



60米级省水船闸输水阀门段 空化特性及防空化措施^{*}

薛 淑, 严秀俊, 向茂铭

(南京水利科学研究院 通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 通过恒定流减压箱模型试验, 针对60米级省水船闸充、泄水阀门段的空化特性进行研究。明确了阀门段空化源, 计算不同开度的空化数, 获得空化范围、空化形态和空化强度, 并提出掺气减蚀的防空化措施, 推荐了合理的掺气量。试验结果表明, 采用阀门门楣自然通气能抑制门楣及底缘空化、采用阀后突扩体跌坎强迫通气措施能充分抑制跌坎和升坎空化, 两项通气措施相结合能够有效解决60米级省水船闸充、泄水阀门段的空化问题。

关键词: 船闸; 输水阀门; 空化; 掺气

中图分类号: U 642

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)02-0012-05

Cavitation characteristics and resistance measures of filling and emptying valve of 60 m-class water-saving ship lock

XUE Shu, YAN Xiu-jun, XIANG Mao-ming

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology,
Ministry of Transport, PRC, Nanjing 210029, China)

Abstract: Based on the vacuum tank experiments, the cavitation characteristics of the filling and emptying valve of the water-saving ship lock with a water head of 60 m-class were studied. Through model tests, the cavitation source was ascertained, and the cavitation number under each opening degree was calculated. The cavitation range, cavitation form, and cavitation strength were also obtained. The defense measures for reducing cavitation erosion by aeration were put forward, and the reasonable aeration amount was recommended. The test results showed that automatic natural aeration at top-sealing sill of valve could suppress cavitation of itself and valve lip effectively, and forced aeration at drop-sill could reduce the cavitation occurred on drop-sill and upward slope of enlargement culvert. The combination of the two aeration measures could effectively solve the cavitation problem in the filling and emptying valve section of 60 m-class water-saving ship lock.

Keywords: ship lock; filling and emptying valve; cavitation; aeration

高水头船闸中, 输水阀门段是船闸设计的关键部位, 该处水流条件复杂, 运行时承受各种动水作用, 同时伴随着剧烈的空化。空化现象发生本质原因是阀门后水流的瞬间加速使局部压力降低至水蒸汽压, 导致水流内形成空穴, 当这些空泡随主流进入低速高压区时, 在水流内或者廊

道边壁处极速溃灭、释放高能量。许多已建的高水头船闸运行情况表明, 如果没有采取合理的防空化措施, 剧烈的空化会产生轰隆的雷鸣声, 震动闸墙甚至击破窗户、破坏廊道内壁结构、危害阀门和附属设施的正常运行^[1-3]。

本文以白市省水船闸为依托, 研究60米级省

收稿日期: 2020-04-10

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402001)

作者简介: 薛淑(1987—), 女, 博士, 高级工程师, 从事水力学及河流动力学研究。

水船闸充、泄水阀门的空化特性及防空化措施。白市省水船闸闸室有效尺度为 $140\text{ m} \times 12\text{ m} \times 4.0\text{ m}$ (长×宽×槛上水深), 设3级省水池。输水系统设1组充水阀门、1组泄水阀门、3组联通阀门。其中, 充水阀门用于省水及非省水运行时, 上游引航道向闸室充水; 泄水阀门用于省水及非省水运行时, 闸室向下游引航道泄水; 3组联通阀门分别用于闸室与3级省水池的互充互泄^[4]。

白市船闸充、泄水阀门采用反向弧形门, 阀后廊道采用顶部突扩+底部突扩布置形式。省水运行时, 阀门最大水头为23.84 m、最小淹没水深为8.83 m, 阀门推荐运行方式为 $t_v=90\text{ s}$ 速率开启; 非省水运行时, 阀门最大水头59.6 m、最小淹没水深为7.73 m, 阀门采用间歇开启方式, 以 $t_v=360\text{ s}$ 速率开启至0.1开度停机1800 s后继续开启至全开的方式运行。

白市船闸输水阀门作用水头高、初始淹没水深

小, 非省水运行时, 阀门最大工作水头达59.6 m, 因此对输水阀门开展空化特性研究并提出有效的防空化措施, 是十分必要的。

1 减压模型设计

以泄水阀门为研究对象, 在恒定流减压箱试验平台安装模型, 开展白市船闸泄水阀门空化特性研究, 模型在减压箱的布置见图1。在减压箱中进行的模型空化试验模型比尺为1:19.2, 遵循重力相似准则, 通过调节真空度保证模型水流空化数与原型水流空化数相等, 即:

$$\sigma_m = \sigma_p \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{P/\rho + (P_a - P_v)/\rho}{v^2/2} \quad (2)$$

