



碾盘山船闸输水系统设计与试验研究

卜美飞, 孙保虎, 胡峰军, 胡开菊

(湖北省交通规划设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430051)

摘要: 碾盘山船闸等级为Ⅲ级, 最大设计水头 14.2 m, 属于中水头大型船闸, 根据类似工程相关经验, 船闸采用闸墙长廊道侧支孔分散输水系统, 推荐阀门开启时间为 6 min, 输水系统以及阀门开启时间选用是否合理直接影响水流及船舶停泊条件。通过水力特性计算并结合 1:15 物理模型, 对输水系统水力特性、廊道压力、闸室停泊条件进行分析。结果表明, 碾盘山船闸采用闸墙长廊道侧支孔输水系统是合理的, 设计的阀门开启时间下各项输水水力特征指标均能满足设计和规范要求。

关键词: 碾盘山船闸; 输水系统; 水力计算; 模型试验

中图分类号: U 641.3+2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)05-0104-06

Design and test study on filling and emptying system of Nianpanshan lock

BU Mei-fei, SUN Bao-hu, HU Feng-jun, HU Kai-ju

(Hubei Provincial Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430051, China)

Abstract: Nianpanshan lock is identified as Grade III, with a maximum design head of 14.2 m, belonging to a large medium-head lock. According to relevant project experience, the long-corridor filling and emptying system with side branch holes inside the lock wall is adopted. The recommended valve opening time is 6 min. The filling and emptying system and valve opening time directly affect the water flow and berthing conditions. Through the hydraulic calculation and 1:15 physical model, the hydraulic characteristics of the filling and emptying system, corridor pressure, and the berthing conditions of the lock chamber are analyzed. The results show that the adopted system is reasonable, and the hydraulic characteristic indexes under the designed valve opening mode can meet the requirements of design and codes.

Keywords: Nianpanshan lock; filling and emptying system; hydraulic calculation; model test

1 工程概况

湖北省碾盘山船闸建设规模为Ⅲ级, 设计代表船型为 1 000 吨级货船, 尺度为 85.0 m×10.8×2.0 m(长×型宽×设计吃水,下同), 同时兼顾现状 1 000 吨级船型及长江水系过闸 1 000 吨级干散货船标准船型, 船舶尺度 64.0 m×13.0 m×2.4 m。船闸尺度根据《内河通航标准》^[1], 并考

虑长江水系过闸 1 000 吨级干散货船标准船型, 确定船闸有效尺度采用 200.0 m×23.0 m×4.0 m(有效长度×有效宽度×门槛水深)。船闸设计通过能力为: 近期(2025 年)单向年过闸客货运量 692 万 t, 远期(2050 年)单向年过闸客货运量 895 万 t。船闸最大设计水头 14.2 m^[2], 通航特征水位见表 1。

表 1 船闸设计水位

类型	上游水位/m	下游水位/m	考虑因素
设计洪水位	50.72	48.48	累积频率 1%, 相应流量 2.30 万 m ³ /s
校核洪水位	50.84	49.37	累积频率 0.33%, 相应流量 2.77 万 m ³ /s

收稿日期: 2021-09-03

作者简介: 卜美飞(1990—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口与航道工程设计。

续表1

类型	上游水位/m	下游水位/m	考虑因素
最高通航水位	50.72	46.31	正常蓄水位和 10 a 一遇洪水位,相应流量 1.35 万 m ³ /s
最低通航水位	38.89	36.52	生态调度泄水流量 1 200 m ³ /s 对应水位,并考虑下游河床下切引起上游水面 1.31 m 的水位降落值和最小通航流量 500 m ³ /s 对应水位,并考虑河床下切引起的 2.5 m 水位变化值
检修水位	50.72	42.70	正常蓄水位和电站满发流量对应水位
最大水头	50.72	36.52	正常蓄水位和下游最低通航水位

2 输水系统设计

2.1 输水系统形式选择

根据《船闸输水系统设计规范》^[3] 输水系统类型的选择公式:

$$m=\frac{T}{\sqrt{H}} \tag{1}$$

式中: T 为闸室灌水时间(min), 根据船闸设计通过能力等要求初步取 10 min; H 为设计水头(m), 最大为 14.2 m; m 为判别系数。根据规范, $m>3.5$ 时, 采用集中输水系统; m 为 2.5~3.5 时, 输水系统类型应进行技术经济论证或参照类似工程选定; $m<2.5$ 时, 采用分散输水系统。本船闸 m 值为 2.65, 应经技术经济论证或者参照类似工程选择输水系统。

