



# 犍为船闸阀门防空化措施研究

严秀俊<sup>1</sup>, 胡亚安<sup>1</sup>, 吴礼国<sup>2</sup>, 王蛟<sup>1</sup>, 王敬鹏<sup>1</sup>, 薛淑<sup>1</sup>

(1. 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;

2. 四川省交通运输厅交通勘察设计研究院, 四川成都 610017)

**摘要:** 阀门空化问题是高水头船闸设计中最为关键的技术难题。门楣和底缘空化特别严重时, 会引发“声振”, “声振”会导致阀门面板及廊道混凝土剥蚀, 严重影响工程安全。依托实际工程研究阀门防空化措施, 取得了满意的成果。所采用的研究方法及措施具有普适性, 可供相关工程参考借鉴。

**关键词:** 阀门空化; 减压试验; 高水头船闸; 防空化措施

中图分类号: TV 135.4; U 64

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)06-0125-05

## Cavitation defense measures for valve of Qianwei ship lock

YAN Xiu-jun<sup>1</sup>, HU Ya-an<sup>1</sup>, WU Li-guo<sup>2</sup>, WANG Jiao<sup>1</sup>, WANG Jing-peng<sup>1</sup>, XUE Shu<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Navigation Structures, Nanjing Hydraulic Research Institute Nanjing, 210029, China;

2. Sichuan Communications Survey & Design Institute, Chengdu 610017, China)

**Abstract:** Valve cavitation problem is the most critical technical problem in the design of high-head lock. Serious cavitation of the lintel and the hemline will arise the “vibroacoustic” phenomenon, which will lead to denudation of valve panel and corridor concrete, and thus seriously affect the engineering quality and safety. The cavitation defense measures for the lock valve are researched based on the actual engineering and satisfactory results are obtained. The research methods and measures are applicable to most cases, so they may serve as reference for the similar engineering.

**Keywords:** cavitation of valve; depressurize test; high-head lock; cavitation defense measure

国内外已建船闸运行经验表明, 船闸输水阀门每天频繁操作, 工作条件复杂, 在中高水头船闸阀门开启过程中, 阀门底缘及下游剪切层、顶止水缝隙等部位较易发生空化, 产生空蚀破坏, 空化严重时廊道常出现巨大雷鸣声, 发生危害作用极大的“声振”现象。“声振”的危害主要体现在: 阀门及其启闭系统强烈振动; 在廊道内产生巨大的冲击压力; 阀门面板及廊道混凝土剥蚀等。因此, 阀门工作条件的好坏已成为衡量船闸

设计成功与否的一个重要标志<sup>[1]</sup>。

阀门空化问题是高水头船闸设计中最为关键的技术难题<sup>[2]</sup>。为抑制高水头船闸阀门空化, 美国一般采用“阀门快开”与“门后廊道顶部通气”相结合的工程措施, 由于河流走势较缓, 船闸水位变幅小, 廊道顶通气条件较易得到满足, 效果较好。苏联主要通过延长输水时间、降低阀门流速, 来改善阀门空化条件。

我国高水头船闸建设中, 针对水口、五强溪、

收稿日期: 2016-01-19

作者简介: 严秀俊 (1971—), 男, 高级工程师, 从事船闸及升船机水动力学研究。

五强溪船闸、东西关等船闸阀门段存在的较强空化,提出了不同形式的突扩方案,并得到应用<sup>[3-5]</sup>。而葛洲坝3座船闸阀门段廊道体型均为顶部渐扩形式,建成后改装了门楣自然通气措施,成功抑制了运行过程中存在的较强空化和声振<sup>[6-8]</sup>。广西红水河上的大化、乐滩(原名恶滩)船闸,门后廊道体型为平顶形式,阀门工作水头达29.0 m,初始淹没水深仅5.0 m,采取了门楣自然通气结合廊道顶自然通气的工程措施,以减免阀门底缘空化。研究成果指出,若仅仅采用顶扩廊道体型且在满足输水时间前提下,这些船闸均将发生较强空化。采用突扩体型,一方面可显著增加阀门后廊道水流压力、减小门后廊道壁面水流压力脉动、降低阀门临界空化数等,从而避免发生空化或减弱空化强度;另一方面,即使阀门底缘发生空化,而突扩体可形成超空化结构,将空化区限制在突扩体水流内部,减弱空泡溃灭时的冲击压力,对廊道边壁起到保护作用<sup>[9]</sup>。

