

# “X”型宽尾墩在底流消能中的应用

范强,田忠\*,史润泽

(四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室,四川 成都 610065)

**摘要:**针对低  $Fr$  底流消力池消能率低的问题,提出进口“X”型宽尾墩 + 底流消能的消能模式,即在消力池进口设置“X”型宽尾墩,以达到分散水流、增加消能率的目的。通过试验,观测该型消能方式的水流形态、水深沿程分布、时均及脉动压强等水力学参数。结果表明:水流形成了底流 + 纵向拉伸水流 + 挑射水流的入池方式,水流分散入池,充分利用了消能水体;水跃长度为跃后水深与跃前水深差的 6.8 ~ 13.3 倍;消力池底板时均压强变化平稳,脉动压强均方根为进口流速水体的 0.03 ~ 0.18 倍;与传统底流消力池相比,消能率提高了 2 ~ 3 倍。对于低  $Fr$  底流消能,进口“X”型宽尾墩 + 底流消能是一种值得推荐的消能方式。

**关键词:**消力池;“X”型宽尾墩;底流消能;消能率

中图分类号:TV653.1

文献标志码:A

## Application of X-shaped Flaring Gate Piers in Bottom-flow Dissipation

FAN Qiang, TIAN Zhong\*, SHI Runze

(State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

**Abstract:** An energy dissipation model of “X-shaped flaring gate piers + bottom-flow dissipation” was put forward to the problem of low energy dissipation rate for small  $Fr$  value in stilling basin. X-shaped flaring gate piers were placed at the water inlet of the stilling basin to disperse water flow and increase energy dissipation rate. Through the experiment, some hydraulic parameters were observed, including the water flow patterns, the depths of the water surface line along the stilling basin, the time-average pressures, the pulsant pressure characteristics and so on. Experiments showed that the water flow forms a mode of “bottom flow + stretching flow in vertical + flow of jet”, the water flow fall into the stilling basin dispersely, which took full use of the interact water flow of each other. The lengths of hydraulic jump was 6.8 to 13.3 times to the different values of the initial flow depth and conjugate flow depth; the time-average pressure on crest was toally change smoothly; the root mean square of the pulsant pressure was 0.03 to 0.18 times to the inlet water. Compared with the traditional stilling basin, energy dissipation rate improved 2 to 3 times. For small  $Fr$  value in stilling basin, “X-shaped flaring gate piers + bottom-flow dissipation” is a worth recommending method.

**Key words:** stilling basin; X-shaped flaring gate piers; bottom-flow dissipation; energy dissipation rate

宽尾墩技术由中国率先发明并使用,由于其布置简单、消能效果显著,在之后的水利水电工程中得到了广泛的应用。多年来,众多专家学者对宽尾墩的消能技术进行了广泛的研究,如:王念慎从消能防冲、脉动压力等方面对宽尾墩与消力池的联合运用方案进行了研究,得出“宽尾墩与消力池联合布置

是高坝泄流消能的优秀方式”的结论<sup>[1]</sup>;尹进步等通过水力学模型试验,对与宽尾墩联合使用的消力池底板时均压强与脉动压强的分布规律进行了研究,得出采用“X”型宽尾墩的脉动压强比采用“Y”型宽尾墩减小约 20% 以上的结论<sup>[2]</sup>;李乃稳等通过对高拱坝表孔宽尾墩流道内水流特性进行数值模拟

收稿日期:2016-04-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51179113)

作者简介:范强(1990—),男,硕士生.研究方向:防灾减灾. E-mail:1562902746@qq.com

\*通信联系人 E-mail:602091581@qq.com

网络出版时间:2016-6-30 10:15:55

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/51.1596.T.20160630.1015.002.html>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

研究,得出了宽尾墩应用于高拱坝泄洪表孔后,表孔宽尾墩下泄水流具有良好的垂向扩散和纵向拉长效果的结论<sup>[3]</sup>等众多研究成果<sup>[4-8]</sup>。这些研究成果对宽尾墩技术的提高起到了推动作用,也极大地扩展了宽尾墩的应用领域。

