

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221174

梯形消能墩—台阶组合式消能工水力特性研究

田 煜, 孙西欢, 李永业, 陈 润, 耿 宽

(太原理工大学水利科学与工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 为降低台阶负压,减少空化空蚀的影响,提高台阶消能效果,在传统台阶凸角位置增设梯形消能墩组成梯形消能墩—台阶组合式消能工,采用水工模型试验与数值模拟相结合的方法,研究梯形消能墩—台阶组合式消能工的水力特性。结果表明,梯形消能墩—台阶组合式消能工台阶水平面与竖直面在靠近凸角附近存在负压,有发生空化空蚀破坏的可能;但台阶水平面与竖直面负压区掺气浓度基本大于5%,可有效降低空化空蚀危害;在本研究范围内,梯形消能墩—台阶组合式消能工消能率可达70%以上,消能率随流量的增大而降低。该组合式消能工有利于减小台阶空化空蚀危害和提高台阶消能效果,可为台阶消能工设计和现有台阶溢洪道除险加固提供参考依据。

关键词: 台阶消能工; 梯形消能墩; 压强特性; 掺气效果; 消能特性

中图分类号: TV135.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)03-0099-04

1 引言

近年来,随着碾压混凝土筑坝技术的发展,台阶式消能工得到了广泛应用。当水流经过台阶消能工时,在台阶凹角处产生能量耗散,通过与上覆主流能量交换,利用漩涡内部的紊动促使水流能量耗散,有效增加了消能效果。目前,关于传统台阶消能工水力特性的研究成果较丰富。在水流流态方面,CHANSON H^[1]提出了划分水流流态的界限公式。在水流掺气方面,田嘉宁等^[2]提出了初始掺气点位置与断面掺气浓度的计算公式;RAZA A 等^[3]发现坡度越陡,非掺气区长度越短。在台阶压强特性方面,张志昌等^[4]分析了台阶水平面与竖直面的压强变化规律,发现台阶竖直面上靠近台阶凸角位置负压最大;邱毅等^[5]研究了坡度对台阶负压的影响,发现坡度越陡,台阶负压越大;赵相航等^[6]利用空化数研究台阶面上的空化特性,结果表明台阶水平面上最小空化数出现在凹角位置,竖直面上最小空化数出现在凸角位置;在消能特性方面,伍平等^[7]发现坡度越缓消能效果越好;常晓巍等^[8]研究了台阶溢洪道与消力池组合的消能效果,发现水流大部分能量消

散在台阶溢洪道上。现有研究表明,在台阶竖直面靠近凸角附近负压较大,易产生空化空蚀破坏。基于此,本文在台阶凸角位置布置梯形消能墩,将其命名为梯形消能墩—台阶组合式消能工,利用模型试验和数值模拟的方法,研究梯形消能墩—台阶组合式消能工的压强分布、掺气效果和消能效果,以期降低台阶负压,减小空化空蚀危害,提高消能率。

2 数学模型构建

2.1 湍流模型

采用 RNG κ - ϵ 模型模拟梯形消能墩—台阶组合式消能工,其中连续性方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程为:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

κ 方程为:

$$\frac{\partial(\rho \kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \kappa u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\sigma_\kappa (\mu + \mu_t) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_\kappa - \rho \epsilon \quad (3)$$

收稿日期: 2022-06-02, 修回日期: 2022-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179116)

作者简介: 田煜(1997-),男,硕士研究生,研究方向为水力学及河流动力学,E-mail:1113276628@qq.com

通讯作者: 孙西欢(1960-),男,博士、教授、博导,研究方向为工程水力学,E-mail:sunxihuan0065@163.com

ϵ 方程为:

$$\frac{\partial(\rho\epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\sigma_\epsilon (\mu + \mu_t) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{\kappa} G_\kappa - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{\kappa} \quad (4)$$

