

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220761

闸门开度对泄洪排沙隧洞水力特性影响研究

张 雷^{1,2}, 王中林³, 苏 昊⁴, 王先忠⁵, 曹尊毅^{1,6}, 邹乐乐⁷

(1. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 2. 河南省水电工程磨蚀测试与防护工程技术研究中心, 河南 郑州 450003; 3. 黄河水利水电开发集团有限公司, 河南 郑州 450000; 4. 新疆华电和田水电有限责任公司, 新疆 和田 848000; 5. 满洲里锦源水务有限责任公司, 内蒙古 满洲里 021400; 6. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098; 7. 河南智河工程技术有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要: 为揭示闸门开度对泄洪排沙隧洞水力特性的影响规律,建立了不同闸门开度下的排沙隧洞二维模型,采用VOF法和标准 $\kappa-\epsilon$ 紊流模型对泄洪排沙隧洞易磨蚀断面流场进行三维数值模拟计算,获得了闸门附近的流态、流速、压强等水力特性,并对比分析了不同闸门开度下的水力特性,得到了闸门处至挑坎之前的空化数。结果表明,当闸门小于1/2最大开度运行时,闸门开度越大,隧洞水流流态越平顺,临底流速过渡越平顺,且隧洞底板上下游压力差越小;闸门开度越小,有压洞内流速越小,容易造成泥沙淤积;闸门开度越大,对隧洞整体运行越有利。研究结果对水工隧洞闸门的运行开度优化及闸门底坎抗磨修复具有指导意义。

关键词: 泄洪排沙隧洞; 闸门开度; 水力特性; VOF法; 抗磨修复

中图分类号: TV672⁺.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)03-0117-04

1 引言

弧形工作闸门为水工建筑物的重要组成部分,通过闸门的启闭可达到控制水位和调节流量等目的。但不恰当的闸门启闭开度会给泄洪排沙隧洞带来不利影响,工作闸门在汛期大流量排洪和排沙时,工作闸门启闭频繁,在闸门关闭时闸门底部瞬时流速超过40 m/s,尤其是当闸门小开度(小于2 m)运行时,闸门底部流速为全开度运行的2~3倍,在高速流水冲击作用下,闸门门体底部和底坎易出现冲蚀破坏^[1],特别是弧形工作门后防磨底钢板基本破坏,原因主要为泥沙冲磨、弧形工作门小流量开度加速和抗磨强度不足等,因此有必要研究闸门开度对泄洪排沙隧洞水力特性的影响。目前主要采用数值模拟及试验的方法对水工隧洞的水力特性进行研究。如张雷等^[2]分析了三门峡、达克曲克多沙河流域电站排沙隧洞的磨蚀原因,并对磨蚀修复材料进行了试验研究,为排沙隧洞的磨蚀修复提出了建议;罗昌辉^[3]对溢洪

道水力特性进行了数值模拟分析,证明了VOF模型能准确追踪自由表面;王海军等^[4]采用RNG $\kappa-\epsilon$ 紊流模型和VOF方法对某溢洪道进行数值模拟,指出其计算结果与原型观测数据基本吻合,局部临底流速及梯度过大会导致工程出现冲刷破坏。为研究不同工作闸门开度对水工建筑和水工闸门冲蚀破坏的影响,本文以某泄洪排沙隧洞为例,建立了不同闸门开度下的排沙隧洞二维模型,采用标准 $\kappa-\epsilon$ 紊流模型和VOF法对泄洪排沙隧洞易磨蚀断面流场进行三维数值模拟计算,获得易磨蚀断面的流速、压强、水面线等水流特性,以为电站的闸门运行开度及泄洪排沙隧洞的磨蚀防护提供数据参考。

2 数学模型

2.1 控制方程

引水隧洞中的水流为不可压缩流体,紊流模型选择标准 $\kappa-\epsilon$ 紊流模型进行求解,其连续方程为:

$$\partial\rho/\partial t + \partial(\rho u_i)/\partial x_i = 0 \quad (1)$$

收稿日期: 2022-03-17, **修回日期:** 2022-05-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1965110,52279134);黄河水利科学研究院基本科研业务费专项资金资助项目(HKY-JBYW-2022-01);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJX22_0183,SJX21_0196)

