

大单宽流量下阶梯消能工预掺气 及消能研究

马飞, 田然, 吴建华

(河海大学 水利水电学院, 南京, 210098, Email: mafei921@163.com)

摘要: 大单宽流量下, 阶梯溢洪道掺气发生点下移, 易引起阶梯发生空蚀破坏。本研究提出了一种新颖的阶梯溢洪道预掺气设施, 即在阶梯末端设置突缩出口。水流经过突缩处时, 在过流表面产生局部水跃和射流, 二者卷吸了大量空气进入水流, 达到掺气减蚀之目的。本文研究了突缩掺气设施的流态、掺气浓度分布和消能率等水力特性, 给出了局部水跃的临界条件和消能率估算公式。研究结果表明, 收缩比是决定突缩预掺气设施能否形成局部水跃的关键因素, 在局部水跃和射流的组合流态下, 大单宽流量下的阶梯溢洪道可有效减免空蚀破坏。另外, 设置多级突缩掺气坎的阶梯溢洪道可显著提高其消能率。

关键词: 阶梯消能工; 预掺气; 局部水跃; 射流; 大单宽流量

1 引言

近年来, 随着碾压混凝土筑坝技术的普及, 阶梯溢洪道应用日益广泛。有研究表明, 阶梯溢洪道可使下游消力池长度减小约 1/3, 从而节省大量的工程投资^[1]。然而, 大单宽流量下, 阶梯溢洪道上掺气发生点将向下游移动, 阶梯溢洪道的上游部分因未发生掺气而可能导致阶梯面发生空蚀破坏, 从而限制了阶梯溢洪道更广泛的应用^[2]。

为使阶梯溢洪道更早发生掺气, 并提高其消能率, 带尾坎的阶梯溢洪道被提出。然而, 在大单宽流量下, 这种带尾坎的阶梯溢洪道首部仍会因无掺气而导致空蚀破坏。有学者在溢洪道首级阶梯设置通气孔, 或在溢洪道阶梯前设置掺气坎, 采用人工强迫掺气的方式对阶梯溢洪道上的水流进行预掺气^[3-5]。这两种方法在小流量情况下被证明是有效的, 但在大单宽流量下, 掺气坎的来流具有低佛氏数特点, 易发生空腔淹没, 且存在全断面掺气不足的问题。也有研究者在阶梯溢洪道上游设置宽尾墩, 充分利用宽尾墩水流垂向扩散, 减小阶梯过流单宽流量, 加强挑流水舌两侧掺气和水舌入水掺气作用, 从而达到增大单宽流量、提高水头应用范围的目的。但是, 这种强迫掺气型式存在宽尾墩处水翅过高, 下游水流流态较差等问题, 这时阶梯仅作为一种辅助消能设施在小单宽流量水流不易起挑时发挥作用。

吴建华等提出了挑流掺气池和水跃掺气池两种阶梯预掺气结构型式，利用挑流冲击水垫和完整水跃为阶梯水流提供预掺气，为解决大单宽流量下的阶梯溢洪道空化空蚀问题提供了新思路^[6-8]。目前，开发体型简单、便于施工的阶梯预掺气设施，为阶梯溢洪道提供防空蚀保护，仍是阶梯溢洪道亟待解决的问题之一。

本研究提出了一种新的阶梯溢洪道预掺气方法，采用结构简单的突缩结构型式，利用过流表面的局部水跃和收缩射流进行掺气，掺气在水流表面和底部同时发生，达到全断面掺气之目的，以解决大单宽流量下阶梯溢洪道的防空蚀问题。运用物理模型试验的研究方法对这种阶梯溢洪道上的突缩预掺气设施的水力特性进行了详细地研究。

