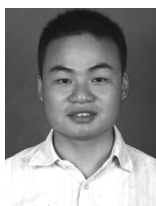


· 航道及通航建筑物 ·

反弧门顶止水窄缝射流水动力特性试验研究^{*}



潘树军¹, 王 新², 王晓辉³

(1. 南京市市政设计研究院有限责任公司, 江苏 南京 210008;

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;

3. 华设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014)

摘要: 高水头船闸反弧门顶止水频繁损坏已成为影响船闸运行可靠度的主要问题, 开展顶止水工作状态下水动力特性研究十分必要。采用顶止水 1:1 切片试验装置, 开展反弧门小开度运行时顶止水窄缝射流水动力学试验研究, 揭示顶止水窄缝射流空化发生发展过程、止水表面动水时均压力分布规律和脉动压力能量分布特征。结果表明, 窄缝射流空化在顶止水下表面产生 20~80 Hz 的高频压力脉动, 易引起柔性止水大变形失稳, 是阀门开启初期发生冲击性振动的原因。

关键词: 高水头船闸; 反弧门; 顶止水; 窄缝射流; 水力特性

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)08-0085-07

Experimental study on gap jet hydrodynamic characteristics of top seal of reversed tainter valve

PAN Shu-jun¹, WANG Xin², WANG Xiao-hui³

(1. Nanjing Municipal Design and Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210008, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Key Laboratory of Navigation Structures Construction Technology, Ministry of Transport, Nanjing 210029, China;

3. China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China)

Abstract: Frequent damage to the top seal of the reversed tainter valve of the high water head ship lock has become the main problem affecting the operation reliability of the lock, and it is necessary to study the hydrodynamic characteristics of the top seal working state. The top seal 1:1 section test device is used for the top seal gap jet hydrodynamic test in the small opening of the reversed tainter valve. The development of gap jet cavitation, the hydrodynamic load distribution on the seal surface and the plusation pressure energy distribution rules are revealed. The results show that gap jet cavitation produces high frequency pressure pulsation of about 20 to 80 Hz on the lower surface of the top seal, which is easy to cause instability of the large deformed flexible seal, and is the cause of shock vibration in the initial stage of valve opening.

Keywords: high head lock; reversed tainter valve; top seal; gap jet; hydraulic characteristics

船闸是内河航道控制性节点工程, 地位十分重要。随着国家高等级航道网建设实施, 船闸工程得到快速发展, 建设技术不断进步, 高水头、大型化趋势日益明显。我国已建成的三峡双线连续五级船闸(中间级水头 45.2 m)、大藤峡单级船

闸(水头 40.25 m), 均为世界最高水平。通过总结已建高水头船闸运行情况发现, 船闸核心运转件反弧门的顶止水频繁损坏, 三峡船闸每年都需要检修更换十余条顶止水, 顶止水的频繁破坏导致船闸运行可靠度降低, 因此反弧门顶止水损坏

收稿日期: 2021-12-16

^{*}基金项目: 国家自然科学基金项目(51779151)

作者简介: 潘树军(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水工设计与研究。

问题成为影响船闸高效运行的关键。

根据已有研究^[1-2]，阀门顶止水破坏与工作水头密切相关，水头越高寿命越短，主要原因归结于复杂的水力作用。多座高水头船闸原型观测表明，在阀门开启初期总会发生短暂的冲击性振动，这是顶止水与胸墙脱离引起的窄缝射流空化造成的^[3]。另外，中高水头船闸阀门挡水状态下经常出现强烈振动现象，均因止水漏水引起结构自激振动，与小开度时止水窄缝射流问题相同^[4]。针对止水损坏问题，运行管理部门非常重视，在实践中不断改进止水的安装工艺，止水的使用寿命有一定的延长，但问题未得到完全解决。因反弧门顶止水问题相对复杂，相关研究明显不足，尚未掌握反弧门顶止水的工作特性。为此，本文利用研发的无缩尺效应的顶止水 1:1 切片试验装置^[5-6]，开展阀门顶止水小开度状态时水力特性及影响因素研究，为提出顶止水工作状态改善措施奠定基础。

