

某工程排沙洞弧形工作闸门后流道空蚀破坏成因的试验研究

向品宇¹, 宋铨焘², 邓 军²

(1. 四川大学水利水电学院; 2. 四川大学山区河流保护与治理全国重点实验室)

摘要:结合国内某工程排沙洞运行过程中弧形闸门出口侧墙空蚀破坏的实例,采用水力学模型试验方法,研究了不同开度运行条件下弧形闸门出口区域的水流特性及壁面压力特性,并对空蚀破坏的成因进行了深入分析。结果表明:弧形闸门全开时,掺气设施运行情况良好,不易发生空蚀破坏;弧形闸门局开时,出口水流横向扩散角增大,侧空腔长度迅速缩短,水流冲击区下游压力迅速降低,致使该区域水流空化数较小,并伴有侧墙清水区,从而加剧空蚀破坏风险;清水区的范围与破坏范围基本一致。

关键词:高速水流;弧形闸门;突扩突跌掺气设施;空蚀破坏;压力;流速

中图分类号:TV131.3

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2026)05-0096-06

Experimental study on causes of cavitation erosion damage in flow passage downstream of a radial service gate in a sediment flushing tunnel of a project//Xiang Pinyu¹, Song Tanta², Deng Jun² (1. College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University; 2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University)

Abstract: Based on a case of cavitation erosion damage on the sidewalls at the outlet of a radial gate during the operation of a sediment flushing tunnel in a domestic hydraulic project, hydraulic model tests were conducted to study the flow characteristics and wall pressure characteristics in the outlet region of the radial gate under different opening conditions, and the causes of cavitation erosion damage were thoroughly analyzed. The results show that when the radial gate is fully open, the aeration facility operates well and cavitation erosion damage is unlikely to occur. When the radial gate is partially open, the lateral diffusion angle of the outlet flow increases, the length of the side cavity shortens rapidly, and the pressure downstream of the flow impingement zone drops rapidly, resulting in a relatively small cavitation number in this region and the presence of a clear-water zone on the sidewall, which intensifies the risk of cavitation erosion damage. The extent of the clear-water zone is basically consistent with that of the damage zone.

Key words: high-speed flow; radial gate; sudden expansion and drop aeration facility; cavitation damage; pressure; flow velocity

高坝工程中的泄水建筑物通常采用有压接无压明流隧洞的设计形式。弧形闸门挡水能力强,能够保障水流平顺通过,可适应不同水头条件和施工环境,因而常被选为有压出口闸门的优选类型。但高坝工程运行过程中,水流具有水头高、流量大、流速快等特点,容易导致工作闸门后流道侧墙发生空蚀破坏^[1-2]。研究表明,掺气是防止高速水流空蚀破坏的有效办法^[3-5],已在工程实践中得到了普遍应用^[6-8]。弧形闸门一般设置突扩突跌掺气设施,如龙羊峡水电站泄洪底孔、东江水电站二级放空洞、三峡工程泄洪深孔等^[9]。在弧形闸门出口的底板和侧

墙同步设置掺气坎,使有压出口水流在底部及两侧形成稳定的掺气空腔。该布置不仅能满足掺气减蚀的要求,还有利于改善弧形闸门的止水条件^[10-11]。

但是,当弧形闸门由全开变为局开时,局部流态恶化,严重时甚至引起掺气设施失效。张建民等^[12]研究发现,当弧形闸门全开时,空腔形态良好,当弧形闸门变为局开时,侧空腔长度明显缩短,侧墙存在清水区。肖兴斌等^[13]结合工程实例,认为侧扩大小会影响水翅,进而影响侧墙压力。Ma等^[14]采用数值模拟方法对空腔长度的影响因素进行了研究,指出跌坎高度和侧扩宽度与空腔长度具有相关性。此

基金项目:国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目(U23A20668)

