

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.20180026

张柱, 赵伟, 崔少军, 等. 不同掺气条件下底板水流脉动压强特性研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 170-175. ZHANG Z, ZHAO W, CUI S J, et al. Fluctuating pressure characteristics of flow on flume bottom with different aeration conditions[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 170-175. (in Chinese)

不同掺气条件下底板水流脉动压强特性研究

张柱, 赵伟, 崔少军, 徐一民

(昆明理工大学 电力工程学院, 昆明 650000)

摘要: 针对水流掺气后对脉动压强特性的改变问题, 基于矩形陡槽水工模型试验结果, 分析了不同掺气设施及不同通气方式泄槽底板的脉动压力标准差沿程变化规律。分析结果表明, 自掺气底板水流脉动压强沿程变化平稳; 强迫掺气底板水流脉动压力明显增大, 并在水舌冲击区呈单峰规律; 单独底坎、单独侧坎和底侧联合坎三种掺气设施中, 单独侧坎掺气对底板水流脉动压强影响最小。另外同种掺气设施下, 增大流量、增大通气孔面积和采用分散进气方式都会增大泄槽底板的脉动压强。

关键词: 模型试验; 掺气坎; 底板; 脉动压强; 通气孔

中图分类号: TV 131 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)01-0170-06

Fluctuating pressure characteristics of flow on flume bottom with different aeration conditions

ZHANG Zhu, ZHAO Wei, CUI Shaojun, XU Yimin

(College of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Aiming at the change of pulsating pressure characteristics after aeration of water. Based on the test results of the rectangular chute hydraulic model, the variation laws of the standard deviation of pulsating pressure on the chute base slab of different gas-absorbing facilities and different ventilation methods is analyzed. The results show that, in the condition of self aeration, the fluctuation pressure of the bottom plate is smooth along the curve; Forced aeration water flow pulsating pressure increased significantly, especially in the impacted area was a single peak law. Three kinds of aeration facilities: only set the bottom aerator, only set the lateral aerator and the bottom aerator and the lateral aerator set at the same time, the effect of only set the lateral aeration on the pulsation of the bottom plate is the least. For the same bottom aerator, increasing the flow rate, increasing the vent area and decentralized vent holes will increase the pressure of the bottom chute.

Key words: model test; aerator; bottom plate; fluctuating pressure; ventilation hole

在国内外特别是我国西南地区众多的高水头、大单宽流量具有高速水流的泄水建筑物中, 通过对水体进行强迫掺气来防止空蚀破坏的工程方式已经变得十分常见^[1-5]。如二滩水电站泄洪洞、龙滩水电站溢洪道、小湾水电站泄洪洞、溪洛渡水电站泄洪洞等水利工程泄洪建筑物中均采用了相应的掺气设

施。掺气减蚀的水流特性比较复杂, 许多问题还有待深入研究。在强迫掺气水流的众多问题中, 掺气设施的掺气空腔长度、通气量的计算以及坎后掺气浓度的变化规律等问题的研究相对比较充分, 研究成果较为丰富^[6-10], 其中时启隧、潘水波^[11]、夏毓常^[12]、P. Rustschmann^[13]、倪汉根^[14]、徐一民^[15]等

收稿日期: 2017-09-22 修回日期: 2017-11-16 网络出版时间: 2018-01-15
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180115.1143.004.html>
基金项目: 国家自然科学基金项目(51269005)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51269005)

