

文章编号: 1000-4750(2013)Suppl-0329-04

陡槽高速泄流掺气减蚀试验研究

张陆陈, 骆少泽, 王 新

(水文水资源与水利工程科学国家重点实验室南京水利科学研究所, 南京 210029)

摘 要: 陡槽高速泄流可能产生的空蚀破坏是目前大型水电站十分关注的问题之一, 本文通过 1:40 整体水工模型试验, 研究了陡槽的底掺气与侧掺气的掺气减蚀规律。结果表明, 底空腔长度与单宽泄流量呈抛物关系, 拐点的临界单宽泄流量取决于底挑坎水流的出射角; 通气孔通气量与单宽泄流量间存在二次函数关系, 水体掺气率系数并不是常数, 随水流湍动增大而减小; 设侧掺气坎使水体掺气浓度显著增加, 不仅保护了泄槽侧壁, 也加强了底板的保护。

关键词: 水利水电工程; 陡槽; 模型试验; 掺气减蚀; 空腔长度; 通气量; 掺气浓度

中图分类号: TV6 文献标识码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.04.S018

EXPERIMENTAL STUDY OF AIR ENTRAINMENT TO ALLEVIATE CAVITATIONS FOR CHUTE WITH HIGH-SPEED DISCHARGE

ZHANG Lu-chen, LUO Shao-ze, WANG Xin

(State Key Laboratory Of Hydrology-Water Resources And Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: By 1:40 integral hydraulic model tests, the law of air entrainment to alleviate cavitation for a base aerator and a lateral aerator of a chute is studied. The results show that the length of bottom cavity is parabolic with the discharge per unit width, and the critical discharge depends on the emergence angle. The ventilation volume of a vent is quadratic with the discharge per unit width; the aeration rate coefficient is not a constant, decreasing with the increase of flow turbulence. The air concentration increases significantly with the lateral aerator, protecting the sidewall of the chute, and the soleplate as well.

Key words: hydraulic and hydroelectric engineering; chute; model test; air entrainment to alleviate cavitation; cavity length; ventilation volume; air concentration

陡槽是大型水电站常用的泄水通道, 是泄水建筑物中的重要组成部分。陡槽段水流流速高, 易对过流面产生空蚀破坏, 危及泄水建筑物的安全运行。研究表明, 在高速泄流的过流面设置掺气设施是防止、减免空蚀破坏的最经济、有效的措施。国内外对此已开展了研究: 潘水波^[1]、Chanson^[2]及杨永森^[3]等提出了底空腔长度的估算公式, 但几种公式皆简化了许多因素, 结果差异较大; 通气孔通气量常通过掺气率系数、空腔长度、坎上流速等参数估算^[4], 但不同单宽泄流量下的参数变化规律未有深入研究; 工程上尚缺乏成熟可靠的设计准则。本文

通过水工物理模型试验, 从空腔长度、通气孔通气量、水体掺气浓度等方面探索不同底掺气坎、侧掺气坎在不同单宽泄流量下的掺气减蚀特性及规律。

1 研究内容与方法

某工程陡槽体型如图 1 所示。该陡槽采用开敞式 WES 堰, 堰顶高程 354.00m, 设计水头 26.00m, 净宽 8.00m, WES 堰面下接 1:0.8 斜坡段。为减免陡槽空蚀, 提出了 3 个底掺气体型, 代表性体型 1 见图 2。3 种体型均为挑坎+掺气槽结构, 通气孔直径 1.5m。体型 2 比体型 1 增大了坎高与坡比, 体型

收稿日期: 2012-04-22; 修改日期: 2013-01-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51109143); 江苏省自然科学基金项目(BK2011109)

通讯作者: 张陆陈(1986—), 男, 江苏人, 博士生, 从事水工水力学研究(E-mail: ytherzlc@163.com).

作者简介: 骆少泽(1965—), 男, 江苏人, 教授级高工, 从事水工水力学研究(E-mail: 600780@163.com);

王 新(1983—), 男, 江苏人, 高工, 博士, 主要从事水工结构流固耦合分析研究(E-mail: xwang@nhri.cn).

