

突扩式跌坎消力池掺气特性试验

张红梅,刘经强,于新雨,高媛,李树宁

(山东农业大学水利土木工程学院,山东泰安 271018)

摘要:采用模型试验对突扩式跌坎消力池内水流的掺气浓度进行了量测,研究了来流条件、突扩比、水流流态对掺气特性的影响。结果表明:突扩式跌坎消力池掺气水流典型流态为水跃流叠加在射流之上,跃首被射流分裂成两部分,气泡跃移区在泄槽延长线范围内,长度较无突扩跌坎消力池有所减小,气泡悬移区长度有所增加,临底长度有所减小,突扩处为清水回流区,携带部分气泡;无突扩跌坎消力池底板掺气浓度呈降峰形曲线分布,各纵向断面沿程掺气浓度分布均匀;突扩式跌坎消力池底板掺气浓度呈升峰形曲线分布,掺气浓度在消力池底板1/4中线处最大,1/2中线处次之,靠近边墙处最小;在同一水力条件下,突扩式跌坎消力池底板掺气浓度较无突扩跌坎消力池有显著降低,且消力池底板掺气浓度不随突扩比的增大而减小。

关键词:突扩式跌坎;消力池;掺气;流态;模型试验

中图分类号:TV653+.1;TV131.61 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2021)06-0082-06

Experimental research on aeration characteristics of a stilling pool with drop sill and sudden expansion//ZHANG Hongmei, LIU Jingqiang, YU Xinyu, GAO Yuan, LI Shuning (College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

Abstract: Based on the model test, the aeration concentration of the water flow in a stilling pool with drop sill and sudden expansion was measured, and the influence of incoming flow conditions, sudden expansion ratio, and flow state on the aeration characteristics was studied. The results show that the typical flow pattern of the aerated water flow in a sudden-expansion slumping stilling pool is a hydraulic jump superimposed on the jet of which the head is split into two parts. The bubble zone is within the extension of the chute and the length is reduced compared with the stilling pool without sudden expansion. The length of the drip zone is increased, but its length near the bottom is reduced. A pure water recirculation zone containing bubbles occurs at the sudden expansion. The aeration concentration of the bottom plate of the stilling pool without sudden expansion shows a peak-decreasing curve distribution, and the aeration concentration of each longitudinal section is evenly distributed. The aeration concentration of the bottom plate of the stilling pool with sudden expansion shows a peak-rising curve distribution, with the highest aeration concentration at the 1/4 midline of the floor, the second highest concentration at the 1/2 midline of the floor, and the lowest concentration near the side walls. Under the same hydraulic conditions, the aeration concentration at the bottom of the sudden expansion stilling pool is significantly lower than that without sudden expansion, and the aeration concentration does not decrease with the increase of the sudden expansion ratio.

Key words: drop sill and sudden expansion; stilling pool; aeration; flow pattern; model test

传统底流消能工多应用于中小型工程,在高坝泄流消能中应用很少。突扩式跌坎消力池作为一种应用于高水头、大单宽流量工程的新型消能工,既对生态环境比较友好,又能显著减低消力池内部水力学指标,在国内外很多工程中得到了很好的应用^[1-2]。突扩式跌坎消力池由于侧向突扩的存在,使得入射水流进入消力池后,流场几何形状发生突变,水流失去了两侧固体边壁的约束,在主流两侧形成了立轴漩涡,属于典型的三元混合流态^[3],消力池内部水流结构、压强分布等较无突扩跌坎消力池更加复杂^[4-5]。近年来不少学者对突扩式跌坎消力池进行了研究,如黄海艳等^[6-9]基于水力学模型试验,分析研究了突扩比、跌坎深度、入池水流弗劳德数等因素对消力池内底板及边墙时均压强、临底流速及近墙流速的影响;王海军等^[10]基于模型试验研究了消力池突扩侧立轴漩涡的运动范围及运动形式;金

瑾等^[11-12]通过数值模拟方法模拟了多股跌扩型底流消能工涡旋分布情况;李树宁等^[13-16]通过模型试验得出了消力池底板最大临底流速、最大动水压强、最大上举力的经验估算公式;张文静^[17]基于模型试验研究了突扩比、入池能量、尾坎高度、池长对突扩式跌坎消力池底板临底流速和动水压强的影响。