目前,阀门防空化主要措施包括两方面:1)主动防护措施。从提高阀门底缘空化数的角度出发,主动避免空化发生,如快速开启阀门、增大阀门处廊道淹没水深、优化阀门段廊道体型(底部突扩、顶部突扩及三维突扩)。2)被动防护措施。在有空化发生的情况下,采用通气方式减弱空化溃灭冲击压力,达到保护阀门段廊道边壁免遭空蚀破坏的目的<sup>[10]</sup>。实际工程中,通常需通过相关的水力学物理模型试验,提出其阀门段的布置形式,以确保船闸的安全高效运行<sup>[11]</sup>。

## 1 阀门防空化措施

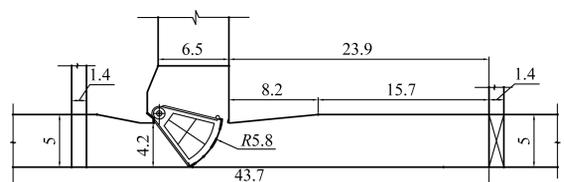
为保证相似性,空化研究常需要进行常压-减压试验。常压试验因为缩尺效应,所得试验结论具有局限性,常辅以经验判断,提出解决方案。后通过减压试验进行效果验证和改进,最大程度还原工程实际情况,解决工程实际问题<sup>[12]</sup>。

犍为航电枢纽工程位于岷江干流乐山市犍为县境内,是岷江(乐山—宜宾段)梯级规划的第3个梯级。作为岷江航电综合开发建设梯级之一的犍为

航电枢纽是乐山市“千亿交通工程”的重中之重,对促进乐山市乃至四川省的经济发展具有重要作用。且规模较大,枢纽船闸设计尺度为200 m×34 m×4.5 m(有效长度×有效宽度×门槛水深),相关水力指标较高;最大工作水头19.0 m,为中高水头船闸;上下游通航水位变幅大,该船闸上游通航水位变幅达7.77 m(335.00~327.23 m),下游通航水位变幅达14.46 m(330.46~316.00 m)。

国内外已建船闸运行经验表明,船闸输水阀门每天频繁操作,工作条件复杂,在非恒定高速水流条件下阀门的水动力学问题,如阀门段廊道及门体结构承受的动水荷载脉动、阀门及启闭系统的流激振动等较为突出。本文即依托该工程进行阀门防空化措施的模型试验研究。

船闸输水阀门常用弧形阀门和平面阀门,弧形阀门又分为正向弧形阀门和反向弧形阀门。由于正向弧形门在运行过程中,工作门井容易进气,而无控制的进气对闸室停泊条件及输水廊道不利,故高水头船闸输水阀门常常采用反向弧形门。平面阀门由于其门槽空化和底缘空化问题较难解决,单吊点启闭、适应振动的能力也相对较差,且启闭力较大,在高水头船闸中应用较少。平面阀门又由于其厚度小、结构简单、刚度大、制造安装及检修方便,在中低水头船闸应用较广。犍为船闸为中高水头船闸、水力指标较高,阀门水力学试验推荐选用适应高水头动水启闭、抗振性能良好的双面板全包反向弧形门。同时为减小施工工程量和便于施工,模型试验采用“平底+顶部渐扩”的廊道形式,阀门段廊道高度4.2 m,为避免廊道顶部“集气”,廊道顶部采用渐扩形式,渐扩比1:10,廊道断面渐扩至5.0 m。具体尺寸及模型见图1。



a) 正视图



b) 俯视图



c) 现场照片

图 1 廊道尺寸及试验模型 (单位: m)

在未进行任何防空化措施前, 阀门段典型开度(0.6)底缘空化形态见图 2。空化发生于底缘尖端的梢涡, 由于门后主流与旋滚区交界面上紊动剪切作用较强, 底缘空化在门后剪切层及旋滚区内得到强化和发展, 其类型表现为漩涡型空化。空化明显且分布较广, 容易对门体及廊道结构造成损害, 故进行防空化措施研究非常必要。

