

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.04.003

王新, 胡亚安, 严秀俊, 等. 高水头船闸阀门顶缝空化切片试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2017(4): 14-19. (WANG Xin, HU Ya'an, YAN Xiujun, et al. Sectioning test study on valve top gap cavitation of high-head lock[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(4): 14-19. (in Chinese))

## 高水头船闸阀门顶缝空化切片试验研究

王 新<sup>1,2</sup>, 胡亚安<sup>1,2</sup>, 严秀俊<sup>1,2</sup>, 吴 波<sup>1</sup>, 钱文勋<sup>1</sup>

(1. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 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:** 针对日益严峻的高水头单级船闸阀门顶缝空化问题, 采用能够真实反映缝隙流特性的 1:1 切片模型试验, 研究阀门顶缝空化特性及门楣自然通气防空化机理。研究表明, 随着空化的发展, 缝隙段依次发生喉口跌坎空化、主流中心空化和阀门面板空化, 缝隙段负压区不断延伸, 直至整个缝隙段达到稳定的 -10 m 水柱负压, 压力脉动很小; 门楣自然通气通过增加缝隙段压力, 消除主流中心空化和阀门面板空化, 抑制喉口跌坎空化。当采用门楣自然通气措施后, 缝隙段压力稳定在 -2 m 水柱左右, 空化消失, 缝隙段水流脉动压力增大; 缝隙段压力与单宽通气量近似二次多项式关系, 通气量极值对应的缝隙段压力约 -2 m 水柱, 此时缝隙段压力与通气量达到平衡状态, 当缝隙段压力逐渐升高时, 门楣通气量逐渐降低, 直至自然通气停止。

**关 键 词:** 高水头船闸; 阀门; 顶缝空化; 自然通气; 切片试验

**中图分类号:** U641.3<sup>+</sup>3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2017)04-0014-06

阀门是船闸输水系统的咽喉, 其安全平稳运行直接关系到整个船闸的运行安全及效率, 重要性不言而喻。船闸工作水头超过 20 m 称为高水头船闸, 高水头船闸阀门段空化是影响阀门及启闭系统振动、结构安全、运行平稳性的重要因素。典型的如葛洲坝船闸, 设计运行水头 27 m, 输水阀门段空化对通航建筑物及设备的正常运转造成了严重影响, 1 号船闸反弧阀门 M20 止水螺栓被剪断, 反弧门振动加速度均方根值超过 4g, 门楣 16Mn 的钢板蚀出 8~10 mm 深的沟槽, 3 号船闸反弧门面板蚀穿, 底缘成蜂窝, 门楣厚度为 24 mm 的钢板被蚀穿, 两端部混凝土外露<sup>[1-2]</sup>。通过不断研究探索及工程实践, 对高水头阀门空化问题认识不断深入, 阀门段空化主要包括门楣缝隙空化、底缘空化、廊道跌坎及升坎空化、门槽空化等, 其中门楣缝隙处产生的强射流及高频空化最为强烈, 底缘空化其次<sup>[3-4]</sup>。

在我国船闸工程的快速发展过程中, 建设了一批高水头船闸, 代表性的有水口三级船闸(中间级水头 41.7 m)、五强溪三级船闸(中间级水头 42.5 m)、三峡五级船闸(中间级水头 45.2 m)<sup>[5-6]</sup>。针对高水头阀门抗空化的迫切需要, 通过科技攻关, 提出了高水头阀门的防空化新技术, 采用新型阀门段廊道体型、合理的初始淹没深度及门楣自然通气相结合的措施, 高水头阀门的空化问题得到了妥善解决, 尤其门楣自然通气, 不仅抑制主要的门楣缝隙空化, 而且掺气水流能够抵达阀门底缘, 对底缘空化也有很好的抑制作用, 已成为高水头阀门防空化必备措施<sup>[7-8]</sup>。当然, 门楣通过设计掺气槽、利用缝隙段负压实现自然通气, 通气效果与门楣的体型设计密切相关, 因此门楣体型至关重要<sup>[9-10]</sup>。在高水头阀门门楣体型研究方面, 鉴于实际缝隙流未进入阻力平方区<sup>[11-12]</sup>, 南京水利科学研究院开创了能真实反映缝隙流特性的门楣 1:1 切片试验方法, 并应用于葛洲坝、三峡、大化、乐滩、红花、草街、银盘等国内高水头船闸门楣体型论证, 为阀门防空化设计提供了重要科技支撑。

