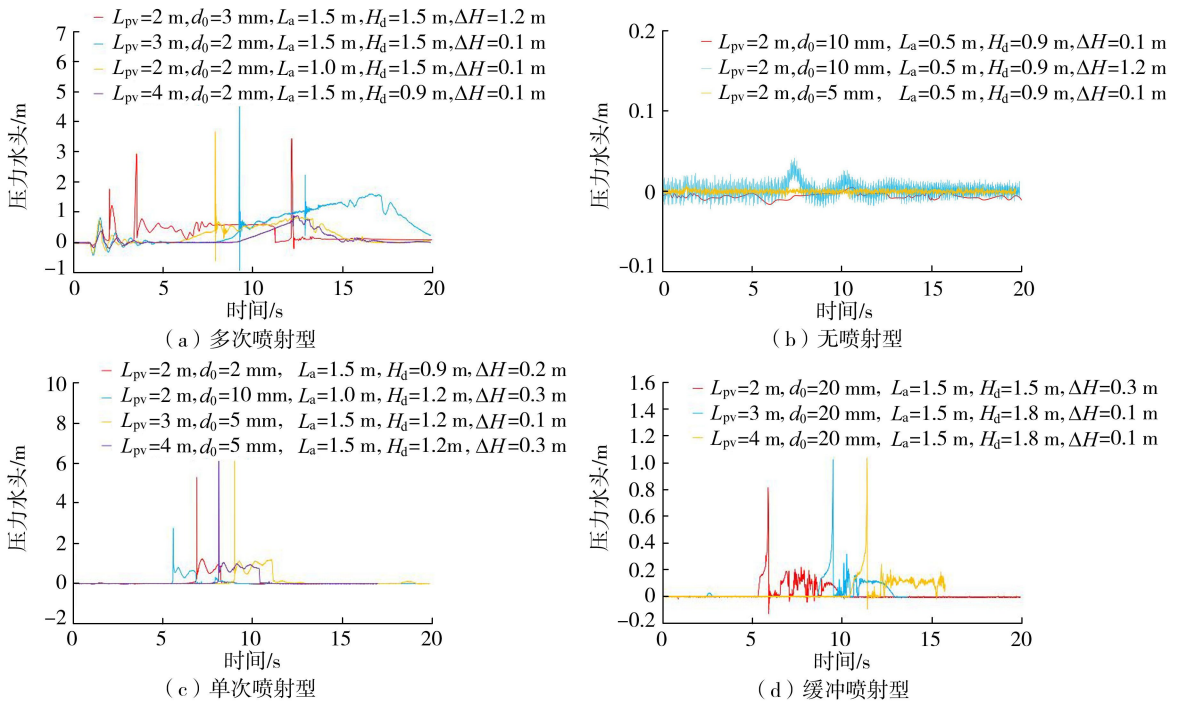


图9 不同类型间歇泉特征压力波动变化

发时间长,与之对应的压力波动几乎贯穿了整个水力过程。在间歇泉喷发阶段,压力波动升高,其过程中可能会发生几次压力脉冲,伴随数次高压与负压。经历脉冲之后,系统内部的压力会在短时间内保持稳定,之后缓慢且略带波动地降低。由于孔口较小,在竖管中气团推升水体时,水体上方的空气压缩或水体排出速度小于上升速度,使得压力逐渐增大。该类间歇泉主要发生在小孔口、大气团、中高初始水位条件下(如工况1): $d_0 \leq 3 \text{ mm}$ 、 $L_a \geq 1.0 \text{ m}$ 且 $H_d \geq 0.9 \text{ m}$ 。

b. 无喷射型。该类间歇泉波形为直线,无压力波动。在瞬变过程中,液面始终保持在PT3位置以下的波动竖管中。该类间歇泉主要出现在中大孔口、小气团、中低水位条件下(如工况2): $d_0 \geq 5 \text{ mm}$ 、 $L_a \leq 0.5 \text{ m}$ 且 $H_d \leq 0.9 \text{ m}$ 。

c. 单次喷射型。该类间歇泉曲线特征为首次压力波动便能达到峰值,该次瞬态高压周期极短,随后压力回落至峰值的20%左右,持续波动,周期相对较长。气团以较大的速度推升水体,使得液面撞击孔口发生压力脉冲,随后气团继续上升,水体持续喷射直至气团抵达孔口释放。该类间歇泉主要发生在中小孔口、中低水位、低水位差条件下(如工况3): $d_0 \leq 10 \text{ mm}$ 、 $H_d \leq 1.2 \text{ m}$ 且 $\Delta H \leq 0.3 \text{ m}$ 。

d. 缓冲喷射型。该波形发生时压力呈指数函数式上升,达到极值时骤然下降至环境压力。实验中主要在第一气团推升水柱直至气团释放阶段出现。该类间歇泉主要出现在全开口、大气团、高水

位、低水位差条件下(如工况4): $d_0 = 20 \text{ mm}$ 、 $L_a = 1.50 \text{ m}$ 、 $H_d \geq 1.5 \text{ m}$ 且 $\Delta H \leq 0.3 \text{ m}$ 。

综上,本文系统性地揭示了通气竖井中间歇泉现象的瞬态演化机理,并对实验尺度下的特征参数做了敏感性分析,并根据实验现象与压力曲线划分了多种间歇泉现象类型。这对大型工程的设计和评估具有一定的参考和预警价值,为后续开展大尺度的物理模型实验或原型模拟提供理论基础。

2.4 压力波动机理分析

基于上述实验现象,对间歇泉发生期间的水气混掺现象进行分析,总结气体排出时气泡破裂与气泡聚合的情况。当较大气团在竖管中分离成两个稍小气团时,由于存在一定高度差,两个稍小气团内的压力不同,纵向压力波在竖管中产生:负压波向上传播,正压波向下传播^[19]。而气泡聚合过程也会产生压力波:正压波向上传播,负压波向下传播。间歇泉喷发时的强烈压力冲击与气团的持续断裂和融合有关。竖管段中大量压力波的传播和叠加是压力波动的重要原因。

3 结 论

a. 在考虑基础流量的情况下,间歇泉瞬变过程可划分为两个阶段:以阀门开启为标志的冲击气团阶段和以气团到达竖管底部为标志的喷发阶段。喷发阶段前,气团进入竖管后与水体混掺,可视作气泡流,若自由液面抵达孔口前气团仍被水体包围,则极易顶托上端水体喷射而出,发生间歇泉现象。此时

气团尾部易形成雾状水气混合物,易与后续小体积气团混合,导致气团提前破裂,喷发次数减少。

b. 基础流量会增大气团水平运动的速度,减小进入竖管的气体含量,从而缓和喷发阶段的水气瞬变与压力波动,降低压力峰值。并且,水位差越大,基础流量越大,系统稳定性越高,压力曲线可更快地趋于稳定。

c. 根据实验条件、发生过程与压力波动趋势,可将间歇泉现象分为多次喷射型、无喷射型、单次喷射型和缓冲喷射型 4 种类型。

d. 间歇泉现象发生时气体会发生气泡破裂与聚合现象,竖管中较大气团破裂或较小气团聚合时,均可能引发纵向压力波,系统内大量压力波的传播与叠加是造成不稳定压力波动的重要原因。

参考文献:

[1] 周建旭,刘峰宏. 复杂输水发电系统尾水隧洞明满流对水力过渡过程的影响[J]. 水利水电科技进展,2024,44(3):51-56. (Zhou Jianxu, Liu Fenghong. Impact of free-surface-pressure flow in tailwater tunnel on hydraulic transition process in complex water conveyance and hydropower systems [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (3): 51-56. (in Chinese))

[2] Shi Lin, Zhang Jian, Yu Xiaodong, et al. Water hammer protection for diversion systems in front of pumps in long-distance water supply projects [J]. Water Science and Engineering, 2023, 16 (2): 211-218.

[3] 舒依娜,刘兆峰,夏修萍,等. 排水管网泵群系统动态摩阻水锤仿真模拟[J]. 水利水电科技进展,2025,45(3):32-39. (Shu Yi ' na, Liu Zhaofeng, Xia Xiuping, et al. Numerical simulation of water hammer with dynamic friction in pump group systems of drainage pipe networks [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45 (3): 32-39. (in Chinese))

[4] 周领,王鹤鸣,徐彬,等. 输水管道水锤泄漏耦合数值模拟及反射系数特性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2026,54(1):43-52. (Zhou Ling, Wang Heming, Xu Bin, et al. Numerical simulation of water hammer and leak coupling in water pipelines and study on reflection coefficient characteristics [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2026, 54 (1): 43-52. (in Chinese))

[5] 钱尚拓,张晗,陈曜辉,等. 排水管道井喷过程气团演变特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(6):90-100. (Qian Shangtuo, Zhang Han, Chen Yaohui, et al. Evolution characteristics of air pocket during geyser in drainage pipes [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53 (6): 90-100. (in Chinese))

[6] 吴金远,周领,刘德有. 考虑动态摩阻的抽水蓄能电站水力瞬变建模模拟[J]. 排灌机械工程学报,2024,42

(6): 612-618. (Wu Jinyuan, Zhou Ling, Liu Deyou. Numerical simulation of hydraulic transients in pumped storage power station with unsteady friction [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2024, 42 (6): 612-618. (in Chinese))

[7] 孙洪亮,陈益民,杨飞,等. 白鹤滩水电站尾水洞明满流段优化试验研究[J]. 中国水利,2019(18):80-83. (Sun Hongliang, Chen Yimin, Yang Fei, et al. Experimental study on optimum of the free-surface-pressurized tailrace tunnel in Baihetan Hydropower Station [J]. China Water Resources, 2019 (18): 80-83. (in Chinese))

[8] 俞晓东,张健. 尾水隧洞通气孔进排气瞬态过程研究 [J]. 水利学报, 2016, 47 (8): 1045-1053. (Yu Xiaodong, Zhang Jian. Investigation on hydraulic transients in tailrace tunnel with air inlet and release from the vent [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47 (8): 1045-1053. (in Chinese))

[9] 钟登禄. 长距离输水隧洞竖井段充水过程两相流瞬态特性研究 [D]. 西安:西安理工大学,2023.

[10] 蒯重列,王晓升,孙振海,等. 竖井形式对调蓄隧道系统井喷的抑制效果分析[J]. 水利水电科技进展,2023,43(3):77-82. (Kuai Zhonglie, Wang Xiaosheng, Sun Zhenhai, et al. Suppression effect on the geyser in storage tunnel system with different shaft forms [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43 (3): 77-82. (in Chinese))

[11] 蔡付林,樊子凯,周建旭,等. 长距离多支线有压输水系统启动水锤防护 [J]. 水利水电科技进展, 2024, 44 (4): 1-6. (Cai Fulin, Fan Zikai, Zhou Jianxu, et al. Start-up water hammer protection for long-distance multi-branch pressurized water conveyance systems [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (4): 1-6. (in Chinese))

[12] 周领,李文姆,刘德有,等. 管道内水流冲击滞留气团的二阶 Godunov 数学模型 [J]. 水电能源科学, 2021, 39 (4): 95-99. (Zhou Ling, Li Wenmu, Liu Deyou, et al. A second order Godunov model of transient flow with trapped air [J]. Water Resources and Power, 2021, 39 (4): 95-99. (in Chinese))

[13] Guo Qizhong, Song C C S. Dropshaft hydrodynamics under transient conditions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991, 117 (8): 1042-1055.

[14] Muller K Z. Geysering caused by the sudden release of pressurized air pockets [D]. Alabama: Auburn University, 2017.

[15] 朱方磊,程永光. 明渠接竖井水电站引水系统的瞬变流规律[J]. 武汉大学学报(工学版),2015,48(6):744-750. (Zhu Fanglei, Cheng Yongguang. Transient flows in headrace system combining open channel and shaft for hydropower stations [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2015, 48 (6): 744-750. (in Chinese))

(下转第 49 页)

掺气设施射流出射角修正方法

董玉萍^{1,2}, 郑林平³, 李国栋¹, 李 丹⁴

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室; 2. 内蒙古机电职业技术学院;
3. 水电水利规划设计总院; 4. 固原市水利勘测设计院有限公司)

摘要:掺气设施射流出射角是精准计算掺气空腔长度的核心水力参数,而射流紊动效应通过改变扩散角间接作用于出射角,其内在物理机理十分复杂。为准确处理水流紊动效应对扩散角的影响,基于二元自由紊动射流理论量化了射流水舌下缘紊动扩散角,提出了掺气设施射流出射角修正公式。通过室内精密变坡水槽试验和工程实例,共比较了 193 种工况下 6 种出射角计算方法得到的原型空腔长度,并与原型实测空腔长度进行了对比。模型试验和工程实例验证结果表明,本文提出的掺气设施射流出射角修正方法合理可靠。

关键词:出射角;射流;紊动扩散效应;扩散角;空腔长度;掺气设施

Correction method of take-off angle of jet from aeration facility//Dong Yuping^{1,2}, Zheng Linping³, Li Guodong¹, Li Dan⁴(1. State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology; 2. Inner Mongolia Technical College of Mechanics and Electrics; 3. China Renewable Energy Engineering Institute; 4. Guyuan Water Resources Survey and Design Institute)

Abstract: The take-off angle of the jet from aeration facilities is a critical hydraulic parameter for accurately calculating the aerated cavity length. The turbulent characteristics of the jet indirectly influence the take-off angle through modifying the diffusion angle, and the underlying physical mechanism is considerably complex. To rigorously account for the effect of flow turbulence on the diffusion angle, the turbulent diffusion angle at the lower jet nappe was quantified based on the theory of two-dimensional free turbulent jets, leading to the derivation of a modified formula for the take-off angle of jet from aeration facilities. A total of 193 test conditions were examined through laboratory experiments conducted in a precision tilting flume, together with engineering applications. The prototype cavity lengths predicted by six alternative take-off angle estimation methods were compared with measured prototype data. Both the model experiments and engineering validations confirm that the proposed correction method for the take-off angle of jet from aeration facilities is reasonable and reliable.

Key words: take-off angle; jet; turbulent diffusion effect; diffusion angle; cavity length; aeration facility

高水头的泄洪建筑物中,水流流速高,泄洪隧洞进口段的收缩部分、闸门槽后的边墙、隧洞的转弯段、溢流堰顶部、泄槽不平整处以及消力齿坎等处易形成低压区^[1-2]。当这些地方的压力降低到水的饱和蒸汽压以下时,水中的气核会迅速膨胀形成空泡,这些空泡随着水流流动,如果遇到压力再次升高的情况,就会迅速溃灭^[3-4]。空泡的溃灭过程会产生极大的冲击力和高温,对泄洪结构的壁面造成严重破坏,即空蚀破坏^[5],通常采用掺气减蚀设施解决这个问题,防止过流面发生空蚀破坏^[6-7]。掺气减蚀设施主要由形成空腔的坎(槽)和供气系统组成,其掺气空腔长度是计算掺气量和下游掺气有效保护长度

的一个重要参数,是设计掺气设施的核心指标^[8-9]。目前掺气空腔长度的计算方法有修正抛射体公式^[10-12]、因次分析法^[13-14]、基于势流理论的数值算法^[15]和射流微元体受力平衡法^[16]等,其中修正抛射体公式形式简单,运算方便,应用较为广泛。

掺气坎后射流下缘出射角受挑坎高度、水深、紊动扩散效应等要素的影响,其值不等于挑坎挑角,因此采用修正抛射体公式计算掺气空腔长度时需要射流出射角进行修正。针对出射角修正问题,国内外学者已开展大量试验与理论研究。例如:潘水波等^[10-11]在考虑水深影响的基础上给出了出射角修正公式;Chanson^[17]在研究空腔阻塞机理时采用的

出射角为挑坎挑角;Steiner 等^[18]研究射流轨迹时优化了出射角计算方法;Wu 等^[12]引入权重系数同时考虑水深和紊动扩散效应的影响,给出了出射角计算方法;Pfister^[19]通过测量射流水舌下缘两个初始轨迹点,给出了有效出射角的计算方法;张法星等^[20]考虑来流水深和紊动扩散的影响修正了出射角。

目前,射流紊动扩散效应对出射角影响的研究尚未形成完整的理论系统。由于射流紊动效应并不会直接改变抛射方向,而是通过改变扩散角间接影响整体出射角,其内在物理机制复杂,较难处理,本文基于二元自由紊动射流理论给出了射流下缘紊动扩散角的计算方法,提出了射流出射角修正公式,并通过模型试验和工程应用案例进一步确认本文提出的出射角修正方法的合理性和可靠性。

1 出射角修正公式

图 1 为掺气坎过流示意图,在掺气挑坎末端建立 xOy 直角坐标系, h_0 为坎前平均水深, u_0 为坎前平均流速, γ 为挑坎挑角, Δ 为总坎高, θ_L 为射流水舌下缘出射角, α_1 、 α_2 分别为上游和下游底坡, A 为跌坎底端点, G 为射流冲击点。坎后射流水舌运动可看作自由抛射体运动,因空腔内负压较小,可忽略。取挑坎顶端端点 O 为坐标原点,根据抛射体公式,空腔长度 L_c 的计算公式为:

$$L_c = 0.5Fr^2h_0\sin2(\theta_L + \alpha_2) \cdot \left[\frac{1}{\cos^2\theta_L} + \sqrt{1 + \frac{2\Delta}{Fr^2h_0\sin^2(\theta_L + \alpha_2)}} \right] \quad (1)$$

其中 $\Delta = t_r + t_s$
式中: Fr 为坎前弗劳德数; t_r 为挑坎坎高, t_s 为跌坎坎高。

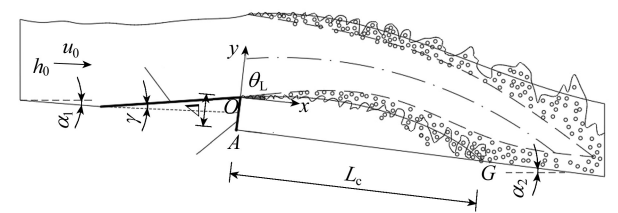


图 1 掺气坎过流示意图

出射角是影响式(1)计算精度的关键参数,结合目前的研究成果,其主要受坎前水深和水舌下缘紊动扩散的影响。实际上,掺气坎后射流水舌下缘已为充分发展的紊流,可看作二元自由紊动射流。水舌下缘紊动扩散角可由二元自由紊动射流理论给出。

1.1 射流水舌下缘紊动扩散角

图 1 中的过坎水流以速度 u_0 脱离挑坎,在运动

过程中由于黏滞性作用上下缘呈现一种犬牙交错的不规则状态,其不断卷吸周围的空气进行动量交换,使射流核心区域沿流动方向(x 方向)逐渐变窄,竖向(y 方向)高度不断增加,直至消失,消失点之后的部分称为射流的充分发展区。图 2 为坎后自由射流水舌紊动扩散示意图,为简化分析,假定坎前水深 h_0 趋向于 0,假定射流上下缘紊动程度相同,将坐标原点取在挑坎处的射流中心,建立如图所示的 xOy 直角坐标系。由于过坎射流的流量为一有限值,过坎射流速度应趋向于无限大,水流一脱离挑坎就形成充分发展区。在射流中沿 y 方向的速度梯度 $\partial u/\partial y$ 很大,直至射流上下缘处降为 0,而 x 方向流速变化较慢,射流高度与长度相比为小量,这一流动特征与边界层相似,可采用边界层微分方程来处理。

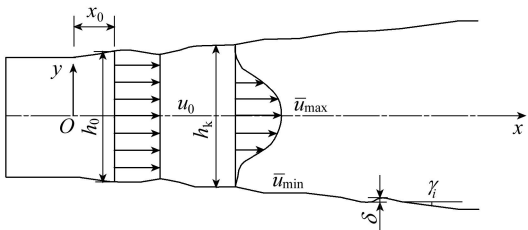


图 2 坎后自由射流水舌紊动扩散示意图

在图 2 中, γ_i 为射流上下缘紊动扩散角,坎后射流运动到 $x=x_0$ 位置时坎前水深为 h_0 ,中心线的速度为 u_0 。以 $x=x_0$ 中心线为参考点,射流水舌沿流动方向紊动程度逐渐增大,其运动到某点处中心线上速度为 $\bar{u}_{\max}$,上下缘处速度为 $\bar{u}_{\min}$,射流高度为 h_k ,紊动扩散角可表示为 $\gamma_i = \arctan(0.5h_k/x)$ 。

根据射流各横截面速度剖面的自保存特性,射流中心线速度 $\bar{u}_{\max}$ 可表示为:

$$\bar{u}_{\max} \sim \sqrt{M/\rho x} \sim x \quad (2)$$

式中: M 为单位时间通过任一单位宽度横截面的总动量; ρ 为流体密度。

射流半高度为

$$0.5h_k \sim x \quad (3)$$

忽略紊动射流中的黏性切应力,由二维连续方程和 N-S 方程可得:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_t}{\partial y} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = 0$$

式中: $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 分别为 x 和 y 方向的平均速度; p 为流体动水压强; $\bar{p}$ 为流体动水平均压强; τ_t 为自由紊动射流切应力。

式(5)的第一边界条件为: $y=0, \bar{u} = u_{\max}, \bar{v} = 0,$

$\partial \bar{u} / \partial y = 0$, 其中 $u_{\max}$ 为运动到某点处的最大速度, v 为 y 方向速度; 第二边界条件为 $y \rightarrow \infty, \bar{u} = 0, \partial \bar{u} / \partial y = 0$ 。

湍流边界层中混合长度 l 与射流高度 h_k 成正比, 即 $l = 0.5 \sqrt{k_1} h_k$, 其中 k_1 为常数, 由试验确定。如取速度梯度近似等于断面上最大速度与最小速度之差除以射流高度 h_k , 即:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \approx \frac{1}{0.5 h_k} (\bar{u}_{\max} - \bar{u}_{\min}) \quad (6)$$

则涡黏度可表示为:

$$\nu_t = 0.5 k_1 h_k (\bar{u}_{\max} - \bar{u}_{\min}) = 0.5 k_1 h_k \bar{u}_{\max} \quad (7)$$

其中 $\bar{u}_{\max} = \bar{u}_0 (x/x_0)^{-1/2}$ $h_k = h_0 x/x_0$

由式(7)可得, 初始状态的涡黏度 $\nu_{t0} = 0.5 k_1 h_0 \bar{u}_0$, 则有:

$$\frac{\nu_t}{\nu_{t0}} = \frac{h_k \bar{u}_{\max}}{h_0 \bar{u}_0} = \frac{x}{x_0} \left(\frac{x}{x_0} \right)^{-1/2} = \left(\frac{x}{x_0} \right)^{1/2} \quad (8)$$

令

$$\bar{u} = \frac{\partial \psi}{\partial y} = \bar{u}_{\max} F'(\eta) = \bar{u}_0 \left(\frac{x}{x_0} \right)^{-1/2} F'(\eta) \quad (9)$$

其中

$$\eta = \sigma y/x$$

式中: ψ 为流函数; η 为相似变量; σ 为待定常数; $F(\eta)$ 为待定函数, 下文简写为 F 。

由式(9)可求得流函数 ψ 和速度分量 $\bar{v}$ 分别为:

$$\psi = \sigma^{-1} \bar{u}_0 x_0^{1/2} x^{1/2} F \quad (10)$$

$$\bar{v} = -\frac{\partial \psi}{\partial x} = \sigma^{-1} \bar{u}_0 \left(\frac{x_0}{x} \right)^{1/2} \left(\eta F' - \frac{1}{2} F \right) \quad (11)$$

将式(8)~(11)代入式(5), 得:

$$2F'^2 + 2FF'' + F''' = 0 \quad (12)$$

令 $\sigma = (u_0 x_0 / \nu_{t0})^{1/2} / 2$, 根据式(5)的边界条件可以获得式(12)的第一和第二边界条件分别为: $\eta=0, F=0, F'=1, F''=0$; $\eta \rightarrow \infty, F'=0, F''=0$ 。

由边界条件 $F'=0$, 式(12)转化为:

$$2FF'' + F''' = 0 \quad (13)$$

上式进一步为:

$$2FF' + F'' = 0 \quad (14)$$

对上式积分可得:

$$F^2 + F' = C_1 \quad (15)$$

式中: C_1 为积分常数。代入定解条件 $\eta=0$ 和 $F=0$, 得 $F'(0)=C_1$, 通常令 $C_1=1$ 。

将 $C_1=1$ 代入式(15)得:

$$F^2 + F' = 1 \quad (16)$$

将式(16)简化为:

$$\frac{dF}{1-F^2} = d\eta \quad (17)$$

对上式积分可得:

$$\operatorname{arctanh} F = \eta + C_2 \quad (18)$$

利用边界条件 $\eta=0$ 和 $F=0$ 得到 $C_2=0$, 则式(18)可写为:

$$F = \tanh \eta \quad (19)$$

$$\bar{u} / \bar{u}_{\max} = \operatorname{sech}^2 \eta \quad (20)$$

相似变量 $\eta = \sigma y/x$ 转化为:

$$\eta = 0.5 \sigma h_k / x = \sigma \operatorname{arctan} \gamma_i \quad (21)$$

由式(21)可知, 要获得紊动扩散角 γ_i , 需要确定 $\bar{u} / \bar{u}_{\max}$ 和 σ 。Gortler 通过实验确定 $\sigma = 7.67^{[18]}$ 。

事实上, 掺气坎射流水舌上下缘分别为自由射流和固壁射流, 上下边界不同, 上下缘速度分布不一致, 导致出口处的射流上下缘扩散角不同。

时启隧^[21]对明渠水流掺气进行了系统研究, 明渠上部掺气水流和近底水流的断面平均流速和最大流速的关系可用边界层内流速分布的指数律表示, 其表达式为:

$$\bar{u} / \bar{u}_{\max} = (y/h_0)^{1/m} \quad (22)$$

取 $m=7$, 明渠上部掺气水流 $\bar{u} / \bar{u}_{\max} = 0.875$, 明渠近底水流 $\bar{u} / \bar{u}_{\max} = 0.817$ 。

因此, 令 $\bar{u} / \bar{u}_{\max}$ 分别为 0.875、0.817, 将其代入式(20)~(21), 计算相应的紊动扩散角 γ_i 分别为 2.76° 和 3.41°。因此下缘紊动扩散角 γ_L 取 3.41°。

1.2 射流水舌下缘出射角修正

坎上水深对出射角的影响采用潘水波等^[10]、Rutschmann 等^[11]给出的公式, 并考虑射流水舌下缘紊动扩散的影响, 水舌下缘出射角修正为:

$$\theta_L = \gamma \sqrt{\tanh(t_r/h_0 \gamma)} - \gamma_L \quad (23)$$

式中: $\gamma_L = 3.41^\circ$ 。

将式(23)代入式(1)就能计算掺气空腔长度。

2 模型试验

2.1 物理模型

试验采用精密变坡水槽, 水槽长 7 m, 宽 0.15 m, 高 0.25 m, 水槽坡度 α 取 6°、5°、3°, 最大供水量为 0.20 m³/s; 在水槽末端布置掺气挑坎, 取固定掺气挑坎挑角 γ 为 5.71°, 掺气挑坎高度 t_r 取 0.01、0.02、0.03、0.04 m, 分别对应 M1 型、M2 型、M3 型、M4 型。坎前水深 $h_0 = 0.03 \sim 0.19$ m, 坎前流速 $u_0 = 2.80 \sim 6.00$ m/s, 水流弗劳德数 $Fr = 2.50 \sim 6.51$, 雷诺数 $Re = 1.96 \times 10^5 \sim 7.50 \times 10^5$, 韦伯数 $We = 102 \sim 252$, 共计 180 种工况。试验工况见表 1。

试验坎前水深采用钢板尺量测, 精度为 1 mm, 下游流量采用矩形薄壁量水堰进行量测。试验整体模型见图 3。

表 1 试验工况

$\alpha/(^{\circ})$	工况数	Fr	h_0/m	体型
6	8	3.5	0.139, 0.096	M1~M4
	12	4.0	0.154, 0.164, 0.074	M1~M4
	12	4.5	0.112, 0.096, 0.054	M1~M4
	12	5.0	0.120, 0.115, 0.077	M1~M4
	12	6.0	0.083, 0.039, 0.047	M1~M4
	4	6.5	0.054	M1~M4
5	4	3.0	0.107	M1~M4
	12	3.5	0.143, 0.160, 0.081	M1~M4
	12	4.0	0.169, 0.173, 0.105	M1~M4
	12	4.5	0.120, 0.118, 0.058	M1~M4
	12	5.0	0.123, 0.080, 0.039	M1~M4
	4	5.5	0.086	M1~M4
3	4	6.5	0.054	M1~M4
	4	2.5	0.123	M1~M4
	8	3.0	0.157, 0.093	M1~M4
	12	3.5	0.170, 0.115, 0.068	M1~M4
	12	4.0	0.178, 0.124, 0.045	M1~M4
	12	4.5	0.132, 0.129, 0.087	M1~M4
	8	5.0	0.125, 0.057	M1~M4
	4	6.0	0.090	M1~M4

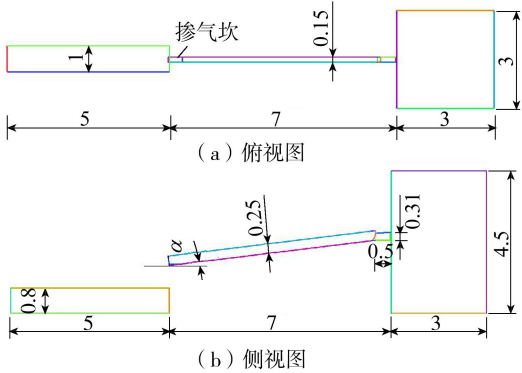


图 3 试验整体模型布置(单位:m)

2.2 水舌下缘轨迹测量系统

传统掺气设施由于射流水舌在冲击底板时发生剧烈旋滚,难以捕捉下缘轨迹,影响了掺气空腔长度的测量精度。本文在水槽末端设置掺气坎,使射流水舌在空中运动,这样所测得的水舌下缘轨迹清晰,便于准确测量掺气空腔长度,可为解决缓坡泄槽掺气设施空腔的回水问题、研发新的曲线型掺气设施提供理论支撑。

试验采用图像处理技术来测量空中射流水舌运动轨迹。相机架设在垂直于空中水舌一侧,固定相机与水舌之间的距离,在相机另一侧布设白板网格,白板尺寸为 2.50 m×1.50 m,白板上网格尺寸为 0.05 m×0.10 m,并在白板边缘处贴有精度为 1 mm 的钢板尺,相机视频分辨率为 2400×1080,视频帧率为 25 帧/s,相机覆盖范围为 2.50 m²,可以拍摄到大部分水舌运动轨迹。

通过张氏标定法获得相机内参和外参,使空中水舌运动轨迹点的位置与其在图像中轨迹点位置相

对应,再利用 OpenCV 平台和 Python 语言提取视频帧、去背景、二值化、均值化、去噪点、边缘检测(Sobel 微分算子)、视频帧输出等一系列操作,获得水舌运动轨迹图像,如图 4 所示,每个工况输出 3 张,从该图读取轨迹点坐标,每个轨迹点平行读取 3 次,取平均值。射流水舌下缘轨迹获得后,就能计算掺气空腔长度。

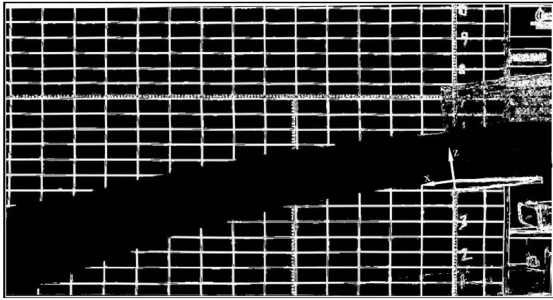


图 4 水舌运动轨迹图像

3 验证结果

将文献[10-13,18,20]中的出射角公式分别代入式(1)计算空腔长度,并与本文考虑紊动扩散影响修正的出射角公式(式(23))代入式(1)计算的空腔长度进行对比,如图 5 所示。再在文献[22]中选取国内 4 个实际工程共 13 种工况,各工况下掺气设施体型参数和水力参数变量见表 2,分别采用上述 6 种方法计算原型空腔长度,并与原型实测空腔长度进行对比(图 6)。由图 5 和图 6 可知,采用文献[12,20]和本文修正出射角公式与刚体抛射公式相结合,计算的空腔长度与实测空腔长度吻合较好,主要原因是这 3 种方法都考虑了坎后射流水舌紊动扩散的影响,但采用本文提出的出射角修正方法计算掺气空腔长度误差在±25%以内,而文献[12,20]的误差在±30%以内,误差高了 5 个百分点,说明本文提出的掺气设施出射角修正方法具有合理性。

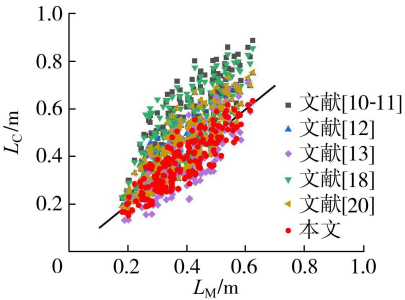


图 5 模型实测空腔长度 L_M 与计算空腔长度 L_C 的对比

4 结 语

现有射流出射角计算方法多基于水深、挑坎挑角、多因子加权等经验方式构建,难以系统揭示射流

表 2 原型掺气坎体型结构参数和水力参数

工程名称	掺气设施类型	Δ/m	$\gamma/(\text{^\circ})$	Fr	$u_0/(\text{m/s})$
Foz do Areia 1 号	挑跌掺气坎	0.20	7.10	8.72	24.02
Foz do Areia 2 号	挑跌掺气坎	0.15	7.10	9.64	26.32
Foz do Areia 3 号	挑跌掺气坎	0.10	7.10	10.80	28.09
鲁布革 1 号	坎槽组合式掺气坎	0.60	10.76	3.94	28.83
鲁布革 2 号	掺气挑坎	0.60	7.13	3.96	31.73
乌江渡 1 号	坎槽组合式掺气坎	0.85	11.31	3.54	27.22
	坎槽组合式掺气坎	0.85	11.31	3.92	26.26
	坎槽组合式掺气坎	0.85	11.31	4.15	24.12
	坎槽组合式掺气坎	0.85	11.31	4.15	24.12
乌江渡 2 号	坎槽组合式掺气坎	0.85	11.31	3.92	26.26
冯家山 1 号	坎槽组合式掺气坎	0.85	11.31	3.54	27.22
	坎槽组合式掺气坎	0.60	3.81	6.15	32.72
冯家山 2 号	掺气挑坎	0.30	7.13	7.14	36.11

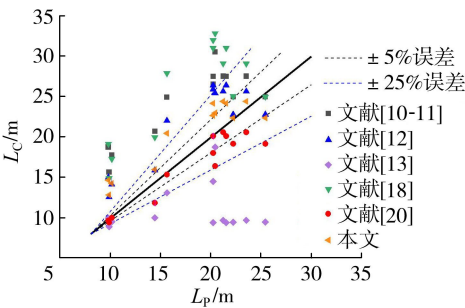


图 6 原型实测空腔长度 L_p 与计算空腔长度的对比

紊动扩散效应对出射角与扩散角内在联系的影响。本文基于二元自由紊动射流理论,给出了射流下缘紊动扩散角的计算方法,提出了射流下缘出射角修正公式。模型试验和工程实例验证结果表明,采用本文提出的掺气坎出射角修正方法计算所得的空腔长度的精度比前人提高了 5%。本文研究成果补充和完善了射流紊动效应对扩散角影响的物理机制,为精准设计局部陡坡掺气坎体型奠定了坚实的基础,具有重要的工程意义。

参考文献:

[1] Xu Weilin, Zhang Yalei, Luo Jing, et al. The impact of particles on the collapse characteristics of cavitation bubbles[J]. Ocean Engineering, 2017, 131: 15-24.

[2] 孙振兴,王芳芳,孙晨光,等. 缓坡泄洪放空洞掺气坎水力特性试验分析[J]. 水力发电学报, 2023, 43(2): 57-66. (Sun Zhenxing, Wang Fangfang, Sun Chenguang, et al. Experimental analysis of hydraulic characteristics of aerators in spillway tunnels with mild slope[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 43 (2): 57-66. (in Chinese))

[3] 李贵吉,张建民. 前置突扩突跌掺气设施曲线阶梯水流掺气特性数值计算[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(4): 46-52. (Li Guiji, Zhang Jianming. Numerical calculation of aerated flow characteristics in a curve-floor stepped tunnel with pre-sudden lateral enlargement and

bottom drop aerator [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (4): 46-52. (in Chinese))

[4] 马斌,王宇航,缙文娟,等. 高重力坝挑坎体型及水力特性对比[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(5): 71-77. (Ma Bin, Wang Yuhang, Gou Wenjuan, et al. Comparison of flip bucket shapes and hydraulic characteristics of a high gravity dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(5): 71-77. (in Chinese))

[5] 张恒,胡海豹. 基于格子 Boltzmann 方法的空泡溃灭过程模拟[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(4): 42-48. (Zhang Heng, Hu Haibao. Simulation of cavitation collapse process based on lattice Boltzmann method[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2024, 52(4): 42-48. (in Chinese))

[6] 张建民. 高坝泄洪消能技术研究进展和展望[J]. 水力发电学报, 2021, 40(3): 1-18. (Zhang Jianmin. Hydraulics of high-speed flows: recent achievements and future outlook [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 40(3): 1-18. (in Chinese))

[7] 高元,刘博,赵蒙,等. 空化水射流研究方法综述[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(1): 18-25. (Gao Yuan, Liu Bo, Zhao Meng, et al. Review of research methods on cavitation water jet [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1): 18-25. (in Chinese))

[8] 李建中,宁利中. 高速水力学[M]. 西安:西北工业大学出版社,1994.

[9] 李书芳,吴建华,马飞. 基于出射流速的反弧鼻坎挑距计算[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(2): 58-62. (Li Shufang, Wu Jianhua, Ma Fei. Calculation of jet trajectory distance of flip bucket based on takeoff velocity [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(2): 58-62. (in Chinese))

(下转第 36 页)

纤维-膨胀剂协同改性混凝土耐硫酸盐侵蚀机理研究

田正宏^{1,2}, 颜伟³, 胡桂宝³, 钱长根³

(1. 河海大学苏州高等研究院; 2. 河海大学水利水电学院; 3. 南京江北新区建设和交通工程质量安全监督站)

摘要:针对高硫酸盐环境下混凝土的侵蚀劣化问题,通过硫酸盐干湿循环试验,系统研究了聚酯纤维、玄武岩纤维及 U 型膨胀剂不同复掺方式对混凝土耐硫酸盐侵蚀性能的影响;通过分析试件外观损伤、质量损失及孔结构演变的劣化规律,评价了混凝土耐硫酸盐侵蚀的特性,揭示了纤维与膨胀剂协同抑制混凝土劣化的机理。结果表明:玄武岩纤维体积分数为 0.15%、U 型膨胀剂质量分数为 4%(以胶凝材料计)的混凝土耐蚀性能最优,50 次循环后试件外观保持完整,无浆体脱落,质量损失率为 6.12%(对照组为 9.52%),无害孔占比较试验前降低了 5.55 个百分点(对照组降低了 10.00 个百分点);膨胀剂与纤维的协同作用优化了混凝土的孔隙结构,提升了混凝土的抗渗和耐侵蚀性能。

关键词:硫酸盐侵蚀;干湿循环;试验分析;劣化特征;微观分析;作用机理

Study on mechanism of sulfate erosion resistance of concrete modified by synergistic action of fiber and expansive agent//Tian Zhenghong^{1,2}, Yan Wei³, Hu Guibao³, Qian Changgen³(1. Suzhou Institute for Advanced Research of Hohai University; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University; 3. Nanjing Jiangbei New Area Construction and Traffic Engineering Quality and Safety Supervision Station)

Abstract: To address the deterioration of concrete exposed to high-sulfate environments, sulfate wet-dry cycling tests were conducted to systematically investigate the effects of different combined incorporation methods of polyester fiber, basalt fiber, and U-type expansive agent on the sulfate erosion resistance of concrete. By analyzing the deterioration patterns of specimen appearance damage, mass loss, and pore structure evolution, the sulfate erosion resistance of concrete was evaluated, and the synergistic mechanism by which fibers and expansive agent inhibit concrete deterioration was revealed. The results show that the concrete incorporating 0.15% basalt fiber by volume and 4% U-type expansive agent by mass of cementitious materials exhibited the best sulfate erosion resistance. After 50 cycles, the specimens remained intact in appearance, with no paste spalling observed. The mass loss rate was 6.12%, compared with 9.52% for the control group. The proportion of harmless pores decreased by 5.55 percentage points relative to that before the test, while that of the control group decreased by 10.00 percentage points. The synergistic effect of the expansive agent and fibers optimized the pore structure of concrete, thereby improving its impermeability and resistance to sulfate erosion.

Key words: sulfate erosion; wet and dry cycles; test analysis; deterioration characteristics; microscopic analysis; mechanism of action

混凝土因其良好的力学性能和较低的成本,被广泛应用于水利、航运等领域,但混凝土结构的施工浇筑层面以及裂缝等薄弱区域的耐久性较差,在高硫酸盐环境下易发生侵蚀劣化,严重影响了建筑物的使用寿命^[1-4]。例如:八盘峡水电站坝体结构多处遭受侵蚀出现开裂、脱落现象;李家峡水电站取芯检测发现混凝土内部硫酸根离子含量超标,存在硫酸盐侵蚀现象^[5]。此外,我国华北、华东及黄淮等地区地下水含有较多硫酸根离子,长三角某些工业集聚区则由于常年受到工业污染,河湖水体中硫酸盐质量浓度均值达 354.40 mg/L,导致附近水工混凝土

结构受到极大侵蚀影响,工程服役年限大幅缩短^[6-7]。

已有学者提出采用掺加纤维和膨胀剂来提升混凝土的耐硫酸盐侵蚀性能,并开展了相关研究。例如:甘磊等^[8]采用室内干湿耦合试验研究了玄武岩纤维的加入对混凝土耐硫酸盐侵蚀性能的影响,发现掺入短切玄武岩纤维能够提升混凝土的抗压及劈裂抗拉强度,各项指标均优于对照组;陈红莉^[9]的干湿循环试验结果表明,聚酯纤维的加入可以明显改善混凝土的耐硫酸盐侵蚀性能和混凝土的整体强度性能,尤其是抗压、抗拉强度;Cai 等^[10]采用中国

作者简介:田正宏(1966—),男,教授,博士,主要从事水利土木工程智慧施工研究。E-mail:zh-tian@hhu.edu.cn

铁道科学研究院的硫铝酸盐膨胀剂与沥青乳液搭配制作了一种水泥沥青混凝土,试验发现 U 型膨胀剂与浆体结构的结合显著提高了混凝土的抗蚀系数; Xu 等^[11]研究了掺加 U 型膨胀剂的混凝土在 15% 硫酸钠溶液条件下的物理力学性能,试验结果表明,随着膨胀剂掺量的增加,混凝土试件的强度降低,但其抗硫酸盐侵蚀能力显著提高。

尽管已有研究证实单一纤维(如玄武岩纤维、聚酯纤维)或膨胀剂(如 U 型膨胀剂)可部分改善混凝土耐硫酸盐侵蚀性能,但在实际工程中,硫酸盐侵蚀往往与干湿循环、温度变化等多因素耦合作用,单一改性手段难以满足复杂工况需求。此外,现有研究多聚焦于单一材料的作用机理,对纤维-膨胀剂复掺的协同效应缺乏系统性分析,尤其是微观孔结构演变与界面结合机制的关联性研究尚未深入。鉴于此,本文选择应用广泛的玄武岩纤维和聚酯纤维以及一种 U 型膨胀剂制备纤维-膨胀剂复掺混凝土,从宏微观多尺度探究其抗硫酸盐侵蚀性能,以期为高硫酸盐环境下混凝土的应用提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验材料主要包括 P·O 42.5 型普通硅酸盐水泥、Ⅱ级粉煤灰、粗骨料(粒径分布为 5~20 mm)、细骨料(细度模数 2.8,天然Ⅱ区中砂)、聚羧酸系高效减水剂、普通自来水、纤维和膨胀剂。纤维是河北某厂生产的聚酯纤维和玄武岩纤维,其性能指标见表 1。

表 1 纤维的主要性能指标

纤维种类	长度/mm	直径/ μm	密度/(g/cm^3)	弹性模量/GPa
聚酯纤维	12	28.22	1.31	26.6
玄武岩纤维	12	17.00	2.65	95.6

纤维种类	拉伸强度/MPa	极限伸长率/%	碱蚀强度保持率/%	熔点/ $^{\circ}\text{C}$
聚酯纤维	1861	13	96.3	265
玄武岩纤维	1556	3	86.0	1050

试验所用膨胀剂为湖北三元特种建材有限公司生产的硫铝酸钙型膨胀剂(U 型膨胀剂),其比表面积为 $375\text{ m}^2/\text{kg}$,细度为 0.27%,初凝时间和终凝时间分别为 200、340 min,水中 7 d 和 21 d 限制膨胀率分别为 0.051%、-0.014%,7 d 和 28 d 抗压强度分别为 33.7、47.2 MPa。

1.2 混凝土配合比

纤维和膨胀剂均为外掺,所用基准混凝土水灰比为 0.43,水泥、粉煤灰、粗骨料、细骨料的质量比为 1:0.21:2.89:2.18,减水剂用量为胶凝材料质量的 1.2%。参考文献[12-14],聚酯纤维和玄武

岩纤维分别按混凝土体积分数掺加,U 型膨胀剂按胶凝材料质量分数掺加;聚酯纤维、玄武岩纤维和 U 型膨胀剂的最优掺量分别为 0.1%、0.15%和 4%,且混凝土工作性能几乎保持不变,但上述研究全基于单一变量,本文设置了最优掺量的不同组合,同时为避免偶然性,增设了其他掺量,每组试件的纤维和膨胀剂掺加方式如表 2 所示,其中第一组为对照组,用于对比掺加纤维和膨胀剂后混凝土的性能变化。

表 2 纤维和膨胀剂掺量

试件编号	聚酯纤维/%	玄武岩纤维/%	U 型膨胀剂/%
对照组	0	0	0
P0.1	0.10	0	0
B0.15	0	0.15	0
PB0.15	0.15	0.15	0
P0.1-4U	0.10	0	4
B0.15-4U	0	0.15	4
PB0.15-4U	0.15	0.15	4

1.3 试件制备及试验设备

试验设置了“分类多拌”的拌合物制备方法,可防止纤维出现聚团现象^[15],避免局部膨胀应力集中,减少微裂缝的产生,保证试验结果的准确性。具体流程如图 1 所示:首先,将称好的水泥、粉煤灰和细骨料倒入搅拌机中干拌 30 s,此过程中加入一半的纤维和膨胀剂;然后将粗骨料倒入搅拌机中继续搅拌 30 s,此过程中加入剩下的纤维和膨胀剂;最后将掺有减水剂的自来水倒入搅拌机中搅拌 60 s,搅拌结束后入模振捣,同时取出部分样品测试其工作性能。本次试验试件均为立方体,尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$,混凝土试件脱模后标准养护 28 d,养护温度为 $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$,养护相对湿度在 95%以上。

试验设备主要包括数显电热恒温鼓风干燥箱、AutoPore V 压汞仪以及 HITACHI SU5000 型扫描电子显微镜(SEM)。数显电热恒温鼓风干燥箱用于混凝土高温烘干,压汞仪用于测量试件孔隙直径分布情况,SEM 用于观测试件微观形貌以及侵蚀产物的主要成分。

1.4 试验方案

硫酸盐侵蚀试验参照 GB/T 50082—2024《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中的加速浸泡试验法,利用高浓度盐溶液浸泡和高温烘干的干湿循环手段。为研究混凝土在硫酸盐侵蚀后的整体性能,选择分析纯无水硫酸钠(Na_2SO_4 ,AR 级)作为侵蚀介质配制侵蚀溶液。为提高试验结果可靠性并缩短试验周期,结合硫酸盐干湿循环试验相关研究^[16-17],确定配制 Na_2SO_4 溶液质量分数为 15%,浸泡过程中用塑料盖对试件箱进行密封,防止水分散失,且每隔 10 次循环换新溶液。烘干温度为 60°C ,

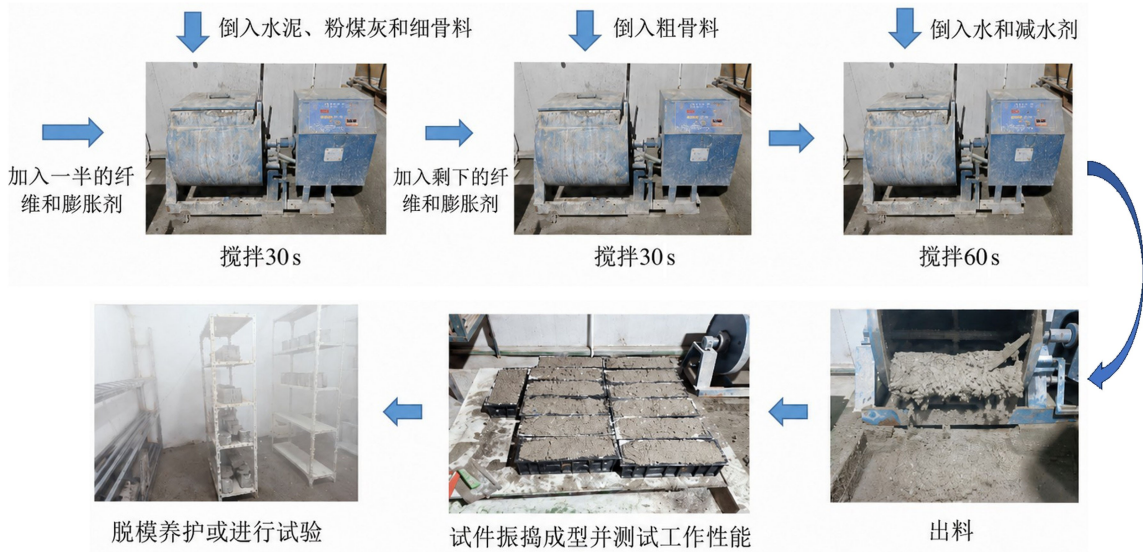


图1 试件制备流程

1个干湿循环周期为24 h,其中盐浸18 h、烘干6 h,浸泡与烘干时间比为3:1。硫酸盐侵蚀试验共进行50次干湿循环,持续50 d。

混凝土试件受侵蚀后的质量损失情况通过质量损失率来评价:

$$K_n = \frac{m_0 - m_n}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: K_n 为试件经历 n 次干湿循环后的质量损失率,%; m_0 为试件干湿循环前的质量,g; m_n 为试件经历 n 次干湿循环后的质量,g。

2 试验结果与分析

2.1 外观损伤

混凝土试件经历了50次硫酸盐干湿循环过程,采用实物图记录试件经历10、30、50次干湿循环后的外观侵蚀损伤情况,图2为各组试件外观损伤形态。

从图2可以看出,干湿循环10次后,不同试件均只出现轻微损伤。试件表面有轻微砂化痕迹,表面微小孔洞有所增加,个别棱角处有缺损浆体掉落。这一阶段对照组、单掺纤维组、复掺纤维和膨胀剂组试件的外观无明显差异。

干湿循环30次后,试件中度损伤,表面孔洞增多增大,出现蜂窝状坑蚀,如图2所示,对照组试件棱角等薄弱部位开始出现脱落和掉渣现象,部分棱角甚至已经“胀裂”。单掺纤维组试件整体虽保持较为完整,但试件表面细小裂纹明显增多,部分试件浆体外壳脱落,并有少量纤维外露。复掺纤维和膨胀剂的试件劣化程度明显低于前两者。损伤主要表现为试件表面的砂化和孔洞增多,试件出现“盐霜”,浆体脱落不明显,整体结构保持完整。出现

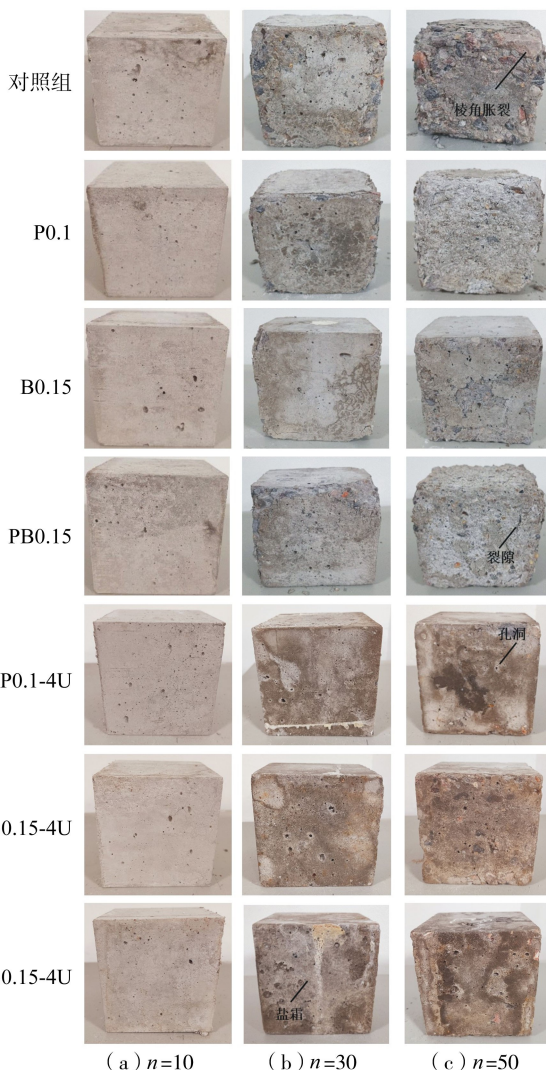


图2 干湿循环后混凝土试件外观形态变化

“盐霜”是因为硫酸盐侵蚀过程中产生硫酸盐结晶(图2),其外观呈淡白色、接近透明,微观形貌呈圆饼状,大小在 $0.2 \sim 2 \mu\text{m}$ 范围内^[18]。

干湿循环50次后,试件发生重度损伤,对照组

试件出现大量浆体剥蚀,试件外部浆体几乎全部脱落,砂石等骨料明显外露,无法保持原有的立方体外形。在干湿循环过程中,硫酸盐结晶不断形成与溶解,构成了一个反复加载与卸载的疲劳循环。这一过程不仅显著促进混凝土内部微裂纹的生成与延伸,同时因过量侵蚀产物的累积而导致混凝土基体孔洞、裂隙扩大,硫酸盐侵蚀通道增多,加重了侵蚀破坏。单掺纤维组试件出现浆体块状脱落现象,但无骨料缺损,破坏主要发生在表面较浅部位以及棱角处,外形仍维持较完整。复掺组试件外观保持完整,虽然浆体表面已被侵蚀砂化而呈颗粒状,但未发生浆体脱落,仅部分棱角出现少量缺损。

2.2 质量损失

混凝土试件经历了 50 次硫酸盐干湿循环过程,采用电子秤分别称量试件经历 10、30、50 次干湿循环后试件的质量,并计算其质量损失率。

混凝土试件在不同硫酸盐干湿循环周期的质量损失情况如图 3 所示。从图 3 可以看出,不同复掺方式下试件的质量变化规律均一致,前 10 次干湿循环中,所有试件质量损失率均下降;当干湿循环次数为 10~40 次时,试件质量损失率均急剧上升;当干湿循环次数达 40~50 次时,试件质量损失率开始缓慢上升。这主要由于混凝土在硫酸盐侵蚀过程中会产生不同的侵蚀产物,而侵蚀产物在不同阶段的作用不同。侵蚀产物生成的具体化学反应方程式为:

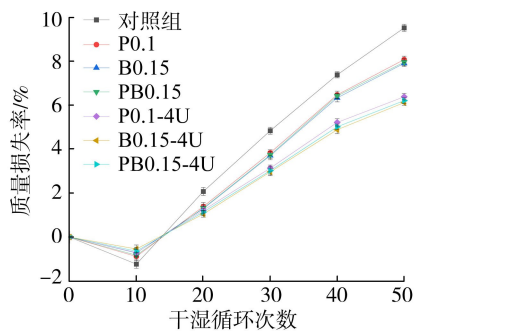
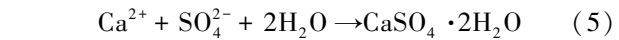
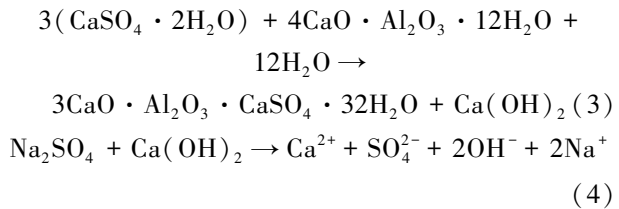
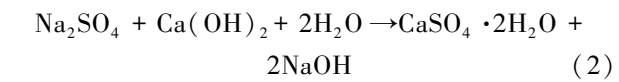


图 3 混凝土试件质量损失率与干湿循环次数的关系

侵蚀初始阶段生成的侵蚀产物填充孔隙,试件质量增加;随着干湿循环次数的增加,式(2)反应持续生成的 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (石膏)为式(3)中 $3\text{CaO} \cdot$

$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ (钙矾石)的形成提供了物质基础;同时式(4)电离的 Ca^{2+} 与溶液中的 SO_4^{2-} 结合生成硫酸钙经水化形成石膏。在此过程中,石膏与硫酸钙可直接相互转化,显著提高了钙矾石和石膏的生成总量,同时反复的干湿循环导致试件内部产生温度梯度应力,引发周期性膨胀-收缩行为,该温度应力与侵蚀产物结晶膨胀应力相互耦合,形成复合破坏机制,共同作用于混凝土基体,加速微裂缝扩展,因此质量损失率急剧上升;当干湿循环次数超过 40 次后,试件表层砂浆在持续剥蚀作用下逐渐脱落殆尽,暴露出内部新鲜的密实基体,同时与侵蚀离子反应生成新的钙矾石与石膏结晶,形成局部堵塞效应,从而减缓了质量损失率的上升速度。

当干湿循环达 50 次时,各组质量损失率呈现显著差异:对照组达 9.52%,而单掺纤维组 (P0.1、B0.15) 与复掺纤维组 (PB0.15) 分别为 7.90%、7.72% 和 7.81%,复掺玄武岩纤维和膨胀剂的试件 (B0.15-4U) 表现出最优抗蚀性,损失率仅为 6.12%,较对照组降低了 35.8%。该现象源于纤维和膨胀剂的协同作用:纤维和膨胀剂复合材料在硬化过程中,膨胀剂的微膨胀效应在受约束条件下使基体内部产生适度压应力,提高纤维与混凝土基体界面的黏结强度^[19];另一方面,纤维通过桥联和约束作用分散局部应力,抑制裂缝扩展,使混凝土砂浆和骨料不易脱落,从而延缓质量损失。

2.3 孔隙直径分布及孔结构变化

采用 AutoPore V 压汞仪测定了硫酸盐干湿循环前后对照组、B0.15 组和 B0.15-4U 组各试件样品的孔隙直径分布情况。根据现有孔结构理论基础^[20]和 ASTM C457M—24 标准^[21],结合孔隙结构分布(图 4),将试件内部孔隙按孔隙直径大小分为无害孔(0~0.1 μm)、低害孔(0.1~1 μm)、有害孔(1~10 μm)、危害孔(10~100 μm)(表 3)。

从图 4(a)~(c)可以看出,在干湿循环的硫酸盐侵蚀模式下,孔结构的劣化主要表现为:随着硫酸盐的侵入,新生细微孔隙和小孔隙逐渐变大,相对有害的小中孔隙发生劣化,中大孔隙扩展成裂缝,从而导致混凝土内部结构损伤、强度下降。从表 3 可以看出,试件中无害孔占比随着干湿循环次数的增加先小幅上升后有所下降,有害孔占比先下降后上升,这是因为早期混凝土中水化产物和侵蚀产物填充了试件中较大孔隙,但是随着侵蚀产物的增加孔隙逐渐扩大,低害孔、有害孔和危害孔的占比逐渐升高,累积孔隙体积越大,强度损失越严重。硫酸盐侵蚀试验开始前,3 组试件无害孔占比分别为 51.16%、55.19% 和 58.64%,低害孔占比分别为 33.27%、

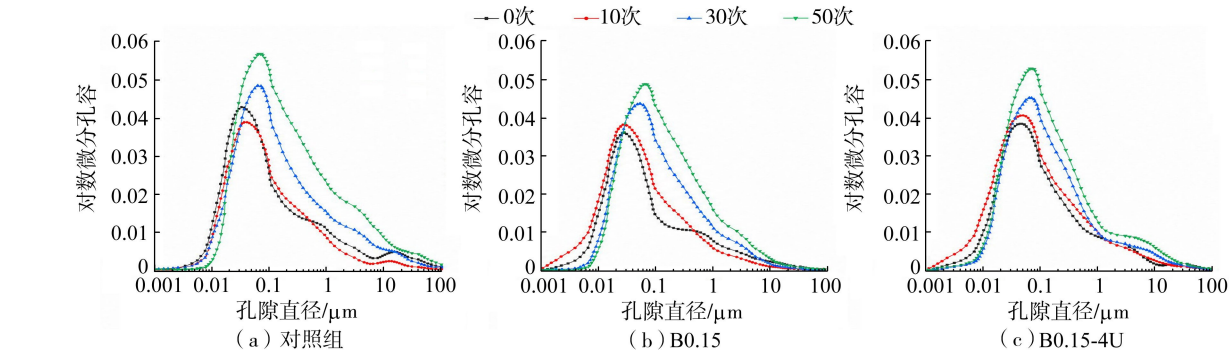


图 4 试件孔径分布随干湿循环次数的动态变化

表 3 硫酸盐干湿循环下不同试件孔隙占比					
试件编号	干湿循环次数	孔隙占比/%			
		无害孔	低害孔	有害孔	危害孔
对照组	0	51.16	33.27	10.65	4.92
	10	51.48	34.58	9.86	4.08
	30	46.67	36.34	11.56	5.43
	50	41.16	37.35	13.66	7.83
B0.15	0	55.19	32.23	8.82	3.76
	10	55.14	33.18	8.17	3.51
	30	51.20	33.72	10.35	4.73
	50	48.09	34.36	11.08	6.47
B0.15-4U	0	58.64	31.02	7.33	3.01
	10	58.78	31.38	6.91	2.93
	30	54.23	32.98	8.82	3.97
	50	53.09	33.17	9.53	4.21

32.23%和 31.02%，有害孔占比分别为 10.65%、8.82%和 7.33%，危害孔占比分别为 4.92%、3.76%和 3.01%；以 0 次干湿循环时的孔隙数据为基础，经历 50 次干湿循环后，试件的无害孔占比分别降低了 10.00、7.10、5.55 个百分点，低害孔占比分别上升了 4.08、2.13、2.15 个百分点，有害孔占比分别上升了 3.01、2.26、2.20 个百分点，危害孔占比分别上升了 2.91、2.71、1.20 个百分点。

结合图 3 和表 3 可以看出，混凝土试件的质量损失率与有害孔占比符合正相关关系，且都呈现先下降后上升的规律，这是因为早期混凝土中水化产物和侵蚀产物填充了试件中较大的孔隙，混凝土质量损失率减小，但随着侵蚀产物的增加，孔隙逐渐扩大，低害孔、有害孔和危害孔的占比逐渐上升，累积孔隙体积增大，砂浆达到破坏强度开始脱落，导致混凝土质量损失率增大。

宏观试验与孔隙分析表明，纤维和膨胀剂的加入能够提高无害孔占比，减少有害孔和危害孔占比，优化混凝土内部孔隙结构，从而提高混凝土耐硫酸盐侵蚀性能，且适量纤维和膨胀剂的共同添加对早期混凝土孔结构细化更具优势，能降低劣化速率。如图 5 所示，复掺混凝土内部存在的纤维在试件浇筑后起到了加固效果，抑制裂纹产生发展的同时也对裂缝起到了封堵作用，显著降低了混凝土内部孔

隙的连通性，增加了渗透路径的弯曲度；同时，膨胀剂早期具有自身微膨胀效应，加入膨胀剂可显著提高 60 min 后水泥浆体结构的堆积速率^[22]，在试件早期养护阶段细化了混凝土的孔隙，从而阻碍了硫酸根离子的扩散，降低了侵蚀作用。因此，复掺纤维和膨胀剂试件的抗渗性和耐侵蚀性明显提高。

