

文章编号:1673-9469(2023)02-0098-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.02.015

深孔有压隧洞平板闸门小开度闸后水力特性及 改善措施试验研究

曾东山¹, 苟超¹, 龙志¹, 曾红¹, 杨红宣^{2*}

(1. 三峡集团中国华水水电开发有限公司, 四川 成都 610041; 2. 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650000)

摘要: 深孔有压隧洞平板闸门小开度运行时, 闸后水流侧收缩现象比较严重, 流态较为复杂, 需要采取一定的工程措施来改善闸后水流流态。基于物理模型试验与理论分析相结合的方法研究了不同导流坎坎高下的闸后水力特性。结果表明: 闸后水流侧收缩现象随导流坎坎高的增加而减小, 闸后水流水舌高度和水舌长度明显降低且底板负压基本消失, 压强分布趋于均匀。但闸室导流坎坎高的增加对过流能力有一定影响, 相对平底闸室, 闸下过流能力随导流坎坎高的增加而减小, 为避免影响过流能力, 导流坎坎高不宜太大。

关键词: 平板闸门; 小开度; 有压隧洞; 闸室; 导流坎

中图分类号: TV131.6

文献标识码: A

Experimental Study on the Hydraulic Characteristics and Improvement Measures of Deep Hole Pressurized Tunnel Plane Gate After Small Opening

ZENG Dongshan¹, GOU Chao¹, LONG Zhi¹, ZENG Hong¹, YANG Hongxuan^{2*}

(1. Three Gorges Group China Huashui Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610041, China;
2. School of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650000, China)

Abstract: The side contraction of the water behind the gates is more serious and the water flow diffuses longitudinally, resulting in a more complex flow pattern, when the plane gate of the deep-hole pressure tunnel operates with small opening. Therefore, some engineering measures need to be taken to improve the flow pattern behind the gates. Based on the physical model experiment and the theoretical analysis, the hydraulic characteristics behind the gate under different heights of diversion ridge are studied in this paper. The results show that the side contraction of the water behind the gate decreases with the increase of the height of the diversion ridge, the height and length of the tongue of the water behind the gate decrease significantly and the negative pressure of the bottom plate basically disappears, and the pressure distribution tends to be uniform. However, the increase of the height of the diversion ridge in the gate chamber has a certain influence on the flow capacity. Compared with the plane bottom gate chamber, the flow capacity under the gate decreases with the increase of the height of the diversion ridge. In order to avoid affecting the flow capacity, the height of the diversion ridge should not be too high.

Key words: plane gate; small opening; pressurized tunnel; gate chamber; diversion ridge

闸门是一种活动的挡水或泄水建筑物^[1-3], 常用于引水渠、泄洪洞、溢洪道等水工建筑物中调节水流, 有时也对水工建筑物的孔口进行封闭, 通常

根据实际需要, 通过对闸门开度进行控制从而达到调节水位、分配流量和排放泥沙等作用, 于是势必会出现闸门处于小开度运行状态^[4-6]。在高水

收稿日期: 2022-11-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52069009); 中国三峡建工(集团)有限公司科研项目(JG/18021B)

作者简介: 曾东山(1977-), 男, 四川成都人, 硕士, 高级工程师, 从事水力学及河流动力学方面的研究。

* 通讯作者: 杨红宣(1975-), 男, 云南昆明人, 博士, 副教授, 从事水力学及河流动力学方面的研究。

头运行条件下,平板闸门小开度闸后水流流态势必会发生变化,已有研究表明,深孔闸门小开度运行时间闸后水流容易造成冲顶现象^[7],从而可能危及到泄水建筑物的安全运行,因此改善闸后水流流态对于高水头平板闸门小开度运行时尤为重要。近年来,不少学者对高水头平板闸门水力特性做了许多研究工作并取得了不少成果。王海军等^[7]通过物理模型试验对平板闸门小开度闸后水舌形态进行了研究分析,并基于涡流理论得到了闸门槽最优错距比计算公式。樊晶晶等^[8]通过采用数值模拟的方法对平板闸门小开度闸后水流特性进行了研究,得到了矩形门槽最佳宽深比。郝鑫等^[9]通过将物理模型试验与数值模拟相结合的方法对高水头平板闸门小开度闸后水流特性进行了研究,得到了闸后水流压力、紊动能和紊动能耗散率等分布规律。综上所述,学者在平板闸门小开度闸后水力特性方面的研究较多,但在改善平板闸门小开度闸后流态方面的研究还不够完善,实际上,闸门处于局开时闸后水流流态较全开时明显不同,尤其在高水头运行条件下,闸后水流侧收缩现象十分明显,水流流线急剧弯曲,加剧了水流的紊动,闸后水流十分紊乱。鉴于此,笔者通过物理模型试验方法对平板闸门小开度闸后水力特性进行研究,并在此基础上研究了一种改善闸后水流流态的措施,研究成果旨在进一步为类似工程的设计与防护提供参考。

1 物理模型

试验模型主要由水库、闸前有压段、闸室段及闸后无压段等4部分组成,模型试验体形如图1所示。其中,闸前有压段进口型式采用矩形方角进口,断面尺寸由12 cm×16 cm(宽×高)渐变为10 cm×10 cm(宽×高),长度(指有压隧洞进口至闸室段进口处)为120 cm。闸室段断面尺寸为10 cm×