3 比体型 1 起坡桩号向上游移动 9m, 同样增加了坎高。3 种体型的细部参数如表 1 所示。

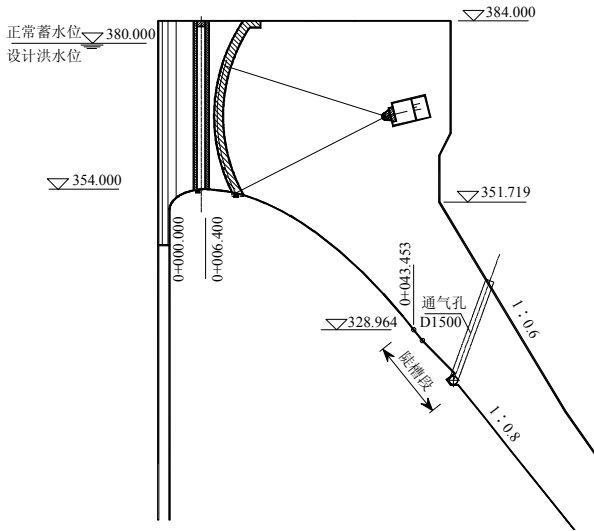


图 1 典型的陡槽体型

Fig.1 Typical shape of chute

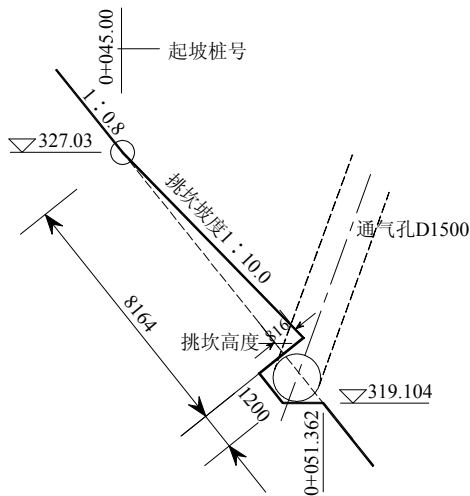


图 2 底掺气坎体型 1

Fig.2 Shape one of three base aerators

表 1 底掺气坎体型参数

Table 1 Shape parameters of three base aerators

参数	体型 1	体型 2	体型 3
起坡桩号/m	0+45.00	0+44.00	0+36.00
挑坎坡度	1 : 10	1 : 8	1 : 10
坎高/m	0.816	1.200	1.111

整体模型按重力相似定律设计, 比尺 1 : 40。试验量测内容涉及空腔长度、通气孔通气量、掺气浓度。通气量使用热线风速仪测量风速换算, 掺气浓度采用同位素测量系统。试验模拟 7 个泄洪工况, 单宽泄量依次为 20.8m²/s、83.3m²/s、133.3m²/s、166.7m²/s、185.4m²/s、219.8m²/s 和 266.7m²/s。

2 底掺气特性

2.1 底空腔长度

3 种体型的底掺气坎均能形成稳定底空腔, 底空腔长度与单宽泄量呈抛物关系, 见图 3。试验资料表明^[4], 底空腔长度与空腔流态密切相关。当空腔内基本无水时, 空腔流态表现为自由空腔, 空腔长度与泄量呈正相关关系, 泄量愈大空腔长度愈长; 但泄量增大至某一临界值时, 空腔尾部产生不稳定反向旋滚, 空腔流态呈淹没空腔, 空腔长度与泄量呈负相关, 泄量增大空腔长度缩短。体型 1 和体型 3 挑角相同且相对较小, 底空腔长度与单宽泄量关系曲线趋势基本一致, 临界单宽泄量约 176m²/s; 体型 2 挑角较大, 底空腔长度随泄量增大而增大, 临界单宽泄量大于 267m²/s。挑坎挑角增大, 临界单宽泄量有增大的趋势。

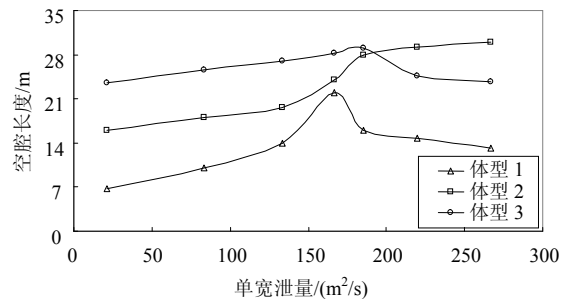


图 3 底空腔长度与单宽泄量关系

Fig.3 Relation between length of bottom cavity and discharge per unit width

按照刚体抛射公式^[5-6], 底空腔长度主要与坎上流速、水深、挑角、坎高等因素有关。流速高、挑角大、坎越高, 底空腔长度应越大。对比体型 2 和体型 3, 体型 2 挑角大, 坎略高, 且更靠下游, 流速略大, 但体型 3 在单宽泄量小于 180m²/s 底空腔长度却大于体型 2。分析认为, 由于体型 3 起点位于 WES 堰中, 小泄量时坎前射流贴壁程度比体型 2 差, 导致射流过坎时出射角相对较大, 底空腔因此较长。随着泄量增大水深增大后, 射流贴壁程度差异影响减小, 体型 2 因挑角大而底空腔长度大于体型 3。

