

# 挑流水垫塘掺气比尺效应试验

辜晋德, 赵建钧, 安建峰

(南京水利科学研究院水工水力学研究所, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 为了研究泄洪消能缩尺模型中的掺气比尺效应, 以提高模型预测精度, 通过模型试验, 对比分析 1 : 50 和 1 : 100 两个不同比尺模型上的挑流水舌形态及下游水垫塘内掺气量(体积分数, 下同)分布。试验结果表明, 在同样的孔口体型作用下, 不同比尺模型水舌空中裂散程度有明显差异, 1 : 100 模型中水舌呈月牙形散落在水垫塘, 1 : 50 模型水舌呈椭圆形散落在水垫塘; 水舌入水形态的差异进一步导致水垫塘掺气量分布不同, 1 : 100 模型水舌入射区域掺气量相对较高, 掺气量峰值约为 50%, 1 : 50 模型上同样位置掺气量峰值约为 40%; 从水垫塘内掺气量空间分布来看, 1 : 100 模型水垫塘横向掺气范围相对较小, 纵向掺气范围相对较大。

**关键词:** 掺气射流; 水垫塘; 掺气量; 比尺效应; 模型试验

中图分类号: TV131.6

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2019)02-0061-05

**Experimental study on scale effect of a aerated jet in a plunge pool**//GU Jinde, ZHAO Jianjun, AN Jianfeng  
(Hydraulic Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** In order to study the scale effect of aeration in a scaled model of flood discharge and energy dissipation, as well as to get more accurate test data, the shape of the air jet and the aeration quantity (volume fraction) in a plunge pool with hydraulic models of scale 1 : 100 and 1 : 50 are studied and compared. The experimental results show that the air jet diffusion in different scaled models is very different from each other, although with the similar orifice shape. The air jet scatters into the plunge pool in an arc shape for the 1 : 100 model while it scatters in an ellipse shape for the 1 : 50 model. Differences of the air jet patterns further lead to different air entrainment quantity in the plunge pool. The air entrainment quantity in the jet impact area for the 1 : 100 model is higher than that of 1 : 50 model, and the peak air entrainment quantity is about 50% for the former while it is about 40% for the latter. Comparison of the spatial distribution of the air entrainment quantity in the plunge pool shows that aeration of 1 : 100 model has a relatively smaller lateral distribution and a relatively larger vertical distribution.

**Key words:** aerated jet; plunge pool; aeration concentration; scale effect; model test

挑流消能是高拱坝工程中最常见的消能方式, 由于紊流问题的复杂性, 目前常规研究手段是根据弗劳德相似准则建立缩尺物理模型, 并对水垫塘动水荷载进行测量, 根据测试结果计算原型的动水荷载, 从而指导工程实践。在这个过程中, 往往将水流掺气问题作为次要因素忽略, 然而水流流速达到一定程度之后, 自身裂散导致掺气现象十分严重<sup>[1-3]</sup>。早在 20 世纪 50 年代, 萧兴斌<sup>[4]</sup>就指出常规泄洪枢纽水工模型比尺约为 1 : 80 ~ 1 : 100, 模型水舌流速约为 3 ~ 4 m/s, 未达到水流自掺气的临界流速, 导致模型掺气情况不符合弗劳德相似准则; 董志勇等<sup>[5-6]</sup>的研究表明, 水流掺气对动水冲击压力及脉动压力均有不同程度的影响。因此, 研究挑流水舌作

用下水垫塘掺气量(体积分数, 下同)分布规律及模型比尺效应, 对于更为准确的预测原型水垫塘的动水荷载具有重要的意义。国内外专家学者通过水工模型试验对工程上常见的挑流<sup>[7]</sup>、底流<sup>[8-9]</sup>、淹没射流<sup>[10-11]</sup>、坝面溢流<sup>[12]</sup>、挑坎后掺气水流<sup>[13-15]</sup>等典型流态的掺气现象进行了研究, 得出了水流掺气的基本结构。Canepa 等<sup>[16-18]</sup>通过试验研究了水垫塘内的掺气量分布; 也有学者尝试通过数学模型计算水流的掺气效应<sup>[19-20]</sup>。关于模型中水流掺气的比尺效应, 谢省宗等<sup>[21]</sup>认为气泡上浮速度不相似是陡槽水流掺气量不相似的主要原因; 孙建等<sup>[22]</sup>通过水流运动基本方程的推导及试验验证, 探讨了水垫塘底板动水压强的缩尺效应。