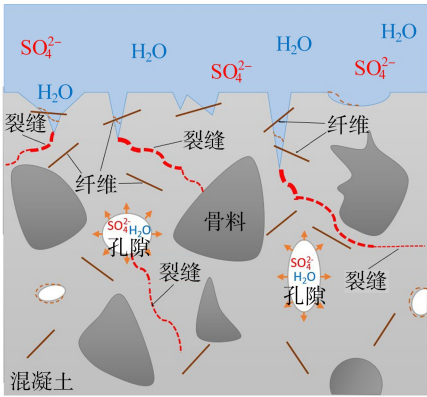


图 5 纤维-膨胀剂协同机制

2.4 微观结构分析

采用 SEM 对选取试件（对照组、B0.15 和 B0.15-4U）近表层 5 mm 横截面碎片进行微观检测，分别获取试件在硫酸盐侵蚀试验前后的照片，如图 6 所示。

从图 6(a)(c)(e)所呈现的未经历硫酸盐侵蚀的混凝土试件原生微观形态可知，对照组试件内部微观结构较为疏松且存在较多孔隙和细微裂缝，B0.15 组和 B0.15-4U 组试件中纤维在基体中随机取向，形成了大量微增强肋。B0.15-4U 组中纤维和膨胀剂在混凝土基体中均匀分布，形成了均匀复合体系，纤维表面附着的混凝土基体水化产物表明纤维与基体具有良好的黏结作用，使纤维在破坏过程中承担剪切应力，从而提高了材料初期的整体强度。

由图 6(b)(d)(f)可知，经历 50 次硫酸盐干湿循环后，对照组试件内部出现了大量针状和短棒状的微观特征，由于混凝土中的孔隙水逐渐蒸发，硫酸根离子侵入与基体反应，从而形成了石膏、C-S-H 凝胶和钙矾石共存的水化腐蚀产物体系^[23]，干湿循环

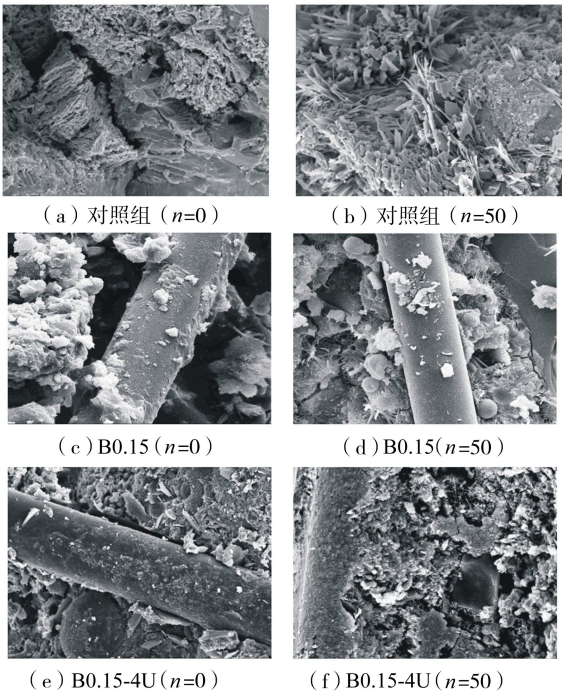


图 6 试件干湿循环前后 SEM 图像

次数越多,腐蚀产物不断增多,侵蚀产物堆积使得原生裂缝扩展、新裂缝生成,致使混凝土受损劣化。B0.15 和 B0.15-4U 组试件中的侵蚀产物明显减少,这是因为试件在受侵蚀过程中应力分散到纤维单丝上,从而有效提高了混凝土的抗压强度和韧性。同时,纤维的存在切断了微裂缝扩展通路以及裂缝间的连接,进一步抑制了裂缝的产生和发展。值得一提的是,无论是侵蚀前还是侵蚀后,B0.15 组试件中纤维与基体的结合都不如 B0.15-4U 组试件紧密,这可能是由于膨胀剂在基体中起到了“黏结剂”的作用,使纤维与基体间孔隙减少,从而减少了硫酸盐侵蚀通道。

为了更直观地解释上述协同效应,拍摄了 5000 倍的纤维和掺膨胀剂混凝土基体的 SEM 图像,如图 7 所示。从图 7 可以看出,膨胀剂使纤维-基体接合面的间隙更小,界面过渡更平滑。膨胀剂自膨胀时会对纤维产生压缩力,缩小了界面过渡区的间隙,并在纤维周围提供一定的应力,从而优化界面结合,添加适量的膨胀剂可以改善纤维的黏结性。协同效应的产生是由于纤维可以将膨胀和自膨胀转

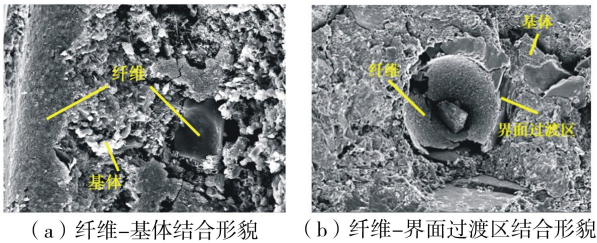


图 7 纤维与掺膨胀剂混凝土结合效果的 SEM 图像

化为被动约束,在此期间膨胀剂的有效性得到增强,而膨胀剂通过触发主动约束来提供自膨胀,同时纤维的增益效果也得到提升。

3 结 论

a. 复掺 0.15% 掺量的玄武岩纤维和 4% 掺量的 U 型膨胀剂的混凝土抗侵蚀整体性能最优,50 次干湿循环后试件外观保持完整,无浆体脱落,仅有部分棱角出现少量缺损,且其质量损失率仅为 6.12%,较对照组降低了 35.8%。

b. 复掺玄武岩纤维和 U 型膨胀剂的混凝土早期孔隙结构最佳,50 次干湿循环后试件无害孔占比达 58.64%,无害孔占比仅降低 5.55 个百分点,低害孔、有害孔和危害孔的增幅均小于对照组。孔结构细化和孔隙连通性降低是混凝土抗渗性和耐硫酸盐侵蚀性能提升的重要原因。

c. 适量添加自膨胀材料(如 U 型膨胀剂)能够使纤维-基体的界面过渡区间隙减小,改善纤维与基体之间的黏结性。同时,纤维和膨胀剂通过协同作用,发挥互补效应,提升 U 型膨胀剂的有效性和纤维抗裂效果,从根本上抑制混凝土劣化发展。

参考文献:

- [1] 王少伟,徐应莉,朱平华,等. 溶蚀作用下混凝土层面劈裂抗拉强度试验研究[J]. 水利水电科技进展,2022,42(1):27-32. (Wang Shaowei, Xu Yingli, Zhu Pinghua, et al. Experimental study on splitting tensile strength of concrete layer interface under dissolution effects [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022,42(1):27-32. (in Chinese))
- [2] 霍文龙,王泉华. GFRP 后锚固混凝土板抗爆性能及损伤评估研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(2):88-97. (Huo Wenlong, Wang Xiaohua. Research on blast resistance performance and damage assessment of GFRP post anchored concrete slabs [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(2):88-97. (in Chinese))
- [3] 吴佳雯,王少伟,刘毅,等. 冻融溶蚀耦合作用下混凝土劣化机理及预测模型[J]. 水利水电科技进展,2025,45(6):53-60. (Wu Jiawen, Wang Shaowei, Liu Yi, et al. Mechanism and prediction model of concrete deterioration under coupled freeze-thaw and leaching action [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025,45(6):53-60. (in Chinese))
- [4] 高猛,姚占全,王海龙. 混合砂混凝土加速盐侵蚀作用的孔隙结构分析[J]. 排灌机械工程学报,2025,43(1):53-59. (Gao Meng, Yao Zhanquan, Wang Hailong. Study on pore structure of mixed sand concrete to

- accelerate salt erosion [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2025, 43(1): 53-59. (in Chinese))
- [5] Bensted J. Mechanism of thaumasite sulphate attack in cements, mortars and concretes [J]. ZKG International, 2000, 53(12): 704-709.
- [6] 张秋英, 李兆, 王健祺, 等. 南水北调东线湖泊硫酸盐污染现状与成因分析: 以东平湖为例 [J]. 环境科学学报, 2023, 43(7): 48-55. (Zhang Qiying, Li Zhao, Wang Jianqi, et al. Sulfate pollution and cause analysis in a lake along the South-North Water Transfer Project East Line: a case study of Dongping Lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023, 43(7): 48-55. (in Chinese))
- [7] 王英浩, 景晓红. 某矿副井混凝土井壁服役环境分析 [J]. 内蒙古科技大学学报, 2016, 35(1): 8-10. (Wang Yinghao, Jing Xiaohong. Analysis on concrete lining service environment of the auxiliary shaft [J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology, 2016, 35(1): 8-10. (in Chinese))
- [8] 甘磊, 吴健, 沈振中, 等. 硫酸盐和干湿循环作用下玄武岩纤维混凝土劣化规律 [J]. 土木工程学报, 2021, 54(11): 37-46. (Gan Lei, Wu Jian, Shen Zhenzhong, et al. Deterioration law of basalt fiber reinforced concrete under sulfate attack and dry-wet cycle [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(11): 37-46. (in Chinese))
- [9] 陈红莉. 干湿循环下混凝土受硫酸盐腐蚀断裂性能试验研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2016.
- [10] Cai Xiaopei, Zhang Yanrong, Gao Liang, et al. Deterioration of cement asphalt pastes with polymer latexes and expansive agent under sulfate attack and wetting-drying cycles [J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 109: 104252.
- [11] Xu Ganggang, Wang Xiaodong, Wang Hai. Experimental study on sulfate attack resistance of cement slurry with UEA expansive agent [J]. E3S Web of Conferences, 2019, 136: 03012.
- [12] 郑君, 张信龙, 郭瑞晋, 等. 高温后冻融玄武岩纤维再生混凝土力学性能 [J]. 混凝土, 2025(3): 46-50. (Zheng Jun, Zhang Xinlong, Guo Ruijin, et al. Mechanical behaviour of freeze-thaw basalt fiber reinforced recycled aggregate concrete after high temperature [J]. Concrete, 2025(3): 46-50. (in Chinese))
- [13] 李艺, 张爽. 干湿循环作用下混杂纤维混凝土抗硫酸盐侵蚀性能 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2016, 37(6): 895-898. (Li Yi, Zhang Shuang. Resistance to sulfate attack of hybrid fiber concrete under dry-wet cycles [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2016, 37(6): 895-898. (in Chinese))
- [14] 崔宏瑞, 孟祥瑞, 程详, 等. 水玻璃-膨胀剂-粉煤灰水泥基复合注浆材料研发与试验 [J]. 中国矿业, 2025, 34(8): 169-177. (Cui Hongrui, Meng Xiangrui, Cheng Xiang, et al. Research and test of sodium silicate-expansion agent-fly ash cement-based composite grouting material [J]. China Mining Magazine, 2025, 34(8): 169-177. (in Chinese))
- [15] 马建宏, 王琪, 焦华喆, 等. 纤维聚合物柔韧混凝土微观孔隙结构特征与增强机理 [J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(6): 1157-1170. (Ma Jianhong, Wang Qi, Jiao Huazhe, et al. Microscopic pore structure characteristics and strengthening mechanism of fiber polymer flexible concrete [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(6): 1157-1170. (in Chinese))
- [16] 徐惠. 硫酸盐腐蚀下混凝土损伤行为研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
- [17] Zhao Nan, Wang Sheliang, Quan Xiaoyi, et al. Behavior of fiber reinforced cementitious composites under the coupled attack of sulfate and dry/wet in a tidal environment [J]. Construction and Building Materials, 2022, 314: 125673.
- [18] Liang Ninghui, Mao Jinwang, Yan Ru, et al. Corrosion resistance of multiscale polypropylene fiber-reinforced concrete under sulfate attack [J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 16: e01065.
- [19] Kumar R, Bhattacharjee B. Assessment of permeation quality of concrete through mercury intrusion porosimetry [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(2): 321-328.
- [20] 吴中伟. 混凝土科学技术近期发展方向的探讨 [J]. 硅酸盐学报, 1979, 7(3): 262-270. (Wu Zhongwei. An approach to the recent trends of concrete science and technology [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 1979, 7(3): 262-270. (in Chinese))
- [21] American Society for Testing Materials. Standard test method for microscopical determination of parameters of the air-void system in hardened concrete; ASTM C457M—24[S]. West Conshohocken: ASTM, 2024.
- [22] Jia Zijian, Zhang Zedi, Jia Lutao, et al. Effect of different expansive agents on the early age structural build-up process of cement paste [J]. Cement and Concrete Composites, 2023, 144: 105282.
- [23] Sarkar N, Chaudhuri B B. An efficient differential box-counting approach to compute fractal dimension of image [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1994, 24(1): 115-120.

(收稿日期: 2025-07-15 编辑: 俞云利)

细颗粒含量对间断级配土侵蚀的影响

李东锋^{1,2}, 许增光¹, 高 惠², 王党伟², 丁子玥³, 曹 成¹

(1. 西安理工大学水利水电学院; 2. 中国水利水电第三工程局有限公司; 3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司)

摘要:针对渗流作用下间断级配土内部侵蚀导致的涌砂和结构变形破坏问题,采用土体内部渗流侵蚀试验装置对细颗粒含量为 20%、30% 和 40% 的间断级配土开展了不同水力梯度下的侵蚀试验,基于离散元法研究了颗粒流失、接触力链和孔隙率的变化过程,探究了间断级配土的细观侵蚀规律。结果表明:细颗粒含量越高的试样侵蚀速率越快,侵蚀运动越剧烈;低水力梯度下,出现渗透挤密现象导致孔隙率减小,且孔隙率的变化具有空间差异性;细颗粒含量影响土体内部颗粒间的接触方式,是颗粒流失的诱因,而接触力链的形式变化和颗粒流失的共同作用导致了土体侵蚀破坏。

关键词: 间断级配土; 渗流侵蚀; 细颗粒含量; 离散元模拟

Effect of fine particle content on erosion of gap-graded soils//Li Dongfeng^{1,2}, Xu Zengguang¹, Gao Hui², Wang Dangwei², Ding Ziyue³, Cao Cheng¹ (1. School of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology; 2. Sinohydro Engineering Bureau 3 Co., Ltd.; 3. POWERCHINA Northwest Engineering Corporation Limited)

Abstract: To address the problems of sand boiling and structural deformation failure induced by internal erosion in gap-graded soils under seepage action, erosion tests under different hydraulic gradients were conducted on gap-graded soil specimens with fine particle contents of 20%, 30%, and 40% using an internal seepage erosion apparatus. Based on the discrete element method, the evolution processes of particle loss, contact force chains, and porosity were analyzed, and the mesoscopic erosion characteristics of gap-graded soils were explored. The results show that specimens with higher fine particle contents exhibit higher erosion rates and more intense erosion processes. Under low hydraulic gradients, seepage-induced compaction occurs, resulting in a decrease in porosity, and the variation of porosity exhibits spatial heterogeneity. The fine particle content affects the contact modes among particles within the soil and serves as a triggering factor for particle loss. The combined effects of contact force chain transformation and particle loss lead to erosion-induced failure of the soil.

Key words: gap-graded soil; seepage erosion; fine particle content; discrete element simulation

间断级配土作为一种分布于土石坝、堤坝和路基等工程的土料,其骨架通常以大尺寸的砾石作为结构性支撑,尺寸较小的砂粒和粉粒等细颗粒则自由堆积在砾石骨架孔隙中^[1-3]。当外部渗流场作用于间断级配土体时,孔隙水压力会驱动细颗粒沿粗颗粒孔隙通道发生迁移,并从渗流出口逐渐流失,该过程称为细颗粒侵蚀作用^[4]。由于间断级配土中粗细颗粒分布不连续,细颗粒更容易在渗流作用下发生运移和流失。细颗粒侵蚀不仅会改变土体内部结构,还可能引起土体变形,是导致土石坝渗漏与失稳的重要原因之一。因此,研究细颗粒含量对间断级配土侵蚀演化规律的调控机制,对于建立非均质土体渗流灾变预警模型以及优化抗渗加固设计具有

重要意义^[5]。
为揭示土体渗流侵蚀过程中细颗粒运移机制,学者们开展了多样化的侵蚀试验^[6-7]。早期主要通过传统侵蚀试验研究细颗粒流失问题,如徐烁等^[8]根据骨架的临界细颗粒含量大小对间断级配土体进行分类,并通过试验研究了间断级配砂土渗流侵蚀问题;董辉等^[9]进行了非稳定渗流条件下宽级配砂砾土细粒迁移试验,通过收集流失细颗粒来判断土体内部的稳定性;王晓摇等^[10]借助饱和渗流颗粒迁移试验,研究了粗细颗粒组成的碎石土细颗粒迁移特征及优先流形成路径;Liu 等^[11]研究了围压和细颗粒含量对欠填充间断级配土内渗流的影响机制。

随着测试技术的发展,倪小东等^[12]引入多色填充砂示踪方法实现了对土样中填充细颗粒运移顺序和方向进行判别,从而直观表征了侵蚀过程。此外,透明土模型试验也被用于渗流侵蚀研究,如 Wang 等^[13]采用透明土模拟实际土体,研究了地基中粗细颗粒交界面接触侵蚀的启动和发展过程。现有研究已初步揭示土体渗流侵蚀中细颗粒的运移规律,但细观尺度下细颗粒与骨架颗粒间的碰撞、摩擦等力学行为对运移过程的影响机制仍不明确,如何表征这一细观力学过程仍是当前研究的难点^[14]。

为突破试验观测的技术瓶颈,数值模拟逐渐成为研究渗流侵蚀细观机制的重要手段^[15-16]。吴梦喜等^[17]对一个典型大坝设计方案进行了计算分析,提出了侵蚀对大坝应力变形影响的有限元模拟方法;Kimoto 等^[18]使用渗流-变形耦合方法模拟了由上向下的渗流破坏,考虑了细颗粒的内部侵蚀。有限元法将细颗粒含量简化为均质参数,但无法反映土体颗粒运移过程中颗粒细观参数对侵蚀的影响规律。相比之下,Nie 等^[19]在离散元模拟中探讨了粒径比和细颗粒含量对间断级配土体模型的影响,提出了一种新的稳定评价准则,但仅适用于低细颗粒含量的理想工况;Nguyen 等^[20]应用计算流体力学-离散元(CFD-DEM)耦合方法,研究了颗粒碰撞和流体受到颗粒阻挡时的能量转化;李伟一等^[21]对渗流前后的土体模型进行三轴模拟试验,研究了不同围压、细颗粒含量和水力梯度下的细颗粒流失率等参数变化规律。尽管已有研究通过试验与 CFD-DEM 耦合方法揭示了间断级配土侵蚀的宏观规律与部分细观现象,但侧重于侵蚀结果的描述或理想化模型下的颗粒运移,对于细颗粒含量如何通过调控土体内部细观结构(如力链网络、接触演化)来主导侵蚀过程动态演化的机制仍缺乏系统阐释^[22-23]。

本文采用自主研发的土体内部侵蚀试验装置对不同细颗粒含量间断级配土分级施加水头开展内部侵蚀试验研究,通过细颗粒累计侵蚀率、颗粒空间分布特征揭示细颗粒含量对间断级配土内部侵蚀的宏观影响,并基于离散元法,从颗粒流失、接触力链与孔隙率变化过程探究了不同细颗粒含量对间断级配土内部侵蚀的影响规律,以期评价间断级配土内部侵蚀风险提供理论依据。

1 侵蚀试验

1.1 试验材料

采用 0.5~1 mm 细颗粒和 5~10 mm 粗颗粒配置成级配不连续的间断级配土作为试验材料,其中粗颗粒作为骨架,细颗粒为骨架间的填充物。将细颗粒质量占总质量的百分比定义为细颗粒含量,共设置 3 种工况对细颗粒含量分别为 20%、30% 和 40%的理想间断级配土(试样 C1、C2、C3)进行渗流侵蚀试验,颗粒级配曲线和试验材料如图 1 所示。

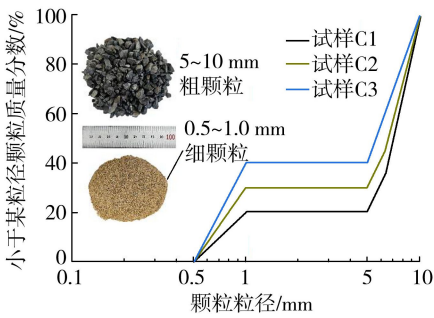


图 1 间断级配土颗粒级配曲线

试验前,采用常用的几何判定准则(Kézdi 法^[24])对不同细颗粒含量的间断级配土进行稳定性评价,结果如表 1 所示,可知细颗粒含量为 20%、30%、40%的试样均为渗透不稳定土。

1.2 试验装置及方案

采用自主研发的土体内部侵蚀试验装置(图 2)开展试验。该试验装置主要由水箱、土体侵蚀容器(直径 40 mm,高度 80 mm)、收集装置等组成,由透明的亚克力玻璃制作,具有良好的可视性,通过摄像设备实时观测细颗粒侵蚀情况,控制水箱的高度调整水流压力,在入口处铺设鹅卵石以提供缓存作用,保证入渗均匀性。

为探究不同细颗粒含量对间断级配土内部侵蚀的影响规律,开展不同水压力作用下的侵蚀试验。将粗细颗粒均匀混合,分 4 次进行填筑,每次填充高度为 20 mm,保证试样均匀性。参照文献^[25],水力梯度从 0 加载至 6,每次增加 0.5 个水力梯度开展试验,持续增加水压力使试样中细颗粒发生迁移,直至流出的水流澄清,试验结束。同一工况下,进行 3 次平行试验,试验结果取平均值以减小误差。

表 1 间断级配土内部稳定性判定

试样编号	细颗粒含量/%	D_{15c}/mm	d_{85f}/mm	D_{15c}/d_{85f}	判定结果
C1	20	6.03	0.95	6.35	不稳定
C2	30	5.95	0.94	6.33	不稳定
C3	40	5.86	0.91	6.44	不稳定

注: D_{15c} 、 d_{85f} 为通过筛分后粗、细颗粒部分累计质量百分数分别为 15% 和 85% 时对应的粒径,两者比值大于或等于 4 时判定为不稳定土。

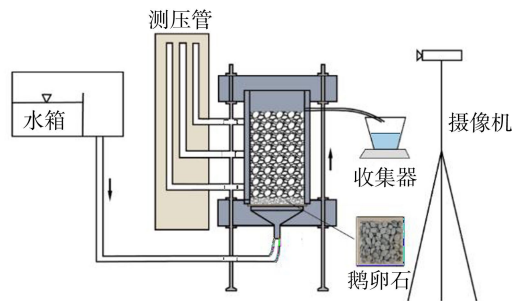


图2 土体内部侵蚀试验装置

1.3 试验结果与分析

1.3.1 细颗粒侵蚀规律

细颗粒累计侵蚀率为侵蚀的细颗粒质量与试样初始总重量之比,是反映间断级配土侵蚀程度的重要参数。图3为3种试样细颗粒累计侵蚀率,可以发现,3种试样的累计侵蚀率随水力梯度的变化而不同,试样C2和C3在水力梯度为0.5时出现细颗粒流失,而试样C1在水力梯度为1时才出现细颗粒流失。在水力梯度相同时,试样C3侵蚀程度最大,最高累计侵蚀率为10.72%;而试样C1侵蚀程度最低,最高累计侵蚀率为8.59%。结果表明,细颗粒含量的增加会加速侵蚀速率,从而影响其渗透稳定性。3种试样的细颗粒累计侵蚀率随水力梯度的增大而增大,根据侵蚀速率变化规律将侵蚀过程分为3个阶段:①细颗粒快速流失阶段。此阶段在水力梯度较小($i \leq 2$)时发生,随着水压力增大,细颗粒在粗颗粒形成的骨架中移动,细颗粒快速流失,此时水流较浑浊,试样内部细颗粒分布不断变化。②骨架重塑阶段。随着水力梯度继续增大,粗颗粒发生移动,骨架出现重塑现象,细颗粒流失速率开始减慢。③相对稳定阶段。此阶段骨架重塑基本完成,已形成渗流通道,水流较为澄清,仅少部分细颗粒被带出。

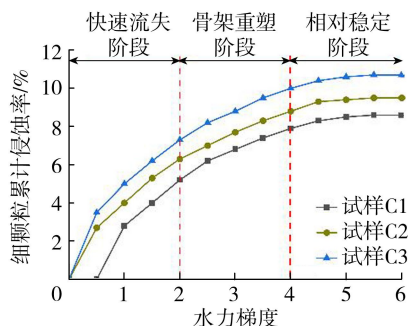
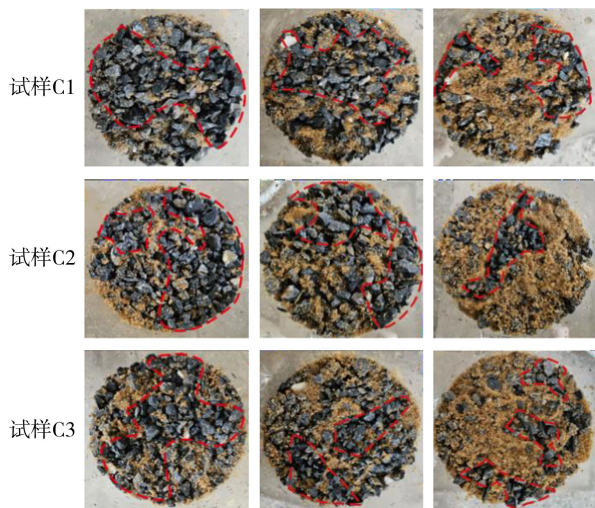


图3 试样细颗粒累计侵蚀率

1.3.2 不同深度处细颗粒分布

图4为试验结束后距底部20、40、60 mm处试样横截面。红色为试样的侵蚀区域,可以发现试样的中部和底部侵蚀更为严重,大量细颗粒随着水压力的增大而流失。试样不同的区域侵蚀范围不同,表明细颗粒侵蚀发生和发展具有空间随机性。

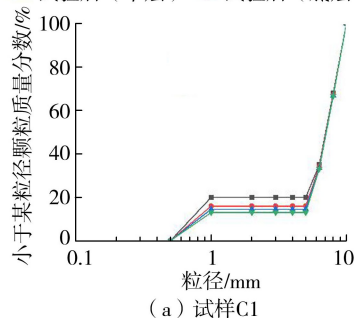


(a) 距底部20 mm (b) 距底部40 mm (c) 距底部60 mm

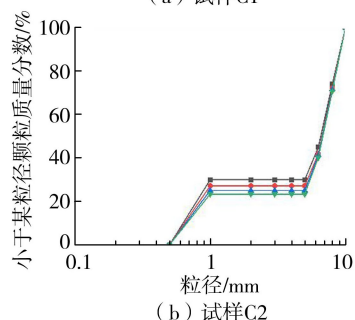
图4 不同深度处试样侵蚀截面

试验结束后,分层取出试样并烘干筛分。试验后上层、中层和底层颗粒级配曲线如图5所示。可以发现,土体侵蚀后的颗粒级配曲线均在原试样级配曲线的下方,而细颗粒部分变化较大,粗颗粒部分变化较小。说明土体内部不同区域的侵蚀程度不同,细颗粒流失较多,而粗颗粒流失较少。在向上渗

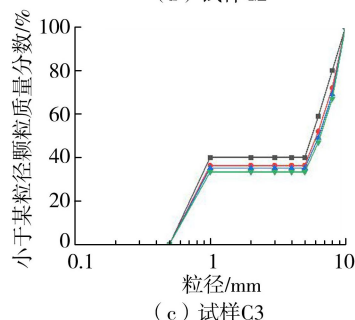
→ 试验前 → 试验后（上层）
→ 试验后（中层） → 试验后（底层）



(a) 试样C1



(b) 试样C2



(c) 试样C3

图5 试验前后试样颗粒级配曲线

流作用下,试样底部因承受更大自重而结构相对不稳定,水流优先扰动并携带底部不稳定孔隙中的细颗粒运移,部分向上运移的细颗粒在途中被骨架拦截,未能充分补充至顶部,侵蚀程度最终形成“自下而上递减”的空间分布特征。3组试验土体级配曲线形状基本没有发生变化,说明侵蚀导致的细颗粒流失未改变原有试样的级配,不同空间区域的细颗粒流失状态基本一致。

2 间断级配土侵蚀离散元模拟研究

2.1 模型构建

本文采用 PFC^{3D} 软件,通过设置参数对颗粒间的接触力和位移进行求解,从而构建 DEM 离散元模型,模型构建流程如下:设置参数(摩擦系数、颗粒密度、颗粒粒径、颗粒重叠比、墙体模量)→设置计算区域→生成墙体模型→颗粒填充→运行模型→模型平衡。

根据渗流侵蚀试验的土体颗粒级配构建一个直径 40 mm、高 80 mm 的非线性 Hertz-Mindlin 接触模型,由于颗粒最大与最小粒径的比值($d_{\max}/d_{\min}$)较大,PFC^{3D} 软件数值计算速度较慢^[26],因此模拟分析中将 0.5~1.5 mm 的细颗粒简化为 1.0~1.2 mm、5~10 mm 的粗颗粒简化为 8.3~8.5 mm。其中颗粒摩擦系数设为 0.5,重叠比为 0.18,密度为 2500 kg/m³,墙体模量为 100 MPa,泊松比为 0.3^[27-29]。利用 MesoMR23-060H-I 型核磁共振仪测得 20%、30%、40%细颗粒含量土样的初始孔隙率分别为 0.26、0.24、0.21。假设颗粒为球形刚体,构建不同细颗粒含量的离散元模型如图 6 所示。

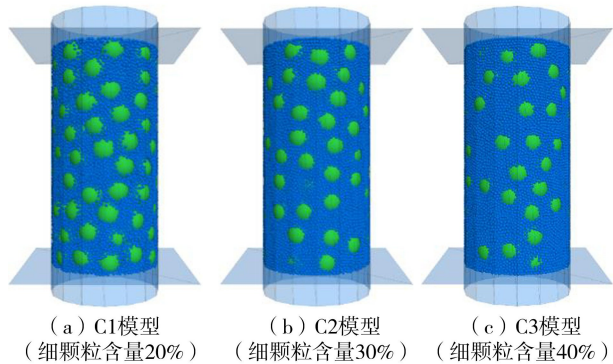


图 6 不同细颗粒含量的试样离散元模型

2.2 模型设置

本文基于每个流体单元所含颗粒大于 100 个的原则对原型试样的计算模型进行网格剖分^[30](图 7),通过控制水压力来模拟不同的水力梯度条件,水力梯度为 1~6,流体单元每计算 0.1 s 增加一个水力梯度。PFC^{3D} 计算模型时间步长设置为

2.0×10^{-7} s,CFD 时间步长设置为 2.0×10^{-5} s,每 0.02 s 保存一次数据,当土体模型内部的颗粒完全被水流冲出时,计算结束。

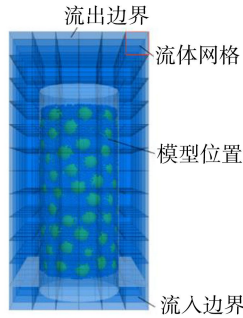


图 7 流体单元网格剖分

为研究渗流作用下不同细颗粒含量土样的内部颗粒堆积情况和接触动态变化过程,在模型内不同位置放置半径为 17 mm 的测量球(图 8),按照文献[31]的方法,对孔隙率、接触数目、颗粒位移等变量进行监测。

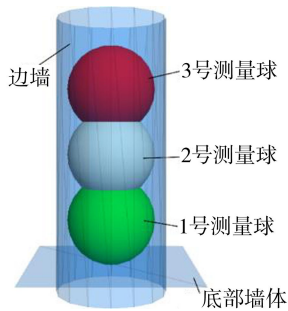


图 8 测量球位置

2.3 模拟结果与分析

2.3.1 颗粒流失变化过程

图 9 为不同细颗粒含量模型颗粒流失过程,可以发现,在 0.1~0.3 s 时段,C1 模型内部细颗粒在粗颗粒骨架间运动,具有明显的纵向迁移行为,在计算时刻 0.4 s 时,模型整体上升且颗粒逐层流出容器。C2 和 C3 模型在 0.1 s 时细颗粒流出容器,且 C3 模型表层颗粒运动更剧烈,细颗粒流失更多。在 0.2 s 以后,3 种模型内部细颗粒减少,粗颗粒重新排列,细颗粒在孔隙内部重新填充,模型内颗粒整体上升,粗颗粒携带细颗粒逐层冲出容器边界,这是由于模型顶部为自由流出边界,底部为固定壁面,向上渗流力克服颗粒自重与摩擦力,推动颗粒整体运动,模拟了实际土体内部侵蚀破坏的过程。C1、C2、C3 模型试样的底层抬升高度基本一致,但细颗粒含量的增加加速了细颗粒的运动,提前了模型整体上升的时间节点。随着水力梯度的增大,出现粗颗粒流出容器的现象,说明破坏发生,但不同细颗粒含量的模型破坏时间不一致,C1、C2、C3 模型分别在 0.3、0.3、0.2 s 发生破坏。此过程为骨架重塑阶段,细颗

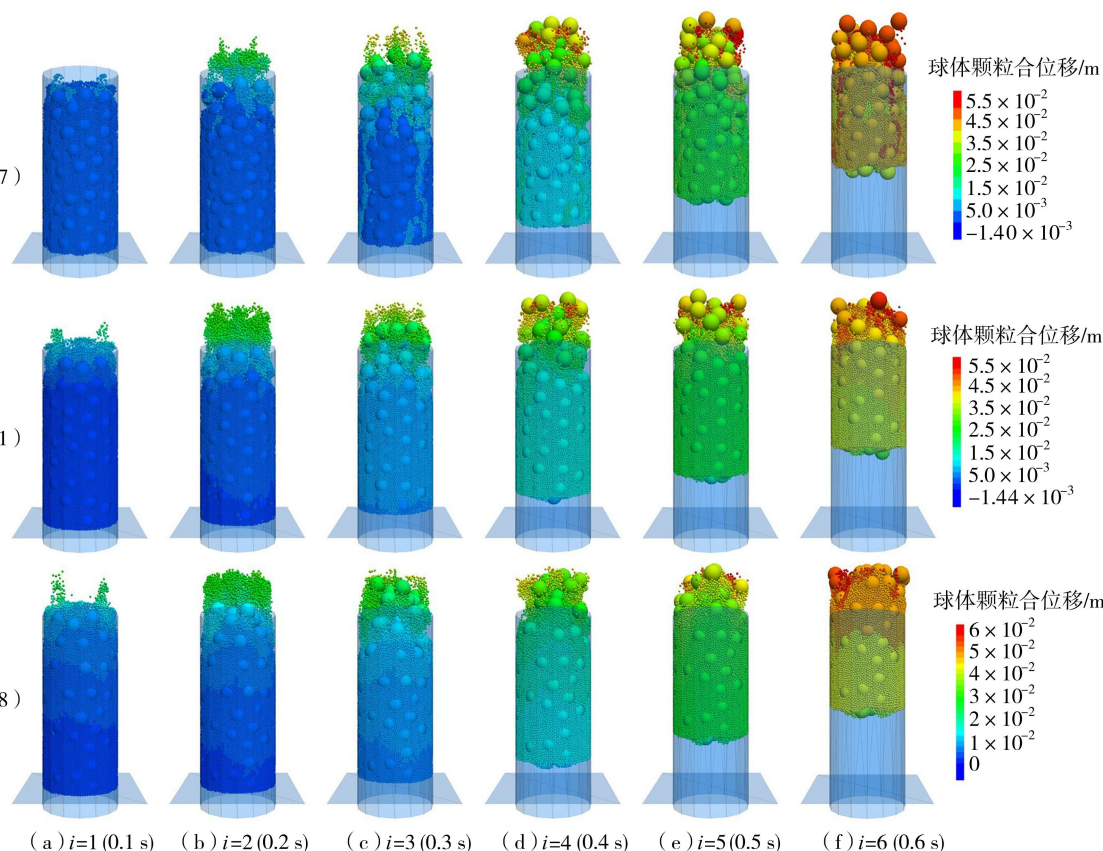


图9 不同细颗粒含量模型颗粒流失过程

粒流失速率减小,试样内部粗颗粒重新排列。值得注意的是,数值计算是在理想条件下进行的,因此侵蚀过程中粗颗粒流失较多,而试验中未发现粗颗粒大量流失。通过上述分析,以粗颗粒冲出圆柱形容器边界作为临界破坏状态,将间断级配土的颗粒流失过程分为两个阶段,在临界破坏发生前,试样内部颗粒出现侵蚀和表层细颗粒流失,在临界破坏发生后,粗颗粒在细颗粒带动下流失,试样整体上升破坏。侵蚀首先沿阻力最小的连通孔隙发生,细颗粒含量越高,可参与运移的颗粒越多,渗流路径越多,从而加速了整体流失进程,表明细颗粒迁移具有优先路径的特性。

2.3.2 接触力链变化过程

接触力链是颗粒之间相互接触形成的抵抗水流作用的内部结构,可以有效反映颗粒间的受力和接触情况。C1、C2 和 C3 模型由于细颗粒含量的不同,初始力链结构也不同,C1 模型粗颗粒之间形成的接触较多,而 C2 和 C3 模型细颗粒之间形成的接触较多。图 10 为不同细颗粒模型接触力链变化过程,在水力梯度为 1~3 时,C1 模型表层处仅有少量力链,是试样以单颗粒的形式流出过程中相互接触所形成的;之后粗颗粒移动导致细颗粒在骨架间重新填充,力链形式发生改变,颗粒之间接触增多,出口处出现伞状力链组,说明此时以颗粒群形式流出。

细颗粒含量的增加会加速颗粒之间的力链形式的变化,C2 和 C3 模型在细颗粒流失阶段已经出现伞状力链,随着水力梯度的增大,所有模型的力链大量涌出,呈现整体流失特征。

C1、C2 和 C3 模型内部接触分别为粗颗粒-粗颗粒接触(强接触)、粗颗粒-细颗粒接触(弱接触)和细颗粒-细颗粒接触(弱接触)。不同接触方式导致形成的力链组成不同,从而影响不同水力梯度下土体内部侵蚀情况。图 11 为 3 种模型接触数目随时间变化曲线,不同接触方式的数目变化情况与土体侵蚀阶段有关(图中阶段 1 为固结沉降阶段,阶段 2 为细颗粒流失阶段,阶段 3 为骨架颗粒流失阶段,阶段 4 为整体上升阶段)。C1 模型由于细颗粒含量较少,初始孔隙率大,在水压力作用下颗粒整体相互挤压,弱接触数目明显增加,强接触数目变化较小,总接触数目持续增长,为固结沉降阶段,见图 11(a);在细颗粒流失阶段,大量细颗粒运移,强接触减小,向弱接触转化;在水力梯度增大至 3 之后,侵蚀速率加快,粗颗粒流失,主要为弱接触。如图 11(b)(c)所示,C2 模型与 C3 模型的各种类型力链数目变化趋势基本一致,从零时刻开始,两种模型的接触数目都出现了骤降,由于 C3 模型内部弱接触数目更多,C3 模型骤降的幅度更大,模型内部力链组成破坏更为严重。随着水流的持续流入,模型内部颗粒不断移

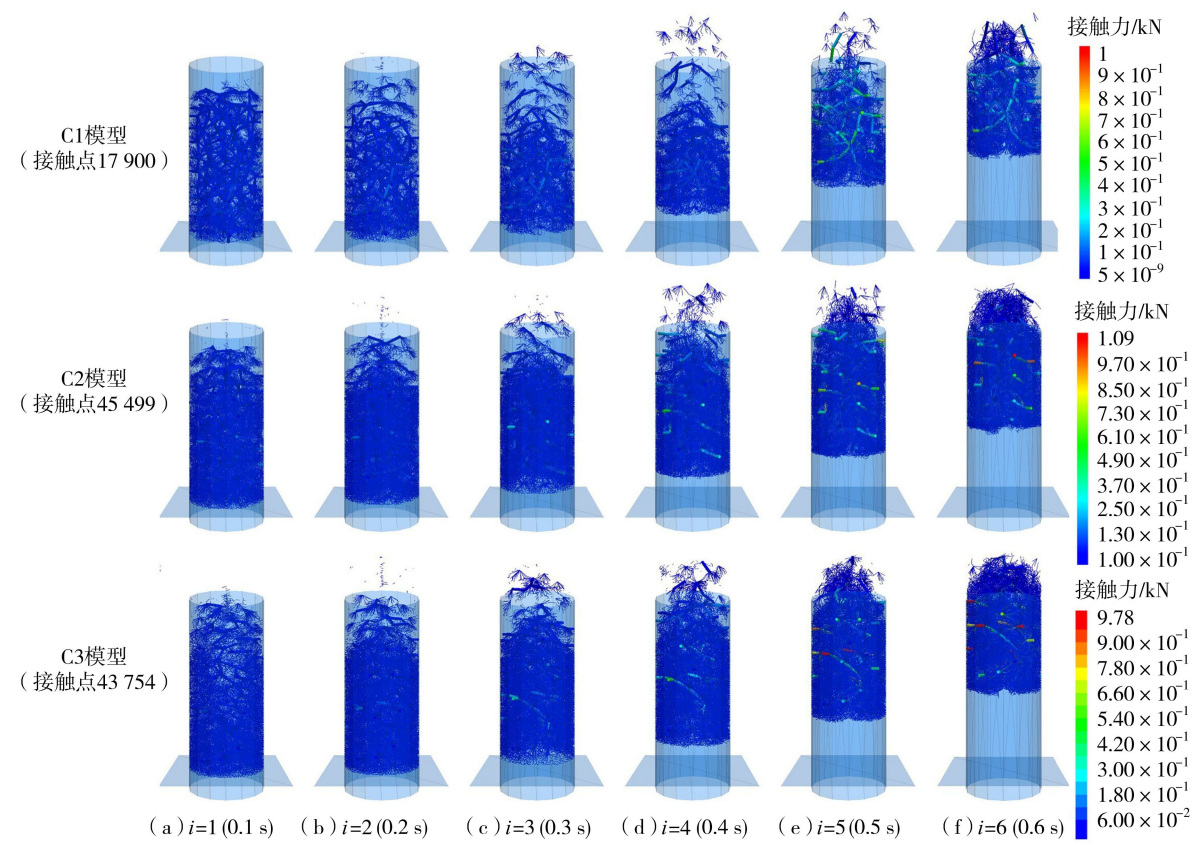


图 10 不同细颗粒含量模型接触力链变化过程

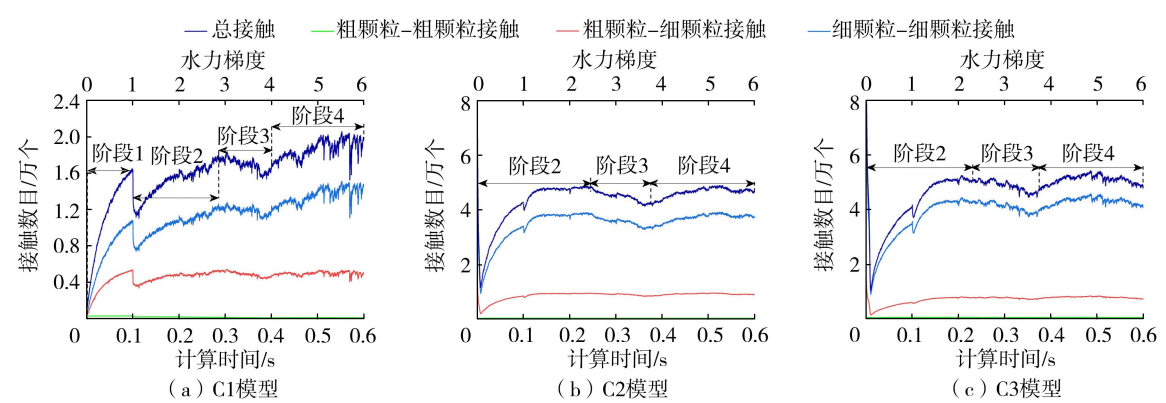


图 11 不同模型颗粒间的接触数目随时间变化曲线

动,C2 和 C3 模型内部总接触数目逐渐增多,直至接触增长稳定时与模型的临界破坏时刻相对应,而 C3 模型在水力梯度为 2 时,总接触数目变化趋势出现变化,说明细颗粒含量增加通过增大弱接触数目导致模型破坏时刻提前。C2 和 C3 模型由于细颗粒含量相对较多,初始孔隙率较小,未出现固结沉降。接触与力链的演变规律表明,细颗粒含量通过控制弱接触数目影响力链网络的初始稳定性,随后在渗流作用下弱接触断裂、颗粒重排与力链动态重构,高细颗粒含量加剧了该过程,从而导致结构失稳提前。

2.3.3 孔隙率变化过程

如图 12 所示,不同细颗粒含量试样的孔隙率变化曲线不同,同一模型的不同区域孔隙率也不同,具

有空间差异性。可以发现,C1、C2 和 C3 模型的表层孔隙率最先增大,C1 模型增加幅度较大,C2 和 C3 模型由于细颗粒含量较多,表层孔隙率增加幅度不大。在计算时间 0.2 s 之前,低水力梯度作用下,出现渗透挤密现象,位于中层和底层区域的孔隙率减小。在 0.2 s 后,粗颗粒流失,试样内部进入骨架重塑阶段,平均孔隙率开始大幅度增大,其中中层和底层孔隙率贡献较大,是因为试样出现了整体上升。这表明同一细颗粒含量的试样在水流侵蚀作用下,不同区域颗粒之间作用效果具有空间差异性,而细颗粒在试样中填充越不均匀,这种差异性越明显。孔隙率的时空变化反映了侵蚀过程中土体内部结构的局部调整与整体失稳,是细颗粒迁移与力链重构

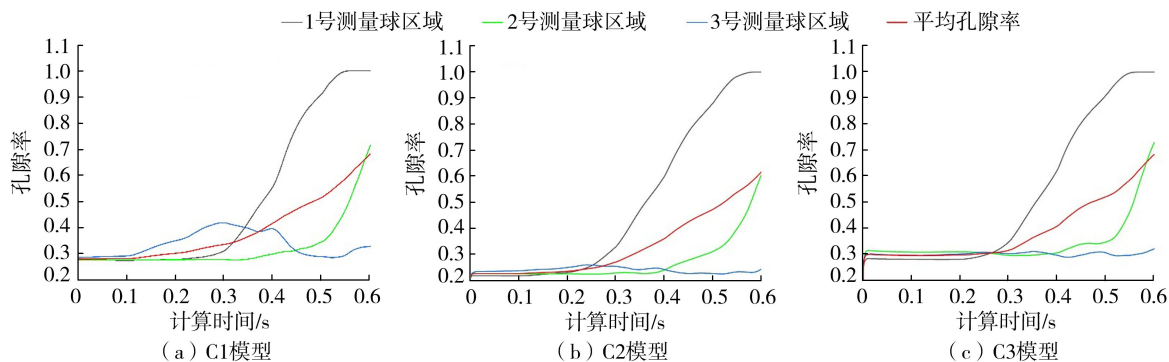


图 12 不同细颗粒含量孔隙率变化曲线

共同作用的宏观表现。

对比不同细颗粒含量模型的平均孔隙率变化曲线可知,细颗粒含量较多的 C2 和 C3 模型在初始水力梯度为 0 时存在突变现象,C3 模型变化更剧烈。这表明细颗粒含量的增加导致初始侵蚀程度更大,因此 C3 模型突变后平均孔隙率最大,在渗流力较小时,中部和底部出现渗透挤密现象,孔隙率短暂下降,随着渗流力的增大,孔隙率也开始持续增大。

3 讨论

细颗粒含量是判定土体稳定性最常用的参数。根据细颗粒在粗颗粒孔隙中的填充情况,将颗粒的堆积情况分为未满足堆积、满足堆积和过满足堆积 3 种形式,其中满足堆积又根据粗细颗粒分布是否均匀分为均匀满足和均匀不满足堆积两种形式,假定模型内部粗颗粒都为矩形排列,用不同颜色区分粗颗粒和细颗粒,3 种堆积形式如图 13 所示。

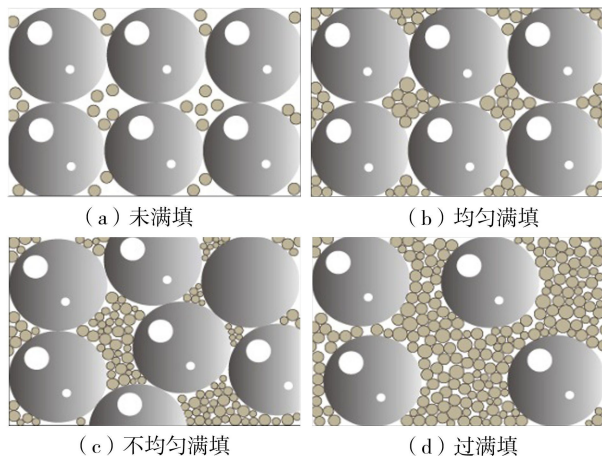


图 13 模型内部颗粒的堆积形式

值得注意的是,C1、C2 和 C3 模型与 3 种堆积方式不是一一对应的。当细颗粒较少时,颗粒为悬浮状态,内部粗颗粒与粗颗粒接触占比较大,强接触为土体内部的主要接触,土体内部骨架体系完整,此时颗粒堆积方式为未满足堆积,主要以单颗粒的形式流失。随着水力梯度的增大,细颗粒向上运移,中上

层颗粒堆积方式从未满足堆积向满足和过满足状态转化,以弱接触为主要接触方式,土体内部骨架体系不完整,以粗颗粒群的形式流失,骨架开始重塑,细颗粒重新在孔隙中填充。由上述分析可知,渗流作用下间断级配土内部侵蚀破坏规律为:细颗粒含量决定了土体的堆积状态,而不同堆积状态下土体的不同接触组成决定渗流作用下土体内部颗粒的启动方式,随着颗粒的移动,颗粒之间相互碰撞发生接触,土体内部的接触组成发生变化,最终造成了颗粒的流失和土体的破坏。由此可见,细颗粒含量影响土体内部的接触组成,是颗粒发生流失的诱因,而渗流作用下土体内部侵蚀破坏是接触力链形式变化和颗粒流失共同作用的结果。

4 结论

- 细颗粒含量是影响间断级配土体内部侵蚀程度的重要因素。细颗粒累计侵蚀率随水力梯度的增大而增大,而细颗粒含量的增加会加大侵蚀速率,从而影响其渗透稳定性。
- 细颗粒含量的增加会加速细颗粒运动。在临界破坏之前,主要是土体内部颗粒的侵蚀和表层细颗粒的流失;在破坏发生后,粗颗粒在细颗粒的带动下流失,土体整体上升破坏。
- 土体内部不同区域的孔隙率变化不同,在低水力梯度下,土体中底层出现渗透挤密现象,孔隙率短暂下降,随着水力梯度增大,孔隙率逐渐增大。
- 细颗粒含量影响土体内部颗粒之间接触方式,是颗粒发生流失的诱因,最终是接触力链形式变化与颗粒流失共同作用导致了侵蚀破坏的发生。

参考文献:

[1] 于际都,刘斯宏,王涛,等.间断级配粗粒土压实特性试验研究[J].岩土工程学报,2019,41(11):2142-2148.
(Yu Jidu, Liu Sihong, Wang Tao, et al. Experimental research on compaction characteristics of gap-graded coarse-grained soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical

- Engineering,2019,41(11):2142-2148. (in Chinese))
- [2] 罗玉龙,李澳,张海彬,等.不同层间系数条件下双层地基潜蚀可视化试验研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(1):226-235. (Luo Yulong, Li Ao, Zhang Haibin, et al. Visual experimental study on suffusion in double-layered soil under different retention ratios[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024,43(1):226-235. (in Chinese))
- [3] 王宇,谷艳昌,王士军,等.基于雷诺数的砂砾石管涌过程判别[J].水利水运工程学报,2022(6):113-120. (Wang Yu, Gu Yanchang, Wang Shijun, et al. Discriminating piping process in sandy gravels based on Reynolds number[J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(6):113-120. (in Chinese))
- [4] Jiang Xianggang, Wörman A, Cheng Xiaoping, et al. Internal erosion of debris-flow deposits triggered by seepage[J]. Engineering Geology, 2023,314:107015.
- [5] Zhao Yu, Liu Zhun, Liang Teng, et al. Soil fluidisation induced by fine particles migration: insights from the Shenzhen 2015 landfill landslide [J]. Engineering Geology, 2024,343:107783.
- [6] 唐凯,郭丹,沈才华,等.细颗粒含量对极细砂渗透性的影响规律和细观机理[J].水利水电科技进展,2021,41(6):46-51. (Tang Kai, Guo Dan, Shen Caihua, et al. Influence rule of fine particle content on sand permeability and its mesoscopic mechanism[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021,41(6):46-51. (in Chinese))
- [7] 陈星欣,苏世灼,张清林.多孔介质中反复注入颗粒迁移特性试验[J].水利水电科技进展,2017,37(5):64-68. (Chen Xingxin, Su Shizhuo, Zhang Qinglin. Experimental study on the particle transport in porous media under repeated injection conditions[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017,37(5):64-68. (in Chinese))
- [8] 徐烁,张学民,王立川,等.基坑漏水漏砂灾害发展的试验及模拟研究[J].铁道科学与工程学报,2024,21(10):4101-4113. (Xu Shuo, Zhang Xuemin, Wang Lichuan, et al. Experimental and simulation study on the development of water and sand leakage disasters in foundation pits [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024,21(10):4101-4113. (in Chinese))
- [9] 董辉,任佳展,程子华,等.非稳定渗流条件下宽级配砂砾土细粒迁移试验研究[J].长江科学院院报,2023,40(12):96-102. (Dong Hui, Ren Jiazhan, Cheng Zihua, et al. Experimental study on fine particle migration in widely graded gravel soil under unsteady seepage condition[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023,40(12):96-102. (in Chinese))
- [10] 王晓瑶,樊秀峰,简文彬,等.碎石土细颗粒迁移特征及优先流形成路径[J].工程地质学报,2024,32(2):387-396. (Wang Xiaoyao, Fan Xiufeng, Jian Wenbin, et al. Migration characters of gravel soil fine particles and the formation path of preferential flow [J]. Journal of Engineering Geology, 2024,32(2):387-396. (in Chinese))
- [11] Liu Leilei, Chen Rui, Zhou Chao, et al. Microscopic mechanism of the combined effects of confining pressure and fines content on suffusion in gap-graded underfilled soils[J]. Journal of Hydrology, 2023,626:130370.
- [12] 倪小东,左翔宇,孙达明,等.堤基侵蚀型管涌的砂槽试验研究[J].工程科学与技术,2018,50(2):24-31. (Ni Xiaodong, Zuo Xiangyu, Sun Daming, et al. Study on the piping erosion in levee foundation by sand box model test [J]. Advanced Engineering Sciences, 2018,50(2):24-31. (in Chinese))
- [13] Wang Gang, Yang Jing, Jin Wei, et al. Examining the criteria for contact erosion in granular soil foundations [J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2023,24(2):66-77.
- [14] 李火坤,王文韬,王姣,等.二元堤基结构堤防管涌机理模型试验[J].水利水电科技进展,2024,44(1):79-88. (Li Huokun, Wang Wentao, Wang Jiao, et al. Model test study on piping mechanism of binary dike foundation structure[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024,44(1):79-88. (in Chinese))
- [15] 刘胜,王媛,冯迪.堤防管涌渗流场响应特征的数值模拟[J].水利水电科技进展,2023,43(6):10-16. (Liu Sheng, Wang Yuan, Feng Di. Numerical simulation of response characteristics of seepage field during embankment piping[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023,43(6):10-16. (in Chinese))
- [16] 张子豪,杨博,顾凯,等.基于分布式应变感测的堤防管涌探测试验研究[J].河海大学学报(自然科学版),2026,54(2):136-142. (Zhang Zihao, Yang Bo, Gu Kai, et al. Experimental study on embankment piping detection based on distributed strain sensing[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2026,54(2):136-142. (in Chinese))
- [17] 吴梦喜,余挺,张琦.深厚覆盖层潜蚀对大坝应力变形影响的有限元模拟[J].岩土力学,2017,38(7):2087-2095. (Wu Mengxi, Yu Ting, Zhang Qi. Finite element simulation of influence of deep overburden suffusion on dam stress and deformation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017,38(7):2087-2095. (in Chinese))
- [18] Kimoto S, Akaki T, Kodama H. Numerical simulation of seepage failure by upward flow considering internal erosion [J]. Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2019,7(2):654-659.
- [19] Nie Zhihong, Zhu Yangui, Zou Jinfeng, et al. DEM study of the microscopic characteristics and internal stability of binary mixtures [J]. Powder Technology, 2019,352:314-324.
- [20] Nguyen T T, Indraratna B. The energy transformation of internal erosion based on fluid-particle coupling [J].

- Computers and Geotechnics,2020,121:103475.
- [21] 李伟一,钱建固,尹振宇,等. 间断级配砂土渗流侵蚀现象的计算流体力学-离散元耦合模拟[J]. 岩土力学, 2021,42(11):3191-3201. (Li Weiyi, Qian Jiangu, Yin Zhenyu, et al. Simulation of seepage erosion in gap graded sand soil using CFD-DEM[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021,42(11):3191-3201. (in Chinese))
- [22] Liu Yajing, Wang Lizhong, Hong Yi, et al. A coupled CFD-DEM investigation of suffusion of gap graded soil: coupling effect of confining pressure and fines content [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2020,44(18):2473-2500.
- [23] Chen Ding, Huang Wenxiong, Huang Dan. A study of overtopping breach process with soil-water erosion using improved smoothed particle hydrodynamics [J]. Acta Geotechnica, 2024,19(2):939-951.
- [24] Kézdi A. Soil physics[M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing, 1979.
- [25] Wang Tuo, Zhang Fengshou, Wang Pei. Experimental and numerical study of seepage-induced suffusion under K_0 stress state[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 2023,24(4):319-331.
- [26] 丁子玥, 许增光, 曹成, 等. 渗流侵蚀模拟中离散元模型参数影响性分析[J]. 水土保持学报, 2024,38(4):143-152. (Ding Ziyue, Xu Zengguang, Cao Cheng, et al. Influence analysis of discrete element model parameters in seepage erosion simulation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(4):143-152. (in Chinese))
- [27] 许增光, 武子豪, 曹成, 等. 颗粒形态对间断级配砂砾土内部侵蚀影响研究[J]. 水力发电学报, 2025,44(7):97-108. (Xu Zengguang, Wu Zihao, Cao Cheng, et al. Study on impact of particle morphology on internal erosion in gap-graded sand and gravel soils[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2025,44(7):97-108. (in Chinese))
- [28] Gelet R, Marot D. Internal erosion by suffusion on cohesionless gap-graded soils: model and sensibility analysis [J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2022,31:100313.
- [29] Song Yixiang, Chen Xu, Li Zhao. Investigation on the failure mechanism of the internal erosion in inverse grading sand based on DDA and Darcy's law [J]. Computers and Geotechnics, 2024,173:106516.
- [30] Hu Zheng, Zhang Yida, Yang Zhongxuan. Suffusion-induced deformation and microstructural change of granular soils: a coupled CFD-DEM study [J]. Acta Geotechnica, 2019,14(3):795-814.
- [31] 丁子玥. 基于离散元模拟的间断级配土细观渗流侵蚀破坏过程分析及机理研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2024.

(收稿日期:2025-04-30 编辑:熊水斌)

(上接第 20 页)

- [10] 潘水波, 邵瑛瑛, 时启燧, 等. 通气挑坎射流的挟气能力 [J]. 水利学报, 1980(5):13-22. (Pan Shuibao, Shao Yingying, Shi Qisui, et al. The self-aeration capacity of the water jet over the aeration ramp[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1980(5):13-22. (in Chinese))
- [11] Rutschmann P, Hager W H. Air entrainment by spillway aerators[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990,116(6):765-782.
- [12] Wu Jianhua, Ruan Shiping. Cavity length below chute aerators [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2008,51(2):170-178.
- [13] Pfister M, Hager W H. Chute Aerators. I: air transport characteristics [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010,136(6):352-359.
- [14] 时启燧, 潘水波, 邵瑛瑛, 等. 通气减蚀挑坎水力学问题的试验研究[J]. 水利学报, 1983(3):1-13. (Shi Qisui, Pan Shuibao, Shao Yingying, et al. Experimental investigation of flow aeration to prevent cavitation erosion by a deflector[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1983(3):1-13. (in Chinese))
- [15] 杨永森, 杨永全. 掺气减蚀设施后二维空腔流动计算 [J]. 水利学报, 2000(6):54-60. (Yang Yongsan, Yang Yongquan. Numerical calculation for two-dimensional cavity flow downstream of an aerator [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(6):54-60. (in Chinese))
- [16] 徐一民, 王伟, 许唯临, 等. 掺气坎(槽)射流空腔长度的计算 [J]. 水利水电技术, 2004,35(10):7-9. (Xu Yimin, Wang Wei, Xu Weilin, et al. Calculation of the cavity length of jet flow from chute aerators [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004,35(10):7-9. (in Chinese))
- [17] Chanson M H. Predicting the filling of ventilated cavities behind spillway aerators [J]. Journal of Hydraulic Research, 1995,33(3):361-372.
- [18] Steiner R, Heller V, Hager W H, et al. Deflector ski jump hydraulics [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008,134(5):562-571.
- [19] Pfister M. Jet impact angel on chute downstream of aerator [C]//4th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures. Portugal: IAHR, 2012,1-8.
- [20] 张法星, 徐建强, 徐建军. 掺气坎射流出射角的修正方法 [J]. 人民长江, 2010,41(2):87-90. (Zhang Faxing, Xu Jianqiang, Xu Jianjun. Correction method for emergence angle of jet flow over aerator [J]. Yangtze River, 2010,41(2):87-90. (in Chinese))
- [21] 时启燧. 高速水气两相流 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [22] 孙健. 高拱坝坝身泄洪和消能防冲 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2002.

(收稿日期:2025-02-18 编辑:俞云利)

考虑孔隙水饱和度的湿态混凝土弹性模量多尺度预测

杜向琴¹, 刘志龙¹, 陈荣妃¹, 赵振华¹, 李宗利²

(1. 贵州师范大学材料与建筑工程学院; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院)

摘要:为了探究孔隙率和孔隙水饱和度对不同尺度下混凝土弹性模量的影响,基于细观夹杂理论,建立了考虑孔隙率和孔隙水饱和度的湿态混凝土弹性模量多尺度预测模型,分析了多尺度下孔隙率和孔隙水饱和度对弹性模量的影响规律。结果表明,该模型预测结果与多组试验结果吻合较好,可有效预测混凝土在不同尺度上的弹性模量;混凝土材料在水泥净浆、砂浆、混凝土 3 个尺度上的弹性模量均随孔隙率增大而降低,但孔隙率对干燥状态下材料弹性模量的影响较饱和状态更显著;混凝土材料在水泥净浆、砂浆、混凝土 3 个尺度上的弹性模量均随孔隙水饱和度增大而增大,且孔隙率越大,弹性模量随饱和度增大而提高的幅度也越大。

关键词:混凝土;弹性模量;孔隙水;饱和度;多尺度

Multi-scale prediction of elastic modulus of wet concrete considering pore water saturation//Du Xiangqin¹, Liu Zhilong¹, Chen Rongfei¹, Zhao Zhenhua¹, Li Zongli² (1. School of Materials and Architectural Engineering, Guizhou Normal University; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University)

Abstract: To investigate the effects of porosity and pore water saturation on the elastic modulus of concrete at different scales, a multi-scale prediction model for the elastic modulus of wet concrete considering porosity and pore water saturation was established based on the micromechanical inclusion theory. The influence of porosity and pore water saturation on the elastic modulus at multiple scales was analyzed. The results show that the predicted results from the proposed model are in good agreement with multiple sets of experimental results, and the model can accurately predict the elastic modulus of concrete across various scales. The elastic modulus of concrete at the cement paste, mortar, and concrete scales decreases with increasing porosity, and the influence of porosity on the elastic modulus of materials is more pronounced in the dry state than in the saturated state. The elastic modulus of concrete at the cement paste, mortar, and concrete scales increases with increasing pore water saturation, and the higher the porosity, the more significant the increase in elastic modulus with increasing saturation.