收稿日期: 2016-08-25

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51479124, 51479125)

作者简介: 王 新(1983—), 男, 江苏宿迁人, 高级工程师, 博士, 主要从事通航水力学研究。E-mail: xwang@nhri.cn

近年来,随着船闸建设水平不断提高,大型化单级船闸日益增多,如大藤峡船闸最大工作水头 40.25 m,代表目前我国单级船闸的最高水平,阀门各种水力学问题更加复杂。目前的门楣体型能否适应更高水头的阀门,有必要进一步研究论证。基于此,本文依托大藤峡船闸工程,利用高速高压缝隙流试验装置,开展高水头阀门 1:1 模型切片试验(见图 1),重点研究探讨了门楣顶缝空化特性及自然通气防空化机理。

## 1 门楣 1:1 切片试验设计

门楣缝隙流高速高压试验设备更新换代后,试验能力得到显著提升,如图 1 所示,切片宽度达到 120 mm,作用水头能达到 60 m,工作段观察范围更宽,测控仪器仪表自动化,为开展高水头阀门门楣试验奠定了基础。

阀门门楣缝隙段体型如图 2 所示,左侧边界为工作阀门(反弧门)的下游面板,与右侧门楣间形成窄长的缝隙段,在门楣一侧喉口后设置掺气槽,掺气槽与横向通气主管之间等间距布置多个直径 20 mm 的小通气管,通气利用缝隙段形成的负压实现门楣自然通气,抑制门楣空化。

用有机玻璃制作门楣缝隙段 1:1 切片模型,有机玻璃厚度达 120 mm,共布置 2 个小通气管。为考察门楣空化、自然通气等特性,进行多种物理量测试分析,主要包括空化及掺气水流流态、门楣通气量、缝隙段动水压力、空化噪声及振动等,相应的测量设备分别为高速摄像、涡街空气流量计、脉动压力传感器、水听器、振动加速度传感器等,其中在阀门面板一侧典型位置布置 5 个压力测点(P1~P5),如图 2 所示。

## 2 门楣自然通气防空化机理

### 2.1 空化及掺气流态

门楣缝隙段空化形态与上下游压力条件密切相关,采用高速摄像系统获得不同条件下缝隙段典型空化及掺气水流流态如图 3 所示。从门楣缝隙空化的发展过程来看,可以分为 3 个阶段,第一阶段为弱空化(图 3(a)),此时,下游水位相对较高,喉口发生空化后,空化水流在掺气槽内旋滚,从缝隙段进口沿门楣壁面向下波状扩散,形成非常稳定的细微云状空化流态;降低下游出口压力至上游压力不再随其变化而变化,达到临界阻塞状态(图 3(b)),此时缝隙段流量、流速、上游压力固定,空化处于发展阶段,由喉口跌坎产生的空化水流附壁区域向下延伸,进入缝隙段,同时上游主流通过喉口后在负压作用下发生内部空化,在主流中心出现纵向空化气流,进入缝隙段后与喉口空化水流混合;再进一步降低下游出口压力,喉口跌坎空化进一步发展,附壁空