挑流水垫塘内的气体主要来源于两部分,一为水舌在空中抛射过程中的自身裂散掺入的气体,二为水舌入水时在水气交界面上的强剪切作用带入的气体。两种作用均与水舌的绝对流速相关,从而决定了模型水垫塘内掺气量具有缩尺效应。本文通过某高拱坝的泄洪枢纽缩尺模型,使用采样分析法获取单股水舌入射区及水垫塘内的掺气量分布规律,并对不同比尺模型的试验数据进行比较,探讨挑流水垫塘掺气的缩尺效应。

## 1 试验模型及量测方法

某在建高拱坝坝高 289 m,坝身为双曲拱坝,其泄洪枢纽布置有 6 个表孔和 7 个深孔,其中深孔呈 V 字形布置,深孔出口挑角从中间向两侧依次减小。水垫塘底板高程为 560 m,二道坝轴线距离坝轴线 400 m,二道坝顶高程为 602 m。本次试验研究对象为中间深孔,其挑角为 20°,出口高程为 724 m,出于消能方面考虑,深孔出口体型采用最典型的底部上翘、顶部下压的体型,以促进水流横向扩散。底部水垫塘为反拱型水垫塘。根据工程参数分别建立 1:100 及 1:50 水工模型,模型主要由进水水箱、泄洪孔口及下游水垫塘组成,模型水垫塘采用透明有机玻璃制作,以便于对水流流态进行观测,模型概况如图 1 所示。

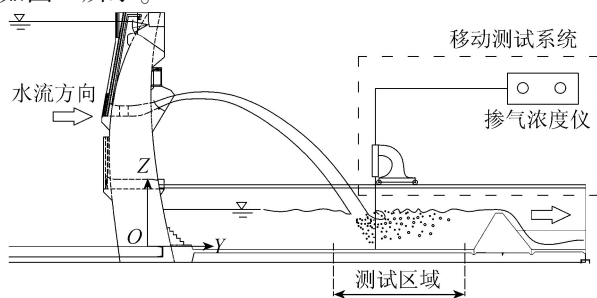


图 1 模型示意图

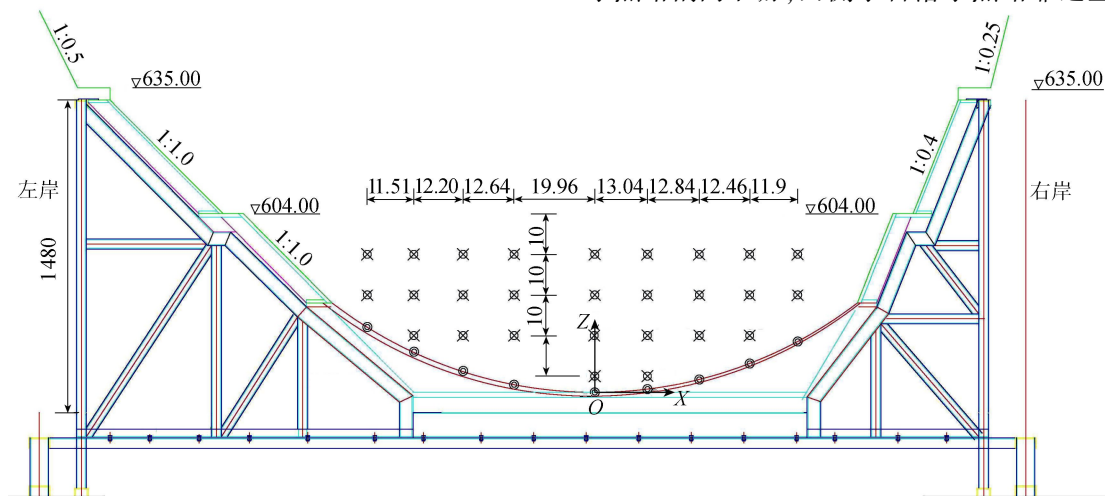


图 2 水垫塘断面测点布置(尺寸单位:cm,高程单位:m)

为了测试水垫塘内的空间掺气分布形式,在模型上沿断面搭建可移动框架,在断面上布置若干测点对水体中的掺气量进行测量,断面测点布置见图 2 所示。采用中国水科院研制的 CQ6-2005 型掺气浓度仪测量水垫塘断面掺气量。对于淹没射流区域的掺气量的测量,为了尽量避免两侧仪器对射流流态的干扰,采用如下方式进行测量:将直径 2 mm 的空心探针放置于待测位置,调节可变体积的集气筒使收集装置内形成负压,测点处的水气混合物通过探针进入收集装置,通过计算收集装置内的压力及空气体积变化可计算出水气混合物中的水和气体体积,掺气量由  $\varphi = V_a / (V_a + V_w)$  计算,其中  $V_a$  为正常大气压的空气体积,  $V_w$  为水体积。试验过程采用旋桨流速仪测量水舌入水流速。