由于入射水流与消力池内水体形成紊动剧烈的剪切面,导致大量空气被卷吸入水中形成水气两相流,水流紊流流场中含有气泡时,原来的紊流结构势必会发生变化,影响消力池内的水力学指标,国内外专家学者基于水工模型试验对工程上常见的消能工如水垫塘、消力池掺气现象进行了研究。郭子中等^[18]研究了二元混合流掺气特性,得到了其掺气浓度分布规律;董志勇等^[5-19]研究了掺气对射流冲击水垫塘底部及坑底压强影响的机理;张锦等^[20]通过水力学模型试验,得到入池流量、跌坎深度以及水流入射角度对壁射流区掺气浓度沿程分布的影响规律;Chanson 等^[21-22]研究了水跃中的掺气和紊动特性,给出了掺气的脉动频率以及气泡输移规律;吴建华等^[23]研究了水跃掺气池的掺气特性,得出了其影响因素;辜晋德等^[24]通过 1 : 50 和 1 : 100 两个不同比尺模型研究了挑流水垫塘的掺气比尺效应。以上研究均基于二元流动,而关于突扩式跌坎消力池三元流动的掺气研究成果还比较少,基于此,本文通过模型试验,对不同流能比及突扩比的突扩式跌坎消力池掺气特性进行了初步研究,分析了其掺气浓度的分布规律,旨在丰富突扩式跌坎消力池研究成果,为其安全稳定运行提供理论依据。

1 试验装置与测点布置

试验在山东农业大学水工实验室进行。整个试验系统采用循环供水,试验模型主要由高位水箱、模型试验区、尾水池、回水渠和地下水库等部分组成,图 1 为试验模型示意图,泄槽段水平长 416 cm,高差为 105 cm,宽度为 50 cm,底坡为 14°;消力池段长度

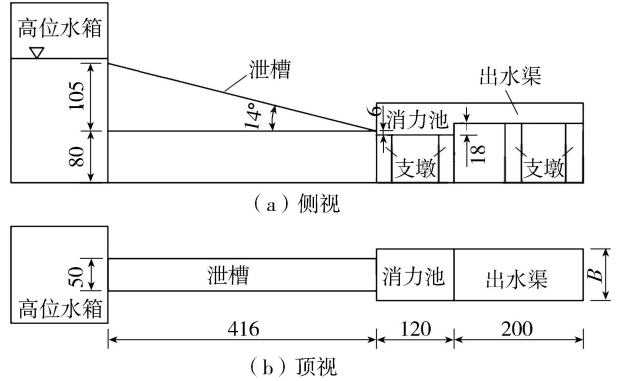


图 1 试验模型(单位:cm)

为 120 cm,跌坎高为 6 cm,尾坎高为 18 cm,消力池下游出水渠段长度为 200 cm,底坡为 1/100。试验中采用了 50 cm、65 cm、80 cm 3 个不同的消力池宽度,对应 3 个不同突扩比(消力池底板宽度与泄槽宽度的比值,用 β 表示),即 1.0、1.3 和 1.6。图 2 为消力池底板测点布置(以 $\beta=1.3$ 为例),以消力池跌坎桩号为原点,沿池长顺水流方向为 x 方向,沿池宽垂直水流方向为 y 方向,沿消力池底板 1/2 中线、1/4 中线、边墙线顺水流方向每间隔 10 cm 布置一个掺气浓度传感器,共布置 30 个,用于测量无突扩跌坎消力池($\beta=1.0$)及突扩式跌坎消力池($\beta=1.3$ 、1.6)底板的掺气浓度。

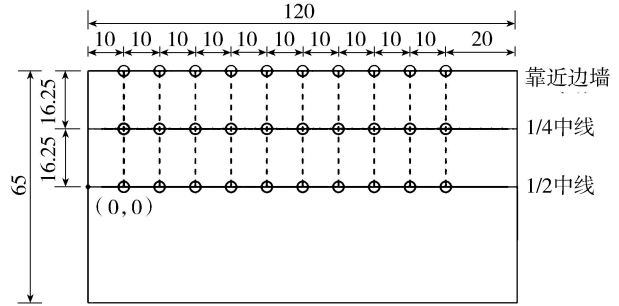


图 2 消力池底板掺气浓度测点布置(单位:cm)