作者简介: 张雷(1982-),男,博士、正高级工程师、硕导,研究方向为水利工程磨蚀机理与防护技术, E-mail: hkyzhanglei@163.com

式中, ρ 为水的密度; t 为时间; u_i 为速度分量; x_i 为坐标分量。

动量方程为:

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

式中, p 为压强; μ 为动力粘性系数; μ_t 为紊动粘性系数。

κ 方程为:

$$\frac{\partial(\rho \kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \kappa v)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x} \right] + G_\kappa + G_b - \rho \epsilon - Y_m + S_\kappa \quad (3)$$

ϵ 方程为:

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon v)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{\kappa} (G_\kappa + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{\kappa} + S_\epsilon \quad (4)$$

其中 $\mu_t = \rho C_\mu \kappa^2 / \epsilon$ (5)

式中, σ_κ 、 σ_ϵ 分别为湍动能 κ 、耗散率 ϵ 对应的普朗特常数, 分别取 1.0、1.3; G_κ 为平均速度梯度引起的湍动能 κ 的产生项; G_b 为浮力影响引起的湍动能 κ 的产生项; Y_m 为表征可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率影响的参数; $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 、 $C_{3\epsilon}$ 均为经验常数, 分别取默认值 1.44、1.92、0.09; S_κ 、 S_ϵ 均为用户定义的源项; C_μ 为经验常数, 取 0.09。

2.2 自由表面追踪

隧洞中水与空气两层流体属于密度不相容的两相流, 适合采用 VOF 法追踪自由表面, 自由表面通过求解一个体积分数连续性方程来捕捉, 第 q 相体积分数满足如下方程:

$$\begin{cases} \partial \alpha_q / \partial t + u_i \partial \alpha_q / \partial x_i = 0 & q = 1, 2 \\ \sum_{q=1}^2 \alpha_q = 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中, α_q 为单元内第 q 相流体所占体积与该单元的体积之比, 若某一时刻网格单元中 $\alpha = 1$, 则表明该单元全部为某一相流体所占据; 若 $\alpha = 0$, 则表明该单元全部为另一相流体占据; 若 $0 < \alpha < 1$, 则表明单元存在两种流体。

3 计算模型及边界条件

3.1 模型建立及网格划分

新疆某泄洪排沙隧洞孔口尺寸为 $6.0 \text{ m} \times 6.8 \text{ m}$, 进口底板高程 1733 m , 设计水位 1776 m , 闸门最大开度为 6.8 m 。本文在设计水位下建立弧形工作闸门开度 (e) 分别为 0.2 、 0.3 、 0.9 、

1.5 、 2.3 、 2.7 m 的六种小开度模型, 见图 1, 该模型主要由水库段、有压隧洞段、闸门段及无压隧洞段组成。将建立好的模型导入 ICEM 中进行网格划分, 由于模型为二维模型, 网格划分以四边形为主, 对底板附近处网格进行局部加密, 计算网格约为 42×10^4 个。

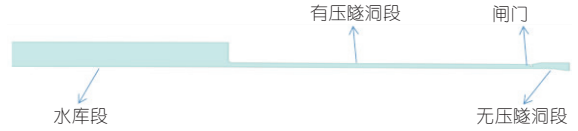


图 1 闸门 2.7 m 开度时计算模型

Fig. 1 Calculation model for 2.7 m opening of gate

3.2 边界条件

入口采用压力入口边界条件, 水流出口边界条件设置为压力出口条件, 壁面设置为固壁无滑移边界条件, 采用壁面函数处理近壁处流动, 流场初始化时以闸门为分界线, 上游充满水, 下游充满空气。各闸门开度下计算终止原则为在计算条件下流场稳定。

4 计算结果与分析

4.1 水流流态分析

本文计算选取体积分数的平均值 $50\% \sim 60\%$ 作为水气交界面即水面线。图 2 为不同开度下隧洞闸门区域流态图。由图 2 可看出, 当流场稳定时, 隧洞内水流体积分数整体层次分明。当闸门开度为 0.2 m 时, 闸门后水面波动较大; 当闸门开度提至 0.3 m 时, 波动出现在挑坎处; 当闸门开度提至 0.9 m 时, 无压洞内水流无明显波动; 当闸门开度为 1.5 m 及以上时, 水面基本无波动。由此可见, 随闸门开度的增加, 隧洞内部的水流流态变得平稳。