为了便于数据比较,模型试验数据中的水位、流量、流速及桩号高程等相关变量均按照弗劳德相似准则换算到原型,但掺气量数据不做换算。试验相关参数见表 1 所示。

表 1 模型试验相关参数

模型比尺	流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	出口流速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	泄洪水头/m	上下游水位差/m	弗劳德数	雷诺数
1:1	1665.30	37.80	101.00	222.00	4.3	302779221
1:50	0.09	5.35	2.02	4.44	4.3	856389
1:100	0.02	3.78	1.01	2.22	4.3	302779

## 2 试验结果及其分析

### 2.1 水舌入水形态

试验过程中可以观测到,在深孔出口“下压上翘”体型的作用下,出口水舌向空中挑起时,受到纵向压缩而产生横向加速度,水舌在最高点呈扁平状,并在空中横向扩散。在 1:100 模型上可以观测到,水舌跌落水垫塘时呈月牙形分布,其中水舌中部落水点略偏向下游,两侧水舌落水点略靠近上游。落

水点下游一定范围内出现类似水跃的表面旋滚,水流波动剧烈;落水点下游大范围内有气泡涌出,气泡量随着与水舌落水点距离的增大而逐渐减小。从水垫塘底部可以观测到水舌落水月牙形区域内产生大量絮状气泡群。由于气泡密度远低于水的密度,气泡在下潜过程中速度急剧降低,然后转为上浮至水面并破裂逸散,因此可以观察到气泡量随水深增加明显减小(图3)。在1:50模型上观测到,水舌在起挑至最高点时形态与1:100模型上基本一致,但在水舌达到最高点后开始出现边缘裂散,水舌落水区域边界较为模糊,目测近似椭圆状,而非1:100模型上观测到的月牙形。同样的从水垫塘底部可以看到柱状气泡群在落水区域产生,水垫塘内气泡分布现象大致与1:100模型水垫塘内的相同。

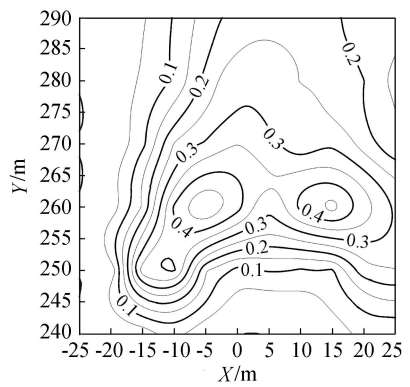


图3 挑流水垫塘掺气现象

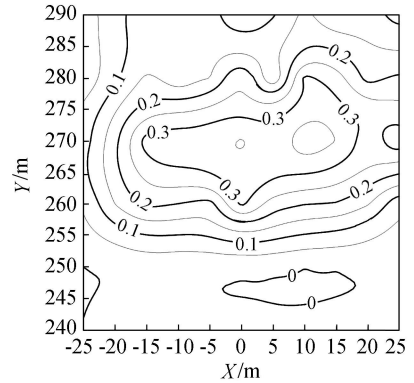
测试得到1:100模型水舌入水流速为5.3 m/s(按弗劳德相似准则相当于原型值为53 m/s);1:50模型水舌入水流速为6.9 m/s(相当于原型值为49.3 m/s)。不同比尺模型水舌入水流速存在差异,按照相似准则换算,1:100模型对应的原型流速略大。水舌形态观测结果表明1:50模型水舌裂散程度高于1:100模型水舌裂散程度。

## 2.2 冲击区水体掺气量

为了表述方便,平面上建立坐标系,以坝轴线与水垫塘中心线的交点为原点,沿坝轴线方向为X轴,沿桩号纵向为Y轴,试验观测到水舌落水区域大致在 $X = -20 \sim 20$  m,  $Y = 250 \sim 270$  m范围内。对水舌落水区域平面掺气量分布情况进行测试时,为了避免水面波动的影响,测试高程为595 m,测试结果见图4所示。从图4中可以看出,1:100模型上掺气量分布形式与1:50模型上有明显不同,1:100模型上水舌落水区域掺气量分布呈三角形, $X = -5$  m处和 $X = 15$  m处(对应水舌左右两侧)出现掺气量峰值。这是由于入水水舌呈月牙形分布,掺气源始于月牙形水气交界面,水舌两侧入水角度略大,由此位置产生的气泡群入水深度略深,在平面分布图上能看到明显两处峰值。1:50模型上实测掺气量分布呈扁平椭圆形状,分布相对较为均匀,水舌区域以外掺气量逐渐降低。从分布形式来看,1:100模型上