1 试验设计

1.1 试验装置

高水头船闸反弧门顶止水布置如图 1 所示，顶止水采用半圆头形式，阀门关闭时止水与胸墙贴紧密封，防止阀门漏水流向下游。当阀门开启时，顶止水与胸墙脱离形成窄缝，在止水顶部(上游高水位)和底部(下游低水位)形成的水头差作用下，在缝隙内产生高速射流，如图 2 所示。可以看出，形成的窄缝射流以最窄断面即喉口位置为界可分为进口收缩段和出口扩散段，类似文丘里管。从理论上可知，在喉口位置流速最大，压力最低，是极易发生空化的位置。拟利用文献[6]研发的 1:1 切片试验装置开展试验。

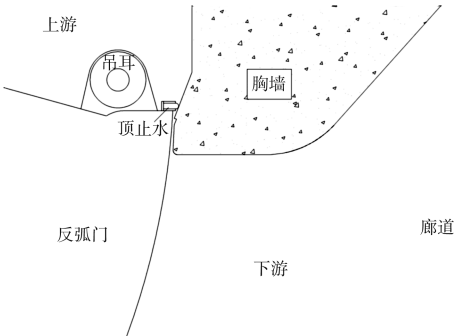


图 1 反弧门顶止水布置

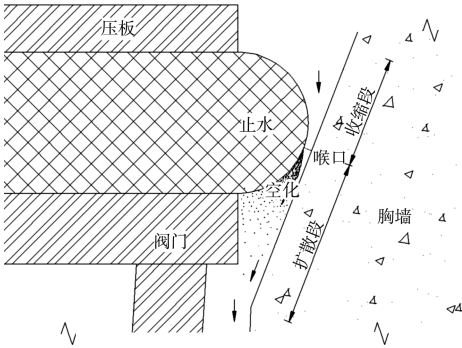


图 2 小开度止水窄缝射流

1.2 止水试件

根据试验装置要求，采用透明有机玻璃材料制作 1:1 的顶止水模型，开展窄缝射流条件下止水的水动力特性试验研究，以获得窄缝射流空化流态、动水压力分布规律及影响因素。有机玻璃试件如图 3 所示，仅模拟止水边界，便于布置动水压力测点。



图 3 止水有机玻璃试件

1.3 测点布置

为考察作用于止水表面的动水荷载，在处于水流作用区域的半圆形止水试件头部布置 8 个压力测点，因缝隙空化主要发生于止水头部的下半区，故测点重点布置于止水下部的，从上向下依次排序，编号 $P_1 \sim P_8$ 。另外，在胸墙边壁与止水对应的位置布置 5 个压力测点，20 mm 等间距自上而下依次排序，编号为 $P_9 \sim P_{13}$ 。压力测点布置见图 4。考虑到脉动荷载大小、安装空间，定制合适量程、小直径的高频脉动压力传感器用于测试，传感器的感应面为直径 2 mm 的圆形，将传感器安装固定后，再将有机玻璃试件安装于试验装置内并密封，重点解决传感器电缆线从内到外连接的高压密封问题。

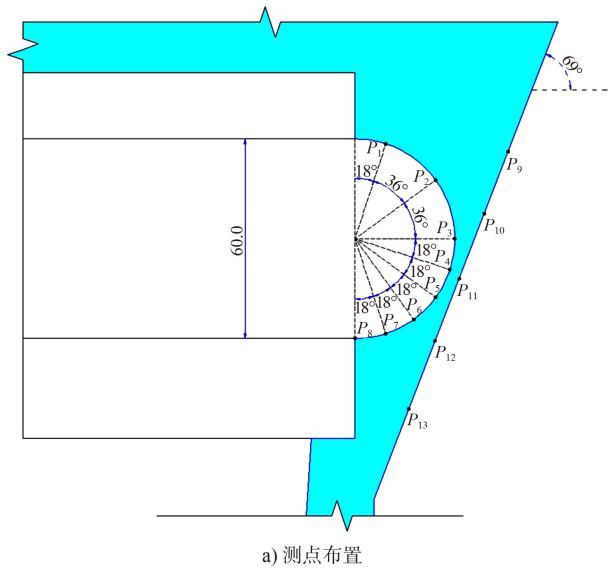


图 4 测点布置和模型

1.4 试验工况

高速射流空化水动力荷载特性研究主要考虑了上下游压力(水位)的影响, 试验工况见表 1, 缝隙宽度按 2.5 mm 设置, 进行 32 种水位组合工况的试验。

表 1 空化试验工况组合

缝隙宽度/mm	上游压力/m 水柱	下游压力/m 水柱
2.5	5	0、1、3
	10	0、1、3、5、7
	15	0、1、3、5、7、9
	20	0、1、3、5、7、9
	25	0、1、3、5、7、9
	30	0、1、3、5、7、9