作者简介: 张柱(1992-), 男, 山西孝义人, 主要从事工程水力学研究。E-mail: roy3707@163.com

通讯作者: 赵伟(1971-), 男, 云南楚雄人, 工程师, 主要从事工程水力学研究。E-mail: 550705068@qq.com

学者均给出了相应的空腔长度计算公式,基本可以满足实践应用。N. Ldespinto 根据巴西福兹杜阿里亚溢洪道通气量的原型观测,得出通气量的经验公式^[16]。吕绪明、颜敏、南海龙等人对掺气坎后水流掺气浓度分布及掺气保护长度进行了研究得出掺气坎后水流掺气浓度沿程分布规律为先增大后减小,而在断面上的分布规律为由水流表面到水流底部逐渐减小^[17-18]。关于水流脉动压强特性的研究方面很多学者主要针对消力池底板、泄洪洞脉动压强特性进行分析:田嘉宁^[19]得出消力池底板脉动压强在冲击区达到最大,强度可达其相应时均压强的 80%,峰值动水压强与时均值的比值可达 5~8 倍。田静^[20]得出泄洪洞沿程脉动压力呈现正偏,幅值为脉动压力均方根的 3~4 倍。杨敏^[21]分析了弧形闸门开孔率与水垫塘底板脉动压强的关系。Aihara^[22]、杨庆^[23]、练继建^[24]等得出掺气坎后水舌冲击区和冲击区下游压力脉动强度分别为 (3.15~5.35)% 和 (0.2~2.0)%、脉动压力优势频率均小于 16 Hz、其概率密度分布均为正态分布。聂孟喜^[25]通过对突扩突跌体型的脉动压力的研究得出:侧墙冲击点处脉动压强偏离正态分布,底板脉压幅值是时均压力的 35%~50%,且水流冲击底板处,主频带窄,脉动压力强度大,时间积分比尺值和纵向积分长度比尺也较大。王红霄^[26]对陡槽掺气坎后脉动压力研究得出:在冲击区、反射区和稳定区,脉动压力的均方根值分别是同位置时均压力值的约 0.5~0.7 倍,且掺气设施后不同区域脉动压力的偏态系数和峰态系数显示脉动压力的分布有所不同,其中稳定区的脉动压力分布最接近于正态分布。同一流量下,冲击区脉动压力的主频率最高,稳定区的最低。但对掺气水流的脉动压力特性的研究还不够深入,资料也比较缺乏。掺气设施的布置,如底掺气、侧掺气、通气孔的进气面积及通气孔面积相同而进气方式不同时如何影响掺气水流的脉动压力特性都缺乏系统的深入研究。本文主要通过水力模型试验,对上述问题进行探讨,这将对进一步的了解掺气水流的脉动压力特性和更好地应用掺气减蚀技术有重要意义。

1 试验布置

试验模型见图 1。模型水槽为 45° 矩形陡槽,槽长 3.66 m,宽 20 cm,边壁高 20 cm。水槽流量用上游矩形薄壁堰控制。掺气减蚀设施采用底板掺气挑坎、侧墙掺气挑坎及底侧联合挑坎三种不同掺气设施。将 3 种不同类型的挑坎模型,置于有机玻璃水槽的上游段,底、侧掺气坎末端位置相同距陡槽进口

1.0 m 处,底侧联合坎则为上述两种掺气坎同时设置,设置位置不变。根据已有研究资料^[16-17]将底坎确定为坡比 $n_{底} = 1:5$,坎高 $\Delta_{底} = 3$ cm,侧坎确定为坡比 $n_{侧} = 1:60$,坎高 $\Delta_{侧} = 0.5$ cm。通气孔于坎后侧墙对称布置,分别设置面积相同的单孔和分散进气的多孔。测量时的坐标系见图 1。