(a) 1:100模型



(b) 1:50模型

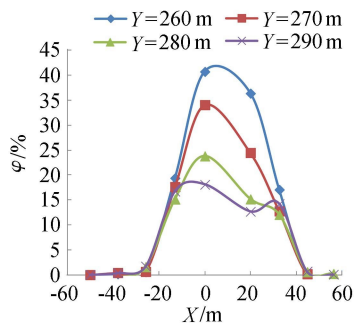
图4 不同比尺模型的水舌落水区域掺气量等值线

掺气量分布相对集中,1:50模型上掺气量分布相对分散;从峰值上看,1:100模型峰值点较为明显,实测掺气量峰值约为50%,而1:50模型上实测掺气量峰值略低,约为40%。

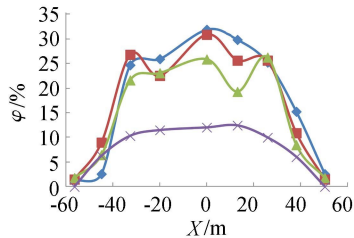
从试验结果来看,水舌入水形态直接决定掺气量分布形态。1:100模型上水舌入水形态呈月牙形,其掺气量平面分布呈现三角形;1:50模型上水舌由于空中裂散,入水时呈现扁平状,其掺气量分布形式呈扁平柱状。虽然1:50模型水舌入水时携气量较大,但是水中掺气量并没有明显高于1:100模型。由此可见挑流水舌与水面剪切作用带入的空气是水垫塘掺气的主要来源,当水舌分散时,裂散水舌缝隙中携带的气体并不能被带入水垫塘内,而是在水气交界面附近快速逸散,水舌的分散反而会降低与水垫塘内水体的剪切作用,从而导致交界面上掺气量下降,因此1:50模型的掺气量反而略低于1:100模型。

## 2.3 水垫塘内水体掺气量

试验对水垫塘内掺气量分布进行了测试,选取测试高程为 $Z = 590$  m,测试结果见图5所示。从图5中可以看出,由于水舌落水点位于水垫塘中心位置,水垫塘内掺气量呈现中间较高,两侧逐渐降低的分布形式,同时随着与落水点距离的增加,掺气量逐渐降低。从具体分布情况来看,1:100模型上掺气量分布类似高斯分布,中间高两侧低,在 $Y = 260$  m处,水垫塘中心掺气量约为40%,向两侧逐渐降低,



(a) 1:100模型



(b) 1:50模型

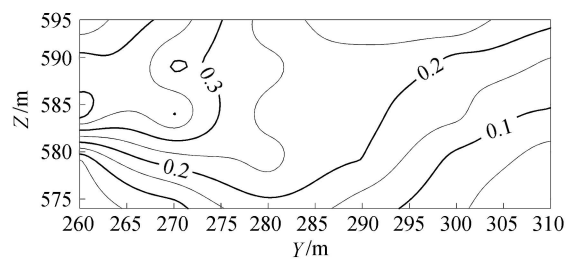
图5 不同比尺模型的水垫塘掺气量平面分布

若以掺气量5%作为掺气边界,则1:100模型上掺气范围约在 $X=-20\sim 40\text{ m}$ 之间;1:50模型上实测掺气量分布峰值较低,在 $Y=260\text{ m}$ 处,水垫塘中心掺气量约为30%,掺气范围大约在 $X=-40\sim 40\text{ m}$ 之间,且在 $Y=260\sim 280\text{ m}$ 之间掺气量分布均较为接近。结合水舌冲击区掺气量分布图(图4),可以看出水舌落水形态不同导致掺气影响范围及分布形式都有不同。1:100模型上水舌较为集中,冲击区掺气量峰值较高,但掺气范围较小;1:50模型上水舌较为分散,冲击区掺气量峰值略小,但是掺气范围较大。