Key words: concrete; elastic modulus; pore water; saturation degree; multiple scales

大坝、渡槽、过河桥梁等水工结构在服役过程中长期与水接触,其不同部位混凝土的含湿状态随气候条件和水位变化而变化。含湿状态的变化会导致混凝土性能改变,进而对结构安全产生不可忽略的影响^[1-2]。近几十年来,国内外学者对含湿状态与混凝土弹性模量之间的关系开展了大量研究^[3-7],并对其影响机理也进行了探讨^[8-9]。

混凝土是一种多相非均质材料,内部含有纳米级的水化硅酸钙(C-S-H)层间孔、微米级的毛细孔以及毫米级的空气气泡孔。不同尺度的孔隙内分布着结合水、吸附水和毛细水等不同形式的水分,在混凝土服役期内可能处于干燥、饱和或半饱和状

态^[10]。杜修力等^[10]提出了预测非饱和混凝土弹性模量的两步均匀化方法,并采用三相球模型建立了饱和混凝土有效体积模量与孔隙率之间的关系^[11]。王海龙等^[6]利用夹杂、等效弹性模量的思想研究了孔隙水含量对饱和混凝土弹性模量的影响。杜向琴等^[12]在预测混凝土弹性模量时也考虑了孔隙率的影响。上述研究虽不同程度考虑了孔隙率或孔隙水含量的影响,但未考虑混凝土的多尺度特征以及不同形式水分的影响。为此,本文基于多尺度理论建立考虑孔隙水饱和度的湿态混凝土弹性模量多尺度预测模型,并探讨不同尺度下孔隙水饱和度与弹性模量之间的关系。

基金项目:贵州省科技计划项目(黔科合基础-ZK[2023]一般261)

作者简介:杜向琴(1981—),女,副教授,博士,主要从事水泥基材料性能研究。E-mail:202008004@gznu.edu.cn

通信作者:李宗利(1967—),男,教授,博士,主要从事水泥基材料性能研究。E-mail:bene@nwsuaf.edu.cn

1 混凝土尺度划分及代表性体积单元选择

根据 Constantinides 等^[13]提出的水泥基材料四尺度模型,本文将混凝土划分为 C-S-H、水泥净浆、砂浆和混凝土 4 个尺度,如图 1 所示。

a. C-S-H 尺度:体系被视为由低密度水化硅酸钙(LD C-S-H)和高密度水化硅酸钙(HD C-S-H)这两种类型的 C-S-H 凝胶组成的二相复合体系^[14],其中,HD C-S-H 作为夹杂相均匀分布于 LD C-S-H 基体中,如图 1(a)所示。均匀化后的 C-S-H 等效均质体将作为水泥净浆尺度上的基体相。

b. 水泥净浆尺度:体系被视为由氢氧化钙(CH)、未水化水泥颗粒、孔隙等夹杂相与 C-S-H 凝胶(基体)组成的多相复合体系,代表性体积单元如图 1(b)所示。其中,基体为上一尺度所得的 C-S-H 等效均质体。均匀化后的水泥净浆等效均质体将作为砂浆尺度上的基体相。

c. 砂浆尺度:体系由水泥净浆、细骨料及两者之间的界面过渡区(interfacial transition zone, ITZ)组成的三相复合体系,其中,被 ITZ 包裹的细骨料颗粒作为夹杂相均匀分布于水泥净浆基体中,如图 1(c)所示。均匀化后的水泥砂浆等效均质体将作为混凝土尺度上的基体相。

d. 混凝土尺度:体系由砂浆、粗骨料及两者之间的 ITZ 组成的三相复合体系,其中,被 ITZ 包裹的粗骨料颗粒作为夹杂相均匀分布于砂浆基体中,如图 1(d)所示。基于均匀化方法将复合体系等效为混凝土均质体,其弹性模量即为非均质混凝土的有效弹性模量。

2 模型建立

鉴于混凝土微细观结构的复杂性,为简化计算并突出孔隙及孔隙水饱和度对混凝土弹性模量的影响^[6,10-12,15-18],本文作如下假设:①各尺度上的夹杂相均为理想的均匀各向同性材料;②HD C-S-H、未水化颗粒、CH、孔隙、粗细骨料等夹杂相均简化为球

形,且均匀分布于基体中。

2.1 水分相的考虑

水分在混凝土材料内以结合水、吸附水和毛细孔水 3 种形式存在。在湿态混凝土多尺度均匀化过程中,C-S-H 尺度仅考虑结合水和吸附水的影响;而水泥净浆、砂浆和混凝土尺度假设吸附水和结合水处于饱和状态,仅考虑毛细孔水的影响。本文采用孔隙水饱和度(即含水孔隙体积与总孔隙体积之比)表征不同尺度混凝土材料内的水分相对含量。

2.2 湿态混凝土弹性模量多尺度模型

如图 1 所示,混凝土材料在不同尺度上均可视为由基体相与夹杂相组成的复合体。根据 Mori-Tanaka 理论,可通过施加远场应变来考虑夹杂间的相互作用。若基体中包含多相夹杂,则第 r 相夹杂中的应变 ϵ_r 可表示为:

$$\epsilon_r = [I + S_r : L_0^{-1} : (L_r - L_0)]^{-1} : \bar{\epsilon}_0 = T_r : \bar{\epsilon}_0 \quad (1)$$

式中: L_0 为基体相的刚度张量; L_r 为第 r 相夹杂的刚度张量; S_r 为第 r 相夹杂的 Eshelby 张量; T_r 为第 r 相夹杂的局部应变; $\bar{\epsilon}_0$ 为基体相的平均应变; I 为单位刚度张量。

2.2.1 C-S-H 尺度

在 C-S-H 尺度上,基体相(LD C-S-H)与夹杂相(HD C-S-H)均由 C-S-H 凝胶颗粒堆积而成^[14],两者基本组成相同,故不考虑界面影响。采用 Mori-Tanaka 法计算 C-S-H 等效均质体的弹性模量,计算公式如下:

$$E_{CSH} = \frac{9k_{CSH}\mu_{CSH}}{3k_{CSH} + \mu_{CSH}} \quad (2)$$

其中
$$k_{CSH} = k_{LD} + \frac{c_{HD}(k_{HD} - k_{LD}) \cdot (3k_{LD} + 4\mu_{LD})}{3(1 - c_{HD})(k_{HD} - k_{LD})} \rightarrow$$

$$\mu_{CSH} = \mu_{LD} + \frac{5c_{HD}\mu_{LD}(\mu_{HD} - \mu_{LD}) \cdot (3k_{LD} + 4\mu_{LD})}{5\mu_{LD}(3k_{LD} + 4\mu_{LD}) + 6(1 - c_{HD}) \cdot (\mu_{HD} - \mu_{LD})(k_{LD} + 2\mu_{LD})} \rightarrow$$

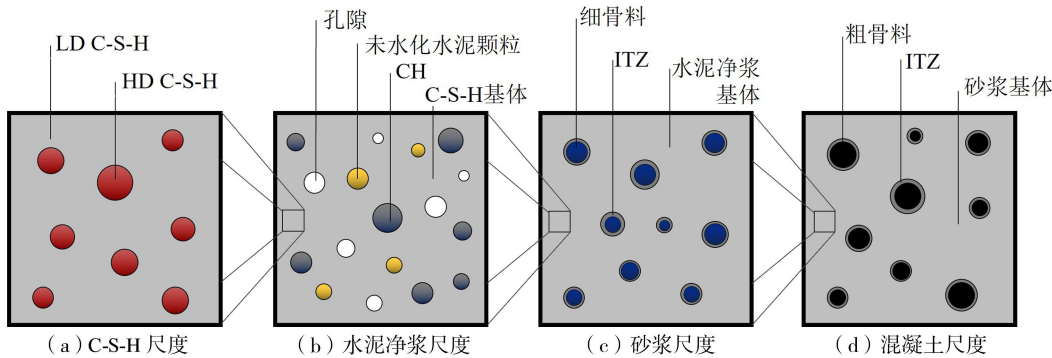


图 1 混凝土多尺度模型的代表性体积单元

式中: k_{CSH} 、 μ_{CSH} 、 E_{CSH} 分别为 C-S-H 凝胶的体积模量、剪切模量、弹性模量; k_{LD} 、 μ_{LD} 分别为 LD C-S-H 的体积模量、剪切模量; c_{HD} 、 k_{HD} 、 μ_{HD} 分别为 HD C-S-H 的体积分数、体积模量、剪切模量。

2.2.2 水泥净浆尺度

如图 1(b) 所示, 水泥净浆尺度上包含 CH、未水化水泥颗粒和孔隙 3 类夹杂相。在一定的温度与湿度环境下, 水泥净浆内孔隙可分为干燥、半饱和及饱和 3 种状态。干燥孔隙内仅含空气, 饱和孔隙内充满水分, 半饱和孔隙内则同时含有水和空气。因空气的压缩性极大, 故认为仅饱和孔隙中的水分会影响体系变形^[10]。为简化计算, 假定当环境温度与湿度一定时, 小于某一临界孔径的孔隙全部被水充满。因此在细观上可认为水泥净浆由 C-S-H 基体与 CH、未水化水泥颗粒、干燥孔隙、饱和孔隙 4 类夹杂相组成。采用两步等效法得到湿态水泥净浆等效均质体。具体步骤如下:

a. 以 C-S-H 为基体, CH 和未水化水泥颗粒为两类夹杂相, 基于 Mori-Tanaka 法等效得到无孔隙水泥净浆, 其有效体积模量 k_{cp0} 和剪切模量 μ_{cp0} 可按下式计算:

$$k_{\text{cp0}} = \frac{c_{\text{CSH}}k_{\text{CSH}} + \sum_{r=1}^2 \frac{c_r k_r k_{\text{CSH}}}{k_{\text{CSH}} + \alpha_r (k_r - k_{\text{CSH}})}}{c_{\text{CSH}} + \sum_{r=1}^2 \frac{c_r k_{\text{CSH}}}{k_{\text{CSH}} + \alpha_r (k_r - k_{\text{CSH}})}} \quad (3)$$

$$\mu_{\text{cp0}} = \frac{c_{\text{CSH}}\mu_{\text{CSH}} + \sum_{r=1}^2 \frac{c_r \mu_r \mu_{\text{CSH}}}{\mu_{\text{CSH}} + \beta_r (\mu_r - \mu_{\text{CSH}})}}{c_{\text{CSH}} + \sum_{r=1}^2 \frac{c_r \mu_{\text{CSH}}}{\mu_{\text{CSH}} + \beta_r (\mu_r - \mu_{\text{CSH}})}} \quad (4)$$

$$\text{其中 } \alpha_r = \frac{3k_r}{3k_r + 4\mu_r} \quad \beta_r = \frac{6(k_r + 2\mu_r)}{5(3k_r + 4\mu_r)}$$

式中: c_{CSH} 为 C-S-H 的体积分数; c_r 、 k_r 、 μ_r 分别为第 r 相夹杂的体积分数、体积模量和剪切模量, 其中下标 $r=1$ 表示 CH 夹杂相, $r=2$ 表示未水化水泥颗粒夹杂相; α_r 、 β_r 分别为第 r 相夹杂的 Eshelby 张量常数。

b. 将干燥孔隙和饱和孔隙作为两类夹杂相, 嵌入上一步所得的无孔隙水泥净浆基体中, 基于 Mori-Tanaka 法等效得到湿态水泥净浆等效均质体, 其弹性模量即为考虑孔隙和孔隙水饱和度的湿态水泥净浆的有效弹性模量。其体积模量 k_{cp}^* 和剪切模量 μ_{cp}^* 按下式计算:

$$k_{\text{cp}}^* = \frac{c_{\text{cp0}}k_{\text{cp0}} + \sum_{r=3}^4 \frac{c_r k_r k_{\text{cp0}}}{k_{\text{cp0}} + \alpha_r (k_r - k_{\text{cp0}})}}{c_{\text{cp0}} + \sum_{r=3}^4 \frac{c_r k_{\text{cp0}}}{k_{\text{cp0}} + \alpha_r (k_r - k_{\text{cp0}})}} \quad (5)$$

$$\mu_{\text{cp}}^* = \frac{c_{\text{cp0}}\mu_{\text{cp0}} + \sum_{r=3}^4 \frac{c_r \mu_r \mu_{\text{cp0}}}{\mu_{\text{cp0}} + \beta_r (\mu_r - \mu_{\text{cp0}})}}{c_{\text{cp0}} + \sum_{r=3}^4 \frac{c_r \mu_{\text{cp0}}}{\mu_{\text{cp0}} + \beta_r (\mu_r - \mu_{\text{cp0}})}} \quad (6)$$

式中: c_{cp0} 为无孔隙水泥净浆基体的体积分数; c_r 、 k_r 和 μ_r 分别为第 r 相夹杂的体积分数、体积模量和剪切模量, 其中下标 $r=3$ 对应干燥孔隙, $r=4$ 对应饱和孔隙, $k_3=\mu_3=\mu_4=0$, $k_4=2.25 \text{ GPa}$ 。各相体积分数之间存在如下关系: $c_{\text{cp0}}+c_3+c_4=1$ 。若净浆的总孔隙率为 p_p , 饱和度为 $S_p \in [0, 1]$, 则 $c_3=p_p(1-S_p)$, $c_4=p_p S_p$ 。

2.2.3 砂浆尺度

相关研究表明^[19-21], 细骨料与净浆之间 ITZ 的非均质性对砂浆弹性模量的影响不可忽视。为此, 采用图 2 所示的三步等效法对湿态砂浆复合体系进行均匀化处理: ①将干燥孔隙和饱和孔隙作为两相夹杂嵌入无孔隙水泥净浆基体, 形成含湿水泥净浆等级基体; ②参考杜向琴等^[12]的方法考虑 ITZ 非均质性, 将 ITZ 与细骨料颗粒共同等效为单一等效颗粒; ③考虑骨料颗粒级配, 将等效颗粒嵌入含湿水泥净浆等效基体中, 形成湿态砂浆等效均质体, 其弹性模量即为湿态砂浆的有效弹性模量。

含湿水泥净浆基体的体积模量 $k_{\text{mor-p}}^*$ 和剪切模量 $\mu_{\text{mor-p}}^*$ 分别为:

$$k_{\text{mor-p}}^* = \frac{c_{\text{cpm}}k_{\text{cpm}} + \sum_{r=1}^2 \frac{c_r k_r k_{\text{cpm}}}{k_{\text{cpm}} + \alpha_r (k_r - k_{\text{cpm}})}}{c_{\text{cpm}} + \sum_{r=1}^2 \frac{c_r k_{\text{cpm}}}{k_{\text{cpm}} + \alpha_r (k_r - k_{\text{cpm}})}} \quad (7)$$

$$\mu_{\text{mor-p}}^* = \frac{c_{\text{cpm}}\mu_{\text{cpm}} + \sum_{r=1}^2 \frac{c_r \mu_r \mu_{\text{cpm}}}{\mu_{\text{cpm}} + \beta_r (\mu_r - \mu_{\text{cp0}})}}{c_{\text{cpm}} + \sum_{r=1}^2 \frac{c_r \mu_{\text{cpm}}}{\mu_{\text{cpm}} + \beta_r (\mu_r - \mu_{\text{cp0}})}} \quad (8)$$

式中: k_{cpm} 、 μ_{cpm} 、 c_{cpm} 分别为砂浆中无孔隙水泥净浆的体积模量、剪切模量、相对体积分数; k_{rm} 、 μ_{rm} 、 c_{rm} 分别为砂浆内组成净浆的第 r 相夹杂的体积模量、剪切模量、相对体积分数, 其中下标 $r=1$ 表示干燥孔隙, $r=2$ 表示饱和孔隙, $c_{\text{cpm}}+c_{1\text{m}}+c_{2\text{m}}=1$, 若砂浆总孔隙率为 p_m , 饱和度为 $S_m \in [0, 1]$, 则 $c_{1\text{m}}=p_m(1-S_m)$, $c_{2\text{m}}=p_m S_m$ 。

湿态砂浆的有效体积模量 k_{mor}^* 和剪切模量 μ_{mor}^* 分别为:

$$k_{\text{mor}}^* = \frac{c_{\text{mor-p}}k_{\text{mor-p}}^* + \sum_{n=1}^N \frac{c_{\text{an}}k_{\text{an}}k_{\text{mor-p}}^*}{k_{\text{mor-p}}^* + 3\gamma_0(k_{\text{an}} - k_{\text{mor-p}}^*)}}{c_{\text{mor-p}} + \sum_{n=1}^N \frac{c_{\text{an}}k_{\text{mor-p}}^*}{k_{\text{mor-p}}^* + 3\gamma_0(k_{\text{an}} - k_{\text{mor-p}}^*)}} \quad (9)$$

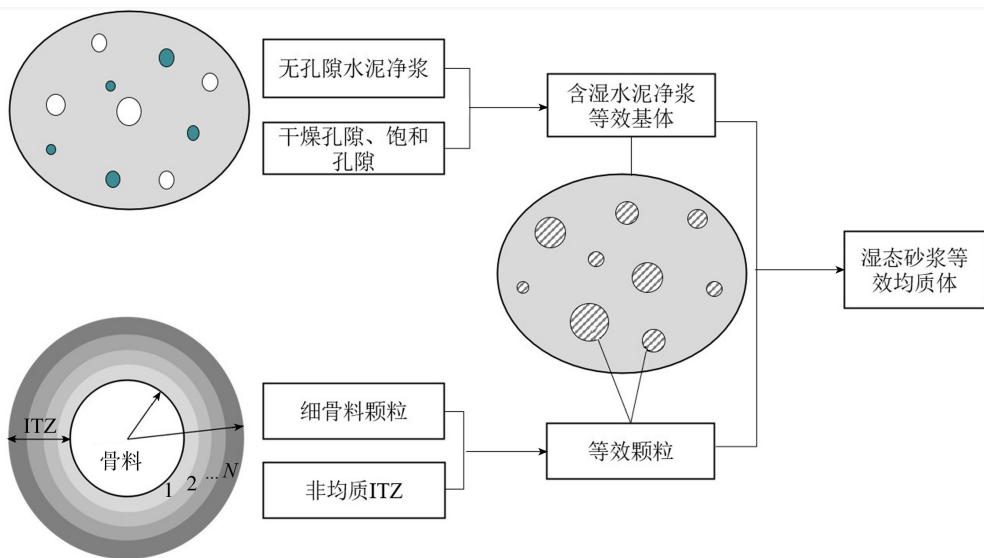


图2 含湿砂浆的均质化过程

$$\mu_{\text{mor}}^* = \frac{c_{\text{mor-p}} \mu_{\text{mor-p}}^* + \sum_{n=1}^N \frac{c_{\text{an}} \mu_{\text{an}} \mu_{\text{mor-p}}^*}{\mu_{\text{mor-p}}^* + 2\delta_0 (\mu_{\text{an}} - \mu_{\text{mor-p}}^*)}}{c_{\text{mor-p}} + \sum_{n=1}^N \frac{c_{\text{an}} \mu_{\text{mor-p}}^*}{\mu_{\text{mor-p}}^* + 2\delta_0 (\mu_{\text{an}} - \mu_{\text{mor-p}}^*)}} \quad (10)$$

其中

$$\gamma_0 = \frac{k_{\text{mor-p}}^*}{3k_{\text{mor-p}}^* + 4\mu_{\text{mor-p}}^*}$$

$$\delta_0 = \frac{3(k_{\text{mor-p}}^* + 2\mu_{\text{mor-p}}^*)}{3k_{\text{mor-p}}^* + 4\mu_{\text{mor-p}}^*}$$

式中: $c_{\text{mor-p}}$ 为砂浆中含湿净浆基体的体积分数; c_{an} 为砂浆中第 n 相等效颗粒的体积分数; N 为细骨料的粒径区间数(粒径区间为 $0 \sim 4.75$ mm, 粒径间距为 0.02 mm); k_{an} 、 μ_{an} 分别为第 n 相等效颗粒的体积模量和剪切模量, 参见文献[12]。

2.2.4 混凝土尺度

湿态混凝土的等效过程与砂浆相似: ①由式(6)~(10)得到无孔隙砂浆基体的有效体积模量 k_{mor0} 和剪切模量 μ_{mor0} ; ②将混凝土中的干燥孔隙和饱和孔隙作为夹杂相引入基体, 得到含湿砂浆基体的体积模量 $k_{\text{con-m}}^*$ 和剪切模量 $\mu_{\text{con-m}}^*$; ③考虑粗骨料颗粒级配及粗骨料与砂浆之间 ITZ 的非均质性, 将粗骨料颗粒与 ITZ 等效为等效粗骨料颗粒; ④将含湿砂浆基体与等效粗骨料颗粒进行均匀化, 基于 Mori-Tanaka 法得到湿态混凝土的体积模量 k_{con}^* 、剪切模量 μ_{con}^* 及弹性模量 E_{con}^* 。

3 模型验证

3.1 水泥净浆尺度

Constantinides 等^[13]建立了水泥净浆弹性模量预测模型, 模型参数通过纳米压痕技术获取, 具体取

值为: LD C-S-H、HD C-S-H 和 CH 的弹性模量分别为 (21.7 ± 2.2) 、 (29.4 ± 2.4) 、 (38.0 ± 5.0) GPa, C-S-H、CH 和孔隙的相对体积分数分别为 0.86 、 0.11 和 0.03 。取饱和度为 0.95 (试件养护于饱和石灰水中, 饱和度很高), 采用本文模型计算得到的水泥净浆弹性模量为 23.08 GPa, 与 Constantinides 等^[13]的试验值 (23.2 GPa) 及其模型预测值 (23.8 GPa) 吻合良好。

Huang 等^[22]将 X 射线显微断层成像技术与 Powers 水化模型相结合, 获得了水泥净浆各物相的体积分数, 并计算了水泥净浆的弹性模量。本文采用与 Huang 等^[22]相同的输入参数(表1), 假设有效饱和度为 0.95 , 得到本文模型与 Huang 等^[22]的湿态水泥净浆弹性模量预测值对比见表1。可以看出, 本文模型预测值与 Huang 等^[22]的计算结果具有较好的一致性, 相对误差均在 10% 以内。

3.2 砂浆尺度

高岳毅^[23]试验测定的4种水泥砂浆弹性模量见表2。因试验龄期为 180 d 且养护条件良好, 取饱和度和为 1.0 。考虑不同砂浆 ITZ 的差异, 普通砂浆、掺硅灰砂浆、掺粉煤灰砂浆、掺矿粉砂浆的局部损伤因子分别取为 0.4 、 0.2 、 0.3 和 0.3 , 采用本文模型计算得到的湿态砂浆弹性模量见表2, 可见本文模型预测值与试验值的相对误差分别为 2.99% 、 4.61% 、 5.67% 和 7.26% , 且较高岳毅^[23]的预测值更接近试验值。这是因为本文模型将 ITZ 视为砂浆中的薄弱区域并考虑其非均质性, 而高岳毅^[23]的模型未考虑矿物掺合料对 ITZ 的良性影响。

3.3 混凝土尺度

Stock 等^[24]测定了不同骨料体积分数下的混凝土弹性模量。根据相关文献^[17,21-22], 本文模型各参数取值如下: 骨料弹性模量为 74.5 GPa, 泊松比为

表 1 水泥净浆弹性模量预测值对比

孔隙体积 分数	CH			未水化水泥颗粒			Huang 等 ^[22]	本文模型预	相对误差/%
	体积分数	弹性模量/GPa	泊松比	体积分数	弹性模量/GPa	泊松比	预测值/GPa	测值/GPa	
0.233	0.109	38.0	0.31	0.293	135	0.3	25.34	26.91	6.20
0.187	0.130	38.0	0.31	0.252	135	0.3	26.72	28.18	5.46
0.283	0.104	38.0	0.31	0.261	135	0.3	21.61	23.36	8.10
0.157	0.173	38.0	0.31	0.087	135	0.3	22.44	22.58	0.64
0.222	0.146	38.0	0.31	0.138	135	0.3	20.81	21.22	1.99
0.245	0.145	38.0	0.31	0.110	135	0.3	18.78	18.83	0.26
0.288	0.126	38.0	0.31	0.154	135	0.3	18.14	18.51	2.04

注:表中 1~8 列数据来自文献[22]。

表 2 4 种砂浆弹性模量预测值

砂的体积分数	净浆基体			砂浆弹性模量 /GPa			砂浆
	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	泊松比	高岳毅 ^[23] 试验值	高岳毅 ^[23] 预测值	本文模型预测值	
0.459	18.2	11.5	0.24	36.8	38.4	35.7	普通砂浆
0.454	19.0	11.9	0.24	39.1	39.9	37.3	掺硅灰
0.445	16.8	10.6	0.24	35.4	37.0	34.9	掺粉煤灰
0.452	15.6	9.8	0.24	36.5	35.8	33.2	掺矿粉

注:表中 1~6 列数据来自文献[23],其中砂(骨料)体积模量为 30.2 GPa、剪切模量为 28.6 GPa、泊松比为 0.14。

0.15,骨料级配服从连续分布,粒径范围为 0.15~19 mm;净浆基体弹性模量为 13.4 GPa,泊松比为 0.25;ITZ 厚度为 50 μm,泊松比为 0.25;局部损伤因子为 0.4^[25],孔隙率为 5%,饱和度取 0.95。本文模型计算得到的湿态混凝土弹性模量见图 3(a),可以看出,当骨料体积分数不超过 60%时,模型预测值与试验值吻合良好,相对误差不超过 5%;当骨料体积分数达 80%时,相邻骨料的 ITZ 重叠较多,不再满

足模型基本假定,故预测值与试验值偏差较大。此外,本文还根据 Zheng 等^[21]的试验数据,预测了水中养护 21 d 混凝土(饱和度为 0.98)的弹性模量,结果见图 3(b),相对误差均在 5%以内。

张国辉^[26]测定了 3 种强度等级混凝土在不同饱和度下的弹性模量。将粗骨料视为 5~40 mm 连续级配,采用本文模型预测不同孔隙水饱和度下混凝土的弹性模量,结果见表 3。由表 3 可见,预测值

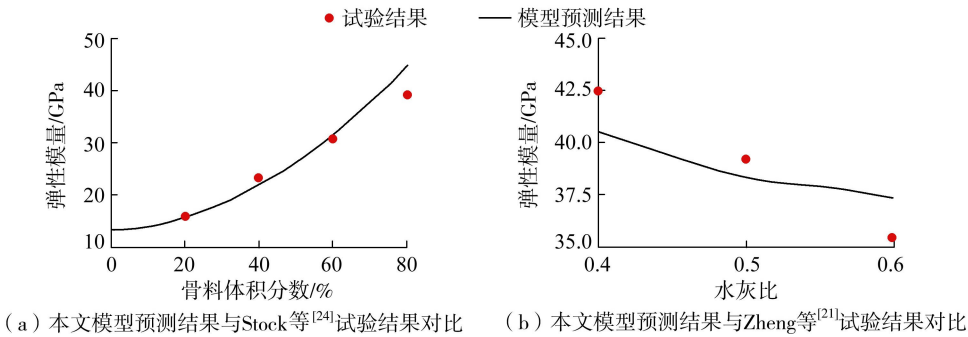


图 3 混凝土弹性模量预测结果

表 3 不同饱和度下混凝土弹性模量预测值

混凝土强 度等级	粗骨料			砂浆		混凝土饱 和度/%	混凝土弹性模量		
	弹性模量/GPa	泊松比	体积分数/%	弹性模量/GPa	泊松比		张国辉 ^[26] 试验值/GPa	本文模型 预测值/GPa	相对误差/%
C15	50.0	0.25	0.535	12.40	0.20	0	19.58	18.26	-6.74
						47.56	20.83	21.62	3.79
						78.30	22.94	24.23	5.62
						100.00	23.24	27.71	9.70
C20	50.0	0.25	0.517	16.74	0.20	0	22.50	20.53	-3.16
						71.63	24.58	26.22	2.82
						80.90	24.75	27.14	3.98
						100.00	100.00	29.61	4.59
C30	50.0	0.25	0.487	21.51	0.20	0	24.31	24.52	0.86
						47.29	27.12	28.04	3.39
						78.05	27.23	30.48	11.94
						100.00	30.36	33.40	10.01

与试验值的相对误差在 12% 以内,且两者随饱和度的变化趋势一致,表明本文模型在预测湿态混凝土弹性模量时具有较好的可靠性。

4 湿态混凝土弹性模量预测

为进一步明确湿态混凝土弹性模量的变化规律,并为预测其弹性模量提供参考,利用本文模型来探讨不同尺度下材料的孔隙率及孔隙水饱和度对混凝土弹性模量的影响规律。在一般工程环境下,C-S-H 凝胶层间的化学结合水及颗粒间的吸附水难以脱除,故可认为 C-S-H 始终处于饱和状态。下文仅探讨水泥净浆尺度、砂浆尺度、混凝土尺度下弹性模量随孔隙率及孔隙水饱和度的变化规律;ITZ 非均质性与骨料级配的影响已在文献[12,17-18,27]进行了详细分析与讨论,此处不再赘述。

4.1 水泥净浆尺度

以 Huang 等^[22]的试验结果(表 1)为依据,采用本文模型反推得到无孔隙水泥净浆基体的弹性模量为 24.50 GPa,水泥净浆弹性模量随孔隙率和饱和度的变化曲线见图 4(a)。可以看出,湿态水泥净浆的弹性模量随孔隙率增大而降低,当孔隙率从 5% 增大至 25% 时,完全干燥水泥净浆的弹性模量降低了 35.0%,饱和净浆的弹性模量降低了 19.4%,表明孔隙率增大对饱和净浆弹性模量的削弱作用弱于干燥净浆。湿态水泥净浆弹性模量随孔隙水饱和度的增大而增大。当孔隙率为 5% 时,饱和度为 25%、50%、75%、100% 的弹性模量较完全干燥状态分别提高了 2.6%、5.9%、10.3% 和 18.0%;当孔隙率为 20% 时,相应增幅依次为 3.5%、11.4%、23.7% 和 44.6%。可见,孔隙率越大,弹性模量随孔隙水饱和度增大而提高的幅度也越大。孔隙率大且饱和度高的水泥净浆中孔隙水含量较多,材料受压时孔隙水可分担更多压力,相较于干燥试件,饱和试件抵抗受压变形的能力更强,所以弹性模量更大。

4.2 砂浆尺度

以水泥净浆尺度上的计算结果为基准,采用本

文模型计算得到的不同孔隙率和孔隙水饱和度下砂浆弹性模量见图 4(b)。可以看出,砂浆弹性模量随孔隙率增大而降低,当孔隙率从 4% 增大至 20% 时,完全干燥砂浆的弹性模量降低了 31.2%,饱和砂浆弹性模量降低了 15.4%,表明孔隙率增大对饱和砂浆弹性模量的削弱作用弱于干燥砂浆,即材料越干燥,孔隙率增大引起的弹性模量降低越显著。砂浆弹性模量随孔隙水饱和度增大而提高。当孔隙率为 4% 时,饱和度为 25%、50%、75%、100% 的弹性模量较完全干燥状态分别提高了 2.8%、7.5%、14.1% 和 23.2%;当孔隙率为 20% 时,相应增幅依次为 5.3%、11.2%、26.1% 和 43.5%。可见,孔隙率越大,弹性模量随饱和度增大而提高的幅度也越大。

4.3 混凝土尺度

以砂浆尺度的计算结果为基准,采用本文模型计算得到的不同孔隙率和孔隙水饱和度下混凝土弹性模量见图 4(c)。可以看出,混凝土弹性模量随孔隙率增大而降低,当孔隙率从 3% 增大至 12% 时,完全干燥混凝土的弹性模量降低了 26.9%,饱和混凝土弹性模量降低了 13.7%,表明孔隙率增大对饱和混凝土弹性模量的削弱作用弱于干燥混凝土。混凝土弹性模量随孔隙水饱和度增大而提高。当孔隙率为 3% 时,饱和度为 25%、50%、75%、100% 的弹性模量较完全干燥状态分别提高了 4.7%、9.6%、17.4% 和 27.6%;当孔隙率为 12% 时,对应增幅依次为 5.1%、13.1%、24.8% 和 41.6%。可见,孔隙率越大,弹性模量随饱和度增大而提高的幅度也越大。

对比图 4(a)~(c)可以发现,由于砂、石骨料的加入,混凝土尺度上的弹性模量最高,砂浆尺度次之,水泥净浆尺度最小;饱和度变化对弹性模量的影响程度同样以混凝土尺度最大,砂浆尺度次之,水泥净浆尺度最小。

根据复合材料力学理论^[28-31],孔隙的引入会导致混凝土弹性模量降低,且材料弹性模量会随孔隙率增大而降低。对于湿态混凝土,当全部或部分孔

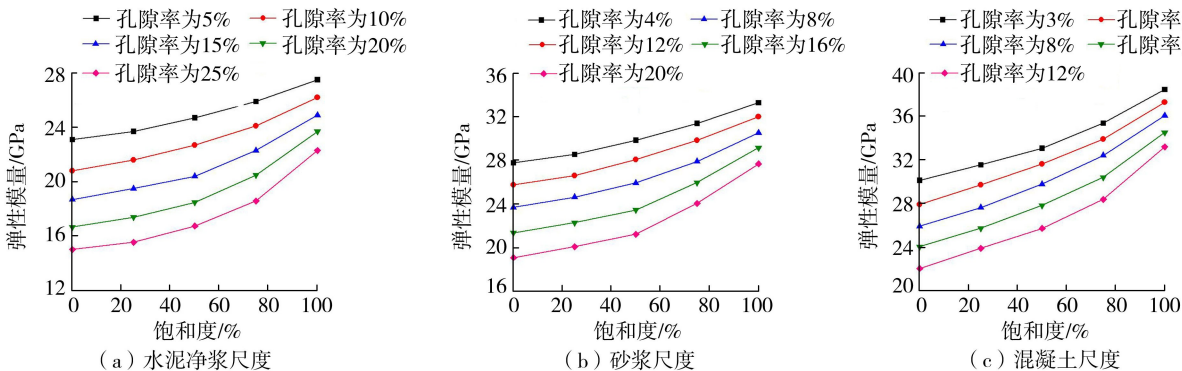


图 4 不同尺度上混凝土弹性模量随孔隙率和饱和度的变化

隙内充满水时,孔隙水会限制或抑制周围固相基质向孔隙内的压缩变形^[11],故相较于干燥材料,湿态状态下材料的弹性模量会有所增大。因此,混凝土材料在水泥净浆、砂浆和混凝土 3 个尺度上的弹性模量一方面随孔隙率增大而降低,另一方面随孔隙水饱和度增大而提高,最终表现为孔隙水的承压能力部分抵消了因孔隙率增大引起的弹性模量降低,使得湿态状态下混凝土材料在水泥净浆、砂浆和混凝土 3 个尺度上的弹性模量对孔隙率变化的敏感程度低于干燥状态,这一规律与杜修力等^[11]、梅塔等^[32]的研究结果一致。

5 结 论

a. 本文建立的考虑孔隙率和孔隙水饱和度的湿态混凝土弹性模量预测模型可用于预测混凝土在不同尺度上的弹性模量,预测结果与前人试验值的相对误差均在 10% 以内。

b. 混凝土材料在水泥净浆、砂浆和混凝土 3 个尺度上的弹性模量均随孔隙率增大而降低,但孔隙率对干燥状态下材料弹性模量的影响较湿态更为显著,这是因为饱和孔隙内的水具有一定承压能力,可在一定程度上抵消因孔隙率增大引起的弹性模量降低。

c. 混凝土材料在水泥净浆、砂浆、混凝土 3 个尺度上的弹性模量均随孔隙水饱和度增大而增大,且孔隙率越大,弹性模量随饱和度增大而提高的幅度也越大。这是因为孔隙水含量越高,外荷载作用下孔隙水承担的压力越大,试件抵抗受压变形能力越强,材料弹性模量越大。

参考文献:

[1] 李庆斌,王海龙. 水环境对混凝土力学性能的影响研究述评[J]. 中国科技论文在线,2006,1(2):83-94. (Li Qingbin, Wang Hailong. Influence of ambient water on properties of concrete [J]. Sciencepaper Online, 2006, 1(2):83-94. (in Chinese))

[2] 王乾峰,刘云贺,彭刚. 水压力环境中混凝土的含水量及其对力学性能的影响[J]. 水利学报,2017,48(2):193-202. (Wang Qianfeng, Liu Yunhe, Peng Gang. Water content in concrete under water pressure environment and the effect on its mechanical properties [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(2):193-202. (in Chinese))

[3] Kanna V, Olson R A, Jennings H M. Effect of shrinkage and moisture content on the physical characteristics of blended cement mortars [J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(10):1467-1477.

[4] 黄灵芝,王嘉欣,司政,等. 水饱和度对再生混凝土力学性能的影响及微观机理分析[J]. 实验力学,2024,39(3):378-388. (Huang Lingzhi, Wang Jiaxin, Si Zheng, et al. Effect of water saturation on mechanical properties of recycled concrete and micro-mechanism analysis [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2024, 39(3):378-388. (in Chinese))

[5] 崔健,鹿羿,张惠申,等. 饱和度对混凝土三轴抗压强度的影响试验研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2023,56(8):870-877. (Cui Jian, Lu Yi, Zhang Huishen, et al. Experimental study on influence of saturation on tri-axial compressive strength of concrete [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2023, 56(8):870-877. (in Chinese))

[6] 王海龙,李庆斌. 饱和混凝土的弹性模量预测[J]. 清华大学学报(自然科学版),2005,45(6):761-763. (Wang Hailong, Li Qingbin. Saturated concrete elastic modulus prediction[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2005, 45(6):761-763. (in Chinese))

[7] Wittmann F H. Interaction of hardened cement paste and water[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1973, 56(8):409-415.

[8] 侯东伟,张君,陈浩宇,等. 干燥与潮湿环境下混凝土抗压强度和弹性模量发展分析[J]. 水利学报,2012,43(2):198-208. (Hou Dongwei, Zhang Jun, Chen Haoyu, et al. Development of strength and elastic modulus of concrete under moisture and drying curing conditions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(2):198-208. (in Chinese))

[9] Maruyama I, Sasano H, Nishioka Y, et al. Strength and Young's modulus change in concrete due to long-term drying and heating up to 90℃ [J]. Cement and Concrete Research, 2014, 66:48-63.

[10] 杜修力,金浏. 细观均匀化方法预测非饱和混凝土宏观力学性质[J]. 水利学报,2013,44(11):1317-1325. (Du Xiuli, Jin Liu. Micro-scale homogenization for prediction of the macroscopic mechanical properties of unsaturated concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(11):1317-1325. (in Chinese))

[11] 杜修力,金浏. 饱和混凝土有效模量及有效抗拉强度研究[J]. 水利学报,2012,43(6):667-674. (Du Xiuli, Jin Liu. Research on the effective modulus and tensile strength of saturated concrete [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(6):667-674. (in Chinese))

[12] 杜向琴,李宗利. 考虑界面过渡区非均质性的混凝土弹性模量预测[J]. 长江科学院院报,2019,36(8):153-158. (Du Xiangqin, Li Zongli. A prediction model for elastic modulus of concrete considering the inhomogeneity of interfacial transition zone[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(8):153-158. (in Chinese))

- [13] Constantinides G, Ulm F J. The effect of two types of C-S-H on the elasticity of cement-based materials: results from nanoindentation and micromechanical modeling [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(1): 67-80.
- [14] Jennings H M. A model for the microstructure of calcium silicate hydrate in cement paste [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(1): 101-116.
- [15] 周宏元, 葛建宏, 王小娟, 等. 再生粗骨料混凝土力学性能离散性试验及数值模拟研究 [J/OL]. 工程力学, 2025-09-23. <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.o3.20250922.1655.054>. (Zhou Hongyuan, Ge Jianhong, Wang Xiaojuan, et al. Experimental and numerical simulation study on discreteness of mechanical properties of recycled coarse aggregate concrete [J/OL]. Engineering Mechanics, 2025-09-23. <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.o3.20250922.1655.054>. (in Chinese))
- [16] 金浏, 杨健, 吴洁琼, 等. 考虑混凝土细观非均质性的钢筋混凝土结构疲劳寿命预测概率模型 [J]. 材料导报, 2024, 38(20): 23090009-8. (Jin Liu, Yang Jian, Wu Jieqiong, et al. Probabilistic prediction model of fatigue life of RC structures considering the meso-scale inhomogeneity of concrete [J]. Materials Reports, 2024, 38(20): 23090009-8. (in Chinese))
- [17] 李朝红, 徐光兴. 混凝土弹性模量预测的混合夹杂模型 [J]. 低温建筑技术, 2013, 35(6): 11-13. (Li Chaohong, Xu Guangxing. The mixture inclusion model for predicting elastic modulus of concrete [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2013, 35(6): 11-13. (in Chinese))
- [18] 李宗利, 邓朝莉, 张国辉. 考虑骨料级配的混凝土有效弹性模量预测模型 [J]. 水利学报, 2016, 47(4): 575-581. (Li Zongli, Deng Chaoli, Zhang Guohui. A predictive model of effective elastic modulus of concrete under influence of aggregate gradation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(4): 575-581. (in Chinese))
- [19] Yang C C. Effect of the transition zone on the elastic moduli of mortar [J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(5): 727-736.
- [20] Garboczi E J, Bentz D P. Analytical formulas for interfacial transition zone properties [J]. Advanced Cement Based Materials, 1997, 6(3/4): 99-108.
- [21] Zheng Jianjun, Zhou Xinzhu, Jin Xianyu. An n -layered spherical inclusion model for predicting the elastic moduli of concrete with inhomogeneous ITZ [J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34(5): 716-723.
- [22] Huang Jinsong, Krabbenhoft K, Lyamin A V. Statistical homogenization of elastic properties of cement paste based on X-ray microtomography images [J]. International Journal of Solids and Structures, 2013, 50(5): 699-709.
- [23] 高岳毅. 水泥基材料微结构及其弹性性能的多尺度研究 [D]. 南京: 东南大学, 2014.
- [24] Stock A F, Hannant D J, Williams R I T. The effect of aggregate concentration upon the strength and modulus of elasticity of concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 1979, 31(109): 225-234.
- [25] Lutz M P, Monteiro P J M, Zimmerman R W. Inhomogeneous interfacial transition zone model for the bulk modulus of mortar [J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(7): 1113-1122.
- [26] 张国辉. 不同水压力环境下混凝土力学特性研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [27] 应宗权, 杜成斌. 考虑界面影响的混凝土弹性模量的数值预测 [J]. 工程力学, 2008, 25(8): 92-96. (Ying Zongquan, Du Chengbin. A numerical method for effective elastic modulus of concrete with interfacial transition zone [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(8): 92-96. (in Chinese))
- [28] 杨庆生. 复合材料力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [29] 杜善义, 王彪. 复合材料细观力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [30] 吴小波. 玄武岩纤维复合材料波纹板力学性能及其套衬结构性能分析 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2025, 53(1): 87-94. (Wu Xiaobo. Mechanical properties of basalt fiber composite corrugated plates and analysis of their lining structure performance [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(1): 87-94. (in Chinese))
- [31] 蒋林华, 闫菁怡, 杨国辉, 等. 复杂条件下水工混凝土研究进展 [J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(5): 81-88. (Jiang Linhua, Yan Jingyi, Yang Guohui, et al. Research progress on hydraulic concrete under complex conditions [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(5): 81-88. (in Chinese))
- [32] 梅塔, 蒙蒂罗. 混凝土微观结构、性能和材料 [M]. 欧阳东, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

(收稿日期: 2025-07-17 编辑: 雷燕)

基于开尔文冲量的单个球形颗粒附近空化泡的移动特性研究

郑潇潇¹, 张广超², 杨玲¹, 郑斌¹

(1. 中国消防救援学院消防工程系; 2. 国核铀业发展有限责任公司)

摘要:为探究水力机械遭受磨蚀破坏的微观机理,基于 Weiss 定理和开尔文冲量相关理论,采用高速摄影实验方法对单个球形颗粒附近空化泡的移动特性进行了定性研究,围绕颗粒半径、空化泡半径等重要参数,对空化泡的开尔文冲量进行了定量分析。研究结果表明,空化泡开尔文冲量理论模型可以有效预测单颗粒作用下的空化泡移动特性;颗粒与空化泡无量纲距离越大,空化泡开尔文冲量的绝对值越小;相比于线性汇,虚拟点源对空化泡开尔文冲量的贡献更大。

关键词:水力机械;球形颗粒;空化泡;空蚀;开尔文冲量;高速摄影

Study on movement characteristics of cavitation bubbles near a single spherical particle based on Kelvin impulse// Zheng Xiaoxiao¹, Zhang Guangchao², Yang Ling¹, Zheng Bin¹ (1. Department of Fire Protection Engineering, China Fire and Rescue Institute; 2. State Nuclear Uranium Resource Development Co., Ltd.)

Abstract: To investigate the microscopic mechanism of erosion damage in hydraulic machinery, a qualitative study on the movement characteristics of cavitation bubbles near a single spherical particle was conducted using high-speed photography experiments, based on Weiss' s theorem and Kelvin impulse theory. The Kelvin impulse of cavitation bubbles was quantitatively analyzed with respect to important parameters such as the particle radius and cavitation bubble radius. The results indicate that the theoretical model of Kelvin impulse of cavitation bubbles can effectively predict the movement characteristics of cavitation bubbles under the influence of a single particle. The absolute value of the Kelvin impulse decreases with increasing dimensionless distance between the particle and the cavitation bubble. Compared with linear sinks, virtual point sources contribute more significantly to the Kelvin impulse of cavitation bubbles.

Key words: hydraulic machinery; spherical particle; cavitation bubble; cavitation erosion; Kelvin impulse; high-speed photography

水力机械运行过程中,空化可能对机械过流部件的材料表面造成损伤,空化损伤也常发生在消防工程领域,例如消防泵长期受空蚀破坏后,寿命锐减^[1-3]。一般而言,当液体中存在颗粒物时,空化泡和颗粒联合作用引起的磨蚀破坏会严重威胁水力机械的安全运行^[4]。空化损伤的物理机制之一是空化泡在材料表面溃灭后产生的高速喷射的微射流,其损伤威力很大。然而,当颗粒和空化泡的距离相对较近时,颗粒也有可能对空化泡产生一定的“吸引效应”,从而保护壁面免受空化泡的损伤,这是因为颗粒可能会显著影响空化泡的形变、微射流以及空化泡的移动等^[5]。此外,颗粒与空化泡的相互作用也广泛应用在超声清洗、化学反应和生物医学等

领域^[6]。为了进一步探究颗粒对空化泡的影响,本文利用高速摄影实验方法和开尔文冲量相关理论,深入研究了球形颗粒作用下空化泡的动力学行为。

开尔文冲量在空化泡动力学的发展进程中始终发挥着至关重要的作用。Benjamin 等^[7]最先将开尔文冲量应用于空化泡动力学的相关研究中,随后 Blake 等^[8-9]基于第一性原理获得了几种简单壁面(如刚性壁面、自由表面等)附近空化泡的开尔文冲量表达式,并将壁面简化为液体的速度势。之后,Blake 等^[10]验证了利用开尔文冲量相关理论预测空化泡形态演变的科学性;基于变形体的非定常 Lagally 定理,Best 等^[11-12]进一步获得了简化的开尔文冲量表达式。Lagally 定理允许使用空化泡形心

基金项目:北京市科技计划项目(Z2311000038230221);中国消防救援学院项目(Y Y202606-09)

作者简介:郑潇潇(1995—),女,讲师,博士,主要从事空化及泡动力学研究。E-mail:1574333739@qq.com

通信作者:杨玲(1987—),女,副教授,硕士,主要从事空化及泡动力学研究。E-mail:yanglingsmile@163.com

位置的速度势来表征空化泡泡壁上的速度势,使得计算开尔文冲量的难度大大降低;Lagally 定理的应用也使得研究球形颗粒附近空化泡的开尔文冲量成为可能。根据 Weiss 定理, Milne-Thomson^[13] 首次获得了开尔文冲量的数值和解析表达式。Wang 等^[5] 基于大量试验数据验证了开尔文冲量对空化泡移动特性的预测价值,并给出了理论模型的适用范围。然而,目前对开尔文冲量的定量研究仍然不够全面和深入,一些重要参数的影响机制还有待揭示。

1 理论模型

在理论模型中,假设液体是不可压缩的,且为有势流动。将空化泡对周围液体的作用视为时变、固定位置、具有各向同性的点源和具有均匀源强密度的线性汇,球形颗粒的影响通过液体的速度势体现。

空化泡开尔文冲量反映了空化泡在一个周期内所受到合外力的累积效果^[14-18],可以通过计算空化泡开尔文冲量来研究颗粒作用下空化泡的动力学行为。根据 Lagally 定理、非定常流动伯努利方程和雷诺传输定理,空化泡开尔文冲量 I 的表达式如下^[5]:

$$I = 4\pi\rho \left(-\frac{4\pi\varphi}{m} \right) \int_0^T R^4 \dot{R}^2 dt \quad (1)$$

式中: ρ 为液体密度; T 为空化泡的一个振荡周期; R 为空化泡的瞬时半径; t 为时间; $\dot{R}$ 为 R 对 t 的一阶导数; φ 为由颗粒引起的液体的附加速度势; m 为点源的强度。式(1)中的 R 、 $\dot{R}$ 和 t 可以通过经典 Rayleigh-Plesset 方程^[14]得到:

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{p_{\text{ext}}(R,t) - p_0}{\rho} \quad (2)$$

其中 $p_{\text{ext}}(R,t) = \left(p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\kappa} - \frac{2\sigma}{R}$

式中: $\ddot{R}$ 为 R 对 t 的二阶导数; R_0 为平衡气泡半径,取 0.1 mm; p_0 为环境压强,取 100 kPa; κ 为多变指数; σ 为液体表面张力系数。

图 1 为球形颗粒对空化泡作用的 Weiss 定理示意图。将球形颗粒的影响用虚拟空化泡和均匀分布的线性汇的叠加作用来表示,且满足颗粒表面上液体的边界条件。因此,单个球形颗粒引起的液体速度势可表示为^[14]:

$$\varphi = -\frac{mR_p}{4\pi l} \frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|} + \frac{m}{4\pi R_p} \int_0^{R_p^2/l} \frac{ds}{|\mathbf{r} - (s,0)|} \quad (3)$$

其中

$$m = 4\pi R^2 \dot{R}$$

式中: R_p 为颗粒半径; l 为颗粒与空化泡中心的距离; $\mathbf{r}$ 为空化泡外某点处距离空化泡中心的距离; $\mathbf{r}_i$

为虚拟空化泡的初始形心位置; s 为积分变量。式(3)中的等号后第一项代表虚拟点源,第二项代表线性汇,线性汇的范围为 $(0, R_p^2/l)$ 。

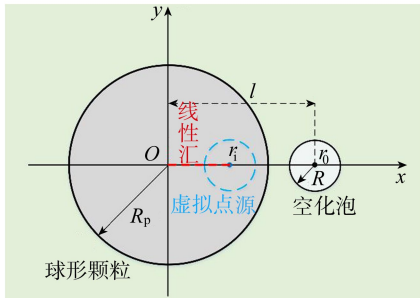


图 1 球形颗粒对空化泡作用的 Weiss 定理示意图

利用 MATLAB 中的自适应步长 ode45 求解器对上述理论模型进行数值求解,以获得空化泡开尔文冲量及空化泡周围液体速度场分布。数值计算中使用的重要常数取值如下:液体密度 1000 kg/m³,环境压强 100 kPa,液体表面张力系数 0.0725 kg/s²,多变指数 1.40。

本文研究的颗粒和空化泡的尺寸相当,颗粒的重力相对于空化泡对其的冲击力较小,因此,本文忽略颗粒的移动。此外,本文研究的空化泡的尺寸有限,忽略空化泡所受的浮力。

2 实验设置

2.1 实验系统

图 2 为用于研究空化泡和颗粒相互作用的高速摄影实验系统示意图。系统主要设备包括高速相机、激光发生器、计算机、装有去离子水的水箱、聚焦透镜、数字延迟发生器等。其中,聚焦透镜的作用是将激光发生器产生的高能激光束聚焦在装满去离子水的水箱中,空化泡便能在焦点处产生。激光能量衰减器被放置在激光束路径上,用于控制空化泡的尺寸。另外,将不同尺寸的球形颗粒用胶水固定在一根细针的尖端,颗粒的运动可以通过调节与针相连的三维位移台控制,颗粒中心和空化泡的中心控制在同一条水平线上。此外,颗粒和空化泡均淹没在去离子水中,并且远离水箱的壁面,因此液面和

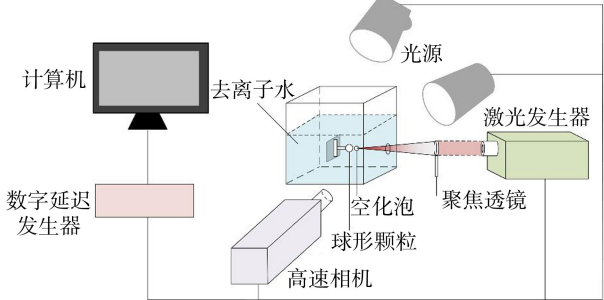


图 2 空化泡与颗粒相互作用高速摄影实验系统示意图

水箱对空化泡动力学的影响可以忽略。本文实验利用高速相机记录了静止流体中单个球形颗粒附近空化泡动力学的过程,拍摄速度为 9 万帧/s,每帧之间的时间间隔为 11.11 μs ,图像分辨率为 256 $\times$ 256 像素。实验过程中采用数字延迟发生器对照明光源与高速相机进行同步。

2.2 典型实验结果

图 3 为单个球形颗粒附近空化泡动力学的典型实验结果($l=2.3\text{ mm}$, $R_p=1.00\text{ mm}$,空化泡最大半径 $R_{\text{max}}=1.15\text{ mm}$,图 3(a)对应的时刻 $t_0=14.53\text{ }\mu\text{s}$,高速摄影每一帧时间间隔 $\Delta t=11.11\text{ }\mu\text{s}$)。在空化泡第一个振荡周期内(图 3(a)~(j)),空化泡在膨胀和溃灭过程中,泡壁呈现出明显的不均匀膨胀和收缩现象,尤其是溃灭阶段,泡壁左侧有明显凸起(图 3(f)~(j))。此外,由图 3 中红色虚线可以看到空化泡有明显的向左运动。在空化泡的第二个振荡周期,空化泡的运动更加剧烈和复杂(图 3(k)~(o))。后文主要分析空化泡的第一个振荡周期。

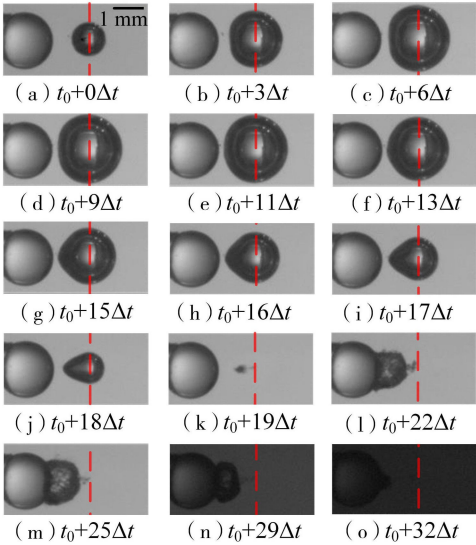


图 3 球形颗粒作用下空化泡前两个周期的动力学行为

3 结果与分析

3.1 开尔文冲量特性

图 4 为单个球形颗粒附近空化泡开尔文冲量的矢量图($R_p=0.001\text{ mm}$, $R_{\text{max}}=1.15\text{ mm}$),图中箭头和长度分别表示冲量的方向和大小,空化泡距离颗粒越近,开尔文冲量越大,并且开尔文冲量的方向始终朝向颗粒中心。

图 5 为空化泡在溃灭过程中的移动情况($R_p=1.00\text{ mm}$, $R_{\text{max}}=1.15\text{ mm}$)。由图 5(a)(b)可知,颗粒与空化泡间距较小时,空化泡朝向颗粒的移动比较显著;而当颗粒与空化泡间距较大时(图 5(c)),空化泡在溃灭过程中的移动不明显。这表明空化泡

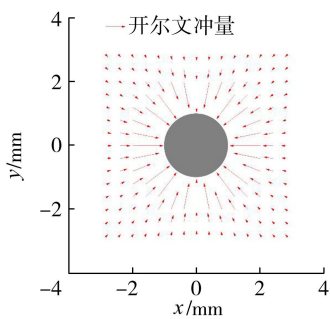


图 4 单个球形颗粒附近空化泡开尔文冲量矢量图

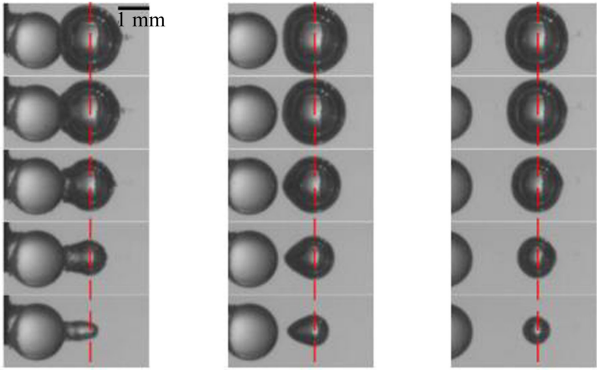


图 5 不同颗粒与空化泡距离下空化泡移动的定性展示

越靠近颗粒,空化泡受颗粒的影响越显著,这也定性说明了空化泡的开尔文冲量结果的合理性。

图 6 和图 7 分别为空化泡在溃灭时周围液体的速度场和空化泡动力学行为的实验结果($R_p=1.00\text{ mm}$, $R_{\text{max}}=1.15\text{ mm}$)。通过对比空化泡在溃灭状态下泡壁附近液体的速度分布和空化泡溃灭状态可知,泡壁附近液体速度分布的不均匀性与空化泡溃灭状态基本一致。靠近颗粒泡壁处的液体速度比较小,远离颗粒泡壁处的液体速度比较大,说明空化泡溃灭产生的射流方向是朝向颗粒的。根据空化泡溃灭后产生的射流方向也间接预测了空化泡朝向颗粒移动的现象^[15]。

3.2 颗粒与空化泡无量纲距离对空化泡开尔文冲量的影响

为进一步揭示颗粒和空化泡的核心参数对空化泡开尔文冲量的影响,基于颗粒与空化泡中心距离、颗粒半径和空化泡最大半径,定义颗粒与空化泡的无量纲距离 γ 如下^[5]:

$$\gamma = \frac{l - R_p}{R_{\text{max}}} \tag{4}$$

图 8 为空化泡开尔文冲量随颗粒与空化泡无量纲距离的变化情况,开尔文冲量负值表示方向朝向颗粒),开尔文冲量的绝对值随颗粒与空化泡无量纲距离的增大急剧减小,表明颗粒与空化泡无量纲距离的增大使颗粒对空化泡的吸引力下降,可以预

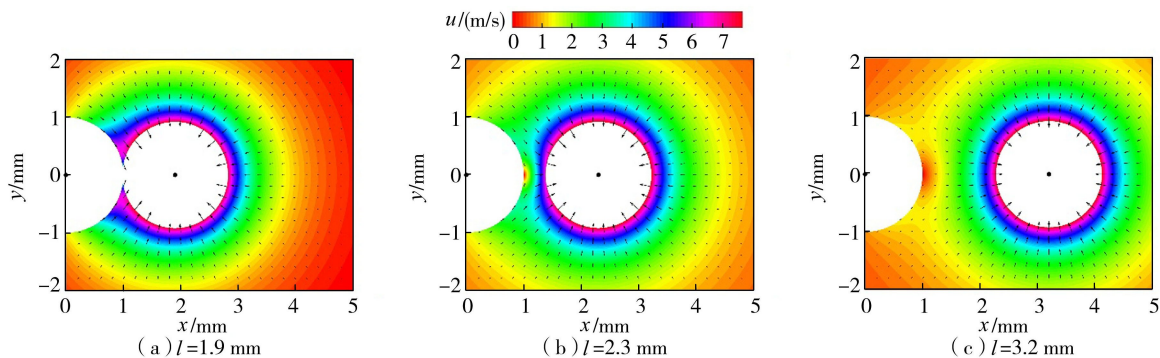


图 6 不同颗粒与空化泡距离下空化泡附近液体的速度分布特征

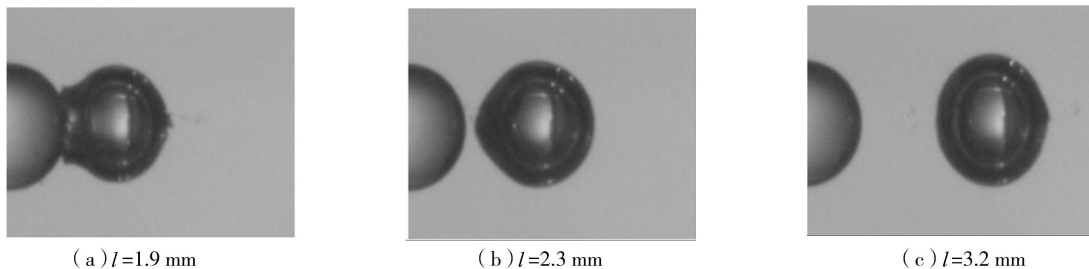


图 7 不同颗粒与空化泡距离下空化泡的动力学行为

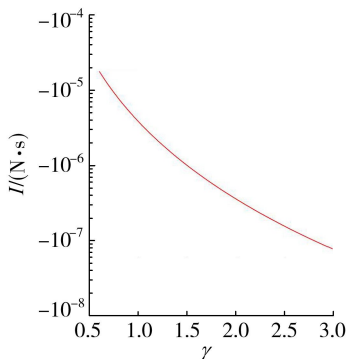


图 8 空化泡开尔文冲量随颗粒与空化泡无量纲距离的变化曲线

测出空化泡向颗粒移动的距离将随之减小。

3.3 空化泡开尔文冲量组成成分的贡献分析

为进一步探究空化泡开尔文冲量组成成分的贡献情况,图 9 给出了虚拟点源和线性汇对空化泡开尔文冲量贡献的对比情况 ($R_p = 1.00 \text{ mm}$, $R_{\max} = 1.15 \text{ mm}$)。由图 9 可知,虚拟点源使空化泡开尔文冲量的方向朝向颗粒,而线性汇对冲量的作用正好

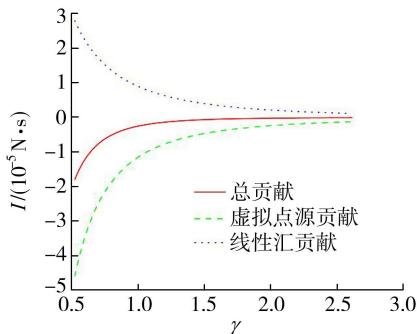


图 9 开尔文冲量组分的贡献对比

相反,朝向远离颗粒的方向。通过对比虚拟点源和线性汇的作用还可发现,相比于线性汇,虚拟点源对空化泡开尔文冲量的贡献更为显著。因此,虚拟点源和线性汇的综合贡献使得空化泡的开尔文冲量朝向颗粒。

4 结 论

a. 空化泡开尔文冲量理论模型可以有效预测单颗粒作用下空化泡的移动特性。

b. 颗粒与空化泡无量纲距离越大,空化泡开尔文冲量的绝对值越小,可以预测出空化泡向颗粒移动的距离也减小。

c. 相比于线性汇,虚拟点源对空化泡开尔文冲量的贡献更显著。

参考文献:

- [1] 杜萱,张宇宁. 恒定压力波作用下气泡振荡现象的理论分析[J]. 排灌机械工程学报, 2025, 43(7): 701-707. (Du Xuan, Zhang Yuning. Theoretical analysis of bubble oscillation phenomenon under constant pressure wave action[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2025, 43(7): 701-707. (in Chinese))
- [2] 石海峡,杨亚飞,李跃等. 蜗壳式多级泵首级叶轮切割压力脉动特性[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(1): 7-12. (Shi Haixia, Yang Yafei, Li Yue, et al. Pressure fluctuation in multistage volute pump with the first stage impeller trimmed[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2019, 37(1): 7-12. (in Chinese))

[3] 陈少林,王恺. 超高层建筑消防系统的减压阀常见问题分析及改进措施[J]. 给水排水, 2021, 57(增刊 2): 362-365. (Chen Shaolin, Wang Kai. Common problems analysis and improvement measures of pressure reducing valves in fire protection systems of super high-rise buildings[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57(S2): 362-365. (in Chinese))

[4] 纪昌明,张玉山,李继清. 市场环境下水电系统厂间经济运行问题研究[J]. 华北电力大学学报, 2005, 32(1): 99-102. (Jing Changming, Zhang Yushan, Li Jiqing. Study on inter-plant economic operation of hydroelectric system under market environment [J]. Journal of North China Electric Power University, 2005, 32(1): 99-102. (in Chinese))

[5] Wang Xiaoyu, Wu Guanhao, Zheng Xiaoxiao, et al. Theoretical investigation and experimental support for the cavitation bubble dynamics near a spherical particle based on Weiss theorem and Kelvin impulse [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 89: 106130.

[6] Zheng Xiaoxiao, Wang Xiaoyu, Zhang Yuning, et al. A single oscillating bubble in liquids with high Mach number [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 85: 105985.