作者简介:向品宇(2005—),男,博士研究生,主要从事水利工程研究。E-mail:1529648514@qq.com

通信作者:邓军(1973—),男,教授,博士,主要从事工程水力学研究。E-mail:djhao2002@scu.edu.cn

外,随着底空腔长度的缩短,水流冲击侧墙形成的下方水翅更容易进入底空腔,进而引发底空腔回水,最终减弱其掺气减蚀的能力^[15]。

本文以国内某排沙洞弧形闸门有压出口侧墙空蚀破坏的工程实例为依托,通过水力学模型试验,研究了弧形闸门在不同开度及水位条件下出口区域的水流特性与壁面压力特性,对其空蚀破坏的原因进行了深入研究和分析,以期为待建工程有压出口弧形闸门下游段体型设计以及已建工程掺气减蚀设施的优化改良提供理论依据与技术参考。

1 工程概况

该工程排沙洞需兼顾部分泄洪任务,为保证排沙洞有压段内水流流速不突破 15 m/s 的限制,高水头运行时排沙洞弧形闸门长期处于局开运行状态。运行资料显示,闸门全开时间约占总运行时间的 31.2%,闸门局开且相对开度大于 0.5 的运行时间占比为 61.1%,即弧形闸门长期处于大开度局开运行状态。排沙洞工作水头较高,闸门运行过程中水头在 82 m 以上的时间约占 61.1%。另外,运行过程中闸门开度变化频繁。2021 年,弧形闸门共运行 18 个周期,闸门变动共 70 次。综上可知,闸门运行期间,局开工况居多,工作水头较高,且开度调节频繁。

2021 年 10 月 20 日的检修发现,排沙洞工作闸门(桩号 0+970)跌坎下游混凝土侧墙出现了严重的空蚀破坏(图 1),破坏区起始桩号 0+974,长 13.5 m,宽 0.95~1.90 m,最大深度约 0.60 m。空蚀破坏发生后,于 2021 年 10 月 21—24 日对破坏区域进行了抢修,但后续运行中仍多次出现空蚀破坏。

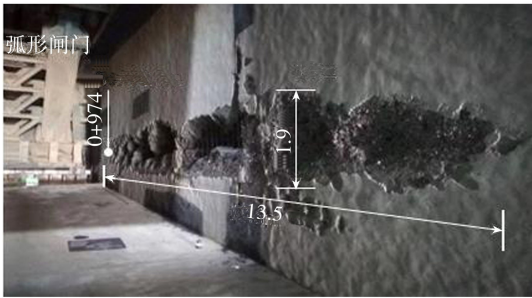


图 1 排沙洞弧形闸门下游侧墙空蚀破坏情况(单位:m)

2 研究方法

2.1 试验模型

试验模型基于该工程泄洪排沙洞布置,主要由圆形有压隧洞、闸室、弧形闸门和矩形泄槽明渠组成,如图 2 所示,闸门局部开启时水流流态如图 3 所示。模型全部采用有机玻璃制作,其中明渠段水力坡度 $i=0.12$ 。该模型为按重力相似准则构建的正

态试验模型,几何比尺为 1:20,相应比例尺为:长度比例尺 $\lambda_L=20$,流速比例尺 $\lambda_v=\lambda_L^{0.5}=4.47$,流量比例尺 $\lambda_Q=\lambda_L^{2.5}=1788.85$,压强比例尺 $\lambda_p=\lambda_L=20$,时间比例尺 $\lambda_t=\lambda_L^{0.5}=4.47$,糙率比例尺 $\lambda_n=\lambda_L^{1/6}=1.65$ 。圆形有压隧洞断面直径为 6.5 m,弧形工作闸门孔口尺寸为宽 4.4 m、高 4.5 m。门孔两侧突扩长度 $b=0.8$ m,跌坎高度 $t=0.96$ m,跌坎下游两侧设有通气竖井,水流经过时,在突扩突跌处形成空腔,通过通气竖井进行供气。