试验在 3 个不同来流条件下进行,流量测量采用中国开封仪表有限公司生产的 E-mag C 型电磁流量计,通过开关闸阀调节流量,采用电磁流量计读取流量值。根据实际的试验条件,用反映水力条件的无量纲数——流能比 $k(k=q/g^{0.5}h^{1.5}$,其中 q 为单宽流量, h 为上下游水位差)来进行 3 个工况的测量,其中 k 分别为 0.014、0.018 和 0.021,对应出水渠末端水位分别为 4.4 cm、5.0 cm 和 5.7 cm。掺气浓度采用中国水利水电科学研究院最新研制的 DDCQY-2016M 型电导掺气仪与 DJ800 多功能采集仪组合使用进行量测,采样频率为 100 Hz,采样历时 82 s,掺气浓度误差小于 0.3%。

2 试验结果与分析

2.1 掺气水流流态

图 3 为同等水力条件下($k=0.018$),无突扩和突扩式跌坎消力池内典型的掺气水流流态。从图 3 可以看出,两种体型的消力池掺气水流典型流态为水跃流和射流叠加而成的混合流,且水跃流叠加在射流之上,跃首被射流分裂成两部分;整个消力池主要分为气泡跃移区、气泡悬移区及清水区 3 个区域,且体型不同,区域范围大小也有所不同。无突扩跌坎消力池($\beta=1.0$)距离跃首约 0.42l(l 为消力池长度)处有大量水团跃出水面,整个水跃表面为气泡跃移区,跃尾为清水区,中间部分是气泡悬移区,跃

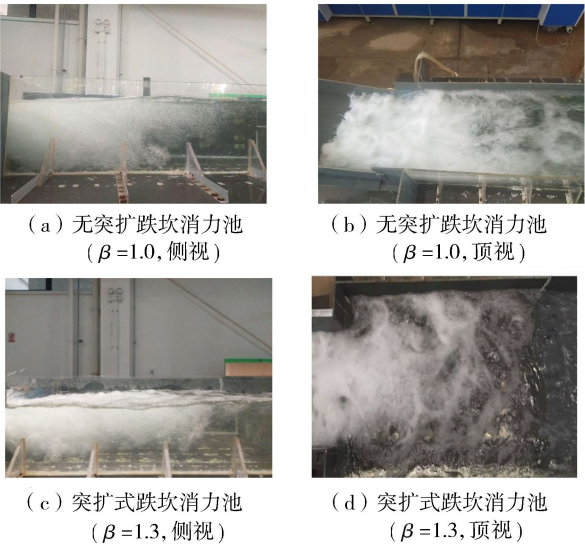


图3 掺气水流流态

移区气泡比较密集、连续,以泡沫层形式存在,相比较而言气泡悬移区气泡分布比较均匀、稀疏,且一直延续到消力池底板;突扩式跌坎消力池($\beta=1.3$)气泡跃移区在泄槽延长线范围内,长度较无突扩跌坎消力池有所减小,气泡悬移区长度有所增加,气泡分布更加密集,临底长度有所减小,只在冲击区有临底现象,突扩处为清水回流区,携带部分气泡。这与消力池内掺气水流特性与水流内部流动密切相关。跌坎消力池的典型流态是射流与水跃流的混合流,高速射流在空气扩散中掺入大量空气,形成高浓度的水气二相流,且在水流入水处掺入大量空气,入水过程中与水跃之间强烈剪切、混掺、扩散,跃首被射流分裂成两部分。表面水波在强烈紊动、破碎、飞溅中卷入大量空气,同时由于水跃旋涡卷吸、输运了大量的气泡,使得气泡跃移区气泡大量连续密集存在,掺气浓度较大。掺入的空气一部分在紊动作用下卷入旋滚区形成悬移区,一部分随水流带走,直到水跃下游溢出水面形成清水区。由于突扩的存在,进入消力池的射流失去了两侧固体边壁的直接约束,在突扩区域内形成了射流侧的扩散与回流,耗散掉部分进入消力池的能量,使得入池射流与水跃之间剪切、紊动减小,因此气泡跃移区浓度较低,悬移区范围较大,清水区较小。

2.2 消力池底板掺气浓度分布特性

图4和图5分别给出了无突扩和突扩式跌坎消力池底板掺气浓度分布情况(以相对测点位置 x/l 为横坐标,其中 x 为测点与消力池跌坎之间的距离)。从图4可以看出,在同一流能比($k=0.018$)条件下,无突扩跌坎消力池底板掺气浓度呈降峰形曲线分布,沿程先迅速衰减后趋于平稳,最大值出现在跃首位置,且1/4中线处、1/2中线处及靠近边墙处