[7] Benjamin T B, Ellis A T. The collapse of cavitation bubbles and the pressures thereby produced against solid boundaries[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences, 1966, 260(1110): 221-240.

[8] Blake J R, Cerone P. A note on the impulse due to a vapour bubble near a boundary [J]. The ANZIAM Journal, 1982, 23(4): 383-393.

[9] Blake J R, Taib B B, Doherty G. Transient cavities near boundaries(Part 1): rigid boundary[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1986, 170: 479-497.

[10] Blake J R, Leppinen D M, Wang Qianxi. Cavitation and bubble dynamics; the Kelvin impulse and its applications [J]. Interface focus, 2015, 5(5): 20150017.

[11] Best J P, Blake J R. An estimate of the Kelvin impulse of a transient cavity [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1994, 261: 75-93.

[12] Landweber L, Miloh T. Unsteady lagally theorem for multipoles and deformable bodies [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1980, 96(1): 33-46.

[13] Milne-Thomson L M . Theoretical hydrodynamics[J]. The Mathematical Gazette, 1996, 34(308): 3608696.

[14] Zheng Xiaoxiao, Wang Xiaoyu, Ding Zhiling, et al. Investigation on the cavitation bubble collapse and the movement characteristics near spherical particles based on Weiss theorem [J]. Ultrasonics Sonochemistry. 2023, 93: 106301.

[15] Hu Jinsen, Lu Xuan, Liu Yifan, et al. Numerical and experimental investigations on the jet and shock wave dynamics during the cavitation bubble collapsing near spherical particles based on OpenFOAM [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 99: 106579.

[16] Wang Xiaoyu, Wu Guanhao, Shen Junwei, et al. Research on the collapse dynamics of a restricted cavitation bubble near a right-angle wall based on Kelvin impulse theory [J]. Physics of Fluids, 2023, 35: 073335 .

[17] Hu Jinsen, Lu Xuan, Liu Yifan, et al. Numerical and experimental investigations on the jet and shock wave dynamics during the cavitation bubble collapsing near spherical particles based on OpenFOAM [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 99: 106576.

[18] 杜先荣,尹建勇,张永学,等. 基于 OpenFOAM 的缺陷壁面附近空化泡动力学过程模拟[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(1): 39-46. (Du Xianrong, Yin Jianyong, Zhang Yongxue, et al. Simulation of cavitation bubble dynamics near defective wall surface based on OpenFOAM [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1): 39-46. (in Chinese))

(收稿日期: 2025 - 05 - 18 编辑: 熊水斌)

(上接第 15 页)

[16] Chan S N, Cong J, Lee J H W. 3D numerical modeling of geyser formation by release of entrapped air from horizontal pipe into vertical shaft[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 144(3): 04017071.

[17] Zhang Shuangqing, Liu Jiachun, Huang Biao, et al. Numerical study of geyser events in rainstorm systems at different scales [J]. Water Science and Engineering, 2023, 16(4): 381-389.

[18] 刘伟,周开锋,赵晗旭,等. 城市排水管道间歇泉形成机理及防护措施研究[J]. 给水排水, 2025, 51(11): 121-128. (Liu Wei, Zhou Kaifeng, Zhao Hanxu, et al. Formation mechanism and protection measures of geysers in urban drainage pipes [J]. Water & Wastewater Engineering, 2025, 51(11): 121-128. (in Chinese))

[19] Fang Haoyu, Zhou Ling, Cao Yun, et al. 3D CFD simulations of air-water interaction in T-junction pipes of urban stormwater drainage system [J]. Urban Water Journal, 2022, 19(1): 74-86.

(收稿日期: 2025 - 03 - 19 编辑: 俞云利)

鄱阳湖总氮总磷时空变化的遥感反演分析

李 晓^{1,2,3}, 吴剑邦⁴, 薛晨阳^{5,6}, 熊丽黎⁷, 刘发根⁸, 张 奇^{5,6}

(1. 南京信息工程大学地理科学学院; 2. 中国科学院大学南京学院; 3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所;
4. 江西省赣抚尾间整治有限公司; 5. 河海大学水灾害防御全国重点实验室; 6. 长江保护与绿色发展研究院;
7. 江西省水文监测中心; 8. 鄱阳湖水文水资源监测中心)

摘要:基于 Landsat 遥感影像并结合实测数据,利用机器学习方法构建了鄱阳湖全湖总氮、总磷质量浓度反演模型,结合流域“五河”入湖水质数据,系统分析了 2021 年 8 月至 2023 年 1 月鄱阳湖总氮、总磷的时空分布特征。结果表明:利用 BP 神经网络构建的总氮质量浓度反演模型拟合效果良好($R^2=0.91$),基于遗传算法优化的 BP 神经网络构建的总磷质量浓度反演模型表现较好($R^2=0.82$);鄱阳湖总氮、总磷质量浓度季节性变化较强,丰水期水质总体优于枯水期;丰水期湖区总氮、总磷质量浓度空间分布异质性较强;鄱阳湖总氮、总磷质量浓度偏高的区域主要集中在湖区中部、东北部以及“五河”入湖口;特大干旱可加剧鄱阳湖水质恶化,导致全湖总氮、总磷质量浓度上升。
关键词:Landsat;遥感反演;总氮;总磷;鄱阳湖

Remote sensing inversion analysis of spatiotemporal variations in total nitrogen and total phosphorus in Poyang Lake//Li Xiao^{1,2,3}, Wu Jianbang⁴, Xue Chenyang^{5,6}, Xiong Lili⁷, Liu Fagen⁸, Zhang Qi^{5,6} (1. School of Geographical Science, Nanjing University of Information Science and Technology; 2. Nanjing College, University of Chinese Academy of Sciences; 3. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences; 4. Jiangxi Ganfu Weih Renovation Co., Ltd.; 5. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University; 6. Yangtze Institute for Conservation and Development; 7. Jiangxi Hydrological Monitoring Center; 8. Hydrology and Water Resources Monitoring Center of Poyang Lake)

Abstract: Based on Landsat remote sensing imagery and in-situ measurements, machine learning methods were used to construct inversion models for total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) mass concentrations across the entire Poyang Lake. Combined with water quality data from the five rivers (the Ganjiang, Fuhe, Xinjiang, Raohe and Xiushui rivers) flowing into the lake, the spatiotemporal distribution characteristics of TN and TP mass concentrations in Poyang Lake from August 2021 to January 2023 were systematically analyzed. The results show that the TN mass concentration inversion model constructed using a back propagation (BP) neural network achieves a good fit ($R^2=0.91$), and the TP mass concentration inversion model based on the GA-optimized BP neural network (GA-BP) performs well ($R^2=0.82$). The TN and TP mass concentrations in Poyang Lake exhibit strong seasonal variation, and the water quality in the wet season is generally better than that in the dry season. The spatial distribution of TN and TP mass concentrations in the lake area during the wet season shows strong heterogeneity. Areas with high TN and TP mass concentrations in Poyang Lake are mainly concentrated in the central and northeastern parts of the lake area and the entrances of the five rivers flowing into the lake. The extreme drought exacerbated water quality deterioration in Poyang Lake, leading to an increase in the TN and TP mass concentrations across the entire lake.
Key words: Landsat; remote sensing inversion; total nitrogen; total phosphorus; Poyang Lake

湖泊是地球上重要的淡水资源之一,为人类提供生产、生活用水^[1]。鄱阳湖位于长江中游,是我国第一大淡水湖泊,也是我国宝贵的淡水资源^[2]。随着鄱阳湖流域人口的增长和工农业的发展及工农业和生活污水的大量排放,鄱阳湖入湖氮磷负荷有所增加,水环境质量下降,水体富营养化有加剧趋势,影响到区域社会经济的可持续发展^[3-4]。氮磷是水体富营养化的物质基础和主要诱因^[5-6],其中总氮

(TN)和总磷(TP)作为指示指标,被广泛用于表征水体富营养化的程度,已成为内陆水体水质评价的重要依据。因此,开展鄱阳湖水质的监测,研究总氮、总磷时空分布特征,解析其原因,对于鄱阳湖富营养化防治有着重要的意义。

传统人工巡测可精确获得点位的水质状况,但由于点位数的限制,难以获取整个湖泊水体的水质状况及其动态变化^[7-9],这是传统的野外采样方法在监测总氮、总磷时空动态分布研究中存在的局限性。20世纪70年代以来,遥感技术的应用越来越广泛,逐渐扩展到陆地水体的水环境监测中。遥感监测具有范围大、持续时间长、周期短、成本低等优点,可以实现大湖面水质的长时间、高时空分辨率的监测,一定程度上弥补了传统人工采样方式的局限性,可以较好地反映湖泊水质的时空差异性和变化规律。因此,越来越多的研究将遥感手段与人工实测数据进行结合,通过建立反演模型来获取湖面的水质状况^[10-11]。水质遥感的基本原理是通过遥感传感器接收经水体吸收、反射和大气衰减后的反射光谱,再将光谱特征与污染物含量进行关联,根据两者的关系构建模型,从而反演水质参数^[12]。但总氮、总磷是非光敏参数,难以直接通过遥感反演获取^[13-14],需要借助半经验法或机器学习进行间接遥感解析,往往需要通过构建基于实测数据验证的遥感反演模型来获取水体中总氮、总磷含量。

众多学者利用遥感技术对太湖、长江、洞庭湖和鄱阳湖等内陆水体进行了水环境监测:Gao等^[15]利用Landsat 5数据,建立了太湖水质反演模型,对总氮、总磷等8个水质指标进行了分析;Chen等^[16]利用实测数据和Landsat数据反演草海的总氮、总磷等参数,证明了非光敏参数遥感反演的可行性;杜冰雪等^[17]研究了鄱阳湖2009—2016年富营养化时空变化,发现鄱阳湖湖区空间差异不大,但该研究仅仅依靠实测数据监测湖区水质,空间分辨率不高;陈兴鹏等^[18]基于高分一号、Landsat 8等多源卫星数据,使用遥感光谱的单一波段反射率构建了反演模型,对2013—2019年秋季鄱阳湖水生态进行了遥感监测。

鄱阳湖汛期水域面积广阔,枯水期面积显著缩小,呈显著的季节性变化。其水位和面积的年际和年内波动,导致水质状况表现出明显的时空差异性。已有研究在揭示鄱阳湖水质时空分布特征方面仍显不足,尤其缺乏2022年特大干旱背景下总氮和总磷的空间分布特征对比分析。为弥补这个不足,本文基于2021—2023年的实测数据,结合同时段遥感反射率数据,利用机器学习方法反演了2021年8月至2022年1月和2022年8月至2023年1月鄱阳

湖全湖总氮、总磷质量浓度,分析了研究时段总氮、总磷质量浓度的空间和季节性变化特征及可能的影响因素,以期为认识鄱阳湖水质对极端干旱水文情势的响应提供新的视角。

1 研究区概况与数据

1.1 研究区概况

鄱阳湖位于江西省北部、长江中游南岸(28°24'N~29°46'N,115°49'E~116°46'E),是长江中游最大的一个过水型、吞吐型、季节性通江湖泊^[19]。鄱阳湖流域面积达16.2万km²,主要承纳赣江、抚河、信江、饶河和修水(以下简称“五河”)水系及环湖区间来水。鄱阳湖水情变化受“五河”流域来水和长江水位的双重影响^[20],流域来水经湖区调蓄后由北部湖口注入长江(图1)。每年4月,鄱阳湖流域降水增多,水位上涨;9月开始水位下降。鄱阳湖洪(6—8月)、枯(11月至次年3月)的水位差可达15m。丰水期时,鄱阳湖水域面积可达3000km²,而枯水期萎缩至不足1000km²^[21],呈现“洪水一片,枯水一线”的独特洪泛特征。

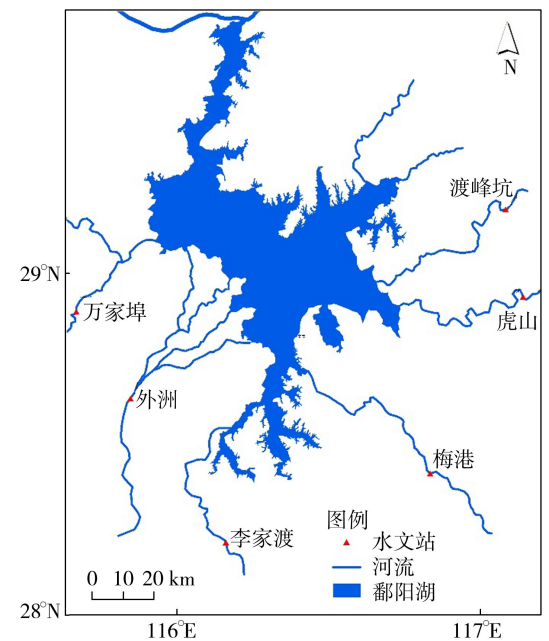


图1 研究区概况

受极端气候条件影响,鄱阳湖干旱化趋势严重,尤其在2022年的特大干旱年。2022年8—10月降水量均在25mm以下,特别是9月仅有1mm,降水量远低于2021年。受降雨的影响鄱阳湖2022年水位较2021年低,尤其是8—10月。2022年8月水位仅为10m左右,9月和10月水位更低,甚至只有7m左右,与2021年相差5~10m。

1.2 研究数据

使用美国陆地卫星Landsat系列遥感数据产品

(<https://earthexplorer.usgs.gov/>)。数据产品系列为 2021—2023 年,包含 Landsat 7、Landsat 8 和 Landsat 9 数据^[22]。在影像筛选过程中,设置单幅影像云量小于 50%,在此基础上通过目视选取无云遮蔽湖区的影像。实测数据由江西庐山水文水资源监测大队提供,包括 2021 年 1 月至 2023 年 12 月的总氮、总磷质量浓度数据。总氮、总磷实测数据由每月月初的湖区人工巡测采样测定,采集的水样均在 24 h 内完成实验室分析,测定方法为分光光度法。虽然 2021—2023 年每月测量 16 组样本,共计 576 组实测数据,但由于 Landsat 系列卫星数据存在被云雾大量遮蔽湖区的现象,因此除去无法识别湖区的影像,可与实测数据时空相匹配的共 384 组。巡测采样的实测总氮质量浓度范围为 0~3.5 mg/L,均值为 1.57 mg/L,实测总磷质量浓度范围为 0~0.18 mg/L,均值为 0.066 mg/L。虽然巡测采集水样费时费力,且站点稀疏,但其获取的水质数据准确性较高,可为本文的水质反演模型构建及反演结果验证提供可靠支撑。

大气校正使用 ENVI 5.3 中的 Fast Line-of-sight atmospheric Analysis of Hypercubes (FLAASH) 模块。FLAASH 能够精确补偿大气影响,其适用的波长范围包括可见光至近红外及短波红外,最大波长为 3 μm^[23]。由于鄱阳湖水域面积季节性变幅较大,无法使用统一的水体边界划分水域,因此在反演之前需要提取水体边界。本文采用归一化水体指数 (NDWI) 对遥感影像的特定波段进行归一化差值处理,以突显影像中的水体信息。一般来说,NDWI 阈值范围在 0.1~1 之间,较低的阈值(如 0.1)可用于提取较小的水体,如河流、湖泊等;较高的阈值(如 0.5 或 1)可用于提取较大的水体,如海洋^[24]。本文水体提取的阈值范围选定为大于 0.1。基于生成的 NDWI 图像,利用密度分割法对像元值进行分类,从而实现鄱阳湖水体的提取。

2 研究方法

2.1 遥感反演技术路线

本文遥感反演的技术路线如下:①先对数据进行处理,包括实测数据和遥感卫星数据预处理,从而获取波段组合;②根据波段组合构建总氮和总磷质量浓度的反演模型;③对模型进行精度评价;④利用模型反演湖区总氮、总磷质量浓度。

2.2 反演模型构建

2.2.1 数据清洗

由于用于模型训练和预测的湖泊光谱反射率数据仅为 Landsat 系列卫星数据,并无光谱仪等实测的

波谱数据校验,再加上数据异常值、缺失值、重复值等对模型的训练和预测造成干扰,因此需对数据进行降噪处理,目的是增强波谱特征,加强特征量与实测值的相关性,提高模型预测的准确度。

2.2.2 敏感波段分析

对遥感数据预处理完成后,获取与人工采样点相同地理位置和采样时间段的波段反射率,利用 SPSS 统计软件将 384 组波段反射率和与之相对应的实测质量浓度数据进行皮尔逊相关分析。由于单一波段反射率难以满足反演精度的要求,本文基于 Landsat 的 6 个波段组合了 20 种波段算法,选取了皮尔逊相关系数绝对值较高的前 3 个波段反射率算法组合作为特征量、实测数据作为输出构建反演模型。与总氮相关性较强的波段组合为 B3/B2、B3/B1 和 B2/B1,与总磷相关性较强的波段组合为 B3/B2、B3/B1 和 (B4-B1+B3)/(B4+B1+B3),相关系数均在 0.6 以上。

2.2.3 机器学习算法的选择

本文选用随机森林、支持向量机、基于粒子群算法优化的支持向量机、BP 神经网络、基于遗传算法优化的 BP (GA-BP) 神经网络和基于粒子群算法优化的 BP 神经网络 6 种机器学习方法构建反演模型。用于机器学习模型的样本为 384 组,包含 3 个输入特征量、1 个输出特征量,共 1 536 个样本。为确保模型训练与验证的科学性,样本数据组按照 7:2:1 的比例划分为训练集、测试集、验证集,其中训练集用于模型拟合,测试集用于测试预测精度,验证集用于验证模型精度。

如表 1 所示,随机森林、支持向量机、基于粒子群算法优化的支持向量机拟合效果较差(决定系数 $R^2 < 0.6$),而利用 BP 神经网络算法构建的总氮质量浓度反演模型拟合效果良好,基于 GA-BP 神经网络构建的总磷质量浓度反演模型拟合效果较好。GA-BP 神经网络解决了局部最小化、学习速度慢、过拟合等问题,显著提高了 BP 神经网络的性能。模型参数设置如下:BP 神经网络模型输入层节点数为 3 (对应 3 种敏感波段组合),输出层节点数为 1 (对应目标水质参数),隐含层节点数为 5,最大迭代次数为 1 000,学习率为 0.01;GA-BP 神经网络模型输入层节点数为 3,输出层节点数为 1,隐含层节点数为 6,学习率为 0.01,遗传代数 50,种群规模为 30。

2.3 模型精度评价指标

模型精度评价是评估实测值与模型预测值之间的拟合效果。训练集的精度越高,模型的稳定性越好;测试集的精度越高,模型的预测能力越强。使用确定性系数 (R^2)、均方根误差 (RMSE) 和平均绝对

表 1 6 种机器学习方法构建总氮、总磷质量浓度反演模型的验证精度

机器学习方法	R^2		RMSE/(mg/L)		MAE/(mg/L)	
	总氮	总磷	总氮	总磷	总氮	总磷
随机森林	0.56	0.48	0.71	0.74	0.50	0.56
支持向量机	0.34	0.35	0.79	0.75	0.66	0.64
基于粒子群算法优化的支持向量机	0.41	0.40	0.72	0.78	0.61	0.59
BP 神经网络	0.91	0.67	0.12	0.34	0.09	0.32
GA-BP 神经网络	0.75	0.82	0.49	0.01	0.21	0.01
基于粒子群算法优化的 BP 神经网络	0.64	0.56	0.43	0.53	0.32	0.48

误差(MAE)作为模型精度的评价指标。

3 结果与分析

3.1 模型拟合效果

总氮、总磷质量浓度反演模型拟合效果很好, R^2 分别为 0.91、0.82, RMSE 分别为 0.12、0.01 mg/L, MAE 分别为 0.09、0.01 mg/L(表 1)。如图 2 所示,数据点均匀分布在 45 度对角线的两侧,总氮、总磷质量浓度反演模型均未见明显的系统误差,两个模

型的拟合效果均符合要求。

3.2 鄱阳湖总氮、总磷时空分布特征

3.2.1 空间分布特征

采用构建的反演模型对 2021 年 8 月至 2022 年 1 月和 2022 年 8 月至 2023 年 1 月鄱阳湖总氮、总磷质量浓度进行了反演计算,其中 2021 年和 2022 年 8、10、11、12 月反演结果如图 3 和图 4 所示。2021 年 8—10 月为汛期,鄱阳湖水域面积较大,总氮、总磷质量浓度空间异质性较强,湖区中部、东北部以及

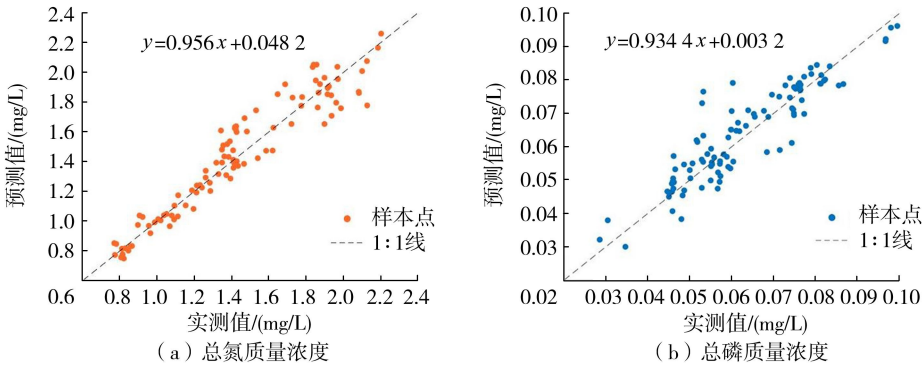


图 2 反演模型拟合效果

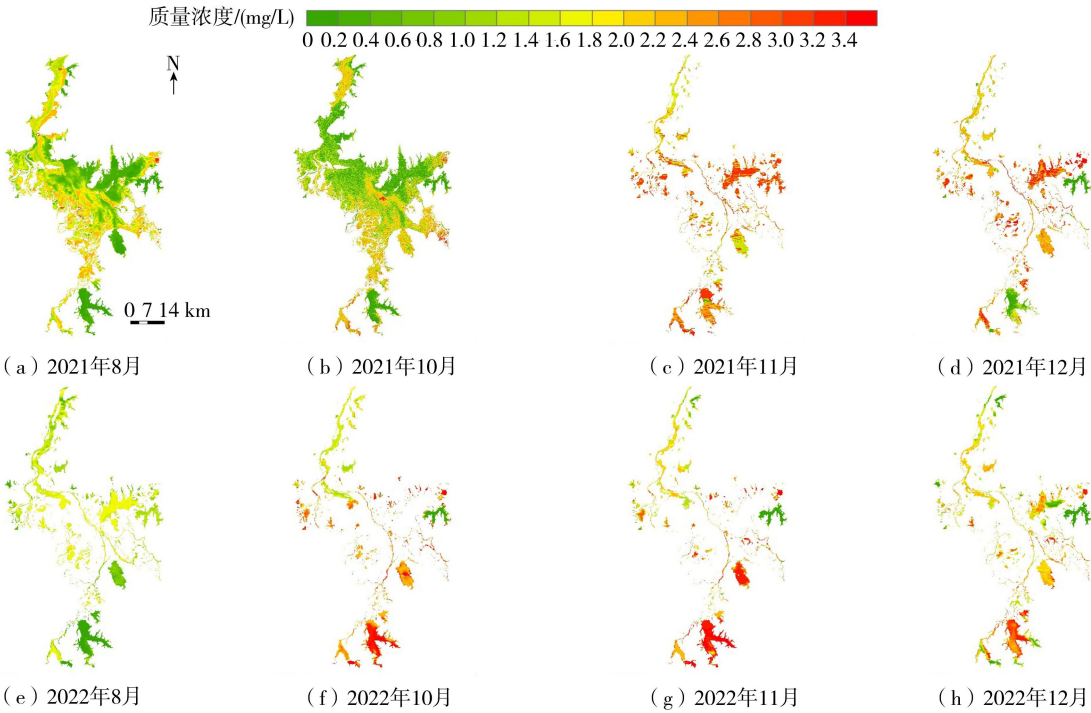


图 3 2021 年和 2022 年总氮质量浓度空间分布

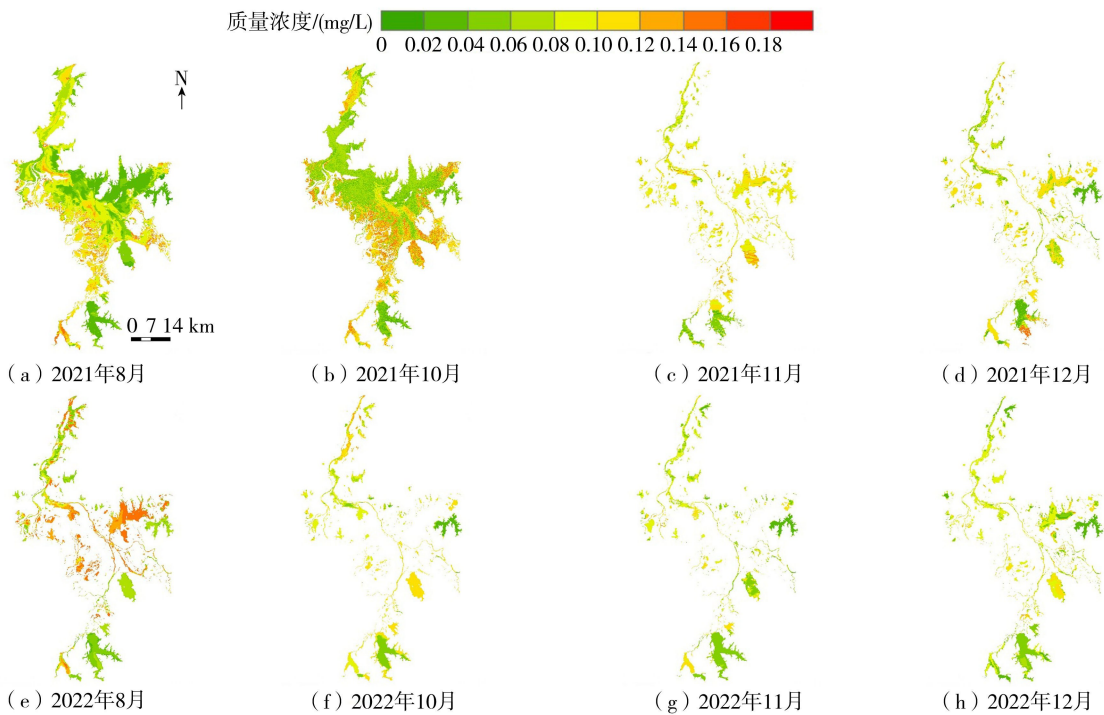


图4 2021年和2022年总磷质量浓度空间分布

“五河”入湖区域总氮、总磷质量浓度偏高,主湖区总氮在1.7~2.2 mg/L之间,总磷在0.06~0.14 mg/L之间,而其他区域总氮在1.0 mg/L以下,总磷在0.06 mg/L以下。枯水期(2021年11月至2022年1月)水域面积锐减,总氮、总磷质量浓度明显升高,大部分湖区总氮质量浓度在1.9 mg/L以上,东北部甚至超过2.3 mg/L。2022年1月,全湖总氮、总磷质量浓度有所下降,主湖区总氮质量浓度在1.0~2.0 mg/L之间,总磷质量浓度在0.08 mg/L以下,但隔离水体(与主湖区分割的独立水体)的总氮质量浓度较高。综上所述,2021年湖区总氮、总磷质量浓度空间分布较为一致,表现在8—10月空间分布异质性较强,部分区域质量浓度偏高,11月至次年1月空间异质性有所减弱,但整体质量浓度较高。

如图3所示,2022年8月至2023年1月湖泊水域面积较小,8—9月总氮质量浓度整体偏低,均在1.6 mg/L以下;10月至次年1月湖区总氮质量浓度

明显升高,大部分区域在1.9~3.0 mg/L之间。如图4所示,2021年8—9月湖区总磷质量浓度空间分布异质性较强,湖区中部和东北部总磷质量浓度较高,在0.10~0.16 mg/L之间,而其他区域总磷质量浓度在0.06 mg/L以下;2022年10月至2023年1月总磷质量浓度空间分布异质性减弱。综上所述,2022年8—9月湖区总氮质量浓度偏低,但在局部区域偏高,空间异质性较强,2022年10月至2023年1月湖区总氮、总磷质量浓度空间分布异质性明显减弱。

3.2.2 时间变化特征

鄱阳湖总氮、总磷月均质量浓度(图5)表现出较为明显的季节性变化。秋冬季(10月至次年1月)总氮、总磷质量浓度总体高于夏季(8—9月)。具体来说,2021年8—10月,总氮质量浓度在1.37~1.44 mg/L之间,明显低于11月至次年1月(1.60~2.03 mg/L)。2022年10月总氮浓度增加明

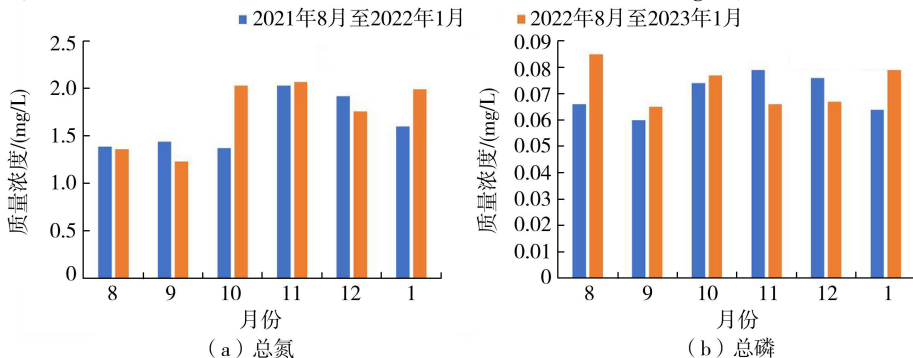


图5 2021年8月至2022年1月和2022年8月至2023年1月总氮、总磷月均质量浓度变化

显,达 2.0 mg/L 左右,此后一直保持较高质量浓度 (1.6~2.0 mg/L)。

相比之下,总磷质量浓度变化幅度较小,但仍可看出 2021 年总磷质量浓度变化呈先上升后下降的趋势,峰值出现在 11 月(0.08 mg/L 左右)。2022 年 10 月至次年 1 月的总磷质量浓度同样较高,均在 0.06 mg/L 以上。

3.2.3 不同质量浓度区间值分布特征

为了进一步揭示不同质量浓度水平的空间分布特征,将总氮质量浓度 0~1.5 mg/L 划定为中低质量浓度区, >1.5~2.4 mg/L 为高质量浓度区, >2.4 mg/L 为极高质量浓度区;将总磷质量浓度 0~0.06 mg/L 划定为中低质量浓度区, >0.06~0.12 mg/L 为高质量浓度区, >0.12 mg/L 为极高质量浓度区。

由图 6 和图 7 可知,除 9 月外,2022 年总氮、总磷高和极高质量浓度区占比均高于 2021 年,2022 年鄱阳湖全湖总氮高和极高质量浓度区占比相较于 2021 年提高了 1.4~44.8 个百分点,其中 10 月最为突出,提高了 44.8 个百分点。2022 年鄱阳湖全湖总磷高和极高质量浓度区占比相较于 2021 年提高了 8.5~29.0 个百分点,同样 10 月变化最大,提高了 29.0 个百分点。此外,2022 年总氮、总磷极高质量浓度区占比明显高于 2021 年,相较于 2021 年分别平均提高了 6.0 个百分点和 3.4 个百分点。其次,2021 年总氮中低质量浓度区占比为

17.3%~61.4%,总磷为 18.7%~53.3%;2022 年总氮中低质量浓度区占比为 15.3%~77.5%,总磷为 10.2%~45.5%。由此可见,2022 年在特大干旱背景下,鄱阳湖水体中总氮、总磷高和极高质量浓度区占比明显提高。

4 讨论

4.1 总氮、总磷质量浓度季节性变化的原因

鄱阳湖总氮、总磷质量浓度季节性变化较强,秋冬季偏高,丰水期水质总体优于枯水期。这与鄱阳湖季节性水文变化节律有关。夏季降水量高,“五河”入湖径流量增多,湖区水位增高,而冬季降水量低,入湖径流减少,湖区水位降低。因此,丰水期降雨充沛时,虽入湖径流量大,携带氮磷等污染物入湖,但湖泊水位高,蓄水量大,起到一定程度的稀释作用,使总氮、总磷质量浓度值相对较低;而枯水期水位低,水文连通性弱,局部湖区的换水周期较长,容易引起氮磷等污染物的聚集,导致较高的污染物含量。

4.2 总氮、总磷质量浓度空间差异的原因

a. 受湖盆结构的影响,鄱阳湖水文、水动力过程呈现明显的空间差异,这是导致湖区总氮、总磷质量浓度空间异质性的主要原因。比如,受局部地形的影响,东北湖湾换水周期较长,可达 180 d,最高可超过 300 d^[25]。东北湖湾较长的换水周期导致污染物易在此区域富集和滞留^[26],因此东北湖湾总氮、

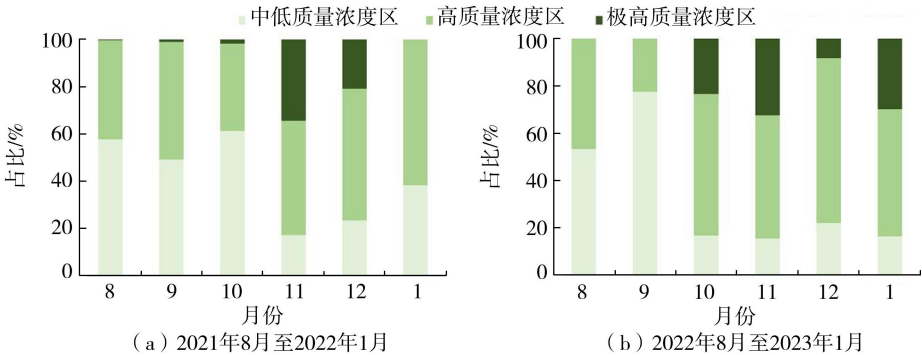


图 6 2021 年 8 月至 2022 年 1 月和 2022 年 8 月至 2023 年 1 月总氮各质量浓度分区占比

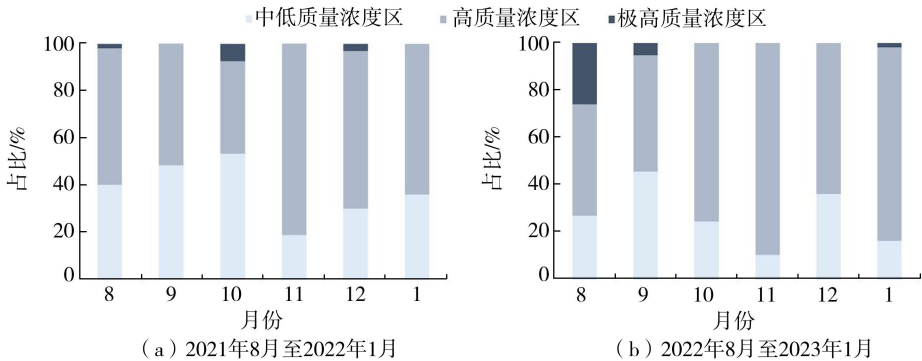


图 7 2021 年 8 月至 2022 年 1 月和 2022 年 8 月至 2023 年 1 月总磷各质量浓度分区占比

总磷质量浓度偏高,尤其在枯水期,水位下降引起水文连通性进一步变弱,抬升了该湖区污染物含量。

b. “五河”入湖口总氮、总磷质量浓度偏高的现象在水域面积较大的 2021 年 8—10 月最为明显。这主要是由于流域径流携带大量来自面源污染的氮磷污染物在入湖口输入鄱阳湖^[27],这些来自流域的氮磷污染物以入湖口为中心,向湖区扩散^[27],因此,“五河”入湖口的氮磷含量通常明显高于其他区域。

c. 湖区北部总氮、总磷质量浓度偏高的现象在水位快速上涨的汛期较为明显。2021 年 8 月湖口水位达 15.33 m,到 9—10 月涨至 16.5 m 左右。这说明汛期水位快速上涨,鄱阳湖向长江的排泄能力减弱,导致北部湖区流速缓慢,而上游湖区的大量氮磷污染物需经北部水道输送至长江,导致污染物在北部湖区聚集,使得湖区北部水道氮磷污染物含量偏高。

d. 鄱阳湖丰水期水质空间异质性较强,原因在于丰水期换水周期的空间异质性要明显强于枯水期^[25],受入湖径流的影响,丰水期“五河”入湖口区域水体交换速率相对较快^[28],换水周期较短,而湖区水域面积较大,导致湖区换水周期空间异质性较强。

4.3 2022 年秋季干旱的影响

a. 2022 年秋季干旱导致湖区总氮、总磷质量浓度上升现象较 2021 年秋季提前了 1 月。2022 年 9 月湖区水位较 2021 年降低了 9.4 m,水域面积缩小了 75%。10 月湖区水位较 2021 年降低了 7.8 m,水域面积缩小了 74%。2022 年秋季因降水量减少,鄱阳湖提前进入枯水期,导致总氮、总磷质量浓度上升的现象提前。

b. 湖区保持总氮、总磷质量浓度偏高现象持续时间更久。2021 年秋冬季湖区总氮、总磷质量浓度偏高的现象主要在 11—12 月,到次年 1 月有所下降,而 2022 年秋冬季湖区总氮、总磷质量浓度偏高的现象从 10 月持续到了次年 1 月。

c. 鄱阳湖湖区总氮、总磷高和极高质量浓度区扩大。2022 年 8 月因降水量减少,鄱阳湖提前进入枯水期,2022 年秋季水域面积甚至比 2021 年冬季还小,高和极高质量浓度区占比相对较高。此外,总氮、总磷质量浓度上升现象提前以及质量浓度偏高现象持久共同导致了 2022 年湖区总氮、总磷高和极高质量浓度区扩大。

综上,2022 年特大干旱加剧了鄱阳湖水质状况的恶化,不仅导致湖区总氮、总磷质量浓度提高及高和极高质量浓度区占比明显扩大,还导致湖区总氮、总磷质量浓度上升的时间提前,且湖区保持总氮、总

磷质量浓度偏高状态的持续时间延长。

5 结 论

a. 利用 BP 神经网络构建的总氮质量浓度反演模型拟合效果良好, R^2 为 0.91;而 GA-BP 神经网络在构建鄱阳湖总磷质量浓度反演模型时表现较好, R^2 为 0.82。

b. 鄱阳湖总氮、总磷质量浓度季节性变化较强,秋冬季总氮、总磷质量浓度偏高,丰水期水质总体优于枯水期。鄱阳湖季节性水文节律变化是影响氮、磷质量浓度季节变化的主因。

c. 鄱阳湖总氮、总磷质量浓度偏高的区域主要集中在湖区中部、东北部以及“五河”入湖口。在丰水期,湖区北部水道总氮、总磷质量浓度升高。流域“五河”、湖泊、长江的相互作用以及鄱阳湖流场是影响氮磷含量空间分异的主因。

d. 特大干旱(2022 年秋冬季)加剧了鄱阳湖水质恶化,不仅导致全湖总氮、总磷质量浓度升高,且高和极高质量浓度区占比明显增大,全湖总氮、总磷高和极高质量浓度状态的持续时间也有所延长。

参考文献:

[1] Pi Xuehui, Luo Qiuqi, Feng Lian, et al. Mapping global lake dynamics reveals the emerging roles of small lakes [J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 5777.

[2] 张奇,刘元波,姚静,等. 我国湖泊水文学研究进展与展望[J]. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1360-1379. (Zhang Qi, Liu Yuanbo, Yao Jing. Lake hydrology in China: advances and prospects [J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(5): 1360-1379. (in Chinese))

[3] 田熊长,蒋水华,贾卓,等. 基于 KH-SVM 的鄱阳湖水质评价及变化趋势分析[J]. 环境工程, 2023, 41(1): 72-78. (Tian Xiongchang, Jiang Shuihua, Jia Zhuo, et al. Water quality evaluation and change trend analysis of the Poyang Lake based on KH-SVM [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(1): 72-78. (in Chinese))

[4] 侯露,高愈霄,刘冰,等. 汛期暴雨情景下鄱阳湖流域水质时空分布特征与污染成因分析[J]. 中国环境监测, 2023, 39(4): 110-124. (Hou lu, Gao Yuxiao, Liu Bing, et al. Spatial-temporal distribution characteristics and pollution causes of water quality in Poyang lake basin under rainstorm in flood season [J]. Environmental Monitoring in China, 2023, 39(4): 110-124. (in Chinese))

[5] Graeber D, McCarthy M J, Shatwell T, et al. Consistent stoichiometric long-term relationships between nutrients and chlorophyll-a across shallow lakes [J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 809.

- [6] Fernandez-Figueroa E G, Rogers S R, Waters M N, et al. The green convergence: United States lakes are collectively moving toward a eutrophic state[J]. *Harmful Algae*, 2024, 139:102721.
- [7] Iadtem N, Saengchut P, Obpat S, et al. Application of dominant phytoplankton to assess water quality in small reservoirs[J]. *Journal of Ecological Engineering*, 2025, 26 (7): 114-129.
- [8] Rome M, Beighley R E, Faber T. Sensor-based detection of algal blooms for public health advisories and long-term monitoring[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 767:144984.
- [9] Schürmann Q J F, Visser P M, Sollie S, et al. Risk assessment of toxic cyanobacterial blooms in recreational waters: a comparative study of monitoring methods[J]. *Harmful Algae*, 2024, 138:102683.
- [10] Batina A, Krtalić A. Integrating remote sensing methods for monitoring lake water quality: a comprehensive review [J]. *Hydrology*, 2024, 11(7): 92.
- [11] Yang Haibo, Kong Jialin, Hu Huihui, et al. A review of remote sensing for water quality retrieval: progress and challenges[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(8): 1770.
- [12] Adjovu G E, Stephen H, James D, et al. Overview of the application of remote sensing in effective monitoring of water quality parameters [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15 (7): 1938.
- [13] Li Xiaojuan, Huang Mutao, Li Jianbao. Remote sensing inversion of lake water quality parameters based on ensemble modelling[J]. *E3S Web of Conferences*, 2020, 143:2007.
- [14] Yuan Yuhao, Lin Zhiping, Jiang Xinhao, et al. Hyper-parameter optimization-based multi-source fusion for remote sensing inversion of non-photosensitive water quality parameters [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2024, 45(18): 6838-6859.
- [15] Cao Hongye, Han Ling. Hourly remote sensing monitoring of harmful algal blooms (HABs) in Taihu Lake based on GOCI images [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(27): 35958-35970.
- [16] Chen Lei, Liu Leizhen, Liu Shasha, et al. The application of remote sensing technology in inland water quality monitoring and water environment science: recent progress and perspectives[J]. *Remote Sensing*, 2025, 17(4): 667.
- [17] 杜冰雪, 徐力刚, 张杰, 等. 鄱阳湖富营养化时空变化特征及其与水位的关系 [J]. *环境科学研究*, 2019, 32 (5): 795-801. (Du Bingxue, Xu Ligang, Zhang Jie, et al. The spatial-temporal characteristics of eutrophication in Poyang Lake and its relationship with the water level[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32 (5): 795-801. (in Chinese))
- [18] 陈兴鹏, 王怀清, 戴芳筠, 等. 鄱阳湖水生态遥感监测及干旱影响分析[J]. *气象研究与应用*, 2024, 45 (4): 102-107. (Chen Xingjuan, Wang Huaqing, Dai Fangyun, et al. Remote sensing monitoring of water ecology in Poyang Lake and assessment of drought impact [J]. *Journal of Meteorological Research and Application*, 2024, 45 (4): 102-107. (in Chinese))
- [19] 陶海南. 鄱阳湖生态环境保护与生态文明建设 [C]// 中国环境科学学会 2009 年学术年会论文集. 北京: 中国环境科学学会, 2009: 320-340.
- [20] 刘健, 张奇, 左海军, 等. 鄱阳湖流域径流模型 [J]. *湖泊科学*, 2009, 21 (4): 570-578. (Liu Jian, Zhang Qi, Zuo Haijun, et al. A surface runoff model for Lake Poyang watershed [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, 21 (4): 570-578. (in Chinese))
- [21] 张奇, 鄱阳湖水文情势变化研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2018: 50-60.
- [22] Zhao Qiang, Yu Le, Du Zhenrong, et al. An overview of the applications of earth observation satellite data: impacts and future trends[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(8): 1863.
- [23] Katkovsky L V, Martinov A O, Siliuk V A, et al. Fast atmospheric correction method for hyperspectral data[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(11): 1698.
- [24] Yang Xiucheng, Zhao Shanhan, Qin Xiubin, et al. Mapping of urban surface water bodies from Sentinel-2 MSI imagery at 10 m resolution via NDWI-based image sharpening[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(6): 596.
- [25] 李云良, 姚静, 李梦凡, 等. 鄱阳湖换水周期与示踪剂传输时间特征的数值模拟 [J]. *湖泊科学*, 2017, 29 (1): 32-42. (Li Yunliang, Yao Jing, Li Mengfan, et al. Numerical simulations of residence time and tracer travel time in Lake Poyang [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, 29(1): 32-42. (in Chinese))
- [26] Li Yunliang, Yao Jing. Estimation of transport trajectory and residence time in large river-lake systems: application to Poyang Lake (China) using a combined model approach[J]. *Water* 2015, 7: 5203-5223.
- [27] 李云良, 姚静, 李梦凡, 等. 鄱阳湖水流动与污染物迁移路径的粒子示踪研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25 (11): 1748-1758. (Li Yunliang, Yao Jing, Li Mengfan, et al. Research of water flow and pollutant transport pathways in Poyang Lake using particle-tracking technique[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(11): 1748-1758. (in Chinese))
- [28] 张素香, 许新发, 徐兴, 等. 鄱阳湖水龄季节性变化特征 [J]. *湖泊科学*, 2018, 30 (1): 199-210. (Zhang Suxiang, Xu Xinfu, Xu Xin, et al. Seasonal variations of water age in Lake Poyang [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30 (1): 199-210. (in Chinese))

(收稿日期: 2025 - 06 - 03 编辑: 熊水斌)

雨养条件下地下水埋深对夏玉米产量与水分利用效率的影响

赵子焄^{1,2,3}, 张晓涛^{2,3}, 蒋 静¹

(1. 太原理工大学水利科学与工程学院; 2. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室;
3. 国家节水灌溉北京工程技术研究中心)

摘要:为研究雨养条件下不同地下水埋深对夏玉米产量与水分利用效率的影响,通过地下水自动控制系统设置地下水埋深为 0.7、1.3、1.8 m 和正常田间埋深共 4 个处理(分别记为 $D_{0.7}$ 、 $D_{1.3}$ 、 $D_{1.8}$ 、 $D_{2.4}$),对雨养条件下夏玉米生育期内的土壤含水率、降雨利用率、潜水蒸发量、株高、叶面积指数、产量和耗水量等指标进行分析。结果表明:雨养条件下地下水埋深对土壤平均含水率、降雨利用率和水分利用效率有显著影响;与 $D_{2.4}$ 相比, $D_{0.7}$ 、 $D_{1.3}$ 和 $D_{1.8}$ 处理下夏玉米全生育期土壤平均含水率显著增加了 6.9%~28.6%,降雨利用率分别降低了 23.2%、11.4%和 2.8%,株高、叶面积指数和干物质积累量分别降低了 1.7%~5.2%、5.8%~13.7%和 9.4%~19.5%;与其他地下水埋深相比, $D_{1.8}$ 处理可保证该地区夏玉米产量最大,水分利用效率最高。

关键词:地下水埋深;降雨利用率;夏玉米;产量;水分利用效率

Effects of groundwater depth on yield and water use efficiency of summer maize under rainfed conditions//Zhao Zihan^{1,2,3}, Zhang Xiaotao^{2,3}, Jiang Jing¹(1. College of Hydro Science and Engineering, Taiyuan University of Technology; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research; 3. National Center for Efficient Irrigation Engineering and Technology Research-Beijing)

Abstract: In order to investigate the effects of different groundwater depths on the yield and water use efficiency of summer maize under rainfed conditions, four treatments with groundwater depths of 0.7, 1.3, 1.8 m and the normal field depth (recorded as $D_{0.7}$, $D_{1.3}$, $D_{1.8}$, and $D_{2.4}$, respectively) were set up using the groundwater automatic control system. The soil moisture content, rainfall utilization rate, phreatic evaporation, plant height, leaf area index, yield and water consumption during the growth period of summer maize under rainfed conditions were analyzed. The results show that the groundwater depth has significant effects on the average soil water content, rainfall utilization rate, and water use efficiency under rainfed conditions. Compared with $D_{2.4}$, the average soil moisture content during the whole growth period of summer maize under $D_{0.7}$, $D_{1.3}$, and $D_{1.8}$ treatments increased significantly by 6.9%~28.6%, the rainfall utilization rate decreased by 23.2%, 11.4%, and 2.8%, respectively, and the plant height, leaf area index, and dry matter accumulation decreased by 1.7%~5.2%, 5.8%~13.7%, and 9.4%~19.5%, respectively. Compared with other groundwater depths, the $D_{1.8}$ treatment can ensure the highest yield and water use efficiency of summer maize in this area.

Key words: groundwater depth; rainfall utilization rate; summer maize; yield; water use efficiency

在地下水浅埋区,大气水、植物水、土壤水、地下水构成了一个完整的农田水分体系^[1-2],地下水对土壤-植物-大气连续体系统生物过程起到了关键的调控作用,地下水位的变化不仅会引起土壤环境的变化^[3-4],还会对农作物的生长和产量产生重要影响^[5-7]。不同地区、不同作物对地下水埋深的要求有所不同^[8-10]。国内外学者对地下水埋深与作物产量

的关系进行了大量的研究。例如:张朝新^[11]通过控制恒定地下水位,提出砂姜黑土种植条件下,适宜农作物生长的地下水埋深范围为:小麦 0.6~1.5 m、黄豆 0.4~1.0 m、芝麻 0.5~1.0 m、玉米 0.4~1.0 m; Mejia 等^[12]在 Bainsville 无石淤泥壤土上开展了为期 2 年的地下灌溉田间试验,发现地下水埋深控制在 0.5 m 或 0.75 m 时,玉米产量高于自由排水处

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB3900602)

作者简介:赵子焄(2000—),女,硕士研究生,主要从事节水灌溉研究。E-mail:2141886835@qq.com

通信作者:蒋静(1984—),女,副教授,博士,主要从事节水灌溉、水土资源与环境研究。E-mail:jiangjing@tyut.edu.cn

理,在较干旱的年份,地下水调控对玉米产量的促进效应更明显;胡永胜^[13]在研究地下水埋深对作物生长的影响时,发现雨养条件下夏玉米在砂姜黑土、黄潮土中种植的最优地下水埋深分别为 0.6、1.0 m;孔繁瑞等^[14]通过作物充分灌溉控制灌水量,通过蒸渗仪试验得出内蒙古地区适宜玉米生长的地下水埋深为 1.5~2.0 m;鄂继芳等^[15]通过 2 年田间试验探究了不同地下水埋深与灌水量对玉米生长的影响,结果表明河套灌区玉米生长适宜的地下水埋深应控制在 1.75~1.85 m,灌水量应控制在 107.3~116.5 mm;武朝宝等^[16-17]基于传统畦灌的蒸渗仪试验得出,为同步提高春玉米产量和水分利用效率,山西汾河灌区在作物生育期内的地下水埋深应控制在 1.0 m 以下;张智翔等^[18]在研究并探索土壤盐分和地下水相互关系时发现,当地下水埋深介于 1.8~2.2 m 时,可以有效平衡作物的生长和土壤平均含水率;Li 等^[19]在研究华北平原浅层地下水对田间土壤理化性质和作物产量的影响时强调,地下水埋深为 1.1 m 最有利于玉米籽粒中干物质的积累,可为夏玉米提供最高的产量和有利的生长条件。

以往关于不同土壤质地^[11-13]和不同灌溉制度^[14-17]条件下地下水埋深对玉米产量及水分利用效率的研究较多,而对于雨养条件下地下水埋深对玉米水分利用效率的研究较少。鉴于此,本文主要研究雨养条件下不同地下水埋深对夏玉米生育期土壤水分、潜水蒸发量、降雨利用率、生长指标、耗水量等的影响,以探寻雨养条件下地下水埋深对夏玉米土壤水分及产量的影响规律,为夏玉米高产栽培和节水灌溉提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2023 年 6—10 月(夏玉米生育期)在中国水利水电科学研究院大兴节水灌溉试验研究基地(39°62'16"N,116°43'15"E)的群集式蒸渗仪展开。研究基地为暖温带半湿润大陆性季风气候,多年平均气温为 12.3℃,平均降水量为 554 mm,试验期间的气温和降水量变化见图 1,试验区土壤为砂壤土,土层深厚,有机质含量丰富,田间持水量和饱和含水量分别为 33.3%和 45.6%。

1.2 试验设计

试验所使用的夏玉米品种为纪元 168。群集式大型蒸渗仪包括称重式蒸渗仪(2.0 m×2.0 m×2.4 m)和非称重式蒸渗仪(2.0 m×2.0 m×3.5 m),蒸渗仪四周是混凝土边界,具有不透水性,底边可以自由排水。试验采用单因素完全随机区组设计,共设

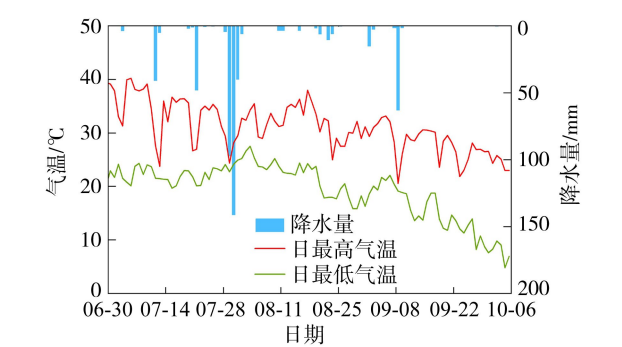


图 1 夏玉米生育期气温和降水量变化

3 个地下水埋深水平,分别为 0.7、1.3、1.8 m(依次记为 D_{0.7}、D_{1.3}、D_{1.8} 处理),每个处理重复 4 次,并设置正常田间埋深(正常深度为 2.4 m,记为 D_{2.4} 处理)做对照。地下水埋深由非称重式蒸渗仪的地下水自动控制系统实现,蒸渗测坑与供排水柱之间用管道连通,构成一个“连通器”。通过控制供排水柱的水位来间接控制蒸渗测坑内的地下水位。地下水自动控制系统如图 2 所示。

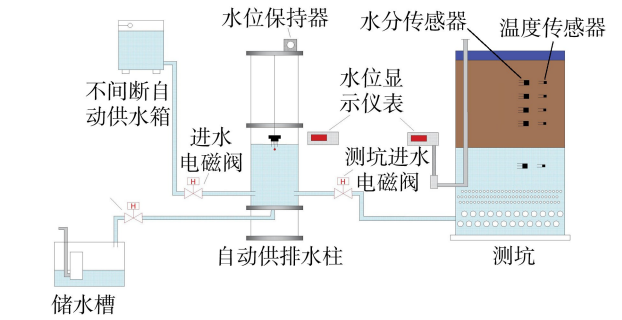


图 2 地下水自动控制系统

试验采用人工播种的方式,种植密度为 60 000 株/hm²。本试验种植夏玉米为 4 行 6 列,且蒸渗仪两两之间的距离与大田玉米行距相差不大,因此边际效应对本试验的影响可忽略不计。各试验处理施肥量相同,播种前施复合肥 450 kg/hm²(w_{总养分}≥45.0%,w(N)=w(P₂O₅)=w(K₂O)=15%),拔节期追施尿素 450 kg/hm²(w_{总氮}≥46%)。夏玉米在 6 月 29 日进行播前灌,6 月 30 日播种,10 月 6 日收获。试验均在大田气候下进行,没有启动防雨设备。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤数据

蒸渗仪内土壤的体积含水率和各层土壤温度用内置的土壤水分传感器(Hydra Probe II,史蒂文斯公司,中国)测定并记录,监测时间间隔为 10 min。

1.3.2 地下补给量和深层渗漏量

称重式蒸渗仪配备 5 000 mL 量筒,每天 8:00 和 20:00 记录土壤渗漏量。非称重式蒸渗仪配备地下水供水控制系统,可自动监测渗漏量和地下水补给

量。进水量即潜水蒸发量,出水量即地下水渗漏量,进出水量之差即地下水补给量。在试验初期设置地下水埋深,在地下水稳定后,于8月2日至10月6日夏玉米收获期间,每天记录一次潜水蒸发量。

1.3.3 作物数据

生育期划分:苗期(6月30日至7月14日)、拔节期(7月15日至8月11日)、抽雄期(8月12日至9月16日)、成熟期(9月17日至10月6日)。

株高、叶面积:每个蒸渗仪测坑选择3株长势均匀的植株进行标记,在苗期和拔节期每3天测一次株高和叶面积,在大喇叭口期、抽雄期、成熟期每7天测一次株高和叶面积。株高和叶面积均采用钢卷尺测定。

干物质积累量:在拔节期后,每个小区选1株植株,每10天取样一次,将采集的样本带回实验室后,在通风烘箱105℃下杀青30 min,然后在70℃下烘干至恒重,此时重量为干物质积累量。

产量及构成要素:夏玉米籽粒成熟后,按小区单独收获,每个小区取1 m²的夏玉米来考种测产,夏玉米收获后,先测量穗长、穗粗、秃尖长、行粒数,然后脱粒,随机取100粒籽粒,重复3次测定百粒重,取平均值。所有夏玉米籽粒烘干至恒重,从而获得夏玉米产量。

1.3.4 作物耗水量和水分利用效率

作物耗水量(即蒸散量)采用田间水量平衡方程计算:

E_T = P + I - D + W_g - R + S_{WD} (1)

式中:E_T为蒸散量;P为降水量;I为灌溉量;D为土壤排水量;W_g为作物通过毛细管上升利用的地下水补给量;R为地表径流;S_{WD}为玉米生育期0~80 cm^[20]土层土壤水分消耗量,指生育期末的土壤含水量与生育期初时的差值。本实验为雨养条件,没有灌溉,故I为0。

水分利用效率E_{WU}为:

E_{WU} = Y/E_T (2)

式中:Y为玉米籽粒产量。

降雨利用率θ为:

θ = (ΔW - S_{gw})/P (3)

式中:ΔW为降雨前后土壤储水量变化;S_{gw}为地下水补给量。

依据地下水补给量和耗水量计算地下水贡献率C:

C = S_{gw}/E_T (4)

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 对试验数据进行处理,采用 Origin 2021 软件绘图,并采用 SPSS 软件进

行单因素方差分析。各处理间的显著性检验采用最小显著差异法(显著性水平 α=0.05)。

2 结果与分析

2.1 地下水埋深对土壤水分变化的影响

根据夏玉米根系在生育期内的分布范围^[21-22],将土层划分为0~20、20~40、40~100、100~200 cm。图3为不同地下水埋深下夏玉米不同土层土壤平均含水率随时间的变化。

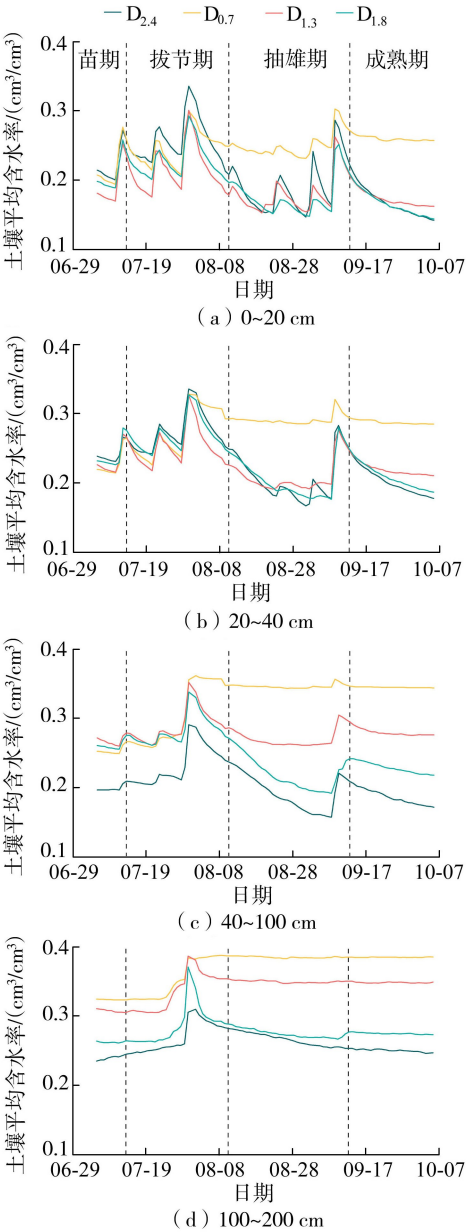


图3 不同地下水埋深下夏玉米不同土层土壤平均含水率变化

由图3(a)可知,苗期至拔节期,与D_{2.4}相比,D_{1.3}、D_{1.8}处理下0~20 cm土层土壤平均含水率分别降低了11.9%~19.3%和7.0%~12.8%;抽雄期至成熟期,D_{2.4}、D_{1.3}和D_{1.8}处理之间的土壤含水率无显著差异(P>0.05),但与D_{2.4}相比,D_{0.7}处理下的

土壤含水率增加了 29.3%~33.1%。由图 3(b)可知,在苗期,与 $D_{2.4}$ 相比, $D_{0.7}$ 、 $D_{1.3}$ 和 $D_{1.8}$ 处理下的 20~40 cm 土层土壤含水率分别降低了 1.2%~5.7%、2.7%~5.0%、1.9%~2.7%;拔节期至成熟期, $D_{2.4}$ 、 $D_{1.3}$ 和 $D_{1.8}$ 处理下的 20~40 cm 土层土壤平均含水率无显著差异 ($P>0.05$),但与 $D_{2.4}$ 相比, $D_{0.7}$ 处理下的土壤含水率增加了 26.9%~29.5%;7 月 29—30 日的一场较大降雨导致 $D_{0.7}$ 处理下的 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤含水率在较大降雨后分别高于 $D_{2.4}$ 处理 20.6%~61.0%和 21.5%~55.5%。由图 3(c)(d)可知,苗期至拔节期, $D_{0.7}$ 、 $D_{1.3}$ 和 $D_{1.8}$ 处理下 40~100 cm 土层土壤平均含水率无显著差异 ($P>0.05$),但高于 $D_{2.4}$ 处理 19.6%~22.6%;拔节期至成熟期,40~100 cm 和 100~200 cm 土层土壤平均含水率随地下水埋深的增加而降低:与 $D_{2.4}$ 相比, $D_{0.7}$ 、 $D_{1.3}$ 和 $D_{1.8}$ 处理下的 40~100 cm 土层土壤含水率分别增大 39.5%~50.7%、24.6%~37.0%和 11.8%~19.2%,100~200 cm 土层土壤含水率分别增大 24.7%~34.1%、19.8%~27.2%和 3.6%~8.0%。从夏玉米全生育期土壤平均含水率来看,与 $D_{2.4}$ 相比, $D_{0.7}$ 、 $D_{1.3}$ 和 $D_{1.8}$ 处理下全生育期土壤平均含水率显著增加了 6.9%~28.6%。

从全生育期看,当连续降水量大于 10 mm 时,会使 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤平均含水率比降雨前分别增大 20.8%~39.4%和 7.5%~28.5%,当降水量大于 60 mm 时,会使 40~100 cm 土层土壤平均含水率增大 26.9%~28.9%,连续降雨(总降水量 238.76 mm)会使 100~200 cm 土层土壤平均含水率增大 15.9%~22.3%,而降水量小于 60 mm 时,对 100~200 cm 土层土壤平均含水率影响较小。

2.2 不同地下水埋深下地下水补给与降雨入渗规律

2.2.1 地下水埋深和降水量对潜水蒸发量的影响

不同地下水埋深和降水量下的潜水蒸发量变化如图 4 所示。从图 4 可以看出,随着生育期推进,不同地下水埋深下潜水蒸发量变化趋势基本一致,地下水埋深越大,潜水蒸发量的变化幅度越趋于平缓,这是因为地下水埋深不同导致的毛管力不同。潜水蒸发量随着地下水埋深的增加而减小, $D_{0.7}$ 处理下的潜水蒸发量最大,可达 10.37 mm/d。与 $D_{0.7}$ 相比, $D_{1.3}$ 和 $D_{1.8}$ 处理下的潜水蒸发量分别降低 29.1%~58.9%和 58.8%~89.1%。 $D_{1.8}$ 和 $D_{1.3}$ 处理由于受 7 月 29 日至 8 月 2 日降雨的影响,8 月 2 日之后几天的潜水蒸发量较小。此外,由于降雨入渗补充土壤水分,植物根系需要的水分得以补充,进而减少了地下水对土壤水的补给,所以降水量增