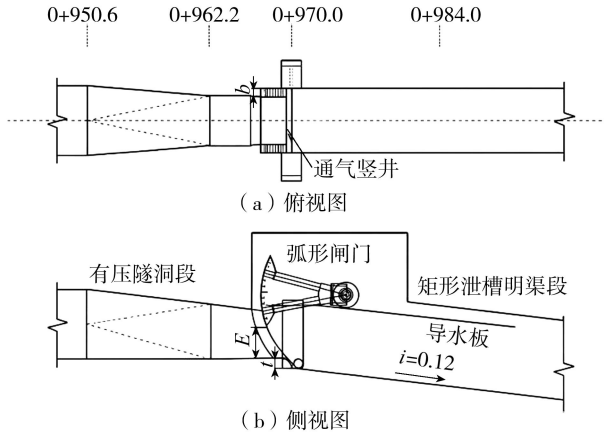


图 2 排沙洞体型布置

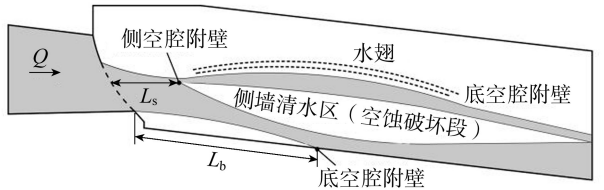


图 3 闸门局开时水流流态

根据工程运行情况,该排沙洞 2018—2022 年运行水头范围为 $H=55\sim125$ m,闸门开度变化范围为 $E=0\sim4.35$ m,相对开度 $e=0\sim1$,最大流量约为 $500\text{ m}^3/\text{s}$,闸门出口断面弗劳德数 $Fr=v/(gE)^{0.5}$,其中 g 为重力加速度。根据排沙洞运行资料,制定了如表 1 所示的试验工况,通过对预设工况进行水力学模型试验,得到不同闸门开度和水流条件下的排沙洞泄洪流量。试验中,流量 Q 采用矩形薄壁堰并配合测针进行量测。同时,分别测量不同闸门开度和水流条件下弧形闸门下游底空腔长度 L_b 、侧空腔长度 L_s 、底板压力 P_b 、侧墙压力 P_s 及沿程平均流速 v ,并据此计算空化数 σ ,以综合分析出口区域的水力学特性,进而探明空蚀破坏的原因。

2.2 试验仪器及方法

侧空腔长度、底空腔长度和沿程自由水面高度通过钢尺测量,取多次测量的平均值;侧墙和底板时均压力和脉动压力通过成都泰斯特公司研发的 CY-201 型压阻式数字压力传感器测量,该传感器量程为 20 kPa,精度为 1.0%,与传感器搭配的

表 1 试验工况

相对开度	水位/m	流量/(m ³ /s)	出口流速/(m/s)	Fr
0.375	230	191	26.7	6.7
0.375	255	220	30.7	7.7
0.375	275	241	33.6	8.4
0.500	230	252	26.4	5.7
0.500	255	290	30.4	6.6
0.500	275	318	33.3	7.2
0.625	230	322	27.0	5.2
0.625	255	371	31.1	6.0
0.625	275	406	34.0	6.6
0.750	230	402	28.0	5.0
0.750	255	462	32.3	5.7
0.750	275	506	35.3	6.3
0.875	230	490	29.3	4.8
0.875	255	564	33.8	5.5
0.875	275	617	36.9	6.1
1.000	196	439	23.0	3.5
1.000	200	459	24.0	3.7
1.000	207	494	25.9	4.0

Smartsensor 压力数据处理软件可显示压力时域变化过程,压力数据通过软件中读取的压力时均值得到。侧墙压力测点自桩号 0+970 起,共 12 组,每 2 m 设置一组测点,同一组测点沿垂直方向均匀布置,间距

0.5 m;底板压力测点自桩号 0+977 起,共 12 个测点,沿底板中轴线布置,相邻测点间距 1 m。试验前对压力探头的采样时间和采样频率进行了验证,最终选定的采样时间为 20 s,采样频率为 200 kHz。通过针式掺气浓度流速仪测量侧墙附近的水流流速,流速测点距离侧墙 0.2 m,在侧空腔附壁点下游布置测量断面,测点沿高程方向均匀布置。该设备主要通过掺气探针针尖采集电信号,分析气泡通过针尖和水流通过针尖的信号差异,从而计算得出气泡流速,探针采样频率为 80 kHz,采样时间为 20 s。

3 结果与分析

3.1 空腔特性及流态变化规律

各闸门开度和水头条件下,弧形闸门突扩突跌掺气设施下游水流流态具有不同的特征。如图 4 所示,当弧形闸门全开时,水流平稳,无明显水翅,侧空腔长度约为 10 m,底空腔长度约为 15 m,无明显清水区,掺气设施运行良好。当弧形闸门局开时,水流横向扩散角增大,冲击侧墙后存在明显向上水翅,底空腔无明显变化,侧空腔长度显著减小,减小至

