

跌落式竖井内水气掺混特性及水力优化设计

马国骏¹,杨校礼²,徐建军¹,陈勇军¹,董四海¹,姚利¹

(1. 深圳市水务规划设计院股份有限公司,广东 深圳 518001; 2. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:针对跌落式竖井水流沿井壁跌落与井底水体剧烈碰撞导致强烈水气掺混可能影响工程安全运行的问题,通过物理模型试验观察水力现象,探究了跌落式竖井内水气掺混特性,分析了排气机理并对竖井排气设施进行了系统水力优化设计,提出了半环形堰+3 道中隔板的高效联合排气减泡方案。研究表明:半环形堰能引导水气掺混远离隧洞进口;中隔板结构可通过延长流径、增加流线转折程度和转折次数,促进微小气泡碰撞、融合和上浮逸出,提升排气减泡效率,保障跌落式竖井在较大水位变幅范围内均可安全稳定运行。

关键词:跌落式竖井;排气;半环形槽;中隔板;物理模型

中图分类号:TV653+.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2025)06-0032-06

Air-water mixing characteristics and hydraulic design optimization in drop shafts//MA Guojun¹, YANG Xiaoli², XU Jianjun¹, CHEN Yongjun¹, DONG Sihai¹, YAO Li¹ (1. Shenzhen Water Planning and Design Institute Co., Ltd., Shenzhen 518001, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To address the issue that intense air-water mixing, caused by the violent collision between water falling along the shaft wall of a drop shaft and the water body at the shaft bottom, may compromise the safe operation of the project, hydraulic phenomena were observed through physical model tests, the air-water mixing characteristics in the drop shaft were explored, the venting mechanism was analyzed, a systematic hydraulic optimization design of the shaft venting facilities was carried out, and a high-efficiency combined venting and bubble-reduction scheme, consisting of a semi-annular weir and three intermediate baffles, was proposed. The results show that the semi-annular weir can divert air-entrained flow away from the tunnel inlet. By extending the flow path and increasing the degree and frequency of streamline deflection, the intermediate baffles promote the collision, coalescence, and upward escape of micro-bubbles, thereby improving the efficiency of venting and bubble reduction, ensuring the safe and stable operation of the drop shaft across a wide range of water level fluctuations.

Key words: drop shaft; venting; semi-annular groove; intermediate baffle; physical model

长距离输水设施是水资源配置工程中的重要组成部分,广泛应用于跨流域调水、城市供水等领域^[1]。长距离输水管道沿线地形复杂,水流多存在落差大、流速高等特点,常需要设置消能设施进行消能和水力衔接。竖井作为一种可消除高落差的高效消能设施,因其结构简单、消能率高、施工方便等特点得到广泛应用^[2-4]。国内外对竖井已经开展了数十年的研究,主要集中在竖井的消能率^[5-6]以及空气夹带^[7-10]问题,部分侧重于竖井过流能力^[11-12]研究,其中竖井内水气掺混强烈的两相紊流仍是学术界重点关注的难题。Chanson^[13]将矩形跌落式竖井内水流按照流量划分为 3 种流态,其中在小流量情况下,水流直接跌落至竖井底部,产生大量气泡群。

Granata 等^[14]通过物理模型试验发现竖井内空气夹带现象严重,下游管道易出现明满流交替及“呛水”现象。以往研究中跌落式竖井多与无压隧洞连接,采用压坡段可使隧洞内水流保持无压^[15],同时在隧洞段设置通气孔可使得气体快速排出^[16],避免下游隧洞出现水流封洞、明满流交替等恶劣流态。而供水工程中需要利用水库与供水管道之间的水头差,使原水直供水厂,因此竖井段后接隧洞常需保持有压状态。然而,竖井内水体跌落消能产生剧烈水气掺混现象,气体极易直接进入有压隧洞且可能积聚成气囊,气囊振荡或溃灭会引起异常压力剧变^[17-18],影响工程安全运行甚至导致爆管事故。