式中: σ_m 、 σ_p 分别为模型和原型空化数; 式(2)为空化数 σ 的定义; P 、 v 为控制点处的压力和流速; P_a 、 P_v 为气压和水的饱和蒸汽压; ρ 为水的密度。

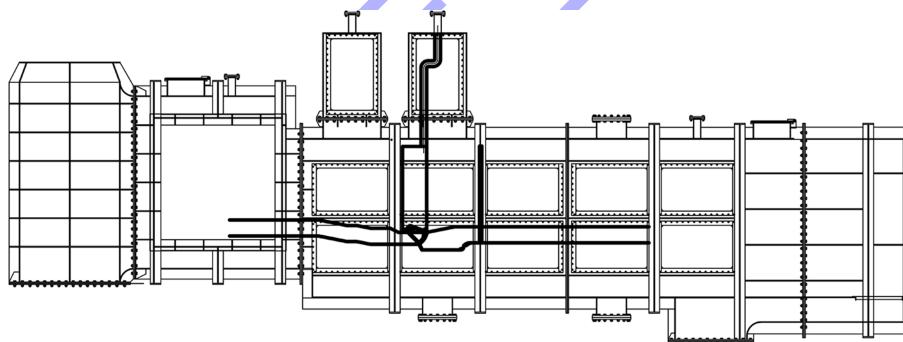


图1 泄水阀门模型在减压箱的布置

为了分析空化程度的强弱, 在阀门段不同部位布置1#~5#水听器监测水流空化噪声强度, 具体布置见图2。其中, 1#水听器布置在跌坎处, 用于接收跌坎空化噪声信号; 2#、3#水听器布置在突扩体1/3、2/3处, 用于采集阀门底缘空化噪声信号; 4#水听器布置在升坎尾部, 用于采集升坎空化噪声信号; 5#水听器布置在升坎下游检修门槽后, 用于采集突扩体后的空泡溃灭噪声。试验使用水听器接收空化噪声信号、高速瞬态波形采集分析系统处理噪声信号, 实时进行波形分析。

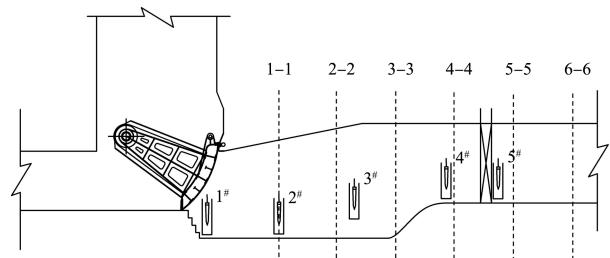


图2 水听器布置位置

2 阀门段的空化特性

根据前期输水系统常压模型试验成果, 泄水阀门在省水、非省水两种运行状态下, 各开度流量见表1。由表1可知, 阀门在0.1~0.2开度时,

非省水运行流量明显大于省水运行；0.3~0.5 开度，非省水运行流量略大于省水运行(5%以内)；0.6~1.0 开度，非省水运行流量小于省水运行。根据空化数的定义，由于泄水阀门阀后淹没深度维持不变，流量越大表明阀门的空化条件越不利，基于上述分析，减压试验进行了省水运行工况全开度试验、非省水运行工况 0.1~0.2 开度的空化试验。

表 1 泄水阀门各开度对应的流量

阀门开度	流量/(m ³ ·s ⁻¹)	
	省水运行	非省水运行
0.1	23	53
0.2	60	72
0.3	100	105
0.4	135	140
0.5	155	160
0.6	185	170
0.7	205	160
0.8	222	155
0.9	235	150
1.0	245	137

2.1 空化部位及空化形态

试验表明，上游最高至下游最低通航水位条件下，白市船闸泄水阀门以推荐开启方式运行，除了门楣空化外，该突扩体型阀门段存在的空化类型主要有底缘空化、升坎空化和跌坎空化。在阀门开度为 0.4~0.6 时，阀门段空化范围超出突扩体，空泡溃灭轨迹最长可延伸至图 2 中 5-5~6-6 断面。