图 1 高速高压缝隙流试验装置

Fig. 1 Test device for gap flow of high speed and pressure

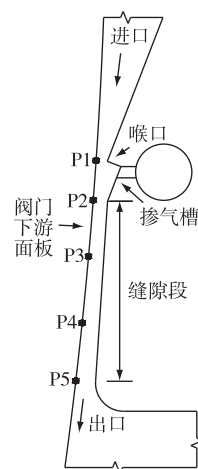


图 2 门楣缝隙段体型

Fig. 2 Diagram of top gap section

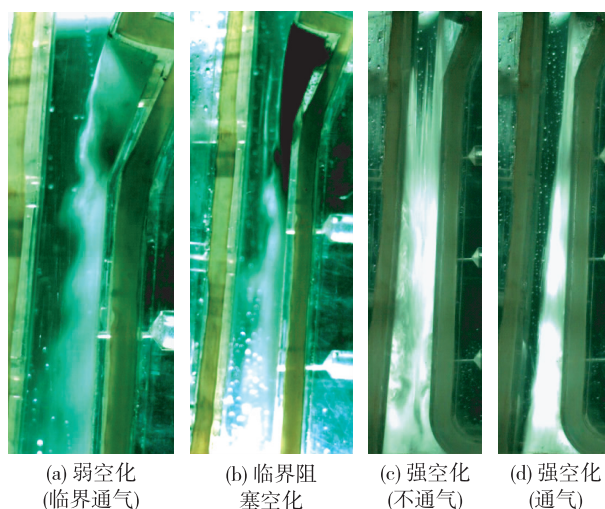


图 3 不掺气与掺气流态对比

Fig. 3 Flow pattern comparison between natural aeration and non-aeration

化继续向缝隙段内部延伸,主流中心空化有所增强,左侧阀门弧形面板也出现了附壁空化,左、中、右三处空化气泡充斥了整个缝隙段(图 3(c)),此时达到强空化状态,受出口高压紊动影响,缝隙段空化水流附壁出现随机回流,使缝隙后半段至出口的空化流态较为紊乱,面板及门楣两侧均发生空化,与原型门楣钢板、阀门面板蚀损现象吻合。在强空化状态下,打开通气阀门,门楣自然通气,空化流态瞬间转变(图 3(d)),面板空化、主流中心空化消失,喉口跌坎空化与掺气槽内气体形成掺气水流,沿门楣壁面向下游流动扩散,至缝隙段出口断面基本混掺均匀。从门楣是否通气时的流态变化可以看出,门楣自然通气的防空蚀包括两个方面:消除了面板空化、主流中心空化,同时抑制了喉口跌坎空化。

## 2.2 缝隙段压力特性

流态与压力密切相关,因此,通过分析缝隙段 5 个测点压力分布,可以进一步了解空化发展过程缝隙段压力特性及门楣自然通气抑制空化的机理。引入能够表征缝隙段空化条件的参数——下游空化数:

$$\sigma_d = \frac{P_d + P_a - P_v}{v^2 / (2g)}$$

其中: $\sigma_d$ 为下游水流空化数; $P_d$ 为下游控制压力; $P_a$ 为大气压力; $P_v$ 为饱和蒸汽压力; $v$ 为喉口流速。缝隙段临界阻塞空化下游空化数为 0.54,然后逐渐降低下游压力,下游空化数逐渐减小,空化不断发展,此过程中,几个不同空化状态下缝隙段时均压力分布见图 4。在临界阻塞空化状态,仅缝隙段进口处测点(P2)为负压。随着下游空化数降低,空化逐渐增强,水流向缝隙段延伸,缝隙段压力由正变负,且很快达到最大-10 m 水柱左右的负压。下游空化数进一步减小则负压范围不断延伸扩大,在下游空化数 0.28 时,发生强空化,缝隙段基本全部达到-10 m 水柱稳定的负压状态。

以前文强空化状态下不通气与通气为例进行对比,两种工况缝隙段时均压力和脉动压力分布见图 5。由图可见,不通气强空化状态下,缝隙段内部绝大部分压力处于最低的-10 m 水柱负压,非常稳定。这是缝隙段发生强空化且空化充斥整个缝隙段的原因,喉口及缝隙段出口受上、下游压力影响,压力高于缝隙段内部;相同条件下,门楣自然通气时,缝隙段水流压力整体提升,由-10 m 水柱变为不足-2 m 水柱,此时达到压力与通气量的平衡,即欲实现稳定的通气,缝隙段仍须处于负压状态。从缝隙段脉动压力分布可以看出,在不通气时,缝隙段内部负压稳定,脉动很小,在近出口位置受空化气泡溃灭影响脉动压力突然增大;在相同条件自然通气情况下,缝隙段水流脉动明显大于不通气工况,可见通气后缝隙段内部的水流紊动有所增大,伴随着掺气水流沿缝隙段向下扩散,脉动压力沿程表现出逐渐增大的趋势。

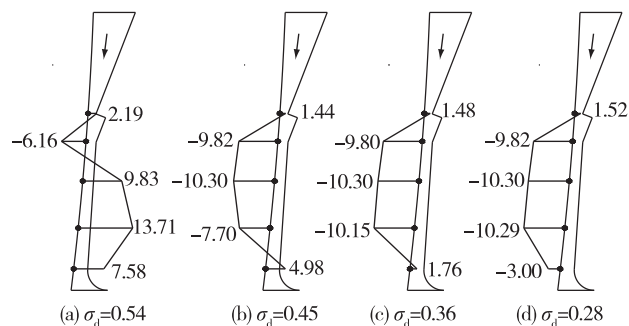


图 4 空化发展过程缝隙段压力变化(单位:m 水柱)

