

# 缓坡条件下掺气坎后空腔长度的试验研究

王尧, 徐一民, 张继肖, 舒蕴璟, 马关博

(昆明理工大学 电力工程学院, 昆明 650500)

**摘要:** 掺气坎后空腔长度是检验掺气效果的一项重要指标, 主要受掺气坎体型(即坎高和挑角)、水力条件、空腔内负压以及空气阻力等因素影响。通过物理模型试验研究了缓坡条件下水槽底坡、掺气挑坎体型对空腔长度的影响, 弗氏数  $Fr$ 、雷诺数  $Re$ 、韦伯数  $We$  三者分别与空腔长度的关系, 并分析了缓坡条件下空腔长度随  $Fr$  波动这一试验结果产生的原因。最后运用杨永森公式对空腔长度进行了计算, 并分析了计算值与试验值之间的误差和相关性。研究成果可为优化掺气设施设计和完善计算经验公式提供参考。

**关键词:** 水力学试验; 空腔长度; 水槽底坡; 挑坎高度; 挑坎坡比; 弗氏数  $Fr$

**中图分类号:** TV 131.3   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-1683(2013)03-0062-05

## Experimental Study on the Cavity Length in the Aerator under the Slight Slope

WANG Yao, XU Yimin, ZHANG Jixiao, SHU Yujing, MA Guanbo

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

**Abstract:** The cavity length in the aerator is an important indicator for aeration effects. It is impacted by many factors, including the aerator shape (height and slope), hydraulic conditions, negative pressure in the cavity, and air resistance. In this paper, the physical model experiments were conducted to study the effects of chute slope and aerator shape on the cavity length under the conditions of slight slope. Furthermore, the relationships between the cavity length and each of the three factors, namely Froude number ( $Fr$ ), Reynolds number ( $Re$ ), and Weber number ( $We$ ), were obtained, and the reason of the experiment results that the cavity length fluctuates with the Froude number ( $Fr$ ) under the conditions of slight slope was analyzed. Finally, the cavity length was calculated using Yang Yongsen's formula, and the errors and correlations between the calculated and experimental values were analyzed. These results can provide references for optimizing the aerator design and improving the empirical calculation formulas.

**Key words:** hydraulic experiment; cavity length; chute slope; aerator height; aerator slope; Froude number ( $Fr$ )

由于大型高水头泄水建筑物泄水时流速高、单宽流量大, 泄水建筑物的某些过流部位容易产生空化现象并遭受空蚀破坏。减免空蚀破坏的重要措施之一是掺气减蚀<sup>[1-3]</sup>。在掺气减蚀研究中, 掺气空腔的水力特性和空腔长度的计算方法是十分重要的问题。空腔长度作为掺气空腔的主要几何尺寸, 通常用来量度掺气坎下游流动状态, 并且在工程上决定着掺气量及掺气设施的有效保护范围<sup>[4-5]</sup>。影响空腔长度的因素主要有掺气坎体型(即挑坎高度和挑坎坡比)、水力条件、空腔内负压以及空气阻力等<sup>[6-9]</sup>。目前, 空腔长度的计算方法都无法满足既精度较高又相对简便的要求。徐一民等在分析掺气坎射流的微分水体受力的理论上建立了掺气坎射流空腔积水的方程式, 但该法的解析求解困难<sup>[10]</sup>。王海云等<sup>[11]</sup>对某龙抬头泄洪洞采用全场数值模拟方法得到了经验公式, 不过式

中系数往往随试验条件不同而有所变化, 针对性较强。杨永森等<sup>[12]</sup>通过对射流底缘的运动轨迹进行试验研究和理论分析后, 提出了抛射体公式, 此式充分考虑了影响空腔长度的各种不定因素, 精度相对较高, 也较适用于工程实际。本文通过物理模型试验, 研究缓坡条件下泄槽底坡、掺气挑坎体型对空腔长度的影响, 最后对比分析了运用杨永森公式计算所得的空腔长度与试验测得的空腔长度之间的关系, 可为优化掺气设施设计和完善计算经验公式提供参考。

## 1 试验设计方案

### 1.1 试验设备

整套试验装置分为三角形薄壁堰、前池、可移动式明流

收稿日期: 2012-09-10   修回日期: 2013-04-23   网络出版时间: 2013-05-18  
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130518.1744.032.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51069002); 云南省自然科学基金(2009ZC015M)