刘达等^[19]针对珠三角水资源配置工程中的竖

井式高位水池开展了模型试验研究,发现跌落式竖井内存在明显的掺气区,即使在竖井内水深较大时,在强动能作用下,水体掺气区仍会影响到下游进水管。张双庆等^[20]基于数值模拟研究,发现在上游来流快速增加时会产生较大的井喷压力,而不恰当的竖井直径会导致井喷压力大幅增加。为解决水气掺混影响有压隧洞内空气夹带问题,杨开林^[21]针对输水管线空气阀进排气孔径进行研究,构建了空气阀进排气孔径与输水管线充水和排水流速、负压控制要求及水击压力之间的函数关系。薛泷辉^[22]在旋流竖井泄洪洞后部设置集气室及排气井的基础上添加稳流挡板以避免气囊溃灭、水体振荡,同时有效避免了气体回落再次进入水平泄洪洞。

综上所述,水利工程中常在隧洞段收集气体并排出,鲜见竖井内部有限空间内布置排气减泡设施的研究和工程实践,尤其是跌落式竖井在较大水位变幅范围内运行时,如何在不影响竖井消能的前提下,避免气体进入下游有压隧洞,目前尚未见成熟的工程案例可供参考。本文以深汕西部水源及供水工程的竖井消能设施作为研究对象,采用物理模型试验方法,基于大量试验成果进行水力优化,在保证消能效果的同时促进气体从竖井段尽快逸出,以期有为有压供水工程排气设施布设提供参考。

1 模型设计

深汕西部水源及供水工程位于汕尾市海丰县西部,地处珠三角经济圈和海峡西岸经济区的结合部。工程分为水源工程和供水工程,供水工程线路呈北南走向,以隧洞为主,少量管道,线路全长 7.39 km,近期正常运行规模为 7.9 万 t/d (0.91 m³/s),远期最大供水规模为 35 万 t/d (4.05 m³/s),供水方式为有压重力流输水。水库至水厂最高水头差 90.36 m,输水规模近、远期及不同工况变化较大,输水系统较为复杂。供水工程采用锥形阀+消力池+跌落式竖井进行消能,其中竖井还承担与下游隧洞水力衔接的功能。竖井直径 10.00 m,深 37.39 m,底部高程 46.73 m,最低水位 53.73 m,设计水位 60.72 m,水位变幅约 7 m;环形堰为实用堰,堰面曲线为 1/4 椭圆曲线,曲线方程为 $\frac{x^2}{1.5^2} + \frac{y^2}{4^2} = 1$,堰高 4.00 m,壁厚 2.00 m,见图 1。

模型按照重力相似准则设计,几何比尺 1:20。模拟范围包括取水头部、输水隧洞段、消力池、竖井段及隧洞出口段,模型全长约 20.00 m,采用有机玻璃制作,其中竖井模型内径为 0.50 m,高 1.87 m。

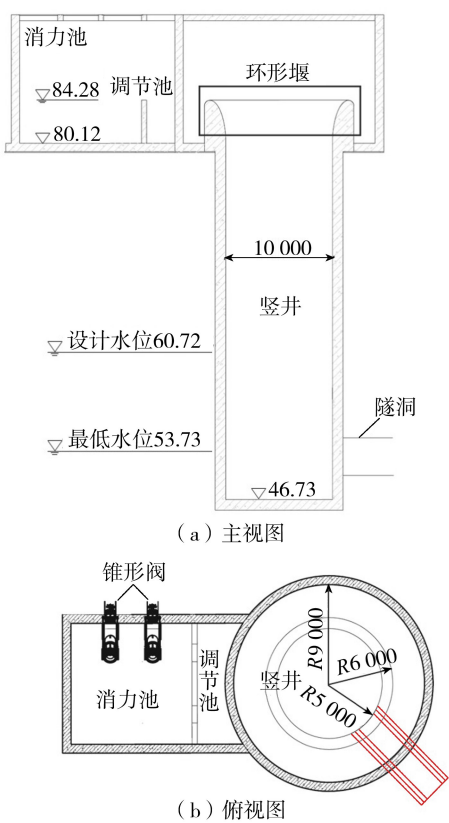


图1 跌落式竖井结构示意图
(高程单位:m;尺寸单位:mm)