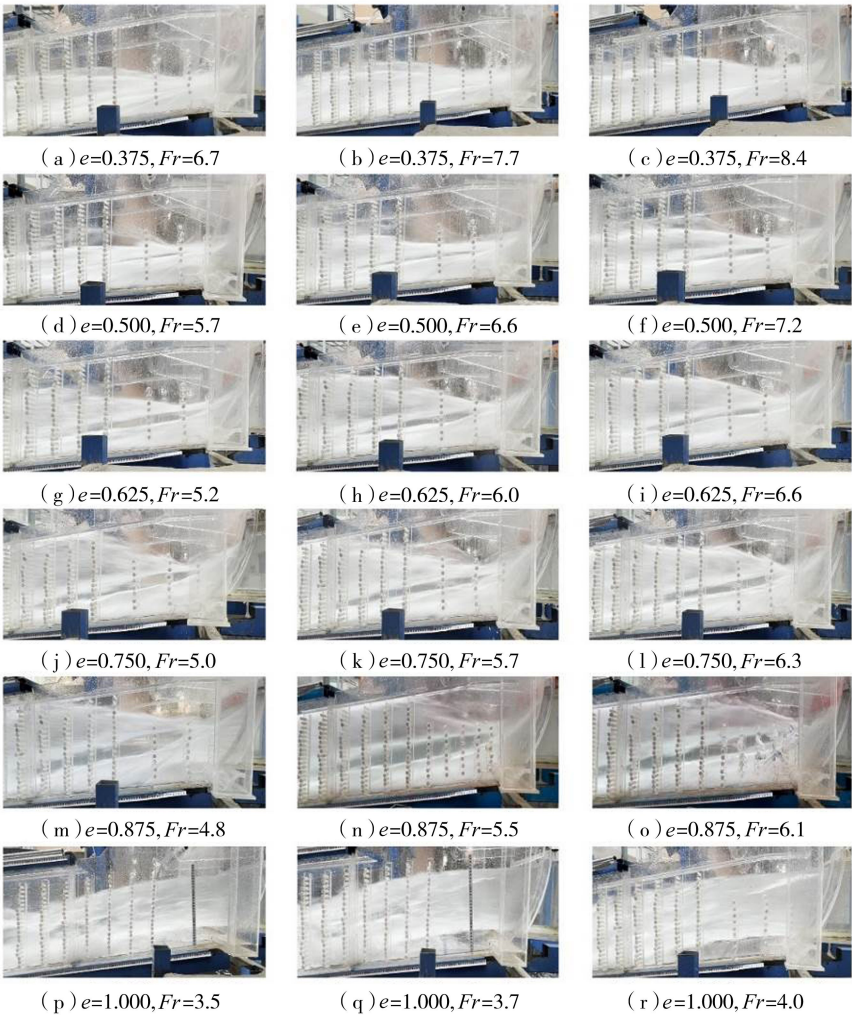


图 4 弧形闸门各开度水流流态

1.8 m 左右。当闸门开度较小($e=0.375$)时,水流厚度较小,表面自掺气效果明显,无明显清水区;当闸门开度较大($e\geq 0.500$)时,存在明显清水区,清水区对应桩号 0+970 至 0+990,掺气效果差,对工程不利。

图 5 揭示了水流条件对空腔长度的影响规律。闸门全开和局开时,底空腔长度随水流 Fr 均近似呈线性关系。闸门全开时, $R^2=0.99$, 闸门局开时, $R^2=0.92$, L_b 为 14.0~20.0 m, 如图 5(a) 所示。但是,弧形闸门由全开变为局开后,侧空腔长度 L_s 明显缩短,闸门全开时 L_s 约为 10 m, 闸门局开时 L_s 约为 1.0~2.0 m, 局开时开度对侧空腔长度影响较小, 如图 5(b) 所示。