典型的空化发生部位及空化形态见图 3。各部位空化发生机理如下：1) 底缘空化是反弧门最常见的空化形态，发生于底缘尖端的梢涡，由于主流与门后漩滚区交界面上剪切作用较强，底缘空化在门后剪切层及漩滚区内得到强化和发展。2) 升坎空化是由于过流面突变而发生的漩涡型空化，发生在升坎尾部主流与升坎脱离的位置，在小开度时空泡溃灭区偏向廊道顶部，大开度偏向廊道底部。3) 跌坎空化发生在主流与跌坎回漩区的交界面上，溃灭区位于突扩廊道底板，随着开

度增大，溃灭区逐渐向下游扩展。

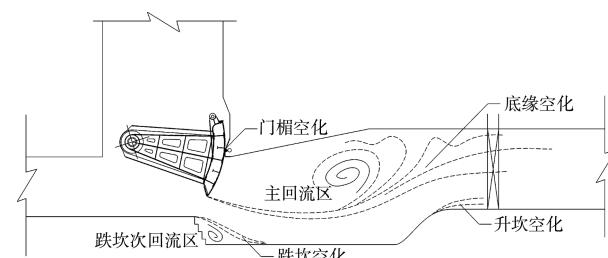


图 3 空泡运动溃灭轨迹

2.2 空化数计算

空化数是表征空化状态的特征参数，定义 σ_i 为临界空化数，表征水流处于临界空化状态。 $\sigma > \sigma_i$ 时，表明阀门段无空化； $\sigma \leq \sigma_i$ 时，阀门段存在空化。定义 σ/σ_i 为相对空化数，表征空化的强弱，其值越小，表示空化越强。由空化数定义知，改变箱内真空度可以提高或降低阀门空化数，从而控制阀门空化状态。

在减压试验中通过目测及仪器分析判断，以阀后收缩断面的平均流速作为参考断面流速，取廊道底相应位置的最低压力(认为该处流速最大，为阀后出流收缩断面)为参考断面压力，测定了各开度阀门的工作空化数及临界空化数，并计算得出相对空化数，见表 2，其中，收缩断面的收缩系数根据《船闸输水系统设计规范》附录 A^[5]查得。泄水阀门在省水状态和非省水运行状态下，相对空化数对比见图 4、5。由图、表可知：

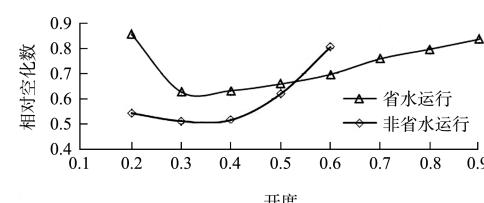


图 4 底缘相对空化数对比

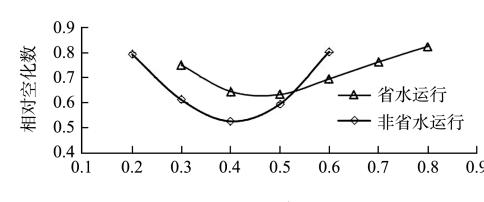


图 5 升坎相对空化数对比

表2 泄水阀门空化数计算

运行状态	阀门开度	工作空化数	底缘空化		升坎空化		跌坎空化	
			临界空化数	相对空化数	临界空化数	相对空化数	临界空化数	相对空化数
省水	0.1	1.77	-	>1	-	>1	-	>1
	0.2	0.94	1.10	0.85	0.75	>1	-	>1
	0.3	0.60	0.96	0.63	0.80	0.75	-	>1
	0.4	0.58	0.92	0.63	0.90	0.64	-	>1
	0.5	0.67	1.02	0.66	1.06	0.63	-	>1
	0.6	0.82	1.18	0.69	1.18	0.69	-	>1
	0.7	1.06	1.40	0.76	1.39	0.76	-	>1
	0.8	1.32	1.66	0.80	1.60	0.83	-	>1
	0.9	1.67	2.00	0.84	-	>1	-	>1
	0.1	0.22	-	>1	-	>1	1.32	0.17
非省水	0.2	0.59	1.10	0.54	0.75	0.79	0.75	0.79
	0.3	0.49	0.96	0.51	0.80	0.61	-	>1
	0.4	0.47	0.92	0.51	0.90	0.53	-	>1
	0.5	0.63	1.02	0.62	1.06	0.59	-	>1
	0.6	0.95	1.18	0.80	1.18	0.80	-	>1
	0.7	1.80	1.40	>1	1.39	>1	-	>1
	0.8	2.92	1.66	>1	1.60	>1	-	>1
	0.9	4.61	-	>1	-	>1	-	>1