10 cm(宽×高),长度为25 cm,包括工作闸门槽长,闸门形式采用平底式闸门,闸门槽采用矩形方角门槽,宽深比为3:2,与断面尺寸为10 cm×20 cm(宽×高)、底坡*i*=5%的无压明渠段相连,闸后无压段长为140 cm。在闸后底板中轴线上布设D1—D10共10个测压孔,在图示xyz坐标系(坐标单位cm)中为D1(5,0,0)、D2(15,0,0)、D3(30,0,0)、D4(45,0,0)、D5(60,0,0)、D6(75,0,0)、D7(90,0,3)、D8(105,0,0)、D9(120,0,0)、D10(135,0,0)。为便于试验观测,整个模型从闸前有压段进口至闸后无压段均采用厚8 mm的有机玻璃制作。

将闸门开度小于隧洞高度的30%称为闸门小开度^[8],试验分别取闸门相对开度为10%、13%和16%等3种情况进行物理模型试验。在闸门相对开度不变的条件下,水头增加则下泄流量增大,故可用不同流量反映不同水头,为方便试验观测,试验流量供给采用矩形薄壁堰进行控制,水位采用精度为0.1 mm的水位测针量测,并引入无量纲化参数来表征下泄流量大小^[10],即 Q^2/gD^5 ,其中, Q 为下泄流量, m^3/s ; D 为有压隧洞进口直径,m。测点水深与时均压强利用玻璃测压管及精度为1 mm的钢板尺测量。

2 试验结果分析

2.1 闸后流态分析

平板闸门小开度闸后水流流态的好坏通常与闸前水头、闸门开度、闸门槽及闸门下缘形式有关。本试验是在固定闸门槽及闸门下缘形式不变的条件下研究闸前水头与闸门开度对闸后流态的影响,试验中通过改变闸门相关开度的大小,针对不同闸前水头,可以将闸后水流流态沿程划分为“收缩段、扩散段及破碎段”3个阶段。闸孔水流在闸门槽横向收缩作用下在纵向形成一股射流,且水流的水舌高度和水舌长度与闸前水头和闸门相

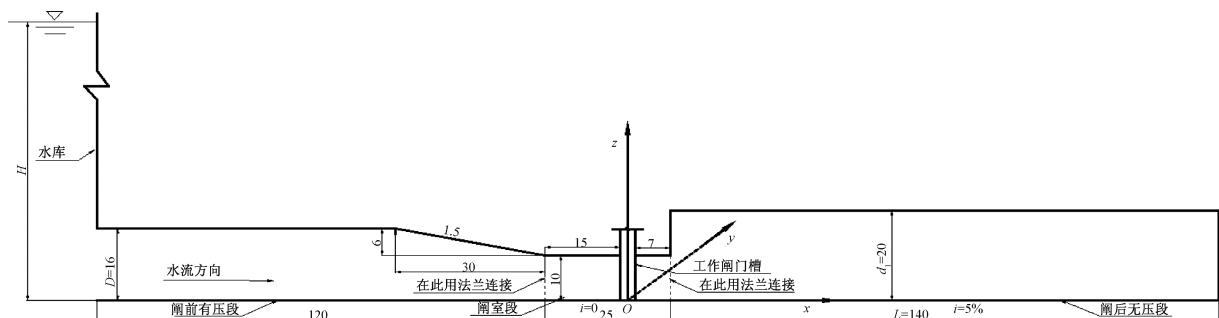
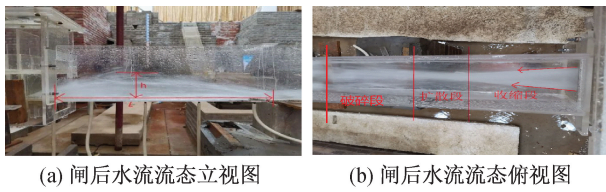


图1 模型试验体形(单位:cm)

Fig. 1 Model diagram layout (unit: cm)



(a) 闸后水流流态立视图 (b) 闸后水流流态俯视图

图2 平板闸门小开度闸后水流流态实景图

Fig. 2 Realistic view of the flow pattern after a small opening of the flat gate

对开度之间的相关性较强。在闸前水头较高、闸门相对开度较小的情况下,过闸水流在闸门槽横向收缩束窄作用下闸门下缘两侧处表层水流挑的较高,水流挑射距离也较远,水流掺气比较充分,水舌湍动也较为剧烈。相反,在闸前水头较低、闸门相对开度较大的情况下,出闸水流受闸门槽的横向收缩束窄作用较小,闸门下缘两侧处水流的挑射角也较小,水流的掺气程度也有所减小。

2.2 闸后水面曲线分析

为了研究小开度平板闸门后水面曲线沿程变

化关系,试验分别对不同流量和不同闸门相对开度下的闸后底板沿程水深进行了实测,并将试验实测数据绘制成图3所示。

从图3可以看出,不同流量下闸后底板水深沿程变化规律基本一致,均表现为先增加后减小的变化趋势。这主要因为出闸水流在横向上受到闸门槽的横向收缩作用,闸门下缘两侧水流以对称的形式向底板轴线方向收缩,水流在横向上得到束缚。另外,在惯性力作用下,闸门下缘水流在竖向上因闸门开度的垂向收缩作用,导致出闸水流在竖向上继续向前收缩,收缩至最小断面处惯性力作用得到减弱,在横向的束缚作用下,水流在竖向上得到扩散从而在闸后形成一股射流,且水流的水舌高度及水舌长度均随流量的增加而增加。此外,相同流量下,闸后水舌外缘最高点和水舌长度随着闸门相对开度的增加而减小。其原因在于闸下过流面积随闸门相对开度的增加而增加,过闸水流在横向上的收缩程度得到削弱,水流在横向得到扩散。