作者简介: 王尧(1986), 男, 江苏常州人, 硕士研究生, 主要从事工程水力学方面的研究。E-mail: 642774070@qq.com

通讯作者: 徐一民(1965-), 男, 云南昆明人, 教授, 主要从事工程水力学方面的研究。E-mail: yiminxu@sina.com

泄水槽及掺气设施等部分。可移动式明流泄水槽全长 7.6 m,横断面为 10 cm(宽)×30 cm(高)的矩形断面。上下槽底坡比较小,设置为相同。掺气设施采用挑坎形式,设计 9 种不同体型的挑坎模型,置于距进水口 4.8 m 处,并于挑坎后槽壁两侧对称设置开口为直径 8 mm 的通气孔。掺气挑坎布置见图 1。图中,α 为水槽底坡坡角,β 为挑坎挑角,Δ 为挑坎高度,v 为挑坎上的平均流速,h 为挑坎上的水深,L 为空腔长度,d 为空腔回水深度(空腔内回水最高点与槽底间的垂直距离),φ<sub>1</sub> 为射流水舌的冲击角。

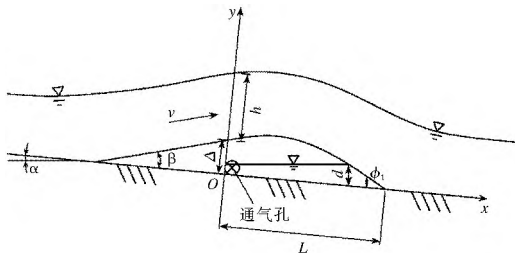


图 1 掺气设施布置

Fig. 1 The layout of aerator

### 1.2 试验条件

(1) 挑坎体型。实际工程中,挑坎坡比的选取范围大致为 1:5~1:15<sup>[3]</sup>。本试验中挑坎采用三种坡比 1:5、1:7、1:10,每种坡比又依次设计 3 种坎高 Δ= 1、2、3 cm,共计 9 种不同的体型。

(2) 水槽底坡。综合考虑现有试验条件,泄水槽底坡分别设定为  $i=0.070, 0.087, 0.096$ 。

(3) 水力条件。本试验流量范围  $Q=1\ 500\sim 5\ 500\text{ cm}^3/\text{s}$ ,坎上平均流速  $v=1.0\sim 2.0\text{ m/s}$ ,坎上水深  $h=1.5\sim 3.0\text{ cm}$ 。

(4) 通气孔。挑坎后槽壁两侧对称设置开口为直径 0.8 cm 的通气孔,以使充分通气。

(5) 设计工况。在开始试验前对各种工况进行了初步的测试,特别是对临界情况作了观测,使每种设计工况下,坎后均能保证形成稳定的空腔。具体设计工况见表 1。

## 2 试验结果分析

### 2.1 泄槽底坡、掺气坎体型对空腔长度的影响

#### 2.1.1 挑坎高度和挑坎坡比对空腔长度的影响

选取泄槽底坡  $i=0.087$ ,对挑坎高度  $\Delta=1, 2, 3\text{ cm}$  分别对应挑坎比 1:5、1:7、1:10 逐一进行试验,研究挑坎高度和挑坎比对空腔长度的影响。试验结果见图 2。

试验表明,挑坎高度和挑坎比均对空腔长度产生较大影响。在试验条件下,泄槽底坡、挑坎高度和挑坎坡比,只要控制其中之一不变,空腔长度将随另者增大而增大。某一流量下,空腔长度可以通过调整挑坎高度和挑坎坡比来增大。原因是挑坎高度越大即挑流水舌起挑点越高,挑流水舌落点相应越远,空腔长度也随之越大;挑坎坡度越大即挑流水舌起挑角越大,挑距也就越远,空腔长度亦随之越大。而且从图 2 还可以看出,挑坎高度比挑坎坡度对空腔长度的影响更为显著。

