

巨型水电站深孔门槽金属损伤特性

朱烨森^{1,2,3}, 陈思¹, 于世杰¹, 徐云泽², 窦宝捷³, 胡葆文¹

(1.中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 311122; 2.大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 3.四川轻化工大学 材料腐蚀与防护四川省重点实验室, 四川 自贡 643000)

摘要: **目的** 研究巨型水电站深孔门槽处的水动力特性, 并探究门槽金属在恶劣流态下的损伤行为。**方法** 采用 $k-\epsilon$ 双方程紊流模型和有限体积离散方法, 对电站深孔水流进行数值模拟, 研究深孔局部体型的变化对水流的影响, 并通过冲刷腐蚀喷嘴实验, 探究流速对门槽钢衬的腐蚀影响。**结果** 深孔局部体型的变化对水流压强和流速分布的影响很大, 100 m 量级水头可使深孔出口最大流速达 45 m/s, 且流速越大, 门槽钢衬的点蚀电流增大。**结论** 304 不锈钢的点蚀趋势随着流速的增大而增加, 并且随着流速继续提升至真实运行工况, 冲刷腐蚀和空蚀问题会愈加突出, 需采取一定防护措施。

关键词: 巨型水电站; 门槽; 超高水头; 冲刷; 空化; 腐蚀

中图分类号: TG172

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)01-0170-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.01.017

Damage Characteristics of Deep Hole Gate Slot of Giant Hydropower Station

ZHU Yesen^{1,2,3}, CHEN Si¹, YU Shijie¹, XU Yunze², DOU Baojie³, HU Baowen¹

(1. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China; 2. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116024, China; 3. Material Corrosion and Protection Key Laboratory of Sichuan Province, Sichuan University of Science & Engineering, Sichuan Zigong 643000, China)

ABSTRACT: The work aims to study the hydraulic characteristics of the deep hole slot in the giant hydropower station, and explore the damage behavior of the metal in the slot under adverse flow conditions. In this paper, $k-\epsilon$ turbulent flow model and finite volume discrete method were used to numerically simulate the deep hole flow in the hydropower station, and study the influence of the local shape of the deep hole on the flow. The influence of flow velocity on the corrosion of the slot steel lining was investigated through an erosion corrosion nozzle experiment. The results showed that the change of the local shape of the deep hole had a great influence on the distribution of water pressure and velocity. The maximum flow velocity at the outlet of the deep hole could reach 45 m/s with a water head of 100 m. The pitting current of slot steel lining increased with the increase of flow velocity. In conclusion, the pitting tendency of 304 stainless steel increases with the increase of flow velocity, and as the flow velocity continues to increase to the actual operating conditions, problems such as erosion corrosion and cavitation will become more prominent, and certain protective measures need to be taken.

收稿日期: 2024-03-13; 修订日期: 2024-11-22

Received: 2024-03-13; Revised: 2024-11-22

基金项目: 工业装备结构分析国家重点实验室基金 (GZ22118); 材料腐蚀与防护四川省重点实验室开放基金 (2023CL12)

Fund: The Open Foundation of State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment (GZ22118); Opening Project of Material Corrosion and Protection Key Laboratory of Sichuan province (2023CL12)

引文格式: 朱烨森, 陈思, 于世杰, 等. 巨型水电站深孔门槽金属损伤特性[J]. 装备环境工程, 2025, 22(1): 170-177.

ZHU Yesen, CHEN Si, YU Shijie, et al. Damage Characteristics of Deep Hole Gate Slot of Giant Hydropower Station[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(1): 170-177.

KEY WORDS: giant hydropower station; gate slot; ultra-high water head; erosion; cavitation; corrosion

随着巨型水电站的规划与建设, 作为电站建设、挡水、泄洪、发电安全等重要保障的巨型闸门及门槽, 其技术指标极高, 挑战巨大, 突破了现有技术的应用条件。门槽是闸门运行和支撑必不可少的结构, 然而, 由于门槽的存在, 使流经门槽的高速水流出现分离, 阻力增强、脉动增强, 更主要的是使得门槽内部及下游边壁形成空化, 从而造成空蚀, 轻则出现麻点、蜂窝, 重则导致门槽大面积破坏, 使闸门操作失灵, 危及闸门的运行安全及建筑物的结构安全^[1-3]。由图 1 可见, 巨型电站深孔门槽在巨大流速下出现严重蚀坑 (见图 1c)。水电部第四工程局勘测设计研究院曾对国内 85 个工程的 158 座闸门的运行情况进行了调查, 其中有空蚀迹象的有 32 例, 约占总数的 20%。为保证发电需求, 巨型水电站布置在狭窄河谷, 且随着高坝建设的迅速发展, 目前巨型水电站的坝高已进入 300 m 量级, 深孔闸门工作水头已达 100 m 以上, 超大泄量、超高水头使得深孔泄水最大流速达到 40 m/s 以上, 空化风险巨大, 闸门及门槽的结构设计制造等面临极大的技术挑战。

随着电站工程规模越来越大, 技术参数指标越来越苛刻, 除了巨大流速下的闸门和门槽空蚀问题, 门槽结构的冲刷腐蚀问题也十分突出, 损伤机理及形成原因越来越复杂, 且无相似工程可借鉴参考^[4-5]。目前, 国内外几个已建和在建的巨型水电工程中, 门槽出口侧壁处均出现了密集蚀坑, 但损伤原因不明确, 作用机理不清楚, 给工程维护和安全管理带来了巨大困难。