根据国内已建较高水头船闸输水系统形式相关资料, 大多数集中输水系统形式都应用于 10 m 以下水头船闸, 对于 10 m 水头以上船闸大多采用分散输水系统形式^[4-5]。考虑到碾盘山船闸水头较高(14.2 m)、闸室尺度大, 为了缩短充、泄水时间, 减少船舶的过闸时间, 提高航运效益, 结合汉江上游已建崔家营船闸输水系统结构形式, 采用闸墙长廊道侧支孔出水的第一类分散输水系统。

2.2 输水阀门廊道尺寸

根据《船闸输水系统设计规范》, 输水阀门处廊道断面面积可根据给定的输水时间和阀门全开时输水系统流量系数按下式计算:

$$\omega=\frac{2C\sqrt{H}}{uT\sqrt{2g}[1-(1-\alpha)k_v]} \tag{2}$$

式中: ω 为输水阀门处廊道断面面积(m²); C 为计算闸室水域面积(m²), 对单级船闸取闸室水域面积, 取 5 175 m²; H 为设计水头(m), 取 14.2 m; u 为阀门全开时输水系统的流量系数, 根据输水系统流量计算取 0.635; T 为闸室灌水时间(s), 取 600 s; α 为系数, 查表取 0.575; k_v 为系数, 取 0.6。

经计算, 输水阀门面积 $\omega=31.04$ m², 取整 32.0 m²。

2.3 输水系统布置

2.3.1 进水口段

输水系统进水口采用导墙垂直多支孔布置, 支孔喉部面积顺水流方向逐渐缩小, 进水口顶高程 36.0 m; 进水口面积按分散输水系统进口流速 ≤ 2.5 m/s 的要求设计。按以下公式初步估算:

$$Q_{\max}=\frac{8}{3\sqrt{3}}\frac{CH}{T\sqrt{(2-k_v)k_v}} \tag{3}$$

$$v=\frac{Q_{\max}}{A} \tag{4}$$

式中: Q_{\max} 为充水最大流量(m³/s), 经计算为 205.74 m³/s; A 为进水口面积(m²); v 为进口流速(m/s), 按不大于 2.5 m/s 控制。

经计算进水口面积不小于 82.3 m²。船闸进水口布置在上游导航墙内, 左、右侧进水口均从引航道取水, 每侧进水口设 3 个尺寸为 4.0 m×4.0 m (高×宽)的进水孔, 双侧进口总面积 96 m², 进水口顶高程 36.0 m、底高程 32.0 m, 进水孔外设有拦污栅, 防止杂物进入输水廊道。

2.3.2 闸室主廊道及侧支孔布置

输水阀门处廊道断面面积确定后, 选择主廊道断面面积及出水支孔断面面积时, 有 2 个比值必须加以注意, 即:

$$\alpha=\frac{\omega_1}{\omega} \tag{5}$$

$$\beta=\frac{\omega_2}{\omega_1} \tag{6}$$

式中: α 、 β 为系数; ω_1 为主廊道面积(m²); ω 为阀门处廊道面积(m²); ω_2 为出水支孔断面总面积(m²)。

原则上, α 值越大, 输水系统出水孔段的损失越小; β 值越接近 1, 越有利于前后支孔出水均匀, 但将增加出水孔段水头损失。根据我国多数船闸的统计, α 值在 1.01~1.31, β 值在 0.91~

1.02^[6-7]。因此,取主廊道断面尺寸为 4.2 m×4.2 m,则 2 个断面总面积为 35.28 m²,闸墙每侧设 24 个侧支孔,分为 3 组,每组 8 孔,为使顺充水流方向的首、末出水支孔流量分布比较均匀,从上游至下游 3 组孔口尺寸分别为 0.85 m×0.90 m、0.78 m×0.90 m、0.71 m×0.90 m,出水孔总面积为 33.7 m²,由此计算得到的 α 、 β 值分别为 1.10、0.96。

根据《船闸输水系统设计规范》,出水孔间距宜为闸室宽度的 1/4,因此确定出水支孔间距为 23 m 的 1/4 为 5.75 m,每侧布置 24 个出水孔,闸室两侧出水孔交错布置于闸室中部,单侧出水孔总长为 132.25 m,占闸室有效长度的 66.13%。根据《船闸输水系统设计规范》,支孔出口应布置在下游最低通航水位时设计船舶深度以下,本支孔出口顶、底高程分别为 32.90、32.00 m,下游最低通航水位 36.52 m,船舶最大吃水 2.4 m,满足规范要求。