Fig. 4 Pressure changes with growing of cavitation in gap section (unit: m in water column)

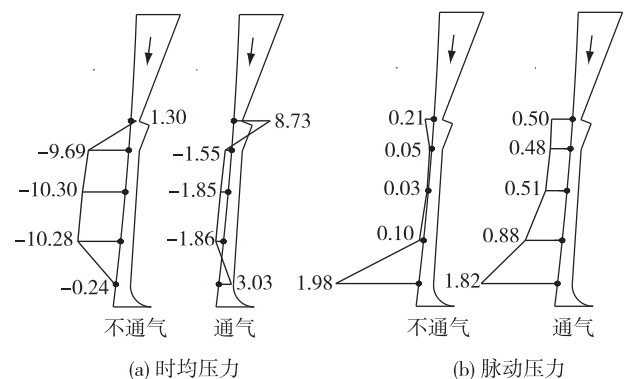


图 5 缝隙段压力分布(单位:m 水柱)

Fig. 5 Pressure distribution along gap section (unit: m in water column)



### 2.3 空化噪声及振动特性

相同工况下,通过阀门控制是否向缝隙段自然通气,不通气和通气情况下,空化噪声过程线对比见图6,由图可见,不通气时,缝隙段发生强空化,噪声强度明显大于自然通气情况,前者约为后者的5倍,可见自然通气对空化具有很好的抑制作用,是避免出现“声振”的关键所在。

在门楣缝隙段侧壁布置三向振动加速度传感器,测量相同进出口压力条件下(强空化)门楣通气与否两种状态的振动响应,如表1所示。不通气时缝隙段发生空化,通气后,振动相对于不通气时降低70%~80%,可见,空化是振动的一个主要激励源,在空化被自然通气抑制后,振动也相应减小,空化与振动关系密切。

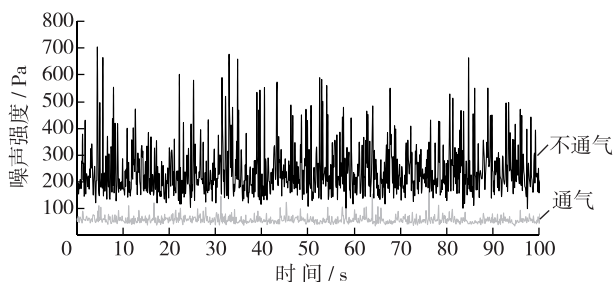


图6 门楣通气与否空化噪声对比

Fig. 6 Cavitation noise comparison with and without natural aeration

表1 门楣通气与否振动对比

Tab. 1 Vibration comparison with and without natural aeration

| 喉口宽度/mm | 方向 | 振动加速度均方根值/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ) |      | 降幅/% |
|---------|----|----------------------------------------------|------|------|
|         |    | 不通气                                          | 通气   |      |
| 20      | x  | 1.65                                         | 0.49 | 70.5 |
|         | y  | 1.69                                         | 0.35 | 79.5 |
|         | z  | 2.28                                         | 0.55 | 75.8 |
| 25      | x  | 1.88                                         | 0.58 | 69.2 |
|         | y  | 1.94                                         | 0.45 | 76.7 |
|         | z  | 2.85                                         | 0.73 | 74.6 |

### 3 阀门运行过程掺气特性

在高水头阀门开启充水过程中,随开度逐渐增大,缝隙流进口压力逐渐减小,出口压力逐渐增大,缝隙段空化条件逐渐减弱。对于本文研究的门楣体型,临界自然通气条件用上游压力 $P_u$ 和下游压力 $P_d$ 表示,呈线性关系: $P_u = 1.625P_d$  ( $R^2 = 0.9997$ ),当缝隙段进出口压力关系在该直线左上区域时能自然通气,在直线右下区域时不能自然通气。

根据门楣自然通气条件及大藤峡船闸阀门水力学试验得到的阀门不同开度时的前后压力可知,在阀门0.6开度内门楣可以自然通气。利用门楣切片模型,调节进出口压力,模拟阀门不同开度时门楣工作条件,获得门楣自然通气量,通气量过程线见图7,0.1~0.6开度缝隙段压力分布见图8。