2 试验结果与分析

2.1 跌落式竖井水气掺混现象

经锥形阀和消力池初步消能后的水流沿环形堰堰顶进入竖井,紧贴环形堰堰面,顺井壁下行,试验中无水流脱壁现象。过堰水流在下泄过程中势能转换为动能,虽与井壁、空气摩擦消耗部分能量,但冲击竖井内水体时,下泄水流仍具备较大机械能。同时下泄水体夹带大量气体,在竖井底部表层水体区域形成一定深度的水气混合带。竖井内水位(H)较高时(设计水位 60.72 m),水气混合带厚约 2.00 m,见图 2(a)。竖井内水位较低时(最低水位 53.73 m),因水流下行距离增大,水气混合带厚度增至 2.20 m,后接隧洞与竖井接口处存在大范围水气掺混水体,持续输送大量气泡进入下游隧洞,见图 2(b)。

由图 2 可见,跌落式竖井若无排气设施,因下泄水流具备较大能量,水气掺混强烈,在竖井内水位较低时,大量气体随水流进入下游隧洞,增加后续水厂原水处理难度,同时无法保证供水工程高效安全稳定运行,需要设置一定淹没深度的警戒水位或通过工程措施优化过流和消能方式,避免气体进入下游隧洞。

2.2 竖井内排气设施设计

针对该跌落式竖井存在的水气掺混问题,分别

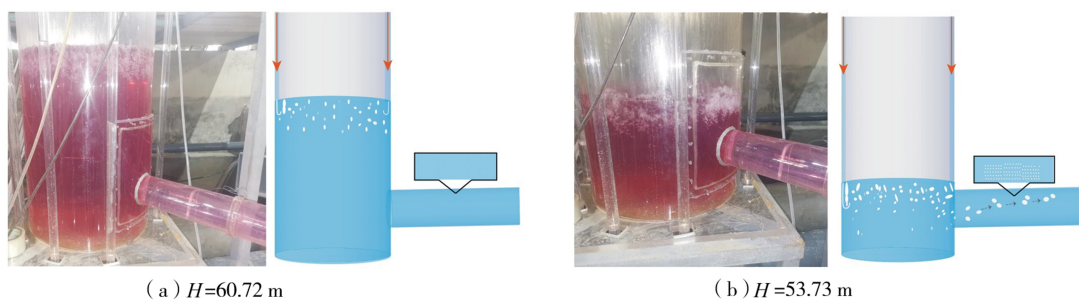


图 2 竖井内水气掺混试验现象及示意图

设计了半环形槽、半环形槽+1道中隔板、半环形槽+3道中隔板共3种优化方案,具体结构见图3。

2.2.1 半环形槽方案

在竖井内侧靠近下游隧洞进口上部位置加设半环形槽,槽宽1.00 m、高1.00 m、底高程54.79 m,顶高程55.79 m,半环形槽对称布置至1/2竖井范围,如图3(a)所示。

不同竖井水位工况下,加设半环形槽后竖井内水流流态及排气效果较原设计方案有较大改善,各工况试验现象如下:①如图4(a)所示,竖井内水位为最低水位53.73 m时,水流贴竖井壁下行,半环形槽出口处的挟气水流跌入竖井内,水流紊动剧烈,有较多气体掺混进入水体,相比原设计方案,进入下游

隧洞的气体显著减少,但仍有少量气泡进入下游隧洞;②如图4(b)所示,竖井内水位为55.74 m时,井内水位略低于环形槽顶,半环形槽出口处水流跌落距离减小,水流紊动程度降低,偶有水溅发生,挟气水流越过半环形槽进入竖井内,偶有小气泡进入下游隧洞;③如图4(c)所示,竖井内水位为56.33 m时,井内水位略高于环形槽顶,竖井内水体表层形成一定深度的水气混合带,半环形槽内部分水流横漂进入竖井内,偶有气泡进入下游隧洞;④如图4(d)所示,竖井内水位为设计水位60.72 m时,竖井内水流贴壁下行,水体表面形成一定深度的水气混合带,未发现气体进入下游隧洞。