根据《船闸输水系统设计规范》要求,侧支孔

长度 L 介于 $2D\sim 4D$, D 为出水支孔直径或断面宽度,取支孔断面最大宽度 $D=0.850$ m,则 L 在 1.7~3.4 m,取 $L=3.15$ m,支孔断面采用标准的与闸墙垂直的水平布置,为减少水力损失,支孔进口断面采用四面修圆,圆弧半径为 0.30 m,出口断面三面修圆,圆弧半径也采用 0.30 m,水平方向按 3.0°角扩散。出水孔外布置消能槛,消能槛布置于闸室中间,单侧长 138.0 m,两侧反对称布置,顶面高程为 32.50 m,顶面宽度 0.5 m,消能槛中心线距闸墙边缘线 2.0 m。

2.3.3 出水口段

廊道出水口布置在下游导航墙出水口段内,出水口尺寸为 4.0 m×6.5 m,2 个出水孔总面积为 52 m²,出水口顶、底高程分别为 35.0、31.0 m,出水廊道内布置隔流墩,出水口外布置不对称消能槛进行消能。

2.3.4 输水系统主要尺寸

碾盘山输水系统主要尺寸见表 2。

表 2 碾盘山船闸输水系统特征尺寸

部位	描述	面积/m ²	与阀门面积比
进水口	上游导航墙进水口段设垂直 3 支孔进水口,进水口顶、底高程分别为 36.0、32.0 m,淹没水深 14.72 m	96.00	3.00
上闸首检修阀门段廊道	廊道顶、底高程分别为 36.0、32.0 m	32.00	1.00
上闸首工作阀门段廊道	阀门后采用平底+顶部及两侧渐扩体形,淹没水深 0.52 m	32.00	1.00
闸室主廊道	廊道距迎水面 3.15 m,通过 1:10 的斜坡分别于充泄水阀门段廊道连接	35.28	1.10
闸室出水支孔	每侧共布置 24 个出水支孔,分为 3 组,由上游至下游支孔喉部断面尺寸分别为 0.85 m×0.90 m、0.78 m×0.90 m、0.71 m×0.90 m	33.70	1.05
下闸首工作阀门段廊道	通过鹅颈管与下游检修阀门连接,淹没水深 0.52 m	32.00	1.00
下闸首检修阀门段廊道	廊道顶高程 35.0 m,顶高程 31.0 m	32.00	1.00
出水口	下游导航墙出水口段布置出水孔,出水孔顶、底高程分别为 35.0、31.0 m,淹没水深 1.52 m	52.00	1.63

2.4 输水系统水力计算

碾盘山输水系统水力计算根据《船闸输水系统

设计规范》4.3.1 条采用 MathCAD 软件编程计算,最大水头工况下水力特性计算结果见表 3。

表 3 碾盘山船闸闸墙长廊道输水系统水力计算结果

充泄水	输水时间/ s	阀门开启 时间/s	输水系统 阻力系数	阀门全开后 流量系数	最大流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	进水口最大 流速/(m·s ⁻¹)	主廊道最大 流速/(m·s ⁻¹)	最大能量/ MW
充水	552	360	2.382	0.635	218.27	2.27	6.82	19.45
泄水	564	360	2.459	0.625	216.22	—	6.76	19.36
规范允许值	—	—	—	—	—	2.50	15.00	—
充泄水	最大比能/ (kW·m ⁻²)	上引航道最大 水流量/kN	上引航道最大平 均流速/(m·s ⁻¹)	闸室最大 水流量/kN	闸室惯性 超高/m	下引航道最大 水流量/kN	下引航道最大平 均流速/(m·s ⁻¹)	阀门后最大 负压/kPa
充水	116.56	6.42	0.218	15.29	0.167	—	—	-19.8
泄水	59.33	—	—	3.56	0.162	23.25	0.924	-8.6
规范允许值	—	32.00	0.5~0.8	32.00	0.250	32.00	0.8~1.0	-30.0

碾盘山船闸闸墙长廊道侧支孔输水系统充水过程水力特性曲线见图 1, 泄水过程水力特性曲线见图 2。根据水力计算结果, 输水系统各项水力指标均能满足规范要求, 输水系统布置基本上是合理的。