加导致潜水蒸发量减少。

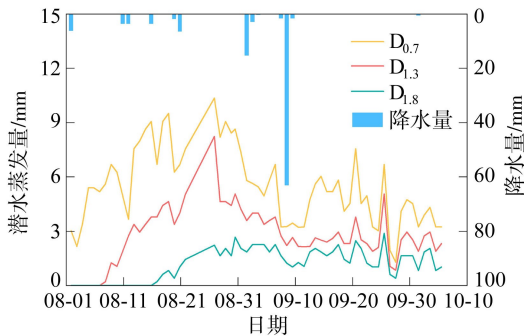


图 4 不同地下水埋深和降水量下的潜水蒸发量变化

2.2.2 地下水埋深对降雨利用率的影响

分析降水量与降雨前后不同地下水埋深的土壤储水量变化(图 5)可知,不同地下水埋深下,降水量与土壤储水量变化量呈线性正相关关系,决定系数大于 0.95。此外,地下水埋深越大,地下水补给量越小,导致斜率增大,即降雨利用率增大,降雨对土壤水的补给增大。与 $D_{2.4}$ 相比, $D_{0.7}$ 、 $D_{1.3}$ 和 $D_{1.8}$ 处理下降雨利用率分别降低了 23.2%、11.4%和 2.8%。

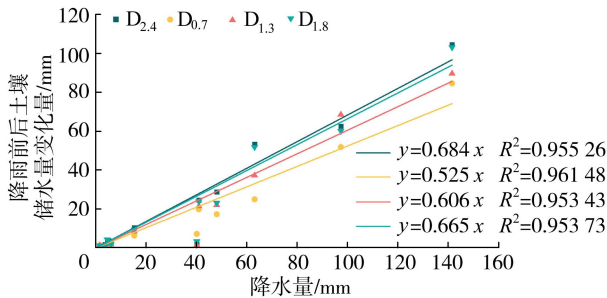


图 5 不同地下水埋深下降雨对土壤水补给的相关分析

2.3 地下水埋深对夏玉米生长指标的影响

2.3.1 地下水埋深对夏玉米株高和叶面积指数的影响

地下水埋深对株高影响不显著 ($P>0.05$),对叶面积指数影响显著 ($P<0.05$)。如图 6 所示,总体上,株高和叶面积指数随地下水埋深的增加呈降低趋势。其中,7 月 28 日至 9 月 16 日(拔节期至抽雄期)期间, $D_{2.4}$ 处理的株高和叶面积指数最大,与 $D_{2.4}$ 相比, $D_{0.7}$ 、 $D_{1.3}$ 和 $D_{1.8}$ 处理下的株高分别降低 2.5%、1.7%和 5.2%,叶面积指数分别降低 6.0%、5.8%和 13.7%;在成熟期, $D_{0.7}$ 处理的株高和叶面积指数最大,与 $D_{2.4}$ 相比, $D_{0.7}$ 和 $D_{1.3}$ 处理的株高分别提高 1.2%和 0.4%, $D_{1.8}$ 处理降低 2.3%, $D_{0.7}$ 处理的叶面积指数提高 8.3%, $D_{1.3}$ 和 $D_{1.8}$ 处理的叶面积指数分别降低 0.9%和 4.9%。由以上分析可知,地下水埋深对株高和叶面积指数具有抑制作用。

2.3.2 地下水埋深对夏玉米干物质积累量的影响

地下水埋深对夏玉米干物质积累量影响显著 ($P<0.05$)。如图 7 所示,在拔节期至抽雄期,干物

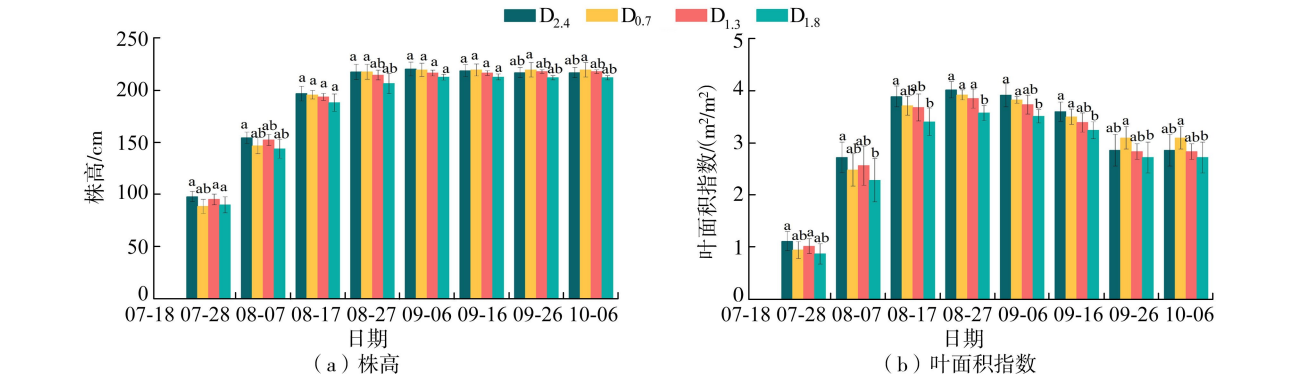


图 6 不同地下水埋深下株高和叶面积指数的变化

质积累量随着地下水埋深的增大先增大后减小;在成熟期,干物质积累量随着地下水埋深的增加先减小后增大,但均低于 $D_{2.4}$ 处理。与 $D_{2.4}$ 相比, $D_{0.7}$ 、 $D_{1.3}$ 和 $D_{1.8}$ 处理在拔节期至抽雄期的干物质积累量分别降低 14.0%、9.4%和 19.5%,在成熟期的干物质积累量分别降低 10.7%、18.7%和 13.4%。由以上分析可知,地下水埋深对干物质积累量具有抑制作用。

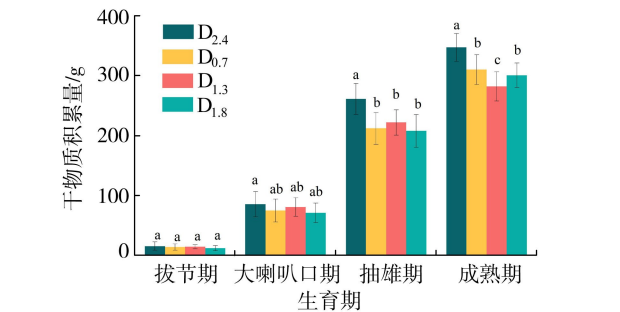


图 7 各生育期不同地下水埋深下干物质积累量的变化

2.4 地下水埋深对水分利用效率的影响

地下水埋深对耗水量、水分利用效率和地下水贡献率影响显著 ($P<0.05$)。如表 1 所示,耗水量和地下水贡献率随着地下水埋深的增加而降低,与 $D_{2.4}$ 相比, $D_{0.7}$ 、 $D_{1.3}$ 和 $D_{1.8}$ 全生育期耗水量分别增加了 56.1%、25.8%和 3.5%;地下水贡献率随着地下水埋深的增加而降低,且降低速度变快。在 3 种地下水埋深处理中,水分利用效率随着地下水埋深的增加而增加, $D_{0.7}$ 处理下的夏玉米产量最低,水分利用效率也最低,仅为 1.29 kg/m^3 ,与长期充分供水有关。 $D_{1.8}$ 处理下的产量略高于 $D_{2.4}$ 处理,水分利

用效率也最高,与 $D_{2.4}$ 相比, $D_{1.8}$ 处理的水分利用效率提高了 1.9%, $D_{0.7}$ 和 $D_{1.3}$ 处理的水分利用效率分别降低了 39.4%和 20.7%。

3 讨论

在地下水浅埋区,土壤毛细水的上升,使受水分胁迫的作物得到了有效水分补给,缓解了缺水的现状,并减少了对灌溉水的依赖。雨养条件下不同地下水埋深(0.7、1.3、1.8 m)对土壤水分影响的对比结果表明:0~20 cm 土层土壤平均含水率受地下水影响较小,受降雨影响较大,这与戴嘉璐^[23]、张豪强等^[24]的研究结果一致;20~40 cm 土层土壤平均含水率相差较小,这是因为夏玉米在苗期主要依靠浅层(0~20 cm)土壤水分;较大降雨(>60 mm)后,40~100 cm 土层土壤平均含水率随着地下水埋深的增加而减小,这是由于 $D_{1.3}$ 、 $D_{1.8}$ 处理的地下水位较深,地下水补给量较少,使得 $D_{1.3}$ 、 $D_{1.8}$ 处理下的 40~100 cm 土层土壤平均含水率降幅较明显;100~200 cm 土层土壤平均含水率随着地下水埋深的增加而降低,但都高于 $D_{2.4}$ 处理的土壤平均含水率。这是因为随着地下水埋深的增加,毛细水上升的高度降低,潜水蒸发量随着地下水埋深的增加而减小,对作物的水分补给减少,进而导致土壤平均含水率降低。从全生育期看,较大降雨会使 0~200 cm 土层土壤平均含水率达到生育期最大,这与张守军^[25]的研究结果一致。

地下水埋深越大,降雨对土壤水的补给越大,即降雨利用率越大。这是因为地下水埋深较大时,土壤水主要来源于降雨^[26],降雨被作物吸收的可能性

表 1 不同地下水埋深下各生育期的耗水量及水分利用效率

处理	耗水量/mm				水分利用效率/(kg/m^3)	地下水补给量/mm	地下水贡献率/%
	苗期	拔节期	抽雄期	成熟期			
$D_{2.4}$	23.64 ^b	291.29 ^{ab}	125.25 ^c	30.31 ^c	470.48 ^b	2.13 ^a	0
$D_{0.7}$	36.44 ^a	373.26 ^a	226.50 ^a	98.11 ^a	734.31 ^a	1.29 ^c	526.74 ^a
$D_{1.3}$	34.64 ^a	318.57 ^{ab}	185.86 ^{ab}	65.85 ^b	591.88 ^{ab}	1.69 ^b	377.14 ^{ab}
$D_{1.8}$	31.64 ^a	243.52 ^b	150.17 ^{bc}	61.50 ^b	486.83 ^b	2.17 ^a	205.38 ^b

注:同列不同上标字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

较大;而当地下水埋深较浅时,土壤水主要来源于地下水和降雨,土壤含水率较高,抑制了作物对降雨的吸收,导致降雨利用率减小。因此,合理确定地下水位埋深对于灌区充分利用降雨资源、缓解灌溉水资源供需矛盾、制定节水灌溉规划等都具有重要的研究意义。

浅层地下水与作物根系土壤之间存在频繁的水分交换,而土壤水分又受到气象因素、土壤特征、植被状况、人为活动等因素的影响,导致不同研究者得出的适宜不同作物的地下水埋深有所不同。地下水埋深通过影响作物生长的土壤环境,影响作物的根系活力,进而影响作物的根冠关系和冠层的光合作用,影响作物生长发育。本文研究发现,地下水埋深越大,株高越小,但不同地下水埋深对夏玉米株高的影响不显著($P>0.05$),这与张守军^[25]、刘战东等^[27]的研究结果一致。叶面积指数随着地下水埋深的增加而减小,这与肖俊夫等^[28]的研究结果一致。当地下水埋深小于1.3 m时,干物质积累量随着地下水埋深的增加而增加;当地下水埋深超过1.3 m时,干物质积累量则随着地下水埋深的增加而降低。而鄂继芳等^[15]的研究表明,灌溉条件下,玉米地上部分生物量与地下埋深(1.4、1.8、2.2 m)呈负相关关系。这是因为地下水埋深较浅(0.7 m)时,充沛的地下水补给使土壤含水率保持在较高水平,影响了玉米根系的生长,最终导致作物干物质积累量下降。适宜的地下水埋深对提高作物产量和水分利用效率具有重要作用,本文研究发现, $D_{1.8}$ 处理的产量和水分利用效率最高,这是因为较大的地下水埋深(1.8 m)会削弱地下水向根层的补给,使耗水量和地下水贡献率减小,同时该地下水埋深又有利于保持适宜的土壤含水量,使玉米协调发展,实现高产,进而提高水分利用效率。

4 结 论

a. 与正常田间埋深的处理相比,地下水埋深可使20~100 cm土层土壤平均含水率显著增加,随着地下水埋深的增加,潜水蒸发量逐渐减小,降雨利用率逐渐增大,当地下水埋深1.8 m时,降雨利用率为66.5%。

b. 地下水埋深越大,株高越小,但不同地下水埋深对夏玉米株高的影响不显著($P>0.05$),叶面积指数随着地下水埋深的增加而显著减小,地下水埋深为1.3 m时,拔节期、抽雄期和大喇叭口期的干物质积累量最大。

c. 相比其他地下水埋深, $D_{1.8}$ 处理的整体效果较好玉米产量和水分利用效率显著提高,实现了节

水和高产的目的。

d. 雨养条件下地下水埋深对土壤含水量、降雨利用率和水分利用效率有显著影响。较大降雨可显著增加土壤含水量,同时通过增强降雨入渗过程而减少潜水蒸发量,从而提高降雨利用率,降低作物对灌溉水资源的依赖,实现节水目标。

参考文献:

[1] 邓文平,章洁,张志坚,等. 北京土石山区水分在土壤-植物-大气连续体(SPAC)中的稳定同位素特征[J]. 应用生态学报,2017,28(7):2171-2178. (Deng Wenping, Zhang Jie, Zhang Zhijian, et al. Stable hydrogen and oxygen isotope compositions in soil-plant-atmosphere continuum (SPAC) in rocky mountain area of Beijing, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(7):2171-2178. (in Chinese))

[2] 赵勇,董义阳,翟家齐,等. 考虑生态耗水的干旱区绿洲灌溉用水效率评价指标与方法[J]. 水资源保护,2024,40(3):78-89. (Zhao Yong, Dong Yiyang, Zhai Jiaqi, et al. A new evaluation indicator and method for oasis irrigation water use efficiency in arid regions considering ecological water consumption [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3):78-89. (in Chinese))

[3] 孙仕军,隋文华,陈伟,等. 地下水埋深对辽宁中部地区玉米根系和干物质积累的影响[J]. 生态学杂志,2020,39(2):497-506. (Sun Shijun, Sui Wenhua, Chen Wei, et al. Effects of groundwater depth on root system and dry matter accumulation of maize in central Liaoning Province [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(2):497-506. (in Chinese))

[4] Zimmermann I, Fleige H, Horn R. Longtime effects of deep groundwater extraction management on water table levels in surface aquifers [J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17(1):133-143.

[5] 周宏,赵文智. 荒漠区包气带土壤物理特征及其对地下水水毛管上升影响的模拟[J]. 应用生态学报,2019,30(9):2999-3009. (Zhou Hong, Zhao Wenzhi. Soil physical characteristics of shallow vadose zone and modeling its effects on upward capillary rise of groundwater in an arid-desert area [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(9):2999-3009. (in Chinese))

[6] Zhou Lifeng, Han Xinlong, Yang Qiliang, et al. Optimizing sowing date to mitigate loss of growing degree days and enhance crop water productivity of groundwater-irrigated spring maize [J]. Agricultural Water Management, 2024, 305:109097.

[7] 白芳芳,乔冬梅,李平,等. 地下水埋深和施氮量对夏玉米灌浆特性及水氮利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(6):90-99. (Bai Fangfang, Qiao Dongmei, Li Ping, et al. Effects of groundwater depth and

- nitrogen application rate on grain filling characteristics and water and nitrogen use efficiency of summer maize[J]. *Agricultural Research In The Arid Areas*, 2022, 40(6): 90-99. (in Chinese))
- [8] Du Mingcheng, Zhang Jianyun, Elmahdi A, et al. Variation characteristics and influencing factors of soil moisture content in the lime concretion black soil region in northern Anhui[J]. *Water*, 2021, 13(16): 2251.
- [9] Zhang He, Li Yan, Meng Yali, et al. The effects of soil moisture and salinity as functions of groundwater depth on wheat growth and yield in coastal saline soils[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(11): 2472-2482.
- [10] 朱振闯, 孙仕军, 朱森森, 等. 地下水埋深对东北平原地下水补给及大豆生长动态的影响[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(7): 1871-1882. (Zhu Zhenchuang, Sun Shijun, Zhu Miaomiao, et al. Effects of groundwater depth on groundwater recharge and soybean growth dynamics in Northeast China Plain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(7): 1871-1882. (in Chinese))
- [11] 张朝新. 旱作物对地下水利用的研究[J]. *灌溉排水*, 1989, 8(1): 20-24. (Zhang Chaoxin. Research on groundwater use by dry crops[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 1989, 8(1): 20-24. (in Chinese))
- [12] Mejia M N, Madramootoo C A, Broughton R S. Influence of water table management on corn and soybean yields[J]. *Agricultural Water Management*, 2000, 46(1): 73-89.
- [13] 胡永胜. 淮北平原不同地下水埋深对作物生长发育及产量的影响[J]. *现代农业科技*, 2023(23): 34-38. (Hu Yongsheng. Effects of different groundwater burial depths on crop growth and yield in Huaibei Plain[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2023(23): 34-38. (in Chinese))
- [14] 孔繁瑞, 屈忠义, 刘雅君, 等. 不同地下水埋深对土壤水、盐及作物生长影响的试验研究[J]. *中国农村水利水电*, 2009(5): 44-48. (Kong Fanrui, Qu Zhongyi, Liu Yajun, et al. Experimental research on the effect of different kinds of groundwater buried depth on soil water, salinity and crop growth[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2009(5): 44-48. (in Chinese))
- [15] 鄂继芳, 杨树青, 刘鹏, 等. 不同地下水埋深与灌水量对玉米生长效应及产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2023(2): 209-219. (E Jifang, Yang Shuqing, Liu Peng, et al. Effects of different groundwater depth and irrigation amount on maize growth effect and yield[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(2): 209-219. (in Chinese))
- [16] 武朝宝. 地下水埋深对作物产量与水分利用效率的影响及作物系数变化[J]. *地下水*, 2011, 33(4): 20-23. (Wu Chaobao. Effect of groundwater depth on crop output & water-used efficiency and the change of crop coefficients[J]. *Ground Water*, 2011, 33(4): 20-23. (in Chinese))
- [17] 刘战东, 肖俊夫, 牛豪震, 等. 地下水埋深对冬小麦和春玉米产量及水分生产效率的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(1): 29-33. (Liu Zhandong, Xiao Junfu, Niu Haozhen, et al. Influence of groundwater depth on yield and WUE of winter wheat and spring maize[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(1): 29-33. (in Chinese))
- [18] 张智翔, 刘松涛, 李茜, 等. 明灌暗排区土壤盐分动态规律及适宜控盐地下水埋深研究[J]. *灌溉排水学报*, 2025, 44(6): 52-60. (Zhang Zhixiang, Liu Songtao, Li Qian, et al. Soil salinity dynamics and optimal groundwater depth for salt control in farmland under surface irrigation and subsurface drainage[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2025, 44(6): 52-60. (in Chinese))
- [19] Li Xurun, Li Zhao, Fu Weizhang, et al. The influence of shallow groundwater on the physicochemical properties of field soil, crop yield, and groundwater[J]. *Agriculture*, 2024, 14(3): 341.
- [20] 王秋瑶. 大豆耗水和生长对地下水埋深变化的响应[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2022.
- [21] 罗守德, 武殿林, 郭国亮, 等. 玉米根系在土壤中的伸长和分布[J]. *作物杂志*, 1985(4): 18-19. (Luo Shoude, Wu Dianlin, Guo Guoliang, et al. Elongation and distribution of maize roots in soil[J]. *Crops*, 1985(4): 18-19. (in Chinese))
- [22] 孟娇, 张晓涛, 党红凯, 等. 轮作期内冬小麦不同灌溉制度对夏玉米水分利用效率的影响[J]. *水利水电科技进展*, 2025, 45(4): 102-110. (Meng Jiao, Zhang Xiaotao, Dang Hongkai, et al. Effects of different irrigation regimes for winter wheat on water use efficiency of summer maize during rotation period[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2025, 45(4): 102-110. (in Chinese))
- [23] 戴嘉璐. 河套灌区维持玉米稳定生长的水氮与地下水埋深模拟研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
- [24] 张豪强, 朱永华, 吕海深. 淮北平原夏玉米生长与土壤含水量和地下水的关系[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(5): 79-84. (Zhang Haoqiang, Zhu Yonghua, Lyu Haishen. Study on relationship between summer maize growth and soil water content and groundwater in Huaibei Plain[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2021, 49(5): 79-84. (in Chinese))
- [25] 张守军. 地下水埋深对玉米生长及地下水补给的影响[J]. *人民黄河*, 2019, 41(12): 142-145. (Zhang Shoujun. Experimental study on effects of groundwater depth on corn growth index and groundwater level recharge under horizontal irrigation conditions[J]. *Yellow River*, 2019, 41(12): 142-145. (in Chinese))

(下转第 71 页)

基于博弈论组合赋权和 TOPSIS 法的矿区水资源安全性综合评价

薛晓强¹, 周雅清¹, 许乐杰², 张少坤³, 王鹏皓³

(1. 陕西小保当矿业有限公司; 2. 陕西飞海工程管理有限公司; 3. 西安理工大学土木建筑工程学院)

摘要:为定量评价矿区水资源安全性,以陕北 X 矿区为研究对象,构建了包含水质状况、水资源数量、用水效率、生态可持续性 4 个准则层共 16 个二级指标的评价指标体系,并划分了各指标的风险等级;运用博弈论组合赋权法将层次分析法和熵权法得到的指标权重进行组合优化,将组合权重与 TOPSIS 法结合,根据指标与理想解的贴近度分析矿区多年的水资源安全性。结果表明:该矿区 2017—2023 年水资源综合安全级别为“较安全”,与矿区实际情况相符;影响矿区水资源安全性的主要因素为地表水水质达标率、矿区废水排放达标率和地下水污染指数。

关键词:博弈论;TOPSIS 法;矿区;水资源;综合评价

Comprehensive evaluation of water resources security in mining areas based on game theory combination weighting and TOPSIS method//Xue Xiaoqiang¹, Zhou Yaqing¹, Xu Lejie², Zhang Shaokun³, Wang Penghao³ (1. Shaanxi Xiaobaodang Mining Co., Ltd.; 2. Shaanxi Feihai Engineering Management Co., Ltd.; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology)

Abstract: To quantitatively evaluate water resources security in mining areas, this study takes the X mining area in northern Shaanxi as the research object and constructs an evaluation index system comprising four dimensions (water quality status, water resources quantity, water use efficiency, and ecological sustainability) with a total of 16 secondary indicators, and classifies the risk levels of the indicators. The game theory combination weighting approach is employed to optimize the integration of indicator weights derived from the analytic hierarchy process and the entropy weight method. The combined weights are then incorporated into the TOPSIS method to analyze the multi-year water resources security of the mining area based on the closeness of each indicator to the ideal solution. The results indicate that the comprehensive water resources security level of the mining area from 2017 to 2023 is relatively safe, which is consistent with the actual conditions of the mining area. The primary factors affecting water resources security in the mining area are the surface water quality compliance rate, the wastewater discharge compliance rate of the mining area, and the groundwater pollution index.

Key words: game theory; TOPSIS method; mining area; water resources; comprehensive evaluation

矿区水资源是矿区生产活动和生态平衡的命脉,其安全性直接影响着矿区的可持续发展以及区域的稳定性。随着矿产资源开发规模的扩大和开采深度的增加,矿区水资源系统面临着水质污染加剧、人均可用水量减少等问题,水资源的供需矛盾日益突出,导致水资源安全风险事件频发^[1],严重影响了矿区的生产效率和生活质量^[2-3]。矿区水资源安全性评价已成为助力矿区可持续发展与区域稳定的必要环节^[4]。

国内外学者关于矿区水资源安全性评价的研究主要集中于三个层面。在以水质健康风险为核心的水环境质量类评价层面,Akakuru 等^[5]针对尼日利

亚的铅锌矿区进行了致癌风险和地下水质量评价,并采用机器学习模型预测了矿区周围地下水的污染水平,为受采矿活动严重影响地区的公共卫生和环境管理提供了重要帮助;卢振等^[6]对神东矿区不同水体进行了取样测试,采用 CCME-WQI 法对矿区开展了水质评价,揭示了矿区内不同类型人群的水质健康风险及空间分布特征;庞红璐等^[7]对厄立特里亚 Zara 矿区的 11 处地下水和 6 处地表水采样点进行了抽样检测,采用单因子法对矿区的水质进行了评价。在侧重于水资源数量的供需平衡类评价层面,姚强岭等^[8]建立了包含 3 个方面 15 种参数的矿区采动水资源潜力评价体系,探讨了维持生态平衡

基金项目:薛晓强(1984—),男,高级工程师,主要从事煤矿管理及生产研究。E-mail:18235783113@163.com

作者简介:周雅清(1992—),男,助理工程师,主要从事煤矿环保管理研究。E-mail:410704510@qq.com

所需采动水资源总量的计算方法;李琳^[9]为解决宁东煤炭基地水资源供需矛盾,采用基于熵权的TOPSIS法评价了该基地矿井水的供需双向协调情况;Guo等^[10]考虑经济、社会和生态因素,对平朔矿区供水需水平衡进行了评价分析,并通过粒子群优化算法建立了矿区水资源优化配置模型,为矿区水资源的优化配置提供了方法参考。在生态效应与可持续管理类评价层面,刘晓民等^[11]以大海则煤矿为例,综合考虑地质、采动、自然资源、生态环境、地质灾害以及社会经济6个维度,建立了生态脆弱区煤-水绿色开采度评价指标体系;解馨馨等^[12]基于煤炭生产、水资源和环境生态3个维度的21项指标,构建了煤-水-生态协调发展的TOPSIS评价模型,为矿区煤矿及水资源开采提供了理论参考。

国内外现有研究虽在各领域取得了进展,但仍存在两大局限:①在研究视角上,多侧重于单一维度(水质或水量),未能将影响矿区水资源安全性的众多因素纳入统一框架进行系统综合评估;②在方法上,权重确定方法存在主观或客观的片面性,且评价模型多局限于静态分析,缺乏对安全水平动态演变趋势的分析与预警能力。因此,本文采用博弈论将层次分析法与熵权法所得权重进行组合优化,并将组合权重融入TOPSIS模型,通过计算历年指标与理想解的贴近度,同时识别影响安全水平的关键因子,以期对矿区水资源安全管理提供决策参考,并为同类矿区的风险预警与调控策略提供方法借鉴。

1 研究区概况与评价指标体系构建

1.1 研究区概况

陕北X矿区处于秃尾河流域及榆溪河流域的中间地带,总面积220km²,拥有职工近2000人。井田范围内无地表河流,仅分布有一些海子,其蓄水量季节性变化明显。本文基于矿区2017—2023年水质监测报告、项目水资源论证报告及水平衡测试报告,对其进行水资源安全性综合评价。

1.2 评价指标体系构建

矿区水资源系统是一个复杂的多维动态系统,其安全水平受自然、经济、生态及社会等多方面因素的综合影响。为克服上述研究视角单一的问题,本文构建了一个逻辑递进的四维评价框架,其核心创新在于针对矿区这一特殊情境,将水质、水量、用水效率和生态可持续性整合为一个具有内在联系的有机系统。具体而言,本文依据《全国水资源综合规划技术大纲》《矿山生态环境保护与恢复治理技术规范(试行)》等相关法规标准,结合水资源安全理论和系统科学理论,通过文献研究、专家访谈等方

式,基于以下4个方面考量构建了矿区水资源安全性综合评价指标体系:①水质状况是水资源安全的基础前提,直接决定水资源的可利用性;②水资源数量是安全的物质保障,反映水资源的供给能力与承载规模;③用水效率是安全的调控核心,体现了人类对水资源的集约利用水平;④生态可持续性安全的终极目标,必须确保水资源开发不损害生态系统的长期健康。这4个方面遵循“前提→保障→调控→约束”的递进逻辑,构成了一个从资源本底到人类利用再到生态持续的完整闭环,实现了从单一判断到系统性综合诊断的跨越。该评价指标体系包含4个准则层和16个二级指标,见图1。

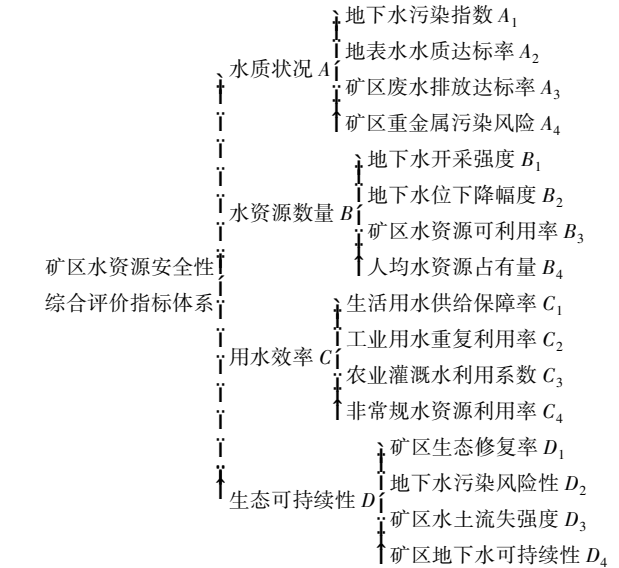


图1 矿区水资源安全性综合评价指标体系

1.3 评价指标风险等级划分

考虑影响矿区水资源安全水平的多种因素,参照水资源安全等级划分^[13]和国内外相关分级标准,并结合矿区实际情况对评价指标进行定性和定量分级,将矿区水资源安全性划分为5个风险等级,并按综合得分评判风险等级,分别为安全(Ⅰ级,>0.8)、较安全(Ⅱ级,>0.6~0.8)、较不安全(Ⅲ级,>0.4~0.6)、不安全(Ⅳ级,0.2~0.4)和极不安全(Ⅴ级,<0.2),结果见表1。

2 研究方法

2.1 模型构建

针对研究方法上的局限性,本文提出了一种基于博弈论组合赋权和TOPSIS法的矿区水资源安全性评价模型。通过博弈论将层次分析法(AHP法)主观赋权与熵权法客观赋权进行折中处理,得到各影响因素的组合权重;随后利用TOPSIS法计算评价对象与理想解的贴近度,并据此对矿区水资源安全性进行合理排序,最终确定其安全等级。该模型

表 1 评价指标风险等级划分及 2017 年样本数据

指标	不同风险等级指标值					2017 年样本指标值
	I 级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅳ级	V 级	
A_1	≤ 1.0	$>1.0 \sim 2.0$	$>2.0 \sim 3.0$	$>3.0 \sim 4.0$	>4.0	1.62
A_2	$\geq 95\%$	$85\% \sim <95\%$	$70\% \sim <85\%$	$50\% \sim <70\%$	$<50\%$	87%
A_3	$\geq 95\%$	$85\% \sim <95\%$	$70\% \sim <85\%$	$50\% \sim <70\%$	$<50\%$	83%
A_4	≤ 1.0	$>1.0 \sim 2.0$	$>2.0 \sim 3.0$	$>3.0 \sim 4.0$	>4.0	2.3
B_1	$\leq 30\%$	$>30\% \sim 50\%$	$>50\% \sim 70\%$	$>70\% \sim 90\%$	$>90\%$	51%
B_2	≤ 0.5	$>0.5 \sim 1.0$	$>1.0 \sim 2.0$	$>2.0 \sim 3.0$	>3.0	1.13
B_3	$\geq 70\%$	$50\% \sim <70\%$	$30\% \sim <50\%$	$10\% \sim <30\%$	$<10\%$	72%
B_4	≥ 1700	$1000 \sim <1700$	$500 \sim <1000$	$200 \sim <500$	<200	1233.67
C_1	$\geq 95\%$	$85\% \sim <95\%$	$70\% \sim <85\%$	$50\% \sim <70\%$	$<50\%$	86%
C_2	$\geq 80\%$	$60\% \sim <80\%$	$40\% \sim <60\%$	$20\% \sim <40\%$	$<20\%$	93%
C_3	≥ 0.6	$0.5 \sim <0.6$	$0.4 \sim <0.5$	$0.3 \sim <0.4$	<0.3	0.53
C_4	$\geq 30\%$	$20\% \sim <30\%$	$10\% \sim <20\%$	$5\% \sim <10\%$	$<5\%$	67%
D_1	$\geq 70\%$	$50\% \sim <70\%$	$30\% \sim <50\%$	$10\% \sim <30\%$	$<10\%$	49%
D_2	≤ 1.0	$>1.0 \sim 2.0$	$>2.0 \sim 3.0$	$>3.0 \sim 4.0$	>4.0	3.72
D_3	≤ 500	$>500 \sim 1000$	$>1000 \sim 2000$	$>2000 \sim 5000$	>5000	863
D_4	$\geq 95\%$	$85\% \sim <95\%$	$70\% \sim <85\%$	$50\% \sim <70\%$	$<50\%$	83%

综合考虑了矿区水质状况、水资源数量、用水效率、生态可持续性等多维度因素,兼顾了主观经验与客观数据的权重分配合理性,具有科学性和适用性。矿区水资源安全性综合评价流程如图 2 所示。

2.2 基于 AHP 法的主观权重确定

AHP 法是一种用于权重决策的分析方法,它将复杂的决策问题分解为多个层次,由专家根据经验对层次结构中的各项指标进行两两比较,从而利用标度赋值标准(如 1~9 标度法)构建判断矩阵^[14-15]。本文研究邀请了 8 位专家,包括 3 位市级水利勘测设计院的高级工程师、3 位来自矿区环境管理部门的负责人以及 2 位高校水资源评价研究领域的教授。采用德尔菲法进行两轮匿名咨询,首轮正常发放调查问卷,次轮则将首轮统计结果反馈给专家,使其参考群体意见并修正判断,促使意见收敛。在此基础上,将所有专家的打分结果进行几何平均,以此构建目标层对准则层以及准则层对指标层的判断矩阵,借助 SPSSPRO 平台计算各指标权重。随后,对

判断矩阵进行一致性检验,所有矩阵的一致性比率均小于 0.1,证明主观权重分配较为合理。

2.3 基于熵权法的客观权重确定

熵权法是一种基于信息熵概念的客观赋权方法,通过熵值来衡量系统的无序程度。其核心原理为,指标的熵值越小,表明该指标数据的离散程度越大,所提供的信息量越多,在综合评价中所应赋予的权重也越高^[16]。借助 MATLAB 软件计算出各指标客观权重。

2.4 基于博弈论的最优组合赋权

博弈论组合赋权是通过构建指标之间的博弈关系,综合考虑主、客观权重分配,寻求最佳权重值的方法^[17-18]。其核心思想是寻找一组最优的线性组合系数,使得组合权重向量与各基本权重向量的离差极小化,从而达成一种均衡状态。

a. 若采取 L 种方法对 n 个评价指标进行赋权,计算得到基本权重向量的集合 $w_k = \{w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{kn}\} (k=1, 2, \dots, L)$, 则基本权重向量的任意线性组

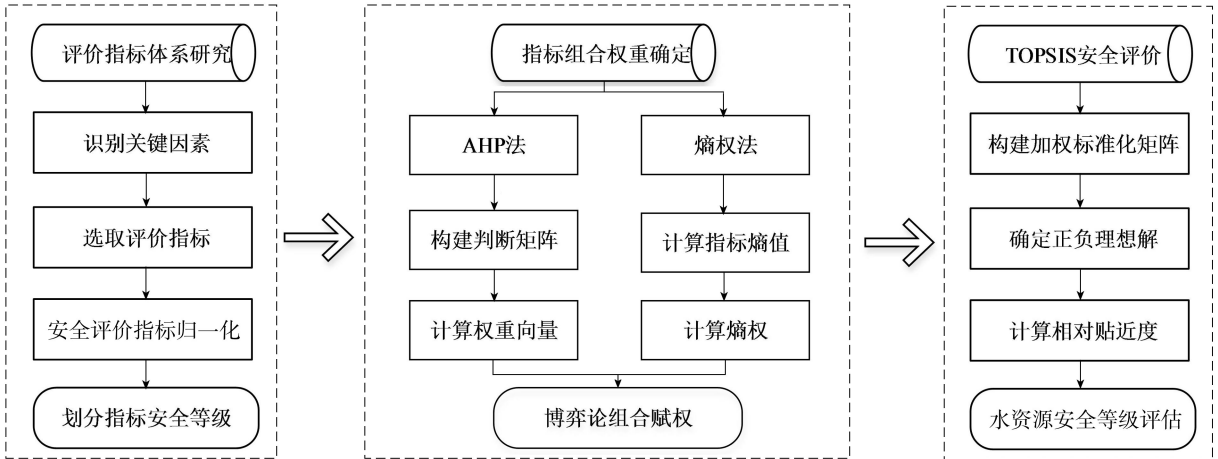


图 2 矿区水资源安全性综合评价流程

合可以表示为:

$$\boldsymbol{w} = \sum_{k=1}^L \alpha_k \boldsymbol{w}_k^T \tag{1}$$

式中: $\boldsymbol{w}$ 为组合权重向量; α_k 为线性组合系数。

b. 根据博弈论的基本思想,寻找最优线性组合系数 α_k^* ,使得组合权重向量 $\boldsymbol{w}$ 与基本权重向量 $\boldsymbol{w}_k$ 的离差最小化,即满足:

$$\min \parallel \sum_{k=1}^L \alpha_k \boldsymbol{w}_k^T - \boldsymbol{w}_k^T \parallel \tag{2}$$

c. 根据矩阵微分性质,求解线性方程组:

$$\begin{pmatrix} \hat{\boldsymbol{e}}_1 \boldsymbol{w}_1 \boldsymbol{w}_1^T & \boldsymbol{w}_1 \boldsymbol{w}_2^T & \cdots & \boldsymbol{w}_1 \boldsymbol{w}_L^T \\ \hat{\boldsymbol{e}}_2 \boldsymbol{w}_2 \boldsymbol{w}_1^T & \boldsymbol{w}_2 \boldsymbol{w}_2^T & \cdots & \boldsymbol{w}_2 \boldsymbol{w}_L^T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{\boldsymbol{e}}_L \boldsymbol{w}_L \boldsymbol{w}_1^T & \boldsymbol{w}_L \boldsymbol{w}_2^T & \cdots & \boldsymbol{w}_L \boldsymbol{w}_L^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\boldsymbol{e}}_1 \alpha_1 \\ \hat{\boldsymbol{e}}_2 \alpha_2 \\ \vdots \\ \hat{\boldsymbol{e}}_L \alpha_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{\boldsymbol{e}}_1 \boldsymbol{w}_1 \boldsymbol{w}_1^T \\ \hat{\boldsymbol{e}}_2 \boldsymbol{w}_2 \boldsymbol{w}_2^T \\ \vdots \\ \hat{\boldsymbol{e}}_L \boldsymbol{w}_L \boldsymbol{w}_L^T \end{pmatrix} \tag{3}$$

d. 将上式解得的线性组合系数 α_k 进行归一化处理,即可得到最优线性组合系数 α_k^* :

e. 最终的最优组合权重向量为 $\boldsymbol{w}^*$:

$$\boldsymbol{w}^* = \sum_{k=1}^L \alpha_k^* \boldsymbol{w}_k^T \tag{4}$$

2.5 TOPSIS 评价模型与计算步骤

TOPSIS 法的基本原理是通过计算各评价对象与正理想解和负理想解的距离,以距离最优解最近、距离最劣解最远为原则,从而判断相对优劣的评价方法^[19]。其基本计算步骤为:

- a. 建立初始评价矩阵。
- b. 为消除不同指标量纲的影响,使数据具有可比性,对原始评价矩阵进行标准化,处理后得到标准化矩阵。
- c. 根据各指标的权重,计算加权归一化评价矩阵。
- d. 计算各评价指标的正、负理想解。在本文研究中,各评价指标的正理想解(C^+)代表理论上各指标所能达到的最优安全状态,即所有效益型指标取最大值,所有成本型指标取最小值。负理想解(C^-)则代表最劣安全状态。以用水效率维度为例,其正理想解由 2017—2023 年间生活用水供给保障率、工业用水重复利用率、农业灌溉水利用系数和非常规水资源利用率这 4 个指标各自的年度最优值构成。后续计算出的各年度贴进度,即评价该年度现状与这一理论最优状态的接近程度。
- e. 采用欧氏距离计算各评价对象与正理想解及负理想解的距离。
- f. 计算评价对象与正、负理想解的贴进度。在一般情况下,贴进度的取值越接近 1,则说明评价对象越贴近理想解。

3 结果与分析

3.1 权重计算结果

基于第 2 节博弈论组合赋权确定的最终权重,对 X 矿区 2017—2023 年的水资源安全性进行实证评价与分析。

本文中 $L=2$,基于式(1)~(4),利用 MATLAB 求解线性方程组,求得 $\alpha_1=0.5045, \alpha_2=0.4955$,权重计算结果如表 2 所示。由表 2 可知,准则层权重从大到小依次为:水质状况(0.329)、水资源数量(0.254)、用水效率(0.217)和生态可持续性(0.200)。这表明水质状况和水资源数量是影响矿区水资源安全性的两个最关键维度。二级指标中,地表水水质达标率(0.093)、矿区废水排放达标率(0.088)、地下水污染指数(0.087)的权重位列前三,说明这些指标在矿区水资源安全方面发挥着重要作用。

表 2 权重计算结果

指标	主观权重	客观权重	组合权重
A_1	0.116	0.057	0.087
A_2	0.097	0.089	0.093
A_3	0.079	0.097	0.088
A_4	0.081	0.042	0.061
B_1	0.088	0.078	0.083
B_2	0.064	0.073	0.069
B_3	0.055	0.047	0.051
B_4	0.057	0.045	0.051
C_1	0.074	0.034	0.054
C_2	0.049	0.103	0.076
C_3	0.024	0.041	0.033
C_4	0.045	0.063	0.054
D_1	0.040	0.066	0.053
D_2	0.051	0.067	0.059
D_3	0.030	0.050	0.040
D_4	0.049	0.047	0.048

3.2 指标层贴进度计算与结果分析

以用水效率为例,根据上述计算方法即可得到该维度中各项二级指标的正、负理想解,可确定 2017—2023 年 X 矿区水资源用水效率中各二级指标与正、负理想解的距离 S_i^+ 和 S_i^- 为:

$$\begin{aligned} S_1^+ &= 0.0259 & S_1^- &= 0.0927 & S_2^+ &= 0.0722 \\ S_2^- &= 0.0616 & S_3^+ &= 0.0409 & S_3^- &= 0.0860 \\ S_4^+ &= 0.0828 & S_4^- &= 0.0760 & S_5^+ &= 0.0745 \\ S_5^- &= 0.0530 & S_6^+ &= 0.0945 & S_6^- &= 0.0583 \\ S_7^+ &= 0.0726 & S_7^- &= 0.0488 \end{aligned} \tag{5}$$

由此得到各二级指标贴进度 E_i 为:

$$\begin{aligned} E_1 &= 0.781 & E_2 &= 0.460 & E_3 &= 0.678 & E_4 &= 0.478 \\ E_5 &= 0.416 & E_6 &= 0.382 & E_7 &= 0.402 \end{aligned} \tag{6}$$

同理,可确定矿区水质状况、水资源数量以及生态可持续性的贴进度。各准则层的贴进度计算结果见表 3。

表 3 各准则层贴近期度计算结果

准则层	贴近期度						
	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	2023 年
水质状况	0.659	0.685	0.729	0.673	0.532	0.515	0.508
水资源数量	0.690	0.684	0.724	0.690	0.630	0.576	0.528
用水效率	0.781	0.460	0.678	0.478	0.416	0.382	0.402
生态可持续性	0.725	0.579	0.649	0.568	0.683	0.691	0.666

由表 3 可知,从水质状况来看,2019 年、2018 年和 2020 年分别以贴近期度 0.729、0.685 和 0.673 排名前三位,且呈现先升后降的波动特征。2019 年的峰值得益于当时污染管控措施的加强,但此后贴近期度持续下滑至 2023 年的 0.508,反映出治理效果的衰减,其核心原因在于矿区污染源复杂,治理措施的长效性不足,初期投入的治理设施因设备老化、处理能力饱和以及运维不到位,难以应对长期、累积的污染负荷,导致水质安全水平无法巩固。从水资源数量来看,各年的相对贴近期度差异较小,2019 年、2017 年和 2020 年分别以 0.724、0.690 和 0.690 排名前三位。究其原因,2019 年的高贴近期度源于为满足生产需求而进行的高强度地下水开采。该措施虽在短期内保障了供给量,但破坏了地下水的采补平衡,直接导致后续 2021—2023 年水资源可利用率降低、供给能力衰减,使贴近期度单调下滑至 2023 年的 0.528,其根源在于水资源管理缺乏总量控制和可持续规划,未能平衡短期生产需求与长期资源可持续性。与前两个维度相比,用水效率的安全形势最为严峻,其安全状况呈现“经历冲击后持续低迷”的态势。2017 年贴近期度高达 0.781,但 2018 年急剧下滑至 0.460,此后的 2020—2023 年持续处于低位(0.382~0.478)。这表明矿区的用水效率在经历系统性冲击后,陷入了长期低效困境,其根源在于生产规模扩大时,节水技术与管理措施未能同步升级,且缺乏长效节水机制与刚性约束,导致效率失守后难以恢复。从生态可持续性来看,其安全水平呈现“震荡修复”的演变特征,2017 年贴近期度高达 0.725,经历 2018 年的回落后,于 2019 年反弹至 0.649,但 2020 年再次探至周期内最低点 0.568。结合矿区实际,2018 年的下滑可归因于矿区开始实施的初期生态修复工程造成的扰动,2019 年的反弹表明修复措施产生了初步效果,但 2020 年再次成为修复过程中的“痛点”时期,这深刻反映了生态系统的脆弱性,也表明修复效果易受持续采矿活动、气候条件等内外因素干扰,导致成效出现反复。此后,贴近期度缓慢回升,表明长期的修复投入累积效应开始显现,生态系统抵抗干扰的能力增强,进入了一个相对稳定的恢复通道。然而,其数值仍未超越 2017 年基准,说明治理成效的巩固仍需时日。

3.3 准则层评价结果

由指标层确定的贴近期度结果可得贴近期度评价矩阵 E ,将其与博弈论组合赋权法确定的组合权重相乘,可得准则层综合评价结果向量 $Q = (0.702, 0.608, 0.701, 0.616, 0.554, 0.526, 0.525)$

不同年份矿区水资源安全各年的综合水平排名先后为 2017 年、2019 年、2020 年、2018 年、2021 年、2022 年和 2023 年,其整体综合得分为 0.618。根据等级划分标准,该矿区水资源安全状况整体处于“较安全”级别。根据离差分析,2017—2023 年的离差值分别为 0.097、0.003、0.096、0.011、-0.051、-0.079、-0.080。可见,2017 年和 2019 年的安全水平显著高于平均值,表现出突出的管理成效;2020 年和 2018 年略高于平均水平,处于较不安全状态;而 2021—2023 年则持续低于平均水平,且偏离幅度逐年扩大,显示出近期水资源安全状况呈现持续下滑趋势,治理压力不断增大。

综合来看,评价结果从时间变化和系统结构两个方面表明,矿区水资源安全管理体系的适应能力和协同能力略显不足。各维度安全水平的差异以及综合得分的波动下降趋势反映出当前的管理方式在应对复杂风险时,未能将不同治理环节有效整合,难以形成持久稳定的安全保障能力。从时间变化上看,安全状况呈现“短期改善、长期承压”的特点。这表明管理行为多为事中或事后应对,缺乏基于长期风险预警的前瞻性规划。安全水平未能随治理投入持续提高,反而在初期改善后逐步下滑,说明现有措施可持续性不强,其效果容易被更深层次的系统性压力所抵消。从系统结构上看,各维度安全水平的发展不同步、不均衡,暴露出管理系统存在“各自为政”的问题。水质、水量、效率和生态等治理环节之间缺乏有效的政策协同和资源整合,导致治理效果难以在不同领域间形成合力。

究其根本,当前的管理模式未能将水资源安全作为一个动态演化的整体系统来对待,治理思路仍局限于解决单个问题的技术层面,忽视了不同子系统之间的相互影响和反馈作用。这种机制上的缺陷,使得系统难以建立起抵御内外干扰的适应能力,最终表现为综合安全水平的波动和下降。

4 结论与建议

4.1 结论

a. 基于博弈论组合赋权和 TOPSIS 法对陕北 X 矿区 2017—2023 年水资源安全性的综合评价结果表明,该矿区整体安全级别为“较安全”,但安全水平呈“短期改善、长期承压”的波动下降态势,2021—2023 年持续低于平均水平且偏离幅度逐年扩大,近期水资源安全面临较大挑战。

b. 影响矿区水资源安全性的关键指标依次为地表水水质达标率、矿区废水排放达标率和地下水污染指数,水质状况与水资源数量是主导维度。各维度安全水平发展不同步,用水效率在 2018 年骤降后长期低迷,生态可持续性呈震荡修复特征,反映出管理系统存在“各自为政”问题,治理措施缺乏跨维度协同与长效机制。

c. 通过贴适度计算可直观量化各年度水资源安全程度及潜在风险,能够有效识别不同年份各维度的优势与短板,为矿区水资源的精准调控、动态预警和科学管理提供明确依据。模型兼顾主观专家经验与客观数据信息,权重分配合理,评价结果与矿区实际相符,可为同类矿区水资源安全评估及区域可持续发展提供方法借鉴与决策支持。

4.2 建议

a. 针对薄弱环节进行精准管控。在水质方面,重点加强污水处理设施的运行维护与效能监测,定期更新老化设备,确保废水排放长期稳定达标。对尾矿库、废石场等潜在污染源进行防渗加固,严防渗漏;在水资源数量方面,严格控制地下水开采,保障水资源可持续供给。将再生水、矿坑水作为生产首选水源,并提高其供应稳定性,减少对地下水的依赖,增强系统抗风险能力;在用水效率方面,对洗选、冷却等主要用水环节进行节水改造,将用水效率纳入绩效考核,形成“节水增效”的约束机制;在生态可持续性方面,落实边采边治,对排土场、沉陷区等区域及时进行植被恢复。同时,在施工区严格落实水土保持措施,降低水土流失强度。

b. 整合环保、水利、能源及矿区管理部门职能与数据,同步建设集监测、评价、预警、调度于一体的智慧水务平台,实现信息共享与业务协同,提升系统性治理能力。

c. 将水资源安全核心指标纳入考核,建立责任追究制度。鼓励产学研合作,攻关矿区水资源高效利用与生态修复关键技术,形成长效支撑。

参考文献:

[1] 王幸,张晓力,刘翔宇. 黄河流域环境规制对水资源利

用效率的影响研究[J]. 水利经济,2024,42(6):43-49. (Wang Xing, Zhang Xiaoli, Liu Xiangyu. Research on impact of environmental regulations on water resources utilization efficiency in the Yellow River Basin [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(6): 43-49. (in Chinese))

[2] 金菊良,常哲,周亮广,等. 流域水资源安全风险评价问题的系统分析[J]. 水利水电科技进展,2025,45(5): 112-118. (Jin Juliang, Chang Zhe, Zhou Lianguang, et al. System analysis of water resources security risk assessment in river basins[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(5): 112-118. (in Chinese))

[3] 李滕. 矿区水资源利用现状研究[J]. 世界有色金属, 2017(15):287-289. (Li Meng. Study on the utilization of water resources in mining area [J]. World Nonferrous Metals, 2017(15):287-289. (in Chinese))

[4] 陈彩红. 矿区水资源合理利用分析[J]. 世界有色金属, 2018(17):218-220. (Chen Caihong. Analysis of rational utilization of water resources in mining area [J]. World Nonferrous Metals, 2018(17):218-220. (in Chinese))

[5] Akakuru O C, Eyankware M O, Aigbadon G O, et al. Carcinogenic health risks and water quality assessment of groundwater around lead-zinc mining areas of Ebonyi state Nigeria: a data-driven machine learning approach [J]. Discover Civil Engineering, 2024, 1(1):130.

[6] 卢振,郭洋楠,李国庆,等. 神东矿区地表水、地下水和矿井水水质特征及健康风险评价[J]. 安全与环境工程, 2023, 30(5):222-234. (Lu Zhen, Guo Yangnan, Li Guoqing, et al. Water quality and health risk of surface water, groundwater and mine water in Shendong Mining Area[J]. Safety and Environmental Engineering, 2023, 30(5):222-234. (in Chinese))

[7] 庞红璐,陈意,吴先勇,等. 厄立特里亚科卡矿区水质量评价及水污染特征研究[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(7):19-24. (Pang Honglu, Chen Yi, Wu Xianyong, et al. Water quality evaluation and water pollution characteristics of Zara Koka mine in Eritreap [J]. Environmental Science and Management, 2017, 42(7): 19-24. (in Chinese))

[8] 姚志岭,于利强,陈胜焱,等. 西部生态脆弱矿区采动水资源与生态环境效应[J]. 煤炭学报, 2025, 50(2):748-767. (Yao Qiangling, Yu Liqiang, Chen Shengyan, et al. Mining-affected water resources and ecological effects in ecologically fragile mining areas of western China [J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(2):748-767. (in Chinese))

[9] 李琳. 宁东煤炭基地矿井水供需双向协调评价:基于 TOPSIS 方法的实证研究[J]. 陕西煤炭, 2019, 38(1): 5-8. (Li Lin. Two-way coordinated evaluation of mine water supply and demand in Ningdong Coal Base: an

empirical study based on TOPSIS method [J]. Shaanxi Coal, 2019, 38(1): 5-8. (in Chinese))

[10] Guo Liangliang, Xie Xinxin, Zeng Jian, et al. Optimization model of water resources allocation in coal mine area based on ecological environment priority[J]. Water, 2023, 15(6): 1205.

[11] 刘晓民, 王文娟, 王震宇, 等. 基于 GT-ANP 理论的生态脆弱区煤-水协调绿色开采度评价[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(8): 203-210. (Liu Xiaomin, Wang Wenjuan, Wang Zhenyu, et al. Evaluation of coal water coordinated green mining degree in ecologically fragile area based on GT-ANP theory[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(8): 203-210. (in Chinese))

[12] 解馨馨, 杨军耀, 陈军锋. 露井联采矿区煤-水-生态协调发展评价体系研究[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(6): 135-140. (Xie Xinxin, Yang Junyao, Chen Junfeng. Study on evaluation system of coal-water-ecology coordinated development model in open-pit combined mining area [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(6): 135-140. (in Chinese))

[13] 张彦, 李明然, 寇利卿. 基于 PSR-PCA-ANFIS 模型的保定市中心城区水资源安全评价[J]. 中国农村水利水电, 2022(2): 68-75. (Zhang Yan, Li Mingran, Kou Liqing. Evaluation of water resources security in Baoding central city based on PSR-PCA-ANFIS model[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(2): 68-75. (in Chinese))

[14] 张晓峰, 石永杰, 刘俊, 等. 基于 AHP-熵权法的望虞河西岸圩区活水调度方案多目标优选[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(3): 80-87. (Zhang Xiaofeng, Shi Yongjie, Liu Jun, et al. Multi-objective optimization of flowing water dispatch schemes in western polder area of Wangyu River based on AHP-entropy weight method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(3): 80-87. (in Chinese))

[15] 艾亚迪, 魏传江, 马真臻. 基于 AHP-熵权法的西安市水资源开发利用程度评价[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(2): 11-16. (Ai Yadi, Wei Chuanjiang, Ma Zhenzhen. Evaluation on water resources development and utilization degree based on AHP-entropy weight method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(2): 11-16. (in Chinese))

[16] 何婧, 孙银光. 高职院校国家助学金评定如何帮助较不利学生?: 基于 AHP-熵权法的评定[J]. 教育与经济, 2024, 40(6): 84-93. (He Jing, Sun Yingguang. How does the selection of state grants for higher vocational colleges help disadvantaged students? an evaluation study based on AHP and entropy[J]. Education & Economy, 2024, 40(6): 84-93. (in Chinese))

[17] 杨毅彪, 孙恒五, 戴震, 等. 基于博弈论组合赋权的地方高校校内专业评估[J]. 系统科学学报, 2025, 33(2): 149-154. (Yang Yibiao, Sun Huanwu, Dai Zhen, et al. Research on specialty evaluation in local colleges and universities based on the combination weighting of game theory[J]. Journal of System Science, 2025, 33(2): 149-154. (in Chinese))

[18] 孔令婷, 钱真, 刘敏. 基于熵权 TOPSIS 评价法的上海市应对太湖流域超标准洪水调度策略研究[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(3): 55-61. (Kong Lingting, Qian Zhen, Liu Min. Study on scheduling strategies in Shanghai City for managing over-standard floods from the Taihu Basin based on entropy-weighted TOPSIS evaluation method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(3): 55-61. (in Chinese))

[19] 刘睿佳, 杨侃, 陈静, 等. 基于区间直觉模糊 TOPSIS 法的水资源空间均衡评价[J]. 人民黄河, 2023, 45(3): 56-61. (Liu Ruijia, Yang Kan, Chen Jing, et al. Evaluation of water resources spatial equilibrium based on extended TOPSIS method with interval intuitionistic fuzzy sets[J]. Yellow River, 2023, 45(3): 56-61. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-03-24 编辑: 俞云利)

+++++

(上接第 64 页)

[26] 王丽娟, 宋翹楚, 吴为, 等. 江苏沿海滩涂地下水埋深及矿化度变化规律[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(6): 52-57. (Wang Lijuan, Song Qiaochu, Wu Wei, et al. Variation law of groundwater depth and mineralization of coastal tidal flats in Jiangsu Province [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(6): 52-57. (in Chinese))

[27] 刘战东, 刘祖贵, 俞建河, 等. 地下水埋深对玉米生长发育及水分利用的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(7): 617-624. (Liu Zhandong, Liu Zugui, Yu Jianhe, et al. Effects of groundwater depth on maize growth and water use efficiency [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(7): 617-624. (in Chinese))

[28] 肖俊夫, 南纪琴, 刘战东, 等. 不同地下水埋深夏玉米产量及产量构成关系研究[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(6): 36-39. (Xiao Junfu, Nan Jiqin, Liu Zhandong, et al. Study on yield and yield components of summer maize under different groundwater levels [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(6): 36-39. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-03-20 编辑: 俞云利)

基于 D-S 证据理论的土料压实质量多源信息融合评估方法

杨 钢¹,刘国庆²,李洪飞³,丁学赏²,常瑞峰³,刘东海¹

(1. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室; 2. 天津水务投资集团有限公司; 3. 天津市水利工程集团有限公司)

摘要:为准确评估围坝土料压实质量,提出了一种基于碾轮加速度时域和频域等多源信息融合的压实质量综合评估方法。分别建立了单位体积压实功、频域指标 CV 及时频域指标 CWT-THD 等不同指标与土料压实度之间的定量关系模型;以 D-S 证据理论为信息融合框架,结合施工实际及 Murphy 规则对 3 种指标的基本概率分配值求解与冲突证据融合进行了优化。实例验证结果表明,所提出的方法可提高土料压实质量评价的准确率,避免单一指标评估的片面性,并可用于分析压实质量的空间均匀性,实现对土料压实质量的快速、准确评定。

关键词:土石坝施工;压实质量;多源信息融合;智能碾压;D-S 证据理论;综合评估

Multi-source information fusion evaluation method of soil compaction quality based on D-S evidence theory//Yang Gang¹, Liu Guoqing², Li Hongfei³, Ding Xueshang², Chang Ruifeng³, Liu Donghai¹ (1. *State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University*; 2. *Tianjin Water Investment Group Co., Ltd.*; 3. *Tianjin Water Conservancy Engineering Group Co., Ltd.*)

Abstract: To accurately evaluate the compaction quality of embankment soil materials, a comprehensive assessment method based on multi-source information fusion of roller acceleration data in both the time and frequency domains is proposed. Quantitative relationship models between compaction degree and different indicators, including compaction energy per unit volume, frequency-domain indicator CV, and time-frequency-domain indicator CWT-THD, were established. Utilizing the Dempster-Shafer (D-S) evidence theory as the information fusion framework, the basic probability assignment values of the three indicators and conflicting evidence were optimized through integration with construction practice and Murphy's rule. The case validation results demonstrate that the proposed method can improve the accuracy of compaction quality evaluation, avoid the limitations of single-indicator assessments, and enable the analysis of spatial uniformity of compaction quality, thereby achieving rapid and accurate evaluation of soil compaction quality.