另外,要想改善空腔形态,坎高并非越高越好,挑角也不

表 1 掺气坎设计工况

Table 1 The design conditions

水槽底坡	挑坎高度/cm	挑坎坡度	流量/( $\text{cm}^3\cdot\text{s}^{-1}$ )
$i=0.070$	1	1:5	$Q=5\ 243, 4\ 361, 3\ 440, 2\ 622, 2\ 171, 1\ 707$
		1:7	
		1:10	
	2	1:5	
		1:7	
		1:10	
	3	1:5	
		1:7	
		1:10	
$i=0.087$	1	1:5	
		1:7	
		1:10	
	2	1:5	
		1:7	
		1:10	
	3	1:5	
		1:7	
		1:10	
$i=0.096$	1	1:5	
		1:7	
		1:10	
	2	1:5	
		1:7	
		1:10	
	3	1:5	
		1:7	
		1:10	

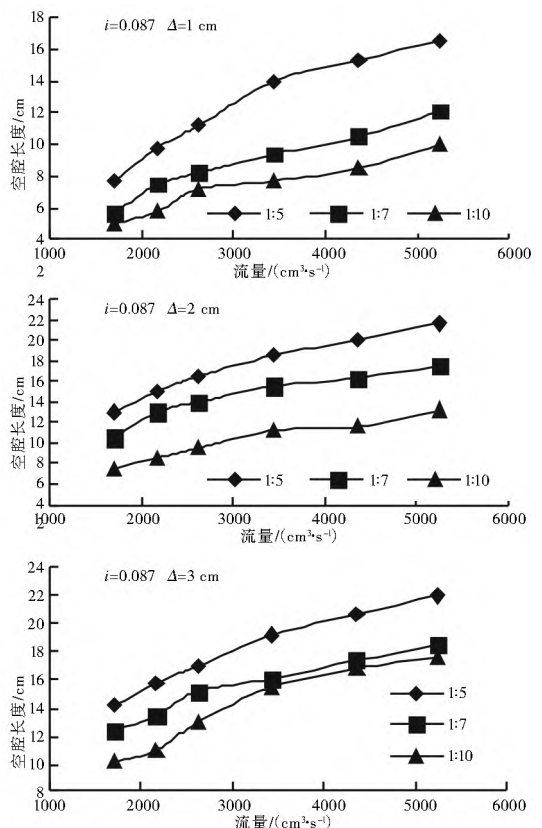


图 2 挑坎高度和挑坎比对空腔长度的影响

Fig. 2 The effects of aerator height and aerator slope on the cavity length

是越大越好,坎高和挑角都应有一定的限制范围。因为坎高

增加或挑角增大未必会使回水深度减小, 前两者与后者间均不存在绝对的负相关关系。相反, 坎高太高或挑角太大, 将使水流流态产生变化。

### 2.1.2 泄槽底坡和挑坎坡比对空腔长度的影响

选取挑坎高度  $\Delta = 2\text{ cm}$ , 泄槽底坡  $i = 0.070, 0.087, 0.096$  及挑坎坡比 1:5、1:7、1:10 分别进行试验。试验结果见图 3。

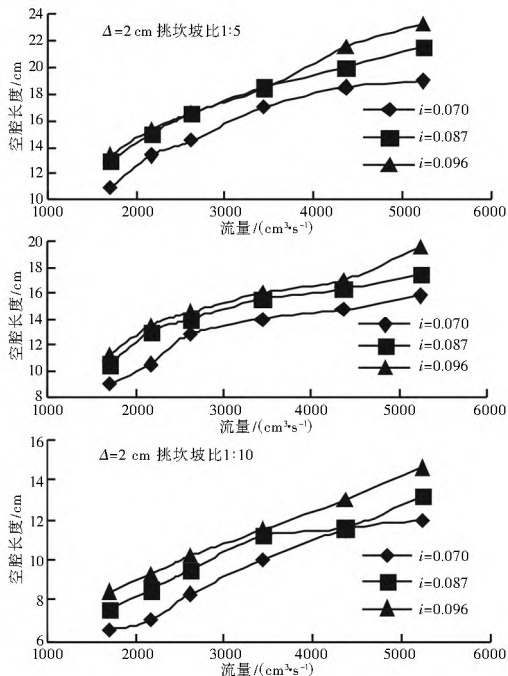


图 3 泄槽底坡和挑坎坡比对空腔长度的影响

Fig. 3 The effects of chute slope and aerator slope on the cavity length

从图 3 任何一张图中可见, 流量和挑坎比一定时, 泄槽底坡越大, 空腔长度越大。综合 3 张图可知, 流量和泄槽底坡一定时, 挑坎坡比越大, 空腔长度越大。说明在试验范围内, 空腔长度随泄槽底坡和挑坎比变化趋于一致。