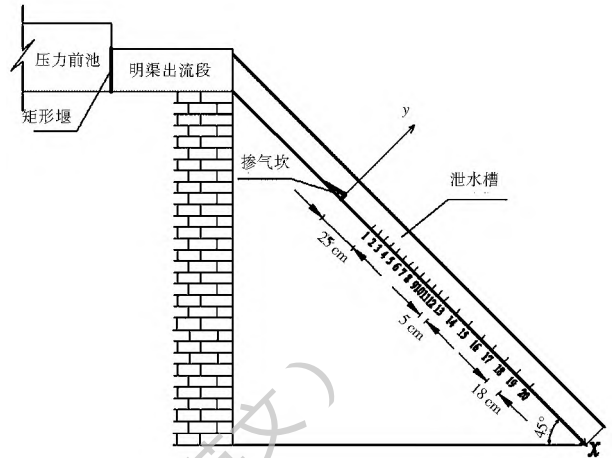


图 1 试验模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test model

本次试验采用 $Q = 30$ L/s、35 L/s、40 L/s、45 L/s、50 L/s 5 级流量进行试验。试验共设置测量水槽底板压力的断面 20 个,在掺气坎后 25 cm 处开始设置 1 号测量断面,其中 1 号至 13 号测量断面间距为 5 cm,13 号至 20 号测量断面间距为 10 cm。测压孔沿各断面底板轴线布置。

2 试验结果及分析

2.1 掺气坎后流区划分

根据掺气设施后水流流态的变化,将坎后水流沿流程依次划分为四个区域:空腔区、冲击区、反射区、稳定区。其中空腔区位于水流经掺气设施挑射作用后,主流脱离底板的区域,冲击区位于射流水舌落点附近,在此区域水流紊动剧烈,掺气浓度变化明显。冲击区后为反射区。反射区之后水流趋于稳定,强迫掺气进入水流的空气沿程逐渐溢出,该区域越到下游越以自掺气为主,称为稳定区。根据试验实测数据,本试验各级流量下掺气坎后不同流区范围见表 1。

表 1 掺气坎后水流流态区域划分

Tab. 1 Flow regimes after the aerator

掺气形式	空腔区	冲击区	反射区	稳定区	备注
自然掺气	/	/	/	≥ 90	无掺气坎
底坎掺气	0~60	65~95	105~125	≥ 135	只有底坎
侧坎掺气	0~60	65~95	105~125	≥ 135	只有侧坎
联合掺气	0~70	75~115	125~135	≥ 145	同时有底侧坎

2.2 掺气坎型式对脉动压强的影响

试验中脉动压强通过 CY200 型高精度智能压力传感器采集。对脉动压强的特性研究主要通过脉动压强的均方根值(或标准差) σ 来进行:

$$\text{标准差: } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (p'_i - p)^2}{N}} \quad (1)$$

式中: p'_i 为瞬时脉动压强, 时均值 $p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p'_i$; N 为测量时段内的采样个数。

试验过程中在保证其他试验条件不变的前提下, 分别采用自然掺气、底坎、侧坎、底侧联合坎四种不同的掺气形式进行试验。其中单独底坎和底侧联合坎时, 在底坎后水槽左右侧边墙各布置一个半径 $r = 7.5 \text{ mm}$ 的通气孔。流量为 40 L/s 时, 四种不同掺气形式坎后底板脉动压强的标准差 σ 值沿程变化的实测值见图 2。

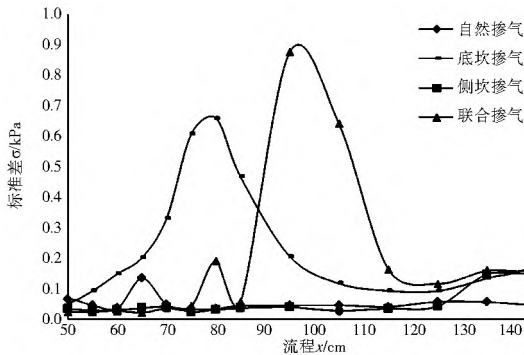


图 2 不同掺气形式下底板脉动压力标准差沿程变化

Fig. 2 σ on flume bottom along flow course under different aeration forms

试验结果显示: 各种掺气条件下底板脉动压强沿程变化规律性明显不同。单独自然掺气情况下, 脉动压强 σ 值沿程变化相对稳定, 且数值较小, 整个流程脉动压强标准差均在 $0.032 \sim 0.133 \text{ kPa}$ 范围内波动。