Key words: earth-rock dam construction; compaction quality; multi-source information fusion, intelligent compaction; D-S evidence theory; comprehensive evaluation

确保土料碾压施工过程中的压实质量是有效控制围坝工后沉降与不均匀沉降的关键。常规的土料压实质量检测采用人工试坑抽检,存在检测效率低、取样费时费力、样本点少、难以反映全仓面、难以及时反馈控制且干扰后续施工作业等不足。如何建立碾压质量高精度快速评估模型,在碾压过程中实现土料压实质量的综合评估,是该领域亟须解决的问题^[1-2]。

近年来,随着智能碾压技术^[3]的发展,基于实时监测指标来评估土料压实质量的方法已得到较多应用,主要包括基于碾轮振动加速度频谱分析的频域指标压实监测值(CV)^[4]、压实控制值(CCV)^[5]、

总谐波失真指标(THD)^[6]等、以及借助碾压机-土料动力学模型推导出的压实指标如刚度^[7]、单位体积压实功^[8]等。例如:Liu 等^[9]基于 CV 和单位体积压实功等指标,实现了全施工作业面压实质量的快速评估;Xu 等^[10]提出了自适应的质量控制集成系统,并利用智能碾压技术实时采集工作面的监测指标 CCV,实现了路面的压实质量评估;Yang 等^[11]提出将振动能量压实值(KECV)作为公路压实质量的实时监测指标,实现了全域压实质量合格率的快速评估。上述指标在一定程度上都能表征压实质量,但都存在各自的局限性,如频域指标通过土料不同密

实状态对碾轮的振动响应不同来间接评估土料的压实质量,但容易受到土料底层坚硬程度和底层压实均匀性的影响;刚度指标能够直接表征碾压过程中土料被压实的坚硬程度,但无法体现压实过程中土料对碾轮的动态响应;单位体积压实功可客观反映碾压机对土料的压实作用和土料接受外界施压的效果,但无法反映不同土料压实效果的均匀性。此外,基于频率分析方法得到的现有指标仅在时域或者频域内进行分类,但振动响应的时频域特征可以更全面地表示压实质量^[12],但相关研究目前仍较为匮乏。

Dempster-Shafer (D-S) 证据理论是一种处理多种不确定性信息的理论框架,可用于解决不确定性推理和多源信息融合问题,已广泛应用于人工智能、模式识别、决策分析等领域,近年来逐渐被用于隧道、基坑等工程领域^[13-16]。相较于最大熵、模糊集等不确定信息推断理论,D-S 证据理论能够处理多源证据的冲突性,聚焦多个具体证据的共同支持点,从而得到更加合理、准确的评估结果。

为降低单个评估指标在土料压实质量评估中的片面性,本文将 CV、单位体积压实功及 CWT-THD 作为多源证据信息,建立多源信息融合下的土料压实质量综合评估模型,结合 D-S 证据理论进行信息融合,以期实现土料压实质量的准确评定。

1 基于智能碾压的土料压实质量表征指标分析

智能碾压技术可实时采集碾轮运行参数(如碾轮振幅、频率、加速度等)及碾压过程参数(如碾压遍数、铺层厚度、振动状态、行进速度等),利用车载压实质量实时监测装置(用于监测压实指标,如 CV、单位体积压实功等),动态监测和评估被压料的压实效果(如压实度、孔隙率、干密度),自适应调节碾压参数,实现在线监控和反馈指导施工,使碾压质量始终处于受控状态^[17]。实时计算的压实指标带有时间属性,与碾轮的实时位置坐标信息以及实时监测的碾压参数信息进行组合发送至数据库中,用于后续的压实质量评估^[18]。

单位体积压实功可客观反映碾压机对土料的压实作用和土料接受外界施压的效果,一定程度上可表征土料的压实程度。但该指标不能体现对不同土料的压实状态,不同土料在相同压实功下可能具有不同的压实效果。其计算公式如下^[8]:

$$E = \frac{2A(W + \pi F/4)fN}{Bhv} \quad (1)$$

式中: E 为碾压 N 遍后的单位体积压实功; A 为碾轮

工作振幅; W 为碾轮的径向荷载; F 为实际输出激振力; f 为振动频率; N 为碾压遍数; B 为碾轮宽度; h 为压实厚度; v 为碾压机行车速度。

将 CV 作为土料压实质量频域监测指标,可通过土料不同密实状态对碾轮的振动响应不同来间接评估土料的压实质量,但评估结果易受土料底层坚硬程度及压实均匀性的影响。CV 能够体现不同土料对碾轮振动的响应,可弥补单位体积压实功对不同土料压实效果辨别能力不足的问题,其计算公式如下^[19]:

$$I_{CV} = 300A_4/A_2 \quad (2)$$

式中: I_{CV} 为 CV 指标值; A_2 为碾轮振动加速度的基频谐波对应幅值; A_4 为二倍基频谐波对应幅值。

连续小波变换^[20] (CWT) 通过将振动加速度响应信号与不同尺度的小波函数(小波基)进行卷积得到小波系数,进而推导得到时频域指标。小波基的缩放变换结合了频率维度,而与振动加速度响应信号的卷积结合了时间维度。因此,CWT 可对频率和时间维度上的振动加速度响应信号进行分析,与其他监测指标相比,时频域指标可以更细致地表征不同压实状态下振动加速度响应信号的变化。

单位体积压实功仅量化了碾压机对土料施加的能量输入,不能反映不同土料在相同能量输入下的实际压实状态或压实效果差异;CV 关注碾轮振动加速度信号的基频与二次谐波之间的关系,但无法准确反映更复杂的频域成分,尤其是高频失真分量对压实质量的贡献。而时频域指标能够捕捉压实过程中振动信号的动态变化,同时提取振动信号中的高频失真分量,可进一步细化土料内部的响应特性。于是本文将考虑高频和低频的联合指标 CWT-THD 作为时频域指标,采用 Morse 小波函数作为小波基进行分析。其计算公式如下:

$$I_{CWT-THD} = \frac{50 \sqrt{\sum_{i=1}^{16} M_i^2}}{F_1 + F_2 + F_3 + F_4} \quad (3)$$

式中: $I_{CWT-THD}$ 为 CWT-THD 指标值; M_i 为碾轮振动加速度信号高频部分的幅值小波系数模,用来反映高频失真分量; $F_1 \sim F_4$ 分别为 1~4 倍基频谐波范围内的小波幅值均值,共同表示信号在前 4 阶谐波上的主要能量分布。

2 基于 D-S 证据理论的多源信息融合方法

2.1 压实质量证据融合规则构建

设多源信息融合土料压实质量评估的 D-S 证据识别框架为 $\theta = \{Q_1, Q_2\}$, 分别代表压实质量合格与不合格;而土料压实质量证据集为 $\varphi = \{A_j, j = 1, 2,$

..., 5}, 分别代表单位体积压实功、CV、CWT-THD、土料特性参数级配和含水率。若有函数 $m: 2^\theta \rightarrow [0, 1]$ 满足如下条件:

$$\begin{cases} m(\emptyset) = 0 \\ \sum_{Q_i \subseteq \theta} m(A_j(Q_i)) = 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\emptyset$ 为空集; $m(A_j(Q_i))$ 为证据 A_j 对识别框架中子集 Q_i 的基本概率分配。

称 m 为识别框架 θ 的基本概率分配函数, 计算结果为基本概率分配 (BPA)。当从多个信息源得到证据集中每个证据体的 BPA 后, 需要将这些证据按照一定的规则进行融合^[21]。常规 D-S 融合规则为:

$$m(F) = \begin{cases} \sum_{Q_1 \cap Q_2 = F} m(A_j(Q_i)) / (1 - K) & \forall F \subseteq \theta, F \neq \emptyset \\ 0 & F = \emptyset \end{cases} \quad (5)$$

式中: F 为融合后的焦元子集; K 为冲突系数, 被用于描述证据之间存在冲突性, 其值越大, 说明证据体之间的冲突越大, 也意味着所融合后的决策结果的可靠度越差。

2.2 概率分配函数选择

考虑既定工况下土料不同压实度条件下评估指标的波动性, 对评估指标进行统计分析, 得到不同评估指标的取值区间。评估指标值越大, 支持压实度合格的概率越高。结合压实度控制要求, 计算得到不同评估指标的控制阈值, 则评估指标的 BPA 可按线性分配计算:

$$m(A_j(Q_1)) = \begin{cases} 0.5(A_j - A_{j\min}) / (A_{j\text{threshold}} - A_{j\min}) & A_j \in [A_{j\min}, A_{j\text{threshold}}] \\ 0.5 + 0.5(A_j - A_{j\text{threshold}}) / (A_{j\max} - A_{j\text{threshold}}) & A_j \in (A_{j\text{threshold}}, A_{j\max}] \end{cases} \quad (6)$$

式中: A_j 为评估指标的实际值; $A_{j\max}$ 和 $A_{j\min}$ 分别为评估指标的最大值和最小值; $A_{j\text{threshold}}$ 为控制阈值; $m(A_j(Q_1))$ 和 $m(A_j(Q_2))$ 分别为评估指标支持压实度合格和不合格的 BPA。

2.3 冲突程度弱化处理

通常, 随着不同评估指标数量的增加, 其冲突概率会不断提高。而土料压实质量往往受到多来源、多指标的综合影响, 采用不同指标进行综合评估十分必要。因此, 为提高多源信息融合结果的准确性, 需要对这种潜在的冲突性进行优化处理。

本文采用 Murphy 规则^[22]进行多源证据评价指标间冲突程度的弱化。该方法首先将多个评估指标

值的 BPA 进行均值计算以及权重调整, 再使用 D-S 组合规则进行信息融合。该方法可以处理冲突数据, 且收敛速度较快。评估指标的平均 BPA 计算公式为:

$$m_{\text{avg}}(Q_1) = \sum_{j=1}^5 m(A_j(Q_1)) / 5 \quad (8)$$

$$m_{\text{avg}}(Q_2) = \sum_{j=1}^5 m(A_j(Q_2)) / 5 \quad (9)$$

式中: $m_{\text{avg}}(Q_1)$ 和 $m_{\text{avg}}(Q_2)$ 分别为压实度合格与不合格的平均 BPA。

进一步地, 将所有指标证据体的概率值进行权重调整, 使每个指标证据体的支持概率值都趋于一致, 减少冲突对结果的影响。调整指标概率分配值公式如下:

$$m'(A_j(Q_1)) = \alpha m_{\text{avg}}(Q_1) + (1 - \alpha) m(A_j(Q_1)) \quad (10)$$

$$m'(A_j(Q_2)) = \alpha m_{\text{avg}}(Q_2) + (1 - \alpha) m(A_j(Q_2)) \quad (11)$$

式中: $m'(A_j(Q_1))$ 和 $m'(A_j(Q_2))$ 分别为调整后评估指标支持压实度合格与不合格的 BPA; α 为调整系数, 一般取 0.5。

计算得到调整后的 BPA 后, 继续利用式 (5) 进行 $j-1$ 次融合迭代, 即可得到最终的融合结果。

3 围坝土料压实质量综合评估步骤

为实现对土料压实质量的综合评估, 首先, 利用压实质量实时监控系统^[23] 实时采集每个采样位置处的碾轮振动加速度信号以及碾压参数, 计算得到采集位置处的多个压实质量评估指标; 然后, 基于 D-S 证据理论对计算得到的多个评估指标值进行信息融合, 得到每个采集位置处融合后的概率值; 最后, 利用空间插值方法对任意位置处压实度合格概率值进行插值, 得到全工作面压实度合格概率值分布云图, 同时进行压实质量均匀性评价, 并结合现场压实度控制标准要求, 指导现场施工, 对不合格区域进行补碾, 保证压实质量达标。土料压实质量综合评估实施步骤具体如下:

a. 任意位置处压实质量评估指标实时采集与计算。 利用智能碾压技术, 在碾压过程中实时采集碾轮振动加速度、行车速度、碾压遍数、压实厚度等数据, 结合式 (1) ~ (3) 计算得到每个采集位置处 (一般是每隔 1 s 采样频率, 考虑 3 ~ 4 km/h 的行车速度, 故相邻采集点距离约 1 m) 的单位体积压实功、CV 和 CWT-THD。

b. 压实质量评估指标标准化。 针对单位体积压实功、CV 和 CWT-THD 指标不同的量纲和取值范

围,采用线性归一化方法将不同评估指标取值转换为无量纲数值。

c. 基于改进 D-S 证据理论进行多个指标的信息融合。首先,利用式(6)和式(7)计算得到每个采集位置处不同评估指标支持压实度合格与不合格的概率值;然后,利用式(8)~(11)得到每个采集位置处弱化冲突后,每个评估指标支持压实度合格与不合格的概率值;接着,利用式(5)进行融合迭代,得到每个采样位置处(每个位置间隔约 1 m)最终的融合概率值。

d. 土料压实质量全域快速评估。利用步骤 c 得到的采样点处的压实度合格概率和空间插值方法(如克里金插值),对其他任意位置处压实度合格概率值进行插值,可得到全工作面支持压实度合格概率值分布云图;以支持压实度合格的概率值 p 作为控制标准要求,当支持压实度合格的最终融合概率值大于 p 时,可认为压实度合格,一般 p 取值为 0.5。此外,可现场随机抽取若干检测点,对每个点的融合评估结果与实际压实度检测结果进行对比分析。通过计算的压实度合格概率值来判断各点的压实质量是否符合要求。随后,将模型预测结果与实测数据进行对比分析,采用准确率、召回率、假阴性率等评价指标^[24]对模型的性能进行定量评估,以反映其优劣性。

e. 压实质量均匀性分析。通过步骤 d 利用克里金空间插值法构建半变异函数模型,结合模型的关键参数分析全域压实质量的空间均匀性,以避免工后沉降的不均匀性。半变异函数值的计算和拟合公式分别为^[25]:

$$\gamma(h) = \sum_{i=1}^{N_h} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 / 2N_h \quad (12)$$
$$\gamma(h) = \begin{cases} c_0 + c[3h/2a - (h/a)^3/2] & 0 < h < a \\ c_0 + c & h \geq a \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\gamma(h)$ 为半变异函数; h 为取样间隔; N_h 为取样间隔为 h 时检测点的对数; $z(x_i)$ 为空间位置 x_i 处的实际观测值; c_0 为块金值,反映了微小尺度的变异性; c 为基台值,反映了整体的空间变异程度; a 为变程,反映了变量的空间影响范围及空间分布的连续性。

4 实例验证

4.1 碾压试验方案

天津市某水库围坝扩建工程,增容后水库总库容为 9525 万 m^3 ,坝顶高程为 10.8 m,全长 14.2 km,土方填筑量约 600 万 m^3 ,施工工期约 1 年。采用就

近取土筑坝方式,取土料场建在原水库库区内。筑坝土料主要为粉质黏土,其塑限和液限分别为 21.0%和 34.6%,最优含水率为 18.6%,最大干密度为 1.68 g/cm^3 。该土料的粒径分布见表 1。

表 1 土的粒径分布

粒径(mm)	>0.250	0.250~0.075	0.075~0.005	<0.005
质量分数(%)	3.8	17.6	52.1	26.5

碾压试验设置 1 个碾压条带,条带长 35 m、宽 2.5 m,松铺厚度约为 40 cm,条带上标记 6 个试验点,每个试验点间距为 5 m,如图 1 所示。使用柳工 CLG622 单钢轮振动碾压机振动压实土料,条带先静碾 1 遍,再高频低振 4 遍,碾压机前进后退一次算碾压 2 遍。试验过程中碾压机行进速度与实际施工一致,维持在 2.5 km/h 左右。每遍振碾后,利用环刀对试坑检测点进行取样;最后一遍振碾后,额外随机选择 4 个试坑检测点进行取样,并用手持 RTK 设备记录所有试坑检测点的位置坐标。考虑到现场施工土料来自同一料场,且土料较为均匀,可认为其级配与含水率基本一致。



图 1 现场试验布置(单位:m)

4.2 多源信息融合下压实质量综合评估

根据试坑检测点的坐标位置匹配远程数据库中的振动加速度信号以及碾压参数,利用式(1)~(3)计算试坑检测点的 CV、 E 以及 CWT-THD,并分析上述指标与压实度 D 之间的相关性(图 2)。由图 2 可知,3 个指标与压实度之间均存在较好的相关性,其决定系数 R^2 分别为 0.78、0.75 和 0.71。

基于 CV、 E 、CWT-THD 3 个指标的关系模型得到的计算值与实测值之间的最大相对误差分别为 1.71%、1.85%以及 2.05%,其平均相对误差分别为 0.85%、0.95%以及 0.97%。由此可见,上述 3 个评估指标能够较好地表征土料的压实质量。为进一步提升评估精度,采用 D-S 证据理论对其进行融合处理,以实现土料压实质量的综合评估。针对试验条带,根据第 3 节评估步骤,得到支持压实度合格概率值分布云图,如图 3 所示。

根据式(4)~(11),计算 4 个位置处的试坑检

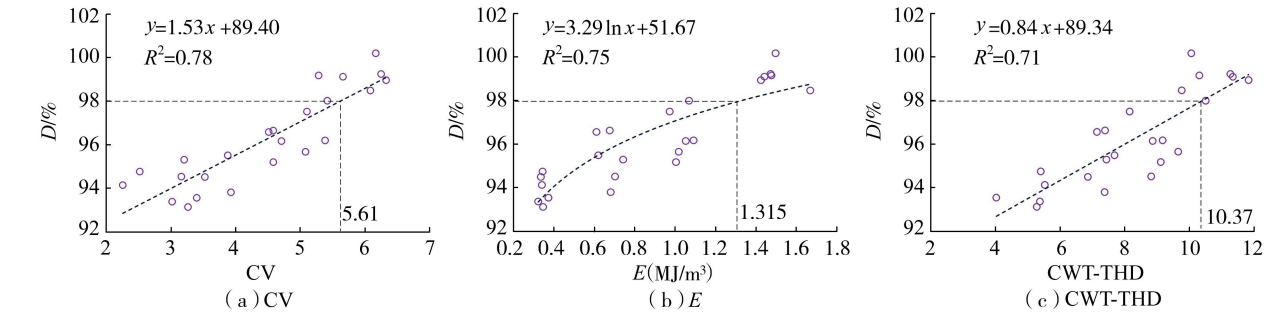


图2 不同评估指标与压实度的关系

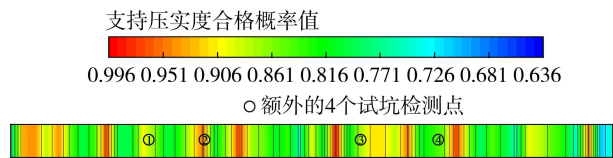


图3 支持压实度合格概率值分布云图

测压实度合格概率值,见表2。如采集位置①处,最终融合结果为[0.901,0.099],表示压实度合格概率为0.901,不合格概率为0.099。根据设定的概率阈值,当支持压实度合格概率值大于0.5时,认为压实质量合格。由表2可知,基于D-S证据理论的多源信息融合结果中,支持压实度合格概率值均大于0.5,表明评定结果均为合格,与试坑实测压实度值大于98%为合格的评定结果一致。

表2 试坑压实度实测值与合格概率值对比

采集位置	实测值/%	最终融合结果	融合评定结果
①	99.03	[0.901,0.099]	合格
②	100.14	[0.954,0.046]	合格
③	100.60	[0.910,0.090]	合格
④	98.88	[0.856,0.144]	合格

4.3 全仓面压实质量综合评估

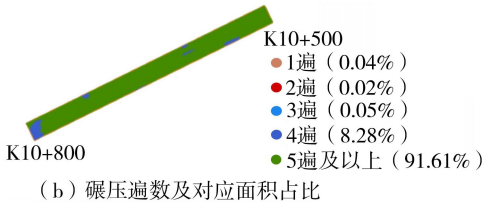
以该工程第4标段K10+500~K10+800的某待测仓面为例,其仓面位置及施工参数(总遍数和压实厚度)数据如图4所示,其中压实厚度的平均值为0.31m,标准差为0.05m。

根据第3节评估步骤,得到该仓面不同评估指标分布云图以及支持压实度合格概率值分布云图(图5),现场压实度控制标准不低于98%,图中阴影部分表示不合格区域。按SL/T848—2025《碾压式土石坝施工规范》要求每100~200m³取样一次(本文研究中200m³取样一次),并将随机检测的10个试坑检测点位置标注在云图中。

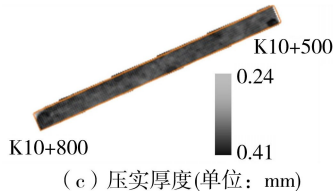
试坑检测结果与其云图对应位置处的不同指标评估结果如表3所示。由表3可知,实测结果中10号试坑压实质量不合格,其余试坑均合格;3种不同评估指标的单一评定结果中除10号试坑外还分别存在其他试坑不合格(2号、7号和1号)的情况,这可能是由于施工速度的波动以及加速度振动信号



(a) 仓面位置示意图



(b) 碾压遍数及对应面积占比



(c) 压实厚度(单位: mm)

图4 待测仓面位置及施工参数

表3 压实度实测值和不同指标计算的压实度评估结果对比

试坑编号	压实度实测值/%	基于不同指标计算的压实度/%			融合结果
		CV	E	CWT-THD	
1	98.58	98.83	98.96	97.48*	[0.761,0.239]
2	98.78	97.85*	98.69	99.16	[0.749,0.251]
3	98.67	98.14	99.42	99.06	[0.809,0.191]
4	98.82	99.26	98.16	99.94	[0.848,0.152]
5	99.14	99.71	98.24	98.35	[0.857,0.143]
6	99.32	98.67	98.69	99.16	[0.829,0.171]
7	98.44	99.41	97.35*	99.67	[0.737,0.263]
8	99.61	98.32	98.26	98.44	[0.818,0.182]
9	98.82	98.44	99.79	99.43	[0.827,0.173]
10	97.66*	97.34*	97.26*	97.21*	[0.468,0.532]*

注: *表示不合格。

的不稳定导致了单一评定结果的误判。而基于D-S证据理论的多源信息融合结果中只有10号试坑压实度合格概率小于0.5,其余均大于0.5,评定结果与实测结果保持一致。这表明基于多源信息融合后的压实质量评定结果平衡了各个指标之间的敏感性和抗干扰性,相较于单一指标的评定结果准确性更高。

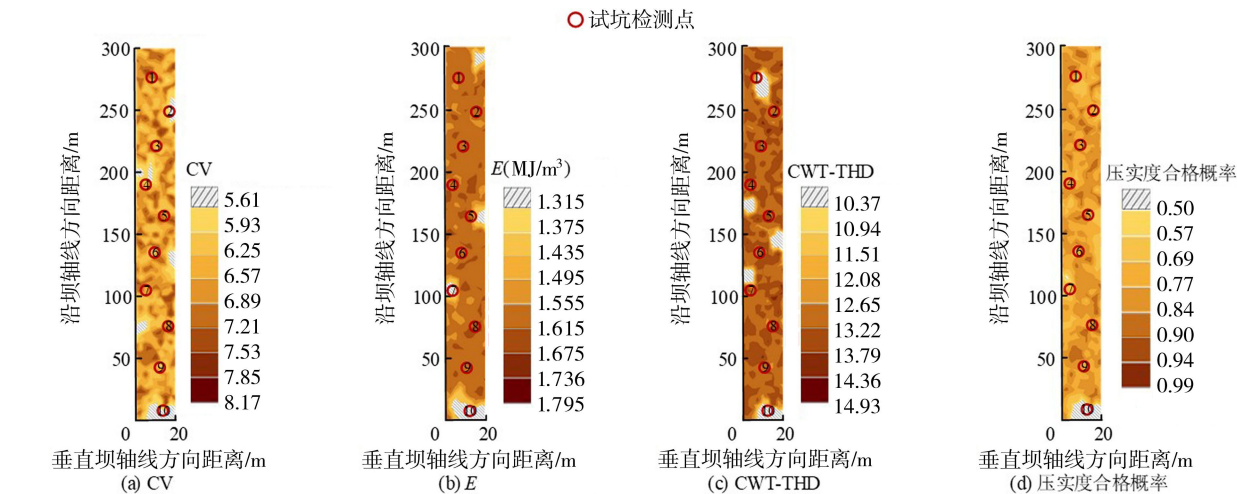


图5 待测仓面不同评估指标分布云图

待测仓面不同评估模型的评价指标如表4所示。由表4可知,总体上3种不同指标的单一评估模型准确率和召回率均达到0.85以上,且假阴性率较低,表明3种不同的评估指标能够较好地表征压实质量,模型精度较高;而基于多源信息融合的评估模型评价指标结果表现更好,可实现对土料压实质量的准确评定。

表4 不同评估模型的评价指标

评估模型	准确率	召回率	假阴性率
CV	0.90	0.89	0.11
E	0.90	0.89	0.11
CWT-THD	0.90	0.89	0.11
融合结果	1.00	1.00	0.00

根据第3节步骤e,针对多源信息融合的压实度融合概率值构建半变异函数,比较沿方位角 0° 、 45° 、 90° 和 135° 方向上的半变异函数值(图6)。由图6可知,不同方向上的半变异函数值之间没有显著差异,表明该仓面压实质量在各个方向上没有明

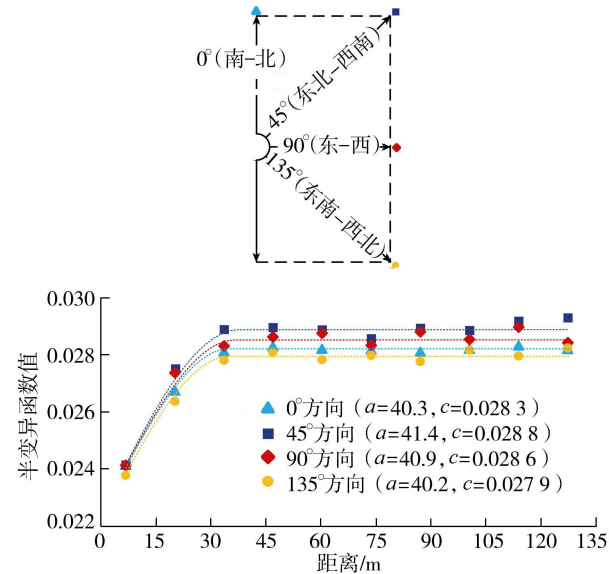


图6 不同方向上的压实度融合概率值半变异函数值

显差异,仓面在施工过程中的压实质量得到了较好的控制,空间均匀性较好。

5 结 语

为解决单一指标表征土料压实质量的局限性,本文将频域指标 CV、单位体积压实功 E 及时频域指标 CWT-THD 作为表征土料压实质量的多源信息,提出了一种基于多源信息融合的围坝土料压实质量综合评估方法,利用 D-S 证据理论对多种评价指标进行了信息融合,结合施工实际情况以及 Murphy 规则对基本分配概率值求解与冲突证据融合进行了优化,从而实现了土料压实质量的快速、准确评定。实例验证结果表明,本文方法评定的压实质量结果与试坑检测结果一致,相较于单一指标评定结果的准确率更高,同时可用于分析压实质量的空间均匀性,为土料碾压质量控制提供了新的途径。

参考文献:

- [1] 崔博,闫辰博,王佳俊. 基于 FOA-RF 算法的心墙砾石土压实质量预测模型[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(3): 42-48. (Cui Bo, Yan Chenbo, Wang Jiajun. Research on compaction quality prediction model of core wall gravel soil based on FOA-RF algorithm[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(3): 42-48. (in Chinese))
- [2] 田正宏,苏伟豪,郑祥,等. 基于 GA-BP 神经网络的碾压混凝土压实度实时评价方法[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(3): 81-86. (Tian Zhenghong, Su Weihao, Zheng Xiang, et al. Real-time evaluation method of compaction degree for roller-compacted concrete based on GA-BP neural network[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(3): 81-86. (in Chinese))
- [3] Wang Xuefei, Li Xiangdong, Li Jiale, et al. Training strategy and intelligent model for in-situ rapid

- measurement of subgrade compactness[J]. Automation in Construction,2024,165:105581.
- [4] Li Jianhua, Wang Xuefei, Li Jiale, et al. A generative adversarial learning strategy for spatial inspection of compaction quality [J]. Advanced Engineering Informatics,2024,62:102791.
- [5] Ling Jianming, Lin Sheng, Qian Jinsong, et al. Continuous compaction control technology for granite residual subgrade compaction [J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2018,30(12):04018316.
- [6] Mooney M A, Gorman P B, Gonzalez J N. Vibration-based health monitoring of earth structures[J]. Structural Health Monitoring,2005,4(2):137-152.
- [7] Rahman F, Hossain M, Hunt M M, et al. Soil stiffness evaluation for compaction control of cohesionless embankments[J]. Geotechnical Testing Journal,2008,31(5):442-451.
- [8] 刘东海,李子龙,王爱国. 基于碾压机做功的堆石坝压实质量实时监测与快速评估[J]. 水利学报,2014,45(10):1223-1230. (Liu Donghai, Li Zilong, Wang Aiguo. Roller working-based real-time monitoring and rapid assessment of rock-fill dam compaction quality [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2014,45(10):1223-1230. (in Chinese))
- [9] Liu Donghai, Lin Min, Li Shuai. Real-time quality monitoring and control of highway compaction [J]. Automation in Construction,2016,62:114-123.
- [10] Xu Qinwu, Chang G K. Adaptive quality control and acceptance of pavement material density for intelligent road construction[J]. Automation in Construction,2016,62:78-88.
- [11] Yang Xian, Wu Chuping, Qiao Lan, et al. Compaction quality assessment of highway using roller-integrated positive maximum kinetic energy increment detection technique[J]. Case Studies in Construction Materials,2024,21:e03411.
- [12] Wang Xuefei, Lu Wei, Li Jiale, et al. Multi-domain adaptive analysis of intelligent compaction measurement value for subgrade construction [J]. Automation in Construction,2024,163:105413.
- [13] 丘伟兴,赵炼恒,吴波,等. 基于证据推理的隧道坍塌多源信息融合评估[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2024,51(1):190-200. (Qiu Weixing,Zhao Lianheng,Wu Bo,et al. A multi-source information fusion assessment for the tunneling collapse disaster based on evidential reasoning [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2024,51(1):190-200. (in Chinese))
- [14] 刘素艳,乔一鸣,董一林,等. 改进 D-S 证据理论的高冲突多信息融合方法研究[J]. 铁道科学与工程学报,2025,22(7):3328-3338. (Liu Suyan,Qiao Yiming,Dong Yilin,et al. High conflict multi source information fusion method for improving D-S evidence theory [J]. Journal of Railway Science and Engineering,2025,22(7):3328-3338. (in Chinese))
- [15] 林威伟,张君,王晓玲,等. 基于改进证据理论的土石坝碾压质量综合评价方法[J]. 水利学报,2025,56(1):117-129. (Lin Weiwei,Zhang Jun,Wang Xiaoling,et al. A comprehensive evaluation method for rolling quality of earth-rock dam based on improved evidence theory [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2025,56(1):117-129. (in Chinese))
- [16] 李卓,孙屹,姜鑫,等. 低围压与不同温度作用下土石坝护坡土石混合体力学特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(6):90-96. (Li Zhuo,Sun Yi,Jiang Xin,et al. Study on mechanical properties of earth-rock mixture for earth-rock dam slope protection under low confining pressure and different temperatures [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(6):90-96. (in Chinese))
- [17] Ma Yuan, Lu Wei, Luan Yingcheng, et al. Research on global optimization mechanism of intelligent compaction parameters of soil subgrade based on difference method [J]. Journal of Building Engineering,2024,82:108381.
- [18] 屈嘉程,田正宏,孙啸,等. 基于瑞雷波速的碾压混凝土压实效果评价[J]. 水利水电科技进展,2020,40(4):58-64. (Qu Jiacheng, Tian Zhenghong, Sun Xiao, et al. Evaluation of compaction effect of RCC based on Rayleigh wave velocity [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(4):58-64. (in Chinese))
- [19] Wang Xuefei, Wang Tingkai, Zhang Jianmin, et al. Autonomous soil vision scanning system for intelligent subgrade compaction [J]. Automation in Construction,2024,158:105242.
- [20] 孙增寿,李晓鹏,韩培琰,等. 基于小波包样本熵的连续梁桥损伤识别[J]. 振动、测试与诊断,2018,38(5):916-921. (Sun Zengshou,Li Xiaopeng,Han Peiyan,et al. Damage Identification for continuous girder bridge based on wavelet packet sample entropy [J]. Journal of Vibration,Measurement & Diagnosis,2018,38(5):916-921. (in Chinese))
- [21] 李德春,练继建,苏芳,等. D-S 证据理论的改进算法及其在导墙结构损伤定位中的应用验证[J]. 水利水电科技进展,2015,35(1):78-84. (Li Dechun,Lian Jijian,Su Fang,et al. An improved method based on D-S evidence theory and its verification in damage location for guide wall structure [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2015,35(1):78-84. (in Chinese))

(下转第 92 页)

平板闸门闭门卡阻原因分析及解决对策

盛传明^{1,2,3}, 练继建², 刘 昉², 李 蕾³

(1. 河北工程大学水利水电学院; 2. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室;
3. 天津大学前沿技术研究院有限公司)

摘要:为研究平板闸门闭门卡阻的原因,采用物理模型试验和 CFD 数值模拟相结合的方法,分析了自由出流下平板闸门动水闭门的水动力性能。研究表明,在上游压力水头的作用下,上游水封的平板闸门水推力较大,水重力对闭门作用不显著,此时闸门主要依靠自身重力闭门;闸门运行一段时间后,摩擦系数过大是闸门闭门卡阻的重要原因;自由出流下,平板闸门的许用摩擦系数主要与闸门自重、上下游水头差和水推力作用面积有关;减小支承材料摩擦系数、增加配重、减小上下游水头差、减小水推力作用面积和适当关闭弧形闸门有利于平板闸门关闭。
关键词:平板闸门;闭门卡阻;自由出流;摩擦系数;支承材料

Analysis of causes and countermeasures for plane gate jamming in closing process//Sheng Chuanming^{1,2,3}, Lian Jijian², Liu Fang², Li Lei³ (1. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering; 2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University; 3. The Frontier Technology Research Institute Limited Company of Tianjin University)

Abstract: To investigate the causes of plane gate jamming in the closing process, a combined approach of physical model experiments and CFD numerical simulations was employed to examine the hydrodynamic characteristics of plane gates during dynamic closure under free-flow conditions. The results show that under the upstream pressure head, plane gates equipped with upstream seals experience significant hydrodynamic thrust forces with minimal contribution from water-induced gravitational forces, rendering gate closure primarily dependent on self-weight. After a period of gate operation, excessive friction coefficient is identified as a significant cause of closing jamming. Under free-flow conditions, the permissible friction coefficient of the plane gate is mainly governed by the gate self-weight, the upstream-downstream head difference, and the effective area subjected to water thrust. Five countermeasures were proposed to facilitate the successful closure of the plane gate: reducing the friction coefficient of supporting materials, increasing counterweights, decreasing the upstream-downstream head difference, reducing the water thrust action area, and appropriately closing the radial gate.
Key words: plane gate; closing jamming; free flow; friction coefficient; supporting material

闸门是水利工程中用于控制水流的关键设施,广泛应用于水库、河道、渠道、船闸等工程中。近年来,国内外陆续报道了多起平板闸门闭门卡阻事故,如万安^[1]、小浪底^[2]、密云^[3]、上利^[4]、泗阳^[5]及美国的 Wanapum^[6]和委内瑞拉的 Guri^[7]等水利工程。闸门在关闭过程中受到多种作用力的影响。在竖直方向上,主要作用力包括闸门自重、水柱压力和水流经过闸门时产生的下吸力或上托力;在水平方向上,则主要受水推力的作用,该力会引发摩擦阻力,阻碍闸门关闭。模型试验是研究平板闸门流场和受力特性的常用手段。例如:Naudascher 等^[8-9]研

究发现闸门体型和闸门开度对闸门闭门力具有显著影响,这些变量在闸门启闭过程中起到了关键的作用;Markovic-Brankovic 等^[10-16]通过模型试验方法,研究了平板闸门闭门过程中的受力特征,发现闸门体型、闭门方式和水流流态等均会影响闭门力,若闸门体型设计不良,会引起闭门力不足,最终阻碍闸门顺利关闭。当前研究主要聚焦于如何增大闭门力,未建立闸门受力与闭门卡阻的关系,也未提出促使闸门完全关闭的方法。除物理模型试验外,计算流体力学(CFD)技术被日益广泛地用于闸门水动力性能的研究。数值模

拟可克服模型与原型之间的比尺效应,也可在任意狭小区域提取数据,从而为物理模型试验提供补充。例如:Amorim 等^[17-23]使用 CFD 方法,研究了平板闸门闭门过程中的压力分布;高训宇等^[3,24-28]使用 CFD 方法,研究了不同工况下闸门受到的闭门力,研究表明,闸门受力与闸门开度、闸门体型和水流条件密切相关,通过控制相关变量可增大闭门力。当前数值模拟以流场展示为主,没有将流场压力分布与闸门受力相关联,也没有从受力角度解释闸门闭门卡阻现象。

本文以某泄洪洞内平板闸门为研究对象,使用模型试验与 CFD 数值模拟相结合的方法,重点分析了自由出流下平板闸门闭门卡阻的原因,并提出了相应的解决对策,以期为解决此类工程问题提供思路,并为高水头平板闸门的优化设计提供参考。

1 工程概况

某水利枢纽工程位于黄河干流,泄洪洞采用有压洞接无压洞布置型式,洞内布置一扇平板闸门和一扇弧形闸门,分别作为事故闸门和工作闸门使用。平板闸门孔口宽 6 m、高 12 m,设计水头 100 m,弧形闸门孔口宽 7.0 m、高 6.5 m,底板高程均为 3 175 m。平板闸门底缘采用后倾角型式,定轮支承,动水闭门。平板闸门自重 112.5 t,当上下游水头差为 50 m 时,平板闸门下落到距离底板 10.4 m 处卡住,当上游水头降至 25 m 时,平板闸门下落到距离底板 4.8 m 处卡住。水质较清澈,几乎无泥沙,门槽底槛处无异物阻挡,当平板闸门开度较小时,无明显振动发生,可排除泥沙、异物和流激振动影响。

2 研究方法

2.1 初步受力分析

平板闸门下落时,在上游水头的作用下,闸门受力情况如图 1 所示。图中, F_n 、 F_p 、 G_g 、 F_b 分别为水推力、绳索拉力、闸门自重和水重力,其中水重力包括水柱压力、下吸力或上托力, $P_{前}$ 、 $P_{后}$ 、 $P_{上}$ 和 $P_{下}$ 分别为面板上游压力、面板下游压力、梁板上表面压力和梁板下表面压力。

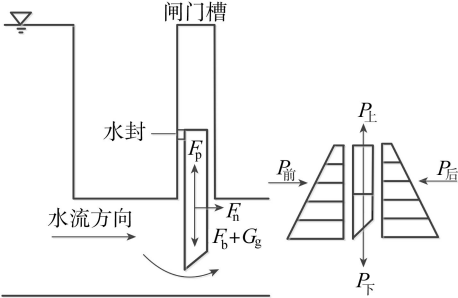


图 1 平板闸门受力示意图

和梁板下表面压力。

闸门闭门过程中受力满足:

$$G_g + F_b - F_p - \mu F_n = 0 \tag{1}$$

式中: μ 为摩擦系数。 μF_n 代表摩擦力,来源于水封及支承材料的预紧力。

水推力和水重力分别满足^[24]:

$$F_n = \int (P_{前} - P_{后}) dA_1 \tag{2}$$

$$F_b = \int (P_{上} - P_{下}) dA_2 \tag{3}$$

式中: A_1 为水推力作用面积; A_2 为水重力作用面积。

闸门自重可由闸门质量计算,水推力和水重力可通过压力传感器测量得到,水推力作用面积和水重力作用面积可通过闸门体型和水封位置得到,当闸门卡阻时,绳索拉力为 0,此时摩擦系数可通过式(1)计算。

本文重点研究闸门自由出流情况,此时 $P_{后}=0$ 。

2.2 模型试验

按照重力相似准则,建立 1 : 25 试验模型,主要包括水库、引水口、有压洞身、平板闸门、闸门槽、弧形闸门、尾水渠和尾水堰等。模型主体、平板闸门和弧形闸门均使用有机玻璃制作,尾水渠使用灰塑料板制作^[29],平板闸门使用铅块进行配重,整体试验模型如图 2 所示。

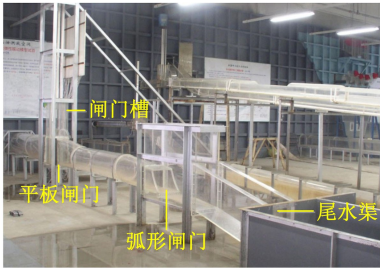


图 2 整体试验模型

试验中,上游水位使用水位测针测量,流量使用矩形堰测量,平板闸门开度使用电机驱动卷扬机控制,弧形闸门开度通过手动控制。闸门结构及传感器布置如图 3 所示。面板压力使用 3 对压力传感器(1 号、2 号和 3 号)测量,分别布置在上游面板的不同高度,梁板压力使用 1 对压力传感器(4 号)测量,布置在底主横梁的上下表面。使用中国水利科学研究所的 DJ800 压力测量分析系统进行数据采集及处理,采样频率为 100 Hz,采样时间为 60 s,传感器误差为 0.01 m。

2.3 数值模拟

参考物理模型及设计资料,建立 1 : 1 三维数值模型,数值模型主要包括水库、引水口、闸门井、平板闸门、弧形闸门和有压洞身等,如图 4 所示。

应用 GAMBIT 软件,使用域动网格更新技术和

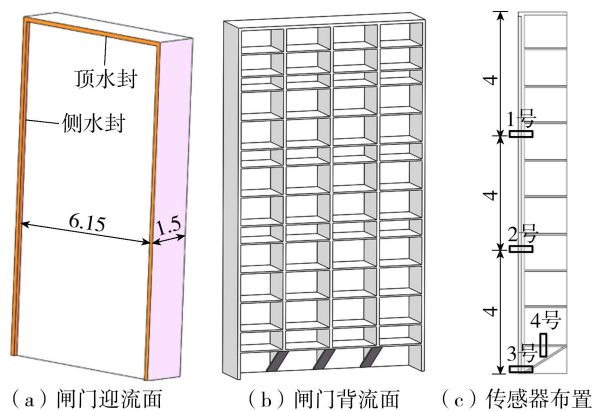


图3 闸门结构及传感器布置(单位:m)

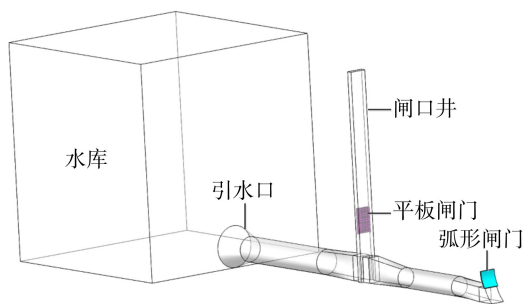


图4 三维数值模型

动态分层方法对数值模型进行网格划分。将门槽内部区域设置为运动区域,将门槽外部区域设置为静态区域,运动区域与静态区域的分界面为变形边界,闸门上下界面为刚性运动边界,通过调整分层和缩减系数,在闸门运动边界附近动态增加或减少网格层数,可有效避免动网格变形产生负体积,提高计算精度。平板闸门网格采用三角形网格,流体域网格采用四面体网格,使用标准壁面函数,对闸门处网格进行加密,闸门网格起始步长为 0.1 m ,增长率为 1.12 。开展网格无关性分析,分别生成3种流体域体网格,网格尺寸分别为 0.35 、 0.5 、 1 m ,对应网格总数分别为 $3\ 868\ 704$ 、 $1\ 960\ 021$ 、 $1\ 103\ 815$,如图5所示。

提取闸门前后面板水头差作为评判指标,并与模型试验结果进行对比, 0.35 、 0.5 、 1 m 网格计算误差分别为 0.1% 、 1.7% 、 8.2% , 0.35 m 网格和 0.5 m 网格计算误差接近。考虑计算精度和计算效率,后

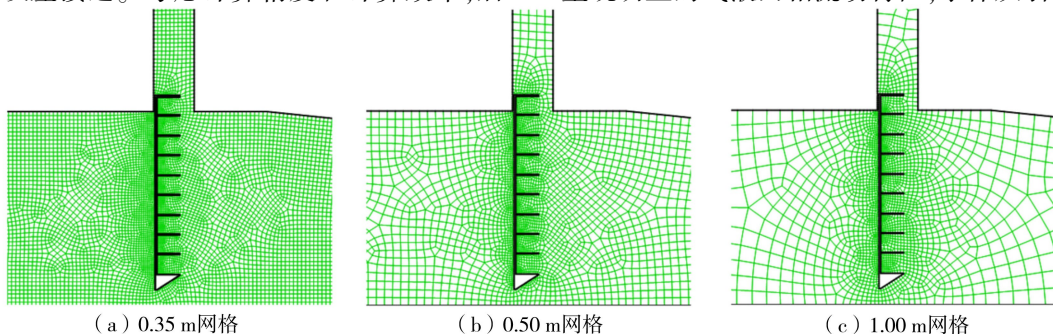


图5 模型网格划分

续使用 0.5 m 网格模型进行数值模拟分析。网格质量指标包括:最大单元挤压值为 0.727 ,最大单元偏斜度为 0.785 ,最大纵横比为 162 。

使用FLUENT软件对离散模型进行水动力性能分析^[30],使用VOF二相流模型计算空气和水的体积分率,空气为主相,水为次相,入口采用压力入口,出口采用压力出口,闸门井上表面采用空气入口,闸门设置为移动边壁,通过自定义函数(UDF)实现闸门关闭,闭门速度与原型闸门一致,其余边界均为固壁。控制方程包括雷诺平均纳维-斯托克斯方程,湍流模型使用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型^[31],使用分离式SIMPLE(压力耦合方程半隐式方法)进行压力-速度耦合计算,时间步长为 0.01 s ,确保计算结果具有良好的收敛性。

2.4 模型验证

不同闸门开度(e)下,4个压力传感器测点的压强对比如图6(a)~(c)所示;3号测点在不同闸门开度下的压强分布如图6(d)所示;当闸门开度为 1 m 时,3号测点在不同上下游水头差(H)和弧形闸门开度(A)下的压强对比如图6(e)~(f)所示。

使用平均绝对相对误差(MARE)^[32]对计算结果进行分析。由图6可知,当闸门开度为 4 、 1 、 0.2 m 时,测点压强的MARE值分别为 2.1% 、 7.2% 、 2.6% ;对于3号测点,不同平板闸门开度、不同上下游水头差和不同弧形闸门开度下,压强的MARE值分别为 3.3% 、 6.2% 和 3.6% 。误差值均小于 8% ,误差可能来源于试验过程和网格质量。数值模拟计算值与模型试验测量值结果接近,表明CFD方法能够较精确地捕捉并反映实际工程的水动力特性。

3 结果与分析

3.1 水动力性能

闸门闭门过程中,不同闸门开度下的流场流速分布和压力分布如图7和图8所示。

由图7可知,闸门在自由出流闭门过程中,流场呈现明显的气液两相流动特征,水体从引水口进入,

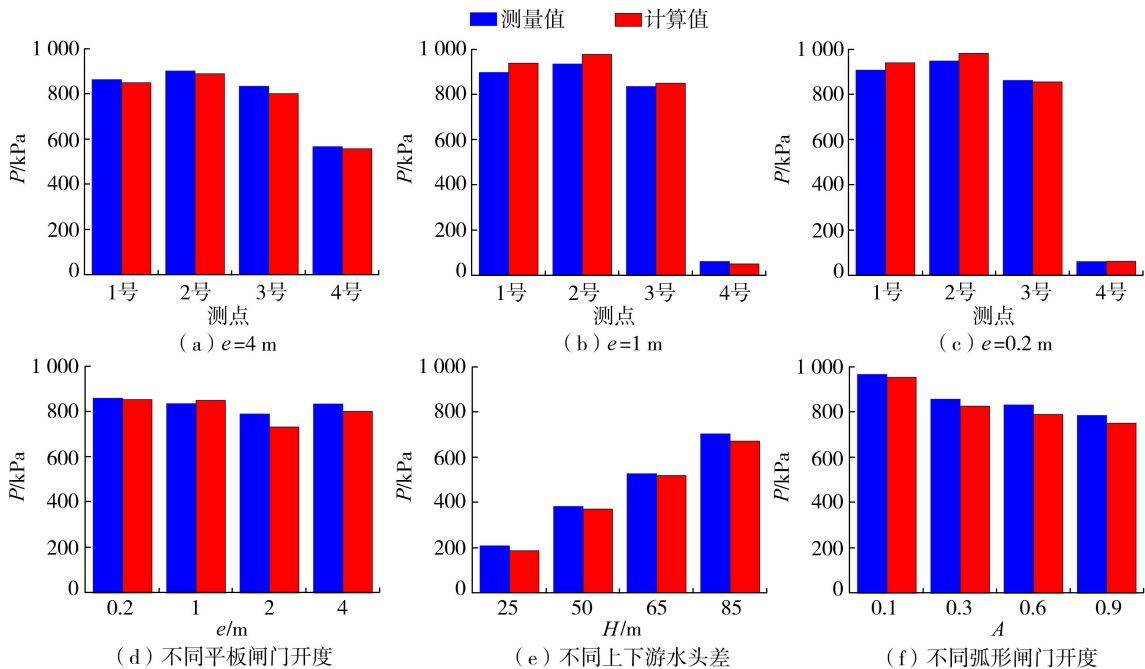


图6 不同情况下压强测量值与计算值对比

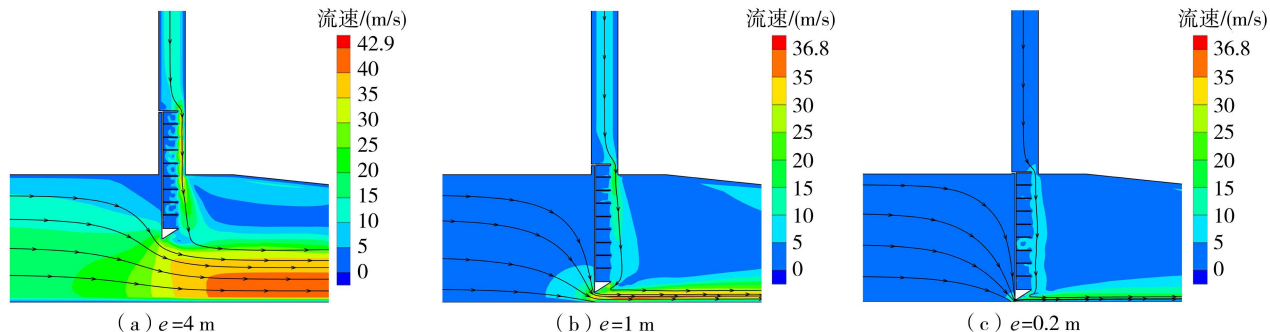


图7 不同闸门开度下的流速分布

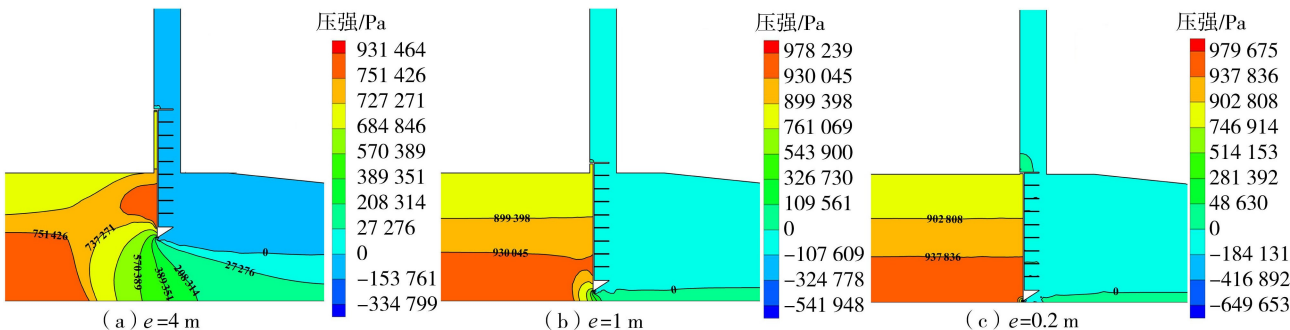


图8 不同闸门开度下的流场压力分布

空气从闸门井进入,小开度时水流如同射流,流场中几乎未见明显涡流。数值方面,随着闸门开度减小,水流速度并未相应降低。

由图8可知,高压区主要集中在闸门上游,下游压力近乎为零,在闸门底部过流边缘处可见显著的压力梯度,表明闸门只受上游单向水头作用。梁板上下表面压力相近,几乎不受水重力影响。闸门闭门过程中,闸门上游压力持续增大,下游压力仍然为零,表明闸门受到的水推力逐渐增大,而水重力变化较小。

3.2 闭门卡阻

不同开度下闸门受到的水重力和水推力如图9所示。由图9可知,随着闸门开度减小,闸门受到的水推力显著增大,而水重力变化较小,数值比水推力小两个量级,说明当水封位于闸门上游时,水重力对闸门动水闭门的贡献较小。

闸门闭门卡阻时,绳索拉力为0,此时式(1)可写为:

$$\mu_p = (G_g + F_b - F_p)/F_n \approx G_g/F_n = G_g/\rho gh_n A_1 \quad (4)$$

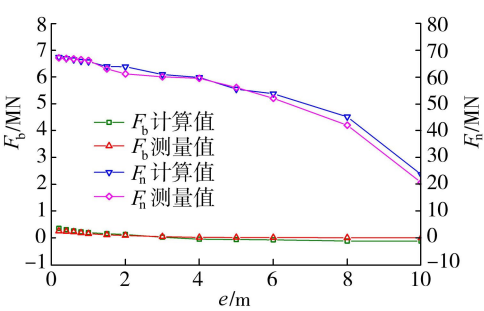


图9 不同开度下闸门受到的水重力和水推力

式中： μ_p 为许用摩擦系数； ρ 为密度； g 为重力加速度； h_n 为闸门前后水头差。

由式(4)可知，自由出流下，当水封位于闸门上游时，闸门自重、面板挡水面积均为定值，作用于闸门的水压力最大值为设计水头 100 m，因此闸门存在最小摩擦系数，即闸门可完全关闭时的许用摩擦系数。水推力作用面积 $A_1 = 73.8 \text{ m}^2$ ，计算可知许用摩擦系数为 0.047，即当闸门摩擦系数小于 0.047 时，闸门可实现完全关闭。

提取闸门卡阻时的自重、水重力和水推力等参数，反推当前摩擦系数，如表 1 所示。

表 1 闸门实际摩擦系数计算结果

工况	e/m	G_g/kN	F_b/kN	总竖向力/ kN	F_n/kN	μ
1	4.8	1 102	17.3	1 119.3	10 271	0.109
2	10.4	1 102	-57.6	1 044.4	10 203	0.101

通过计算得知，当闸门开度为 4.8、10.4 m 时，实际摩擦系数均约为 0.1，远大于许用摩擦系数 0.047。实际工程中，闸门经过一段时间应用，滑轮、滑块和导轨都会出现不同程度的磨损锈蚀，导致摩擦系数较设计值明显增大，如班多水电站的闸门设计摩擦系数为 0.06，实测值为 0.196^[2]；密云水库的闸门设计摩擦系数为 0.11，实测值为 0.27^[5]；泗阳节制闸的闸门设计摩擦系数为 0.15，实测值为 0.3^[7]；万安水电站的闸门设计摩擦系数为 0.11，实测值为 0.2^[33]；柘林水电站的闸门设计摩擦系数为 0.11，实测值为 0.28^[34]；小江水库的闸门设计摩擦系数为 0.12，实测值为 0.3^[35]；黄壁庄水库的闸门

设计摩擦系数为 0.1，实测值为 0.264^[36]。当摩擦力过大，闸门自重和水重无法克服摩擦力时，闸门出现卡阻现象，最终导致闭门失效。因此，摩擦系数过大是平板闸门闭门卡阻的重要原因。

4 解决对策

4.1 支承材料

闸门支承材料随着使用时间的延长日趋老化，材料的硬度、弹性模量、抗压强度、润滑效果都发生变化，摩擦系数逐渐增大，承载能力相应降低，从源头上降低摩擦系数是解决闸门闭门卡阻的有效方法。

针对支承材料的老化特性，在使用一定时间后要及时更换，在施工安装和运行期间应尽量减少阳光直射，加强材料表面的清洁和保养，尽量减缓老化速度。同时，应提升滑道的加工与安装工艺，提高滑道的光洁度，并消除错牙、扭曲等缺陷，从而避免安装缺陷引发的刨削、犁沟等异常磨损，并降低运行摩擦力。应急启闭时，可在滑道表面涂抹一定比例的润滑材料，如二硫化钼和酚醛清漆汽油混合液，降低支承材料的摩擦系数^[37-38]。另外，开发抗磨、减摩和抗震特性的新型支承材料，代替传统的胶木、铸铁等材料，是延长其服务周期、减少维护频次的重要方向，也是闸门优化设计的趋势。

4.2 闸门自重

通过式(4)可知，当摩擦系数为 0.109 时，若想实现闸门完全关闭，闸门自重需为 847 t。虽然足量配重可使闸门完全关闭，但过大的重量会对闸门自身结构安全造成影响，另外，当摩擦系数增大时，需额外增加配重。因此，当闸门摩擦系数较小时，可考虑适当增加配重来关闭闸门；当闸门摩擦系数较大时，增加配重在现实中难以实现。

4.3 上下游水头差

当闸门开度为 1 m 时，不同上下游水头差下流场压力分布和闸门受力如图 10 和图 11 所示。由图 10 可知，改变上下游水头差时，闸门下游压力为

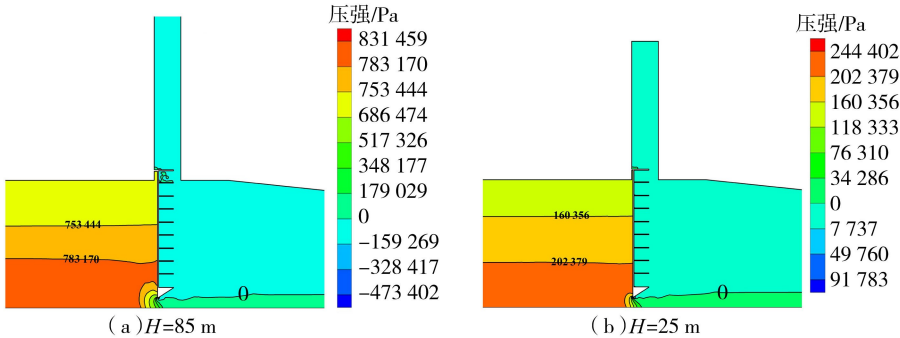


图 10 不同上下游水头差下的流场压力分布

零,上游压力呈现明显变化。由图 11 可知,随着水头差降低,作用在面板上游的压力减小,此时摩擦力降低,而水重力与闸门自重的合力变化较小。因此,当闸门发生卡阻事故时,通过泄洪来降低上下游水头差,或者在下游出口设置尾水结构,将尾水壅高,减小作用在闸门上的摩擦力,可促进闸门关闭。

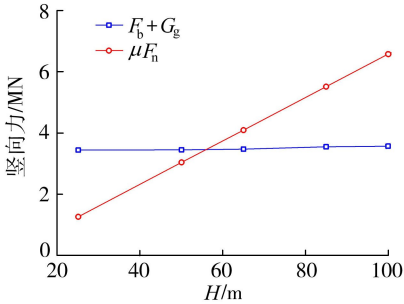


图 11 不同上下游水头差下的闸门受力

4.4 分段闸门

将整体闸门设计成分段形式,两段闸门分别下落,当下半段落地后,上半段开始下落。分段长度 $l=6\text{ m}$ 时的闸门流场如图 12 所示,不同分段长度下闸门受力如图 13 所示。由图 12 可知,下半段闸门下落时,水流从闸门上下两侧流向下游,压力在上下两侧过流处均呈梯度变化,闸门下游面压力基本为零。上半段闸门下落时,流场压力分布与整体闸门下落时几乎相同,在闸门下侧过流处呈现梯度变化。由图 13 可知,随着闸门长度减小,水重力与闸门自重的合力变化较小,而摩擦力显著减小,因为分段闸门减小了水推力作用面积。因此,将整体闸门设计成分段形式分别下落,可有效减小摩擦力,在较大的

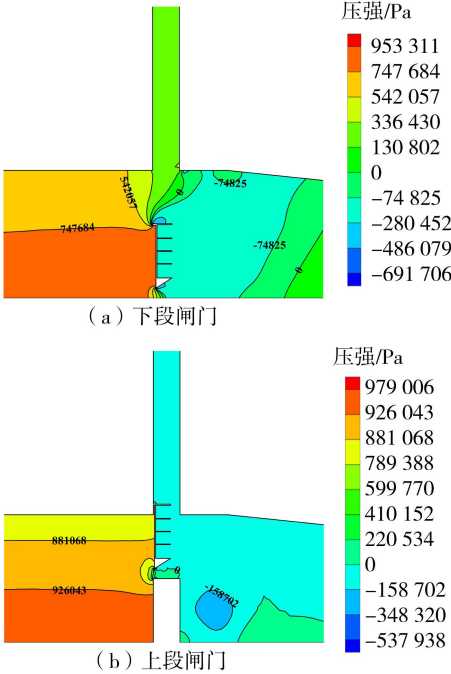


图 12 分段闸门压力分布

摩擦系数下仍可实现闸门关闭。

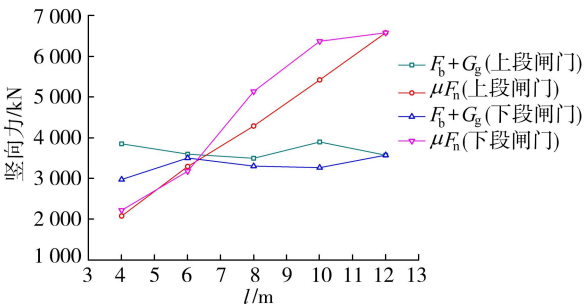


图 13 不同分段长度下的闸门受力

4.5 弧形闸门开度

当闸门开度为 1 m 时,改变弧形闸门开度,流场压力分布和闸门受力如图 14 和图 15 所示。

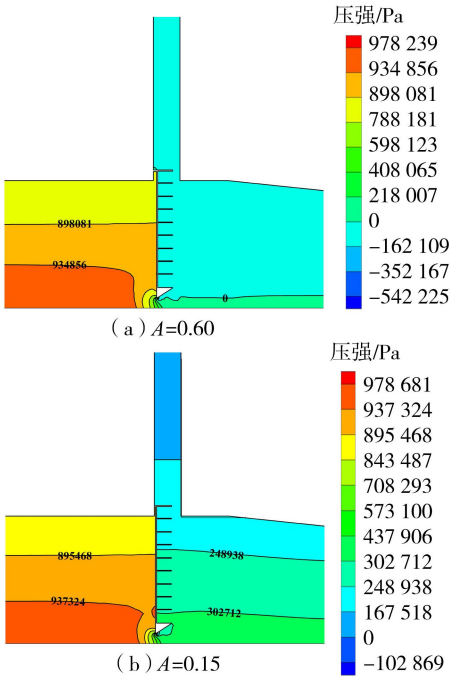


图 14 不同弧形闸门开度下的流场压力分布

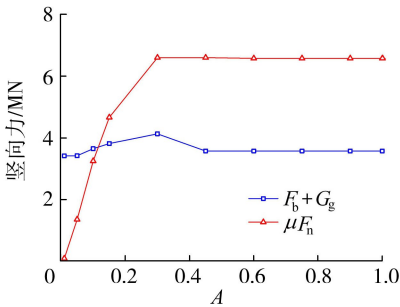


图 15 不同弧形闸门开度下的闸门受力

由图 14 可知,不同弧形闸门开度下,闸门上游压力基本一致,下游压力变化明显,小开度时下游压力升高,主要因为弧形闸门影响过闸流量及作用在平板闸门上的压力水头。由图 15 可知,随着弧形闸门开度减小,闸门水重力与自重的合力基本不变,而摩擦力初期保持稳定,后期逐渐减小,当弧形闸门开度小于 0.15 时,水重力与自重的合力大于摩擦力,

平板闸门可继续关闭。因此,当突遇紧急情况需要切断流道,而平板闸门无法迅速关闭时,可适当减小弧形工作闸门开度来促使平板闸门关闭,这在紧急事故时可作为一种备用选项。

5 结 论

a. 自由出流下,平板闸门上游压力呈静压分布,下游压力为零,此时平板闸门受单向水推力作用,当水封位于闸门上游时,梁板几乎不受水重力。

b. 对于运行在自由出流下上游水封的平板闸门,许用摩擦系数与闸门自重、水推力作用面积和上下游水头差有关。闸门运行一段时间后,滑块、滑轮和滑轨等会出现不同程度的老化生锈,引起摩擦系数增大,当实际摩擦系数大于许用摩擦系数时,平板闸门出现卡阻现象,摩擦系数过大是平板闸门闭门卡阻的重要原因。

c. 更换老旧的支承材料,做好润滑保养工作,开发高性能支承材料来代替传统材料,降低支承材料的摩擦系数,有利于平板闸门关闭。当摩擦系数较小时,适当增加配重有利于平板闸门关闭,当摩擦系数过大时,增加配重难以实现闸门关闭。减小上下游水头差可减小作用于闸门的水推力,有利于闸门关闭。闸门分段下落可减小水推力作用面积,水重力基本不变,摩擦力明显减小,有利于闸门关闭。适当关闭弧形闸门可减小作用于平板闸门的水推力,水重力基本不变,摩擦力明显减小,有利于平板闸门关闭。

参考文献:

[1] 董志伟. 水电站进水口闸门未正常闭门分析及处理 [J]. 水电与新能源,2024,38(5):40-44. (Dong Zhiwei. Analysis and treatment of an abnormal closing fault of a water intake gate in a hydropower station[J]. Hydropower and New Energy,2024,38(5):40-44. (in Chinese))

[2] 王志刚,洪羽. 小浪底水库低水位、高含沙水流对闸门运用的影响[J]. 河南科技,2021,40(7):57-59. (Wang Zhigang,Hong Yu. A brief analysis of the influence of low water level and high sediment flow on gate operation in Xiaolangdi Reservoir[J]. Journal of Henan Science and Technology,2021,40(7):57-59. (in Chinese))

[3] 高训宇. 潮河人防隧洞进口事故门胶木滑道的运行隐患及处理措施[J]. 北京水务,2018(5):49-52. (Gao Xunyu. Safety hidden danger and treatment plan of bakelite chute of entrance emergency gate to civil defense tunnel of Chao River in Miyun Reservoir [J]. Beijing Water,2018(5):49-52. (in Chinese))

[4] Qi Huijun, Li Tongchun, Liu Xiaoqing, et al. Study on failure of an ecological tunnel gate caused by jet-flow from air vents [J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 79:

1043-1057.

[5] 刘须朋,王卫,刘厚爱,等. 泗阳节制闸闸门启闭卡阻原因分析 [J]. 山西水利科技,2013(4):21-23. (Liu Xuping,Wang Wei,Liu Houai,et al. Analyzing the causes of blocking the lifting and lowering of gate of Siyang regulation sluice[J]. Shanxi Hydrotechnics,2013(4):21-23. (in Chinese))

[6] Sheng Chuanming, Liu Fang, Ma Chao, et al. Application of CFD to predict the sluice gate jammed [J]. Journal of Hydraulic Research,2023,61(5):686-702.

[7] 陈林. 高水头平面闸门闭门失效与结构破坏机理研究 [D]. 天津:天津大学,2020.

[8] Naudascher E, Kobus H E, Rao R P R. Hydrodynamic analysis for high-head leaf gates [J]. Journal of the Hydraulics Division,1964,90(3):155-192.

[9] Naudascher E, Rao P V, Richter A, et al. Prediction and control of downpull on tunnel gates [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1986,112(5):392-416.

[10] Markovic-Brankovic J, Drohier H. New high head leaf gate form with smooth upstream face [J]. TEM Journal,2013,2(1):3-12.

[11] 杨敏,牛利敏,陈林,等. 长输水隧洞中段有压平面闸门启闭力及稳定性试验 [J]. 水利水电科技进展,2016,36(3):41-46. (Yang Min, Niu Limin, Chen Lin, et al. Experimental study on hoisting force and stability of pressured plane gate located in Middle of long water delivery tunnel [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2016,36(3):41-46. (in Chinese))

[12] Ameen S, Taher T, Ahmed T M. Effects of geometrical and flow rates on the prediction of bottom pressure coefficients of tunnel lift gate of dams [J]. Journal of the Institution of Engineers (India) :Series A, 2018, 99(4):741-749.