试验中可见,半环形槽可有效收集下游隧洞侧

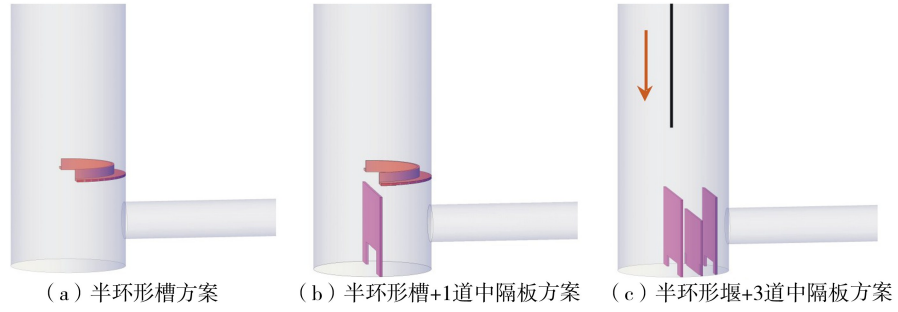


图 3 优化方案布置示意图

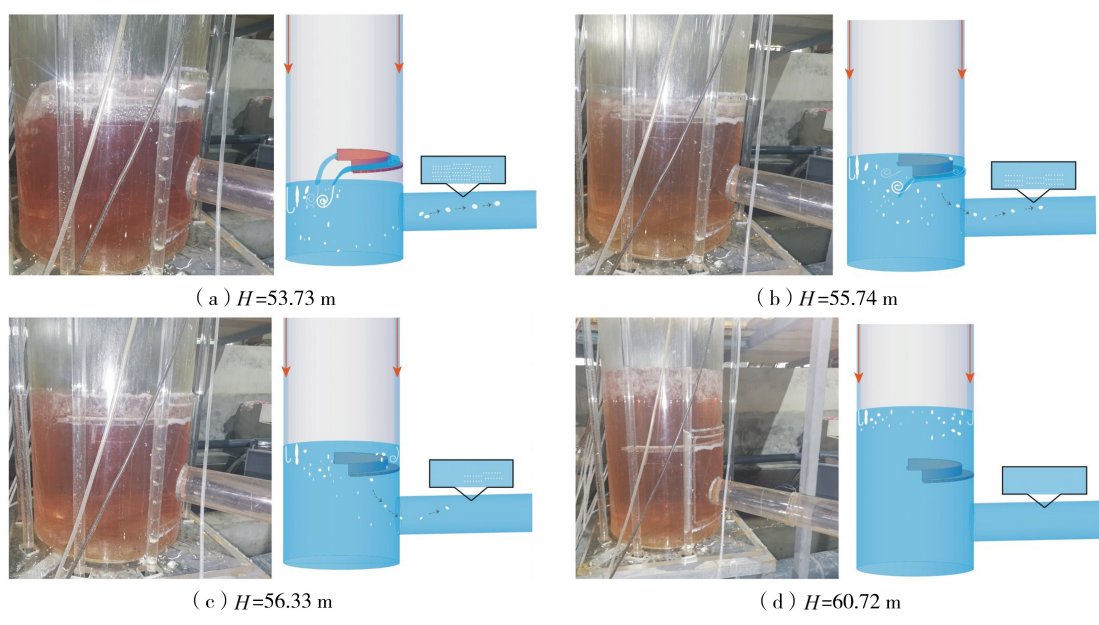


图 4 加设半环形槽后竖井内水气掺混试验现象及示意图

1/2 环形堰范围内的贴壁下行水流并从两端集中排出,使其远离下游隧洞进口,避免贴壁下行水流直冲隧洞进口,使隧洞进口处的水气掺混与气体入洞问题得到改善。在水位略高于半环形槽顶部或水位过低时,仍发现有部分气泡进入下游隧洞,气泡随水流运动排向下游。