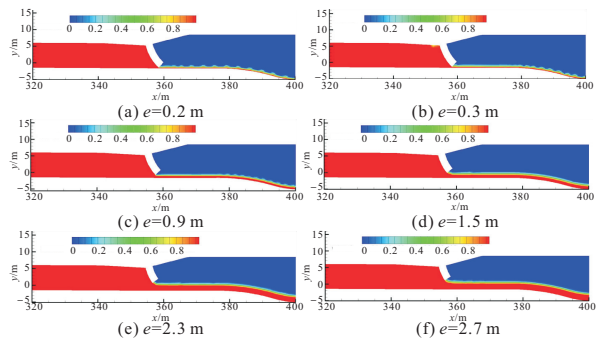


图 2 不同开度下隧洞闸门区域流态图

Fig. 2 Flow pattern diagram of tunnel gate area under different opening degrees

4.2 水流流速分析

图 3 为不同开度下隧洞闸门区域流速图。由图 3 可看出, 在不同闸门开度条件下, 闸门之前的有压洞内水流流速分布均匀, 且随闸门开度的增

大,有压洞内整体流速增大。当闸门开度为 0.2、0.3 m 时,即水流由有压段流向闸门段时,水流流速在闸门附近及闸门底部迅速增大,无压洞内流速靠近闸门处流速较大,随后流速有明显减小。而随闸门开度逐渐增大,隧洞内水流流速在闸门处增大过渡更加平顺。当闸门开度逐渐增大,闸门过流孔口处的主流逐渐靠近闸门底部,使得该处隧洞底部流速减小。无压洞内流速在闸门开度 0.9 m 及以上时,流速分布总体较为均匀。

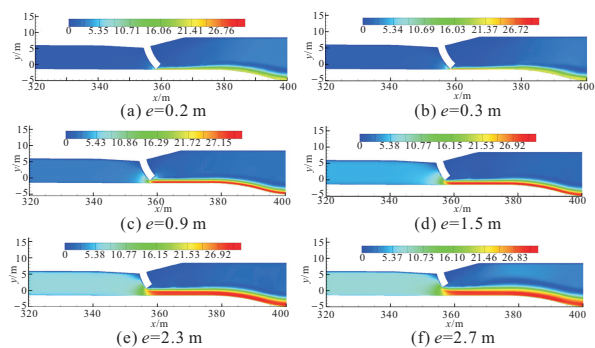


图 3 不同开度下隧洞闸门区域流速图

Fig. 3 Flow velocity diagram of tunnel gate area under different opening degrees

表 1 为不同开度下无压洞内的最大流速。由表 1 可知,各闸门开度下无压洞内最大流速相差较小。隧洞内水流由有压段流向闸门处时,随闸门开度逐渐增大,水流流速由有压段向闸门段过渡的更加平顺,有压段内的整体流速随闸门开度的增大而增大。

表 1 不同闸门开度下无压洞内最大流速

Tab. 1 Maximum flow velocity in uncompressed cavity under different gate openings

闸门开度 /m	最大流速 / (m · s ⁻¹)	闸门开度 /m	最大流速 / (m · s ⁻¹)
0.2	29.44	1.5	29.61
0.3	29.39	2.3	29.61
0.9	29.86	2.7	29.51

图 4 为不同闸门开度下隧洞中部流速。由图 4 可知,有压隧洞内流速分布在垂直方向总体均匀,且总体流速大于入口处流速,但在闸门开度较大即闸门开度为 2.3 m 以上时,最大流速略小于入口处;在闸门开度为 0.2、0.3 m 时,流速由底部向中部过渡时明显不及其他较高闸门开度下平顺,但此时流速较小对无压洞影响很小。隧洞中部最大流速随闸门开度增大而增大,且最大流速处于垂直方向中间位置,当闸门开度为 2.7 m 时,隧洞中部平均流速为 7.63 m/s,满足设计排沙需求。