2 窄缝射流空化特性

2.1 空化流态

试验过程中, 从试验段侧面透明有机玻璃观

察窗观察窄缝射流流态, 可看出不同空化状态的发展变化过程。首先, 通过缓慢调节旁通的调水阀门, 控制稳压箱内的压力以及通过试验段的流量, 使进口压力和过流流速缓慢增大, 不断升高上游压力, 同时调节出口阀门控制下游压力稳定不变, 使工作段从无空化到初生空化、空化发展、强空化等不同状态, 如图 5 所示。从空化形态可以看出, 在压力和流速较小时已经发生明显的空化现象, 空化发生于止水与胸墙形成的缝隙流最窄断面位置的止水表面, 即在 P_4 和 P_{11} 测点附近, 呈云状空化从止水表面向下游输运扩散。随着上游压力和流速的不断增大, 空化不断增强, 表现为空化噪声增强、空化气泡扩散范围逐渐向下游延伸等。从止水空化流态也可以看出, 在空化较弱时, 空化泡尚会在止水下表面附近溃灭, 但随着空化的不断增强, 空化泡的溃灭区域向下游扩展, 范围逐渐增大。



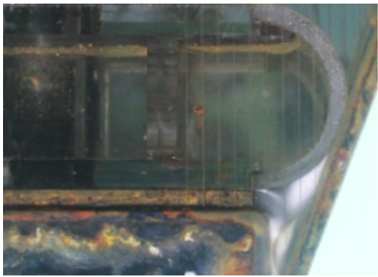
a) 初生空化



b) 空化发展

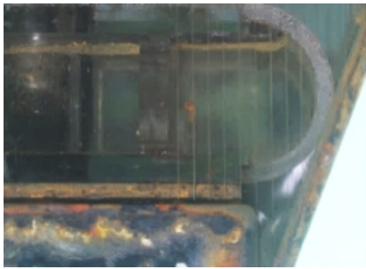


c) 空化发展



d) 强空化

图 5 射流空化形态

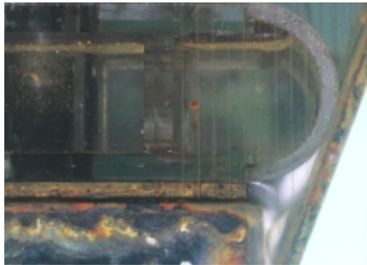


d) u30d9

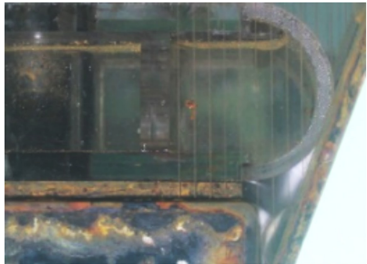
图 6 下游水压变化时空化形态

2.2 影响因素

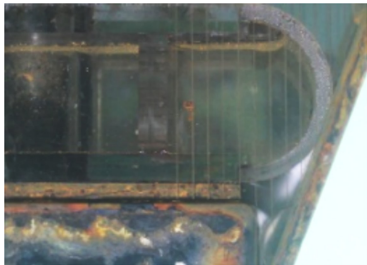
缝隙射流空化流态主要受上下游压力影响，上游压力影响喉口位置的流速与压力，其决定了空化条件，下游压力影响空化气泡群溃灭作用的位置。在上游压力稳定不变条件下，不断增大下游压力，缝隙空化流态变化如图 6 所示，其中 u 代表上游压力， d 代表下游压力。当下游压力较低时(0~1 m 水柱)，空泡随水流扩散较远，作用于试件下表面大部分范围内；随着下游压力逐渐增大，空泡溃灭区域不断向上游压缩。不同空化形态的作用还需要结合动水压力特性进行分析。



a) u30d0



b) u30d3



c) u30d5

3 动水压力特性

3.1 时均压力

选取表 1 中上游压力为 25 m 水柱、下游压力为 5 m 水柱的工况进行分析，缝隙内部时均压力分布见图 7。可以看出，在上方的收缩段，受上游压力控制， P_1 点处断面较宽、流速较小、压力基本为静压；随着缝隙向下，断面不断收缩，缝隙宽度逐渐减小，流速不断增大，表面的压力不断降低；到达最窄断面 P_4 测点附近，缝隙流速最大，压力降到最低，出现较大的负压，发生空化；在最窄断面之后即进入了扩散段，受下游压力控制，压力逐渐增大，负压变为正压。止水头部表面和胸墙的沿程压力分布规律基本一致，在本工况 20 m 水头条件下，止水上下表面的受力差异明显，在较大的上表面压力和下表面局部拉力作用下，止水将向下或右下拉伸变形。