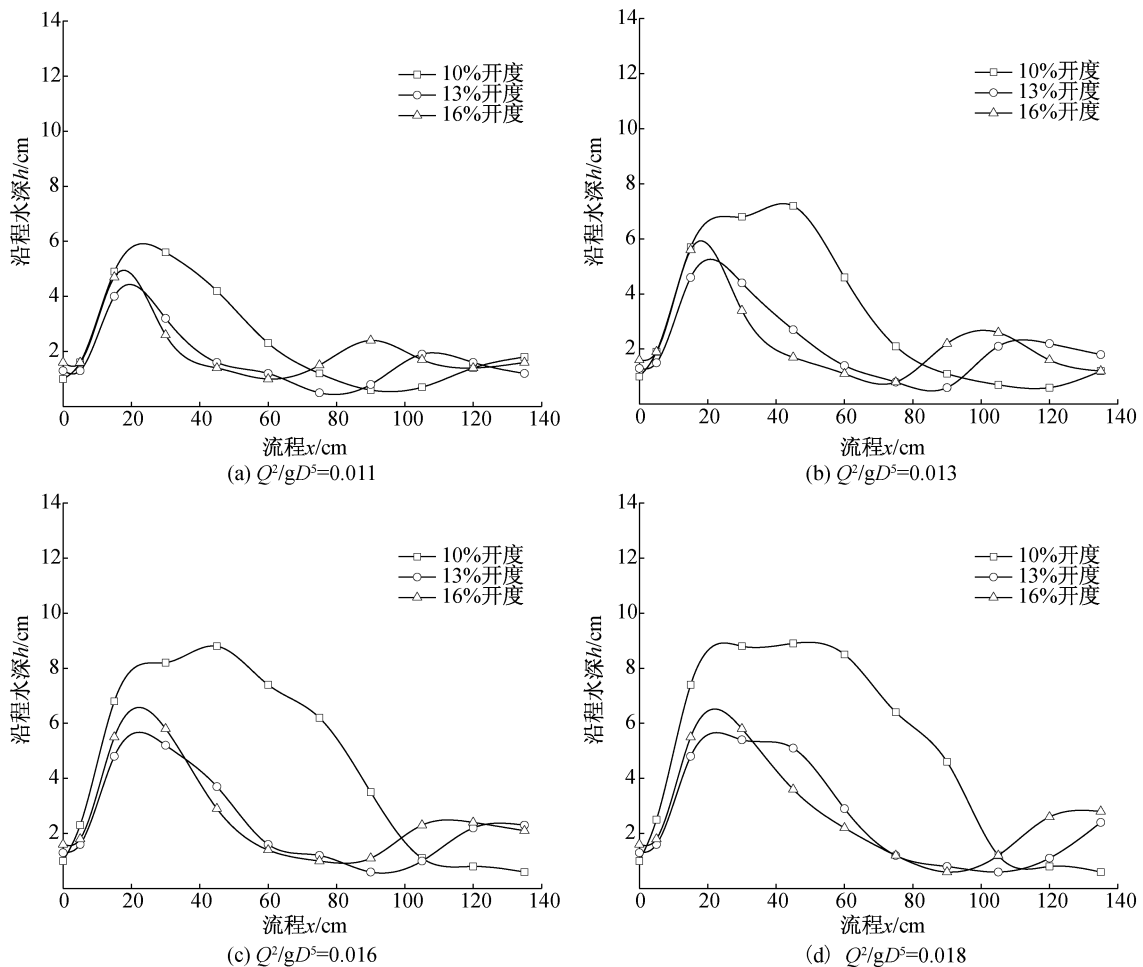


图3 不同流量下闸后底板沿程水深变化曲线

Fig. 3 Variation curve of water depth along the bottom plate after the gate at different flow rates