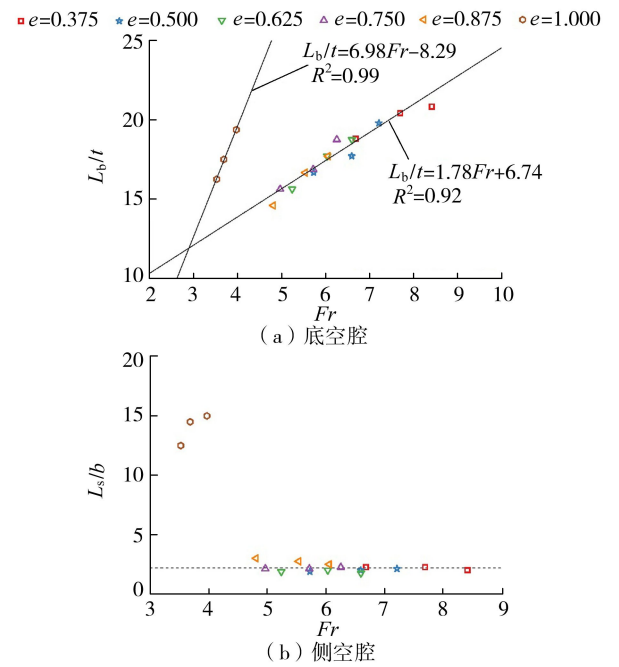


图 5 空腔长度变化

3.2 壁面压力

试验所得底板压力分布结果如图 6 所示。闸门开度较小时,压力分布较稳定,在 $e=0.375$ 、 $Fr=8.4$ 条件下,沿程底板压力 P_b 最大值为 4.65 m,最小值为 1.23 m,在冲击区并未出现压力显著增大的现象;闸门开度较大及全开时, P_b 明显增大,且 P_b 随着闸门开度的增加而增加,例如在 $e=1.000$ 、 $Fr=4.0$ 条件下,冲击区上游 P_b 从 1.06 m 快速上升,冲击区 P_b 达 10.19 m,随着水流反弹和回落,冲击区下游沿程 P_b 随之在 4.38~5.33 m 间波动。

图 7 为侧墙压力分布情况。由图 7 可知,闸门全开时(图 7(a)),侧墙压力 P_s 不存在负压,反弹区压力略微增大,随后压力减小,如在 $Fr=3.5$ 的水流条件下, P_s 从 0.50 m 上升至 2.94 m,随后降至 1.02 m,整体侧墙压力波动较小,无明显突变区域,对工程的不利影响较小;闸门局开时(图 7(b)),碰

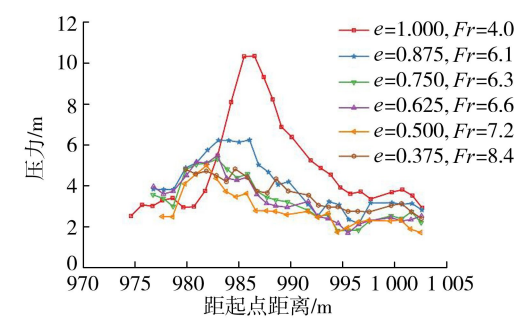


图 6 底板压力变化

撞区 P_s 显著增大,以 $e=0.625$ 、 $Fr=6.6$ 的工况为例,冲击区 P_s 剧烈上升至 4.79 m,随后 P_s 迅速减小至 0.47 m,工况 $e=0.375$ 、 $Fr=8.4$ 时甚至出现负压 (-0.17 m),这段区域整体上出现了较大压力梯度变化,形成明显的冲击高压区和反弹低压区,增大了发生空化空蚀的风险。反弹低压区与清水区的位置与排沙洞侧墙出现空蚀破坏断面的桩号基本一致。