单独侧坎掺气时, 脉动压强标准差 σ 值在整个流程内的变化范围为 $0.019 \sim 0.314 \text{ kPa}$, 同流程变化程度与自然掺气情况下的水流脉动情况相似。当进入稳定区后, 由于侧坎掺气造成水流侧向紊动已经随流程的增大进一步引起水体整体的紊动, 所以稳定区的脉动压强 σ 值有所增大, 其变化趋势与底坎掺气、底侧联合掺气情况下此区域的脉动压强 σ 值变化趋势具有良好的一致性。

底坎掺气情况下, 脉动压强 σ 值在空腔区变化情况与自然掺气情况下同流程相比, 在流程 $\leq 50 \text{ cm}$ 范围内, 要稍微稳定一些, 这是由于水流由于底坎挑射作用并未与底板直接接触, 底板受水流脉动影响程度较小, 底板的脉动压强 σ 值基本稳定在 0.051

kPa 以下。之后脉动压强 σ 值逐渐增大, 进入冲击区后, 水流直接冲击底板引起剧烈紊动, 而且掺入的空气由于冲击作用随水流不断地迁移扩散进一步加剧了水流的紊动, 使水流脉动压强 σ 值在冲击区呈现单峰现象。水流进入反射区逐渐趋于稳定, 强迫掺气沿程逐渐溢出, 水流紊动强度逐渐降低, 底板脉动压强 σ 值逐渐减至最小。在水流稳定区水流掺气形式主要转化为自掺气, 水流旋滚并不剧烈, 但由于反射区水舌二次跌落冲击泄槽底板, 形成了底板脉动压强 σ 值一定程度的再次增大的趋势。

底侧联合掺气情况下, 底板脉动压强 σ 值沿程变化情况与底坎掺气变化情况基本相同。由于底侧联合掺气情况下对水流的挑射作用更加明显, 空腔区范围更长, 水流脉动压强开始增大的位置也相应出现在流程 75 cm 处, 冲击区水流脉动压强标准差的最大值也由于相较底坎掺气水流紊动更加强烈而有所增大。

2.3 流量变化对脉动压强的影响

在单独设置底坎掺气坎, 左右侧边墙各布置一个半径 $r = 7.5 \text{ mm}$ 的通气孔的条件下, 流量 $Q = 30 \sim 50 \text{ L/s}$ 时, 泄槽底板脉动压强标准差 σ 沿流程分布的实测值见图 3。

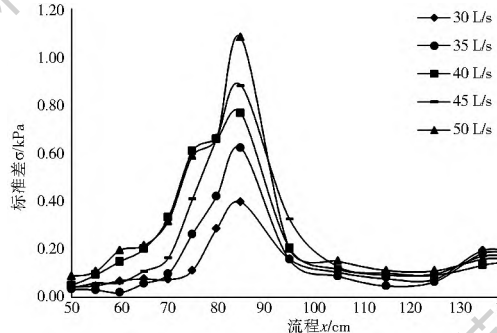


图 3 不同流量下底板脉动压力标准差沿程变化

Fig. 3 σ on flume bottom along flow course under different flow rates

试验结果表明, 不同流量下底板的脉动压强标准差 σ 值沿程变化趋势基本是一致的。冲击区, 水流呈一定角度冲击底板, 引起与底板接触的水流发生强烈紊动, 直接导致了 σ 值的迅速增大, 在流程 $80 \sim 85 \text{ cm}$ 处达到最大值, 此后又迅速衰减。水流反射区水流经反射后有脱离底板运动的趋势, 与底板相互作用并不强烈, 因此脉动压强整体又恢复平稳状态。在水流稳定区强迫掺气效果已经不再明显, 水体掺气更主要的是来自于水体自身紊动裹挟作用造成的自然掺气。此区域由于泄槽陡坡作用水体进入稳定区时形成二次跌落, 与底板再次直接作用引起水体紊动增强, 导致底板脉动压强再次增大, 体现为脉动压强 σ 值沿程再次上升。