需要指出的是因泄槽变坡幅度所限, 本试验所选取的泄槽底坡变化范围较小, 使得泄槽底坡对空腔长度的影响研究不够充分。若泄槽底坡变幅较大, 可能达到某一坡角后, 空腔长度反而会随之减小。

### 2.2 空腔长度分别与弗氏数 $Fr$ 、雷诺数 $Re$ 、韦伯数 $We$ 三者的关系

(1) 选取挑坎高度  $\Delta = 1\text{ cm}$ , 水槽坡度  $i = 0.070$  进行试验, 所得空腔长度分别与弗氏数  $Fr$ 、雷诺数  $Re$ 、韦伯数  $We$  三者的关系见图 4。

本试验计算得出的  $Fr$  都小于 7, 所以水的重力作用就较为明显, 空腔出现回水的机率大大增加<sup>[8]</sup>。

从空腔长度与  $Fr$  的关系中易见, 在试验范围内, 当  $Fr$  增大, 空腔长度呈现出“S”型波动: 先增大、后减小、再增大。杨永森等的试验中也出现过相似结果: 随着  $Fr$  增大, 空腔长度先增大再出现微弱的减小<sup>[12]</sup>。说明缓坡条件下空腔长度随  $Fr$  的变化较为复杂。原因可能是射流空腔于缓坡条件下更易产生积水, 而一旦积水出现, 空腔长度就会变短, 同时空腔变短后, 空腔内负压又会改变, 通气量和水流掺气量又将

重新寻求平衡, 水力条件变化, 平衡又会被破坏, 这与底坡较大条件下掺气空腔的变化情形有所不同。

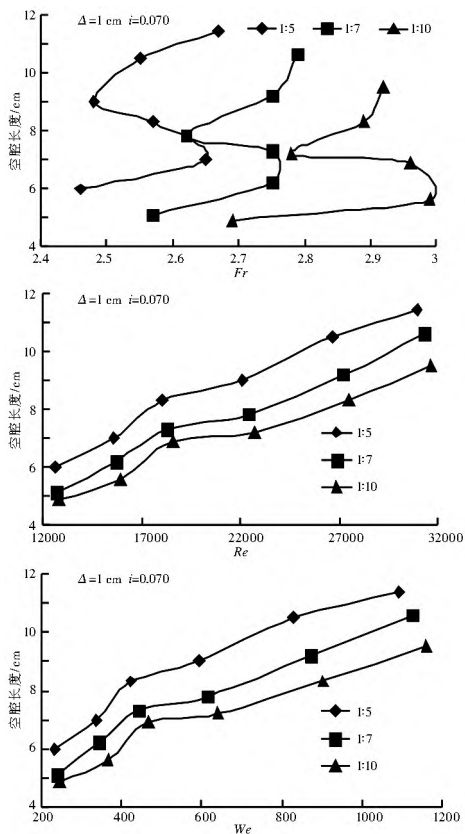


图 4 空腔长度分别与弗氏数  $Fr$ 、雷诺数  $Re$ 、韦伯数  $We$  三者的关系曲线

Fig. 4 The relationships between the cavity length and  $Fr$ ,  $Re$ , and  $We$  respectively

由空腔长度分别与  $Re$ 、 $We$  的关系可得,  $Re$  增大, 空腔长度会随之相应增加, 而  $We$  增大亦是如此。另外,  $Re$  相同, 空腔长度将随挑坎坡比增大而增加,  $We$  相同也是同样情况。同时又可推知, 空腔长度欲相同,  $Fr$  所需越大, 挑坎坡比所需越小。

(2) 选取挑坎坡比 1:5, 流量  $Q = 5\,243\text{ cm}^3/\text{s}$ , 在泄槽底坡  $i = 0.070, 0.087, 0.096$  及挑坎坡比 1:5、1:7、1:10 下分别进行试验。计算结果见表 2。