在门槽钢结构设计规范中, 门槽材料通常采用碳钢、铸钢和不锈钢 (如 Q355B 钢和 304 不锈钢等), 而为了保证门槽与深孔隧洞的结构连续性, 采用焊接将门槽与孔洞侧壁钢材进行连接, 并在完焊后现场打磨及喷涂防腐涂层。在实际工程运行中, 深孔巨大的流速破坏

了涂层的完整性, 进而在电偶、残余应力、流质以及沙砾的冲刷下, 门槽出口侧壁和底槛处的焊接部位蚀坑密集^[6-7]。某巨型水电站深孔门槽采用 Q355B 碳钢和 304 不锈钢, 侧壁焊接结构下游处蚀坑密集 (见图 1d、e), 给闸门挡水和泄水安全带来了巨大安全隐患。

由高水头、高速水流引起的闸门槽空蚀现象, 在国内外引起广泛的关注。Ball^[8]、詹航^[9]、周赤等^[10]、刘国瑞等^[11]、李永刚^[12]指出, 门槽形式、形状参数对门槽内部和槽后壁面压力有着显著影响, 并重点研究了较优合宜的门槽宽深比、较优的斜坡方式和较优的圆角半径/圆角比对门槽及后部压力分布的改善情况。蔡勇平等^[13]、向贤镜等^[14]、王伟等^[15]通过双相流模型研究了气液两相条件下门槽周边流态分布、压力分布和空化系数情况。董永霞^[16]、杨霄^[17]、王德振^[18]对含导轨的矩形门槽进行了空间结构上的空化程度影响分析研究, 通过对各个门槽部位进行流场的时域分析, 定性推断出门槽在下游方角处的空化数最大、空化风险最高, 而在进口闸墩处的空化数最低、空化风险最低。柳康宁等^[19]通过采用射流理论进一步研究了不同门槽结构下的水流分布, 得到了在空蚀初期的空化数经验数值。

数值模拟技术进一步完善了门槽空蚀分析方法。王艳明等^[20]采用有限体积法, 通过优化 $k-\omega$ 紊流模型, 对溢流坝下游进行了二维数值模拟分析, 获取了槽后流场分布和压强分布特性, 进一步优化了闸门和门槽布置形式。马福喜等^[21]、黄海艳^[22]、王孝群^[23]进一步利用数值模拟技术, 通过三维流体分析, 优化处理了固液不规则边界条件, 通过 VOF (Volume of Fluid) 法追踪流场路径, 计算了坝后水流形态。由此, 在复杂的高水头高流速水流作用下, 结合数值计算结果可以获取更精细的环境及载荷特点。诸多学者针对

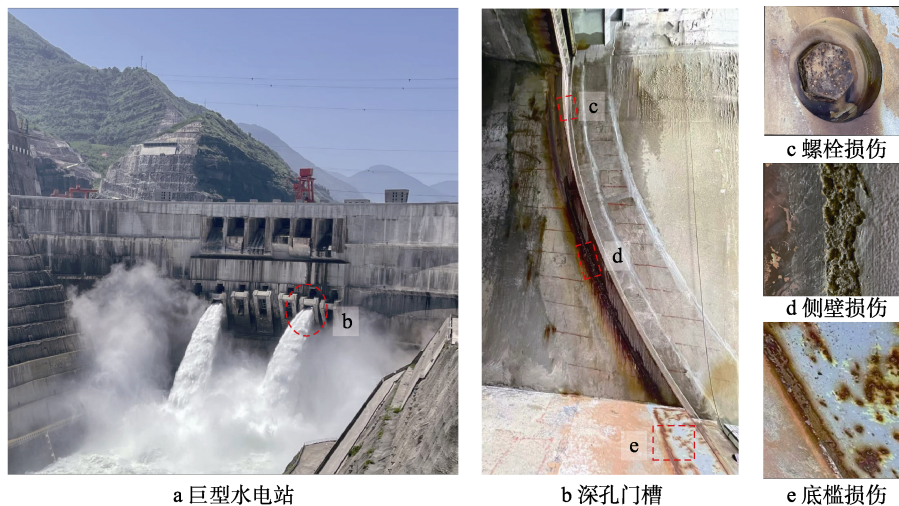


图 1 巨型水电站超高水头门槽结构损伤形式

Fig.1 Damage pattern of super high head gate slot structure in giant hydropower station: a) giant hydropower station; b) deep hole gate slot; c) bolt damage; d) sidewall damage; e) sill damage

闸门和门槽金属结构开展了损伤特点分析,如获取了闸门锈蚀损伤^[24-25]、冲刷腐蚀损伤^[26-28]特点。侯孟扬等^[29]研究总结了多场多相作用下的金属材料的空蚀特性,并采取了结合材料研发、流道优化和后期防护的损伤控制手段,以保障结构寿命和工程安全。