随着流量的增加,水流速度有所增加,紊动更加强烈,同位置底板脉动压强 σ 值要更高,底板沿程所受的脉动压强 σ 值也分别依次增大。流量增大导致水深增大,水体受重力作用影响明显,主流冲击底板位置提前,使脉动压强 σ 值在进入冲击区范围后迅速增大,在图中体现为流量越大脉动压强 σ 值开始增大的趋势出现的越提前。总体来说,流量与脉动压强标准差成正相关,但随着流量的不断增大脉动压强标准差增大的趋势减缓。

3.4 通气孔面积对脉动压强的影响

强迫掺气必须要保证有足够的通气量,使水体维持较高的掺气浓度,由于通气孔面积的大小直接对通气量的多少造成影响,而通气量的变化又将造成水体脉动特性不同。为了探究通气孔面积的变化对水流脉动压力的影响,单独底掺气坎时选取三种不同的通气孔面积在同一流量 $Q=30\text{ L/s}$ 时进行掺气试验,具体通气孔关系见表3。该三种不同通气孔面积下以及不设通气孔时泄槽底板的脉动压强 σ 值沿程变化的实测结果见图4。

表3 通气孔布置(a)

Tab.3 Layout of the ventilation holes (a)

通气孔类型	通气孔半径/mm	单侧数	双侧总数量/个	单侧总面积/cm ²	位置
A	7.5	1	2	177.6	侧壁坎
B	5.3	1	2	88.3	后对称位置
C	4.3	1	2	58.9	

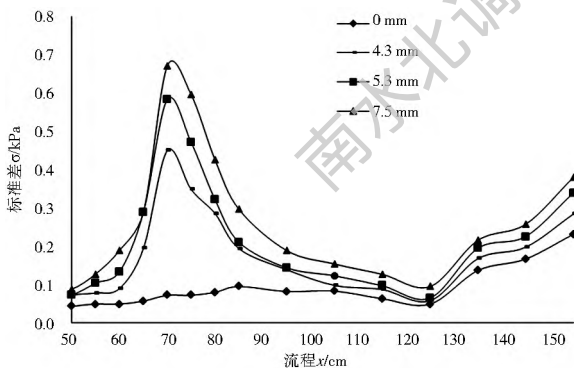


图4 不同通气孔面积下底板脉动压力标准差沿程变化

Fig.4 σ on flume bottom along flow course under different ventilation area

试验结果显示,底坎掺气条件下,不设通气孔时,底板脉动压强 σ 值沿程变化幅度不大,均处于0~0.1 kPa之间,相比设通气孔时底板脉动压强 σ 值处于较低水平,说明水流是否掺气对脉动压力的影响很大,且通气孔面积的大小影响掺气浓度从而影响脉动压力;不同通气孔面积下底板脉动压强 σ 值沿程变化趋势一致,均呈单峰且在冲击区达到最大值;随通气孔

面积增大泄槽底板的脉动压强 σ 值也增大,说明通气孔面积的增加使通气量的增大加剧了水体紊动,表现为底板脉动压强标准差随之增大。

3.5 集中通气与分散通气对脉动压强的影响

为了探究通气孔面积相同时,采用集中通气和分散通气对掺气水流脉动压力的影响,选择单独设置掺气底坎,表4所示A、B、C三种不同通气孔方式在相同流量 $Q=35\text{ L/s}$ 时进行试验。三种不同通气孔布置条件下的泄槽底板的脉动压强 σ 值沿程变化关系见图5。

表4 通气孔布置(b)

Tab.4 Layout of the ventilation holes (b)

通气孔类型	通气孔半径/mm	单侧数	双侧总数量/个	单侧总面积/cm ²	位置
A	7.5	1	2	177.6	侧壁坎
B	5.3	2	4	177.6	后对称位置
C	4.3	3	6	177.6	