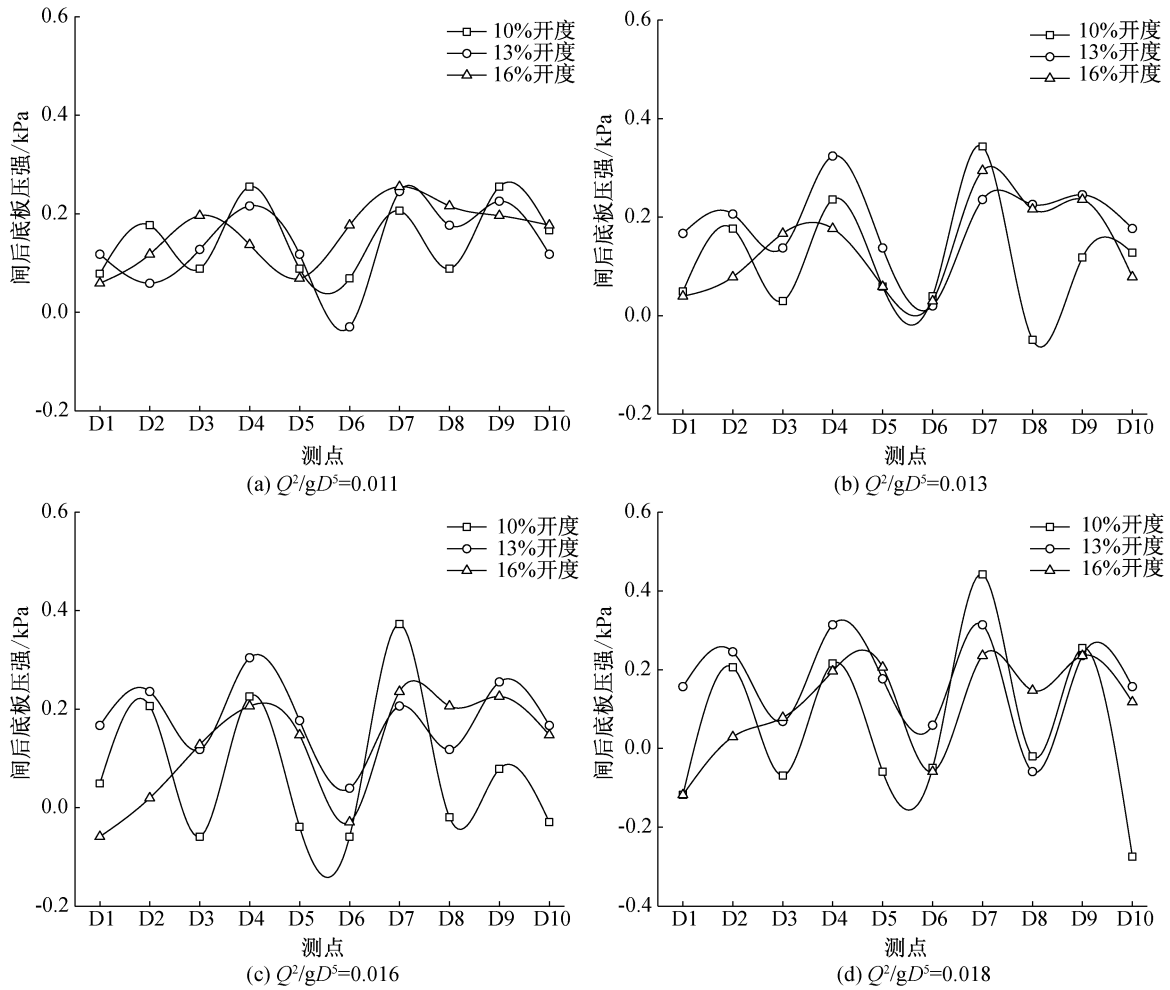


图 4 不同流量下闸后底板压强分布曲线

Fig. 4 Pressure distribution curve of the bottom plate after the gate at different flow rates

2.3 闸后时均压强分析

深孔有压隧洞平板闸门小开度运行时,由于闸门槽及闸门开度的影响使得过流边界条件发生了改变,水流的连续性遭到破坏,过闸水流容易在闸后产生空化、空蚀破坏从而可能引成建筑物结构失稳,所以压强是衡量泄水建筑物结构能否安全运行的重要参数之一^[11]。试验实测了 3 种闸门相对开度在 4 种不同流量参数 $Q^2/gD^5 = 0.011、0.013、0.016$ 和 0.018 下的底板时均压强,如图 4 所示。

从图 4 可以看出,不同水力条件下,闸后底板时均压强沿程分布规律基本相似,并且随着流量的增加其压强沿程波动幅度较大甚至在不同测点处有负压出现,闸后负压的产生主要是因为出闸水流在闸后形成一股挑射水流导致水流脱离底板所致。另外,在相同流量下,底板压强沿程波动幅度随闸门相对开度的增加而逐渐减小,闸门开度越大,压力峰值越小,并且压力峰值越靠前。这是因为在相同水力条件下,闸后水流水舌高度和水

舌距离随闸门相对开度的增加而减小。

3 改善措施研究

通过对高水头平板闸门小开度闸后水流流态、水面线及底板时均压强分析可知,闸后水流横向收缩比较严重,过闸水流容易在闸后形成一股射流且闸后底板有负压出现,可能对底板产生空蚀破坏。因此有必要采取一些工程措施来改善闸后水流流态,避免闸后水流冲顶及减小或消除底板负压,本措施是在原闸室平坡底板上局部加设一三角形导流坎,试验共设了坎高 $\Delta = 1.5、2.5$ 与 3.5 cm,3 种体形的导流坎,体形参数见表 1、图 5 所示。

表 1 方案参数表

Tab. 1 Table of programme parameters

导流坎坎高 Δ/cm	闸室高度 d/cm	相对坎高 ξ
1.5	10	0.15
2.5	10	0.25
3.5	10	0.35

注: d 为闸室进口高度,相对坎高 $\xi = \Delta/d$ 。

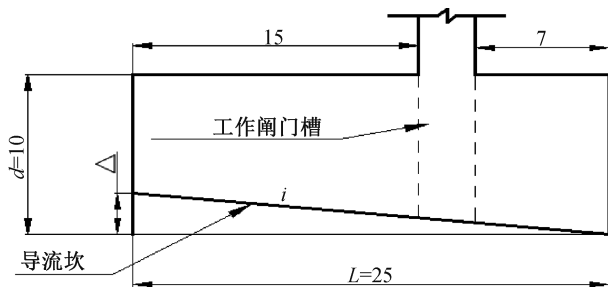


图5 闸室导流坎示意图(单位:cm)

Fig. 5 Schematic diagram of the diversion ridge (unit: cm)

3.1 导流坎坎高对闸下过流能力的影响

水利工程中通常用一无量纲数——流量系数 μ 来反映某一堰闸的过流能力,而流量系数 μ 值的计算通常又与堰闸出流方式有关。本试验所有工况下闸下出流方式均为闸孔出流,按《水力学》^[12]教材闸孔出流计算公式,可知流量系数计算公式为:

$$\mu = \frac{Q}{Be\sqrt{2gH}} \quad (1)$$

式中: μ —闸孔出流流量系数; Q —孔流流量, m^3/s ;