[13] 刘昉,谷欣玉,李文胜,等. 动水关闭的平面事故闸门门体型优化试验研究 [J]. 农业工程学报,2019,35(12):142-149. (Liu Fang, Gu Xinyu, Li Wensheng, et al. Structural optimization of emergency plate gate for closure in moving water [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(12):142-149. (in Chinese))

[14] 肖志乔,孙嘉华,盛军. 金汇港南闸中孔大宽高比平面直升门的振动特性分析 [J]. 水利水电科技进展,2024,44(5):74-79. (Xiao Zhiqiao, Sun Jiahua, Sheng Jun. Analysis of vibration characteristics of planar vertical-lift gate with large aspect ratio in middle hole of Jinhui Harbor South Gate [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(5):74-79. (in Chinese))

[15] Wang Yanzhao, Xu Guobin, Liu Zhicheng, et al. Experimental study on the slip-stick vibration of plane gate [J]. Water,2024,16(6):912.

[16] 王延召. 平面闸门闭门振动及对持住力影响的研究 [D]. 天津:天津大学,2022.

[17] Amorim J C C, De Andrade J L. Numerical analysis of the

- hydraulic downpull on vertical lift gates [C]// Waterpower' 99: Hydro' s Future: Technology, Markets, and Policy. Las Vegas: American Society of Civil Engineers, 1999: 1-9.
- [18] Kim D G. Numerical analysis of free flow past a sluice gate [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2007, 11 (2) : 127-132.
- [19] Kostecki S W. Numerical analysis of hydrodynamic forces due to flow instability at lift gate [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2011, 11 (4) : 943-961.
- [20] Ma Chao, Sheng Chuanming, Lian Jijian, et al. Failure analysis of a leaf gate jammed in closing process [J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 110: 104391.
- [21] 马江霞. 平面闸门启闭过程中过闸水流水力特性数值模拟研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.
- [22] 邵园园, 薛海朋, 薛铮, 等. 平板闸门闭门过程水流流态数值模拟研究 [J]. 水电与抽水蓄能, 2023, 9 (1) : 14-18. (Shao Yuanyuan, Xue Haipeng, Xue Zheng, et al. Numerical simulation of flow pattern in the process of bulkhead gate closing [J]. Hydropower and Pumped Storage, 2023, 9 (1) : 14-18. (in Chinese))
- [23] 高志伟, 冯慧慧, 谢丽生, 等. 抽水蓄能电站尾水事故闸门-门槽流固耦合动力特性研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2024, 35 (6) : 139-148. (Gao Zhiwei, Feng Huihui, Xie Lisheng, et al. Dynamic characteristics of fluid-structure coupling of emergency gate-gate slot in pumped storage power stations [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2024, 35 (6) : 139-148. (in Chinese))
- [24] Aydin I, Telci I T, Dundar O. Prediction of downpull on closing high head gates [J]. Journal of Hydraulic Research, 2006, 44 (6) : 822-831.
- [25] Uysal M A. Prediction of downpull on high head gates using computational fluid dynamics [D]. Ankara: Middle East Technical University, 2014.
- [26] 刘昉, 赵梦丽, 冷东升, 等. 不同底缘形式的平板闸门水力特性数值模拟 [J]. 水利水电科技进展, 2017, 37 (5) : 46-50. (Liu Fang, Zhao Mengli, Leng Dongsheng, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics of plain gate with different types of bottom edges [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37 (5) : 46-50. (in Chinese))
- [27] Koken M, Aydin I, Sahin A. Application of computational fluid dynamics to predict hydrodynamic downpull on high head gates [J]. Engineering Computations, 2017, 34 (4) : 1191-1203.
- [28] Wang Yanzhao, Xu Guobin, Liu Fang. Holding force and vertical vibration of emergency gate in the closing process: physical and numerical modelling [J]. Applied Sciences, 2021, 11 (18) : 8440.
- [29] 孟万尚, 李琳, 赵帅杰. 梯形闸门出流流动特性研究 [J]. 水利水电科技进展, 2025, 45 (1) : 32-38. (Meng Wanshang, Li Lin, Zhao Shuaijie. Research on flow characteristics of trapezoidal sluice gate discharge [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45 (1) : 32-38. (in Chinese))
- [30] 盛传明, 练继建, 刘昉, 等. 深水水库下泄低温水治理挡水幕布受力研究 [J]. 水利学报, 2016, 47 (12) : 1548-1557. (Sheng Chuanming, Lian Jijian, Liu Fang, et al. Force analysis on water barrier curtain for released flow with low temperature from deep reservoirs [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47 (12) : 1548-1557. (in Chinese))
- [31] 王树杰, 盛传明, 袁鹏, 等. 潮流能水平轴水轮机湍流模型研究初探 [J]. 中国海洋大学学报, 2014, 44 (5) : 95-100. (Wang Shujie, Sheng Chuanming, Yuan Peng, et al. A study on turbulence models of horizontal axis tidal current turbines [J]. Periodical of Ocean University of China, 2014, 44 (5) : 95-100. (in Chinese))
- [32] Ma Chao, Sheng Chuanming, Lian Jijian, et al. Solidification sludge as a scour countermeasure in ocean engineering [J]. Ocean Engineering, 2022, 244: 110423.
- [33] 曾文英, 刘万平. 万安水电厂进水口事故闸门滑块改造 [J]. 西北水电, 2012 (增刊 1) : 224-228. (Zeng Wenying, Liu Wanping. Renovation of slide blocks of emergency gate at power intake, Wan' an Hydropower Plant [J]. Northwest Hydropower, 2012 (S1) : 224-228. (in Chinese))
- [34] 李贵谋, 谢宝楠. TS-70A 滑道在柘林水电厂泄洪放空洞工作闸门的运用与原型观测 [J]. 华中电力, 1998 (2) : 2-5. (Li Guimou, Xie Baonan. Application and prototype observation of TS-70A slide tracks in service gates of spillway tunnels at Zhelin Hydropower Station [J]. Central China Electric Power, 1998 (2) : 2-5. (in Chinese))
- [35] 向定汉, 李新福, 李贵谋. 钢闸门支承滑道研究进展 [J]. 广西水利水电, 1997 (1) : 23-26. (Xiang Dinghan, Li Xinfu, Li Guimou. Study progress of steel sluice gate bearing slidingway [J]. Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering, 1997 (1) : 23-26. (in Chinese))
- [36] 张黎明. 几种水工闸门启门力摩擦系数原型观测成果分析 [J]. 水力发电, 1987 (8) : 35-40. (Zhang Liming. Analysis of prototype observation results on friction coefficients for opening force of hydraulic gates [J]. Water Power, 1987 (8) : 35-40. (in Chinese))
- [37] 顾蕴诚. 摩擦特性和闸门的安全运用 [J]. 水利建设与管理, 2001, 21 (6) : 44-46. (Gu Yuncheng. Friction characteristics and safe operation of gates [J]. Water Conservancy Construction and Management, 2001, 21 (6) : 44-46. (in Chinese))
- [38] 王延召, 徐国宾. 平面闸门爬行振动物理模型试验研究 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2024, 52 (5) : 37-44. (Wang Yanzhao, Xu Guobin. Experimental study on physical model of slip-stick vibration of plane gate [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (5) : 37-44. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-04-05 编辑: 俞云利)

大型混流式水轮机高负荷工况能量特性数值模拟

乔 鹏¹,刘昆庭²,李 秘¹,于韵宽²,陈典龙¹,朱文兵¹,阚 阚²

(1. 三峡金沙江云川水电开发有限公司宁南白鹤滩电厂; 2. 河海大学电气与动力工程学院)

摘要:为揭示大型混流式水轮机高负荷工况下效率下降的原因,对旋涡诱导能量损失的机理进行了数值模拟研究;采用平均动能理论量化各过流部件内的水力损失,并基于刚性涡量理论识别转轮和尾水管内复杂涡结构。模拟结果表明:当超过额定流量后,转轮和尾水管是产生水力损失的主要区域,其水力损失最大占比分别达到 30%和 75%;转轮叶片进水边流动分离诱导的脱流涡与叶根马蹄涡合并,引发强剪切流动,导致进水边附近能量损失显著增加;尾水管柱状涡带涡核附近的低速流动与涡带外围高速主流之间的速度梯度显著增强了湍动能耗散;转轮内脱流涡与尾水管柱状涡带是高负荷工况下的主要损失源,其强度随流量增大而增强,是机组效率下降的主要原因。

关键词:大型混流式水轮机;刚性涡;平均动能;能量损失;数值模拟

Numerical simulation of energy characteristics of a large Francis turbine under high-load conditions//Qiao Peng¹, Liu Kuntong², Li Mi¹, Yu Yunkuan², Chen Dianlong¹, Zhu Wenbing¹, Kan Kan² (1. Ningnan Baihetan Hydropower Station, Three Gorges Jinshajiang Yunchuan Hydropower Development Co., Ltd.; 2. School of Electrical and Power Engineering, Hohai University)

Abstract: To reveal the causes of efficiency degradation in a large Francis turbine under high-load conditions, a numerical simulation investigation was conducted on the mechanism of vortex-induced energy losses. The mean kinetic energy theory was employed to quantify hydraulic losses in each flow passage component, while the rigid vorticity theory was adopted to identify complex vortex structures in the runner and draft tube. The results show that once the discharge exceeds the rated value, the runner and draft tube become the dominant sources of hydraulic loss, accounting for up to 30% and 75% of the total hydraulic loss, respectively. The flow separation-induced vortex at the leading edge of the runner blade merges with the horseshoe vortex at the blade root, producing intense shear flow and significantly increasing energy loss near the leading edge. The velocity gradient between the low-velocity flow near the vortex core of the cylindrical vortex rope in the draft tube and the high-velocity main flow in the outer region significantly enhances turbulent kinetic energy dissipation. The separation vortex in the runner and the cylindrical vortex rope in the draft tube are the primary loss sources under high-load conditions. Their intensities increase with discharge, leading to a substantial reduction in turbine efficiency.

Key words: large Francis turbine; rigid vortex; mean kinetic energy; energy loss; numerical simulation

水电作为技术成熟、调节灵活的可再生能源,在高可再生能源占比的电力系统中承担着重要的调节作用^[1]。混流式水轮机因其宽水头适应性与高效能量转换的特点,成为大中型水电站的核心装备。在水电站运行中,电网负荷波动与调度需求迫使水轮机在偏离最高效率工况下运行,在这些工况下水轮机流道内不稳定的流动特征显著增强^[2],带来了额外的水力损失,导致效率下降,严重制约电站经济性。

国内外很多研究聚焦于低负荷工况下运行时水轮机内部的不稳定流动特征。易万爽等^[3]对某混

流式水轮机的小流量工况进行了数值模拟分析,发现在小流量工况下转轮叶片间流道存在显著的叶道涡,尾水管直锥段壁面上附着涡带。吴在强等^[4]探索了改善混流式水轮机在低负荷下运行时尾水管内不良流态的方法,发现水轮机在低负荷下运行时尾水管内偏心涡带诱发的压力脉动会导致机组的振动。Presas 等^[5]对中水头混流式水轮机进行了数值模拟研究,发现机组在低负荷工况下定速运行时需要更多的流量才能维持稳定的功率输出。虽然在低负荷工况下混流式水轮机内部的不稳定流动特征较为明显,但在运行工况超过最高效率工况后,继续提

基金项目:三峡金沙江云川水电开发有限公司宁南白鹤滩电厂科研项目(Z532302052)
作者简介:乔鹏(1988—),男,高级工程师,硕士,主要从事水电厂机械维护工作。E-mail:qiao_peng1@ctg.com.cn
通信作者:阚阚(1990—),男,教授,博士,主要从事流体力学及工程研究。E-mail:kankan@hhu.edu.cn

高流量会使得进入水轮机的水流携带更多的能量,反而破坏了水轮机内部的稳定流动。

水轮机在偏离最高效率工况运行时,不稳定流动会加剧水轮机内部能量损失,直接降低了能量的转换效率。王李科等^[6]采用熵产法量化评估了某水泵水轮机在S区内能量损失特性,指出在小流量工况下转轮进口处形成的挡水环是造成无叶区能量损失占比增加的主要原因。Ohiemi等^[7]使用熵产法量化评估了某轴流式水轮机内部的能量损失,得到水轮机内部的大部分能量损失主要发生在导叶尾流区下游、流道壁面附近和叶顶附近的结论。虽然熵产法能够精准定位水轮机内发生能量损失的区域^[8],但由于仅考虑了湍流耗散效应,导致计算结果误差较大^[9]。

水轮机流道内的涡结构是水轮机内部不稳定流动最直观的表现,不仅破坏了水轮机的水力稳定性,还增加了能量损失。朱强等^[10]对某低水头混流式水轮机转轮内叶道涡的数值模拟表明,叶片表面的脱流进入叶间流道诱导了叶道涡的生成。Pang等^[11]研究了导叶开度影响混流式水轮机转轮内涡流演化的机制,发现低负荷工况下转轮内部的涡流现象最明显。然而,上述研究均采用传统的涡识别方法,如 Q 准则、 λ 准则、 Δ 准则等,这些涡识别方法通常会流场中的强剪切流动误判为旋涡,大大降低了涡识别精度^[12]。

本文以某大型混流式水轮机为研究对象,基于刚性涡量理论和平均动能理论对额定202 m水头高负荷工况下水轮机流道内的流动特性和能量特性进行数值模拟分析,以期大型混流式水轮机叶片的设计优化和大型水电站的运行优化提供参考。

1 数值模拟方法

1.1 平均动能理论

根据Wilhelm等^[13]基于RANS方程提出的平均动能理论,通过对平均动能输运方程中的耗散项进行体积分来计算能量损失。在混流式水轮机中,能量损失主要包括平均动能耗散损失和湍动能耗散损失两部分,两者之和表征了混流式水轮机内部的总能量损失。此外,采用刚性涡量理论识别混流式水轮机流道内的旋涡,以提高旋涡的识别精度^[14]。

1.2 模型设置

本文以一台大型混流式水轮机为研究对象。如图1所示,该水轮机三维流道几何模型主要包括蜗壳、固定导叶、活动导叶、转轮和尾水管。水轮机的设计参数如下:转轮叶片数15,固定导叶数23,活动

导叶数24,额定转速111 r/min,额定水头202 m,额定流量544.2 m³/s,额定出力1 015 MW。

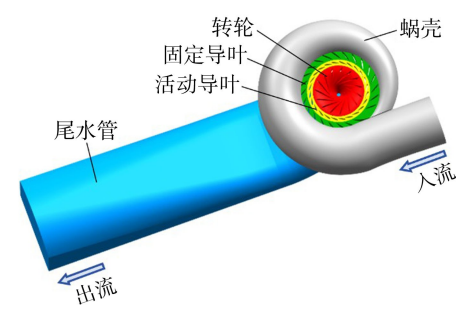


图1 水轮机三维全流道几何模型

使用ANSYS CFX软件进行稳态数值模拟,采用SST $k-\omega$ 湍流模型捕捉流场内的湍流特征^[15]。蜗壳进口和尾水管出口边界条件分别设置为压力进、出口。计算域采用多重参考坐标系实现分区设置:将转轮域定义为旋转坐标系,其他计算域定义为静止坐标系。动静交界面间采用冻结转子法传递数据,壁面采用无滑移边界条件。采用SIMPLEC算法实现速度压力的耦合求解,收敛精度设置为 10^{-5} 。

1.3 网格方案

使用ICEM CFD软件对几何模型进行结构化网格划分,网格划分结果如图2所示。在设计工况下,分别采用3套网格方案开展数值模拟计算,基于理查森外推法^[16]计算网格收敛指数,以评估数值模拟误差,验证结果如表1所示。选取数值模拟得到的水轮机效率作为评价参数,对不同网格方案的收敛特性进行分析,结果表明,由于网格不断加密,离散解逐渐趋近于精确解,网格收敛指数逐步减小。其中,方案3的网格收敛指数已小于3%,满足收敛性要求,能够保证数值计算结果的准确性。综合考虑计算精度与计算成本,最终选定方案3作为后续计算网格,不再进一步加密。

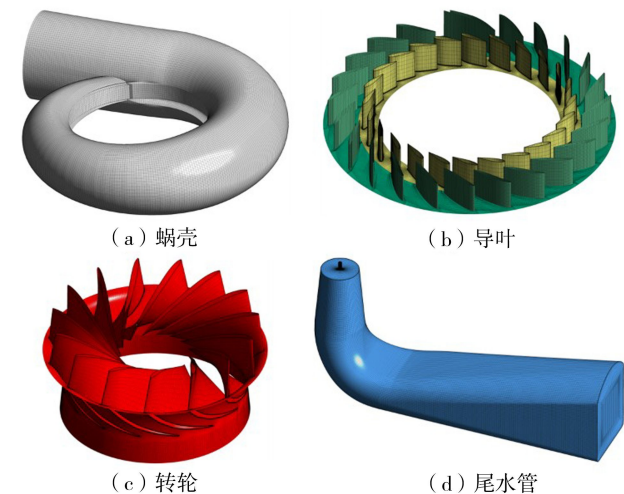


图2 水轮机结构化网格划分

表 1 外推法网格无关性验证

方案	网格单元数/万个	水轮机效率/%	网格收敛指数/%
1	265.00	91.16	
2	637.00	92.83	1.56
3	14.66	93.16	0.12

2 结果与分析

2.1 外特性对比

在水头为 202 m 时,通过数值模拟得到了水轮机的外特性曲线,将数值模拟结果与模型试验数据进行对比验证,结果如图 3 所示。水轮机模型试验在中国水利水电科学研究院水力机械实验室的水力试验台上进行,该试验台对模型效率的综合试验误差不超过±0.2%,模型试验按照 GB/T 15613—2023《水轮机、蓄能泵和水泵水轮机模型验收试验》进行。所有工况下数值模拟误差均小于 3%,并且外特性曲线变化趋势与模型试验数据保持一致,证明了数值模型的精确性和仿真策略的适配性。

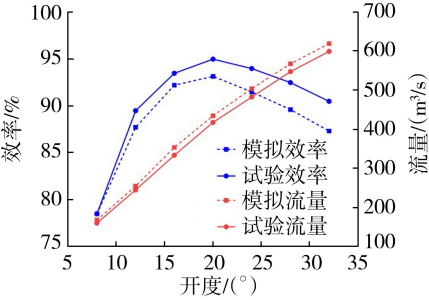


图 3 模型精度验证

2.2 各部件水力损失占比

本文采用平均动能法对水轮机各过流部件的水力损失进行定量计算。图 4 为水轮机各部件水力损失随流量的变化规律。当进入水轮机的流量超过额定流量 Q_r 后,即在高负荷工况下运行时,蜗壳和固定导叶内的水力损失对总水力损失的贡献度呈现下降趋势,其占比不足 1%。转轮和尾水管的水力损失呈现快速上升趋势。其中,尾水管的水力损失最大占比达到 75%,转轮内水力损失最大占比达到 30%。相较于最优效率工况,流量达到 1.25 Q_r 时,尾水管的水力损失增加了约 3 倍,转轮内的水力损

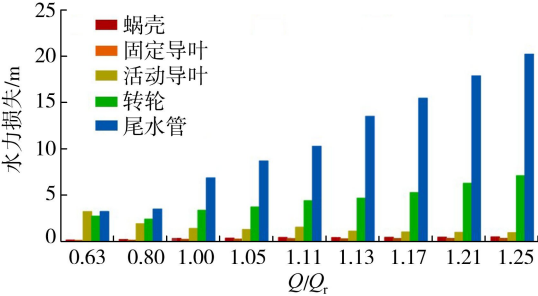


图 4 各部件的水力损失随流量的变化规律

失增加了约 1.5 倍。这说明,在流量超过额定流量后,尾水管和转轮内水力损失的急剧增加是导致水轮机组效率快速下降的主要原因。

2.3 转轮内能量损失空间分布

图 5 通过刚性涡量等值面展示了不同开度下,高负荷工况时水轮机转轮内部主要的涡结构。当流量高于 Q_r 时,转轮叶片进口处形成负冲角。负冲角的形成导致水流无法完全附着于叶片表面流动,使得流动在压力面上发生了边界层分离,诱导了脱流涡的形成。转轮叶片根部(叶根),即叶片与下环连接区域存在典型的马蹄涡。叶根复杂的几何形状和端壁效应导致流动在叶根处发生了边界层分离,进而诱导了马蹄涡的形成。马蹄涡的存在进一步加剧了局部流动的不稳定性。随着导叶开度 α_0 的增大,转轮内的流量增大,转轮叶片进水边的脱流涡逐渐沿压力面向转轮下游发展。当流量进一步增大时,叶片进口的负冲角随之增大,压力面上的脱流涡体积显著增大,并与叶根的马蹄涡相互卷合,形成复杂的涡结构。

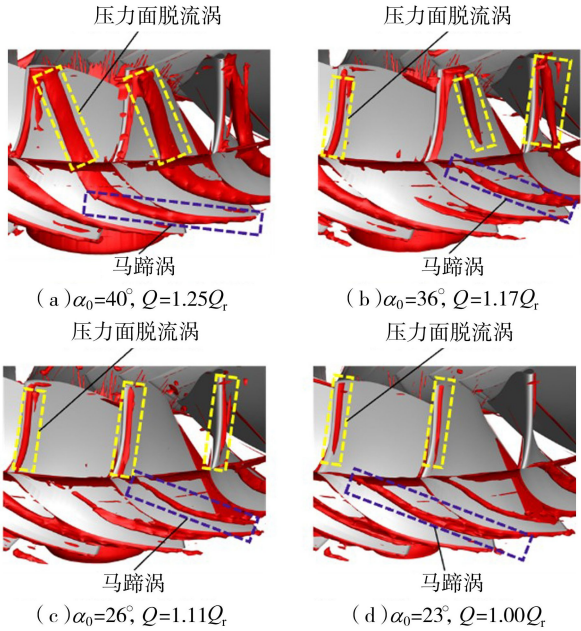


图 5 转轮内的涡结构

图 6 为转轮 50% 叶高流面上的压力分布情况。在高负荷工况下,叶片进水边和压力面上均出现了由脱流涡造成的低压区。水流经过脱流区时,携带的能量被涡流耗散,这不仅降低了流速,同时引起了局部的压力降低。脱流涡导致的低压区范围较广,是造成叶片在进水边附近产生负力矩的主要原因。

在高负荷工况下,转轮压力面上出现了脱流涡与马蹄涡合并的涡结构。这种复杂的涡结构引起了局部的能量损失。图 7 为转轮叶片表面能量损失的空间分布规律。叶片压力面沿流向的能量损失呈现

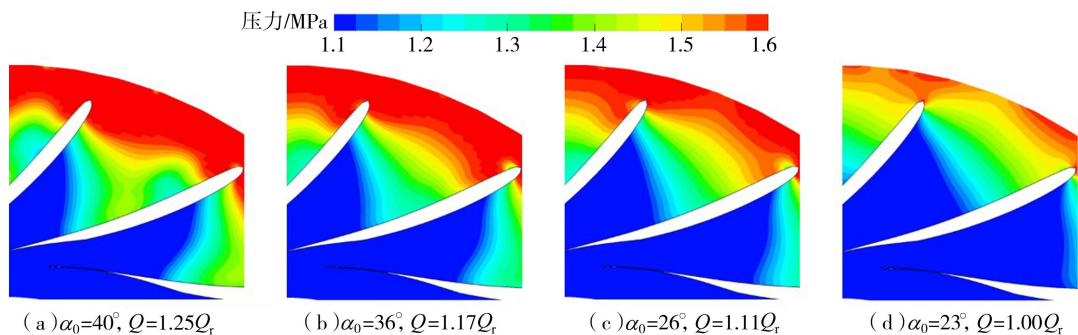


图6 转轮 50%叶高流面上的压力分布

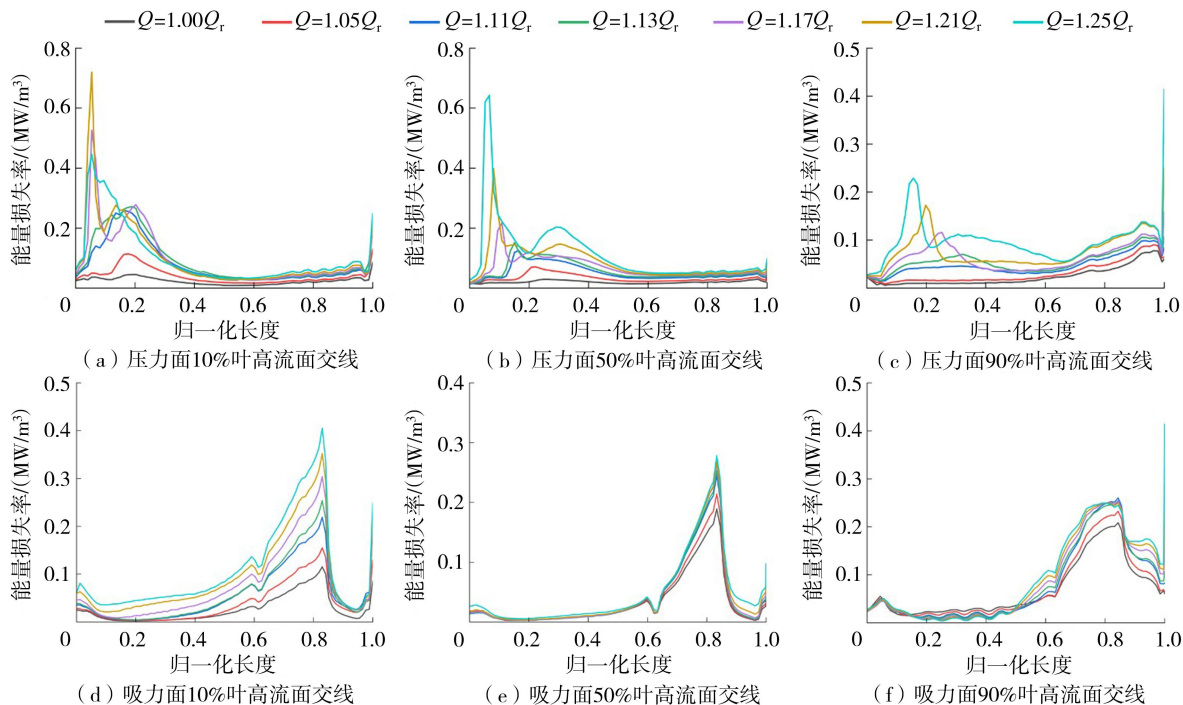


图7 转轮叶片表面能量损失分布

先减小后增大的趋势,能量损失峰值集中出现在叶片进水边附近,这与进水边附近的脱流涡密切相关。而在吸力面,能量损失沿流向呈整体增大的趋势,其能量损失峰值主要分布在叶片出水边附近,这与尾流区湍流耗散增强有关。

在高负荷工况下,叶片压力面上的高能量损失与脱流涡的形成密切相关。在脱流涡涡核区域,流速显著低于主流区,由此产生的速度梯度强化了压力面附近的剪切流动,这导致叶片进水边压力面侧的能量损失显著增加。此外,在转轮出口区域,由于流速增大导致对流效应增强,显著提高了湍动能生成率,引发较大的能量损失。从展向分布来看,脱流涡诱导的能量损失沿上冠到下环方向呈递减趋势,这是由于在高负荷工况下,流动分离倾向于发生在转轮叶片进水边靠近上冠的区域。随着流动沿展向向下环发展,叶片进口的负冲角逐渐减小。此时,流动分离随之被抑制,脱落涡强度减弱,最终表现为能量损失沿展向梯度降低的分布特征。

2.4 尾水管内能量损失空间分布

图8为水轮机尾水管涡带的形态,可以清晰地观察到尾水管内典型的柱状涡带结构。该涡带在尾水管直锥段呈现纺锤体形态,并附着在泄水锥上,一直向尾水管下游延伸至弯肘段。随着流量的逐渐增大,涡带延长,直径逐渐增大。

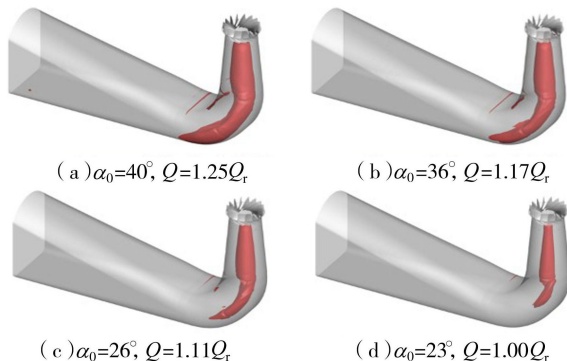


图8 尾水管涡带形态

柱状涡带的形成机制主要受转轮出口水流绝对速度周向分量的影响。当水轮机偏离最优效率工况

运行时,转轮出口水流的绝对速度在圆周方向上存在显著的分量,这一速度分量诱导了尾水涡带的形成。在高负荷工况下,转轮出口的绝对速度具有与转轮旋转方向相反的周向分量,这种反向速度分量破坏了尾水管内的轴对称流动,促使柱状涡带的形成。涡带的旋转运动与主流之间的相互作用增加了湍动能耗散。随着流量的增大,涡带的尺寸和强度逐渐增加,进一步加剧了尾水管内部的能量损失。

图 9 为尾水管内的能量损失分布云图,尾水管直锥段和弯肘段区域内存在明显的能量损失。在高负荷工况下,尾水管内存在强烈的柱状涡带。涡核中心的低速流动与涡带外围的高速流动形成了显著的速度梯度,带来了能量损失。随着导叶开度的增大,尾水管内的流量增多,涡带体积得以增大,尾水管内的能量损失增加。此外,涡核中心区域的能量损失明显低于涡核外围区域。这表明,流体在涡核中心的低速旋转对湍动能生成的影响相对较小,尾水管内的能量损失主要源自涡核中心的低速流动与涡带外围的高速流动之间显著的速度梯度引发的剪切流动。这种剪切流动显著增强了湍动能的生成和耗散,从而加剧了能量的损失。

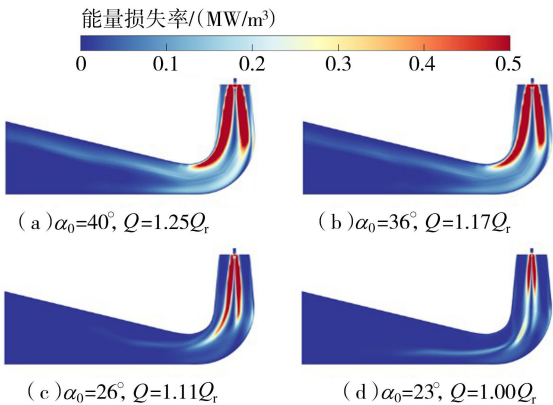


图 9 尾水管内能量损失分布云图

3 讨 论

本文对某大型混流式水轮机高负荷工况下内部流动进行了数值模拟,重点分析了转轮和尾水管流道内不稳定流动与水轮机能量损失之间的关联性,阐明了流道内涡结构诱导能量损失的机制。采用平均动能理论量化水轮机各部件内的能量损失,并对转轮流道内的能量损失特性进行了定量分析,采用基于刚性涡量理论的涡识别方法精准识别了转轮和尾水管内的复杂涡结构。本文的研究结论可为大型混流式水轮机叶片和尾水管的设计优化,以及大型水电站的运行策略优化提供数据支持和理论依据。然而,本文研究仍存在一定的局限性:求解雷诺时均 N-S 方程时,需要额外引入湍流模型来封闭方程,这

导致数值模拟无法准确预测复杂的三维湍流。因此可以考虑使用大涡模拟的方法捕捉水轮机三维流道内小尺度的湍流细节。水轮机内回流、卡门涡、旋转失速等复杂的流动现象引起的能量损失未纳入本文的研究。此外,电网对大型水电站的调节能力提出了更高的要求,水轮机不仅要具备在宽负荷工况范围下运行的能力,同时还要能够快速实现工况转换^[17],因此今后的研究要重点关注水轮机过渡过程中的水力不稳定性和能量损失。

4 结 论

- a. 在高负荷工况下,转轮和尾水管内的水力损失在总水力损失中占比较高,其损失最大占比分别为 30% 和 75%。当流量超过额定流量后,尾水管和转轮内水力损失的急剧增加是导致水轮机组效率快速下降的主要原因。
- b. 高负荷工况下,转轮叶片进口负冲角诱导压力面发生流动分离,形成脱流涡,并与叶根马蹄涡合并形成复杂涡结构。脱流涡导致的强剪切流动显著增强湍流耗散,是转轮内能量损失的主要来源,水力损失主要分布于叶片进水边附近。
- c. 高负荷工况下,尾水管内形成了柱状涡带。涡核附近的低速流动与涡带外围高速主流之间产生强烈速度梯度和剪切流动,显著增强湍动能生成与耗散,是尾水管能量损失的主要来源。随着流量增大,柱状涡带强度和尺度增加,其诱导的水力损失进一步加剧。

参考文献:

[1] Vagnoni E, Gezer D, Anagnostopoulos I, et al. The new role of sustainable hydropower in flexible energy systems and its technical evolution through innovation and digitalization[J]. Renewable Energy, 2024, 230: 120832.

[2] 郭涛,张晋铭,孙震,等. 运行负载扰动条件下水轮机流态演化和空化性能研究[J]. 工程力学, 2024, 41 (12): 224-236. (Guo Tao, Zhang Jinming, Sun Zhen, et al. Influence of operating load conditions on vortex evolution and cavitation performance in Francis turbine [J]. Engineering Mechanics, 2024, 41 (12): 224-236. (in Chinese))

[3] 易万爽,薛炳,宋晶辉,等. 巨型混流式水轮机小流量工况下高保真数值模拟[J]. 水力发电, 2025, 51 (4): 69-74. (Yi Wanshuang, Xue Bing, Song Jinghui, et al. Numerical simulation on the flow characteristics of giant Francis turbine under low flow rate condition[J]. Water Power, 2025, 51 (4): 69-74. (in Chinese))

[4] 吴在强,林亚涛,关英波,等. 混流式水轮机尾水管涡带及改善措施研究[J]. 水电能源科学, 2023, 41 (7): 197-

200. (Wu Zaiqiang, Lin Yatao, Guan Yingbo, et al. Study on vortex zone of draft tube and improvement measures of Francis turbine[J]. Water Resources and Power, 2023, 41(7):197-200. (in Chinese))
- [5] Presas A, Valero C, Valentín D, et al. Water saving options in hydropower by means of variable speed operation; a prototype study in a mid-head Francis turbine[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 291:117296.
- [6] 王李科, 姚亮, 冯建军, 等. 水泵水轮机 S 特性区能量损失及流动特性研究[J]. 水利学报, 2024, 55(3):344-354. (Wang Like, Yao Liang, Feng Jianjun, et al. Energy loss and flow characteristics analysis of a model pump turbine in the S-shape region[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(3):344-354. (in Chinese))
- [7] Ohimi I E, Yang Sunsheng, Singh P, et al. Evaluation of energy loss in a low-head axial flow turbine under different blade numbers using entropy production method[J]. Energy, 2023, 274:127262.
- [8] 周罗香, 张志兵, 孙政, 等. 基于熵产理论的水泵水轮机驼峰区内部水力损失特性研究[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(1):62-67. (Zhou Luoxiang, Zhang Zhibing, Sun Zheng, et al. Study on internal hydraulic loss characteristics of pump-turbine hump region based on entropy generation theory[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1):62-67. (in Chinese))
- [9] Qin Yonglin, Li Deyou, Wang Hongjie, et al. Investigation on hydraulic loss component and distribution in hydraulic machinery: a case study of pump-turbine in pump mode[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 52:104932.
- [10] 朱强, 龚莉, 袁玲丽, 等. 某低水头混流式水轮机叶道涡特性数值分析[J]. 水电站机电技术, 2023, 46(3):6-10. (Zhu Qiang, Gong Li, Yuan Lingli, et al. Numerical analysis of blade passage vortex characteristics in a low head mixed flow turbine[J]. Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station, 2023, 46(3):6-10. (in Chinese))
- [11] Pang Jiayang, Yao Bing, Liu Xiaobing, et al. Influence of guide vane opening on channel vortex and pressure pulsation in Francis turbine runners[J]. Physics of Fluids, 2024, 36(4):043325.
- [12] Gao Yisheng, Liu Chaoqun. Rortex and comparison with eigenvalue-based vortex identification criteria[J]. Physics of Fluids, 2018, 30(8):085107.
- [13] Wilhelm S, Balarac G, Métais O, et al. Analysis of head losses in a turbine draft tube by means of 3D unsteady simulations[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2016, 97(4):1255-1280.
- [14] Liu Chaoqun, Gao Yisheng, Tian Shuling, et al. Rortex: a new vortex vector definition and vorticity tensor and vector decompositions[J]. Physics of Fluids, 2018, 30(3):035103.
- [15] 阚闯, 张清滢, 黄佳程, 等. 叶顶泄漏流动对轴流泵反向发电能量特性的影响研究[J]. 工程热物理学报, 2023, 44(9):2416-2422. (Kan Kan, Zhang Qingying, Huang Jiacheng, et al. Tip Leakage flow on energy performance for an axial flow pump as turbine[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(9):2416-2422. (in Chinese))
- [16] Celik I B, Ghia U, Roache P J, et al. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications[J]. Journal of Fluids Engineering, 2008, 130(7):078001.
- [17] 李桂林, 冯陈, 张玉全, 等. 基于特性曲线的水轮机调速器新型功率调节模式研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(6):110-118. (Li Guilin, Feng Chen, Zhang Yuquan, et al. Research on a novel power regulation mode of water turbine governor based on characteristic curve[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(6):110-118. (in Chinese))

(收稿日期:2025-05-11 编辑:熊水斌)

(上接第 78 页)

- [22] 彭浩, 韩玉, 梁铭, 等. 基于多源信息融合的隧道施工综合安全动态评估技术研究[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(9):1893-1902. (Peng Hao, Han Yu, Liang Ming, et al. Research on dynamic safety assessment technology for tunnel construction based on multi-source information fusion[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, 47(9):1893-1902. (in Chinese))
- [23] 刘东海, 王爱国, 柳育刚, 等. 基于碾轮振动动态分析的土石坝压实质量实时监测与评估[J]. 水利学报, 2014, 45(2):163-170. (Liu Donghai, Wang Aiguo, Liu Yugang, et al. Real-time monitoring and assessment of compaction quality for earth-rock dam basing on roller vibration behavior analysis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(2):163-170. (in Chinese))
- [24] Deng Naifu, An Zaizhan, Hao Jiawang, et al. Few shot intelligent assessment method for compaction quality of earthwork considering uncertainty[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 256:125000.
- [25] 钱劲松, 杨以诚, 凌建明. 路基智能压实的地统计分析与空间均匀性评价[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54(10):2859-2869. (Qian Jinsong, Yang Yicheng, Ling Jianming, et al. Geostatistical analysis and evaluation of subgrade spatial uniformity based on intelligent compaction technology[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(10):2859-2869. (in Chinese))

(收稿日期:2025-03-20 编辑:俞云利)

基于 VMD-LSTM-VAE 的渗流监测数据异常值检测模型

李梦华^{1,2}, 钱胥安^{1,2}, 傅蜀燕^{1,2,3}, 赵晗坤^{1,2}, 金思彤^{1,2}, 欧斌^{1,2,3,4}

(1. 云南农业大学水利学院; 2. 云南省水利水电工程安全重点实验室; 3. 云南省中小型水利工程智慧管养工程研究中心;
4. 云南省水安全保障重点实验室)

摘要:针对传统渗流监测数据异常值检测方法在处理非线性、非平稳水位监测数据时的不足,提出了一种基于变分模态分解(VMD)、长短期记忆网络(LSTM)和变分自编码器(VAE)的组合模型。该模型利用 VMD 对水位时间序列进行多尺度分解,获得具有不同频率特征的本征模态函数;通过双层 LSTM 捕捉各模态分量的时序依赖特征;利用 VAE 进行特征压缩与重构,并基于重构误差实现异常值的检测。实例验证结果表明,该组合模型能够有效识别孤立异常点和连续异常值序列;在测试集中分别按 1%、2% 和 3% 的比例随机添加异常值的场景下,模型均表现出良好的检测性能,验证了其在渗流监测数据异常值检测中的有效性。

关键词:大坝渗流监测;异常值检测;变分模态分解;长短期记忆网络;变分自编码器

An outlier detection model for seepage monitoring data based on VMD-LSTM-VAE//Li Menghua^{1,2}, Qian Xu'an^{1,2}, Fu Shuyan^{1,2,3}, Zhao Hankun^{1,2}, Jin Sitong^{1,2}, Ou Bin^{1,2,3,4} (1. College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University; 2. Yunnan Key Laboratory of Hydraulic and Hydropower Engineering Safety; 3. Yunnan Engineering Research Center for Intelligent Management and Maintenance of Small and Medium-sized Water Conservancy Projects; 4. Yunnan Key Laboratory of Water Security)

Abstract: To address the limitations of traditional outlier detection methods for seepage monitoring data in processing nonlinear and nonstationary water level monitoring data, a hybrid model based on variational mode decomposition (VMD), long short-term memory network (LSTM), and variational autoencoder (VAE) is proposed. In the proposed model, VMD is used to perform multiscale decomposition of the water level time series and obtain intrinsic mode functions with different frequency characteristics. A two-layer LSTM is then employed to capture the temporal dependencies of each modal component. VAE is used for feature compression and reconstruction, and outlier detection is achieved based on the reconstruction error. Case validation results show that the hybrid model can effectively identify isolated outliers and continuous outlier sequences. In scenarios where outliers were randomly added to the test set at proportions of 1%, 2%, and 3%, the model exhibited good detection performance, verifying its effectiveness in outlier detection for seepage monitoring data.

Key words: dam seepage monitoring; outlier detection; variational mode decomposition; long short-term memory network; variational autoencoder

大坝渗流监测数据能够实时反映渗流状态,是评估大坝安全性的重要依据。然而,由于仪器设备故障、外部环境干扰以及数据采集与传输过程中不可避免的误差,监测数据中常常混杂着异常值^[1]。若未能及时识别并妥善处理这些异常值,将影响大

坝渗流性态的精确分析,进而导致安全评估结果出现偏差,最终影响大坝运行安全性的准确评估。

传统的异常值检测方法主要包括统计分析法和经验阈值法。然而,统计分析法在处理数据的时序相关性及非线性特征方面效果有限;经验阈值法则

基金项目:国家自然科学基金项目(52369026,52069029);水灾害防御全国重点实验室 2023 年度“一带一路”水与可持续发展科技项目(2023490411);云南省农业基础研究联合专项面上项目(202401BD070001-071);云南省水安全保障重点实验室建设项目(20254916CE340051)

作者简介:李梦华(2000—),女,硕士研究生,主要从事大坝安全监测研究。E-mail:2024240069@stu.ynau.edu.cn

通信作者:欧斌(1983—),男,副教授,博士,主要从事水工结构安全监控与病害诊断研究。E-mail:oubin418@126.com

高度依赖专家主观经验,难以适应监测环境中复杂多变的情况及多样化工况条件。随着机器学习技术的发展,深度学习方法^[2-4]在异常值检测领域展现出显著优势。长短期记忆网络(LSTM)因其特殊的门控机制,能够有效捕捉时间序列数据的长期依赖关系,在监测数据分析中得到广泛应用。例如:叶斌^[5]利用 LSTM 对大坝安全监测数据进行了异常值检测,通过与逐步回归模型和 3σ 准则对比,验证了 LSTM 在多数情况下能较好地拟合实测数据,具有较强的预测能力;余红玲等^[6]提出了基于改进深度稀疏自编码器(DSAE)的大坝渗流监测数据异常值检测模型,采用基于混沌初始化和非线性飞行速率改进的天鹰优化(IAO)算法对 DSAE 的超参数进行优化,并利用逆向云算法拟定异常阈值,提高了异常值检测的准确性和可靠性;熊敏等^[7]提出了多维度 LSTM 异常值检测与恢复方法,利用多个测点的监测数据对单测点进行预测,有效利用了不同测点间的相关信息,相比单维度 LSTM 方法,在异常值检测和数据恢复方面表现更优。在时间序列异常值检测的相关研究中,Lin 等^[8]结合变分自编码器(VAE)提取局部特征和 LSTM 捕捉长期依赖关系的优势提出了 VAE-LSTM 混合模型,取得了良好的异常值检测效果。此外,变分模态分解(VMD)技术在信号处理领域展现出独特优势。例如:Ou 等^[9]将 VMD 与分形理论、鲸鱼优化算法-深度极限学习机(WOA-DELM)相结合用于大坝变形分析,有效提高了数据处理和预测精度;岳明昊等^[10]运用时空相关性原理对缺失的监测数据进行了插补处理,结合小波去噪与格拉布斯检验的组合方法,实现了对异常值的有效识别与处理,从而提升了监测数据的可靠性。

然而,面对复杂工况下多尺度特征提取不足、时空关联挖掘不充分及阈值设定理论基础薄弱等局限问题,现有方法的检测稳定性及准确性亟待提升。为此,本文创新性地融合了 VMD、LSTM 与 VAE,构建了 VMD-LSTM-VAE 组合模型。该模型通过 VMD 技术分解渗流序列获取多尺度本征模态函数(IMFs),利用 LSTM 深度挖掘各 IMF 分量的时序依赖规律,并基于 VAE 的特征压缩-重构机制建立异常判据。为系统验证模型性能,进一步设计随机异常值嵌入测试框架,通过多场景异常工况模拟评估其泛化能力。

1 模型构建

1.1 VMD 信号分解及特征提取

变分模态分解(VMD)是一种自适应信号分解方法,可将非线性、非平稳时间序列分解为若干具有

不同中心频率和时间尺度特征的 IMF 分量^[11-12]。各 IMF 分量能够反映原始序列中不同频段的波动成分,有助于表征监测数据中的长期趋势、周期变化和短期扰动等多尺度特征。大坝渗流监测数据受库水位、降雨、温度、运行工况及仪器误差等多种因素影响,通常具有明显的非线性和非平稳特征。若直接利用原始监测序列进行建模,噪声扰动和多尺度成分耦合可能影响模型对异常值的识别效果。因此,本文在 LSTM-VAE 建模前引入 VMD,对测压管水位监测序列进行多尺度分解,以提高输入数据的稳定性和特征表达能力。

本文中的 VMD 处理流程如下:①对预处理后的测压管水位时间序列进行 VMD 分解,得到 3 个 IMF 分量;②结合各 IMF 分量的频率特征、能量占比及变化形态,分析其所表征的渗流变化信息;③筛选能够反映主要渗流变化过程的有效模态分量,削弱高频噪声和局部随机扰动对后续建模的影响;④对筛选后的有效模态分量进行重构,并将重构后的序列作为 LSTM-VAE 模型的输入。通过上述处理,可在保留渗流监测数据主要时序特征的同时降低噪声干扰,为后续基于重构误差的异常值检测提供更稳定的数据基础。

1.2 LSTM-VAE 模型构建

LSTM 可用于提取 VMD 技术分解后各模态分量的时序依赖关系^[13],而 VAE 能在无监督框架下学习数据的潜在分布^[14],二者协同作用,使模型兼具时序特征学习与特征压缩的双重能力。由于大坝渗流数据的非平稳特性(如季节更替、设备漂移等导致的统计特性时变),传统固定阈值易在异常边界模糊时失效,本文提出动态阈值机制,基于实时重构误差的统计分布自适应调整判别标准,能降低背景波动引起的误报与漏报风险。该机制的实现步骤如下:

a. 数据预处理。对渗流监测数据进行预处理,包括缺失值处理、异常值初筛、平滑与降噪。

b. 信号分解与特征提取。采用 VMD 将预处理后的渗流监测序列分解为若干具有不同频率特征的 IMF 分量,并根据频率特征和能量占比筛选有效模态分量并进行重构。该过程可提取信号的主要多尺度特征,并削弱高频噪声及局部随机扰动的影响,为后续 LSTM-VAE 建模提供输入数据。

c. LSTM-VAE 模型训练。采用 LSTM-VAE 模型对训练集数据进行无监督训练^[15-16],其中训练集为预处理后数据的 70%。LSTM 网络用于捕捉渗流监测时间序列中的长期依赖特征^[17-18],VAE 则通过特征压缩与重构学习数据的潜在分布,并以重构结

果与原始输入之间的差异作为后续异常值判别的重要依据。模型输入为由滑动窗口构造的时间序列子样本。首先,编码器中的堆叠 LSTM 网络提取输入样本的时序特征,并映射得到潜变量分布的均值和方差参数;随后,通过重参数化采样获得潜变量 z ;最后,由对称的 LSTM 解码器根据潜变量对输入序列进行重构。模型训练目标为最小化由重构误差项和潜变量分布约束项共同构成的损失函数:

$$L_{\text{LSTM-VAE}} = 0.8 \| \mathbf{X} - \hat{\mathbf{X}} \|_2^2 + 0.2 D_{\text{KL}}[q(z|\mathbf{X}) \| p(z)] \quad (1)$$

式中: $L_{\text{LSTM-VAE}}$ 为 LSTM-VAE 模型的损失函数; $\mathbf{X}$ 为滑动窗口构造的输入时间序列样本向量, $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_T)^T$; T 为滑动窗口长度; $\hat{\mathbf{X}}$ 为模型重构输出的时间序列样本向量, $\hat{\mathbf{X}} = (\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_T)^T$; $q(z|\mathbf{X})$ 为编码器学习得到的潜变量的后验分布; $p(z)$ 为潜变量的先验分布,通常设为标准正态分布; $D_{\text{KL}}[\cdot \| \cdot]$ 为 Kullback-Leibler (KL) 散度,衡量后验分布 $q(z|\mathbf{X})$ 与先验分布 $p(z)$ 之间的差异。重构误差项和 KL 散度项的权重分别设为 0.8 和 0.2。该损失函数由两部分组成:第一部分为重构误差项,用于衡量模型重构输出与输入样本之间的差异,使模型学习正常渗流监测序列的主要时序变化特征;第二部分为 KL 散度项,用于约束潜变量的后验分布接近先验分布,增强潜在空间表示的稳定性。通过联合最小化上述两项,模型能够兼顾输入序列重构与潜在分布建模,为后续基于重构误差的异常值判别提供依据。

d. 异常值检测与重构误差计算。模型训练完成后,将新的测试数据输入 LSTM-VAE 模型进行重构,并计算其重构误差。该误差即为实际输入值与模型重构输出值之间的偏差:

$$E_R = \| x - \hat{x} \|_2^2 \quad (2)$$

式中: x 为原始输入样本; $\hat{x}$ 为模型输出的重构结果。

模型训练完成后,将测试样本输入 LSTM-VAE 模型进行重构,并计算输入样本与重构输出之间的重构误差。重构误差反映了模型对测试样本时序特征的复原能力。若某一测试样本的重构误差显著高于训练集中正常样本的重构误差水平,说明该样本难以被模型有效重构,可能存在异常。后续基于重构误差构建动态阈值机制,实现异常值识别。

e. 动态阈值计算与异常识别。为实现异常样本与正常样本的有效区分,本文利用训练阶段正常样本的重构误差分布特征构建动态判别阈值。考虑到正常样本的重构误差通常集中在一定范围内,而异常样本往往会产生较大的重构误差,因此采用均

值与标准差相结合的方式确定异常值判别阈值。测试样本的重构误差为 E_R ,异常值判别阈值为 τ ,则其计算公式为:

$$\tau = \mu(E_R) + \alpha\sigma(E_R) \quad (3)$$

式中: τ 为异常值判别阈值; μ 表示均值运算; σ 表示标准差运算; α 为阈值灵敏度系数,用于调节异常值判别的严格程度。

当 $E_R > \tau$ 时,表明该样本难以被模型有效重构,将其判定为异常值;当 $E_R \leq \tau$ 时,则判定为正常样本。通过基于重构误差统计分布设置判别阈值,模型能够在一定程度上适应渗流监测数据的波动特征,降低固定阈值带来的误报或漏报风险。LSTM-VAE 由编码器、潜变量采样模块和解码器构成。编码器采用双层 LSTM 提取渗流监测序列的长期依赖特征,并映射得到潜变量分布参数;潜变量采样模块通过重参数化采样获得潜变量 z ;解码器采用与编码器相对应的 LSTM 结构,将潜变量 z 映射回数据空间,实现输入序列重构。模型通过时间维度扩展操作保持输入与输出序列长度一致,并在无监督训练过程中联合优化重构误差项与 KL 散度项。重构误差可反映样本与正常数据分布之间的偏离程度,为后续动态阈值判别提供依据。

1.3 VMD-LSTM-VAE 模型结构

为充分发挥 VMD 在非平稳渗流信号降噪与特征提取方面的优势,同时结合 LSTM 与 VAE 对时序数据潜在结构的建模能力,提出了一种融合 VMD、LSTM 与 VAE 的异常值检测模型,即 VMD-LSTM-VAE 模型。图 1 展示了从数据预处理、模态分解到 LSTM-VAE 模型构建,再到动态阈值检测的完整模型架构及其核心流程,涵盖信号分解、特征重构、模型训练以及异常值检测环节。通过这一综合性模型结构,异常值的识别与处理得以实现。该模型内部整合了多个关键组件,包括 LSTM 编码器、隐变量采样机制以及 LSTM 解码器。此外,模型还包含一个以重构误差为核心的异常值识别模块,驱动异常值的精准检测。

2 实例验证

2.1 工程概况与模型参数设置

云南某土石坝位于昆明市盘龙江中游,为大(2)型水利工程。主坝坝长 201 m,坝高 62 m,副坝坝长 354.6 m,坝高 34.5 m。为监测坝身渗流及心墙渗透压力,在主坝河床断面布设 ZU1 ~ ZU5 共 5 个测压管,形成桩号为 0+082 的顺河向监测断面。本文选取逐日采集的 ZU1 测压管水位监测数据作为研究对象,进行异常值检测分析。ZU1 ~ ZU5 测压

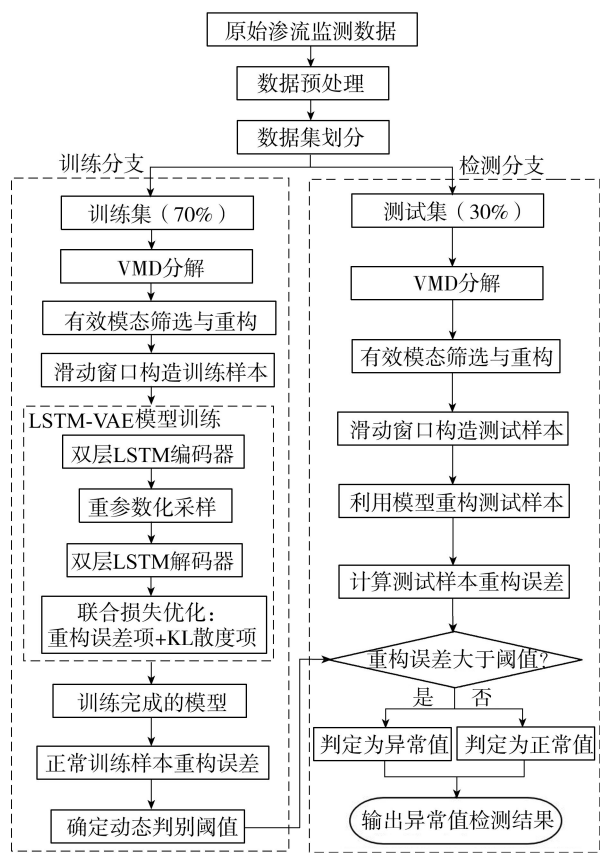


图1 VMD-LSTM-VAE 模型结构与异常值检测流程
管在主坝平面上的布置位置见图2。

在明确监测对象和数据来源的基础上,对模型主要参数进行统一设置。VMD 分解模态数设为 3,用于表征测压管水位序列中的长期趋势、年周期变化和短期波动特征;惩罚因子设为 2000,最大迭代次数设为 500,中心频率采用线性方式初始化。LSTM-VAE 模型采用编码器-潜变量采样-解码器结构,其中编码器和解码器均采用双层 LSTM。第一层和第二层 LSTM 的隐藏单元数分别设为 64 和 32,滑动窗口长度设为 60 个时间步。由于本文采用逐

日采集的渗流监测数据,60 个时间步对应连续 60 d 的监测序列。模型采用修正线性单元(ReLU)激活函数,随机失活率设为 0.2,潜变量维度设为 16。损失函数中,重构误差项权重设为 0.8,KL 散度项权重设为 0.2。上述参数在不同异常值添加比例测试和模型对比实验中保持一致。

2.2 随机异常值添加

为评估模型在不同异常形态和不同异常值添加比例下的识别性能,本文在保持训练集数据不变的基础上,仅对测试集进行人工异常值嵌入。实验共选取 1557 组 ZU1 测压管水位监测数据。首先对原始数据进行预处理,包括缺失值处理、明显异常值初筛、平滑与降噪;随后按照时间顺序将预处理后的数据划分为训练集和测试集,其中 70% 作为训练集,30% 作为测试集。训练集用于 LSTM-VAE 模型训练,测试集用于随机异常值添加和检测性能评价。

为模拟实际工程监测中可能出现的异常情况,本文在测试集中构造孤立异常、连续异常和混合异常 3 类典型异常模式。随机异常值添加^[19]时,以被替换位置的原始观测值为基准,并以正常水位监测序列的标准差作为扰动幅值尺度,具体设置如下:

a. 孤立异常。在测试集中随机选取单个时间点,将该点原始观测值替换为叠加 2~3 倍标准差扰动后的值。扰动方向随机确定,使异常值相对于原始观测值表现为偏高或偏低。

b. 连续异常。在测试集中随机选取起始位置,插入长度为 5~10 个时间点的连续异常序列。连续异常序列以对应位置的原始观测值为基准,叠加 1.8~2.2 倍标准差的平滑扰动,并采用正弦函数控制扰动幅值变化,以模拟传感器短时漂移或连续测量偏差过程。

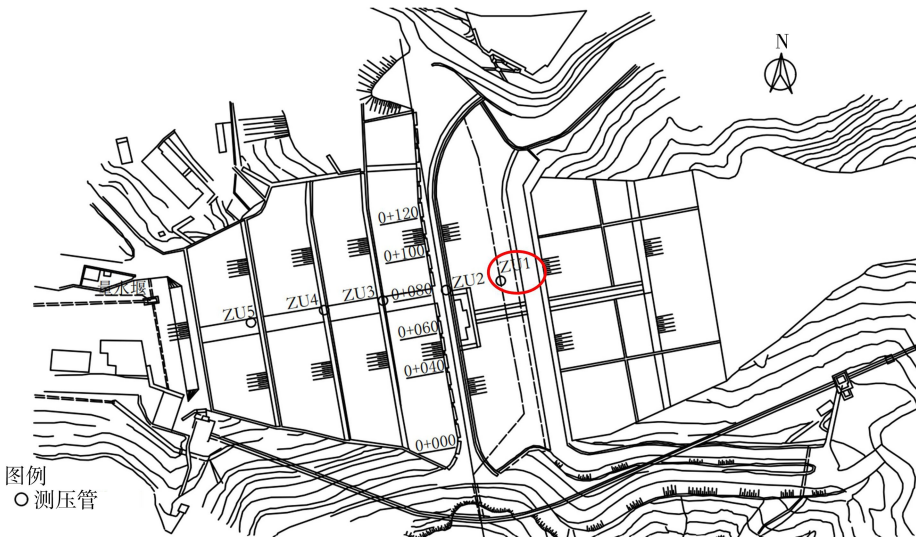


图2 主坝测压管平面布置示意图

c. 混合异常。首先生成长度为 5~10 个时间点的连续异常序列,随后在该连续异常序列中随机插入 1~2 个孤立异常点,以模拟连续异常与局部突变同时存在的复合异常场景。

在异常值数量设置方面,本文将异常值添加比例分别设为约 1%、2%和 3%。该比例指人工添加的异常值样本数占测试集样本总数的比例。具体添加情况见图 3,其中混合连续点和混合孤立点分别表示混合异常模式中的连续异常点和孤立异常点。

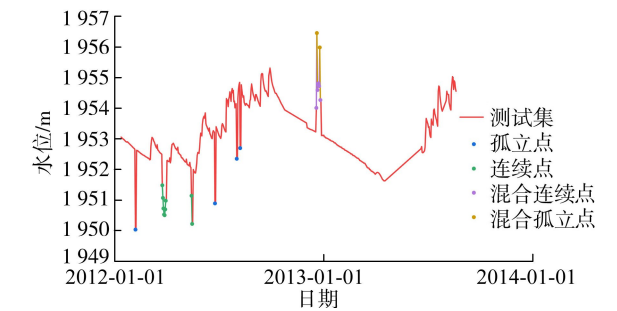


图 3 随机异常值添加

对测试集添加异常值后,用 VMD 对时间序列数据进行分解,分解效果见图 4,图中显示了 3 个 IMF 组件,分别为 IMF1、IMF2 和 IMF3。基于时域能量积分法计算各模态能量占比,该方法可量化不同时间尺度特征在原始信号中的贡献。分析结果表明,测压管水位变化的多年趋势(能量占比 76.64%)、年周期变化(能量占比 20.29%)和短期波动特征(能量占比 2.71%),在测试集中得到了有效分离。

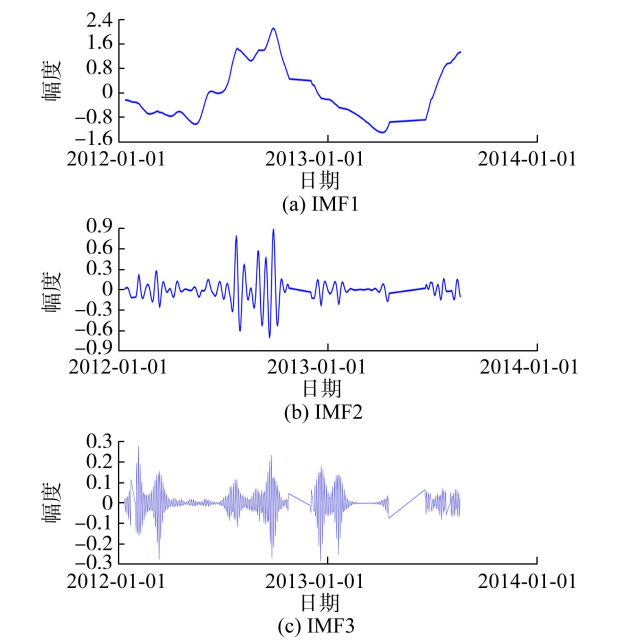


图 4 测试集时间序列分解的分量

通过 VMD 进行分解,测试集中的时间序列被有效分解为多个模态分量,每个模态分量均具备明

确的物理意义以及独特的时间尺度特征。这一分解过程为后续的异常值检测与模式识别奠定了坚实的数据基础,同时有利于深入探究渗流监测数据中所蕴含的多尺度动力学特性。

选择能量占比较高的 IMF1、IMF2 与残差进行重构之后,用 VMD-LSTM-VAE 模型对其进行异常值检测,结果如图 5 所示,

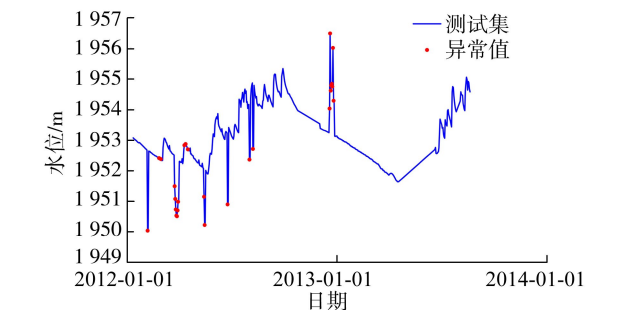


图 5 异常值识别结果

由图 5 可知,VMD-LSTM-VAE 模型在异常值检测任务中表现出优异的性能,能够在有效保持数据内在特征的同时,准确识别多种异常模式,具有较强的工程应用价值。然而,该模型在少量特殊工况下仍存在误判现象,这也为进一步提升异常识别的精确度提供了优化方向。

2.3 结果分析

为了评估 VMD-LSTM-VAE 模型在大坝渗流监测数据异常值检测中的性能情况,构建了包含多个指标的评价体系,选取精确率 P 、召回率 R 、F1 分数及 ROC 曲线下面积 (AUC) [20] 作为评判的关键指标,从不同维度对检测结果进行定量分析。其中,精确率反映了判定为异常的样本中实际异常的比例,衡量了模型的误报水平;召回率表示识别出的异常样本在所有实际异常样本中的占比,衡量了模型的漏报风险;F1 分数作为精确率与召回率的调和均值,可综合评价模型检测性能;AUC 则反映模型在不同判别阈值下区分正常样本与异常值样本的整体能力,AUC 值越接近 1,表示模型分类性能越好。

由 ROC 曲线(图 6)可知,VMD-LSTM-VAE 模型在渗流监测数据异常值检测任务中的 AUC 值为 0.899,明显高于随机分类基准线对应的 AUC 值 0.5,说明该模型具有较好的整体分类能力。具体而言,该模型在区分正常渗流状态与异常状态时,表现出了较强的识别能力,能够有效识别异常状态。图中,假阳性率 (FPR) 表示正常样本被误判为异常值的比例,真阳性率 (TPR) 表示实际异常值样本被正确识别出的比例。

在低误报区间(FPR 小于 0.2),模型的 TPR 迅速上升至 0.6,可见其在控制虚警的同时,能有效捕

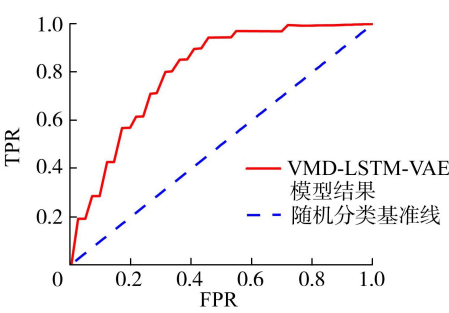


图6 ROC 曲线

捉关键的渗流异常信号;当FPR介于0.2~0.4之间时,ROC曲线呈现出阶梯式上升的形态,说明随着判别阈值变化,模型对异常值样本的识别能力进一步提高;进入高误报区间(FPR大于0.4)后,TPR逐渐趋于稳定并逼近1.0,意味着模型在追求高召回率时仍能维持可接受的精度,这对降低渗流监测中的漏报风险尤为重要。相比于随机猜测(图6中蓝色虚线,AUC值为0.5),该模型显著提升了异常值检测的准确性,能够为大坝安全监测提供可靠的异常预警依据。

针对工程实践中异常形态复杂多样的特点,单一依赖整体AUC值评估难以全面反映模型性能。因此,本文进一步对孤立异常、连续异常与混合异常3类典型异常场景进行独立测试。如表1所示,VMD-LSTM-VAE模型在各类异常场景下均表现出较高的识别精度,尤其在孤立与连续异常场景下保持了100%的精确率,表明该模型具有良好的泛化能力和实际应用潜力。然而,在混合异常等复杂场景下,其检测效果略有下降,表明该模型仍有改进空间。

表1 不同类型异常场景的检测效果

异常类型	精确率/%	召回率/%	F1 分数/%	AUC
孤立异常	100	90.1	94.8	0.908
连续异常	100	88.9	94.1	0.899
混合异常	90	83.9	86.8	0.890

从量化指标看,模型在3种典型异常场景下均取得了优良效果。其精确率始终保持在90%以上,展现出优异的异常识别能力,有效降低了误报风险;召回率与F1分数虽在不同场景下存在波动,但整体保持稳定,体现了良好的鲁棒性,具备较强的工程适应性。

为验证模型的有效性,选取LSTM、VAE、Z-score及K近邻(KNN)4种方法进行对比,并采用精确率、召回率、F1分数和AUC4项指标开展全面评估。这些指标分别从检测精度、异常覆盖率、整体平衡性和多阈值分类能力等维度衡量性能。具体对比结果见表2。

表2 不同方法的评价指标对比

方法	精确率/%	召回率/%	F1 分数/%	AUC
LSTM	86.9	88.8	87.8	0.805
VAE	85.3	89.4	87.3	0.794
Z-score	81.1	84.1	82.6	0.766
KNN	83.4	83.8	83.6	0.778
VMD-LSTM-VAE	96.7	87.6	91.9	0.899

由表2可知,深度学习模型(LSTM和VAE)在异常值检测任务中的整体表现优于传统方法(Z-score和KNN),表明深度学习方法在处理非线性时间序列监测数据方面具有一定优势。相比之下,本文提出的VMD-LSTM-VAE模型在精确率、F1分数和AUC等指标上均取得较优结果,其中精确率为96.7%,F1分数为91.9%,AUC为0.899,说明该组合模型在复杂异常值识别中具有较好的检测性能和稳定性。本文提出的VMD-LSTM-VAE模型融合了多种算法优势,构建了性能较优的异常值检测方案。VMD模块通过自适应信号分解提取多尺度特征,为后续建模提供了具有物理意义的输入表示;LSTM模块用于捕捉时间序列中的长期依赖关系,增强了模型对渗流监测序列时序特征的学习能力;VAE模块通过特征压缩与重构,在低维潜变量空间中学习数据的潜在分布,提高了模型对异常值样本的识别能力。

具体而言,VMD-LSTM-VAE模型在以下3个关键指标上表现出明显优势:①在精确率方面,该模型表现出较高的异常值判别准确性,有效降低了误报风险;②在F1分数方面,该模型在精确率和召回率之间取得了较好的平衡,综合检测性能较优;③在AUC指标方面,该模型在不同判别阈值下均具有较稳定的分类性能。

此外,模型在不同测试场景下表现出的稳定性,进一步表明了其良好的鲁棒性,为工程实践中的渗流异常值检测提供了新的解决方案,对于实际工程应用具有重要意义。

3 结 语

针对大坝渗流监测数据异常值检测面临的挑战,提出了VMD-LSTM-VAE组合模型。该模型有效整合了多尺度特征提取与深度时序学习能力。VMD成功地将原始渗流序列分解为反映不同时间尺度动态的本征模态函数。双层LSTM网络深度捕获了各模态分量的复杂时序依赖特征。VAE模块则通过特征空间的压缩与重构,建立了鲁棒的重构误差基准,为异常值检测提供了核心判据。该融合架构为处理非线性、非平稳渗流监测数据的异常值检测提供了一种新的解决方法。实例验证结果表

明,所提模型在孤立异常、连续异常及混合异常场景的检测中均表现出较好的识别效果,F1 分数分别为 94.8%、94.1%和 86.8%,AUC 值分别为 0.908、0.899 和 0.890。与 LSTM、VAE、Z-score 和 KNN 等方法相比,VMD-LSTM-VAE 模型在精确率、F1 分数和 AUC 等综合评价指标上表现更优,这说明基于重构造误差的动态阈值机制能够有效提升模型对复杂异常模式的识别敏感性与时效性。

参考文献:

[1] 郑霞忠,陈国梁,邹韬.考虑时间序列关联的大坝监测异常数据清洗[J].水力发电,2020,46(4):111-114. (Zheng Xiazhong, Chen Guoliang, Zou Tao. Cleaning of abnormal dam monitoring data considering time series association[J]. Water Power, 2020, 46(4): 111-114. (in Chinese))

[2] 宋锦焄,葛佳豪,杨杰,等.基于时空聚类和深度学习的混凝土坝变形异常值识别方法[J].水利水电科技进展,2024,44(4):65-71. (Song Jintao, Ge Jiahao, Yang Jie, et al. A method for identifying deformation outliers in concrete dams based on spatio-temporal clustering and deep learning[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(4): 65-71. (in Chinese))

[3] 廖攀,李晓庆,顾昊,等.耦合 GAT 和 TCN 的土石坝渗流监测数据异常检测模型[J].水利水电科技进展,2025,45(6):85-90. (Liao Pan, Li Xiaoqing, Gu Hao, et al. Anomaly detection model for seepage monitoring data of earth-rock dams based on coupled GAT and TCN[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(6): 85-90. (in Chinese))

[4] Audibert J, Michiardi P, Guyard F, et al. Do deep neural networks contribute to multivariate time series anomaly detection? [J]. Pattern Recognition, 2022, 132: 108945.