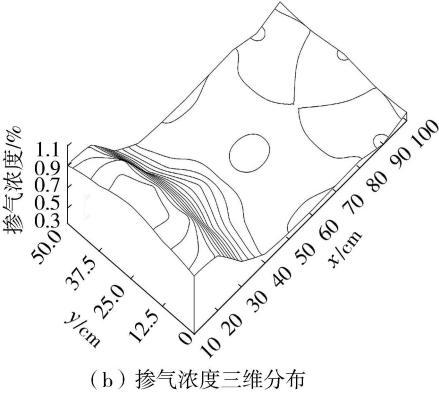
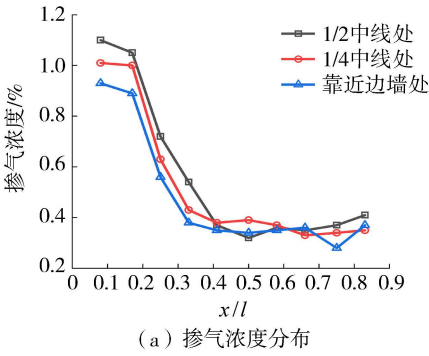


图4 无突扩跌坎消力池底板掺气浓度分布
($\beta=1.0, k=0.018$)

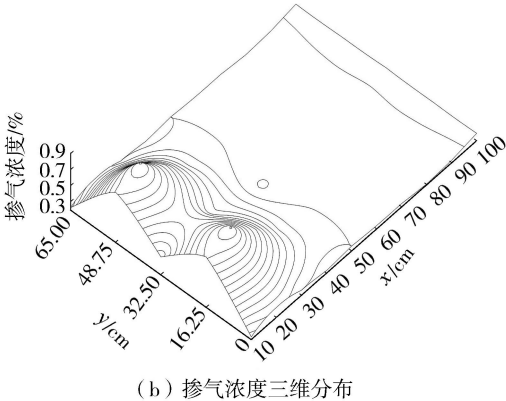
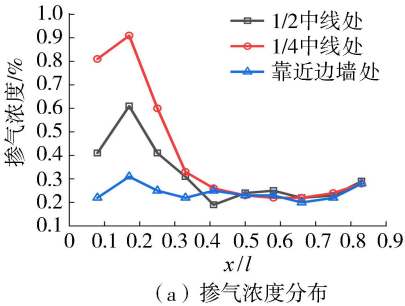


图5 突扩式跌坎消力池底板掺气浓度分布
($\beta=1.3, k=0.018$)

掺气浓度分布比较均匀,1/2中线处略大。由图5可以看出,在同一流能比($k=0.018$)条件下,突扩式跌坎消力池底板掺气浓度呈升峰型曲线分布,沿程先增大到一个最大值再逐渐衰减最后趋于平稳,最大值出现在冲击点附近,且1/4中线处掺气浓度最

大,1/2 中线处次之,靠近边墙处最小,这是由各自的掺气水流流态决定的。无突扩跌坎消力池水流分为 3 个区域,水跃表面是气泡跃移区,掺气浓度最大,跃尾是清水区,中间是气泡悬移区,掺气浓度居中;对于消力池底板,主要是气泡跃移区和清水区,高速掺气射流入池到达底板后,底部强迫掺气增多,掺气分别向壁射流区扩散,同时跌坎下面存在底部旋滚区,卷入大量空气,因此消力池底板首端掺气浓度最大,随着掺气扩散,浓度逐渐衰减,到达跃尾清水区后掺气浓度趋于平稳。突扩式跌坎消力池高速掺气射流入池到达底板后,掺气分别在壁射流区、突扩侧扩散,同时跌坎下底流旋滚携带气泡也向突扩侧扩散,因此消力池底板冲击点掺气浓度最大,后面逐渐衰减至清水区趋于平稳;突扩式跌坎消力池由于突扩的存在,由原来的二元流变成了复杂的三元流动,射流进入消力池,水跃被分成两部分,射流横向扩散叠加主流的卷吸作用,使得射流边界线附近 1/4 中线处掺气浓度最大,射流中心线处掺气浓度略小,突扩侧为清水回流区,掺气浓度最小。