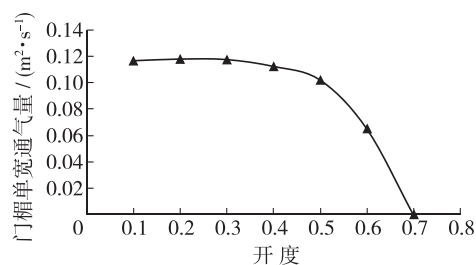


图7 门楣自然通气量

Fig. 7 Ventilation with valve opening

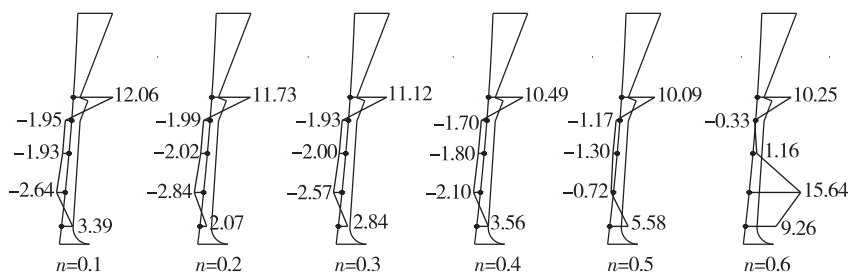


图8 不同开度缝隙段时均压力分布(单位:m水柱)

Fig. 8 Pressure distribution on valve plate under different openings (unit: m in water column)

从图 8 可以看出,自然通气能力与缝隙段压力密切相关,在小开度 0.1~0.3 时,缝隙段内部压力分布基本稳定,门楣通气量稳定;开度进一步增大后,随着下游压力逐渐升高,缝隙段压力分布逐渐受到影响,到 0.4 开度后,受下游压力影响,缝隙段负压逐渐减小,负压范围缩小,门楣通气量相应减小,到 0.6 开度时,仅缝隙段进口一个测点存在负压,通气量大幅减小,0.7 开度门楣不能自然通气,此时喉口发生较弱空化,可见缝隙段压力与自然通气、空化状态密切相关。在采用自然通气措施后,门楣缝隙段不会再发生强空化。

以缝隙段内部典型测点 P2 为例,系列试验 P2 测点压力与门楣单宽通气量关系见图 9,单宽通气量与缝隙段压力近似呈二次多项式关系,通气量极值对应的缝隙段压力约 -2 m 水柱,此时缝隙段压力与通气量达到平衡状态。

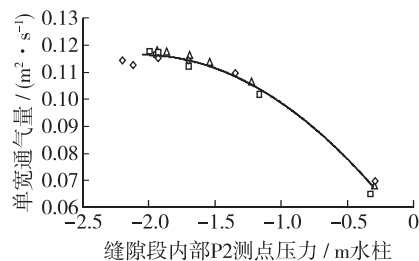


图 9 单宽通气量与缝隙段压力关系

Fig. 9 Relationships between ventilation and pressure of gap section

## 4 结 语

采用高速高压缝隙流试验装置,进行高水头阀门 1:1 切片试验,研究分析了门楣空化特性及自然通气防空化机理,得到以下结论:

(1) 切片试验发现,缝隙段空化包含喉口跌坎空化、主流中心空化、阀门面板空化,三处空化随时间发展依次发生,在强空化阶段三者并存,空化水流充斥整个缝隙段,在缝隙段出口附近空化水流紊乱,伴有回射流。

(2) 门楣自然通气防空化机理:通气增加缝隙段压力,消除主流中心空化和阀门面板空化,抑制喉口跌坎空化。

(3) 随着顶缝空化发展,缝隙段负压区不断延伸,直至整个缝隙段达到稳定的 -10 m 水柱负压,压力脉动很小;当采用门楣自然通气措施后,缝隙段压力整体升高,稳定在 -2 m 水柱左右,空化消失,保持一定负压是通气的必要条件,通气后缝隙段水流脉动压力增大。

(4) 缝隙段压力与单宽通气量近似二次多项式关系,通气量极值对应的缝隙段压力约 -2 m 水柱,此时缝隙段压力与通气量达到平衡状态,当缝隙段压力逐渐升高时,门楣通气量逐渐降低,直至停止自然通气。