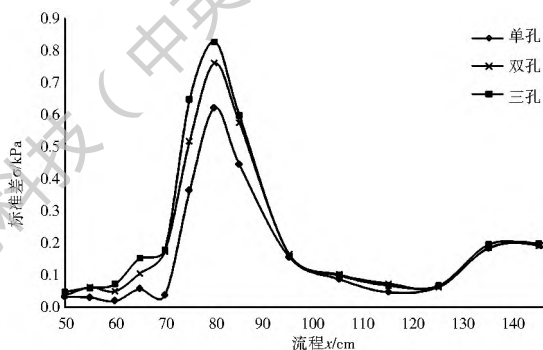


图5 不同通气孔个数下底板脉动压力标准差沿程变化

Fig.5 σ on flume bottom along flow course under different ventilation hole numbers

试验结果显示:在相同通气孔面积情况下,改变通气孔布置方式同样可以对水流脉动压力造成影响,但对于脉动压力沿程的变化趋势并不会引起变化,脉动压强标准差 σ 在底板上仍然呈现出单峰规律。通气孔孔数增加,会引起水流脉动压力变化增大,水流紊动增强,这种变化尤其是在冲击区更为明显,流程 $x=85\text{ cm}$ 处,采用单孔、双孔和三孔通气孔形式时,测得泄槽底板脉动压强 σ 值分别为0.621 kPa、0.761 kPa;和0.828 kPa。在保证通气孔面积不变的情况下,通气孔布置越分散,对冲击区水流脉动压强的影响越明显,脉动压强的标准差峰值越高。

3 结论

通过对泄槽底板水流脉动压强的研究分析,可以得出以下结论。不同掺气形式因影响水流掺气浓

度和流态从而影响泄槽底板的脉动压强。自掺气时,水流作用于泄槽底板的脉动压强数值最小,且沿程波动幅度也最小。增加强迫掺气设施后,水流掺气浓度增大,局部流态也有所变化,使得掺气坎后底板的脉动压强明显增大,特别是在冲击区附近影响最为明显。其中,单独底坎和底侧联合坎对底板脉动压力的影响大于单独侧坎时对底板脉动压力的影响。单独底坎时流量变化也对底板脉动压强产生影响,在试验范围内底板脉动压强随流量增加而增大。掺气设施不同的掺气量和不同的进气方式也对泄槽底板脉动压强产生影响,表现为增大通气孔面积和相同通气孔面积时分散进气方式都会增大泄槽底板的脉动压强。

参考文献(References):