将宽尾墩与坝下消能方式相结合,在一定程度上能够克服坝下消能方式单一的缺点。坝下消能方式主要有底流消能、挑流消能、面流消能及消力岸消能等多种型式<sup>[9-12]</sup>,因底流消能具有流态稳定、冲刷轻微及雾化范围小等优点,在软基建坝、坝体两岸有滑坡体隐患或其他消能方式不能适应地形地质条件等工程时,常采用底流消能。

底流消力池的消能效果随进口 $Fr$ 的增大而增大,但对于低弗氏数,当 $Fr < 3$ 时,消能率小于25.6%。为提高低 $Fr$ 底流消力池的消能率,将宽尾墩技术与底流消能方式相结合,提出进口“X”型宽尾墩+底流消能的消能模式,即在消力池进口设置“X”型宽尾墩,以达到分散水流、增加消能率的目的。

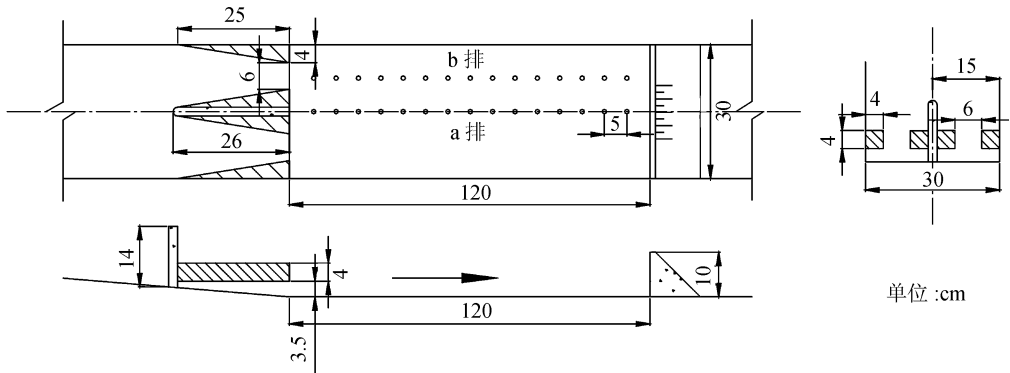


图2 “X”型宽尾墩布置

Fig.2 Lay-out of X-shaped flaring gate piers

消力池水深采用刻度为1 mm的钢尺测量,跃后水深及水跃长度通过测出的水面线确定。在消力池底板中轴线及中轴线与右边墙中线布置两排测压孔(图2),编号分别为 $a_1 \sim a_{15}$ 、 $b_1 \sim b_{15}$ ;测压孔顺水流方向间隔布置,间距均为5.0 cm,两排测压孔间距7.5 cm,采用测压管测量时均压强;脉动压强采用固态单晶硅片压阻式传感器测量,传感器输出信号通过成都泰斯特公司生产的TST5000型高速数据采集器采集,由计算机自动控制采集、监测和数据处理。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 水流形态

试验中选取4组流量对消力池内的水流形态进行观察,流量从小到大分别为: $Q_1 = 0.045 \text{ m}^3/\text{s}$ ,

的。通过试验研究,观测该型消能方式的水流形态、水深沿程分布、时均及脉动压强等水力学参数,并对其消能率进行分析。

### 1 试验装置及测试手段

试验在水槽中进行,水槽宽0.3 m,上游坡度 $i = 6.75\%$ ,下游坡度 $i = 0$ ,消力池设置在平坡段,消力池长1.2 m,后部尾坎高0.1 cm,坎后水槽长2.0 m,见图1。



图1 试验装置

Fig.1 Experiment equipment

消力池进口布置2组“X”型宽尾墩,宽尾墩宽、高均为4 cm,顺水流方向长为25 cm,见图2。

$Q_2 = 0.061 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_3 = 0.075 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_4 = 0.093 \text{ m}^3/\text{s}$ 。小流量 $Q_1$ 、 $Q_2$ 情况下,“X”型宽尾墩顶部不过流,水流以底流+纵向拉伸水流的方式入池,在消力池进口处发生传统水跃,消力池内壅高的水流向下游波状传播,水流较为平顺,见图3。