分析表 2 可知, 在流量和挑坎坡比相同的情况下, 由于泄槽底坡不同, 所得到的坎上流速和水深也随之不同。随着水槽底坡增大, 坎上流速增大, 水深减小, 得到的  $Fr$ 、 $Re$ 、 $We$  都相应增大, 从而空腔长度也增大。

### 2.3 空腔长度试验值与计算值

#### 2.3.1 计算方法

杨永森等建立模型时充分考虑了空腔长度的主要影响因素, 通过对射流底缘运动轨迹的研究提出了空腔长度的抛射体公式<sup>[12]</sup>, 见式(1):

$$L = v_1 \cos \varphi_1 T + \frac{1}{2} g (\sin \alpha - 0.00625 Fr^2) T^2 \quad (1)$$

$$T = \frac{v_1 \sin \varphi_1}{g (\cos \alpha + p_N)} \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{2g(t_r - t_s) (\cos \alpha + p_N)}{(v_1 \sin \varphi_1)^2}} \right] \quad (2)$$

式中:  $L$  为空腔长度;  $v_1$  为挑坎末端断面射流底缘的实际出

射流速;  $\varphi_1$  为挑坎末端断面射流底缘的实际出射角;  $p_N$  为空腔负压指数;  $t_r$  为挑坎高度;  $t_s$  为跌坎高度。

$v_1$  和  $\varphi_1$  可采用以下公式进行修正:

$$v_1 = 0.96v \tag{3}$$

$$\varphi_1 = -0.682Fr_r^{-2.4937} \tag{4}$$

式中:  $v$  为来流断面的平均流速;  $\varphi_1$  用弧度表示。

表 2 挑坎坡比和流量相同情况下空腔长度  $L$ 、弗氏数  $Fr$ 、雷诺数  $Re$ 、韦伯数  $We$  试验结果 (选取挑坎坡比 1:5,  $Q_1 = 5\,243\text{ cm}^3/\text{s}$ )

Table 2 The experimental values of cavity length,  $Fr$ ,  $Re$ , and  $We$  under the conditions of same aerator slope and flow discharge (aerator slope is 1:5,  $Q = 5\,243\text{ cm}^3/\text{s}$ )

挑坎高度	泄槽坡比			
	$i$	0.070	0.087	0.096
$\Delta = 1\text{ cm}$	$L$	11.4	16.5	17.2
	$Fr$	2.67	2.79	2.86
	$Re$	30 899.34	31 271.62	31 461.15
	$We$	1 092.57	1 125.68	1 143
$\Delta = 2\text{ cm}$	$L$	19.0	21.6	23.3
	$Fr$	2.79	2.86	2.92
	$Re$	31 271.62	31 461.15	31 652.98
	$We$	1 125.68	1 143.00	1 160.86
$\Delta = 3\text{ cm}$	$L$	20.2	22.0	26.5
	$Fr$	2.86	2.92	3.07
	$Re$	31 461.15	31 652.98	32 043.76
	$We$	1 143	1 160.86	1 198.3

### 2.3.2 空腔长度试验值与计算值的比较结果和关系曲线

在选取泄槽底坡  $i = 0.070$ , 挑坎高度  $\Delta = 1\text{ cm}$  以及 3 种不同挑坎坡度 1:5、1:7、1:10 下, 对不同流量时的掺气坎后空腔长度进行试验实测, 并运用杨永森公式计算, 再对比两者分析误差和相关性。空腔长度的试验值与计算值见表 3, 空腔长度试验值与计算值的见图 5。

表 3 空腔长度的试验值与计算值 (选取  $i = 0.070$ ,  $\Delta = 1\text{ cm}$ )

Table 3 The experimental and calculated values of cavity length ( $i = 0.070$ ,  $\Delta = 1\text{ cm}$ )

挑坎坡比		流量/( $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )					
		5 243	4 361	3 440	2 662	2 171	1 707
1:5	试验值	11.4	10.5	9	8.3	7	6
	计算值	11.73	10.34	8.92	8.16	7.68	6.41
1:7	试验值	10.6	9.2	7.8	7.3	6.2	5.1
	计算值	10.77	9.75	8.35	7.75	7.09	6.01
1:10	试验值	9.5	8.3	7.2	6.9	5.6	4.9
	计算值	9.91	9.05	7.93	7.41	6.91	5.78