2.3 入池能量对消力池底板掺气浓度的影响

图 6 给出了无突扩和突扩式跌坎消力池底板 1/2 中线处、1/4 中线处及靠近边墙处最大掺气浓度与入池能量的关系,其中入池能量用流能比来表征。从图 6 可以看出,无突扩和突扩式跌坎消力池底板最大掺气浓度沿程均随着流能比的增大而增大,这是因为入池能量越大,入池射流与周围水体剪切、摩擦作用越大,从水面卷入空气越多,同时到达底板后冲击作用增强,底部强迫掺气也增多。

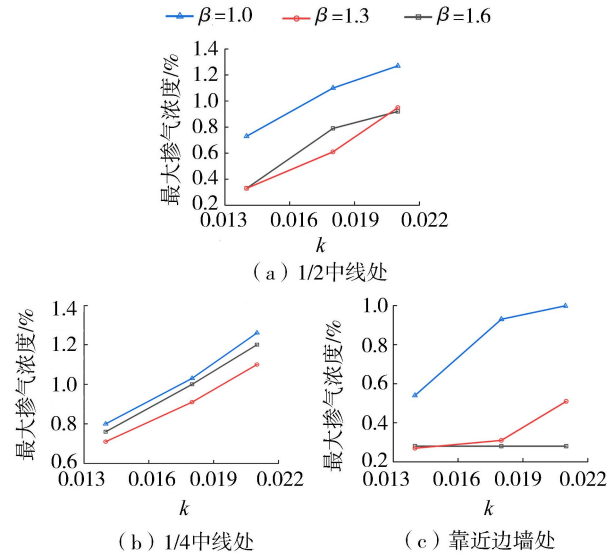


图 6 入池能量对消力池底板掺气浓度的影响

2.4 突扩比对消力池底板掺气浓度的影响

图 7 给出了突扩比对消力池底板掺气浓度的影响,可知在同一水力条件下,突扩式跌坎消力池底板

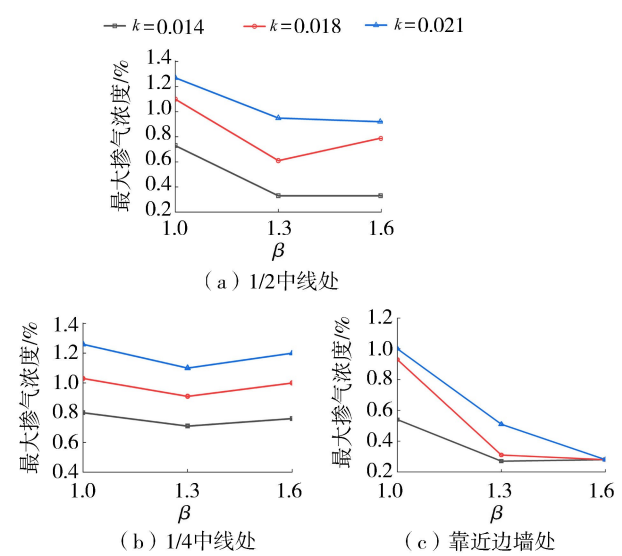


图 7 突扩比对消力池底板掺气浓度的影响

掺气浓度较无突扩跌坎消力池有显著降低, $\beta=1.3$ 时,消力池底板 1/2 中线处最大掺气浓度降低了 25% ~ 55%,1/4 中线处降低了 12% 左右,靠近边墙处降低了 50% 左右; $\beta=1.6$ 时,消力池底板 1/2 中线处最大掺气浓度降低了 27% ~ 55%,1/4 中线处降低了 5% 左右,靠近边墙处降低了 70% 左右。同时发现,掺气浓度并不随着突扩比的增大而单调减小,在消力池底板 1/2 中线和 1/4 中线处 $\beta=1.6$ 的突扩式跌坎消力池比 $\beta=1.3$ 的突扩式跌坎消力池底板掺气浓度大,在靠近边墙处 $\beta=1.6$ 的突扩式跌坎消力池比 $\beta=1.3$ 的突扩式跌坎消力池底板掺气浓度小。这是由各自的掺气水流流态决定的,突扩式跌坎消力池气泡悬移区长度有所增加,临底长度有所减小,突扩侧为清水回流区,因此底板掺气浓度较无突扩时有显著降低;相同水力条件下,突扩比越大,消力池内相应水垫的深度也越小,高速射流入池后与池内水体产生剪切、混掺作用更强烈,底部强迫掺气强度更大,相应的消力池底板掺气浓度也随之增大,而突扩侧清水回流区越大,气泡溢出水面越多,靠近边墙区掺气浓度相应减小。