图3 “X”型宽尾墩顶部不过流

Fig.3 No water flow over the X-shaped flaring gate piers

大流量 $Q_3$ 、 $Q_4$ 情况下,“X”型宽尾墩顶部过流,

水流形成底流 + 纵向拉伸水流 + 挑射水流的入池方式,水流分散入池,充分利用下泄水体的混掺作用。在消力池前端,水流内部形成强烈的旋滚,水流无明显外溅及沿消力池边墙爬高现象,见图4。

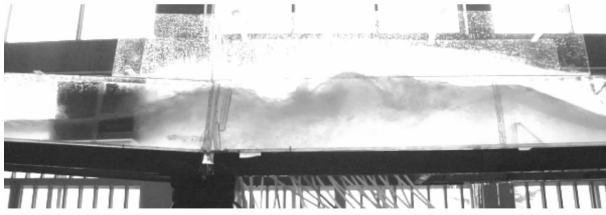


图4 “X”型宽尾墩顶部过流

Fig.4 Water flow over the X-shaped flaring gate piers

## 2.2 消力池水深及水跃长度

试验中对消力池沿程水深进行了测量,分析  $Q_1 \sim Q_4$  这4种不同流量下的水面线及水跃规律,测量结果见图5,图中,  $l$  表示消力池距离,  $h$  表示消力池水深。

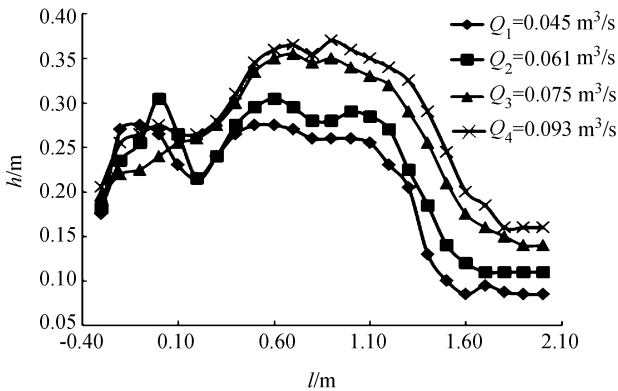


图5 不同流量下的消力池水深

Fig.5 Water depths of the stilling basin for different flows

流量  $Q_1 = 0.045 \text{ m}^3/\text{s}$  时,在消力池进水口上游 0.2 m 处,跃前水深 0.215 m;因流量较小,“X”型宽尾墩顶部不过水,水流在消力池内形成传统水跃。水深在消力池前端不断增大,在消力池后端水深逐渐衰减,在消力池进水口下游 0.8 m 处稳定为均匀流,跃后水深 0.260 m,跃长  $L = 0.6 \text{ m}$ ,跃前、跃后水深差  $\Delta h = 0.045 \text{ m}$ 。

流量  $Q_2 = 0.061 \text{ m}^3/\text{s}$  时,在消力池进水口上游 0.21 m 处,跃前水深 0.219 m;流量较  $Q_1$  有所增加,但斜坡段水深仍未淹没“X”型宽尾墩顶部,水流在消力池内形成传统水跃,消力池内水面线增高,在消力池进水口下游 0.85 m 处稳定为均匀流,跃后水深 0.280 m,跃长  $L = 0.64 \text{ m}$ ,跃前、跃后水深差  $\Delta h = 0.061 \text{ m}$ 。

随着流量的继续增加,当流量  $Q_3 = 0.075 \text{ m}^3/\text{s}$  时,在消力池进水口上游 0.1 m 处,跃前水深 0.255

m;斜坡段水深开始淹没“X”型宽尾墩顶部,水流以底流 + 纵向拉伸水流的方式进入消力池,消力池前端水流旋滚较为强烈,在消力池中部水流已较为平顺,并开始逐渐减小,在消力池进水口下游 0.9 m 处稳定为均匀流,水深 0.35 m,跃长  $L = 0.8 \text{ m}$ ,跃前、跃后水深差  $\Delta h = 0.095 \text{ m}$ 。