1)除门楣空化外, 白市省水船闸在省水运行状态下, 空化发生部位为底缘、升坎; 在非省水运行状态下, 底缘、升坎、跌坎均发生空化。

2)跌坎空化发生在小开度, 仅在非省水运行状态下阀门为0.1、0.2开度时发生, 最小相对空化数为0.17。

3)底缘与升坎空化发生的开度范围较大, 在阀门开度为0.4~0.5最剧烈, 泄水阀门在运行过程中底缘、升坎的最小相对空化数分别为0.51、0.53。

4)阀门在0.1~0.5开度, 非省水运行时阀门空化更强; 0.6~1.0开度, 由于廊道流量与流速的降低, 非省水运行状态下阀门空化强度小于省水运行。

3 阀门段防空化措施

减压模型试验中空化流态显示, 阀门底缘空化发生于主流上方剪切层, 而跌坎、升坎空化位于主流下方剪切层, 结合国内外高水头船闸防空化措施研究与实践经验, 提出解决白市船闸充、泄阀门空化难题的基本思路为: 门楣自然通气解决门楣、阀门底缘空化问题, 跌坎强迫通气解决跌坎、升坎空化问题。

门楣自然通气是解决高水头船闸特别是已建工程阀门空化问题的一项非常有效的工程措施。该技术的核心是: 利用门楣缝隙高速射流的特点, 在缝隙有负压的地方设置通气管, 实现自然通气。根据南京水利科学研究院门楣体型系列研究成果和白市船闸充、泄水阀门的具体布置, 推荐的白市船闸阀门门楣体型见图6。门楣可采用一定厚度的钢板制作, 门楣与阀门面板的特征距离分别为20.00、25.50、34.63 mm, 沿廊道宽度方向布置1排通气支孔, 通气支管连接通气横管(通气横管长度与廊道宽度相等), 通气横管连接通气主管通向闸顶。

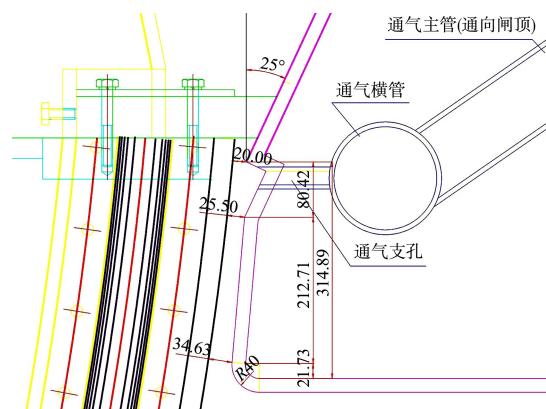


图6 门楣体型设计及通气管尺寸(单位: mm)

跌坎通气管位于跌坎起始位置第 1 级阶梯处，布置方式与门楣通气管类似，包括沿廊道宽度方向布置的通气支孔、支孔汇集的通气横管、通向闸顶的通气主管，通气主管连接集气罐与空压机进行强迫通气。跌坎通气后空气随主流进入突扩体，最后被携带至升坎末端，不但能减免跌坎、升坎空化，还对底缘空化有利。

多座船闸原型观测资料表明，阀门门楣缝隙段平均掺气浓度约在 7% 时，门楣空化能得到充分抑制。本工程在上游最高水位至下游最低水位条件下，泄水阀门以推荐开启方式运行，根据阀门前后压力条件推算可得阀门各开度门楣缝隙段掺气浓度，见图 7。由图 7 可见，阀门开启过程中，在 $n=0.1\sim0.8$ 开度范围内，缝隙段掺气浓度 β 均在 10% 以上，表明门楣空化掺气减蚀能达到很好的效果。