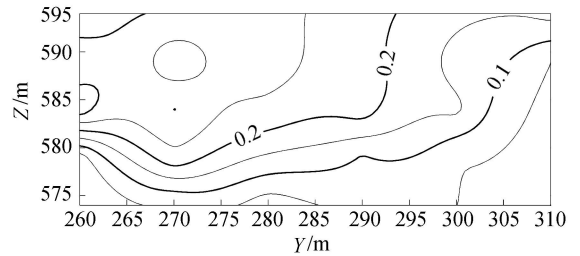
由于气泡自身上浮运动的特性,水垫塘垂向上总体掺气量分布趋势是随着水深的增大逐渐降低,但由于入射水流的作用,气泡群会在射流流速带动下下潜至深处,导致局部掺气量较大。水垫塘中心剖面上掺气量分布如图6所示。对比1:100模型及1:50模型上的测试结果,可以发现两个比尺模型上测试所得掺气量分布形式大致相同,但在1:100模型上,射流核心区域掺气量等值线明显沿着射流方向向水垫塘底部延伸,掺气量25%等值线在 $Y=280\text{ m}$ 处可以延伸至 $Z=580\text{ m}$ 高程,而在1:50模型上未发现等值线明显向下延伸。从等值线的影响范围来看,1:100模型掺气量等值线影响范围略大。气泡下潜的主要影响因素是入射流速的大小,结合入水流速的测试结果,可以得出1:100模型水舌入水流速相对较大是造成掺气量垂向影响范围大的主要原因。

### 3 结论

根据弗劳德相似准则建立1:100及1:50两个不同比尺模型,通过对这两个模型挑流水舌形态



(a) 1:100模型



(b) 1:50模型

图6 不同比尺模型的水垫塘中心剖面掺气量剖面等值线

观测和水舌入水流速、水垫塘掺气量测量及对比,发现不同比尺模型上的水舌裂散形态有明显差异,在同样的孔口扩散体型作用下,1:100模型上水舌入水形态呈月牙形,而1:50模型水舌入水形态呈椭圆形。入水流速的测试结果表明水舌入水形态、入水流速的差异进一步导致水垫塘内掺气量分布形态的不同,1:100模型水垫塘中气泡群相对集中于中间区域,同时气泡群下潜深度较深;1:50模型气泡群平面上较为分散,气泡群下潜深度较浅。

从试验结果来看,挑流水舌裂散形态存在明显的比尺效应,若直接将小比尺模型模拟结果换算至原型,则不可避免存在一定的误差,这种误差在复杂孔口体型、复杂泄洪运行方式下可能会有进一步变化。本文使用的模型尺度已经远超常规,试验结果有一定的代表意义,但水舌流速仍与原型有数量级的差异。无限制增大模型尺度并不现实,如何在兼顾经济及模拟精度的前提下选择水工模型比尺,更好的模拟原型水力特性,仍需进一步探讨。

### 参考文献:

- [1] 刘宣烈,刘均. 三元空中水舌掺气扩散的试验研究[J]. 水利学报,1989,20(11):10-17. (LIU Xuanlie, LIU Jun. Experimental study on the diffusion and aeration of three-dimensional jet [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989, 20(11): 10-17. (in Chinese))
- [2] 姜信和. 挑流水舌掺气扩散的理论分析初探[J]. 水力发电学报, 1989, 8(3): 70-75. (JIANG Xinhe. Theoretical analysis on diversion and diffusion of flow [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1989, 8(3): 70-75. (in Chinese))
- [3] 罗铭,郭亚坤. 有界二元掺气射流水下扩散规律研究