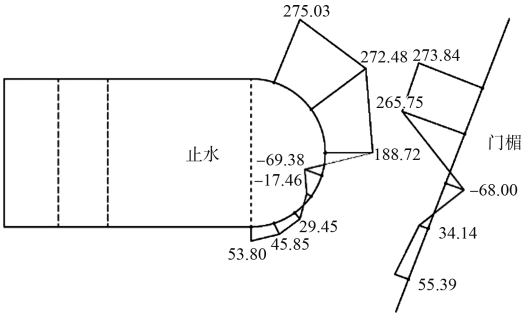


图 7 缝隙内时均压力分布 (单位: kPa)

保持下游压力为 0 m 水柱不变，上游压力从 5 m 水柱到 30 m 水柱不断增大，考察上游压力对缝隙内压力分布的影响。各工况下缝隙段时均压力分布规律同上，因下游压力控制为 0 m 水柱，止水下表面均为负压。各测点时均压力随上游压力变化规律见图 8，可以看出：位于止水试件上方

的 $P_1 \sim P_3$ 、 P_9 、 P_{10} 测点压力变化趋势一致, 受上游压力控制, 随着上游压力的增大, 各测点压力基本呈线性增大; 位于缝隙最窄断面附近的 P_4 、 P_5 、 P_{11} 测点压力变化趋势一致, 随着上游压力的增大, 各测点压力不断增大, 其中 P_4 和 P_{11} 测点更靠近上游, 受上游压力辐射影响要大于 P_5 测点; 位于止水下方的 $P_6 \sim P_8$ 、 P_{12} 、 P_{13} 测点压力变化趋势一致, 随着上游压力的增大, 各测点压力逐渐减小, 空化效果增强, 结合 P_4 、 P_5 测点看, 缝隙段最低负压区随着上游压力的增大逐渐下移, 缝隙段的空化范围不断延伸, 与前述的空化流态吻合; 当下游压力不变、上游压力逐渐增大, 止水头部的上表面正压不断增大, 止水受向下压缩作用增强, 而头部下表面的负压不断减小, 止水受向下拖拽作用增强, 对止水的总体变形影响加剧。

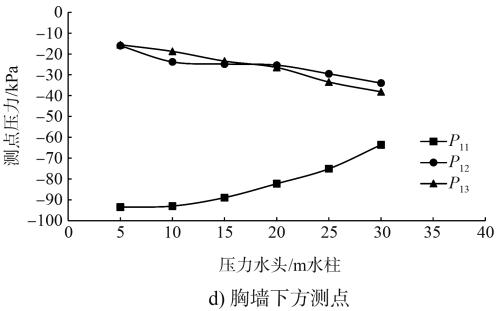


图 8 时均压力随上游压力变化规律

保持上游压力 30 m 水柱不变, 将下游压力从 0 m 水柱逐渐增大到 9 m 水柱, 考察下游压力对缝隙段压力分布的影响。各工况下止水表面和胸墙上测点压力分布见图 9。可以看出, 下游压力增大对缝隙扩散段压力分布影响明显, 随着下游压力的不断增大, 止水头部下表面各测点的时均压力不断增大, 表面负压区域逐渐缩小, 空化发生及影响的范围逐渐被压缩; 在试验窄缝条件下, 下游压力变化对缝隙上游收缩段压力影响较小, 因下游压力不断增大的顶托作用, 缝隙段流量略有减小, 导致 P_3 、 P_4 、 P_{11} 测点的压力略有增大。