流量继续增大,当流量  $Q_4 = 0.093 \text{ m}^3/\text{s}$  时,在消力池进水口上游 0.15 m 处,跃前水深 0.265 m;斜坡段水深全部淹没“X”型宽尾墩,“X”型宽尾墩顶部挑射水流明显,消力池前端水流混掺旋滚强烈,水流在消力池中部逐渐平顺,水深开始减小,在消力池进水口下游 0.8 m 处稳定为均匀流,水深 0.360 m,跃长  $L = 0.65 \text{ m}$ ,跃前、跃后水深差  $\Delta h = 0.095 \text{ m}$ 。

综合研究以上试验成果,可以发现:

1) 当来流量较小时,“X”型宽尾墩底部及中间过水,在消力池内形成传统水跃,水流较平顺,无水流翻溅现象。

2) 当来流量较大时,“X”型宽尾墩顶部过流,水流以底流 + 纵向拉伸水流 + 挑射水流的方式进入消力池,水面线在消力池进口处明显壅高,在消力池前端水流内部混掺旋滚强烈,水流无翻溅及溢出消力池边墙现象。

3) 水跃跃长  $L$  与跃前、跃后水深差  $\Delta h$  的比值  $L/\Delta h$  在4组流量情况下分别为 13.3、10.5、8.4 及 6.8。水跃长度为跃前及跃后水深差的 6.8 ~ 13.3 倍。

## 2.3 时均压强

在消力池底板中轴线及中轴线与右边墙中线布置两排测压孔,编号分别为  $a_1 \sim a_{15}$ 、 $b_1 \sim b_{15}$ ,通过对比在4组不同流量下消力池内的测压管读数,分析在底流消能消力池进口增加“X”型宽尾墩后消力池底板的时均压强特性,见图6,图中,  $P$  表示测压管值。

试验数据表明:相同流量情况下,  $a$ 、 $b$  排测压管时均压强规律性相同;随着流量的增大,消力池底板时均压强随之增大,流量由  $Q_2 = 0.061 \text{ m}^3/\text{s}$  增加到  $Q_3 = 0.075 \text{ m}^3/\text{s}$  时,消力池前端底板压强值增加较大,这主要是由于在流量达到  $Q_3$  时,“X”型宽尾墩顶部过流,入池水流在消力池前端混掺强烈导致底板压强值变高。

通过试验观察及数据分析,在底流消能中增加“X”型宽尾墩后,消力池底板时均压强变化平稳、无压强突变点产生;与实测水深数据相比,时均压强值略大于相同点的消力池水深值。

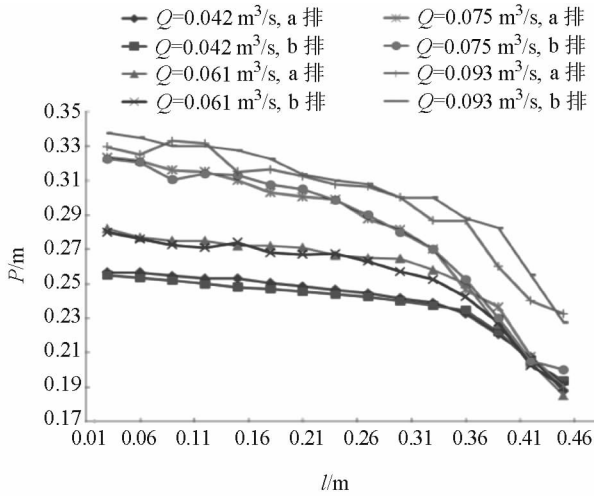


图6 测压管时均压强值

Fig.6 Time-average presses of piezometer tube

2.4 脉动压强

选用最大流量  $Q_4 = 0.093 \text{ m}^3/\text{s}$  对 a、b 两排测压孔的脉动压强进行采集并对其数据进行分析。

脉动压强均方根与进口流速水体的比值  $\sigma/\sqrt{2g}$  在消力池的沿程分布能够反映消力池底板不同位置的脉动压强大小,根据试验数据绘制的消力池前端脉动压强分布如图7所示。