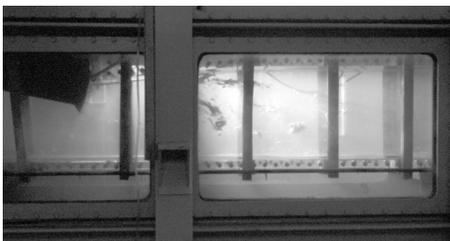


图 2 阀门段典型开度底缘空化形态

### 1.1 量测设备

常压试验在南京水科院通航实验室进行, 减压试验在恒定流减压箱中进行。减压模型试验中通气量、气温、水温、大气压、流量、水位、真空度分别采用浮子流量计、气温计、水温计、大气压力计、电磁流量计、水位计、压力传感器测量。

系统实现了水位及真空度目标值的自动计算、自动调节功能, 系统采用水位及真空度的 PID 调节控制, 使水位及真空度精确调节并稳定在设定目标值。计算监控主界面见图 3。

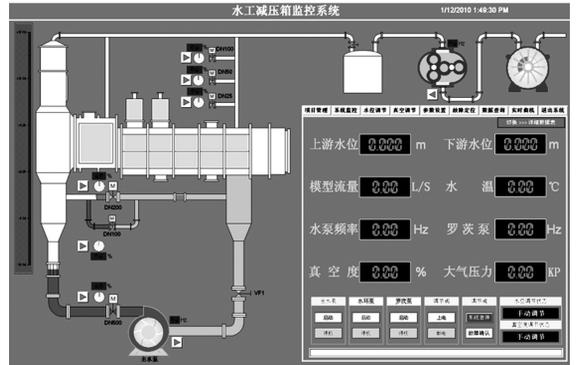


图 3 计算监控主界面

空化噪声作为空化溃灭过程的基本信息, 是判断空化初生和发展的一种极为有效的手段, 为此, 在减压试验中, 通过布置在阀门段的水听器监测水流噪声, 采用先进的高速瞬态波形采集分析系统采集和处理噪声信号, 该系统具有分析频域宽、采样频率高(最高采样频率达 40 MHz)、失真小、功能齐全的特点, 能够快速捕捉空化脉冲信号, 实时进行频谱和波形分析。空化噪声瞬态波形采集系统见图 4。

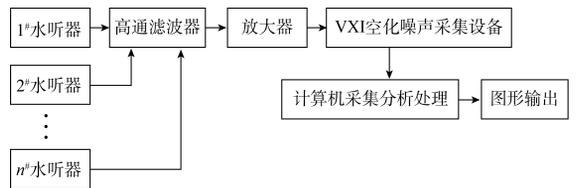


图 4 超高速瞬态空化噪声采集系统

### 1.2 临界空化试验

空化数是表征空化状态的特征参数, 定义为:

$$\sigma = \frac{P/(\rho g) + (P_a - P_v)/(\rho g)}{v^2/(2g)} \quad (1)$$

式中:  $P/(\rho g)$  为参考断面压力;  $P_a$ 、 $P_v$  分别为大气压及水的饱和蒸汽压;  $v$  为参考断面流速。以  $\sigma_i$  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  $\sigma/\sigma_i$  为相对空化数, 表征空化的强弱, 其值越小, 表示空化越强。

试验测定了各开度阀门临界空化数 (本文以消失空化控制, 与初生空化相比, 消失空化更为稳定), 并计算了相对空化数, 见表 1。

表1 阀门底缘相对空化数

阀门开度 $n$	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.7	0.8	0.9
空化数	0.81	0.68	0.49	0.40	0.33	0.41	0.59	>1.0

### 1.3 具体工程措施

常压模型中初步探讨了犍为船闸阀门防空化措施，即利用门楣自然通气解决，门楣自然通气措施系我国独创，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。