## 参 考 文 献:

- [1] 胡亚安, 郑楚珮, 凌国增. 高水头船闸反弧形阀门门顶缝隙流特性及其应用[J]. 水利水运科学研究, 1995(4): 352-361. (HU Ya'an, ZHENG Chupei, LIN Guozeng. Characteristics and applications of top gap slit flow at reversed tainter valve on lock with high lift[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1995(4): 352-361. (in Chinese))
- [2] 卞兆盛. 葛洲坝船闸输水阀门段空化与声振研究[J]. 水运工程, 2000(7): 34-37. (BIAN Zhaosheng. A study of cavitation and acoustic shock at water filling & emptying valve section of Gezhouba ship lock[J]. Port & Waterway Engineering, 2000(7): 34-37. (in Chinese))
- [3] 蒋筱民, 宋志忠. 高水头船闸阀门段廊道防空化设计[J]. 人民长江, 2009, 40(23): 51-53. (JIANG Xiaomin, SONG Zhizhong. Anti-cavitation design of valve section gallery of high head ship lock[J]. Yangtze River, 2009, 40(23): 51-53. (in Chinese))
- [4] 王新, 严秀俊. 船闸平板输水阀门动力优化及流激振动特性分析[J]. 水运工程, 2013(12): 151-154. (WANG Xin, YAN Xiujun. Dynamic optimization and flow-induced vibration study on plate valve of ship lock[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(12): 151-154. (in Chinese))
- [5] 张陆陈, 骆少泽, 王新. 陡槽高速泄流掺气减蚀试验研究[J]. 工程力学, 2013(增刊 1): 328-332. (ZHANG Luchen, LUO Shaoze, WANG Xin. Experimental study of air entrainment to alleviate cavitations for chute with high-speed discharge[J]. Engineering Mechanics, 2013(Suppl 1): 328-332. (in Chinese))
- [6] WANG Xin, LUO Shaoze, HU Ya'an, et al. High-speed flow erosion on a new roller compacted concrete dam during construction

- [J]. Journal of Hydrodynamics, 2012, 24(1): 32-38.
- [7] WANG Xin, LUO Shaoze, LIU Guangsheng, et al. Abrasion test of flexible protective materials on hydraulic structures[J]. Water Science and Engineering, 2014, 7(1): 106-116.
- [8] WU Jianhua, GUO Wenjuan. Critical size effect of sand particles on cavitation damage[J]. Journal of Hydrodynamics, 2013, 25(1): 120-121.
- [9] XU Weilin, BAI Lixin, ZHANG Faxing. Interaction of a cavitation bubble and an air bubble with a rigid boundary[J]. Journal of Hydrodynamics, 2010, 22(4): 503-512.
- [10] WU Jianhua, LUO Chao. Effects of entrained air manner on cavitation damage[J]. Journal of Hydrodynamics, 2011, 23(3): 333-338.
- [11] HORSZCZARUK E. Abrasion resistance of high-strength concrete in hydraulic structures[J]. Wear, 2005, 259: 62-69.
- [12] LUO Jing, XU Weilin, NIU Zhipan, et al. Experimental study of the interaction between the spark-induced cavitation bubble and the air bubble[J]. Journal of Hydrodynamics, 2013, 25(6): 895-902.

## Sectioning test study on valve top gap cavitation of high-head lock

WANG Xin<sup>1,2</sup>, HU Ya'an<sup>1,2</sup>, YAN Xiujun<sup>1,2</sup>, WU Bo<sup>1</sup>, QIAN Wenxun<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology of Ministry of Transport, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** In view of the developing problem of the valve top gap cavitation of high head single-lift ship lock, the scale 1:1 sectioning model test method which can truly describe the gap flow characteristics is adopted to study the valve top gap cavitation and the cavitation resistance mechanics of the natural aeration. It is found that three kinds of cavitation, namely the throat cavitation, the flow center cavitation and the valve plate cavitation, are taking place step by step in the gap section with the development of the cavitation. The mechanics of the natural aeration measure to prevent cavitation is that the pressure of the gap flow becomes high when the air is aerated into the gap section, and then the flow center cavitation and valve plate cavitation disappear and the throat cavitation is weakened remarkably. With the growing of the cavitation, the negative pressure zone in the gap section is gradually extending until the gap section is fulfilled with stable -10 m water head negative pressure. When the natural aeration measure is employed, the pressure in the gap section is stable in the -2 m water column and the cavitations disappear. It is nearly a quadratic polynomial relationship between the pressure of the gap section and the ventilation per meter width. The pressure of the gap is -2 m water head when the ventilation goes to the extreme value, which is the limiting equilibrium situation for the natural aeration system. When the pressure of the gap gradually increases, the ventilation volume decreases gradually until the cessation of the natural aeration. The research results are beneficial to the cavitation resistance design of the high head valve.

**Key words:** high head lock; valve; top gap cavitation; natural aeration; sectioning test