综上所述,巨型水电站超高水头深孔门槽主要存在以下几方面的问题,一方面是水电工程钢闸门设计规范更多基于常规水头的深孔闸门和门槽,而超高水头、超大流速下的门槽区段的水力分布特性还未完全明确,尤其是焊缝等局部水力变化区的空化特性并未开展深入研究。另一方面,门槽结构损伤在设计中通常仅考虑水力学损伤,而忽略了电化学腐蚀损伤,但随着水电工程环境条件的复杂化,单一损伤类型无法解释损伤的成因,“力学-化学”协同损伤作用规律还不明确。因而,本文通过采用标准 $k-\varepsilon$ 双方程紊流模型和有限体积离散方法对拱坝深孔水流进行了数值模拟,深入研究超高水头深孔的流道水力学特性,揭示深孔门槽的水力和空化特性,研究了深孔局部体型的变化对水流的影响。同时,基于数值模拟计算结果,通过搭建冲刷腐蚀装置,探究了大流速下门槽钢结构的“力学-化学”协同损伤规律,获取冲刷腐蚀和空蚀的特点,为深孔门槽的结构设计和损伤控制提供指导。

1 深孔门槽水流数值模拟分析

1.1 计算模型及工况

某巨型水电站拱坝深孔工作门后为突扩突跌体型(如图2所示),流道出口处设置有一扇弧形闸门,弧形闸门面板侧迎水,正对过流方向。门槽左右两侧在闸门侧水封处宽度变大,呈现突扩的结构,门槽底部在闸门底水封处高程下降呈现突跌的结构。闸门开启时,由突扩突跌门槽流出的深孔水形成射流,空气-水两相有较清晰的分界面,可以认为水流-空气互不溶解,因此以VOF模型追踪固定欧拉网格上的水-气界面。

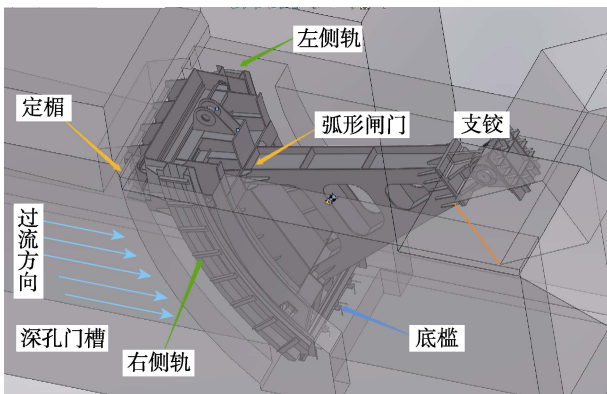


图2 深孔门槽及弧形闸门结构布置
Fig.2 Structural layout diagram of deep hole gate slot and curved gate

初步估算深孔水流流速在 20~40 m/s, 雷诺数超过 105, 为紊流。故采用 $k-\varepsilon$ 紊流模型(包括连续方程、动量方程和 k 、 ε 方程)进行数值求解。

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

k 方程:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G + \rho \varepsilon \quad (3)$$

ε 方程:

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中: ρ 和 μ 分别为按体积分数平均的流体密度和分子黏性系数; p 为修正压力; μ_t 为紊流黏性系数; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 为经验常数; σ_k 和 σ_ε 分别为 k 和 ε 的紊流普朗特数。

本研究采用控制体积法来离散计算区域,计算模型形式如下:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}\phi) - \nabla \cdot (\Gamma_\phi \nabla \phi) = S_\phi \quad (5)$$

式中: t 和 \mathbf{U} 分别为时间和速度矢量; ϕ 为通用变量,可用来代表 u 、 v 、 w 、 k 、 ε 等变量; Γ_ϕ 为变量 ϕ 的扩散系数; S_ϕ 为方程的源项。

在固壁边界上,规定为无滑移边界条件,对黏性底层采用壁函数来处理,并采用 PISO(Pressure-Implicit with Splitting of Operators) 算法对压力和速度场进行耦合计算。模拟计算用非恒定流迭代计算逐步达到恒定流稳定解。选取某一深孔进行建模计算,设置了3道闸门。平面上进行了 4° 的转弯,中心的转弯半径为 40 m。底部挑坎半径为 40 m,对应圆心角 12° 。顶部采用半径 40 m 的单圆弧压坡,压坡角为 3° 。不同库水位下深孔的泄流能力和流量系数见表1,其中在计

表1 不同水位下深孔的计算流量和流量系数

Tab.1 Calculated flow rate and flow coefficient of deep hole at different water levels

库水位/m	设计方提供 流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	三道门	
		计算泄流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	流量系数
832.3	1 729.6	1 762	0.883 5
827.8	1 690.3	1 724	0.883 7
825.1	1 669.2	1 698	0.882 9
785.0	1 257.1	1 295	0.877 3

算流量系数时, 以深孔出口中部高程 727.6 m 以上的水头作为作用水头。

1.2 结算结果

1.2.1 壁面压强和孔内流速分布

各工况下深孔侧壁的计算压强分布云图如图 3 所示, 图中横坐标为深孔沿着出流方向的距离, 取深孔平面转弯点为横坐标 0 点, 纵坐标为深孔高程。可以看出, 库水位在 832.34~785.0 m 时, 在深孔平面转弯点 ($x=0$) 附近, 由于深孔平面转弯, 受到离心力

的影响, 外侧 (右侧) 的压强明显增大, 内侧 (左侧) 的压强明显减小。

不同库水位下深孔底板和顶部中心的压强分布如图 4 所示, 横坐标为深孔沿着出流方向的距离, 取深孔平面转弯点为横坐标 0 点, 纵坐标为压强值。可以看出, 底板和顶部的压强随着库水位的降低而减小, 除了进口上唇和下缘附近, 底板的动水压强大于顶部的压强。底板压强由上游向下游呈减小趋势, 在进口最大, 在出口减小为大气压, 但由于受到附加离心力的影响, 底板反弧段的压强有所增加。