- [J]. 水利学报, 1992, 23(7): 29-34. (LUO Ming, GUO Yakun. Study on underwater spread of binary aerated jet[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992, 23(7): 29-34. (in Chinese))
- [4] 萧兴斌. 掺气水流研究中的几个问题[J]. 人民长江, 1959(11): 46-48. (XIAO Xingbin. Several issues in the study of aerated water flow[J]. Yangtze River, 1959(11): 46-48. (in Chinese))
- [5] 董志勇, 杨永全, 吴持恭. 掺气对射流冲击水垫塘底部动水压强的影响[J]. 中国科学: A 辑, 1994, 24(4): 431-439. (DONG Zhiyong, YANG Yongquan, WU Chigong. Effects of aeration on pressure fluctuation on the bottom of the receiving pool plunged by jets[J]. Science in China: Ser A, 1994, 24(4): 431-439. (in Chinese))
- [6] 董志勇, 吴持恭, 杨永全. 掺气对射流冲击水垫塘底部脉动压强频谱特性的影响[J]. 成都科技大学学报, 1994(1): 9-13. (DONG Zhiyong, WU Chigong, YANG Yongquan. Effects of aeration on properties of frequency spectrum of pressure fluctuation on the bottom of the receiving pool plunged by jets[J]. Journal of Chengdu University of Science and Technology, 1994(1): 9-13. (in Chinese))
- [7] SCHMOCKER L, PFISTER M, HAGER W H, et al. Aeration characteristics of ski jump jets[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 134(1): 90-97.
- [8] CHANSON H, GUALTIERI C. Similitude and scale effects of air entrainment in hydraulic jumps [J]. Journal of Hydraulic Research, 2008, 46(1): 35-44.
- [9] 吴建华, 韩东旭, 周宇. 水跃掺气池的掺气特性[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(3): 31-35. (WU Jianhua, HAN Dongxu, ZHOU Yu. Air-entrainment characteristics of hydraulic jump aeration basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(3): 31-35. (in Chinese))
- [10] 徐庶伟, 王海军, 张锦, 等. 不同水流结构区掺气浓度分布规律试验研究[J]. 人民黄河, 2016, 36(1): 112-115. (XU Shuwei, WANG Haijun, ZHANG Jin, et al. Experimental study on air concentration distribution of the different area of the flow structure[J]. Yellow River, 2016, 36(1): 112-115. (in Chinese))
- [11] LAHEY R T, DREW D A. An experimental study of plunging liquid jet induced air carry under and dispersion [R]. Troy: Rensselaer Polytechnic Institute, 1994.
- [12] BOES R M, HAGER W H. Two-phase flow characteristics of stepped spillways [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 129(9): 661-670.
- [13] 沈春颖, 徐一民, 张涛, 等. 低弗劳德数下挑坎体型对掺气的影响试验[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(2): 15-17. (SHEN Chunying, XU Yimin, ZHANG Tao. Experiment of ramp-type aerator shape on the impact of aeration under low Froude number [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(2): 15-17. (in Chinese))
- [14] 王海云, 戴光清, 张建民, 等. 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): 46-49. (WANG Haiyun, DAI Guangqing, ZHANG Jianmin, et al. Review of the study of aeration facilities for high water head discharge structures[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2004, 24(4): 46-49. (in Chinese))
- [15] 马关博, 徐一民, 乔梁, 等. 泄槽底部掺气坎后水流掺气浓度分布模型试验[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(5): 12-16. (MA Guanbo, XU Yimin, QIAO Liang, et al. Experiment study on the distribution of air concentration in flow after bottom aerator[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(5): 12-16. (in Chinese))
- [16] CANEPA S, HAGER W H. Effect of jet air content on plunge pool scour[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 129(5): 358-365.
- [17] 郭燕鹤, 张家明, 陈维亮, 等. 水垫塘不同水流结构区掺气浓度分布规律试验研究[J]. 水利水电技术, 2017, 48(5): 81-86. (GUO Yanhe, ZHANG Jiaming, CHEN Weiliang, et al. Experimental study on aeration density distribution law in different flow structural regions of water cushion pool [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(5): 81-86. (in Chinese))
- [18] 许鑫鑫. 水垫塘水流结构相互作用下气体迁移扩散特性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
- [19] SOUDERS D T, HIRT C W. Modeling entrainment of air at turbulent free surfaces [C]//Proceedings of the 2004 World Water and Environmental Resources Congress, Salt Lake City: ASCE, 2014: 1-10.
- [20] 陈文学, 穆祥鹏, 崔巍, 等. 掺气水流不同粒径气泡运动特性研究[J]. 水利水电技术, 2017, 48(11): 1-6. (CHEN Wenxue, MU Xiangpeng, CUI Wei, et al. Study on movement characteristics of air-bubbles with different sizes in aerated flow [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(11): 1-6. (in Chinese))
- [21] 谢省宗, 陈文学. 掺气水流掺气浓度缩尺影响的估计[J]. 水利学报, 2005, 36(12): 1420-1425. (XIE Shengzong, CHEN Wenxue. Estimation of scale effect of air entrainment in model test of aerated flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(12): 1420-1425. (in Chinese))
- [22] 孙建, 李玉柱. 高坝挑流掺气水舌对水垫塘动水压强的缩尺影响[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2002, 17(5): 624-630. (SUN Jian, LI Yuzhu. Scalling effects of an aerated jet produced by high arch dam upon hydrodynamic pressure in water cushion pool [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2002, 17(5): 624-630. (in Chinese))

(收稿日期: 2018-01-05 编辑: 雷燕)