- [1] 冯永祥. 二滩水电站泄洪洞侧墙掺气减蚀研究[D]. 天津: 天津大学, 2008. (FENG Y X. Study on aeration and erosion reduction of side wall of spillway tunnel of Ertan hydropower station [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese)) DOI: 10.7666/d.y1518014.
- [2] 陈剑刚, 张建民, 许唯临. 前置掺气坎式阶梯溢洪道体型特点及工程应用试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010(6): 6-11. (CHEN J G, ZHANG J M, XU W L. Practical engineering application and hydraulic characteristics of the flow in stepped spillway with pre-aerator slot [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010(6): 6-11. (in Chinese)) DOI: 10.15961/j.jsuese.2010.06.019.
- [3] 王海云, 戴光清, 刘超, 等. 泄水建筑物反弧末端掺气坎的布置研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010(2): 9-14. (WANG H Y, DAI G Q, LIU C, et al. Study on Aerator Arrangement of Concave Reach Bottom of Discharge Structures [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010(2): 9-14. (in Chinese)) DOI: 10.15961/j.jsuese.2010.02.014.
- [4] 高学平, 贾来飞. 溢洪道掺气坎槽后掺气水流三维数值模拟研究[J]. 水力发电学报, 2014, 33(2): 90-96. (GAO X P, JIA L F. Three-dimensional numerical simulation of aerated flow downstream of aeration slot in spillway [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(2): 90-96. (in Chinese)) DOI: 10.15961/j.jsuese.2010.02.014.
- [5] 戴晓兵, 李延农. 分散通气式掺气设施[J]. 水力发电, 2013, 39(11): 66-68. (DAI X B, LI Y N. Scattered Vent Aerators [J]. Water Power, 2013, 39(11): 66-68. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2013.11.018.
- [6] 王海云, 戴光清, 张建民. 高水头泄水建筑物掺气设施研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(4): 46-48. (WANG H Y, DAI G Q, ZHANG J M. Summary of Research on Aeration Facilities of High Head Discharge Building [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2004, 24(4): 46-48. (in Chinese)) DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2004.04.015.
- [7] 肖兴斌. 岸边溢洪道掺气减蚀设施设计研究与实践综述[J]. 水电工程研究, 2000, (2): 28-39. (XIAO X B. Design and Practice Summary of aeration and erosion prevention facilities for shore spillway [J]. Hydropower Engineering Research, 2000, (2): 28-39. (in Chinese))
- [8] 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, 30(B06): 329-332. (ZHANG L C, LUO S Z, WANG X. Experimental study of air entainment to alleviate cavitations for chute with high speed discharge [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30 (B06): 329-332. (in Chinese)) DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.04.S018.
- [9] 刘斌, 邓军. 掺气对明渠流速分布影响的试验研究[J]. 人民黄河, 2009, 31(9): 102-103. (LIU B, DENG J. Experimental study on the effect of aeration on flow velocity distribution in open channel [J]. Yellow River, 2009, 31(9): 102-103. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2009.09.046
- [10] 张法星, 许唯临, 朱雅琴. 明渠自掺气水流气泡形成过程的试验研究[J]. 水利学报, 2010, (3): 343-347. (ZHANG F X, XU W L, ZHU Y Q. Experimental study on formation of air bubbles in self-aerated open channel flows [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, (3): 343-347. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2010.03.011.
- [11] 时启燧, 潘水波, 邵英英, 等. 通气减蚀挑坎水力学问题的试验研究[J]. 水利学报, 1983(3): 1-13. (SHI Q S, PAN S B, SHAO Y Y, et al. Experimental investigation of flow aeration prevention of cavitation erosion by a deflector [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1983 (3): 1-13. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.1983.03.001.
- [12] 夏毓常. 通气减蚀设施通气量研究报告[R]. 水电部天津勘测设计院, 1984. (XIA Y C. Study on ventilation of ventilation and erosion reduction facilities [R]. Tianjin Investigation and Design Institute, Ministry of Water Conservancy, 1984. (in Chinese))
- [13] RUTSCHMANN P, HAGER W H. Design and performance of spillway chute aerators [J]. International Water Power and Dam Construction, 1990(1).
- [14] 倪汉根. 掺气减蚀机制的探讨与空腔长度的估计[J]. 泄水工程与高速水流, 1993(2): 1-8. (NI H G. Discussion on aeration mechanism and estimation of cavity length [J]. Drainage Works and High Speed Water Flow, 1993(2): 1-8. (in Chinese))
- [15] 徐一民, 王伟. 掺气坎(槽)射流空腔长度的计算[J]. 水利水电技术, 2004, 35(10): 7-9. (XU Y M, WANG W. Calculation of the cavity length of jet flow from chute aerators [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, 35(10): 7-9. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0860.2004.10.003.
- [16] 魏柳, 杨庆, 戴光清, 等. 掺气挑坎通气量试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015(S1): 18-23, 64. (WEI L, YANG Q, DAI G Q, et al. Experimental study on ventilation volume of the flip bucket [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2015(S1): 18-23, 64. (in Chinese)) DOI: 10.15961/j.jsuese.2015.s1.004.
- [17] 南海龙, 徐一民. 掺气坎后水流掺气浓度分布及掺气保护长度试验研究[J]. 水电能源科学, 2015, 33(1): 173-176. (NAN H