一方面,在竖井以最低水位运行时(图 4(a)),自半环形槽两端集中排出的水流与此区域远离隧洞侧下泄的水流对井内水体作用叠加,水流碰撞区域的水气掺混加剧,导致竖井内水体夹带的气体无法全部在有限时间内及时上浮排出,少量气体随水流进入下游隧洞。另一方面,在竖井水位略高于半环形槽时(图 4(b)(c)),半环形槽处于竖井水体水气掺混区域,部分槽内挟气水流可横漂进入竖井内,气泡仍可在短距离内进入下游隧洞。

由此可见,加设半环形槽虽可使竖井在低水位运行时减少进入隧洞气体,但因其安装高度固定,未能实现竖井在一定水位变幅范围内运行时“无气入洞”的目标,仍需在此方案基础上进一步优化。

2.2.2 半环形槽+1 道中隔板方案

为进一步降低竖井内气泡进入下游隧洞的概率,保留半环形槽结构,并在竖井中部布置中隔板,中隔板顶高程 54.59 m,在底部中心处开矩形孔,孔口宽 6.00 m、高 2.00 m,中隔板总宽度 9.20 m,具体布置见图 3(b)。

如图 5 所示,半环形槽+1 道中隔板方案各工况试验现象与半环形槽方案基本相同,但相比半环形槽方案,竖井内水位为最低水位 53.73 m 时(图 5(a)),进入下游隧洞的气体减少,但仍有极少量气泡进入下游隧洞,部分微小气泡紧贴下游隧洞

顶部,不随水流运动;而竖井内水位为 55.74 m 和 56.33 m 时仍有部分微小气泡紧贴下游隧洞顶部(图 5(c)(d))。

在最低水位运行时(图 5(a)),布置的半环形槽+1 道中隔板可有效调整竖井内水流结构,延长入洞水流流径,使随水流运动的气泡尽可能在远离隧洞进口的竖井区域上浮逸出,避免气体进入下游隧洞。但与半环形槽方案存在同样的问题:当竖井内水位略高于半环形槽顶部时(图 5(b)(c)),槽内挟气水流可直接横漂越过半环形槽顶部跌入隧洞进口区域,气泡受入洞水流牵引,可能会直接进入下游隧洞。

随着竖井消能系统长时间运行,因水体破碎形成的极微小气泡仍可能随水流运动进入下游隧洞,并集聚成微小气泡,紧贴下游隧洞顶部。若下游隧洞微小气泡附壁现象持续发生,微小气泡可能融合形成较大气泡随水流下行。

2.2.3 半环形堰+3 道中隔板方案

半环形槽可有效减少贴壁下行挟气水流对隧洞进口的冲击,但在有限槽宽情况下,竖井内运行水位处于半环形槽附近时,该优化方案排气效果欠佳。基于半环形槽方案的气体排出机理,调整该跌落式竖井顶部为半环形堰过流,即在环形堰进口处抬高后接隧洞进口上部环形堰堰顶,设置该区域不过流,竖井顶部仅有远离隧洞进口的半环形堰过流。

为解决竖井内低水位情况下水体破碎形成的微小气泡无法及时上浮逸出的问题,并延长竖井内水流流径,增大流线转折程度及转折次数,增加极微小气泡融合概率,促使水体中气泡融合后上浮逸出,在竖井底部靠近下游隧洞的区域设置 3 道中隔板。其中,第 1 道和第 3 道中隔板采取底部中间孔口过流