2 试验装置与方法

物理模型试验装置如图 1 所示，包括钢板水箱、阶梯溢洪道、突缩掺气坎、量水堰和试验进出水系统等。阶梯溢洪道上游由一长为 50.0 cm 的宽顶堰与水箱连接，下游与排水渠连接。本试验研究中，阶梯溢洪道模型共 12 个阶梯，突缩掺气坎布置在第 3 级阶梯末端，以保证来流为急流，并尽可能地扩大阶梯防空化保护范围。另外，为了提高阶梯溢洪道消能，于第 10、12 号阶梯末端分别设置了突缩掺气坎。台阶高度 t 取为 9 cm，为利于形成局部水跃，突缩掺气坎所在台阶长取为 46.3 cm。突缩掺气坎下游的阶梯坡度可根据实际工程调整。

突缩掺气坎的结构体型如图 2 所示，即在收缩处的渠道两侧设置两道横向的墙，墙与渠道等高，墙厚取为 1.0 cm，实际工程中，墙厚可根据结构安全需要调整。渠道宽 $B = 15.0$ cm，经胸墙束窄后过流宽度为 b 。本试验研究中， b 分别取为 8.5 cm，10.0 cm，11.5 cm 和 13.0 cm，相应的收缩比 γ ($\gamma = b/B$) 为 0.867、0.767、0.667 和 0.567 (M1-M4)。试验中，单宽流量 q 为 0.09~0.56 m²/s。

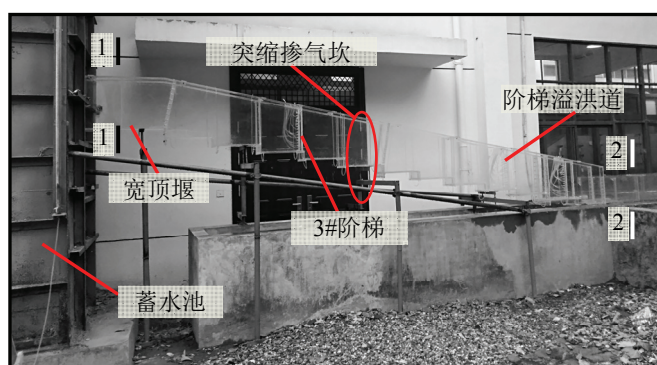


图1 试验装置

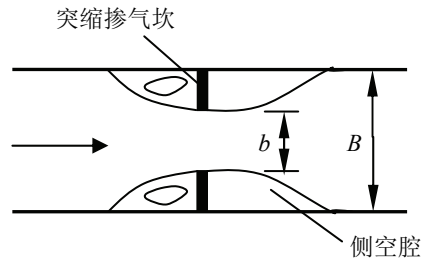


图2 突缩掺气坎结构示意图

用于为阶梯泄槽预掺气的掺气坎设置在第三级阶梯末端，底板掺气浓度测点布置在第5~11级阶梯底板中央，侧墙掺气浓度测点布置于第5级底板侧墙的中间，最低的测点距底板为3.0 cm，各测点间竖向距离为3.0 cm。掺气浓度用CQ6-2005电阻式掺气浓度仪测量，测量误差为 $\pm 0.3\%$ 。为计算阶梯溢洪道消能率，计算断面1和断面2分别设置在宽顶堰和溢洪道的末端（图1）。消能率 $\eta = (E_1 - E_2)/E_1$, $E_1 = h_1 + Z_1 + \alpha_1 v_1^2/2g$; $E_2 = h_2 + Z_2 + \alpha_2 v_2^2/2g$ 分别为1、2断面的总水头。 h_1 和 h_2 为1、2断面水深, Z_1 和 Z_2 为位置水头, v_1 和 v_2 为1、2断面平均流速,动能修正系数 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1.0$ 。选择阶梯溢洪道下游的水平渠道底板为基准面,有 $Z_2 = 0, Z_1 = 1.08\text{m}$ 。

3 试验结果与讨论

3.1 试验流态观察

图3所示为收缩比 γ 为0.667的突缩掺气坎流态。水流流至突缩掺气设施时,流动受到阻碍,水流表面发生局部水跃,随着流量增大,局部水跃随之增大。水流经过突缩掺气设施后被束窄,形成射流水舌,水舌下缘与台阶底板间形成底空腔。由图3可以明显观察到,在各来流情况下,阶梯溢洪道上的水流经过突缩处后发生了强烈的掺气现象。水流掺气的途径主要有3个方面。①水流表面的局部水跃卷吸了大量空气进入水流;②水舌上下缘表面与空气掺混,发生了较为强烈的掺气现象;③水舌撞击台阶底板处发生强烈掺气,由于底空腔和侧空腔与外界大气相连,空气可源源不断地得以补充。