试验表明, 流量增大, 空腔长度相应增加, 并且挑坎坡比越小, 空腔长度的计算值与试验值相应也都越小。从图 5 看出, 试验值与计算值相差不大, 前者略小, 总体拟合尚好。部分原因在于试验中空腔长度用钢尺测量时存在一定的测量误差, 特别是射流的落点更是不易准确测定。从试验数据分析, 挑坎坡比减小, 空腔长度的试验值与计算值间的误差

逐渐增大, 这是因为挑坎坡比减小, 回水深度随之增加, 从而空腔长度测量难度增大。

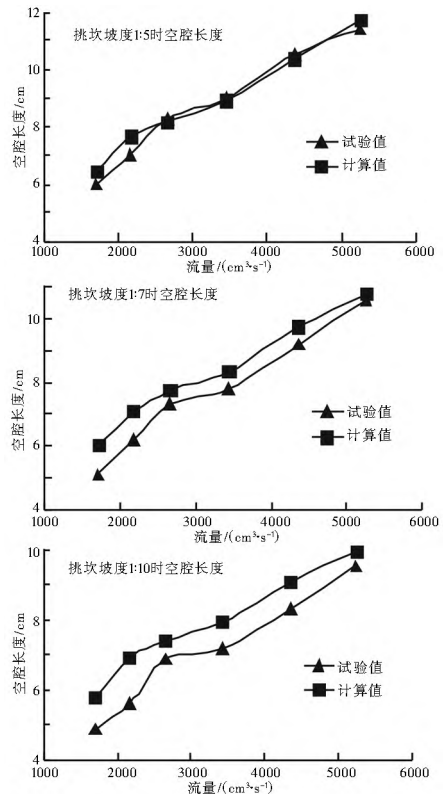


图 5 空腔长度的试验值与计算值的对比

Fig. 5 Comparison of the experimental and calculated values of cavity length

杨永森公式通过对射流底缘的运动轨迹进行试验研究和理论分析, 充分考虑了影响空腔长度的各种不定因素<sup>[15]</sup>, 精度相对较高, 也较适用于工程实际。即使如此, 现有的公式也还存在局限性, 仍不能完全解决工程中遇到的问题, 因而必须继续对空腔长度进行大量的试验研究, 寻找影响空腔长度的各种影响因素, 探求空腔长度的变化规律。

### 3 结论

(1) 试验中, 泄槽底坡、挑坎高度及挑坎坡比三者, 只要控制其中二者不变, 空腔长度将随第三者增大而增大。在泄槽底坡固定, 某一流量下, 要想增大空腔长度可以通过增加挑坎高度或增大挑坎坡比来实现。而且根据空腔长度的变化成效分析, 挑坎高度较挑坎坡比对其影响更为凸显。另外, 空腔形态如要改善, 坎高和挑角均应限制一定范围。

(2) 低流速状态下, 若流量和泄槽底坡不变, 坎上水深增加, 空腔长度也将增大。说明空腔长度与坎上水深二者变化渐趋于同, 这时空腔长度变化的决定性影响因素应是水流重力。

(3) 缓坡条件下, 空腔长度随  $Fr$  的变化较为复杂。试验表明, 当  $Fr$  增大, 空腔长度呈现出“S”型波动: 先增大、后减小、再增大。另外,  $Re$  增大, 空腔长度会随之相应增加; 而  $Re$  相同, 空腔长度将随挑坎坡比增大而增加,  $We$  相同也是同样情况。进一步推知, 空腔长度欲相同,  $Fr$  所需越大, 挑坎坡比所需越小。