式中, ρ 为密度; t 为时间; u_i, u_j 均为速度分量; x_i, x_j 均为坐标分量; μ 为分子粘性系数; μ_t 为紊流粘性系数, 取 0.0845; $\sigma_\kappa, \sigma_\epsilon$ 分别为紊动能 κ 、紊动能耗散率 ϵ 对应的普朗特数; G_κ 为平均速度梯度引起的紊动能产生项; $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}$ 均为常数项, 分别取为 1.42、1.68。

2.2 网格划分及边界设置

数学模型分为引水渠、台阶段和尾水渠三部分。因此, 将网格块按引水渠、台阶段和尾水渠分为 3 块, 采用结构化网格, 对重点研究的台阶段网格加密处理, 网格尺寸为 3 mm(图 1)。上游水流入口边界采用流量边界; 下游水流出口边界采用自由出流边界; 顶部边界采用大气压边界; 其余边界为无滑移固壁边界。

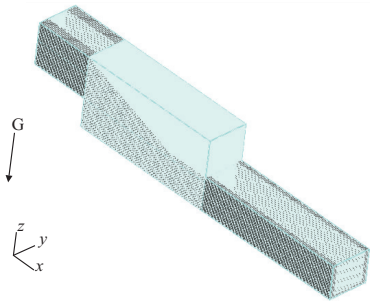


图 1 计算域的网格划分

Fig. 1 Meshing pattern in the computational domain

2.3 网格敏感性分析

使用尺寸为 8、6、4、3、2 mm 的网格, 对台阶段网格进行网格无关性检验。5 种网格尺寸在同一流量工况下第 5 级台阶凸角位置的断面平均水深对比表明, 不同网格尺寸下水流断面水深存在差异, 随着网格尺寸的减小其平均水深逐渐减小, 在网格尺寸为 3、2 mm 时逐渐趋于稳定, 最大差异仅约 0.7%, 可判断进一步缩小网格对提高计算精度作用不大。此外, 在网格尺寸为 2 mm 时, 计算时间大幅增加, 因此本次模拟采用 3 mm 网格进行模拟。

3 数学模型试验验证

3.1 试验系统

试验系统主要由上游水箱、引水渠、台阶段、尾水渠、蓄水池和地下水库组成, 形成一个循环系统, 模型布置剖面示意图见图 2。其中, 引水渠长

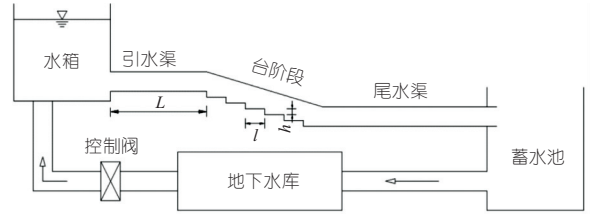
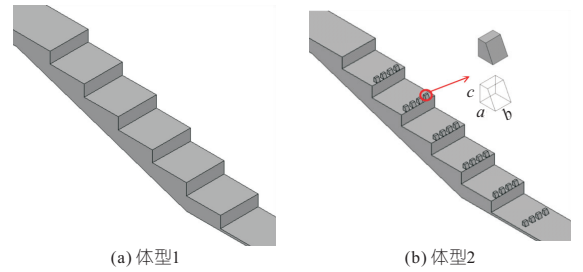


图 2 模型试验装置及剖面布置图

Fig. 2 Model experimental setup and profile arrangement

$L=1$ m, 宽 $W=0.2$ m; 台阶段由 6 级台阶组成, 坡比为 1:3, 单级台阶长 $l=0.18$ m, 高 $h=0.06$ m, 宽 $s=0.20$ m。模型布置两种试验方案, 如图 3, 体型 1 为传统台阶消能工方案; 体型 2 为梯形消能墩—台阶组合式消能工方案, 在台阶水平面凸角位置布设梯形消能墩, 梯形消能墩长 $a=0.02$ m、宽 $b=0.02$ m、高 $c=0.02$ m。



(a) 体型1 (b) 体型2

图 3 试验模型布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental model arrangement