B —闸孔底宽, m ; e —闸孔开度, m ; H —闸前水头(即闸前库水位与闸底板之间的高差), m 。

为了探究导流坎坎高对闸下过流能力的影响,试验分别对不同导流坎坎高下的水位进行了实测,并按式(1)进行计算,不同坎高下的流量系数变化关系见图6示。从图6中可以看出,导流坎坎高对闸下过流能力的影响比较明显,闸孔过流能力随导流坎坎高的增加而减小,流量系数主要在0.732~0.483之间变化。尤其在下泄流量参数 $Q^2/gD^5=0.018$ 、闸门相对开度为10%的工况下,导流坎相对坎高 $\xi=0.15$ 时,流量系数相比闸室底坡为平坡($\xi=0.0$)时减少了1%,当导流坎相对坎高 $\xi=0.25$ 时,流量系数相比平坡时减少了10%,当继续增加导流坎相对坎高 $\xi=0.35$ 时,流量系数相比平坡时减少了18%。可见,为避免影响过流能力,导流坎坎高不宜太大。

3.2 导流坎坎高对闸后水面曲线的影响

为了研究导流坎坎高对闸后水面线的影响,试验实测了3种导流坎坎高在4种流量参数 $Q^2/gD^5=$

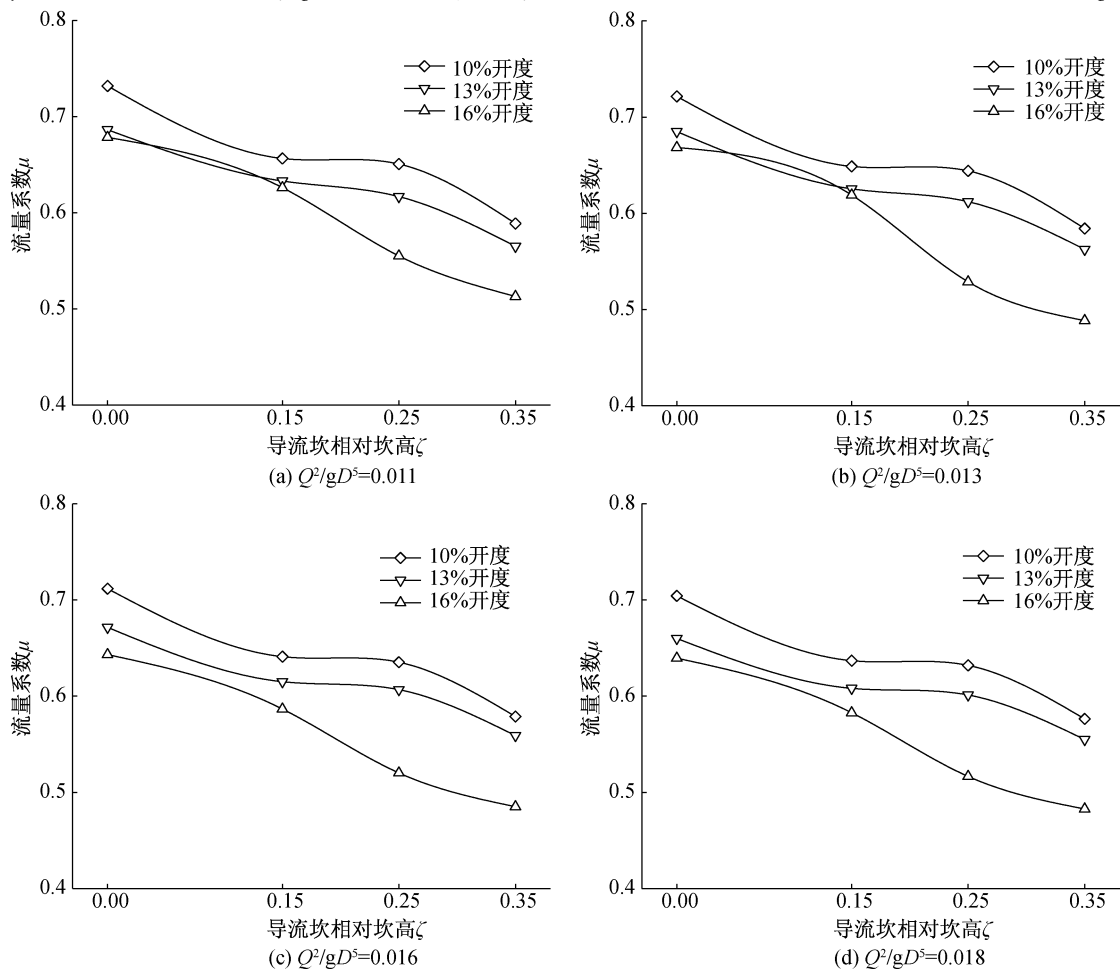


图6 不同流量下导流坎坎高与流量系数的关系曲线

Fig. 6 Relationship curve between diversion ridge height and flow coefficient μ at different flow rates