根据窄缝式挑流鼻坎局部水跃的理论分析,局部水跃的发生主要受来流佛氏数和收缩结构参数影响^[1]。然而,在本试验研究范围内,结果表明局部水跃的发生仅与掺气坎的收缩比有关,即:当 $\gamma \leq 0.667$,局部水跃发生;当 $\gamma \geq 0.767$,局部水跃消失。

3.2 掺气浓度

图4为各模型底板掺气浓度沿程分布。对于M3和M4,局部水跃和射流同时发生,底板掺气浓度立即达到3.0%,并增加至4.5%,整个泄槽沿程底板掺气浓度大于2.7%;而对于M1和M2,由于局部水跃消失,底板掺气浓度显著降低,但仍大于1.0%。前人研究表

明：当掺气浓度大于 1.0%-2.0%时，可有效减免空蚀破坏^[9]。因此，本研究提出的突缩掺气坎可以保护阶梯溢洪道底板免受空蚀破坏。图 5 为第 5 级台阶边墙掺气浓度的竖向分布。对于 M1 和 M2，某些侧墙掺气浓度值低于 1.0%，面临空化空蚀风险。而 M3 和 M4 由于局部水跃的产生，其侧墙掺气浓度均高于 1.0%，，试验结果表明：对于阶梯溢洪道上的突缩掺气坎，局部水跃与射流组合流态较优。



图3 突缩掺气坎流态 ($b/B = 0.667, q = 0.09, 0.24, 0.56\text{m}^2/\text{s}$)

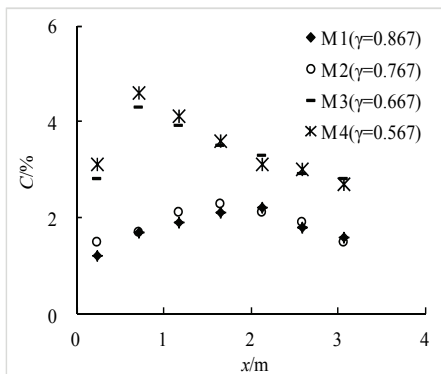


图4 底板掺气浓度沿程分布

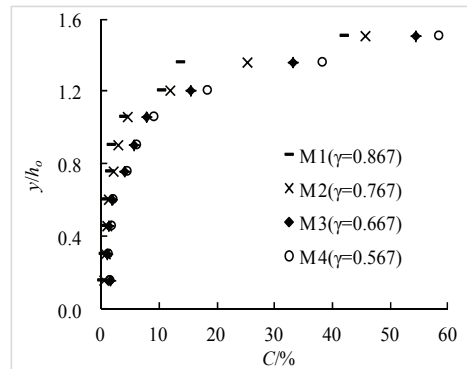


图5 侧墙掺气浓度竖向沿程分布

3.3 消能率

图6是消能率 η 与相对特征水深 d_c/t 的相互关系。 $d_c = (q^2/g)^{1/3}$ 是阶梯溢洪道上的临界水深, 其中 $g = 9.81\text{ms}^{-2}$ 为重力加速度。 q 为单宽流量, $t = 9\text{cm}$ 为阶梯高度。图6中, 带“○”的数据为传统阶梯溢洪道M0, 其他设置突缩掺气坎的阶梯溢洪道M1 – M4。由图6可知, 当 $d_c/t < 1.5$, 各模型的消能率较高, $\eta > 80\%$ 。当单宽流量增大, $d_c/t > 1.5$, 对于传统阶梯泄槽, η 随 d_c/t 的增大迅速降低, 而配置突缩掺气坎的泄槽消能率随 d_c/t 的增大的下降速率较为平缓, 二者在 $d_c/t = 3$ 时最大差值约达15%。这说明在大单宽流量时, 突缩掺气坎具有良好的消能效果。在本研究范围内, 收缩比对消能率影响较小, 故在设计用于消能的突缩掺气坎时, 可适当取较大的收缩比更为经济。