- L, XU Y M. Experimental study on air concentration in flow along chute and length of protective segment[J]. *Water Resources and Power*, 2015, 33(1): 173-176. (in Chinese)
- [18] 颜敏, 徐一民. 挑流反弧段水流掺气浓度的试验研究[J]. *水利水电技术*, 2015, 46(3): 105-109. (YAN M, XU Y M. Experimental study on air concentration in flow over flip bucket[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2015, 46(3): 105-109. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0860.2015.03.025.
- [19] 田嘉宁, 赵庆, 范留明. 台阶式溢流坝后消力池压强特性[J]. *水力发电学报*, 2012, 31(4): 113-118, 124. (TIAN J N, ZHAO Q, FAN L M. Pressure characteristics in stilling basin of stepped spillways[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, 31(4): 113-118, 124. (in Chinese))
- [20] 田静, 罗全胜, 杨香云, 等. 溪洛渡水电站泄洪洞脉动特性试验研究[J]. *中国农村水利水电*, 2009(8): 144-147. (TIAN J, LUO Q S, YANG X Y. Experimental research on pulsation pressure of spillway tunnels in the Xiluodu Hydropower Station[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2009(8): 144-147. (in Chinese))
- [21] 杨敏, 李树宁. 平底水垫塘透水底板下表面脉动压力试验研究[J]. *水利学报*, 2011, 42(11): 1368-1371. (Yang M, Li S N. Experimental investigation of fluctuating pressure acting on the under surface of pervious slabs inflat bottom plunge pool[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(11): 1368-1371. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2011.11.016.
- [22] AIHARA Y. Formation of longitudinal vortices in the sublayer due to boundary-layer turbulence[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1990, 214: 111. DOI: 10.1017/S0022112090000076
- [23] 杨庆, 张建民, 戴光清, 等. 脉动压力对空化的影响[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2004, 36(4): 19-21. (YANG Q, ZHANG J M, DAI G Q. Effects of fluctuation pressure on cavitation[J]. *Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition)*, 2004, 36(4): 19-21. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1009-3087.2004.04.005.
- [24] 练继建, 王继敏, 辜晋德. 水跃区水流脉动压力频谱相似律研究[J]. *科学通报*, 2007, 52(15): 1832-1839. (LIAN J J, WANG J M, GU J D. Study on similarity law of flow pressure spectrum in water jump area[J]. *Chinese science bulletin*, 2007, 52(15): 1832-1839. (in Chinese)) (in Chinese) DOI: 10.3321/j.issn:0023-074x.2007.15.018.
- [25] 聂孟喜, 李琳琳, 段冰等. 突扩突跌布置侧墙及底板脉动压力特征分析[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2007, 47(3): 331-334, 339. (NIE M X, LI L L, DU AN B, et al. Fluctuant characteristics analysis of sidewall and bottom behind sudden lateral enlargement and vertical drop form[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2007, 47(3): 331-334, 339. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-0054.2007.03.008.
- [26] 王红霄, 杨红宣, 等. 突扩突跌掺气设施后泄槽底板脉动压力试验研究[J]. *水利水电技术*, 2017, 48(9): 144-149. (WANG H X, YANG H X. Experimental study on the pulsating pressure behind sudden lateral enlargement and vertical drop form[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2017, 48(9): 144-149. (in Chinese))

(上接第 169 页)

- [23] 陈妮, 陈大宏. 溢流堰过堰流动的数值计算[J]. *人民长江*, 2005, 36(1): 40-41, 46. (CHEN W, CHEN D H. Numerical computation of water flow across overflow weir. *Yangtze River*, 2005, 36(1): 40-41, 46. (in Chinese))
- [24] 李珊珊, 李国栋, 苗洲, 等. 琴键堰不同堰高泄流特性的数值模拟[J]. *水利水电技术*, 2016(5): 60-64. (LI S S, LI G D, MIAO Z, et al. Numerical simulation study on discharge characteristics of piano key weir with various heights[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2016(5): 60-64. (in Chinese))
- [25] 魏文礼, 戴会超. 紊流模型理论及工程应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2006. (WEI W L, DAI H C. Turbulence model theory and engineering application[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2006. (in Chinese))