2.2 通气孔通气量

3 种体型的底掺气坎槽内均没有积水, 通气孔进气通畅, 通气量与泄量关系曲线如图 4 所示。通气量与泄量间存在二次函数关系, 函数曲线呈抛物型, 单宽泄量大于 185m²/s 通气量减小。

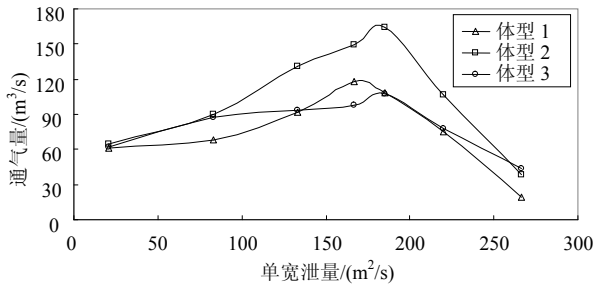


图4 通气孔通气量与单宽泄量关系

Fig.4 Relation between ventilation volume of vent and discharge per unit width

关于水流掺气量有一个应用较广的公式：

$$q_a = KvM \quad (1)$$

式中： q_a 为单宽掺气量； K 为掺气量系数； v 掺气坎上平均流速； L 为空腔长度。按此公式应用于体型2可发现，空腔长度和平均流速都随单宽泄量递增，但实际通气量却出现了拐点。分析认为，这主要与水流紊动有关。

目前普遍认为，掺气由射流水舌气水界面处的紊动交换作用引起，临界条件为水舌横向脉动动能足以克服表面张力和气泡浮力^[7]。掺气量大小则与横向紊动、气泡上浮速度及空腔长度等因素有关。本文3种体型通气孔通气量与单宽泄量关系趋势一致：当单宽泄量从小增大至185m²/s，随着横向紊动增大，掺气量逐渐增大，体型2此阶段单宽通气量 q_a 与 vL 关系如图5所示，两者呈较好的线性关系，系数 K 为0.0295，处于大部分试验研究成果0.022~0.033^[8]范围中。但当泄量进一步增大，掺气量却逐渐减小，这是因为水体紊动的增强使气泡易于破碎为小气泡，大为降低气泡上浮速度^[9-10]，因而减弱了挟气能力。即式(1)中的掺气率系数 K 不是一个稳定不变的常数，在水流紊动一定程度后， K 将随紊动增大而减小。

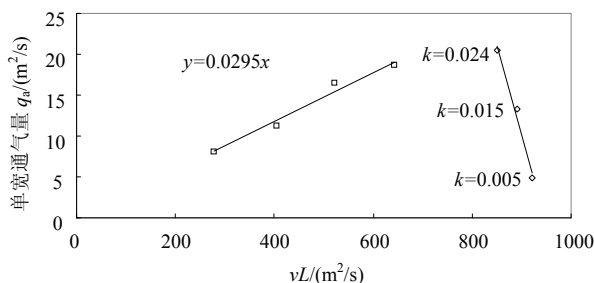


图5 体型2单宽通气量 q_a 与 vL 关系

Fig.5 Relation between ventilation volume per unit width and vL of shape two of three base aerators

3.3 水体掺气浓度

水体掺气浓度在掺气坎下游布置2个断面，桩

号分别为0+61.4和0+73.4，沿高程向每个断面布置5个测点，如图6所示。

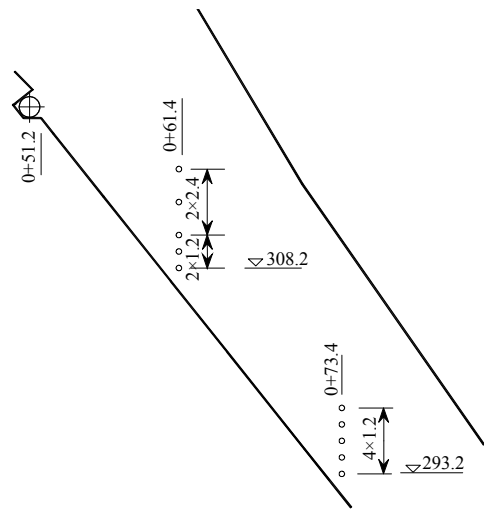


图6 掺气浓度测点布置

Fig.6 Layout of air concentration measuring points

表2 3种底掺气坎体型水体掺气浓度 / (%)