图 5 为不同闸门开度下隧洞临底流速。由图 5 可看出,数值模拟计算所得临底流速在顺水流

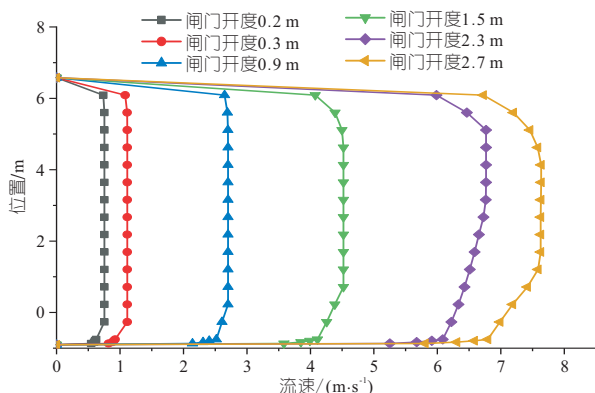


图 4 不同闸门开度下隧洞中部流速

Fig. 4 Flow velocity in the middle of tunnel

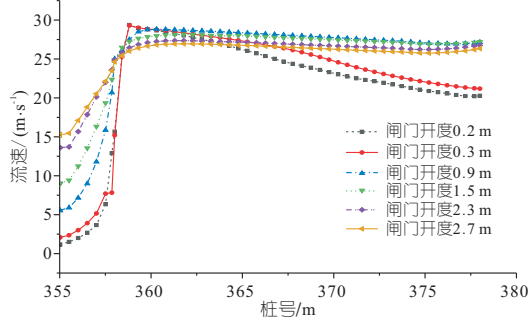


图 5 不同闸门开度下隧洞临底流速

Fig. 5 Flow velocity of tunnel near bottom

方向上水流流经闸门至挑坎之前时,整体流速均为先增大后减小,当闸门开度为 0.2、0.3 m 时,流速减小明显。分析其原因在于由于水深较浅,受到壁面影响较大,因此减小明显;闸门开度越大,临底流速由有压洞过渡到无压洞越平顺;由于闸门开度为 0.2、0.3 m 时流速明显大于其他闸门开度,因此在闸门小开度下,水流对闸门底板区域冲刷更为严重。当闸门开度为 0.9 m 以上时,无压洞内流速随闸门开度增大而减小,且水流在进入挑坎时流速有增大现象。同时闸门开度越大,下游越靠近闸门处的流速越小,且流速过渡更加平顺,对泄洪排沙隧洞运行更有利。

4.3 隧洞底板压强分析

图 6 为不同闸门开度下临底压强。由图 6 可看出,隧洞有压段段底板整体压强在各闸门开度下基本沿程增加,但当闸门开度提至 1.5 m 以上时,该隧洞在进口处压强先减小后增大;随闸门开度不断增大,隧洞有压段底板各桩号压强整体呈逐渐减小趋势。在隧洞有压段向无压段过渡时,底板压强迅速降低,在无压段内,不同开度下底板压强均在闸门附近处(桩号 0+360)达到最大,随闸门开度增加,上下游压力差逐渐变小。无压洞内到挑坎之前整体压强与有压段内压强随闸门开度变化相反,随闸门开度增大,压强逐渐增大,但此处洞内压强总体较小,且此段未出现负压;当进

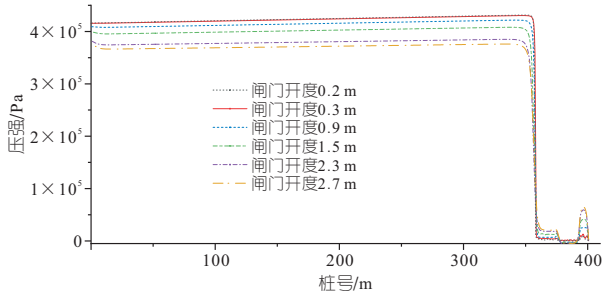


图 6 不同闸门开度下临底压强对比

Fig. 6 Bottom pressure under different gate openings

入正弧段后压强出现降低,在闸门开度为 0.2、0.3 m 时,压强降低不明显且基本未出现负压,当闸门提至 0.9 m 后,正弧段开始出现负压且随闸门开度增大负压增大;各闸门开度下,当水流进入反弧段后压强水头均又增大至正压,且此处压强水头较大,在出口处压强又开始降低。当闸门开度为 2.7 m 时,正弧段负压达到 -4.6 kPa,因此在大开度时需注意正弧段处空化破坏。