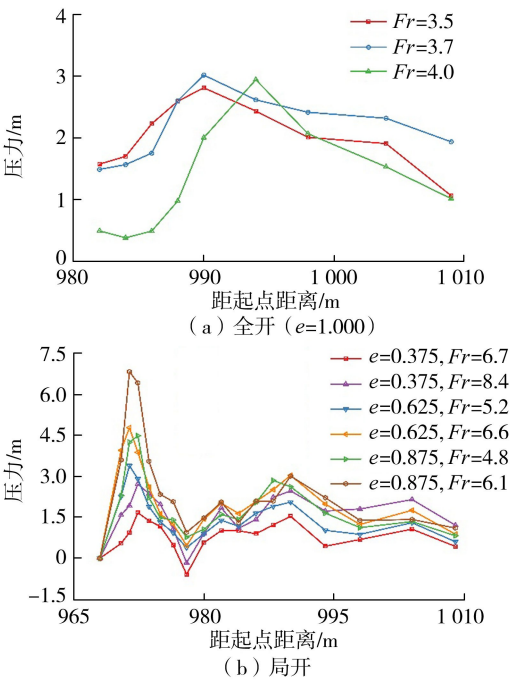


图 7 闸门全开和局开时侧墙压力变化

3.3 空化数

试验过程中测得各工况平均流速结果如图 8 所示。由图 8 可知,闸门下游各断面流速分布均匀,但闸门局开和全开存在明显区别,全开时流速范围为 23.70~26.90 m/s,局开时流速相对较大,变化范围也相对增大,达 31.12~44.56 m/s,发生空蚀破坏的风险上升。

水流空化数根据时均压力和流速计算:

$$\sigma = \frac{P_s + h_a - h_v}{v^2/2g} \tag{1}$$

式中: P_s 为测点位置侧墙压力; v 为测点断面的平均流速; h_v 为水的汽化压强,计算时取 0.24 m 水柱; h_a

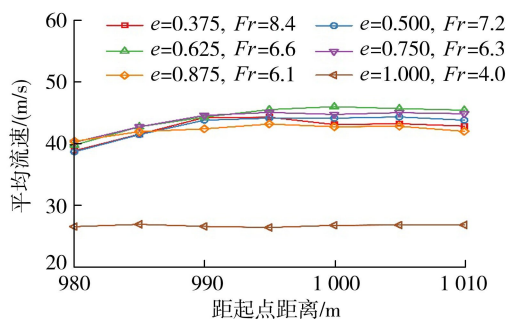


图8 沿程平均流速

为当地大气压强, $h_a = 10.33 - H/900$; H 为当地海拔; g 为重力加速度, 取 9.81 m/s^2 。

各工况沿程平均空化数计算结果如图9所示, 空化数越小, 表示空化现象越容易发生。由图9可知, 闸门全开时, 各断面空化数为 $0.29 \sim 0.44$, 均大于 0.2 , 故发生空蚀破坏的风险较小, 闸门局开时, 绝大多数工况下空化数小于 0.2 , 易发生空蚀破坏, 部分工况 ($e=0.750$, $Fr=5.0$) 下空化数略大于 0.2 , 但这些工况下闸门下游存在明显清水区, 对应桩号为 $0+972$ 至 $0+990$, 该区域掺气效果差, 并且水流流速较大, 达 35.26 m/s , 发生空蚀破坏的风险较大。因此, 闸门局开时, 下游极易发生空蚀破坏。

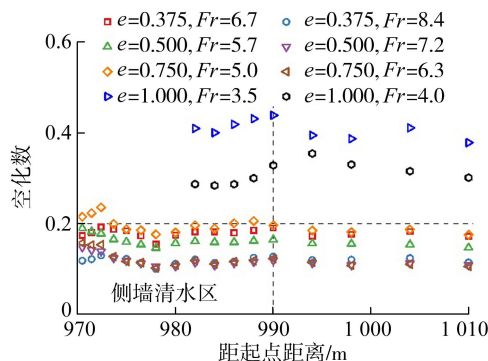


图9 侧墙空化数变化

综上所述, 该工程弧形闸门下游侧墙发生空蚀破坏的原因主要有: 闸门局开时, 高速水流冲击边墙导致桩号 $0+970$ 至 $0+990$ 段侧墙压力变化剧烈, 侧空腔长度显著缩短, 水流空化数多低于 0.2 , 虽然底空腔仍能发挥作用, 但是整体掺气效果变差, 容易发生空蚀破坏。同时, 闸门局开时, 尤其是大开度 ($e \geq 0.500$) 情况下, 侧墙存在明显清水区, 表明高速水流基本无掺气, 极易发生空蚀破坏。结合该工程运行情况, 闸门大开度局开 ($e \geq 0.500$) 且高水头工作时间较长时, 闸门开度变动频繁, 侧墙常处于不利水流条件下, 空蚀破坏风险显著增加。