Table 2 Air concentration of three base aerators

工况	桩号/m	高程/m	体型1	体型2	体型3
单宽泄量 133.3m ² /s	0+61.4	308.2	39.4	83.0	53.7
		309.4	15.3	31.7	28.2
		310.6	9.0	15.2	23.6
		313.0	14.5	16.3	13.9
		315.4	20.2	43.7	18.7
	0+73.4	293.2	4.9	19.2	6.7
		294.4	8.7	28.3	12.1
		295.6	11.2	34.1	21.4
		296.8	25.8	31.8	31.3
		298.0	42.0	35.9	43.9
单宽泄量 266.7m ² /s	0+61.4	308.2	42.3	73.9	42.1
		309.4	8.3	38.3	23.4
		310.6	2.4	5.8	4.7
		313.0	0.3	0.4	1.1
		315.4	1.1	1.4	1.7
	0+73.4	293.2	1.3	3.1	2.5
		294.4	1.2	5.6	3.2
		295.6	0.7	2.4	3.1
		296.8	2.2	2.6	2.6
		298.0	1.7	2.0	2.1

3种体型典型工况的掺气浓度列于表2。桩号0+061.4m断面基本处在底空腔内，近底为空腔区，掺气浓度较大；向上渐变为清水区，掺气浓度逐渐减小；清水区范围随坎上水深增大而增大，单宽泄量最大时，清水区掺气浓度仅0.3%~1.7%；清水区向上为水表面自然掺气，掺气浓度较大。桩号0+073.4m断面已脱离底空腔范围，水体基本掺气均匀，从底部往上掺气浓度逐渐增大至表面自然掺气，水深大时则基本为清水区。

桩号0+61.4断面处，体型2因挑坎高、挑角大

掺气浓度较大；体型 3 其次，系位置偏上游所致；
 体型 1 则因底空腔长度最短而掺气浓度最小。

3 侧掺气特性

从掺气浓度分布可看出，当泄量较大、水体紊动较大时，掺入水体的小气泡不容易上浮扩散，致使侧墙不易掺气，存在较大的清水区。为此，考虑在底掺气坎体型 2 基础上加设侧掺气坎。侧坎 1：坎高 0.25m，坡度 1：38.4；侧坎 2：坎高 0.20m，坡度 1：25。

表 3 不同侧掺气坎水体掺气浓度 / (%)
 Table 3 Air concentration of three base aerators

工况	桩号/m	高程/m	无侧坎	侧坎 1	侧坎 2
单宽泄量 133.3m ² /s	0+61.4	308.2	53.0	54.8	59.5
		309.4	31.7	26.1	36.5
		310.6	15.2	16.6	22.6
		313.0	16.3	20.8	27.2
		315.4	43.7	44.8	47.0
	0+73.4	293.2	19.2	27.0	28.3
		294.4	28.3	22.7	34.4
		295.6	34.1	21.9	33.4
		296.8	31.8	23.8	37.2
		298.0	35.9	26.0	48.7
单宽泄量 266.7m ² /s	0+61.4	308.2	73.9	95.1	94.1
		309.4	38.3	30.8	63.2
		310.6	5.8	6.8	12.1
		313.0	1.4	3.8	3.2
		315.4	0.4	3.7	3.5
	0+73.4	293.2	3.1	23.4	11.4
		294.4	5.6	19.8	9.4
		295.6	2.4	5.8	6.3
		296.8	2.6	4.5	3.3
		298.0	2.0	2.9	3.9

各工况下两种侧坎均能形成稳定的侧空腔，侧空腔长度决定于侧掺气坎坡度。侧坎 1 侧空腔长度约 9m，侧坎 2 约 14m。典型工况水体掺气浓度分布见表 3。加设侧掺气坎后水体掺气浓度有较大提高，特别是边墙区域，最大增加到 3%左右。较侧坎 1，侧坎 2 空腔较长，掺气浓度相对较大。