4.4 隧洞底板空化数分析

图 7 为不同闸门开度下空化数。由图 7 可知,在设计水位时,各闸门开度下闸门至挑坎前的底板空化数均为先减小后增大。当闸门开度为

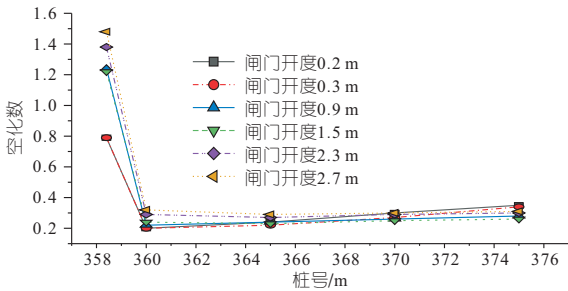


图 7 不同闸门开度下空化数

Fig. 7 Comparison of cavitation numbers at different gate openings

0.2、0.3、0.9 m 时,闸门下游越靠近闸门处的底板空化数明显越小;当闸门开度为 0.3 m 以上时,该段整体空化数随闸门开度增大而增大,因此该隧洞在闸门小开度运行时闸门附近为底板更易发生空化破坏,在闸门开度为 2.7 m 时隧洞较为安全,因此为保证建筑物的使用安全,应尽可能地将闸门开度提高至 2.7 m 以上。

5 结论

a. 隧洞内的流态随闸门开度增大而逐渐平顺,无压洞内临底流速总体为先增大后减小,闸门处临底最大流速随闸门开度减小而增大,且闸门开度为 0.2 m 时,闸门临底最大流速达 30 m/s,对闸门底部的冲蚀更加严重。

b. 隧洞中部流速随闸门开度增大而增大,当闸门开度为 2.7 m 时,隧洞中部平均流速为 7.63 m/s,满足设计排沙需求。

c. 不同闸门开度下,闸门至挑坎前的底板空化数均为先减小后增大,当闸门开度低于 0.9 m 时,闸门底板处的空化系数很小,更加容易发生空化,加上泥沙磨损的作用,隧洞的磨蚀破坏更加严重。

参考文献:

[1] 文林森,王才欢,杨伟,等. 水工附环闸门闭门过程水力特性数值模拟研究[J]. 长江科学院院报,2017,34(10):68-73.
 [2] 张雷,张健峰,赵振杰,等. 三门峡水库泄水建筑物磨蚀修复试验研究[J]. 人民黄河,2017,39(1):110-112,120.
 [3] 罗昌辉. 博斯坝水库表孔溢洪洞水力特性研究[J]. 广西水利水电,2020(2):23-26.
 [4] 王海军,张凡,李会平. 溢洪道泄流临底流速仿真模拟研究[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(5):128-132.

Influence of Gate Opening on Hydraulic Characteristics of Hydraulic Tunnel

ZHANG Lei^{1,2}, WANG Zhong-lin³, SU Hao⁴, WANG Xian-zhong⁵, CAO Zun-yi^{1,6}, ZOU Le-le⁷

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou 450003, China; 2. Henan Engineering Research Center of Hydropower Engineering Abrasion Test and Protection, Zhengzhou 450003, China; 3. Yellow River Water & Hydropower Development Group Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China; 4. Xinjiang Huadian Hetian Hydropower Co., Ltd., Hetian 848000, China; 5. Manzhouli Jinyuan Water Co., Ltd., Manzhouli 021400, China; 6. College of Energy and Electric Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 7. Henan Zhihe Engineering Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: In order to reveal the influence of the gate opening on the hydraulic characteristics of hydraulic tunnels, a two-dimensional model of silt-releasing tunnel with different gate openings was established. The VOF method and standard κ - ϵ turbulence model were used for three-dimensional numerical simulation calculation of flow field in abrasive section of flood silt-releasing tunnel. The hydraulic characteristics such as flow state, velocity and pressure near the gate were obtained. The hydraulic characteristics under different gate opening degrees were analyzed to obtain the cavitation number from the gate to the threshold. The results show that when the gate operation opening is less than 1/2 maximum opening, the larger the gate opening is, the smoother the tunnel flow state is, the smoother the flow velocity near the bottom is, the lower the pressure difference between the upstream and downstream of the tunnel floor is. The smaller the gate opening is, the smaller the flow rate in the pressure cave is, and it is easy to cause sediment deposition; The greater the opening of the gate is, the more favorable the overall operation of the tunnel is. The research results have guiding significance for the optimization of the operating opening of the hydraulic tunnel gate and the anti-wear repair of the gate bottom sill.

Key words: flood discharge tunnel; gate opening; hydraulic characteristics; VOF model; anti-wear repair