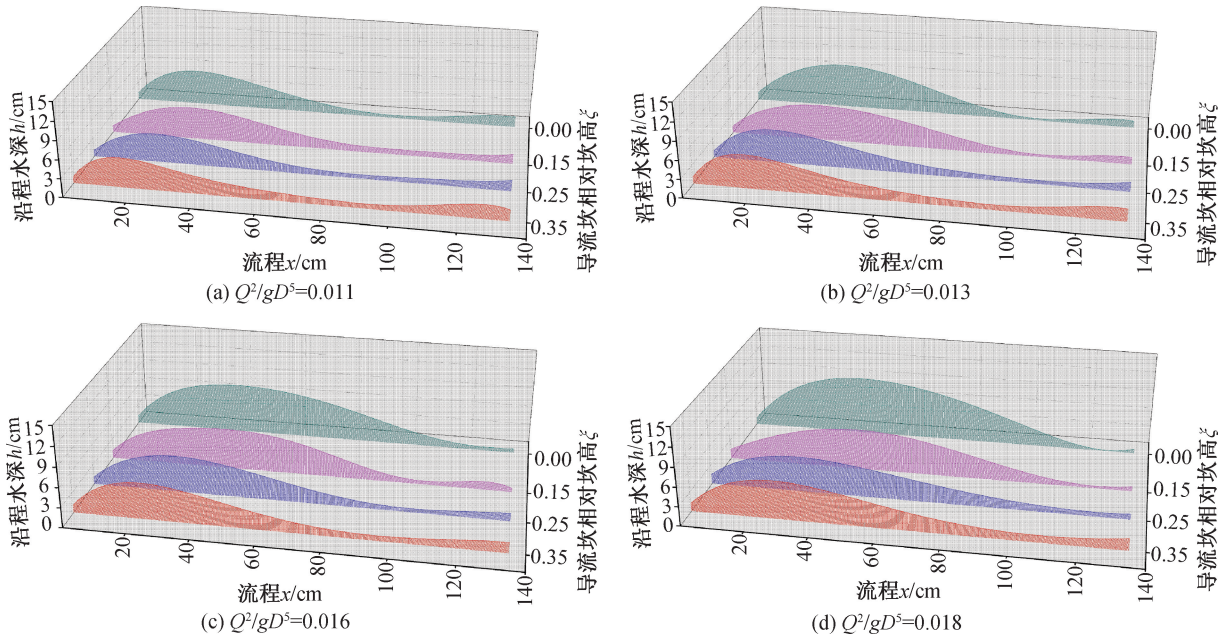


图 7 闸门相对开度为 10%,不同流量下导流坎坎高与闸后水面曲线之间的变化关系

Fig. 7 The relationship between the change of diversion ridge height and the water surface curve behind the gate at different flow rates with the relative opening of the gate at 10%

表 2 闸门相对开度为 10%时,各闸室坎高下闸后水舌外缘最高点与水舌长度

Tab. 2 The highest point of the outer edge of the water tongue and the length of the water tongue after the diversion ridge of each gate chamber down the gate when the relative opening of the gate is 10%

相对坎高 ξ	$Q^2/gD^5 = 0.011$		$Q^2/gD^5 = 0.013$		$Q^2/gD^5 = 0.016$		$Q^2/gD^5 = 0.018$	
	ε	δ	ε	δ	ε	δ	ε	δ
$\xi = 0.00$	0.29	0.479	0.38	0.607	0.46	0.700	0.47	0.750
$\xi = 0.15$	0.26	0.464	0.28	0.571	0.32	0.643	0.34	0.714
$\xi = 0.25$	0.23	0.429	0.25	0.464	0.26	0.536	0.33	0.643
$\xi = 0.35$	0.21	0.429	0.23	0.464	0.24	0.500	0.28	0.586

注: $\varepsilon = h/d_1$, h 为闸后水舌高度, cm; d_1 为闸后无压明渠段尺寸高度, cm; $\delta = l/L$, l 为闸后水舌长度, cm; L 为闸后无压明渠段长度, cm。

0.011、0.013、0.016 及 0.018 下的闸后底板沿程水深,不同坎高下的闸后水面曲线变化关系如图 7 所示。

从图 7 中可以看出,在相同水力条件下,闸后水流的挑射高度和挑射距离与闸下导流坎坎高之间的相关性较为明显。在闸门相对开度不变的情况下,闸后水流水舌高度及水舌长度随导流坎坎高的增加而呈现减小的变化规律,减小程度随坎高的增加越明显,具体变化如表 2 所示。另外,从表中数据还可以看出,相同开度不同水力条件下,随着导流坎坎高的增加,闸后水流水舌高度相比平底闸室减少了 22%~40%,水舌长度则减少了 3%~22%。这是因为在闸门相对开度不变时,闸前水流流线的倾斜程度随导流坎坎高的增加越明显,闸孔水流与闸后底板之间的入射角较无坎(平坡)时有所减小,同时在势能作用下,闸孔水流在横向上的收缩程度也相对较无坎(平坡)时有所减

弱,水流在横向上得到扩散。表明适当增加导流坎坎高有利于改善闸后水流流态。

3.3 导流坎坎高对闸后底板压强的影响

压强作为泄水建筑物结构能否安全运行的重要参数之一,有必要对其进行研究分析^[13-14]。试验分别对 3 种不同导流坎坎高下的闸后底板时均压强进行了实测,并将试验实测数据绘制成图 8。从图 8 中可以看出,不同水力条件下,导流坎坎高对闸后压强沿程分布的影响比较明显且变化趋势基本相同,压强沿程波动幅度随着导流坎坎高的增加而减小,压强沿程分布逐渐趋于平缓且底板无负压出现,底板压强只有在闸后挑射水流与底板主流碰撞破碎处发生突变。这主要因此处水流湍动剧烈,压强受动水压力影响较大。另外,在相同坎高不同流量下,闸后压强沿程波动幅度随着流量的增加而增加,尤其在流量参数 $Q^2/gD^5 =$