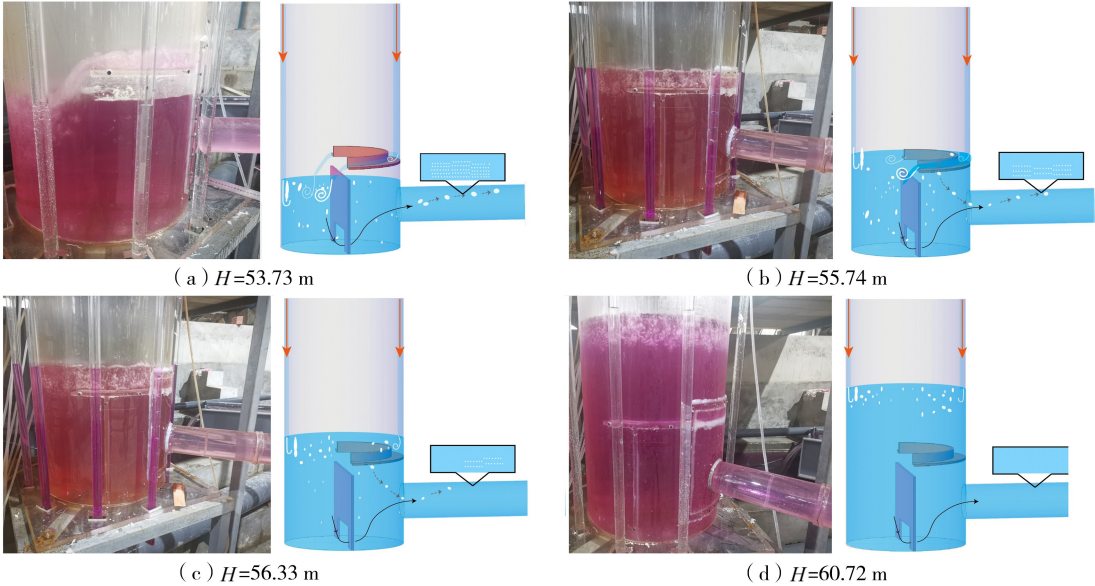


图 5 加设半环形槽+1 道中隔板后竖井内水气掺混试验现象及示意图

方式,第2道中隔板采取堰顶过流方式。为满足工程供水过程中的过流需求,在第2道中隔板底部两侧开孔。其具体布置为:①第1道中隔板位于竖井轴线上,并与下游隧洞进口断面平行布置,宽10.00 m、高7.00 m,底部中心处开孔,孔口宽6.00 m、高1.00 m;②第2道中隔板与第1道中隔板平行布置,由竖井轴线向下游隧洞方向偏移1.67 m,宽9.43 m、高5.00 m;③第3道中隔板与前2道中隔板平行布置,由竖井轴线向下游隧洞方向偏移3.34 m,宽7.47 m、高7.00 m,底部中心处开孔,孔口宽5.00 m、高1.00 m。具体结构如图3(c)所示。

在试验中观察半环形堰+3道中隔板方案竖井内水流排气效果,具体试验现象如下:①如图6(a)所示,竖井内水位为最低水位53.73 m时,水流沿远离下游隧洞进口侧的1/2环形堰下行,冲击竖井内水体,下行水流与远离隧洞侧水体剧烈掺混,因下行单宽流量增加,水气掺混带最长可达5.50 m,在第1道与第3道中隔板之间有气泡上浮排出,未发现气体进入下游隧洞段,未观察到气泡在隧洞中运动现象;②如图6(b)所示,竖井内水位为54.77 m时,流态同最低水位工况,水气掺混带最长可达

4.60 m,未发现气体进入下游隧洞段,未观察到气泡在隧洞中运动现象;③如图6(c)所示,竖井内水位为设计水位60.72 m时,试验现象和54.77 m水位工况相同。

如图6可见,在半环形堰出流和3道中隔板共同作用下,入井水流从远离隧洞侧的半环形堰下泄,3道中隔板分别以孔流、堰流、孔流形式过流。受中隔板阻隔,远离下游隧洞侧的挟气水流无法直接进入隧洞,水流流经延长、流线转折、极微小气泡碰撞融合为较大气泡概率增大,大大延长了竖井水体中气体上浮及微小气泡融合上浮时间,促使气泡在隧洞进口前上浮逸出,有效避免了气泡进入竖井后接有压隧洞的情况。

在半环形槽+1道中隔板方案基础上改进的半环形堰+3道中隔板方案,不仅可以有效收集下行水流,使其远离下游隧洞段进口,还可适应竖井水位较大变幅情况,消除因水流掺混而被主流牵引至下游隧洞的大量气泡,保证供水工程在设计最低水位及以上的全工况下稳定高效运行。