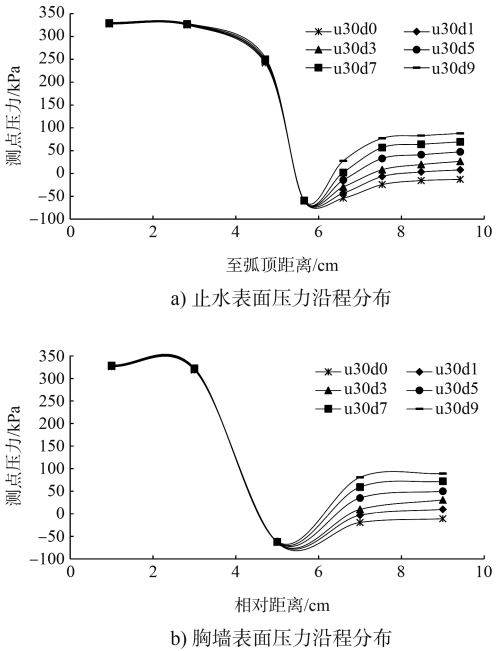
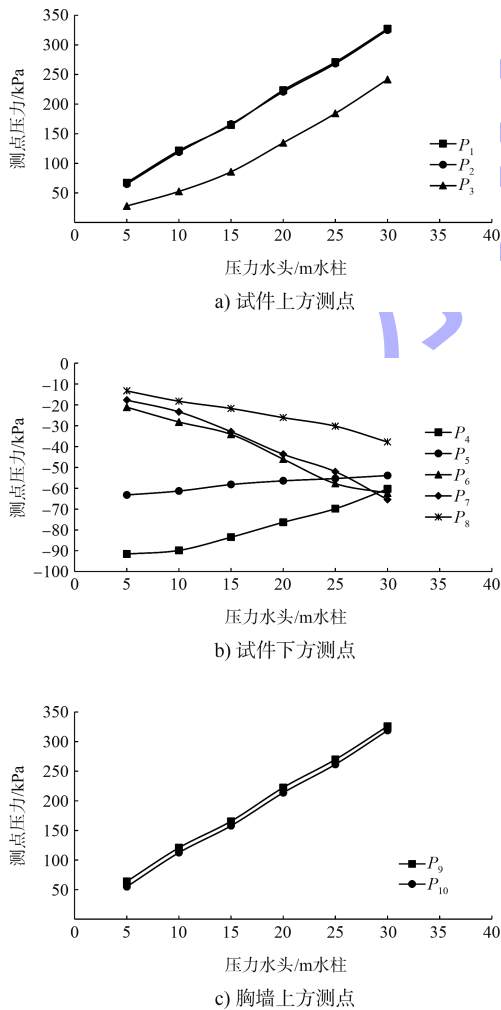


图 9 不同下游压力时均压力分布规律

3.2 脉动压力

选取上游压力 25 m 水柱、下游压力 5 m 水柱的工况分析止水表面脉动压力的能量分布特征,

该工况下止水表面 8 个测点脉动压力功率谱密度曲线见图 10。可以看出,止水上表面 P_1 和 P_2 测点均表现为一般水流低频的随机脉动特性;受止水顶部压板干扰, P_3 测点除低频脉动外,还有频率为 37 Hz 左右的高频扰动; P_4 测点位于压力相对稳定的负压区,水流脉动频率较低、能量很弱; P_5 、 P_6 测点处于空化作用区,脉动能量总体较强,频率分布较宽, P_5 脉动能量主要集中在 30 Hz 内, P_6 测点能量主要集中于 40~80 Hz,优势频率约 60 Hz; P_7 和 P_8 测点的脉动频带逐渐收窄,脉动能量也逐渐减弱,主要能量区的优势频率分别为 46 和 22 Hz。