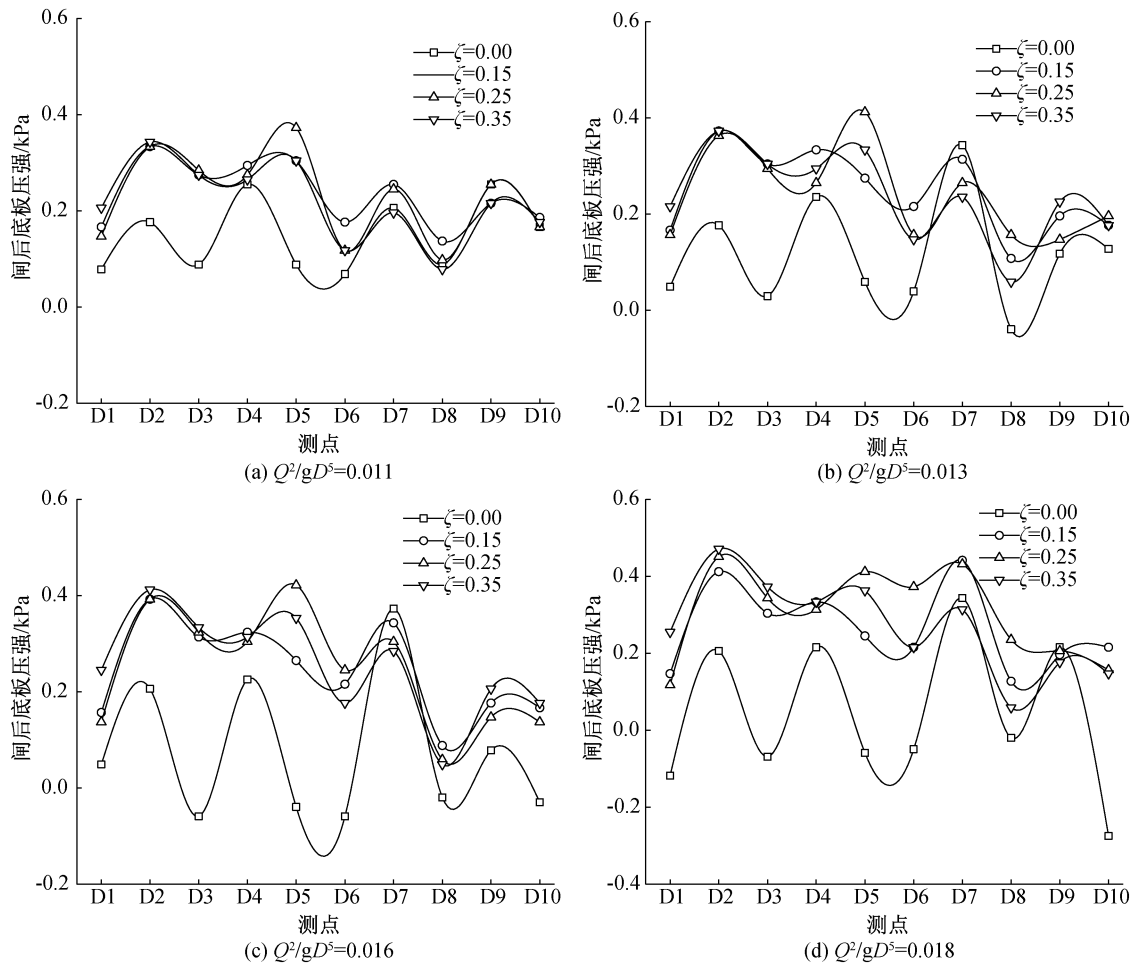


图8 闸门相对开度为10%,不同流量下导流坎坎高与闸后压强沿程分布关系曲线

Fig. 8 The relationship between the height of the diversion ridge and the pressure distribution behind the gate at different flow rates with the relative opening of the gate at 10%

0.018时压强沿程波动幅度差可达0.62 kPa左右。这主要因在闸门相对开度及导流坎坎高不变的条件下,闸前作用水头与流量同步增减,流量越大,闸前作用水头也就越大,出闸水流在横向和竖向上的收缩程度得到增加,水流紊动作用得到加强。

4 结论

1) 闸后水流侧收缩现象随导流坎坎高的增加而减小,但对过流能力有一定的影响,相对平底闸室,过流能力随导流坎坎高的增加而减小,流量系数主要在0.732~0.483之间变化,为避免影响过流能力,导流坎坎高不宜太大,建议导流坎相对坎高 Δ/d 在0.25左右。

2) 压强沿程波动幅度随着导流坎坎高的增加而减小,闸后水流水舌高度和水舌长度明显降低且底板负压基本消失,压强分布比较均匀。

3) 试验是在闸门槽及闸门下缘形式不变的条

件下对导流坎坎高开展了研究,研究内容难免存在不足之处,闸门槽及闸门下缘形式对闸后水力特性的影响有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 闫骏霞,陈小霞,郑世华. 浅谈不同类型闸门在水利工程中的应用[J]. 科技世界,2015,18:232.
- [2] 牛利敏. 长引水压力隧洞平面闸门启闭力及稳定性试验研究[D]. 天津:天津大学,2015.
- [3] 姜凯. 事故闸门动水闭门力及爬振特性研究[D]. 天津:天津大学,2017.
- [4] 张雷,王中林,苏昊,等. 闸门开度对泄洪排沙隧洞水力特性影响研究[J]. 水电能源科学,2023,41(3):117-120.
- [5] 刘竹丽,陈赞,伊元忠. 不同开度下平面钢闸门流固耦合数值模拟研究[J]. 人民黄河,2020,42(11):79-83.
- [6] 洪镛,牛争鸣,贺立强,等. 公伯峡水电站旋流泄洪洞不同闸门开度运行与原型水力特性观测[J]. 应用基础与工程科学学报,2010,18(3):442-451.