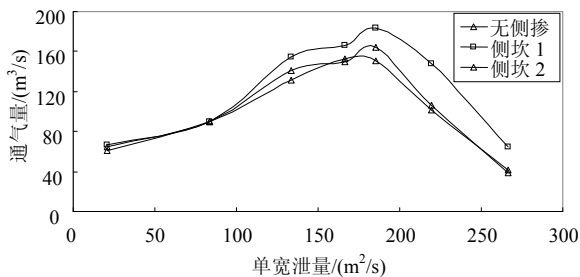


图 7 体型 2 加设侧坎前后通气量与单宽泄量关系

Fig.7 Relation between ventilation volume of vent and discharge per unit width before and after setting lateral aerator based on of shape two of three base aerators

通气孔通气量与单宽泄量关系如图 7 所示，从底通气孔通气量来看，侧坎 2 和无侧坎相差不大，侧坎 1 却增大很多。这表明，当侧空腔长度较小时，部分气体从底空腔进入，增大了底通气孔通气量；而侧空腔长度较大时，则主要从侧坎吸入，故底通气孔通气量变化较小。将侧坎 2 应用于底掺气坎体型 3，水体掺气浓度增大了 15%~70%，通气孔通气量也无变化。因此，加设侧掺气不仅保护了泄槽侧壁，也加强了底板的保护。在不影响陡槽泄流流态情况下适当增加侧掺气坎坡度更有利于侧墙掺气减蚀。

4 结论

本文通过 1：40 整体水工物理模型试验，从空腔长度、通气孔通气量、水体掺气浓度等方面，研究了 3 种底掺气坎、2 种侧掺气坎在不同单宽泄量下的掺气减蚀特性。结果表明：

(1) 底空腔长度与空腔流态密切相关，与单宽泄量呈抛物关系。单宽泄量较小时，底空腔为自由空腔，底空腔长度与单宽泄量呈正相关；在某一临界流量后，底空腔渐被淹没，底空腔长度与单宽泄量呈与负相关关系。临界单宽泄量主要与底挑坎的水流出射角相关，出射角大，临界单宽泄量也大。出射角受坎前水流贴壁程度影响。

(2) 通气孔通气量与单宽泄量间存在二次函数关系，掺气率系数 K 并不是常数，水流紊动达到一定程度后， K 将随紊动程度加大而减小。

(3) 大泄量时泄槽内水深较大，水体紊动产生的小气泡不容易上浮扩散，致使侧墙不易掺气，需考虑加设侧掺气设施。

(4) 加设侧掺气坎水体掺气浓度显著增加，不仅保护了泄槽侧壁，也加强了底板的保护。侧掺气坎坡度决定侧空腔长度；侧空腔长度较小时，部分气体从底空腔进入，侧空腔长度较大时，气体主要从侧坎吸入。在不影响陡槽泄流流态情况下适当增加侧掺气坎坡度更有利于侧墙掺气减蚀。

参考文献：

[1] 潘水波, 邵瑛瑛, 时启燧. 通气挑坎射流的挟气能力 [J]. 水利学报, 1980, 11(5): 13-22.
 Pan Shuibuo, Shao Yingying, Shi Qisui. Aeration capacity of jet passing through flip bucket [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1980, 11(5): 13-22. (in Chinese)

(参考文献[2]—[10]转第 337 页)