上述分析表明,缝隙射流止水表面存在频带较宽、频率较高的扰动,是引起止水自激振动的原因之一。

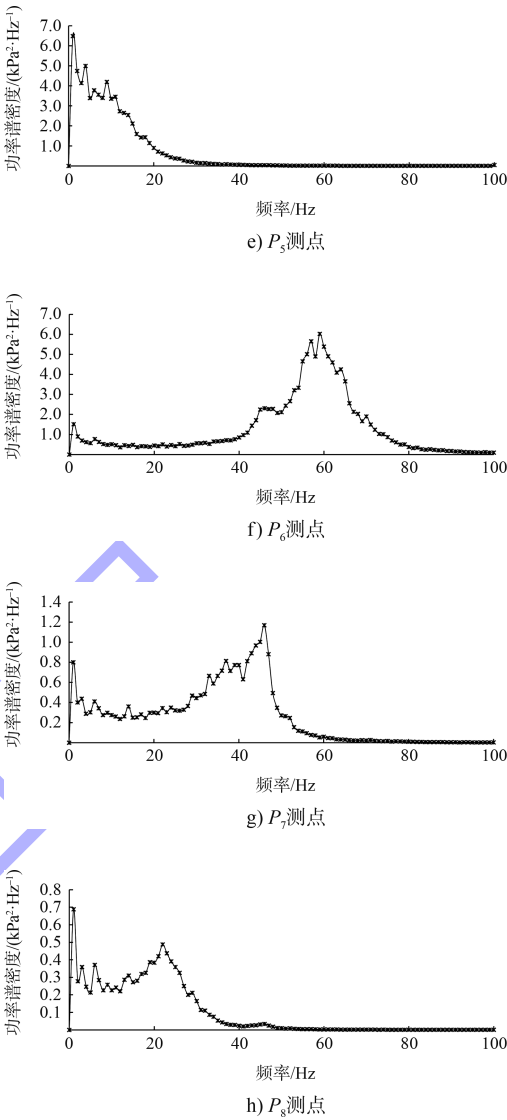
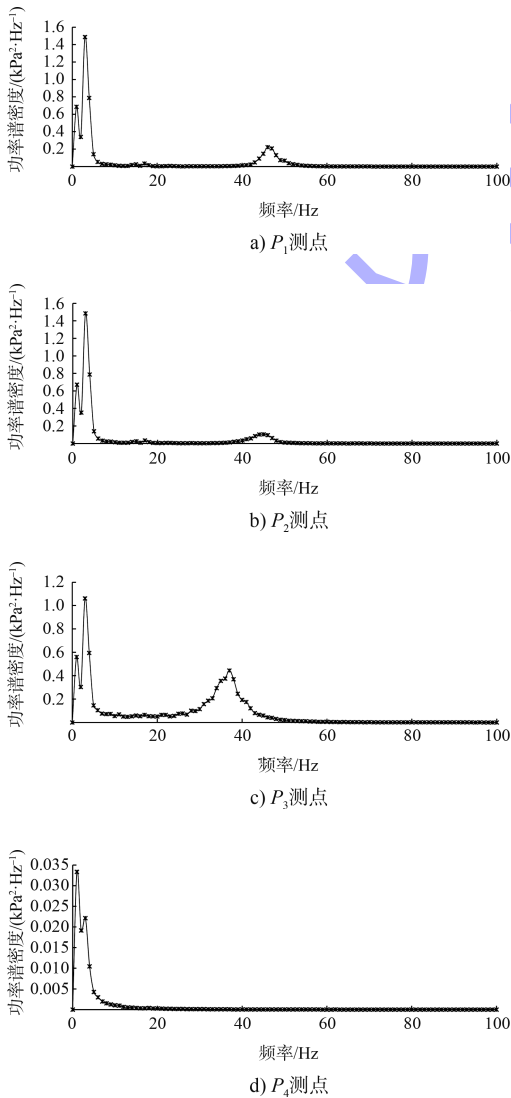


图 10 典型工况脉动压力功率谱密度曲线

保持下游压力为 0 m 水柱不变,上游压力不断增大,探讨上游压力对止水表面脉动压力能量分布特征的影响。选择典型的 P_3 和 P_6 测点,不同上游压力条件下两个测点的脉动压力功率谱密度曲线见图 11。可以看出,止水上表面 P_3 测点的脉动压力能量分布受上游压力影响很大,随着上游压力的增大,即缝隙流速增大, P_3 测点的扰动频率和能量逐渐增大,优势频率与上游压力总体上呈线性关系;上游压力对止水下表面的脉动荷载能量分布也有明显的影响,在上游压力较低时,随着压力增大, P_6 测点扰动频率和能量不断增大,但在压力增大到 20 m 水柱后,扰动频率主频不再增大,相对稳定。