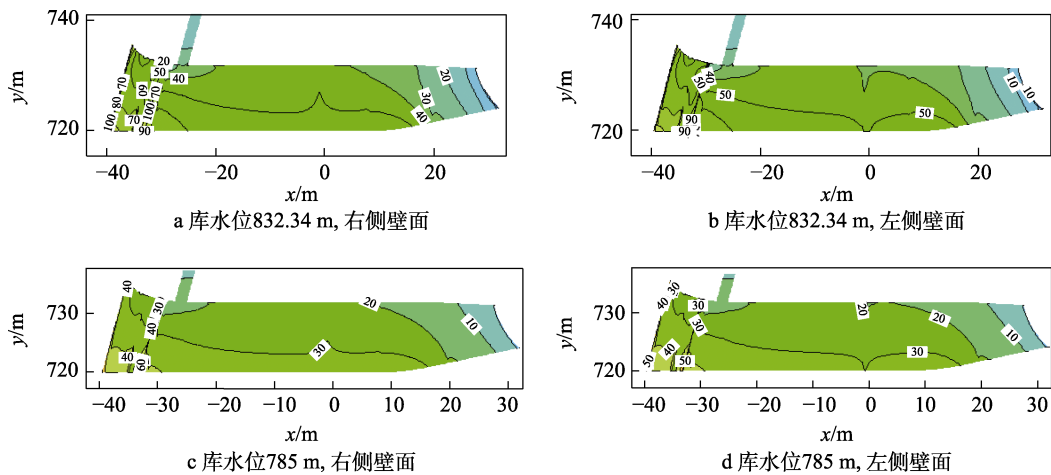


图 3 不同库水位深孔侧壁压强分布云图 (kPa)

Fig.3 Pressure distribution contour of deep hole side wall with different reservoir water level (kPa): a) reservoir water level 832.34m, right wall; b) reservoir water level 832.34m, left wall; c) reservoir water level 785 m, right wall; d) reservoir water level 785 m, left wall

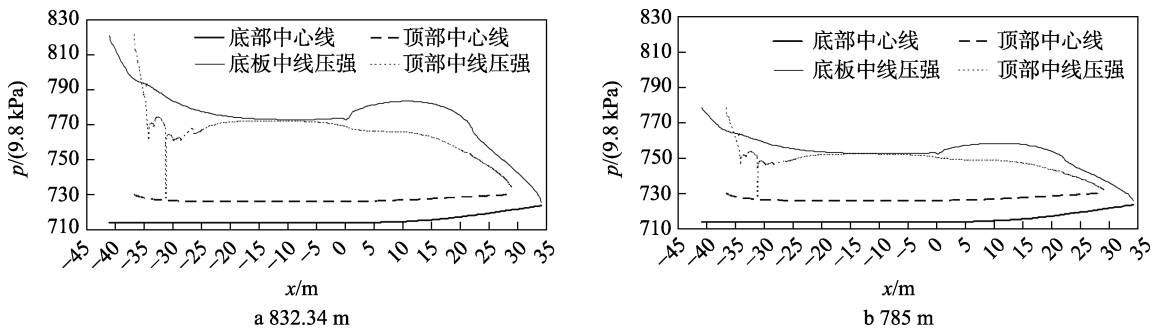


图 4 不同库水位深孔底板和顶部中线的压强分布

Fig.4 Pressure distribution on bottom plate and top center line of deep hole at different reservoir water levels

各工况下 $y=725.75$ m 剖面的流速云图和流线分布如图 5 所示, 其中横坐标为深孔沿着出流方向的距离, 取深孔平面转弯点为横坐标 0 点, 纵坐标为深孔在宽度方向的距离, 取深孔宽中为纵坐标 0 点。可以看出, 流速沿程增大, 库水位高于 825 m, 出口水流最大流速超过 40 m/s。由于深孔在平面上向左侧转 4° , 深孔进口的流线在平面上向左弯曲, 能看出水流冲击右侧边墙, 导致深孔右侧边墙压强大于左侧边墙压强。

1.2.2 空化数分布

库水位为 832.34 m 时, x 为 18.9、27.1 m 两横断

面处的水流空化数分布如图 6 所示, 横坐标为深孔在宽度方向的距离, 取深孔宽中为纵坐标 0 点, 纵坐标为深孔截面所在高程。可以看出, 由上游到下游, 随着水流流速的增加和压强的减小, 水流空化数沿程降低。在平面扩散部位, 深孔中部的水流空化数相对较小, 但最小值基本为 0.6。在出口附近, 深孔上部靠近 2 个角隅部位的水流空化数要小, 最小值约 0.2; 但在靠近边墙的地方, 水流空化数都比较大, 超过 1。受到平面转弯的影响, 深孔水流空化数在横断面上的分布不再对称。