- 20—22. (in Chinese)
- [3] 吴明赞, 陈森法. 柴油机曲轴运转的非线性振动与混沌[J]. 船舶工程, 2002, 21(1): 10—12.
Wu Mingzan, Chen Senfa. On the nonlinear vibration and chaos of diesel engine crankshaft in running [J]. Ship Engineering, 2002, 21(1): 10—12. (in Chinese)
- [4] 周瑞平, 游家慰, 李增光. 船舶推进轴系非线性冲击响应仿真[J]. 江苏船舶, 2005, 25(4): 33—35.
Zhou Ruiping, You Jiawei, Li Zengguang. Simulation of nonlinear impulsion response for propulsive shafting of ship [J]. Jiangsu Ship, 2005, 25(4): 33—35. (in Chinese)
- [5] 林瑞霖, 吴家明, 黄次浩, 等. 柴油机轴系非线性扭转振动响应分析[J]. 内燃机工程, 2003, 15(6): 59—60.
Lin Ruilin, Wu Jiaming, Huang Cihao, et al. Analysis for response of nonlinear torsional vibration of diesel shafting [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2003, 15(6): 59—60. (in Chinese)
- [6] 韩同群. 基于 BRICKS 的车用柴油机曲轴扭振与减振分析[J]. 柴油机设计与制造, 2006, 14(2): 14—15.
Han Tongqun. Analysis of torsional vibration of crankshaft system of a vehicle diesel engine based on BRICKS [J]. Design & Manufacture of Diesel Engine, 2006, 14(2): 14—15. (in Chinese)
- [7] 代东亮. 舰船推进轴系动力学特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
Dai Dongliang. The research on the dynamic response of the propulsion shafting in naval ship [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006. (in Chinese)
- [8] Pasricha M S, Carnegie W D. Torsional vibrations in reciprocating engines [J]. Journal of Ship Research, 1976, 20(1): 32—39.
- [9] Pasricha M S. Second resonance in reciprocating engine of an examination of torsional vibration of a two-degree-of-freedom system having variable inertia [C]. Southampton UK: The Institute of Sound and Vibration, 1994: 2018—2025.
- [10] Pasricha M S. Effect of damping on parametrically excited torsional vibrations of reciprocating engines including gas forces [J]. Journal of Ship Research, 2006(2): 147—150.
- [11] Pasricha M S. Effect of gas forces on parametrically excited torsional vibrations of reciprocating engines [J]. Journal of Ship Research, 2001(4): 262—264.
- [12] 杨志安, 程欣桐. 船用柴油机膨胀气体冲击力作用轴系的主参数共振[J]. 工程力学, 2010, 27(7): 221—225.
Yang Zhian, Cheng Xintong. Primary parametric resonances of diesel shafting subjected to impact force of expansion of vapour [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(7): 221—225. (in Chinese)
- [13] 陈勤, 何琳, 吕志强. 钢丝绳弹性联轴器的性能试验及数学模型[J]. 海军工程大学学报, 2001, 13(3): 72—74.
Chen Qin, He Lin, Lü Zhiqiang. The characteristics testing of wire rope coupling and its mathematical model [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2001, 13(3): 72—74. (in Chinese)
- [14] Nayfeh A H, Mook D T. Nonlinear oscillations [M]. New York: Wiley-Interscience, 1979: 788—810.

(上接第 332 页)

- [2] Chanson H. Predicting the filling of ventilated cavities behind spillway aerators [J]. J Hydraul Res, 1995, 33(3): 361—372.
- [3] 杨永森, 陈长植, 于琪洋. 掺气槽上射流挟气量的数学模型[J]. 水利学报, 1996, 27(3): 13—21.
Yang Yongsen, Chen Changzhi, Yu Qiyang. Quantity of entrained air mathematical model of jet passing through flip bucket [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 27(3): 13—21. (in Chinese)
- [4] 夏毓常, 韦有忠. 通气减蚀设施及通气量估算方法[J]. 人民黄河, 1986, 17(4): 49—52.
Xia Yuchang, Wei Youzhong. Aeration structure and estimation methods of ventilation volume [J]. Yellow River, 1986, 17(4): 49—52. (in Chinese)
- [5] 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 Yimin, Wang Wei. Cavity length calculation of jet passing through flip bucket [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, 35(10): 7—9. (in Chinese)
- [6] Rutschmann P, Hager W H. Design and performance of spillway chute aerators [J]. Int Water Pow Dam Constr, 1990, 42(1): 36—42.
- [7] 杨永森. 跌坎型掺气槽过流的掺气特性[J]. 水利学报, 1994, 25(2): 65—70.
Yang Yongsen. Air entrainment characteristics of flow over step type aerator [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994, 25(2): 65—70. (in Chinese)
- [8] Pinto N L de S, Neidert S H, Ota J J. Aeration at high velocity flows-part one [J]. International Water Power Dam Construction, 1982, 34(2): 34—38.
- [9] 李志高, 陈刚. 两流体模型中气泡粒径对掺气浓度预测结果的影响[J]. 西北水力发电, 2004, 20(1): 4—6.
Li Zhigao, Chen Gang. The effect of bubble diameter on entrainment concentration forecast result in two-fluid model [J]. Journal of Northwest Hydroelectricpower, 2004, 20(1): 4—6. (in Chinese)
- [10] Zarrati R. Mathematical modeling of air-water mixtures in open channels [J]. J Hydraulic Research, 1994, 32(5): 23—27.