3 结 论

a. 突扩式跌坎消力池掺气水流典型流态为水跃流叠加在射流之上,跃首被射流分裂成两部分,气泡跃移区在泄槽延长线范围内,长度较无突扩跌坎消力池有所减小,气泡悬移区长度有所增加,临底长度有所减小,突扩处为清水回流区,携带部分气泡。

b. 无突扩跌坎消力池底板掺气浓度呈降峰形曲线分布,各纵向断面沿程掺气浓度分布均匀;突扩式跌坎消力池底板掺气浓度呈升峰型曲线分布,掺气浓度在消力池底板 1/4 中线处最大,1/2 中线处

次之,靠近边墙处最小。

c. 随着入池能量的增大,突扩式跌坎消力池底板的掺气浓度也随之增大。

d. 同一水力条件下,突扩式跌坎消力池底板掺气浓度较无突扩跌坎消力池有显著降低;掺气浓度并不随着突扩比的增大而单调减小,在消力池底板1/2中线和1/4中线处 $\beta=1.6$ 的突扩式跌坎消力池比 $\beta=1.3$ 的突扩式跌坎消力池底板掺气浓度大,在靠近边墙处 $\beta=1.6$ 的突扩式跌坎消力池比 $\beta=1.3$ 的突扩式跌坎消力池底板掺气浓度小。

参考文献:

- [1] 孙永娟,孙双科.高水头大单宽流量底流消能技术研究成果综述[J].水力发电,2005,31(8):70-72. (SUN Yongjuan,SUN Shuangke. Summary on research results of underflow energy dissipation technology with high head and large unit-width discharge[J]. Water Power,2005,31(8):70-72. (in Chinese))
- [2] 张锦,王海军,李明敏.跌坎型底流消能工淹没射流掺气浓度分布规律试验[J].云南水力发电,2015,31(3):6-11. (ZHANG Jin,WANG Haijun,LI Mingmin. Experimental study on air concentration of submerged jets of energy dissipater with step-down floor[J]. Yunnan Water Power,2015,31(3):6-11. (in Chinese))
- [3] 金明,郭子中.三元混合流初步研究[J].河海大学学报(自然科学版),1987,15(1):88-92. (JIN Ming, GUO Zizhong. Preliminary investigation of three-dimensional combined flow[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),1987,15(1):88-92. (in Chinese))
- [4] 聂孟喜,段冰,李琳琳.泄水建筑物中突扩突跌体型侧墙上的水力特性[J].清华大学学报(自然科学版),2006,46(12):1969-1972. (NIE Mengxi,DUAN Bing,LI Linlin. Hydraulic characteristics along the sidewall of a sluice downstream of a sudden lateral enlargement and vertical drop[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology),2006,46(12):1969-1972. (in Chinese))
- [5] 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))
- [6] 黄海艳,张强,王海军.跌扩型底流消能工水力特性的试验研究[J].中国农村水利水电,2010(7):86-88. (HUANG Haiyan,ZHANG Qiang,WANG Haijun. Experimental research on hydraulic characteristics of

underflow for energy dissipators by hydraulic jumps with sudden expansion and abrupt drop[J]. China Rural Water and Hydropower,2010(7):86-88. (in Chinese))