[5] 叶斌.基于 LSTM 模型的大坝安全监测数据异常值检测[D].武汉:长江科学院,2020.

[6] 余红玲,王晓玲,程正飞,等.大坝渗流安全监测数据异常检测的改进 DSAE 模型[J].水力发电学报,2023,42(10):128-138. (Yu Hongling, Wang Xiaoling, Cheng Zhengfei, et al. Improved DSAE model for anomaly detection of dam seepage safety monitoring data [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(10): 128-138. (in Chinese))

[7] 熊敏,江德军,高志良,等.大坝监测数据多维度 LSTM 异常检测与恢复[J].电子测量技术,2023,46(6):51-56. (Xiong Min, Jiang Dejun, Gao Zhiliang, et al. Dam monitoring data multi-dimensional LSTM anomaly detection and recovery [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(6): 51-56. (in Chinese))

[8] Lin S, Clark R, Birke R, et al. Anomaly detection for time

series using VAE-LSTM hybrid model [C]//ICASSP 2020-2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Barcelona: IEEE, 2020: 4322-4326.

[9] Ou Bin, Zhang Caiyi, Xu Bo, et al. Innovative approach to dam deformation analysis: integration of VMD, fractal theory, and WOA-DELM [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2024, 2024(1): 1710019.

[10] 岳明昊,刘仲鹏,欧斌,等.大坝监测数据缺失插补与奇异值修正处理[J].农业工程,2022,12(7):47-51. (Yue Minghao, Liu Zhongpeng, Ou Bin, et al. Missing interpolation and singular value correction of dam monitoring data [J]. Agricultural Engineering, 2022, 12(7): 47-51. (in Chinese))

[11] 许秋鸿,刘晓青.基于 VMD-XGBoost-GRU 模型的危岩体变形预测[J].水利水电科技进展,2024,44(2):92-98. (Xu QiuHong, Liu Xiaoqing. Deformation prediction of dangerous rock mass based on VMD-XGBoost-GRU model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(2): 92-98. (in Chinese))

[12] 张建中,顾冲时,袁冬阳,等.基于优化 VMD 与 GRU 的混凝土坝变形预测模型[J].水利水电科技进展,2023,43(5):38-44. (Zhang Jianzhong, Gu Chongshi, Yuan Dongyang, et al. Deformation prediction model of concrete dams based on optimized VMD and GRU [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(5): 38-44. (in Chinese))

[13] Wei Y, Jang-Jaccard J, Xu W, et al. LSTM-autoencoder-based anomaly detection for indoor air quality time-series data[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(4): 3787-3800.

[14] 黎伟,赵二峰,何菁.大坝变形监测异常数据识别和重构模型[J].水利水电科技进展,2023,43(2):109-114. (Li Yi, Zhao Erfeng, He Jing. Abnormal data identification and reconstruction model of dam deformation monitoring [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(2): 109-114. (in Chinese))

[15] 荆志朋,柴林杰,胡诗尧.基于改进 LSTM-VAE 的配电网异常负荷检测方法研究[J].电测与仪表,2024,61(9):71-76. (Jing Zhipeng, Chai Linjie, Hu Shiyao. Research on abnormal load detection method for distribution network based on improved LSTM-VAE [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(9): 71-76. (in Chinese))

[16] 杨英,唐平. VAE-LSTM 算法在时间序列预测模型中的研究[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2020,35(3):93-101. (Yang Ying, Tang Ping. Research of VAE-LSTM algorithm in time series prediction model [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 35(3): 93-101. (in Chinese))

(下转第 109 页)

基于改进 YOLOv5s 模型的水工建筑物裂缝检测

李怡静,邓佳蕙,袁世虹

(南昌大学工程建设学院)

摘要:针对水工建筑物在复杂自然环境和运行工况下易出现水渍、析钙等劣化现象,进而增大表面裂缝检测难度的问题,提出了一种融合可变形卷积网络(DCNv2)和缩放解耦头(SEH)的裂缝检测模型 YOLO-SEH。该模型在颈部引入高效通道注意力机制,以抑制复杂背景中的噪声干扰;在骨干部分采用 DCNv2 替换 YOLOv5 模型的 C3 模块,以增强模型对裂缝形状的适应能力;在模型头部引入 SEH,以提高模型对裂缝特征的敏感度与辨识能力。将该模型用于无人机采集的水闸和大坝影像裂缝检测任务中,其 mAP@0.5 指标分别达到 86.2%和 84.9%;在消融实验中,与 YOLOv5 模型相比,YOLO-SEH 模型的 mAP@0.5 在大坝和水闸数据集上分别提升了 3.1、4.1 个百分点,精确率分别提升了 4.8、6.6 个百分点,召回率分别提升了 3.4、4.7 个百分点;与 Faster R-CNN、SSD300、YOLOv5、YOLOv7 和 YOLOv8 等模型相比,YOLO-SEH 模型在水工建筑物裂缝检测任务中表现出更优的检测性能。

关键词:水工建筑物;裂缝检测;深度学习;目标检测;YOLOv5s;可变形卷积网络;解耦头

Crack detection for hydraulic structures based on an improved YOLOv5s model//Li Yijing, Deng Jiahui, Yuan Shihong(*School of Infrastructure Engineering, Nanchang University*)

Abstract: Aiming at the problem that hydraulic structures are prone to deterioration such as water stains and calcium precipitation under complex natural environments and operating conditions, thereby complicating surface crack detection, this paper proposes a crack detection model YOLO-SEH integrating a deformable convolutional network (DCNv2) and scaling efficient decoupled head (SEH). An efficient channel attention mechanism is introduced into the model neck to suppress noise interference from complex backgrounds. In the backbone, DCNv2 is adopted to replace the C3 module of YOLOv5, improving the model's adaptability to irregular crack shapes. SEH is incorporated into the detection head to strengthen the model's sensitivity and discriminability to crack features. The proposed model was applied to crack detection on sluice and dam images captured by unmanned aerial vehicles (UAVs), achieving mAP@0.5 values of 86.2% and 84.9%, respectively. Ablation experiments show that compared with the YOLOv5 model, the mAP@0.5 of the YOLO-SEH model increased by 3.1 and 4.1 percentage points, the precision increased by 4.8 and 6.6 percentage points, and the recall increased by 3.4 and 4.7 percentage points for the two datasets, respectively. Furthermore, comparative experiments with the Faster R-CNN, SSD300, YOLOv5, YOLOv7, and YOLOv8 models demonstrate that the YOLO-SEH model achieves superior detection performance for crack detection of hydraulic structures.

Key words: hydraulic structures; crack detection; deep learning; object detection; YOLOv5s; deformable convolutional network; decoupled head

水工建筑物在运行过程中可能因结构形变、地震活动及水流冲刷而产生裂缝,进而面临安全风险。通过分析裂缝的几何形态及外观特性,可评估其劣化程度并推测潜在的成因,为结构健康监测提供科学依据。人工检测裂缝不仅耗时耗力,且存在较大的作业安全风险^[1]。目前,无人机摄影和计算机图像处理已成为裂缝检测的主要手段。然而,传统图

像处理方法(如阈值分割^[2]、边缘检测^[3-5]、区域生长^[6-7]等)过度依赖参数设定,普适性差,难以适应多样化的裂缝形态。相较于传统方法,机器学习方法(如支持向量机^[8]、决策树^[9]等)能够利用训练数据学习到更具代表性的特征。但该类方法严重依赖人工设计的特征,需要大量的专业知识和经验,且难以全面准确地描述裂缝特性,导致模型的泛化能力

基金项目:江西省自然科学基金项目(20232BAB204091)

作者简介:李怡静(1984—),女,副教授,博士,主要从事遥感影像和激光雷达数据处理研究。E-mail:ejinn@ncu.edu.cn

通信作者:邓佳蕙(2001—),女,硕士,主要从事水工建筑物裂缝智能检测研究。E-mail:1377027723@qq.com

不足。

深度学习方法的兴起为裂缝检测带来了新的突破,该方法能够自主地从图像数据集中学习特征,避免了传统方法的局限性^[10]。例如:Zhu 等^[11]将一种轻量级注意力机制的特征融合策略应用于单发多框探测器中,实现了混凝土裂缝的有效检测;刘万军等^[12]基于 Faster R-CNN 融合多尺度特征增强与密集连接结构,遥感识别特征提取性能提升,但推理效率偏低,难以满足实时应用需求;杨富强等^[13]利用迁移学习对 YOLOv3 模型进行了优化,结果表明,相较于直接使用原数据集进行训练的 YOLOv3 模型,改进模型的平均精度指标提升了 13.16 个百分点,显著提高了桥梁裂缝检测的准确率,这一改动虽提升了病害特征的表征能力和检测效率,但网络模型的参数复杂度仍然维持在较高水平;Li 等^[14]基于 YOLOv5 模型正则化优化策略去除了深度神经网络中存在的冗余参数,在自制的拱坝裂缝数据集上取得了较好的成果。

尽管深度学习中的目标检测算法已在裂缝识别领域取得了显著进步,仍存在对特定复杂背景检测效果不佳的问题。同时,由于水工建筑物容易出现水渍、析钙等现象,表面呈现灰白色、黑色、斑块状或条带状分布等劣化现象,使得裂缝与背景之间差异不明显,给裂缝检测带来了更高的挑战。YOLOv5 模型在满足工业领域对效率与成本双重考量方面,展现出了较高的潜力与价值。本文基于 YOLOv5 模型提出了一种融合可变形卷积网络(DCNv2)^[15]与缩放解耦头(SEH)的 YOLO-SEH 模型,并与其他模型进行了对比。

1 模型构建

1.1 YOLOv5s 模型优化策略

YOLOv5 模型主要由骨干网络(Backbone)、颈

部(Neck)和预测头(Head)组成。骨干网络由空间金字塔池化(SPPF)模块和多个卷积(Conv)模块、自适应聚合模块 C3 组成,负责提取输入图像的特征;颈部采用了上采样(Upsample)和拼接(Concat)操作,负责对骨干网络提取的特征进行多尺度特征融合,并把这些特征传递给预测头;预测头则基于这些特征完成目标检测的分类、回归和置信度预测任务。YOLOv5 目标检测框架根据模型深度和宽度参数的不同,提供了 4 个可扩展的版本,按照计算复杂度从低到高依次为:YOLOv5s、YOLOv5m、YOLOv5l 和 YOLOv5x。YOLOv5s 作为 YOLOv5 系列中轻量化程度最高的版本,具有参数量少、推理速度快、硬件部署门槛低等优势,可适配水工场景实时监测需求,因此本文基于 YOLOv5s 模型展开研究。

为提高水工建筑物的裂缝检测精度,本文对 YOLOv5s 进行了如下优化(图 1):在骨干网络部分引入可变形卷积技术(DCNv2),将卷积神经网络(CNN)中的卷积核固定采样模式优化为随感受野变化的动态调整模式,以更好地捕捉水工建筑物中形态多样的裂缝细节;在颈部引入高效通道注意力机制(ECA)^[16],使模型自适应地强化裂缝特征,抑制水渍、析钙等背景噪声的干扰;提出一种缩放解耦头(scaling efficient decoupled head, SEH),将预测头部分的分类和定位任务分离,以更好地适应各自关注的特征,同时根据模型规模自动调整通道数,用少量计算代价提升模型对复杂背景下裂缝特征的敏感度与辨识能力。

1.2 DCNv2 可变形卷积

传统二维卷积核在处理输入的影像特征图时,常遵循网格 R 的固定采样模式,并在每个采样点应用权重 k 进行加权求和。然而,这种方法受限于其深度特征的固有特性,其感受野范围有限,难以充分捕捉裂缝区域的全局上下文信息。因此,本文采用

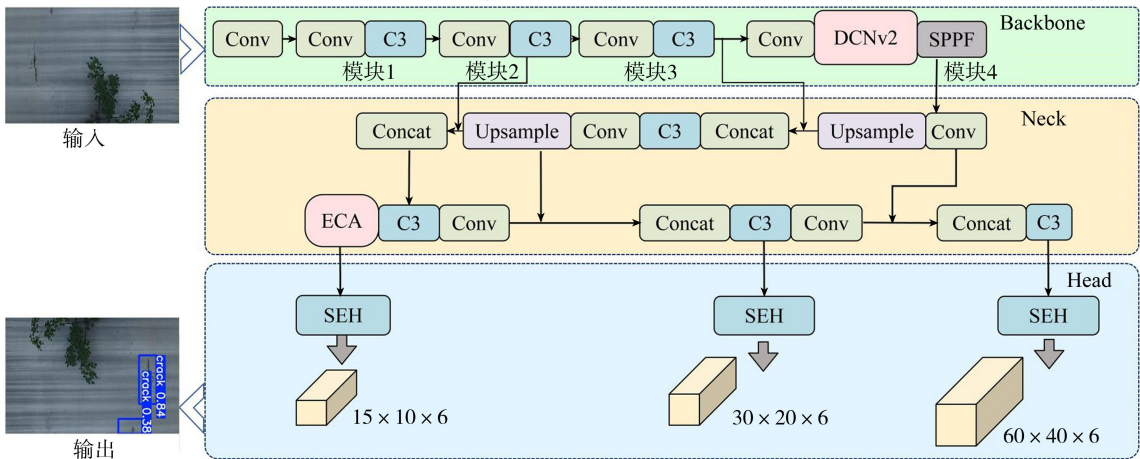


图 1 YOLO-SEH 网络的总体结构

DCNv2,旨在提升模型对裂缝几何形变的适应能力^[17],从而学习到对水工建筑物裂缝中几何形变更为稳健的深度特征表示,进而增强模型的鲁棒性和适用性。

在对水工建筑物影像中的裂缝进行特征提取时,传统标准卷积采样如图 2(a)所示,可变形卷积采样如图 2(b)所示,其中圆点符号代表从图像特征图中提取的激活单元。这些圆点经由箭头指向的后续单元,各自对应于先前特征图上突出标记的单元位置。经过可变形卷积的处理后,所得单元点与物体空间位置之间的关联性增强,从而能够更高效地利用目标的特征信息。

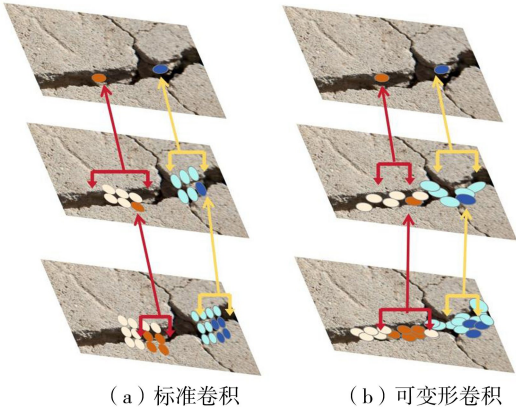


图 2 标准卷积和可变形卷积对裂缝特征的提取对比

1.3 ECA 注意力机制

针对原模型在特征表达及关键信息关注方面的不足,以及通道间信息交互受限导致的误检等问题(如将水工建筑物表面的水渍、析钙等劣化现象误判为裂缝)^[18],本文将 ECA 模块嵌入网络结构中,以抑制背景噪声的干扰,同时增强对裂缝特征的提取能力。ECA 采用一维卷积增强通道间局部交互,避免降维造成的信息损失,最大程度地保留裂缝的细微信息,降低漏检和误检风险。

骨干网络和颈部网络是 YOLOv5s 特征提取与多尺度融合的核心结构,二者的结构设计直接决定模型检测性能。鉴于原模型的骨干和颈部结构引入 ECA 可能存在不确定性,因此本文探讨了在这两层结构的不同位置嵌入 ECA 模块的影响。为避免注意力机制过早介入导致特征提取出现偏差,将注意力模块分别部署在骨干网络和颈部网络的末端层。由于骨干部分特征图分辨率高,插入 ECA 可增强全局上下文捕捉能力,提升目标整体识别效果,但可能忽略局部细节,对小目标检测效果有限。颈部部分特征图分辨率低但细节丰富,插入 ECA 可以增强模型对小目标的敏感性,在裂缝检测任务中表现更优。通过后续实验验证上述分析,进一步明确 ECA 模块的最佳插入位置为颈部。

1.4 SEH

YOLOv5 模型采用的耦合头设计未对分类任务和回归任务进行分离,而是将融合多层的特征图同时输出分类、回归和目标性信息。这种耦合头设计在裂缝检测任务中易引发任务干扰,且对复杂目标的适应性不足,影响了模型的检测性能。

YOLOv6 模型^[19]的混合通道策略提高了解耦头的效率,其中 3×3 卷积层被精简为一层。然而,尽管加入了解耦头,模型的计算复杂度依然较高,并且解耦头的大小不具备随模型尺寸调整的灵活性,这对注重检测效率的轻量级物体检测网络而言是不利的^[20]。

为解决上述问题,本文对 YOLOv6 模型的解耦头进行了改进。YOLOv6 模型的头部采用固定通道配置,而 YOLOv5s 模型虽具备通道调整机制,但其骨干与颈部结构并未直接受通道数影响。因此,本文提出通道缩放因子(CSR)概念,CSR 是针对高效解耦头设计的模型尺寸自适应超参数,具体由以下公式实现:

$$K_{CSR} = C_{SEH} / C_{FPN} \tag{1}$$

其中

$$C_{FPN} = C_{FPN-base} \omega_m$$

式中: C_{SEH} 为 YOLO-SEH 模型解耦头中卷积层的实际输出通道数; C_{FPN} 为颈部特征金字塔网络(FPN)的实际通道数; $C_{FPN-base}$ 为 FPN 的基准通道数; ω_m 为通道宽度乘数。

如图 3 所示,YOLO-SEH 模型的头部网络通过结合骨干与颈部网络的 CSR 动态调整通道数,从而能够针对不同模型尺寸优化检测头部设计。随着 CSR 的变化,特征图通道数相应改变,使网络能够根据模型大小灵活调节特征图通道数。在水工建筑物裂缝检测中,小尺寸模型如 YOLOv5 模型可通过该方法减少参数量,避免因引入大尺寸解耦头导致参数冗余和性能下降问题,从而实现模型的轻量化与高效性。

2 实验分析

2.1 实验环境

实验环境配置为 Windows11 64bit 操作系统,CPU 为 Intel(R) Core(TM) i7-8565U@1.80GHz,GPU 为 NVIDIA GeForce MX230,7.9 G 内存。深度学习工具使用 PyTorch1.11,图形处理器驱动为 CUDA11.5,cuDNN8,编程语言使用 Python 3.11.7,开发环境为 PyCharm。参数设置上,本文采用随机梯度下降优化器,算法训练采用周期性衰减学习率策略,初始学习率设定为 0.01,学习率衰减周期为 200 个训练轮次,批量尺寸为 8,权重衰减系数取 0.0005。

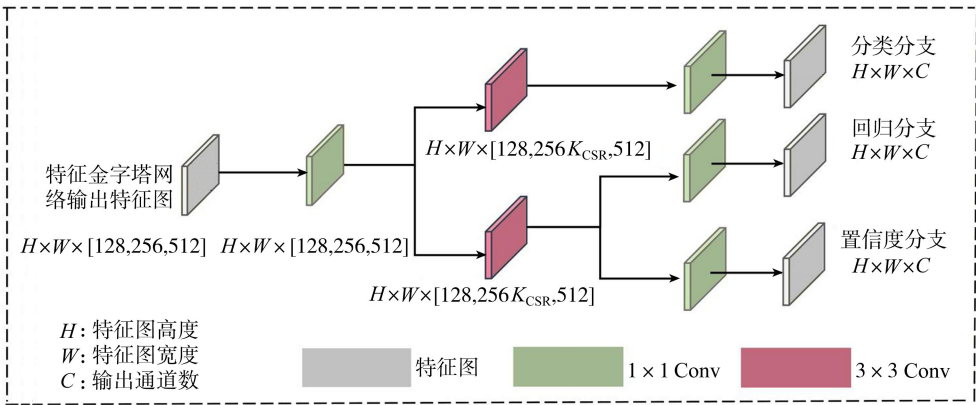


图3 YOLO-SEH 的解耦头结构

2.2 数据来源

本文构建了两套数据集用于 YOLO-SEH 模型的训练和测试。第一套数据集来自某进水闸的无人机序列影像和公开数据集 DeepCrack^[21]。无人机影像大小为 5472×3648 像素,数量为 400 张。挑选可用的 20 张图片进行镜像、旋转、色彩变换等方式增强数据,再加入 537 张大小为 544×384 像素的 DeepCrack 图像进行扩充,最后形成 1000 张大小为 480×320 像素的裂缝图像,如图 4 所示。

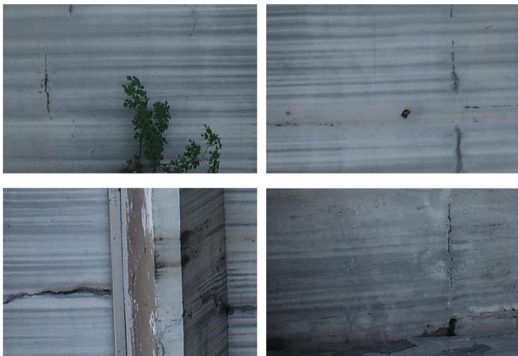


图4 水闸裂缝数据集样例

第二套数据集为本文独立构建的裂缝数据集和部分文献数据集^[22]。获得的大坝裂缝影像数量为 3800 张,选出可用图片 500 张,经过数据增强、裁剪后形成 416×416 像素与 200×200 像素的 2000 张裂缝图像,如图 5 所示。采用 Labellmg 软件对两个数



图5 大坝裂缝数据集样例

据集中的裂缝实施精确标注,并依据 7:2:1 的比例随机分配这些图像与标签至训练集、验证集及测试集中。

2.3 模型性能评价指标

为了评估 YOLO-SEH 模型的性能,采用均值平均精度(mean average precision, mAP, 本文交并比阈值取 0.5,记作 mAP@0.5)、准确率(P)以及召回率(R)等关键指标进行量化评价。

2.4 实验结果与分析

2.4.1 ECA 位置对模型性能的影响

在 YOLOv5s 模型的骨干与颈部分别引入了 ECA 模块后的实验结果如表 1 所示。在两个数据集的 YOLOv5s 裂缝检测中,将 ECA 融合至骨干网络时 mAP@0.5 涨幅较小,而将其融合至颈部部分 C3 模块的最后一层时检测效果表现更佳,能更好地适应裂缝检测的任务需求。骨干网络主要负责提取基础的图像特征,它所处理的是相对底层、宽泛的图像信息。此时引入 ECA,虽然能在一定程度上调整通道注意力,但由于基础特征的广泛性和一般性,对最终检测效果的提升较为有限。而颈部网络处于模型的中间过渡位置,起着承上启下的关键作用,它接收来自骨干网络的基础特征,并将其进一步整合,传递给检测头用于目标检测。将 ECA 模块加入颈部网络后,ECA 能够对这些中间特征进行更具针对性的通道注意力调整,从而让模型输出更贴合任务需求的特征表示,提升了模型在水工建筑物裂缝检测场景下的适应性和检测性能。

表1 ECA 模块不同引入位置时模型在水闸和大坝裂缝数据集上的评价指标

引入位置	水闸裂缝数据集			大坝裂缝数据集		
	$P/\%$	$R/\%$	mAP@0.5/ $\%$	$P/\%$	$R/\%$	mAP@0.5/ $\%$
未引入	79.2	79.0	82.1	79.0	78.8	81.8
骨干网络	81.1	79.6	82.7	79.4	79.0	82.2
颈部网络	82.3	80.2	84.2	81.1	80.6	83.1

2.4.2 注意力机制对模型性能的影响

为验证融合 ECA 模块的 YOLOv5s 模型在水工建筑物表面检测裂缝的优势,本文基于 YOLOv5s 模型分别加入了坐标注意力机制 CA^[23]、经典的空间通道注意力机制 CBAM^[24]和经典通道注意力机制 SE^[25]。水闸数据集的具体结果如表 2 所示,加入 ECA 模块后的 mAP@0.5 提升了 2.1 个百分点,精确率和召回率分别提升了 3.1 和 1.2 个百分点;大坝数据集中加入 ECA 模块后的 mAP@0.5 提高了 1.3 个百分点,精确率和召回率分别提升了 2.1 和 1.8 个百分点。从表 2 可知,YOLOv5s 并不适宜无差别地整合所有注意力机制。引入 SE 模块后,模型的漏检率反而呈现上升趋势,说明模型在处理深层信息方面仍存在局限性,未能有效提升其捕捉能力。引入传统的 CA 及 CBAM 模块后,模型大体上保持了原有的精度水平,这一结果表明,这两种注意力机制并未使网络性能产生实质上的提升。相较于其他 3 种典型的注意力机制,ECA 在水闸裂缝识别任务中表现优越,有效验证了其在提高模型检测精度方面的能力。

表 2 融合不同注意力机制时模型在水闸和大坝裂缝数据集上的性能对比

注意力机制	水闸裂缝数据集			大坝裂缝数据集		
	P/ %	R/ %	mAP@0.5/ %	P/ %	R/ %	mAP@0.5/ %
原模型	79.2	79.0	82.1	79.0	78.8	81.8
CA	81.9	78.6	81.9	80.7	79.8	82.2
CBAM	79.8	79.4	83.2	80.4	79.0	81.9
SE	78.8	77.9	80.2	81.9	79.9	82.8
ECA	82.3	80.2	84.2	81.1	80.6	83.1

2.4.3 CSR 值对模型性能的影响

为量化不同 CSR 取值对模型检测性能与计算

表 3 不同 CSR 取值时模型在水闸和大坝裂缝数据集上的性能对比

CSR 值	水闸裂缝数据集					大坝裂缝数据集				
	P/%	R/%	mAP@0.5/%	参数量/10 ⁶	GFLOPs	P/%	R/%	mAP@0.5/%	参数量/10 ⁶	GFLOPs
0.50	78.4	76.2	74.1	5.1	15.3	75.4	74.1	76.5	5.1	15.3
0.75	82.3	79.8	78.5	6.8	19.7	79.1	77.9	80.5	6.8	19.7
1.00	85.9	81.9	84.3	8.9	26.3	80.8	79.5	82.9	8.9	26.3
1.25	85.9	79.2	81.9	11.1	31.2	81.2	79.2	81.5	11.1	31.2

表 4 各改进模型在水闸和大坝裂缝数据集上的评价指标

模型	ECA	DCNv2	SEH	参数量	GFLOPs	水闸裂缝数据集			大坝裂缝数据集		
						P/%	R/%	mAP@0.5/%	P/%	R/%	mAP@0.5/%
1	×	×	×	7022326	15.9	79.2	79.0	82.1	79.0	78.8	81.8
2	√	×	×	7022329	15.9	82.3	80.2	84.2	81.1	80.6	83.1
3	×	√	×	7084817	15.5	83.1	81.0	83.8	81.4	80.7	83.5
4	×	×	√	8901110	26.3	83.9	81.9	84.3	80.8	79.5	82.9
5	√	√	×	7084820	15.5	84.2	81.5	83.9	82.3	81.4	84.2
6	√	×	√	8901113	25.5	84.4	82.3	84.1	82.1	78.4	82.3
7	×	√	√	8963601	25.8	84.6	82.6	85.9	83.2	81.9	83.7
8	√	√	√	8963604	25.8	85.8	83.7	86.2	83.8	82.2	84.9

注:“√”表示引入该模块,“×”表示未引入该模块。

效率的影响规律并确定最优 CSR 取值,以 YOLOv5s 融合 SEH 解耦头为基础,根据水工建筑物裂缝检测场景对模型精度与轻量化的双重需求,结合通道缩放的合理区间,设置 CSR 为 0.50、0.75、1.00、1.25 共 4 个水平,基于水闸与大坝裂缝数据集开展对比实验,以覆盖通道压缩、适配、过度扩张 3 种典型状态。

表 3 为不同 CSR 取值时模型在水闸和大坝裂缝数据集上的性能对比。由表 3 可知,CSR 为 0.50 时 SEH 解耦头通道过度压缩,细粒度特征丢失,模型检测性能明显下降;CSR 为 0.75 时 SEH 解耦头通道资源略有补充,性能较 CSR 为 0.50 时提升,但仍无法充分捕获复杂裂缝特征;CSR 为 1.25 时 SEH 解耦头通道冗余,导致计算量大幅上涨,浮点运算总量(GFLOPs)较 CSR 为 1.00 时增加了 4.9,基于水闸、大坝数据集的 mAP@0.5 指标较最优值分别低 2.4、1.4 个百分点;YOLOv5s 融合 SEH 解耦头的最优取值为 CSR=1.00,在该取值下,模型基本实现了检测性能峰值,同时参数量与 GFLOPs 处于小模型边缘部署合理区间,既保证了水工建筑物裂缝的精准检测,又避免了通道冗余带来的计算效率损失。

2.4.4 消融实验

本文设计了 8 组基于 YOLOv5s 模型的消融实验,并在统一的超参数配置与训练框架下实施,确保每组条件的一致性,评价指标如表 4 所示。以水闸裂缝数据集为例,模型 2 为了增强模型对重要特征的提取能力,在网络颈部部分最后一层加入了 ECA 注意力机制,mAP@0.5 提升了 2.1 个百分点,在几乎没有增加网络参数且 GFLOPs 与原模型一致的前提下,增强了网络的定位精度与边界框预测效能;为更好地捕捉裂缝的复杂形态,模型 3 在网络骨干部

分的最后一层用 DCNv2 可变形卷积替换了 C3 模块,mAP@0.5 提升了 1.7 个百分点;为使模型在检测头中分别处理分类、定位和置信度检测任务以防任务互相干扰,模型 4 用 SEH 模块替换 YOLOv5 耦合头,mAP@0.5 提升了 2.2 个百分点;模型 5、6、7 分别加入两个模块,网络性能依然保持良好,这表明它们之间未产生相互干扰,验证了模块融合的有效性。模型 8 在轻量化的基础上加入了可变形卷积和解耦头,mAP@0.5 提升了 4.1 个百分点,可见,将这两种元素共同整合进网络架构中,能更好地提升模型的特征提取能力。

图 6 展示了水闸影像的部分裂缝检测结果,橙色标记为漏检的裂缝,红色标记为误检的裂缝。该组数据存在较多背景噪声,裂缝特征不明显,YOLO-SEH 模型相较于 YOLOv5s 模型的检测结果表现出更高的完整性、置信度和更低的漏检率。

图像 2 的裂缝特征不明显,YOLOv5s 模型的检测完整性不足,而 YOLO-SEH 模型通过提取更丰富的特征信息,降低了漏检率。在裂缝灰度值与水闸材质很相似且有析钙的图像 3 中和存在水渍的图像 4 中,YOLOv5s 模型将水渍和析钙误检为裂缝,且存在漏检现象,优化后的所有模型纠正了这些误检,并

大幅提高了识别精度。对于图像 1 和图像 3,优化后模型的置信度和裂缝识别率有较大提升。综合分析表明,YOLO-SEH 模型在水闸裂缝检测中的性能明显提升,验证了其有效性。

图 7 为 YOLOv5s 和 YOLO-SEH 模型在不同数据集上的 $P-R$ 曲线,通过计算曲线下面积可以发现,曲线与坐标轴围成的区域面积与模型性能呈正相关关系,其中覆盖面积最大的曲线所对应的模型具有最优的综合分类能力。在水闸和大坝裂缝数据集上,YOLO-SEH 模型曲线覆盖面积更大,这表明其在精确率和召回率之间达到了更好的平衡,整体性能优于原模型。

图 8 对比了 YOLOv5s 与 YOLO-SEH 模型在 mAP@0.5 指标下的性能曲线。当训练迭代次数达到 75 次时,改进后的 YOLO-SEH 网络逐渐趋于稳定。通过对 YOLO-SEH 模型的性能曲线进行深入分析,可以发现其收敛特性较原模型具有优势:一方面,改进后算法的收敛速度更快;另一方面,在达到稳定状态后,其 mAP@0.5 较原模型有较大提升,这一结果验证了所提出改进方法的有效性。

2.4.5 模型性能对比

为保障对比实验的严谨性,本文在统一超参数

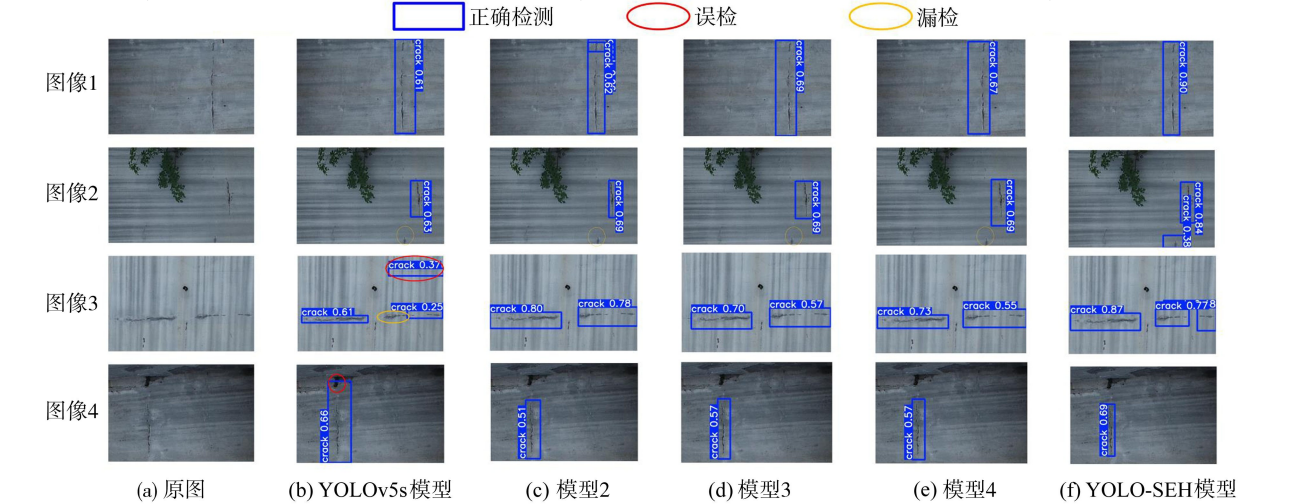


图 6 各改进模型对水闸裂缝图像的检测结果

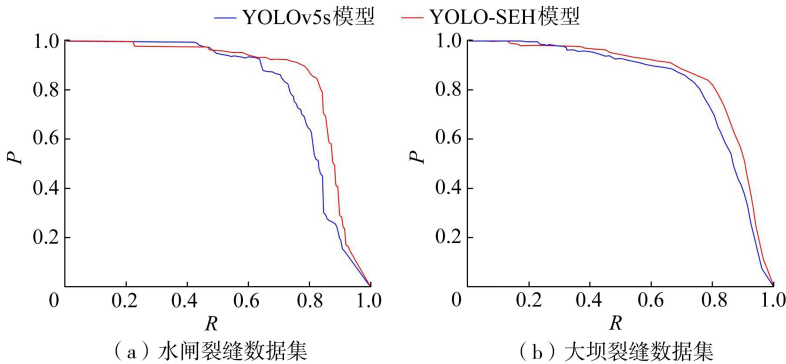


图 7 模型在水闸和大坝裂缝数据集上的 $P-R$ 曲线

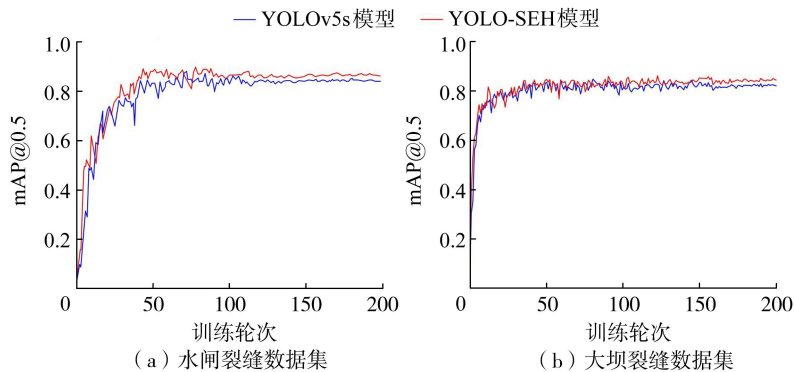


图 8 模型在水闸和大坝裂缝数据集上的 mAP@0.5 曲线

配置与训练框架的基础上,选取 Faster R-CNN^[26]、SSD300^[27]、YOLOv3^[28]、YOLOv5、YOLOv7^[29]、YOLOv8^[30]共 6 种目标检测模型,与本文提出的改进模型 YOLO-SEH 进行性能对比。评估指标聚焦于水闸和大坝两类裂缝数据集的检测精度。由表 5 和表 6 可知,相较于主流检测模型,YOLO-SEH 模型在核心精度指标上优势显著,在水闸裂缝数据集中,其精度、召回率和 mAP@0.5 分别达到 85.8%、83.7%、86.2%,较 YOLOv8 模型分别提升 3.1、5.9、1.7 个百分点,较 YOLOv5 模型分别提升 6.6、4.7、4.1 个百分点,有效增强了复杂场景下目标的识别与捕获能力,降低了漏检与误判风险。同时,该模型在精度跃升的前提下实现了计算量的可控增长,其参数量为 8.96×10^6 、GFLOPs 为 25.8,相较 YOLOv8 模型的参数量 (10.66×10^6) 和 GFLOPs (28.7) 分别降低了 16% 和 10.1%,仅略高于 YOLOv7、YOLOv3 等轻量化模型的参数规模,且保持了模型实时推理速度 (FPS) 为 31.41,较 YOLOv8 和 YOLOv7 模型分别提升了 12.6% 和 22.2%,仅略低于 YOLOv5 模型的推理速度。

表 5 不同网络中在水闸裂缝数据集的实验结果

模型	P/%	R/%	mAP@0.5%	FPS	参数量/ 10^6	GFLOPs
Faster R-CNN	72.9	53.5	72.0	2.74	41.18	10.4
SSD300	76.1	54.0	75.6	15.40	26.29	31.3
YOLOv3	77.2	51.8	76.2	20.13	8.30	13.1
YOLOv5	79.2	79.0	82.1	35.71	7.00	15.6
YOLOv7	80.6	76.5	82.8	25.70	5.90	13.1
YOLOv8	82.7	77.8	84.5	27.90	10.66	28.7
YOLO-SEH	85.8	83.7	86.2	31.41	8.96	25.8

表 6 不同网络中在大坝裂缝数据集的实验结果

模型	P/%	R/%	mAP@0.5%	FPS	参数量/ 10^6	GFLOPs
Faster R-CNN	73.8	55.7	73.2	3.54	41.18	10.4
SSD300	77.1	57.3	78.1	16.70	26.29	31.3
YOLOv3	78.2	56.7	79.7	22.05	8.30	13.1
YOLOv5	79.0	78.8	81.8	36.12	7.00	15.6
YOLOv7	81.2	75.4	82.4	29.97	5.90	13.1
YOLOv8	83.4	79.9	83.2	26.53	10.66	28.7
YOLO-SEH	83.8	82.2	84.9	33.22	8.96	25.8

图 9 为各模型对水闸裂缝部分图像的检测结果。在裂缝区域的检测效能评估中,尤其针对裂缝特征较为隐蔽的图像 2 与图像 3,尽管 Faster R-CNN、SSD300、YOLOv3 以及 YOLOv5 模型均能够实现对裂缝的基本识别,但它们在检测完整性及准确性方面存在不足。图像 3 中树枝与裂缝的灰度值存在相似性,导致 YOLOv3 模型错误地将部分树枝的灰度值识别为裂缝。相比之下,YOLO-SEH 模型不仅成功检测出了所有的裂缝,同时有效地避免了将树枝误判为裂缝的情况。

图 10 为各模型对大坝裂缝部分图像的检测结果。在所示的场景中,前几个模型都未能检测出图像 5 靠近边缘的部分裂缝以及在图像 7 主裂缝上的细小裂缝,而 YOLO-SEH 模型在特征提取方面展现出了更强的能力,能够识别出以往模型难以检测到的裂缝细节,从而显著降低了漏检率。由图像 4 和图像 6 可以看出,改进后的模型在识别先置信度较低的目标方面,展现出了更优的性能。

2.5 讨论

本文针对水闸与大坝两类裂缝数据集设计并实施了一系列对比实验。实验结果表明,YOLO-SEH 模型在裂缝识别任务中表现优异。在检测精度方面,该模型不仅能够更准确地定位裂缝区域,还有效降低了漏检率和误检率,且在复杂背景干扰下表现出优异的抗噪性能;在计算效率方面,YOLO-SEH 与 YOLOv5s 模型的推理速度相当,且显著快于其他对比模型,水工建筑物单张图像推理耗时约 0.031 s,展现了精度与效率间的良好平衡。YOLO-SEH 模型凭借其良好的特征表征能力和背景噪声抑制效果,能够高效地检测复杂表面水工建筑物的裂缝形态。

由于 YOLO-SEH 模型的推理速度低于 YOLOv5s 模型,为了优化检测性能与速度之间的权衡,未来将专注于研发更为轻量化的解耦头。本文仅对水闸和大坝两类水工建筑物的裂缝进行检测,而实际水工建筑物中的劣化现象复杂多样,下一步

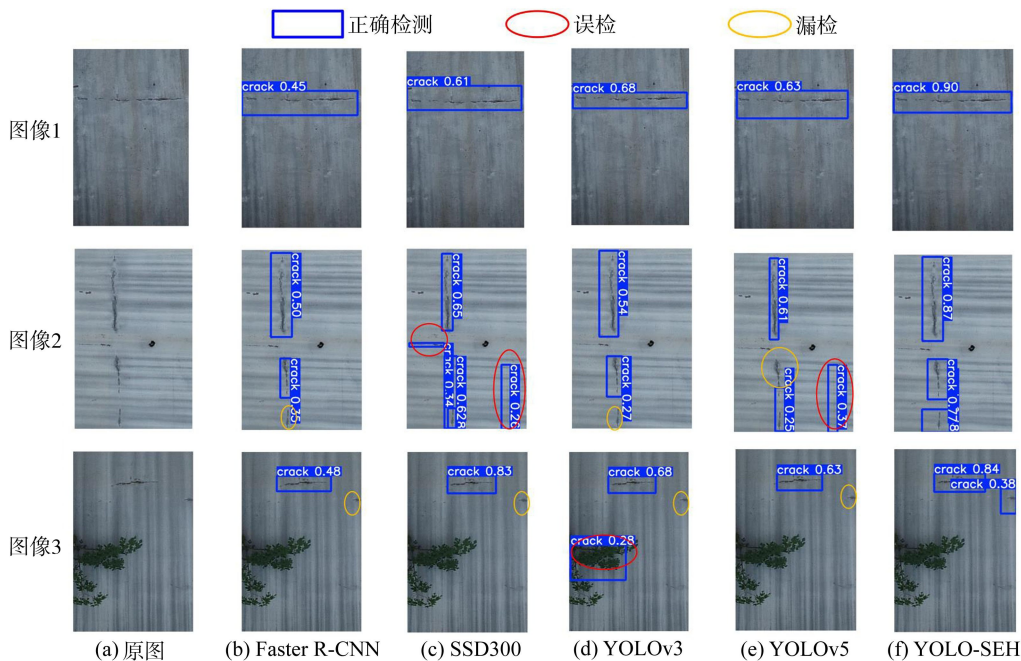


图9 各模型对水闸裂缝图像的检测效果

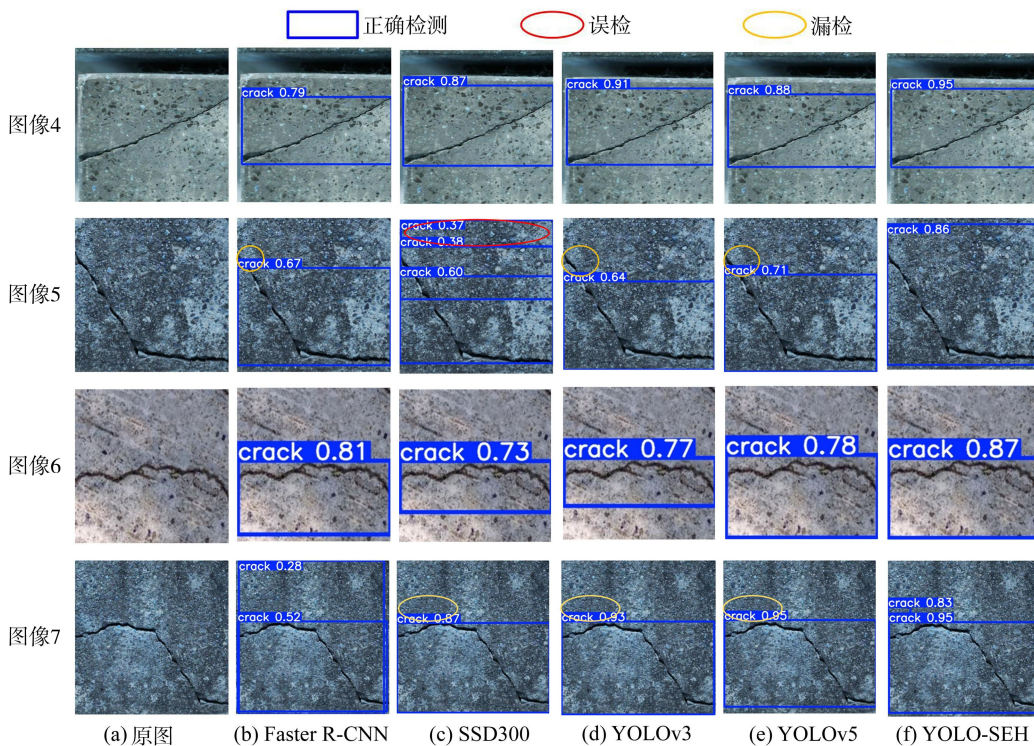


图10 各模型对大坝裂缝图像的检测效果

可采用多模态采集手段获取不同工况下典型水工建筑物的劣化样本,并将 YOLO-SEH 模型的检测目标从单一裂缝拓展至混凝土碳化、渗漏、冻融破坏等多类典型水工劣化类型,进一步提升模型的泛化能力和检测精度,使其更好地适应水工建筑物复杂多变的实际环境。此外,后续研究可考虑采用更高性能的图像采集设备,以获取分辨率更高、质量更优的数据样本,从而进一步提升模型对水工建筑物裂缝的识别能力。

3 结 语

本文针对水工建筑物表面水渍、析钙等现象干扰裂缝检测精度的问题,提出了基于可变形卷积与缩放解耦头的目标检测模型 YOLO-SEH。模型骨干部分引入可变形卷积 DCNv2,有效强化了复杂背景下裂缝的识别能力,为后续特征提取奠定坚实基础;颈部集成 ECA 注意力机制,能够精准区分裂缝与水渍、析钙的特征差异,显著降低了误检风险;头部引

入自适应缩放解耦头 (SEH), 可根据检测网络的具体规模灵活调整通道数量, 在仅产生轻微速度损失的前提下, 大幅提升裂缝检测精度, 各部分协同作用形成了适配复杂水工场景的高效检测架构。实验结果表明, 相较于 YOLOv5 模型, YOLO-SEH 模型在大坝和水闸裂缝数据集上均具有更优异的检测性能, mAP@0.5 分别提升了 3.1、4.1 个百分点, 精确率分别提升了 4.8、6.6 个百分点, 召回率分别提升了 3.4、4.7 个百分点。在与 Faster R-CNN、SSD300、YOLOv3、YOLOv7 等主流检测模型的对比实验中, YOLO-SEH 模型取得最优检测结果。该模型能够在水工建筑物复杂背景干扰下保持稳定的检测效能, 实现检测精度与速度的良好平衡, 为水工建筑物裂缝检测提供切实有效的技术解决方案。

参考文献:

[1] 王一兵,包腾飞,高治鑫. 基于 LabVIEW+VDM 的混凝土坝裂缝检测方法[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (5): 76-82. (Wang Yibing, Bao Tengfei, Gao Zhixin. Crack detection method of concrete dams based on LabVIEW+VDM[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(5): 76-82. (in Chinese))

[2] 徐辉,贺俊吉,方亮. 基于图像显著性的大坝裂缝检测[J]. 工业控制计算机, 2018, 31(9): 19-20. (Xu Hui, He Junji, Fang Liang. Dam crack detection based on image saliency[J]. Industrial Control Computer, 2018, 31 (9): 19-20. (in Chinese))

[3] 陈伟,范新南,李敏,等. 基于 Gabor 算子的人工蜂群算法大坝裂缝检测[J]. 微处理机, 2015, 36 (4): 32-38. (Chen Wei, Fan Xinnan, Li Min, et al. Dam crack detection of artificial colony algorithm based on Gabor operator[J]. Microprocessors, 2015, 36 (4): 32-38. (in Chinese))

[4] 张大伟,许梦钊,马莉,等. 水下大坝裂缝图像分割方法研究[J]. 软件导刊, 2016, 15 (9): 170-172. (Zhang Dawei, Xu Mengzhao, Ma Li, et al. Research on underwater dam crack image segmentation method [J]. Software Guide, 2016, 15(9): 170-172. (in Chinese))

[5] 张来胜,李亚萍. 融合视觉处理的堤坝水下裂缝检测方法[J]. 软件导刊, 2022, 21 (6): 188-193. (Zhang Laisheng, Li Yaping. Underwater crack detection method of dam with visual processing[J]. Software Guide, 2022, 21 (6): 188-193. (in Chinese))

[6] 张小伟,包腾飞,高兴和. 基于计算机视觉的混凝土坝裂缝检测方法[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (5): 83-88. (Zhang Xiaowei, Bao Tengfei, Gao Xinghe. Crack detection method of concrete dams based on computer vision[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(5): 83-88. (in Chinese))

[7] 张小伟,包腾飞. 基于局部大津阈值与区域生长的坝面细小裂缝识别分割算法[J]. 水电能源科学, 2022, 40 (2): 97-100. (Zhang Xiaowei, Bao Tengfei. Identification and segmentation algorithm of small cracks on dam surface based on local OTSU threshold and regional growth [J]. Water Resources and Power, 2022, 40 (2): 97-100. (in Chinese))

[8] Liu Zhiwei, Suandi S A, Ohashi T, et al. Tunnel crack detection and classification system based on image processing [C]//Machine Vision Applications in Industrial Inspection X. San Jose:SPIE, 2002:145-152.

[9] 杨吉才. 基于 ID3 决策树分类模型的自动评估学生技能水平的算法[J]. 无线互联科技, 2024, 21 (18): 17-22. (Yang Jicai. Algorithm for automatically evaluating student skill levels based on ID3 decision tree classification model [J]. Wireless Internet Science and Technology, 2024, 21(18): 17-22. (in Chinese))

[10] 牛慧余,包腾飞,李扬涛,等. 基于改进 Mask R-CNN 的混凝土坝裂缝像素级检测方法[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43 (1): 87-92. (Niu Huiyu, Bao Tengfei, Li Yangtao, et al. Pixel-level crack detection method of concrete dam based on improved Mask R-CNN [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(1): 87-92. (in Chinese))

[11] Zhu Wei, Zhang Hui, Eastwood J, et al. Concrete crack detection using lightweight attention feature fusion single shot multibox detector [J]. Knowledge-Based Systems, 2023, 261:110216.

[12] 刘万军,高健康,曲海成,等. 多尺度特征增强的遥感图像舰船目标检测[J]. 自然资源遥感, 2021, 33 (3): 97-106. (Liu Wanjun, Gao Jiankang, Qu Haicheng, et al. Ship detection based on multi-scale feature enhancement of remote sensing images [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2021, 33(3): 97-106. (in Chinese))

[13] 杨富强,余波,赵嘉彬,等. 基于改进 YOLOv3 的桥梁底部裂缝目标检测方法[J]. 中国科技论文, 2022, 17 (3): 252-259. (Yang Fuqiang, Yu Bo, Zhao Jiabin, et al. Crack target detection method of bridge bottom based on YOLOv3[J]. China Sciencepaper, 2022, 17(3): 252-259. (in Chinese))

[14] Li Yangtao, Bao Tengfei. A real-time multi-defect automatic identification framework for concrete dams via improved YOLOv5 and knowledge distillation[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2023, 13 (6/7): 1333-1349.

[15] Zhu Xizhou, Hu Han, Lin S, et al. Deformable convnets v2: More deformable, better results [C]//Proceedings of the 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Long Beach: IEEE, 2019: 9308-9316.

[16] Wang Qilong, Wu Banggu, Zhu Pengfei, et al. ECA-Net:

efficient channel attention for deep convolutional neural networks [C]//Proceedings of the 2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Seattle:IEEE,2020;11534-11542.

[17] 施慧慧,徐雁南,滕文秀,等. 高分辨率遥感影像深度迁移可变形卷积的场景分类法 [J]. 测绘学报,2021,50 (5):652-663. (Shi Huihui,Xu Yannan,Teng Wenxiu,et al. Scene classification of high-resolution remote sensing imagery based on deep transfer deformable convolutional neural networks [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2021,50 (5):652-663. (in Chinese))

[18] 何旺,钮新强,田金章,等. 基于 MobileNetV2-DeepLabv3+的混凝土坝水下裂缝语义分割模型 [J]. 水利水电科技进展,2024,44 (6):106-112. (He Wang,Niu Xinqiang,Tian Jinzhang,et al. Semantic segmentation model for underwater cracks in concrete dams based on MobileNetV2-DeepLabv3+[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44 (6):106-112. (in Chinese))

[19] Li C Y,Li L L,Jiang H L,et al. YOLOv6:a single-stage object detection framework for industrial applications [J/OL]. arXiv: 2209. 02976, 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.02976>.

[20] 叶栢铖,朱尤攀,周永康,等. 轻量级目标检测算法综述 [J]. 红外技术,2025,47 (3):289-298. (Ye Baicheng,Zhu Youpan,Zhou Yongkang,et al. Review of lightweight object detection algorithms [J]. Infrared Technology,2025,47 (3):289-298. (in Chinese))

[21] Liu Yahui,Yao Jian,Lu Xiaohu,et al. DeepCrack:a deep hierarchical feature learning architecture for crack segmentation [J]. Neurocomputing,2019,338:139-153.

[22] 高文飞. 基于 CW-YOLOv5 网络的大坝裂缝检测研究 [J]. 水利技术监督,2024 (12):30-33. (Gao Wenfei. Research on dam crack detection based on CW-YOLOv5 network [J]. Technical Supervision in Water Resources,2024 (12):30-33. (in Chinese))

[23] Hou Qibin,Zhou Daquan,Feng Jiashi. Coordinate attention for efficient mobile network design [C]//Proceedings of the 2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Nashville: IEEE, 2021: 13713-13722.

[24] Woo S,Park J,Lee J Y,et al. CBAM:convolutional block attention module [C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV). Munich: Springer,2018;3-19.

[25] Hu Jie, Shen Li, Sun Gang. Squeeze-and-excitation networks [C]//Proceedings of the 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Salt Lake City:IEEE,2018;7132-7141.

[26] Ren Shaoqing, He Kaiming, Girshick R, et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2017,39 (6):1137-1149.

[27] Liu Wei, Anguelov D, Erhan D, et al. SSD: single shot MultiBox detector [C]//European Conference on Computer Vision. Amsterdam:Springer,2016;21-37.

[28] Farhadi A, Redmon J. YOLOv3: an incremental improvement [C]//Computer Vision and Pattern Recognition. Berlin:Springer,2018,1804:1-6.

[29] Wang C Y,Bochkovskiy A,Liao H Y M. YOLOv7;trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors [C]//Proceedings of the 2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Vancouver:IEEE,2023;7464-7475.

[30] Ultralytics. YOLOv8 (2023) [EB/OL]. (2023-04-01). <https://github.com/ultralytics/ultralytics>.
(收稿日期:2025 - 03 - 25 编辑:俞云利)

(上接第 99 页)

[17] 欧斌,张才溢,陈德辉,等. 基于改进 EMD-LSTM 的混凝土坝变形预测模型 [J]. 水利水电科技进展,2024,44 (6):93-99. (Ou Bin,Zhang Caiyi,Chen Dehui,et al. Deformation prediction model for concrete dams based on improved EMD-LSTM [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44 (6):93-99. (in Chinese))

[18] 赵宇,郑东健,冉成,等. 基于 QR-KOA-ITransformer-BiLSTM 的混凝土坝变形和变形区间预测模型 [J]. 河海大学学报 (自然科学版),2026,54 (2):102-108. (Zhao Yu,Zheng Dongjian,Ran Cheng,et al. Concrete dam deformation and deformation interval prediction model based on QR-KOA-ITransformer-BiLSTM [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2026,54 (2):102-108. (in Chinese))

[19] 王译玲,丁勇,李登华. 耦合 DWT-IFLOF 的大坝监测数据异常检测算法 [J]. 中国农村水利水电,2024 (7):203-209. (Wang Yiling,Ding Yong,Li Denghua. Anomaly detection algorithm for dam monitoring data coupled with DWT-IFLOF [J]. China Rural Water and Hydropower,2024 (7):203-209. (in Chinese))

[20] 李元梦,李登华,丁勇. 基于 DBSCAN 的大坝安全监测异常数据检测算法 [J]. 水电能源科学,2024,42 (1):149-152. (Li Yuanmeng,Li Denghua,Ding Yong. Abnormal data detection algorithm for dam safety monitoring based on DBSCAN [J]. Water Resources and Power,2024,42 (1):149-152. (in Chinese))
(收稿日期:2025 - 03 - 18 编辑:俞云利)