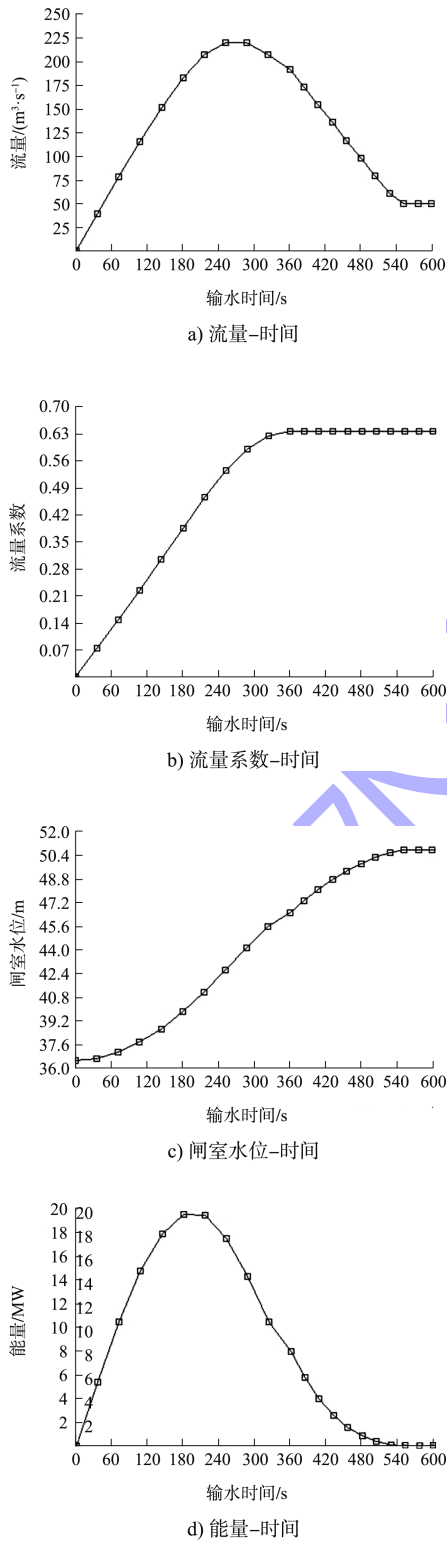


图 1 充水过程水力特性曲线

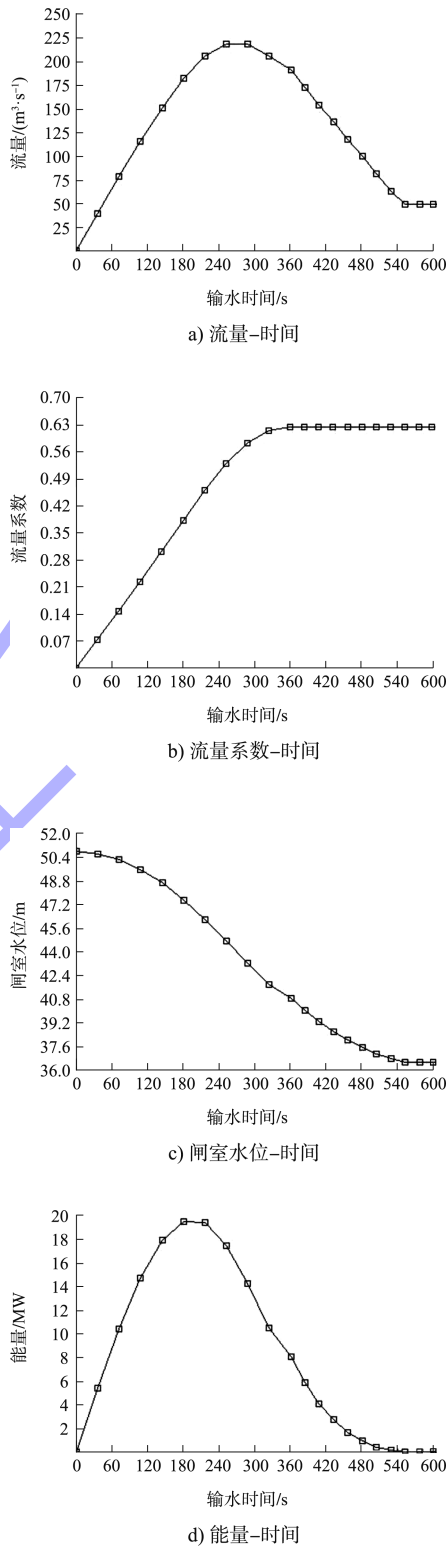


图 2 泄水过程水力特性曲线

3 模型试验验证

3.1 试验工况

为模拟不同水头下船闸过闸输水系统水力特性, 选定 3 组水位作为试验工况, 见表 4。

表 4 试验工况

工况	输水阀门开启时间/min	上游水位/m	下游水位/m	水头差/m
1	6	50.72	36.52	14.20
2	6	50.72	46.31	4.41
3	6	38.89	36.82	2.57