4 结论

a. 闸门全开时, 突扩突跌型掺气设施发挥了良

好的作用, 空腔形态良好, 各工况下无明显清水区, 侧墙压力无明显突变区域, 且空化数均大于 0.2 , 发生空蚀破坏的风险较小。

b. 闸门局开时, 水流受到闸门压迫, 出射时横向扩散角增大, 侧空腔长度显著减小, 形成了高压冲击区和低压反弹区, 导致出现明显的侧墙清水区, 水流空化数小于 0.2 。其中, 底空腔长度随水流条件变化存在明显规律, 表现为 Fr 与空腔长度的一次函数关系。闸门开度较大时, 存在较厚的清水区, 该区域无掺气, 水流流速大, 侧墙压力低, 极易发生空蚀破坏; 小开度时, 出射水流较薄, 表面自掺气效果明显, 清水区范围较小, 与大开度情况相比, 发生空蚀破坏的风险较小, 但仍有破坏的可能性。该结论与工程实际破坏情况基本一致。

参考文献:

- [1] 薛伟, 陈昭运. 空蚀破坏的微观过程研究[J]. 大电机技术, 2003(6): 40-43. (Xue Wei, Chen Zhaoyun. The study on the micro-course of the cavitation erosion[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2003(6): 40-43. (in Chinese))
- [2] 张云莲. 泄水建筑物的空蚀破坏和解决方法[J]. 腐蚀与防护, 2001, 22(8): 343-345. (Zhang Yunlian. The cavitation damage of sluicing structure and the preventing methods[J]. Corrosion & Protection, 2001, 22(8): 343-345. (in Chinese))
- [3] 郭军, 张东, 刘之平, 等. 大型泄洪洞高速水流的研究进展及风险分析[J]. 水利学报, 2006, 37(10): 1193-1198. (Guo Jun, Zhang Dong, Liu Zhiping, et al. Achievements on hydraulic problems in large spillway tunnel with a high head and large discharge flow and its risk analysis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(10): 1193-1198. (in Chinese))
- [4] 朱春英, 凌霄, 刘杰, 等. 小浪底工程明流洞掺气减蚀设计研究[J]. 水力发电, 2001(2): 23-26. (Zhu Chunying, Ling Xiao, Liu Jie, et al. Research on aerated cavitation erosion reduction design in tunnel of Xiaolangdi Project[J]. Water Power, 2001(2): 23-26. (in Chinese))
- [5] Pfister M, Hager W H. Chute aerators. I: air transport characteristics[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 136(6): 352-359.
- [6] 肖兴斌. 掺气减蚀设施的研究与应用综述[J]. 长江水利教育, 1996, 13(1): 55-59. (Xiao Xingbin. Overview of research and application of aeration corrosion reduction facilities[J]. Journal of Changjiang Institute of Technology, 1996, 13(1): 55-59. (in Chinese))
- [7] 高昂, 吴时强, 王芳芳, 等. 掺气减蚀技术及掺气设施研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(2): 86-94. (Gao Ang, Wu Shiqiang, Wang Fangfang, et al. Research

progress of aeration cavitation reduction technology and aeration devices[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2019,39(2):86-94. (in Chinese))

[8] Fuhrhop H, Schulz H E, Wittenberg H. Solution for spillway chute aeration through bottom aerators [J]. International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements,2014,2(3):298-312.

[9] 周赤,何勇,廖仁强. 三峡工程泄洪深孔突扩跌坎式掺气的试验研究[J]. 长江科学院院报,1997,14(2):2-6. (Zhou Chi, He Yong, Liao Yongqiang. Experimental studies on aerator with vertical drop and lateral sudden enlargement form for Three Gorges Project's outlets[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1997,14(2):2-6. (in Chinese))

[10] 王伟,邓军,卫望汝. 高水头弧形闸门出口侧墙空化特性及掺气减蚀研究 [J]. 工程科学与技术,2025,57(2):84-92. (Wang Wei, Deng Jun, Wei Wangru. Cavitation characteristics and aeration mitigation for the sidewall of a radial gate in a high-head tunnel [J]. Advanced Engineering Sciences,2025,57(2):84-92. (in Chinese))

[11] Zhang Jianmin, Chen Jiangang, Xu Weilin, et al. Three-dimensional numerical simulation of aerated flows downstream sudden fall aerator expansion-in a tunnel[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B,2011,23(1):71-80.