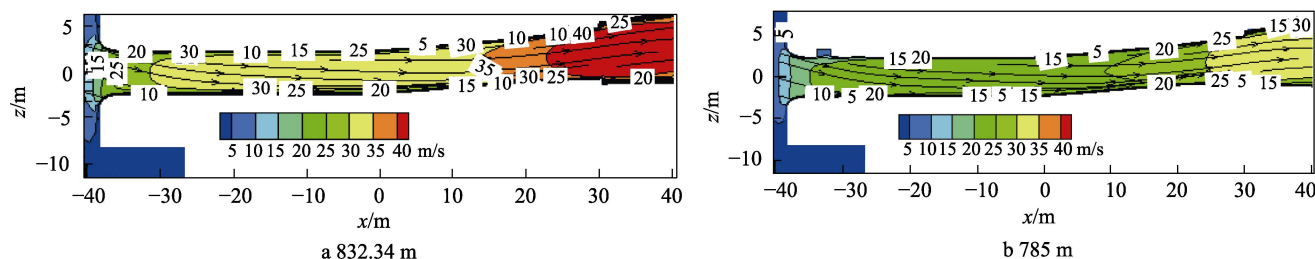


图5 不同工况下深孔 $y=725.75\text{m}$ 剖面流速分布和流线
Fig.5 Deep hole $y=725.75\text{m}$ profile velocity distribution and streamline under different working conditions

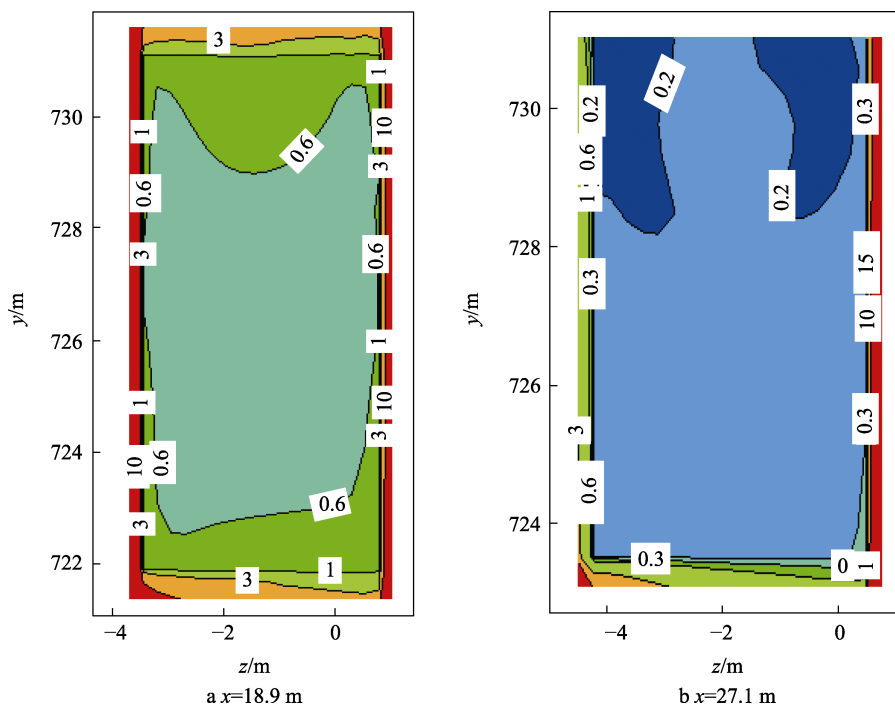


图6 库水位 832.34 m 不同横断面的空化数分布
Fig.6 Cavitation number distribution in different cross sections at reservoir water level of 832.34 m

2 浸没式冲刷腐蚀实验

2.1 浸没式喷射装置

为了进一步确认不同库水位下门槽金属结构的损伤特性,在实验室环境中搭建浸没式冲刷腐蚀平台进行冲刷腐蚀实验。根据数值计算结果,通过控制装置液体流动的速度、压力、温度等参数,以便能够更好地分析和评估冲刷损伤效应,并通过平行试验确保实验结果的可重复性和可比性。冲刷腐蚀实验采用了如图7所示的浸没式喷射装置。喷射装置由泵、压力表、流量计、阀门和容量为20 L的不锈钢水箱组成。实验所用试片为门槽钢衬同材质的304不锈钢,所用溶液为模拟库区水溶液,由去离子水与分析纯试剂配制而成,溶液成分见表2。实验过程中,环境温度为 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。实验时,溶液通过水箱进入管路中,在泵的驱动下从喷嘴喷出,再进入管路并保持循环。喷嘴内径为10 mm。多电极阵列放置在喷嘴正下方,多电极的工作表面与样品架的前表面齐平。样品架的长度和

宽度分别为160、100 mm。在这项工作中,分别就溶液静止和15 m/s流速2种工况进行腐蚀测试,每种工况进行3组平行实验。其中,溶液静止测试工况用于模拟闸门完全关闭状态,15 m/s流速工况用于模拟库水位在785 m时门槽底部的过流状态(由图5b可以看出,出口处的流速范围处于15~20 m/s)。考虑到浸没式射流冲击装置在实验室的最大模拟流速仅为16 m/s,若需进行更高库水位下门槽金属材料的性能,可采用高速空泡机进行试验模拟。冲刷腐蚀实验采用电化学三电极体系,采用极化曲线测试,电位扫描范围为由开路电位以下200 mV(v.s. Ag/AgCl参比电极)扫描至开路电位以上1 000 mV,扫描速率为0.5 mV/s。

表2 模拟库区水溶液成分含量

Tab.2 Composition of water components of hydropower plant

mg/L					
K^+ 和 Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
55.2~61.8	99~115.8	34.2~69.6	34.5~66	41.4~105	651.5~636.9