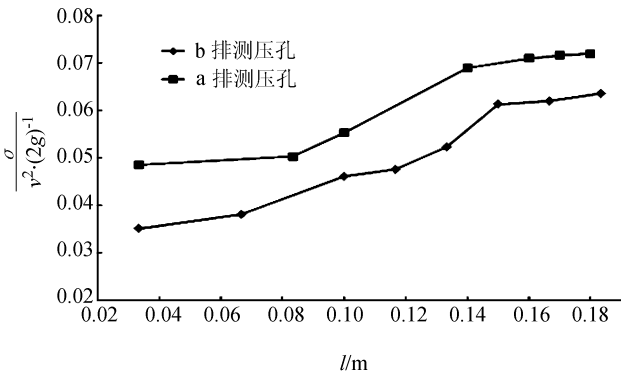


图7 脉动压强分布

Fig.7 Fluctuation pressure distribution

结果表明,两排测压孔的脉动压强分布规律基本相同。流量  $Q_4$  下,“X”型宽尾墩顶部过流,水流以底流+纵向拉伸水流+挑射水流的方式进入消力池,下泄水体在中轴线附近紊动更为强烈,因此,a排测压孔的脉动压强值较b排脉动压强值略高。通过对脉动压强数据的进一步分析可知:脉动压强均方根为进口流速水体的0.03~0.18倍。

2.5 消能率

水跃的消能率一般用消能系数来表示,水跃段水总头损失  $E$  与跃前断面比能  $E_1$  之比称为水跃的消能系数,以符号  $K_j$  表示,则  $K_j = E/E_1$ ,消能系数

$K_j$  越大则水跃的消能效率越高。棱柱体矩形水平明渠的理论消能系数按下式计算:

$$K_j = \frac{E}{E_1} = \frac{\frac{h_1}{4\eta} (\eta - 1)^3}{h_1 + \frac{v^2}{2g}} = \frac{(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1)^3}{8(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1)(2 + Fr_1^2)}$$

式中: $h_1$  为跃前断面水深; $h_2$  为跃后断面水深; $\eta$  为共轭水深比, $\eta = h_2/h_1$ ; $v$  为跃前断面平均流速; $Fr_1$  为跃前断面弗劳德数。

由公式可知,消能系数  $K_j$  为跃前断面弗劳德数  $Fr_1$  的函数。且  $K_j$  随着  $Fr_1$  的增大而增大,因此, $Fr_1$  越大,水跃的消能效率也越高。对于低弗氏数的底流消力池,当  $Fr_1 < 3$  时,理论消能率小于25.6%。

通过计算4组不同流量下跃前断面的弗劳德数  $Fr_1$ ,根据公式求得理论消能系数  $K_j$ ;通过计算跃前及跃后断面的断面比能  $E_1$ 、 $E_2$ ,求得实际消能系数  $K_j' = (E_1 - E_2)/E_1$ ;对比  $K_j$  及  $K_j'$  的大小,判断在底流消能中加入“X”型宽尾墩后是否提高了水跃的消能率,计算的理论与实际消能系数如表1所示。

表1 消能系数统计

Tab.1 Energy dissipation ratio statistics

组次	流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	弗劳德数 $Fr_1$	理论消能系数 $K_j$	实际消能系数 $K_j'$
1	0.045	1.659	0.040	0.126
2	0.061	1.842	0.066	0.178
3	0.075	2.184	0.121	0.292
4	0.093	2.357	0.151	0.353

分析表1数据可知:在4组不同流量下,消力池进口增加“X”型宽尾墩后的消能率明显高于传统消力池的理论消能率,消能率提高了2~3倍。

3 结论

对于低弗氏数底流消能过程中消能率低的问题,提出了一种进口“X”型宽尾墩+底流消能”的消能方式,使水流通过宽尾墩后形成底流+纵向拉伸水流+挑射水流的形式,充分利用下泄水流之间的相互作用消能。通过试验观测,分析该型消能方式的水流形态、消力池水深分布、时均及脉动压强等水力学特性,并对比分析了该型消能方式与传统底流消能的消能率。