- [7] 陈文鑫,王立辉,王海军.跌扩型底流消能工突扩比对边墙水力学指标影响的试验研究[J].南水北调与水利科技,2010,8(2):20-22. (CHEN Wenxin,WANG Lihui,WANG Haijun. Experimental study on the expansion ratio influence of hydraulics characteristics near sidewall of falling-sill bottom-flow energy dissipator[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2010,8(2):20-22. (in Chinese))
- [8] 陈朝,毛舒娅,黄海艳,等.跌扩型底流消能工压力分布特性的试验研究[J].南水北调与水利科技,2011,9(1):36-39. (CHEN Zhao,MAO Shuya,HUANG Haiyan, et al. Experimental study on characteristic of pressure distribution about the falling-sill and expanding bottom-flow energy dissipater[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2011,9(1):36-39. (in Chinese))
- [9] 周书建.跌坎型底流消能工冲击区掺气特性试验研究[J].科学技术创新,2017(33):129-132. (ZHOU Shujian. Experimental study on aeration characteristics of impact zone of underflow energy dissipater[J]. Scientific and Technological Innovation,2017(33):129-132. (in Chinese))
- [10] 王海军,王立辉,杨红宣.突扩跌坎型底流消能工突扩后立轴漩涡水力特性研究[J].水力发电学报,2010,29(2):11-14. (WANG Haijun,WANG Lihui,YANG Hongxuan. Study on hydraulic characteristics of vertical vortices of a bottom-stepped energy dissipater with abrupt wall expansion[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2010,29(2):11-14. (in Chinese))
- [11] 金瑾,郑铁刚.跌扩型底流消能水力特性的数值模拟研究[J].石河子大学学报(自然科学版),2013,31(1):109-113. (JIN Jin,ZHENG Tiegang. Numerical simulation of hydraulics on energy dissipation by hydraulic jump with vertical drop and sudden enlargement[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science),2013,31(1):109-113. (in Chinese))
- [12] 郑铁刚,戴会超,孙双科,等.跌扩型底流消能漩涡特性的初步研究[J].水利水电技术,2013,44(11):29-33. (ZHENG Tiegang,DAI Huichao,SUN Shuangke, et al. Preliminary study of vortex on energy dissipation by hydraulic jump with vertical drop and sudden enlargement[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2013,44(11):29-33. (in Chinese))
- [13] 李树宁.跌坎消力池水动力荷载研究[D].天津:天津大学,2012.
- [14] 李树宁,杨敏,李会平,等.溢洪道陡槽底板上举力特性试验研究[J].中国农村水利水电,2016(5):153-156. (LI Shuning,YANG Min,LI Huiping, et al. Experimental

[15] 李树宁,杨敏.平底板急流区下表面脉动压力试验研究[J].中国农村水利水电,2016(4):123-125.(LI Shuning, YANG Min. Experimental investigation of fluctuating pressure acting on the undersurface of the flat floor in the jet region[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(4):123-125. (in Chinese))

[16] 李树宁,杨敏.跌坎消力池上举力特性试验研究[J].人民黄河,2016,38(3):89-91.(LI Shuning, YANG Min. Experimental research on characteristics of uplift force on stilling basin with drop sill[J]. Yellow River, 2016, 38(3):89-91. (in Chinese))

[17] 张文静.突扩式跌坎消力池水力特性实验研究[D].泰安:山东农业大学,2017.

[18] 郭子中,应新亚.二元混合流掺气特性初步研究[J].河海大学学报(自然科学版),1986,14(3):53-64.(GUO Zizhong, YING Xinya. Air entrainment characteristics of two-dimensional combined flow[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 1986, 14(3):53-64. (in Chinese))

[19] 邓军,许唯临,刘善均,等.射流掺气对水垫塘及坑底压强影响的实验研究[J].水科学进展,2009,20(3):373-378.(DENG Jun, XU Weilin, LIU Shanjun, et al. Influence of water jet aeration on pressure in scour pool and plunge pool[J]. Advances in Water Science, 2009, 20

[13] 王建华,钟华平,耿雷华,等.水资源可利用量计算[J]. 水科学进展,2006,17(4):549-553. (WANG Jiansheng, ZHONG Huaping, GEN Leihua, et al. Available water resources in China [J]. Advances in Water Science, 2006,17(4):549-553. (in Chinese))

[14] 郭周婷. 水资源可利用量估算初步分析[J]. 水文, 2001,21(5):23-26. (GUO Zhouting. Preliminary analysis of estimation of water resource availability [J]. Journal of China Hydrological,2001,21(5):23-26. (in Chinese))

[15] 雷志栋,尚松浩,杨诗秀,等. 叶尔羌河平原绿洲水资源可利用量的探讨[J]. 灌溉排水,1998,18(2):10-13. (LEI Zhidong, SHANG Songhao, YANG Shixiu, et al. Discussion on the water resources available in the plain of Reerqiang River[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 1998,18(2):10-13. (in Chinese))

[16] 陈显维. 国内外水资源可利用量概念和计算方法研究现状[J]. 水利水电快报,2007,28(2):7-10. (CHEN Xianwei. Research Status of concept and calculation method of available water resources at home and abroad [J]. Express water Resources & Hydropower Information, 2007,28(2):7-10. (in Chinese))

[17] 魏佳,张守平,杨清伟,等. 基于工程供水能力的地表水

(收稿日期:2020-09-24 编辑:熊水斌)

(收稿日期:2020-10-27 编辑:骆超)