3.2 模型设计

碾盘山船闸输水系统模型试验采用正态水工整体模型进行试验研究^[8-9]，模拟船型采用 1 000 吨级单船，尺度为 85.0 m×10.8 m×2.0 m(长×型宽×设计吃水)，遵循重力相似准则并按照几何相似进行模型设计，根据试验任务及要求，模型几何比尺采用 1:15。模型的模拟范围包括船闸部分上游引航道、上闸首、闸室、下闸首、部分下游引航道，最终选择模型纵向模拟范围为 360 m，横向模拟范围 75 m，模型尺寸为 24 m×5 m(纵向×横向)。水工及船舶模型见图 3。

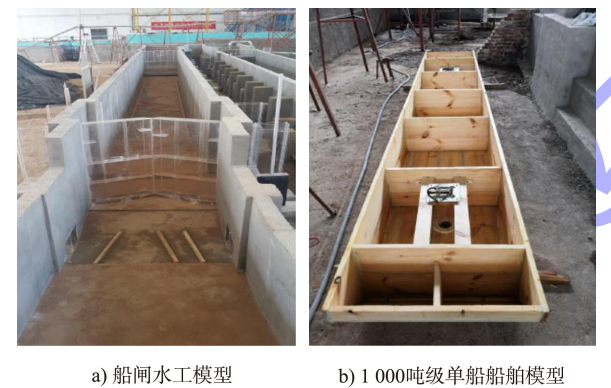


图 3 水工及船舶模型

3.3 试验成果分析

3.3.1 输水系统水力特性

在 3 种不同水位组合运行工况下，船闸充泄水(阀门双边运行)主要水力特征参数见表 5。

表 5 3 种工况下充泄水主要水力特征参数

工况	过程	输水阀门开启时间/min	闸室输水时间/min	最大流量 $Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	闸室主廊道流速/ $(m \cdot s^{-1})$	进水口流速/ $(m \cdot s^{-1})$
1	充水	6	9.89	189.82	5.93	1.98
	泄水	6	10.67	169.96	5.31	1.77
2	充水	6	6.13	74.83	2.34	0.81
	泄水	6	6.78	72.69	2.27	0.76
3	充水	6	5.49	30.99	0.97	0.32
	泄水	6	6.52	28.89	0.90	0.30

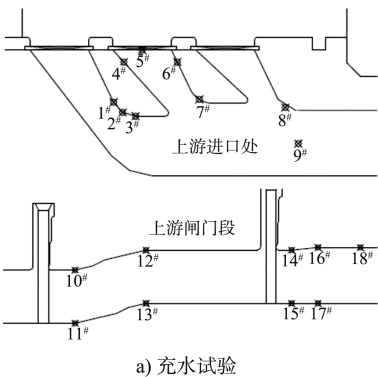
由表 5 可知，最大设计水头工况下(工况 1，14.2 m 水头)，当阀门双边运行开启时间为 6 min 时，船闸充水时间为 9.89 min，最大充水流量 189.82 m³/s；船闸泄水时间为 10.77 min，最大泄水流量为 169.96 m³/s，最大流量均小于设计计算流量。船闸泄水时间相比较于设计要求的输水时间(10 min)略长，考虑到模型存在缩尺影响，原型船闸运行时流量系数将较模型有所增加，输水时间较模型有所缩短，根据已建国内外船闸原型观测与模型试验经验，原型船闸输水时间较模型缩短 10%~15%，因此预计输水阀门双边开启时间不超过 6 min 时，输水时间可满足 10 min 内。上述水力特性指标均满足规范要求，输水系统各部分尺寸基本合理。

3.3.2 输水廊道阻力系数及流量系数

试验在输水廊道各特征位置布置压力测点，通过测压管测定恒定流下廊道各部位的压力及上下游引航道水位和闸室水位^[10]，计算出输水廊道各区段的阻力系数。试验所得输水廊道充水时阻力系数为 2.87，流量系数为 0.59；泄水时廊道阻力系数为 2.44，流量系数为 0.64。