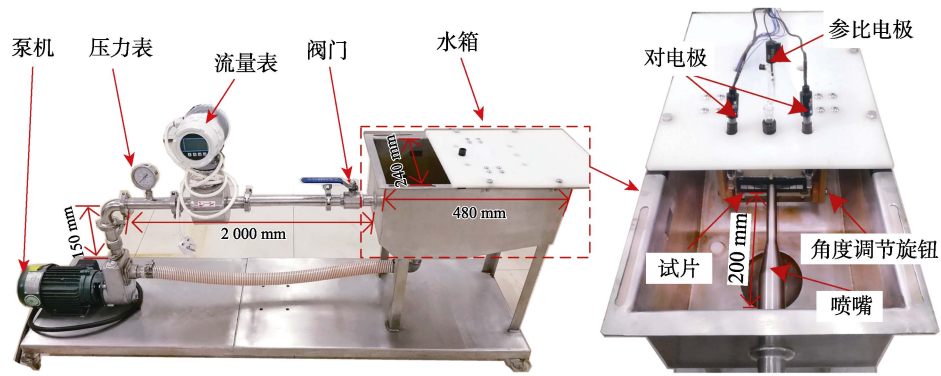


图 7 用于实验的浸没式射流冲击装置
Fig.7 Schematic illustration of submerged jet impingement system used for test

2.2 实验结果

2 个流速下的 304 钢衬材料的极化曲线测量结果如图 8 所示。当溶液静止时, 3 组实验均表现为典型的钝化行为, 腐蚀电位基本处于 $-0.15 \sim -0.2$ V, 且腐蚀电流在 $10^{-8} \sim 10^{-7}$ A/cm² 量级。由图 8a 可知, 尽管 3 组平行实验处于相同的溶液环境, 但由于极化曲线测试是依次进行的, 存在有一定时间偏差, 并且 3 个电极间距较小, 约 12 mm, 当前一个电极进行极化测试时, 对环境场有一定的影响, 使得腐蚀电流有一定偏差。当溶液流速达到 15 m/s 时, 3 组实验同样均表

现为典型的钝化行为, 腐蚀电位基本处于 $-0.15 \sim -0.2$ V, 但此时出现了点蚀电位, 约为 0.9 V, 且腐蚀电流在流动状态下达到了 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ A/cm² 量级, 明显高于静止状态。对比 2 种状态下的极化曲线可知, 随着流速增大, 304 不锈钢点蚀趋势增加, 且腐蚀电流增大, 点蚀风险增强。

进一步地, 对比 2 种状态下的腐蚀形貌情况, 如图 9 所示。激光共聚焦和 SEM 形貌结果均表明, 静水条件下, 试样打磨痕迹清晰, 形貌无明显变化。随着流速增大, 在 15 m/s 流速下, 出现明显的蚀坑。