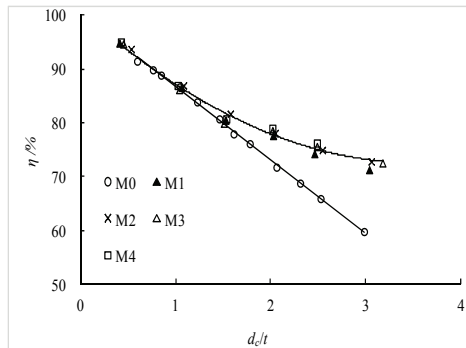


图6 消能率 η 随 d_c/t 的变化

4 结论

突缩掺气坎的流态可分为: 射流流态, 射流与局部水跃组合流态。局部水跃的发生主要取决于收缩比 γ , 当 $\gamma \leq 0.667$ 时, 局部水跃发生; 当 $\gamma \geq 0.767$ 时, 局部水跃消失。射流与局部水跃组合流态是突缩掺气坎较理想的流态。此流态下, 泄槽沿程底板掺气浓度均大于2.7%, 侧墙掺气浓度大于1.0%, 可避免了大单宽流量下的空化空蚀风险。对于设置多级突缩掺气坎的阶梯溢洪道, 大单宽流量下的消能率可提高15%以上。

参考文献

- 1 Chanson, H. Hydraulics of skimming flows over stepped channels and spillways. Journal of Hydraulic Research, 1994, 32(3): 445–460.
- 2 Chanson, H. A review of accidents and failures of stepped spillways and weirs. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water and Maritime Engineering, 2000, 142(4): 177–188.

- 3 Pfister, M., Hager, W. H., Minor, H-E. Stepped spillways: pre-aeration and spray reduction. *International Journal of Multiphase Flow*, 2006, 32(2): 269–284.
- 4 Pfister, M., Hager, W. H., Minor, H-E. Bottom Aeration of Stepped Chutes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 132(8): 850–853.
- 5 吴建华, 韩东旭, 周宇. 水跃掺气池的掺气特性. *水利水电科技进展*, 2016, 36 (3): 31–35.
- 6 Qian, S. T., Wu, J. H., Ma, F. Hydraulic performance of ski-jump-step energy dissipater. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 142 (10): 05016004-1–7.
- 7 Wu, J. H., Qian, S. T., Ma, F. A new design of ski-jump-step spillway. *Journal of Hydrodynamics*, 2016, 28 (5): 914–917.
- 8 彭勇, 张建民, 许唯临, 等. 前置掺气坎式阶梯溢洪道掺气水深及消能率的计算. *水科学进展*, 2009. 20(1): 63–68.
- 9 Peterka, A. J. The effect of entrained air on cavitation pitting. *Proceedings of Minnesota International Hydraulics Convention*. Minneapolis, Minnesota, 1953, 507–518.

Study on pre-aeration and energy dissipation on stepped chutes under large unit discharges

MA Fei, TIAN Ran, WU Jian-hua

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanning, 210098.

Email: mafei921@163.com)

Abstract: Stepped chutes are prone to cavitation damage due to the absence of air entrainment during large unit discharge. The present study proposes a simple pre-aeration device, called an abrupt contraction aerator, for stepped chutes. This aerator can generate a local hydraulic jump or a jet, which entrains the air into the flow and thus provides aerated flow for the stepped chute. The hydraulic characteristics of this aerator are experimentally investigated, such as flow regime, air concentration and energy dissipation. The test results demonstrate that the contraction ratio is key parameter for occurrence of local hydraulic jump at the suddenly contraction aerators, and the aerator provides adequate aerated flow for the stepped chute when the flow regime is the combination of a local hydraulic jump and a jet. In addition, the present aerators also are effective with regard to energy dissipation.

Key words: Stepped spillway; Pre-aeration; Local hydraulic jump; Jet; Large unit discharge.