(下转第112页)

- 工程水文地质问题[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 14-16.
- [3] 张永双, 郭长宝, 李向全, 等. 川藏铁路廊道关键水工环地质问题: 现状与发展方向[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 2-8.
- [4] 郭长宝, 王保弟, 刘建康, 等. 川藏铁路交通廊道地质调查工程主要进展与成果[J]. 中国地质调查, 2020, 7(6): 2-4.
- [5] 宋健, 唐方头, 邓志辉, 等. 青藏高原嘉黎断裂晚第四纪运动特征[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2013, 49(6): 974-978.
- [6] 郑来林, 金振民, 潘桂棠, 等. 东喜马拉雅南迦巴瓦地区区域地质特征及构造演化[J]. 地质学报, 2004, 78(6): 744-748.
- [7] 王玉海, 李曦滨, 李茸, 等. 曹村煤矿十采区水文地质条件与突水危险性分析[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2010, 27(3): 66-68.
- [8] 张宇. 川藏铁路贡嘎隧道水文地质条件及线路优选研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- [9] 彭琪. 拉月隧道温泉成因机制及地温场数值模拟研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- [10] 朱志强. 色季拉山隧道工程岩体渗透特征及涌水预测研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- [11] 郭艺, 甘甫平, 闫柏琨, 等. 基于聚类分析与因子分析的西藏高原南部湖水水化学特征研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2021, 38(3): 81-89.
- [12] 李倩, 王普, 王秀村, 等. 基于改进多属性群决策的高速铁路建设项目质量管理绩效评价[J]. 铁道学报, 2018, 40(5): 156-163.
- [13] 薛翊国, 孔凡猛, 杨为民, 等. 川藏铁路沿线主要不良地质条件与工程地质问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(3): 446-460.
- [14] 马剑飞, 李向全, 张春潮, 等. 西藏波密冰川覆盖区大型河流与断裂带地下水转化关系[J]. 水文地质工程地质, 2021, 2021, 48(5): 24-32.

(责任编辑 周雪梅)

(上接第 90 页)

- [4] 赵迎辉. 高速交会列车的气动性能及车辆动力学特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [5] 田红旗. 风环境下的列车空气阻力特性研究[J]. 中国铁道科学, 2008(5): 108-112.
- [6] 周鹏. 高速列车气动特性及环境影响研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- [7] 张小钢, 刘应清, 赵海恒. 高速列车经过路边建筑物时的非定常湍流绕流数值模拟研究[J]. 铁道学报, 1998(2): 88-93.
- [8] 金海, 杨立国, 陈凯. 地铁列车高速过站风环境数值模拟研究[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2015, 51(4): 606-612.
- [9] 王英学, 高波, 骆建军, 等. 高速列车进入隧道空气动力学模型实验分析[J]. 空气动力学学报, 2004(3): 346-351.
- [10] 王瑞丽. 高速列车驶入隧道气动效应数值模拟研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.
- [11] 周朝晖, 许建林, 梅元贵. 高速铁路隧道空气动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [12] 黄颖. 城际铁路隧道及地下车站空气动力学效应研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [13] 徐文协. 高速地铁列车在单洞双线隧道中的空气动力效应研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021.
- [14] 管鸿浩, 龚彦峰, 踪敬良, 等. 高速列车单列通过时双线隧道内列车风分布规律研究[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(6): 83-89.
- [15] 蒋尧, 李奎, 胡炜, 等. 时速 350 km 高速铁路半地下车站气动效应影响研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(S1): 187-193.
- [16] 邓隆. 高速铁路隧道洞口异型缓冲结构气动参数分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [17] 韩华轩. 高速铁路地下车站隧道气动效应及缓解措施研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [18] 闫亚光, 杨庆山. 高速列车隧道内会车时气动舒适性研究[J]. 北京交通大学学报, 2017, 41(1): 56-61.
- [19] 李凌宇. 地下高铁站台屏蔽门气动效应研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020.

(责任编辑 周雪梅)

(上接第 104 页)

- [7] 王海军, 陈海滨, 余佩义. 平板闸门小开度时侧收缩引起的水流现象试验研究[J]. 昆明理工大学学报: 理工版, 2007(1): 28-30+35.
- [8] 樊晶晶, 王海军, 毛舒娅, 等. 平板闸门小开度闸后水流特性数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(2): 124-128.
- [9] 郝鑫, 黄海艳, 王海军, 等. 高水头平板闸门小开度的数值模拟与试验对比[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(1): 30-34.
- [10] 苟超, 杨红宣, 沈春颖, 等. 折流角变化下的旋流式竖井溢洪道涡室脉动压强试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2022(7): 214-220.
- [11] 郭子敬. 基于矢量和法的库水位下降边坡稳定性研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2018, 35(2): 31-34+48.
- [12] 吴持恭. 水力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [13] 王蓓, 吕城腾, 纪南. 某水电站倾倒岩体基于 UDEC 变形评价方法研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2017, 34(3): 60-64.
- [14] 苟小武, 刁明军, 王川隘, 等. 消力池尾坎坡度对底板脉动压强特性的影响试验研究[J]. 西南民族大学学报: 自然科学版, 2022, 48(6): 701-708.

(责任编辑 周雪梅)