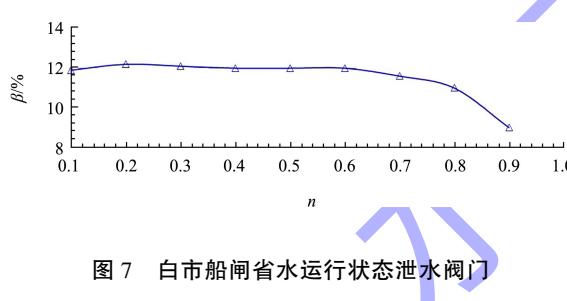
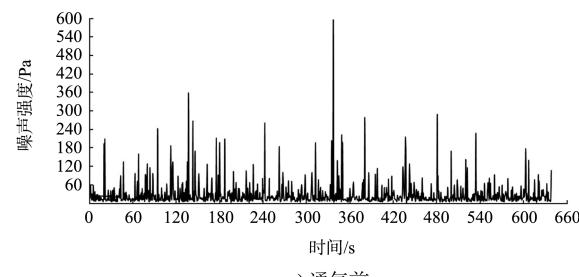
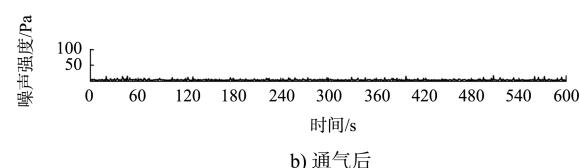


图 7 白市船闸省水运行状态泄水阀门
门楣缝隙段掺气浓度

本文进行了门楣与跌坎位置不同掺气量的减压模型试验，推荐门楣、跌坎通气流量为 $0.03 \text{ m}^3/\text{s}$ 。通过试验观察，未采取通气时，噪声强度脉冲大而密集；采用联合通气措施后，掺气水流可以保护阀门面板及阀门后主流上、下边界，空化被充分抑制，噪声强度显著降低。在非省水运行状态下， $n=0.1$ 开度跌坎空化最强，通气前后跌坎噪声强度对比见图 8；在省水运行状态下， $n=0.4$ 开度底缘与升坎空化最剧烈，通气前后底缘噪声强度、升坎噪声强度对比见图 9、10。

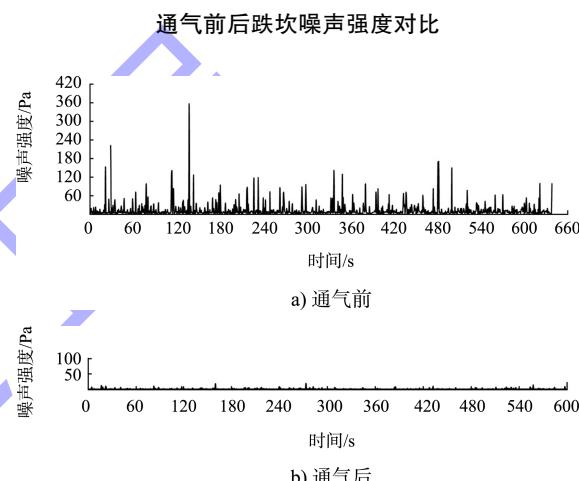


a) 通气前

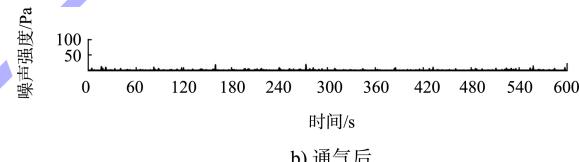


b) 通气后

图 8 非省水运行， $n=0.1$ 开度，1#水听器

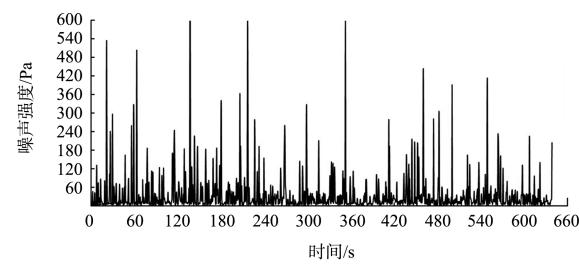


a) 通气前

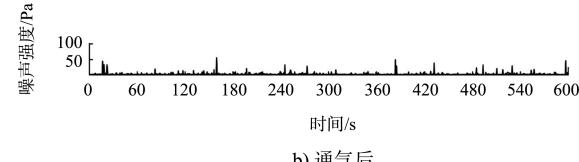


b) 通气后

图 9 省水运行， $n=0.4$ 开度，3#水听器
通气前后底缘噪声强度对比



a) 通气前



b) 通气后

图 10 省水运行， $n=0.4$ 开度，4#水听器
通气前后升坎噪声强度对比