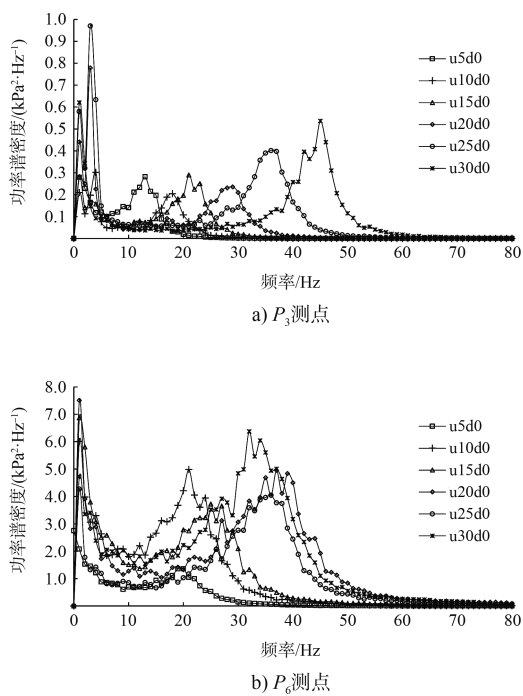


图 11 上游压力对脉动压力特性的影响

保持上游压力为 30 m 水柱不变, 下游压力不断增大, 探讨下游压力对止水表面脉动压力能量分布特征的影响。代表性测点 P_3 和 P_6 的功率谱密度曲线见 12。可以看出, 下游压力变化对止水上表面的脉动压力能量分布没有影响, 不同下游压力下 P_3 测点的功率谱密度曲线基本未变; 止水下表面测点 $P_5 \sim P_8$ 脉动压力功率谱密度曲线变化明显, 随着下游压力增大, 缝隙射流受下游顶托, 各测点脉动压力频带变宽, 扰动主频不断增大, 而能量总体呈减弱趋势。

上述分析可知, 下游压力对止水下表面的脉动压力能量分布影响较大, 扰动频率变化较为灵敏、变化范围较宽, 将影响止水的自激振动特性。

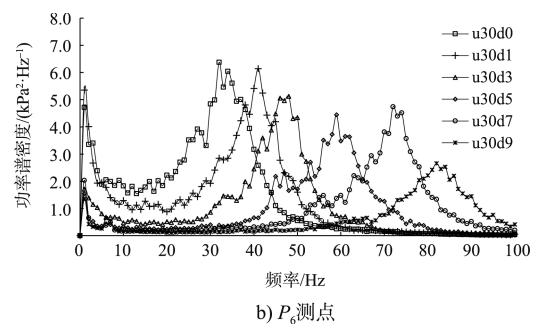
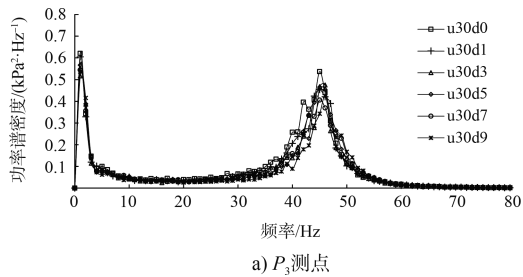


图 12 下游压力对脉动压力特性的影响

4 结论

- 1) 顶止水窄缝射流易发生空化, 空化特性受上下游压力影响较大, 上游压力决定空化条件, 下游压力影响空化气泡群溃灭范围, 射流空化是引起阀门开启初期冲击性振动的原因。
- 2) 顶止水表面时均压力分布表明, 止水上部受较大的正压压缩, 下部受负压拖拽, 引起止水向前下方发生较大变形, 止水下表面负压区范围主要受下游压力控制。
- 3) 窄缝射流空化在顶止水下表面产生频带较宽的高频压力脉动, 主频受上下游压力影响明显, 在 20~80 Hz 变化, 压力脉动易引起柔性止水大变形失稳, 产生自激振动。
- 4) 采取措施减小顶止水的动水荷载、改善受力状态是解决其频繁破坏问题的主要方向。

参考文献:

[1] 李家熹. 阀门止水装置可靠性与失效分析[J]. 水运工程, 1992(11): 33-36, 13.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 王晓辉, 王新, 张宏洋, 等. 船闸输水阀门顶止水自激振动切片试验研究[J]. 水力发电, 2020, 46(9): 111-114, 135.

[5] 魏述和, 王新. 高水头船闸阀门顶止水安装变形试验与数值模拟[J]. 水运工程, 2020, (3): 92-97, 120.

[6] 王新, 胡亚安, 严秀俊. 高水头阀门顶止水抗冲磨与变形特性试验[J]. 工程力学, 2018, 35(S1): 349-354.