试验表明,该型消能方式水流平稳,无水流翻溅及溢出消力池边墙现象,消力池底板时均压强及脉

动压强变化平稳、无压强突变点,效能率为传统底流消能方式的2~3倍。对于低弗氏数的底流消能,进口“X”型宽尾墩+底流消能是一种非常有效的消能方式。

#### 参考文献:

- [1] Wang Nianshen. A laboratory study on hydraulic characteristics of flaring gate piers and stilling pool in combined application[J]. Shuili Xuebao, 1986(9): 15-23. [王念慎. 采用宽尾墩加消力池水工布置的水力特性试验研究[J]. 水利学报, 1986(9): 15-23.]
- [2] Yin Jinbu, Liang Zongxiang, Zheng Zhi, et al. Experimental study on the bottom pressure of a stilling basin combined with flaring gate piers[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(4): 103-108. [尹进步, 梁宗祥, 郑治, 等. 与宽尾墩联合使用的消力池底板压强特性试验研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(4): 103-108.]
- [3] Li Naiwen, Xu Weilin, Zhang Faxing, et al. Study on numerical simulation of 3-D flow formed by flaring gate piers on surface spillways in high arch dams[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2008, 40(2): 19-25. [李乃稳, 许唯临, 张法星, 等. 高拱坝表孔宽尾墩流道内水流特性的数值模拟研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2008, 40(2): 19-25.]
- [4] Nan Xiaohong, Liang Zongxiang, Liu Hansheng. New type of flaring pier for improving energy dissipation of stepped surface over flow dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(8): 49-57. [南晓红, 梁宗祥, 刘韩生. 新型宽尾墩在索风营水电站的应用与研究[J]. 水利学报, 2003, 34(8): 49-57.]
- [5] Mo Zhengyu, Wu Chao, Lu Hong, et al. Relationship of location of flaring gate piers, Froude number at section of starting flare and weir head[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2007, 39(4): 26-30. [莫政宇, 伍超, 卢红, 等. 宽尾墩位置始扩点佛汝德数与堰上水头关系[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2007, 39(4): 26-30.]
- [6] Hu Yaohua, Wu Chao, Zhang Ting, et al. Affect factors analysis of aerated cavity of X-shaped flaring gate pier[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2007, 39(3): 24-28. [胡耀华, 伍超, 张挺, 等. X型宽尾墩阶梯掺气空腔影响因素分析[J]. 四川大学

学报(工程科学版), 2007, 39(3): 24-28.]

- [7] Lu Yanna, Li Longguo, Li Naiwen, et al. Study on pressure characteristics of the flaring gate pier on the surface spillway in high arch dam[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2014, 46(Suppl 1): 49-56. [卢艳娜, 李龙国, 李乃稳, 等. 宽尾墩应用于高拱坝表孔后的压力特性[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(增刊1): 49-56.]
- [8] Yin Jinbu, Liang Zongxiang, Gong Honglin. Experimental study on flow characteristics of 3-D hydraulic jump of flaring gate piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(11): 1333-1338. [尹进步, 梁宗祥, 龚红林. 宽尾墩三元水跃特性试验研究[J]. 水利学报, 2010, 41(11): 1333-1338.]
- [9] Liu Da, Liao Huasheng, Li Lianxia, et al. Large eddy simulation on stilling basin with shallow-water cushion[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2014, 46(5): 28-34. [刘达, 廖华胜, 李连侠, 等. 浅水垫消力池的大涡模拟研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(5): 28-34.]
- [10] Xie Shengzong, Zhu Ronglin, Li Shiqin, et al. Hydraulics of bucket basin equipped with flaring gate piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992, 32(2): 7-18. [谢省宗, 朱荣林, 李世琴, 等. 宽尾墩戽式消力池联合消能工的水力特性及其水力计算方法[J]. 水利学报, 1992, 32(2): 7-18.]
- [11] Nan Junhu, Niu Zhengming, Zhang Dong, et al. Numerical simulation of cavity gyrating flow in gyrating discharge tunnel[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2015, 47(1): 76-83. [南军虎, 牛争鸣, 张东, 等. 旋流消能工内空腔旋流的数值模拟[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(1): 76-83.]
- [12] Li Naiwen, Li Longguo, Zhuang Wenhua, et al. Hydraulic characteristics of the wall-jet region in a pool with an oblique submerged jet[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2015, 47(3): 14-20. [李乃稳, 李龙国, 庄文化, 等. 水垫塘冲击射流附壁区的水力特性[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(3): 14-20.]