[12] 张建民,许唯临,王伟,等. 高水头冲沙放空洞边墙空蚀破坏原因探讨 [J]. 水力发电学报,2010,29(5):197-201. (Zhang Jianmin, Xu Weilin, Wang Wei, et al. Cavitation damage to sidewalls in a sand flushing tunnel under high head [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2010,29(5):197-201. (in Chinese))

[13] 肖兴斌,王才欢,王业红. 弧形闸门突扩跌坎式通气减蚀研究进展综述[J]. 长江科学院院报,2000(5):1-4. (Xiao Xingbin, Wang Caihuan, Wang Yehong. Review on study of aerators with sudden lateral enlargement and bottom drop at taintor gate region[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2000(5):1-4. (in Chinese))

[14] Ma Xudong, Dai Guangqing, Yang Qing, et al. Analysis of influence factors of cavity length in the spillway tunnel downstream of middle gate chamber outlet with sudden lateral enlargement and vertical drop aerator[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B,2010,22(5):680-686.

[15] 李宏娟,薛玉林. 弧形闸门突扩跌坎泄洪放空洞受损修复研究[J]. 水电站机电技术,2023,46(4):95-97. (Li Hongjuan, Xue Yulin. Study on damage repair of radial gate sluice discharge cavity with sudden enlargement and falling bucket [J]. Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station,2023,46(4):95-97. (in Chinese))

(上接第 26 页)

[24] Gylltoft K. Fracture mechanics models for fatigue in concrete structures [D]. Luleå: Luleå Tekniska Universitet,1983.

[25] Horii H, Shin H C, Pallewatta T M. Mechanism of fatigue crack growth in concrete [J]. Cement and Concrete Composites,1992,14(2):83-89.

[26] Hillerborg A, Modéer M, Petersson P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements [J]. Cement and Concrete Research,1976,6(6):773-781.

[27] Petersson P E. Crack Growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials [R]. TVBM 1006, Lund: Division of Building Materials, University of Lund,1981.

[28] Liaw B M, Jeang F, Du J J, et al. Improved nonlinear model for concrete fracture [J]. Journal of Engineering Mechanics,1990,116(2):429-445.

[29] Foote R M L, Mai Y W, Cotterell B. Crack growth resistance curves in strain-softening materials [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids,1986,34(6):593-607.

[30] Ottosen N S, Ristinmaa M. Enhanced fictitious crack model accounting for material drawn into the cohesive zone: physically based crack closure criterion [J]. International Journal of Fracture,2016,199(2):199-211.

[31] 傅剑平,慕遂峰,白绍良. 高应变状态下混凝土的非等应变幅重复受压性能试验研究 [J]. 工程力学,2006,23(11):145-152. (Fu Jianping, Mu Suifeng, Bai Shaoliang. Cyclic loading tests on behavior of concrete subjected to large compressive strains of different amplitude [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23 (11): 145-152. (in Chinese))

[32] GB/T 50152—2012 混凝土结构试验方法标准[S].

[33] 卫军,李松林,董荣珍,等. 考虑残余变形影响的混凝土疲劳损伤本构模型[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2016,43(7):57-61. (Wei Jun, Li Songlin, Dong Rongzhen, et al. Fatigue damage constitutive model of concrete considering the effect of residual deformation [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016,43(7):57-61. (in Chinese))

[34] Wang Limin, Xu Shilang, Zhao Xiqiang. Analysis on cohesive crack opening displacement considering the strain softening effect [J]. Science in China Series G,2006,49(1):88-101.

[35] Paris P, Erdogan F. A critical analysis of crack propagation laws [J]. Journal of Basic Engineering,1963,85(4):528-533.

(收稿日期:2025-07-05 编辑:俞云利)