3.3.3 输水廊道压力结果分析

充水试验中，1[#]~9[#]测点布置在输水廊道进口段，10[#]~18[#]测点布置在上游输水阀门附近；泄水试验中，19[#]~22[#]测点布置在下游输水阀门附近，23[#]~29[#]测点布置在输水廊道出口段。测点布置见图 4。最大水头工况下，充泄水试验各测点压力峰值见表 6。



a) 充水试验

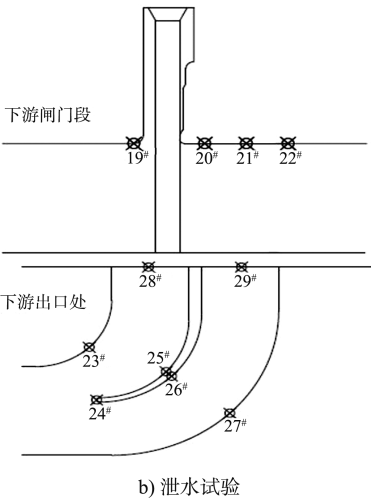


图 4 非恒定流压力测点分布

表 6 最大水头工况充水和泄水试验各测点压力最大和最小值

试验类型	测点	压力/kPa	
		最大值	最小值
充水	1 [#]	208.4	147.4
	2 [#]	209.8	143.4
	3 [#]	195.7	132.4
	4 [#]	199.5	136.2
	5 [#]	208.5	146.2
	6 [#]	210.9	149.1
	7 [#]	197.5	126.9
	8 [#]	207.4	146.0
	9 [#]	215.9	150.7
	10 [#]	163.3	83.9
	11 [#]	227.1	155.8
	12 [#]	137.4	69.2
	13 [#]	217.6	134.5
	14 [#]	136.0	-27.1
	15 [#]	212.5	33.8
	16 [#]	134.4	-21.5
	17 [#]	215.7	15.8
	18 [#]	147.4	-20.5
泄水	19 [#]	162.8	-9.2
	20 [#]	48.5	-10.6
	21 [#]	62.3	-6.3
	22 [#]	49.9	-21.3
	23 [#]	88.9	30.6
	24 [#]	101.6	30.0
	25 [#]	101.6	28.4
	26 [#]	109.8	57.2
	27 [#]	114.5	46.5
	28 [#]	112.8	53.1
	29 [#]	119.0	63.9

试验结果表明, 船闸充泄水过程中, 上下游输水阀门门后廊道顶部测点 14[#]、16[#]、18[#]~22[#]都产生了不同程度的负压, 但廊道顶部的负压值均大于-30 kPa, 不会出现空化现象。

3.3.4 闸室停泊条件

最大设计水头工况(工况 1, 14.2 m 水头)、双边阀门运行开启时间 6 min, 船舶停泊条件试验结果见表 7。

表 7 闸室船舶最大系缆力

过程	输水阀门开启时间/min	停靠位置	纵向系缆力/kN	前横向系缆力/kN	后横向系缆力/kN
充水	6	前部	21.26	10.79	15.27
	6	后部	18.19	14.13	10.68
泄水	6	前部	16.41	10.27	8.76
	6	后部	15.32	6.33	6.92

试验结果表明, 当阀门双边运行时间为 6 min 时, 闸室内无明显纵横向水流, 闸室水面平静, 流态良好, 无局部紊动, 未观测到漩涡等不良水流现象, 说明闸室侧支孔处设置明沟消能在改善船舶停泊条件方面获得了预期效果; 充水时船舶最大纵向系缆力 21.26 kN, 最大横向系缆力 15.27 kN, 泄水时船舶最大纵向系缆力 16.41 kN, 最大横向系缆力 10.27 kN, 均满足规范要求(纵向系缆力不大于 32 kN, 横向系缆力不大于 16 kN)。

4 结语

1) 碾盘山船闸长廊道输水系统在最大设计水头工况下(50.72~36.52 m), 工作阀门双边开启时间 $t_v = 6$ min 时, 船闸充泄水时间均可控制在 10 min 内, 满足船闸设计通过能力, 各项水力特性指标满足规范要求; 充泄水过程中, 输水阀门门后部分廊道顶部测点产生了不同程度的负压, 但负压值均大于-30 kPa, 不会出现空化现象, 类似工程设计时可加大阀门段淹没水深以减少负压; 充泄水过程中, 闸室内流态良好, 未观测到漩涡等不良水流现象, 充水时船舶最大纵向系缆力 21.26 kN, 最大横向系缆力 15.27 kN, 泄水时船舶最大纵向系缆力 16.41 kN, 最大横向系缆力 10.27 kN, 均满足规范要求。 (下转第 138 页)