3 结 论

a. 跌落式竖井运行水位较低时,竖井内水体落差大,隧洞进口处淹没深度不足,水体破碎形成的气泡难以在竖井内迅速上浮逸出,气体会进入竖井后接有压隧洞,在无其他排气设施情况下,竖井运行时需保持一定高度的安全水位。

b. 基于半环形槽+1道中隔板方案的试验成果,综合考虑半环形槽和中隔板两种排气设施的排气机理及优缺点的半环形堰+3道中隔板方案,可避免跌落式竖井下泄水流直接进入隧洞进口,延长了水流流经,提高了微小气泡碰撞融合概率,促使气泡在隧洞进口前上浮逸出,解决了竖井无法在较大变幅水位情况下安全稳定运行的难题。

参考文献:

[1] 孟东勇. 南水北调中线给水区输水工程管道布设分析 [J]. 河南水利与南水北调, 2022, 51 (8) : 45-46. (MENG Dongyong. Analysis of pipeline layout in water supply area of the Middle Route of South-to-North Water Transfer Project [J]. Henan Water Resources and South-to-North, 2022, 51 (8) : 45-46. (in Chinese))

[2] 司才龙,王永宁,白妍丽,等. 泄洪竖井内消能掺气技术研究进展 [J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2024, 39 (3) : 349-356. (SI Cailong, WANG Yongning, BAI Yanli, et al. Research progress on energy dissipation and aeration technology in flood discharge shaft [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2024, 39 (3) : 349-356. (in Chinese))