(4) 流量和挑坎坡比相同, 泄槽底坡增大, 坎上流速增

大,水深减小,得到的  $Fr$ 、 $Re$ 、 $We$  都相应增大,空腔长度也增大,其水力参数的变化趋势大体一致。

(5) 空腔长度的试验值与运用杨永森公式求得的计算值之间的误差随挑坎坡比减小而增大。主要原因是挑坎坡比减小,回水深度随之增加,使得空腔长度测量难度增大。

#### 参考文献(References):

- [1] 时启燧. 高速水气两相流[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2007. (SHI Qǐsui. High velocity Aerated Flow[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2007. (in Chinese))
- [2] 张仕善. 泄水建筑物泄槽体型设计[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2009. (ZHANG Shǐshan. Design on Chute Type of Discharge Structures[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2009. (in Chinese))
- [3] 吴持恭. 高速水力学研究的进展[J]. 大自然探索, 1992, 11(3): 100-106. (WU Chǐgong. Progress on the Study of Hydraulics of High Speed Flows[J]. 1992, 11(3): 100-106. (in Chinese))
- [4] 张立恒, 许唯临. 掺气减蚀设施空腔回水问题的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2006, 6(15): 2388-2389. (ZHANG Lǐheng, XU Weǐlin. Experimental Investigation on the Backwater behind Aeration Facility[J]. Journal of Science Technology and Engineering, 2006, 6(15): 2388-2389. (in Chinese))
- [5] 赵业彬, 徐艺菲, 骆少泽, 等. 某水电站溢流坝陡槽高速泄流掺气减蚀试验研究[J]. 水电能源科学, 2012, 30(9): 82-84. (ZHAO Yebīn, XU Yǐfei, LUO Shǎoze, et al. Experimental Study of High speed Discharge Aeration Cavitation Alleviating for Chute of Overflow Dam in Hydropower Station[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(9): 82-84. (in Chinese))
- [6] 王海云, 戴光清, 杨永全, 等. 高水头泄水建筑物掺气坎体型研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2006, 21(5): 646-653. (WANG Haiyun, DAI Guangqing, YANG Yongquan, et al. Experimental Study on Aerator Type of Hydraulic Structures with High Water Head[J]. Journal of Hydrodynamics: Ser. A, 2006, 21(5): 646-653. (in Chinese))
- [7] 漆力健, 廖华胜, 李贵吉, 等. 低佛劳德数掺气坎空腔回水问题研究[J]. 水利学报, 2007, 38(7): 819-825. (QI Lǐjian, LIAO Hua sheng, LI Guǐji, et al. Numerical Simulation on Backwater Downstream of Aerators in Spillway with Low Froude Number Flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(7): 819-825. (in Chinese))
- [8] 徐一民, 王伟, 许唯临, 等. 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 Yǐmín, WANG Wei, XU Weǐlin, et al. Calculation of the Cavity Length of Jet Flow from Chute Aerators[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, 35(10): 7-9. (in Chinese))
- [9] 徐一民, 王伟, 许唯临, 等. 掺气坎射流空腔积水计算[J]. 自然科学进展, 2008, 18(5): 591-595. (XU Yǐmín, WANG Wei, XU Weǐlin, et al. Calculation of the Cavity Length of Jet Flow from Chute Aerators[J]. Progress in Natural Science, 2008, 18(5): 591-595. (in Chinese))
- [10] 杨永森, 杨永全, 帅青红. 低  $Fr$  数流动跌坎掺气槽的水力及掺气特性[J]. 水利学报, 2000, (2): 27-31. (YANG Yong sen, YANG Yongquan, SHUAI Qinghong. The Hydraulic and Aeration Characteristics of Low Froude Number over a Step Aerator[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, (2): 27-31. (in Chinese))
- [15] 陈康, 金晓媚, 万力, 等. 应用 MODIS 数据进行土壤盐渍化评价方法研究[J]. 科技导报, 2009, 27(14): 59-63. (CHEN Kang, JIN Xiaomei, WAN Li, et al. Assessment of Soil Salinization Using MODIS Data [J]. Science and Technology Review, 2009, 27(14): 59-63. (in Chinese))
- [16] 崔鹏. 宁夏引黄灌区土壤盐渍化现状与地下水动态调控[J]. 宁夏农林科技, 2009, 6: 142-143. (CUI Peng. Regulation of Ningxia Irrigation Area of Soil Salinization and Groundwater Dynamic status [J]. Ningxia Journal of Agriculture and Science and Technology, 2009, 6: 142-143. (in Chinese))
- [17] 何文寿, 刘阳春, 何进宇. 宁夏不同类型盐渍化土壤水溶盐含量与其电导率的关系[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(1): 111-116. (HE Wen shou, LIU Yang chun, HE Jǐnyu. Relationships between Soluble Salt Content and Electrical Conductivity for Different Types of Salt affected Soils in Ningxia [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(1): 111-116. (in Chinese))

(上接第 61 页)