推荐的犍为船闸阀门段廊道体型及通气管布置见图5。建议在门后10.0 m及16.0 m廊道顶处各设置2根 $\phi 100$  mm通气管，并在闸顶设置控制阀，作用如下：1) 便于排除充水前廊道中的空气(排干检查时同理)；2) 解决船闸充泄水过程中廊道顶的“集气”现象；3) 作为后备措施，必要时强迫通气。

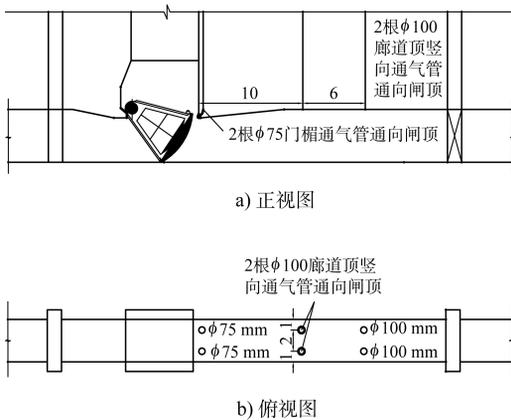


图5 阀门段廊道体型及通气管布置(单位:m)

### 1.4 措施效果分析

#### 1) 门楣自然通气抑制门楣空化效果。

图6为 $n=0.2$ 开度门楣通气与否缝隙段流态。门楣通气管封闭时，空化在掺气坎末端形成，布满缝隙段及缝隙段出口弧门面板。通气后，门楣掺气水流覆盖了门楣缝隙段空化发生区域，其运动轨迹与门楣缝隙段空穴运动轨迹基本吻合。可见，门楣自然通气对于抑制阀门门楣缝隙段空化较为理想，原先存在的顶缝空化可以得到充分抑制。

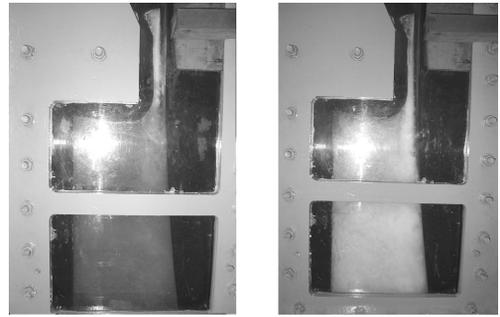


图6 门楣通气与否缝隙段流态

#### 2) 门楣自然通气抑制底缘空化效果。

根据多座船闸原型观测及调试成果，门楣通气能有效抑制不同程度的底缘空化，犍为船闸现试验体型下底缘最小相对空化数为0.33，通过经验预见门楣自然通气可以较好地抑制底缘空化。减压试验也验证了门楣自然通气抑制底缘空化效果。

底缘空化相对较强的 $n=0.5$ 开度通气与不通气条件下空化噪声强度对比见图7。由图7可知，在该开度下，不通气时，噪声强度脉冲大而密集；通气后，噪声强度显著降低，实测的噪声强度过程线仅有少量脉冲(2#水听器位于阀门后)。试验表明，门楣通气后，较强的底缘(包括门楣)空化被较大程度地抑制，门楣通气效果显著。