[3] 蔡付林,郭黎明,周骏,等. 扩散段体型对竖井式进/出

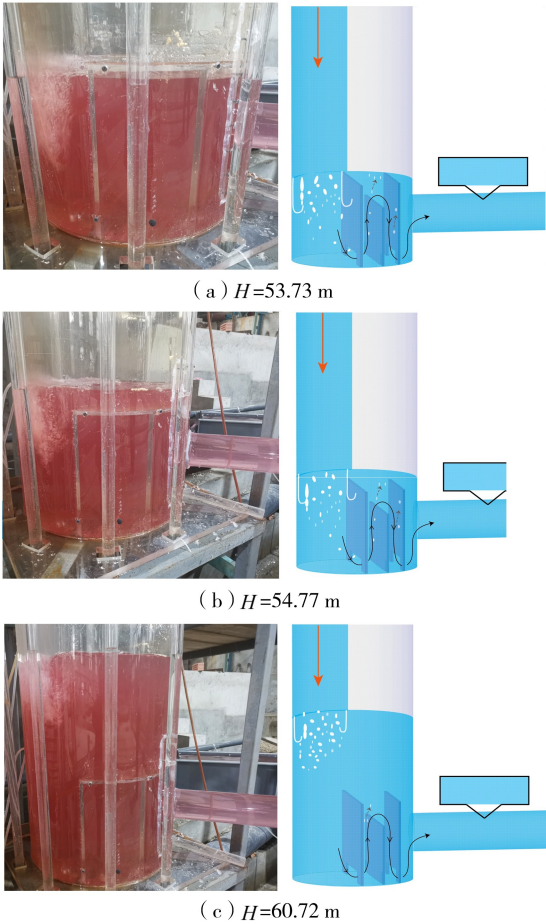


图6 加设半环形堰+3道中隔板后竖井内水气掺混试验现象及示意图

- 水口出流水力特性的影响[J]. 海大学学报(自然科学版), 2025, 53(5): 100-106. (CAI Fulin, GUO Liming, ZHOU Jun, et al. Effect of diffuser geometry on hydraulic characteristics of flow at shaft-type inlet/outlet [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(5): 100-106. (in Chinese))
- [4] 程伟平, 章军军, 陈益民, 等. 超短竖井式进/出水口的水力控制[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(5): 548-552. (CHENG Weiping, ZHANG Junjun, CHEN Yimin, et al. Hydraulic control of super short vertical well entry/draft tub [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(5): 548-552. (in Chinese))
- [5] LIU J C, HUANG B, ZHU D Z. Jet impinging in plunging dropshafts of medium height [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 148(12): 04022028.
- [6] KEIHANPOUR M, KABIRI-SAMANI A. Effects of modern marguerite-shaped inlets on hydraulic characteristics of swirling flow in shaft spillways [J]. Water Science and Engineering, 2021, 14(3): 246-256.
- [7] CHAN S N, CHIU C H. Flow regimes of a surcharged plunging dropshaft-tunnel system [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2021, 147(10): 04021045
- [8] REN Weichen, WU Jianhua, MA Fei, et al. Hydraulic performance of helical-step dropshaft [J]. Water Science and Technology, 2021, 84(4): 954-965.
- [9] 芦三强, 乔时雨. 跌流竖井结构优化及其气压特性数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(6): 24-29. (LU Sanqiang, QIAO Shiyu. Structure optimization and numerical simulation of air pressure characteristics of a plunging flow dropshaft [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(6): 24-29. (in Chinese))
- [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] 谭志伟. 竖井式跌水水力计算的探讨[J]. 中国农村水利水电, 2008(2): 92-94. (TAN Zhiwei. Investigation on hydraulic calculation of shaft drop structures [J]. China Rural Water and Hydropower, 2008(2): 92-94. (in Chinese))
- [12] 郭新蕾, 夏庆福, 付辉, 等. 新型旋流环形堰竖井泄洪洞数值模拟和特性分析[J]. 水利学报, 2016, 47(6): 733-741. (GUO Xinlei, XIA Qingfu, FU Hui, et al. Numerical study on flow of newly vortex drop shaft spillway [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(6): 733-741. (in Chinese))
- [13] CHANSON H. An experimental study of Roman dropshaft hydraulics [J]. Journal of Hydraulic Research, 2002, 40(1): 3-12.
- [14] GRANATA F, DE MARINIS G, GARGANO R, et al. Hydraulics of circular drop manholes [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2011, 137(2): 102-111.
- [15] 孙诗游, 王芳芳, 吴修锋, 等. 高水头跌流竖井溢洪道水力设计综合优化[C]//水力学与水利信息学进展 2024: 工程水力学. 南京: 南京水利科学研究院, 2024: 204-213.
- [16] 马斌, 魏建根, 王孝群, 等. 多洞联合泄洪通风补气系统运行特性[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(2): 115-123. (MA Bin, WEI Jiange, WANG Xiaoqun, et al. Operating characteristics of multi-tunnel joint flood discharge and ventilation system [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022, 33(2): 115-123. (in Chinese))
- [17] 段锦章, 李菊红. 有压管道中气囊震荡的影响及排气性能分析[J]. 给水排水, 2022, 58(增刊1): 1031-1035. (DUAN Jinzhang, LI Juhong. Influence of air bag oscillation in pressurized pipeline and analysis of exhaust performance [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 58(Sup1): 1031-1035. (in Chinese))
- [18] 赵莉, 栗金晶, 杨玉思, 等. 压力管道中有压气囊运动的试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(5): 18-22. (ZHAO Li, LI Jinjing, YANG Yusi, et al. Experimental study on movement of pressurized air pockets in a pressure pipeline [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(5): 18-22. (in Chinese))
- [19] 刘达, 黄本胜, 李明, 等. 长距离输水工程竖井式高位水池水力特性研究[J]. 水利学报, 2025, 56(2): 159-169. (LIU Da, HUANG Bensheng, LI Ming, et al. Research on hydraulic characteristics of a vertical drop shaft in long-distance water conveyance projects [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 56(2): 159-169. (in Chinese))
- [20] 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))
- [21] 杨开林. 输水管线空气阀进排气孔径的合理选择[J]. 水利学报, 2024, 55(5): 537-548. (YANG Kailin. Reasonable selection of intake and exhaust diameters for air valve in water pipelines [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(5): 537-548. (in Chinese))
- [22] 薛泷辉. 旋流竖井有压泄洪洞集排气措施研究[J]. 水利科技, 2023(2): 30-32. (XUE Longhui. Study on collecting exhaust gas in pressure spillway hole of swirling shaft [J]. Hydraulic Science and Technology, 2023(2): 30-32. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-07-27 编辑: 熊水斌)