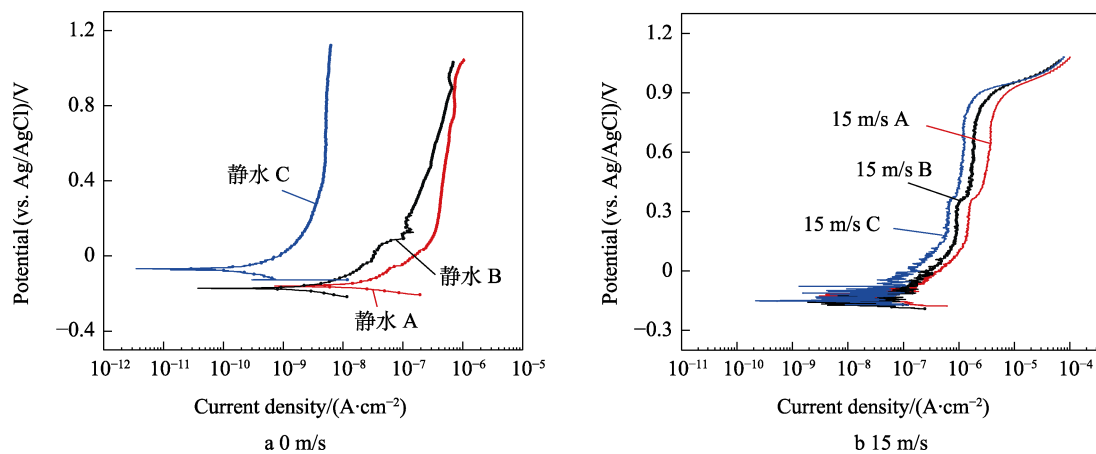


图 8 2 个实验条件下的极化曲线测试结果
Fig.8 Polarization curves of two conditions

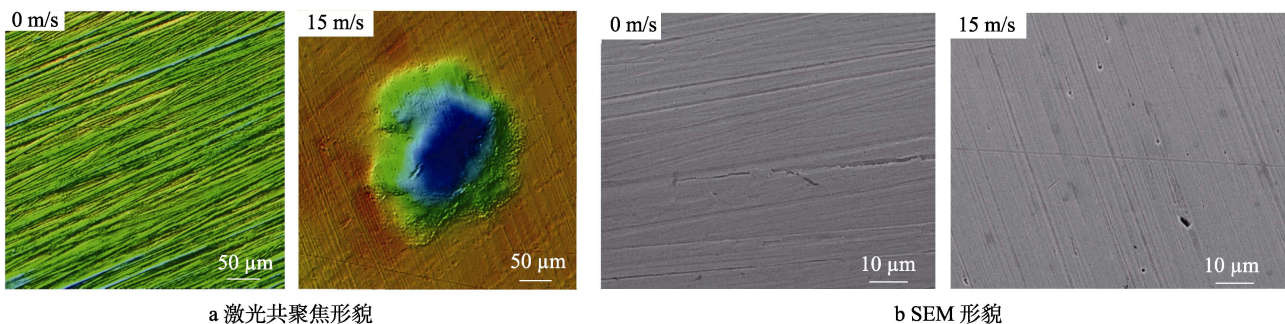


图 9 形貌观测结果

Fig.9 Morphology observation results: a) laser confocal morphology; b) SEM surfacemorphology

3 结论

1) 本研究采用标准 $k-\varepsilon$ 双方程紊流模型和有限体积分散方法对拱坝深孔水流进行了数值模拟, 研究了深孔局部体型的变化对水流的影响。结果表明, 深孔的压强分布规律和流速分布由上游向下游压强逐渐减小, 在同一断面上, 高程越低, 压强越大; 水流流速在深孔中低部最大, 壁面附近为 0, 各孔出口的最大流速约 45 m/s; 深孔内没有发生水流分离现象; 深孔局部体型的变化对水流压强分布影响很大, 平面转弯的凸侧、出口挑坎和压强附近压强增大, 平面扩散部位压强降低。

2) 通过深孔门槽钢衬 304 钢在不同流速下的腐蚀特性实验表明, 随着流速的增大, 304 不锈钢点蚀趋势增加, 且腐蚀电流增大, 点蚀风险增强。本研究中流速最大仅设置为 15 m/s, 后续随着流速继续提升至真实运行条件, 冲刷腐蚀和空蚀问题会愈加突出。

参考文献:

- [1] 肖兴斌, 王业红. 高水头平板闸门水力特性研究[J]. 水利水电科技进展, 2001, 21(4): 29-32.
XIAO X B, WANG Y H. Study on Hydrodynamic Characteristics of High Water-Head Flat Gate[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2001, 21(4): 29-32.
- [2] 王均星, 王瑞峰, 陈利强, 等. 高水头深孔平板门门槽水力特性研究[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(10): 82-85.
WANG J X, WANG R F, CHEN L Q, et al. Hydraulic Properties of High-Head Deep-Hole Bulkhead Gate Slot[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(10): 82-85.
- [3] 宋昉, 吴建华. 门槽空化的特性分析及影响因素探讨[J]. 水电站机电技术, 2012, 35(6): 72-76.
SONG F, WU J H. Characteristic Analysis and Influencing Factors of Cavitation of Gate Slot[J]. Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station, 2012, 35(6): 72-76.
- [4] 崔润, 吴建华, 马飞. 门槽旋涡及壁面压力特性[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2013, 28(2): 231-237.
CUI R, WU J H, MA F. Vortex and Wall Pressure Characteristics of Hydraulic Gate Slots[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2013, 28(2): 231-237.
- [5] 吴健强. 门槽空化特性及数值模拟研究[D]. 成都: 四川大学, 2005.
WU J Q. The Study of the Gate Slots Cavitation Characteristics and Numerical Simulation[D]. Chengdu: Sichuan University, 2005.
- [6] 张卓. 门槽水流的数值模拟及其空化特性分析[D]. 南京: 河海大学, 2007.
ZHANG Z. The Study on the Flow Field near Gate Slot by Numerical Simulation[D]. Nanjing: Hohai University, 2007.
- [7] 章晋雄. 高水头平面事故闸门动水关闭水动力特性及门槽水力特性研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013.
ZHANG J X. Study on Hydrodynamic Characteristics of Moving Water Closure of High Head Plane Emergency Gate and Hydraulic Characteristics of Gate Slot[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2013.
- [8] BALL J W. Hydraulic Characteristics of Gate Slots[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1959, 85(10): 81-114.
- [9] 詹航. 闸后渐扩折坡式消力池水力特性及型式优化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
ZHAN H. Study on Hydraulic Characteristics and Type Optimization of Gradually Broadened Stilling Basin with Slope Behind the Gate[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.
- [10] 周赤, 李静. 突扩跌坎掺气设施深化研究[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(9): 76-79.
ZHOU C, LI J. Further Study on Aerators with Sudden Lateral Enlargement and Bottom Drop[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(9): 76-79.
- [11] 刘国瑞, 刘旭辉. 带导流墙的门槽结构在闸门全开工况下的应用[J]. 华电技术, 2011, 33(11): 47-48.
LIU G R, LIU X H. Application of Gate Slot Structure with Guide Wall under Condition of Gate Fully Opening[J]. Huadian Technology, 2011, 33(11): 47-48.
- [12] 李永刚. 弧形闸门突扩跌段侧墙空化特性的大涡数值模拟研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2010.
LI Y G. Les of the Cavitation Characteristics of the sidewall of a Sudden Lateral Enlargement and Bottom Drop Section in Gate Chamber with Arch Sluice[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2010.
- [13] 蔡勇平, 蔡晓鸿. 进水口设闸控流的坝下涵管空蚀破坏及防空蚀措施[J]. 大坝与安全, 2018, 32(5): 51-54.
CAI Y P, CAI X H. Cavitation Erosion of the Culvert with Gate Set for Flow Control and Its Prevention[J]. Dam & Safety, 2018, 32(5): 51-54.
- [14] 向贤镜, 袁强. 二相流数值模拟在泄洪洞空蚀研究中的应用[J]. 海河水利, 2020(2): 95-97.
XIANG X J, YUAN Q. Application of the Numerical Simulation of Two-phase Flow in the Study of Spillway Cavitation[J]. Haihe Water Resources, 2020(2): 95-97.
- [15] 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/OL]. 工程科学与技术, 2024: 1-11. [2024-03-12]. <https://doi.org/10.15961/j.jsuese.202300347>.
WANG W, DENG J, WEI W R. Cavitation Characteristics and Aeration Mitigation for the Sidewall of a Radial Gate in a High-Head Tunnel[J/OL]. Advanced Engineering Sciences, 2024: 1-11. [2024-03-12]. <https://doi.org/10.15961/j.jsuese.202300347>.
- [16] 董永霞. 高水头明流泄洪洞进口闸墩体型优化及掺气