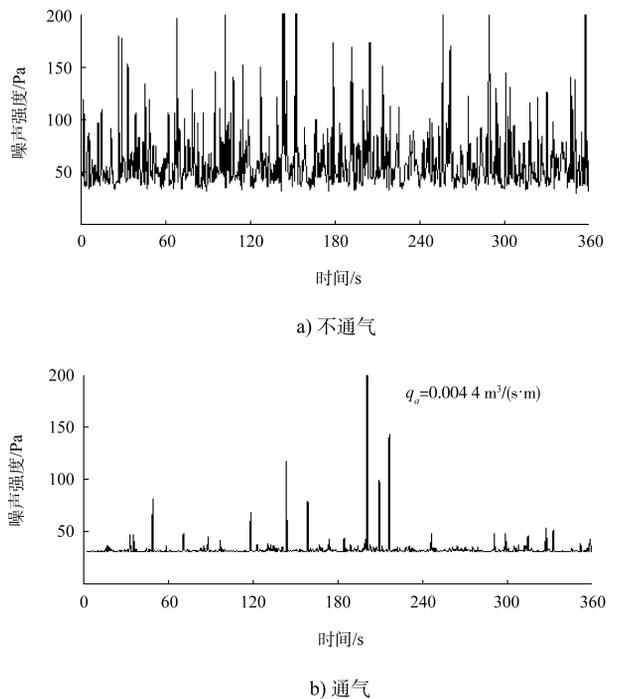


图7 0.5开度空化噪声强度对比

## 2 结语

门楣自然通气措施系我国独创,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。其技术核心是:利用门楣缝隙高速射流的特点,在缝隙有负压处设置通气管,实现自然通气。利用南京水科院独有的门楣切片模型设备,前期对门楣自然通气抑制门楣空化作过详细研究,根据1:1门楣切片模型试验成果及设计单位提供的犍为船闸阀门布置形式,推荐了该船闸门楣体型及通气管布置。

需特别指出,由于门楣通气对缝隙段的几何尺寸较为敏感,施工安装过程中一定要确保门楣挑坎处的间隙最小,这是实现门楣自然通气的前提条件。

虽然本文采用的工程措施是针对具体工程提出的,但由于试验方法先进、原理简单清晰,普适性很强,并通过模型试验论证且已在实际工程中成功运用。

本文以试验研究方法为主,空化研究使用数值模拟手段,首先在流动模型方面,国外经历了经典势流理论、界面追踪法和多相均质模型3个阶段,各类空化发生的机理和现象各不相同,目前为止,数值模拟方法和效果尚待进一步完善。高水头船闸阀门在有限区域内涉及了游移空化、固定空化和旋涡空化等3类典型的空化问题,其空化形态又与阀门后流场结构特征(流场时均特性、流场脉动特性)、不同廊道体型收缩系数等密切相关,因此高水头船闸阀门空化是非常复杂的空化问题,现阶段高水头船闸阀门空化模拟均通过减压箱物理模型试验进行。但随着CFD技术的飞速发展,数值模拟方法凭其节约人力物力,耗时少等优势,在实际工程中必将日益得到运用和

认可,是空化领域研究的一大方向。

## 参考文献:

- [1] JTJ 306—2001 船闸输水系统设计规范[S].
- [2] 宣国祥,李君,黄岳.岷江犍为航电枢纽工程船闸输水系统水力学模型试验研究[R].南京:南京水利科学研究院,2010.
- [3] 胡亚安,刘本芹,严秀俊,等.嘉陵江草街船闸施工图阶段阀门水力学模型试验研究[R].南京:南京水利科学研究院,2007.
- [4] 胡亚安,凌国增.三峡船闸反弧形输水阀门水动力特性及防空蚀措施研究,“八五”国家科技攻关子题报告[R].南京:南京水利科学研究院,1995.
- [5] 胡亚安,卞兆盛.葛州坝一号船闸门楣通气设施原型观测研究[J].水运工程,1995(6):28-32.
- [6] 胡亚安,严秀俊.北本水电站船闸输水阀门与阀门廊道段水动力特性研究[R].南京:南京水利科学研究院,2012.
- [7] 胡亚安,严秀俊,薛淑.银盘船闸泄水阀门廊道体型优化及减压模型试验研究[R].南京:南京水利科学研究院,2011.
- [8] 严秀俊,胡亚安.草街船闸阀门门楣1:1切片模型试验研究[R].南京:南京水利科学研究院,2005.
- [9] 胡亚安,郑楚佩.葛洲坝一号船闸输水阀门空化特性原型监测[J].水科学进展,1994(3):235-241.
- [10] 胡亚安,张瑞凯.三峡船闸阀门底扩与顶扩廊道水力特性综合研究[J].水科学进展,1998(2):164-169.
- [11] 陈泰春,胡亚安,黄岳,等.福建沙溪口电站船闸输水系统水力学原型观测研究[R].南京:南京水利科学研究院,1992.
- [12] 张瑞凯,胡亚安等.三峡永久船闸阀门水动力学特性研究,“九五”国家科技攻关子题报告[R].南京:南京水利科学研究院,2001.

(本文编辑 武亚庆)