- 减蚀措施研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.
- DONG Y X. Optimization of Inlet Pier Type and Study on the Measures of Air Entrainment And Cavitation Alleviation of High Head of Free-flow Tunnel[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017.
- [17] 杨霄. 环形掺气坎下部水气两相流特性研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021.
- YANG X. Study on Water Air Two Phase Flow under Annular Aerator[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2021.
- [18] 王德振. 某表孔溢洪洞的水力特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- WANG D Z. The Study on Hydraulic Characteristics of Spillway Tunnel[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [19] 柳康宁. 矩形门槽内旋涡空化形成的物理机制[J]. 上海交通大学学报, 1984, 18(5): 81-89.
- LIU K N. Physical Mechanism of Vortex Cavitation Inception in Rectangular Cavities[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1984, 18(5): 81-89.
- [20] 王艳明, 陈永灿, 冬俊瑞. 高坝挑流冲坑流场的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 1995, 10(2): 125-134.
- WANG Y M, CHEN Y C, DONG J R. Numerical Simulation for the Flow in the Scour Pool Downstream a High Spillway[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 1995, 10(2): 125-134.
- [21] 马福喜, 王金瑞. 三维水流数值模拟[J]. 水利学报, 1998(1): 39-44.
- MA F X, WANG J R. Numerical Modeling of 3D Turbulent Flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998(1): 39-44.
- [22] 黄海艳. 平板闸门小开度水流数值模拟及闸门槽水流特性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.
- HUANG H Y. Numerical Simulation of Small Opening Flow of Flat Gate and Study on Flow Characteristics of Gate Slot[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2011.
- [23] 王孝群. 高水头长泄洪洞水气二相流数值模拟与通风补气系统优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- WANG X Q. Investigations on the Numerical Simulation of Air-Water Two Phase Flow and the Optimization of Ventilation System of Long Spillway Tunnel with High Energy Head[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [24] 周胜辉, 张冬. 冲砂底孔弧形门门叶空蚀情况及修复——以龚嘴水电站为例[J]. 水电与新能源, 2015(8): 60-61.
- ZHOU S H, ZHANG D. Analysis and Treatment of Cavitation Erosion in the Radial Gate Body for Sediment Flushing Bottom Outlet in Gongzui Hydropower Station[J]. Hydropower and New Energy, 2015(8): 60-61.
- [25] 蔡一平, 杨良泽, 许旭东, 等. 水工钢闸门局部腐蚀演化特征分析[J]. 江苏水利, 2023(10): 56-60.
- CAI Y P, YANG L Z, XU X D, et al. Analysis of Local Corrosion Evolution Characteristics of Hydraulic Steel Gate[J]. Jiangsu Water Resources, 2023(10): 56-60.
- [26] 杨勇, 于跃, 王宏飞, 等. 水工闸门材料失效和磨蚀现场监测技术[J]. 水电与抽水蓄能, 2023, 9(3): 64-67.
- YANG Y, YU Y, WANG H F, et al. Material Failure of Hydraulic Gate and Monitoring Technology for Scour Damage[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2023, 9(3): 64-67.
- [27] 孙家波, 孙家兵, 张华平, 等. 苗尾水电站隧洞高速水流流道空蚀损坏修复技术[J]. 云南水力发电, 2020, 36(1): 92-97.
- SUN J B, SUN J B, ZHANG H P, et al. Repair Technology for Cavitation Damage of Tunnel High-speed Flow Channel of Miaowei Hydropower Station[J]. Yunnan Water Power, 2020, 36(1): 92-97.
- [28] 郭建斌, 孙鹏, 陈吉丰, 等. 闸门受蚀构件的力学性能衰减特性[J]. 腐蚀与防护, 2023, 44(4): 113-118.
- GUO J B, SUN P, CHEN J F, et al. Mechanical Property Attenuation Characteristics of Corroded Components of Gates[J]. Corrosion & Protection, 2023, 44(4): 113-118.
- [29] 侯孟扬, 秦真波, 夏大海, 等. 海洋环境下金属材料在多场多相作用下的空蚀研究进展[J]. 装备环境工程, 2022, 19(8): 75-89.
- HOU M Y, QIN Z B, XIA D H, et al. Cavitation Erosion of Metallic Materials under Multi-Field and Multi-Phase Action in Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(8): 75-89.