试验采用无量纲参数 $\zeta = h_k/h$ 来表征流量, 其中 h_k 为临界水深:

$$h_k = \sqrt[3]{q^2/g} \quad (5)$$

式中, q 为单宽流量, m^2/s ; g 为重力加速度, m/s^2 。

3.2 模型验证

对 $\zeta=0.936$ 工况下各体型台阶水流水面线的模拟值和试验值进行对比, 结果表明, 模拟计算结果与试验结果吻合度较高, 沿程水深最大相对误差为 7.6%, 说明本文模拟方法合理, 计算结果可靠。

4 结果与分析

4.1 压强分布

图 4 为 $\zeta=0.936$ 时各体型第 5 级台阶水平面和竖直面压强分布图 (x 为与台阶凹角的水平面距离, z 为与台阶凹角的竖直面距离, y 为台阶不同纵剖面)。由图 4(a) 可知, 在 $0 \sim 0.6l$ (l 为单级台阶长度) 区域, 水平面压强变化规律相同, 呈明显的“V”形; 各体型最大压强值均出现在 0.5 l 位置, 体型 1 压强变化范围大于体型 2 压强变化范围; 体型 2 无消能墩纵断面 ($y=0.10$ m) 和有消能墩纵断面 ($y=0.08$ m) 最小压强值相同, 但

有消能墩纵断面($y=0.08\text{ m}$)最大压强值更大。在 $0.6l\sim l$ 区域, 体型 1 压强均匀降低, 体型 2 压强在 $0.6l\sim 0.8l$ 区域缓慢降低, 在 $0.8l$ 之后, 无消能墩纵断面($y=0.10\text{ m}$)压强急速降低, 并在 $0.92l\sim l$ 区域产生负压, 而有消能墩纵断面($y=0.08\text{ m}$)由于消能墩对水流的阻碍, 使得压强在 $0.8l$ 至消能墩迎水面的区域增大。由此可见, 通过在台阶凸角位置布置消能墩, 可使台阶水平面压强分布更加均匀, 减小水流对台阶水平面的冲击破坏, 但在台阶凸角附近会产生负压, 易产生空化空蚀危害。

由图 4(b)可知, 在 $0\sim 0.95h$ 区域, 体型 1 压强明显小于体型 2 压强; $0.95h\sim h$ 区域, 体型 1 压强大于体型 2 压强; 体型 1 最大负压出现在 $0.8h$ 位置处, 体型 2 最大负压出现在 h 位置处; 体型 2 在 $0.8h\sim h$ 区域出现负压, 负压范围较体型 1 的更小, 但体型 2 最大负压值比体型 1 的大; 体型 2 无消能墩纵断面($y=0.10\text{ m}$)和有消能墩纵断面($y=0.08\text{ m}$)压强在 $0\sim 0.9h$ 区间基本一致, 在 $0.9h$ 之后, 有消能墩纵断面($y=0.08\text{ m}$)压强较大。可见, 在台阶凸角位置布置消能墩, 可增大台阶竖直面压强, 减小负压范围, 降低发生空化空蚀破坏面积, 但凸角附近会产生更大负压, 在工程中需采用相应措施免遭空蚀破坏。

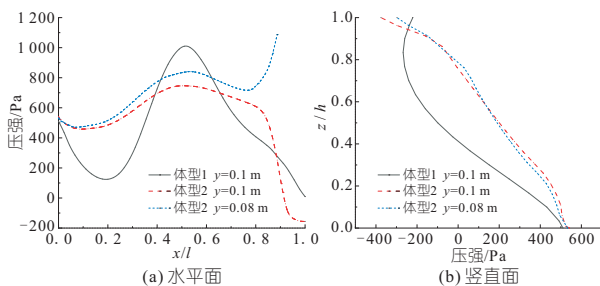


图 4 台阶水平面和竖直面压强分布

Fig. 4 Pressure distribution on the horizontal and vertical surfaces of the step

梯形消能墩—台阶组合式消能工第 5 级台阶梯形消能墩附近的压强变化见图 5。由图 5 可知, 梯形消能墩顶部和背水面存在负压, 且最大负压存在于消能墩背水面顶部。因此, 梯形消能墩

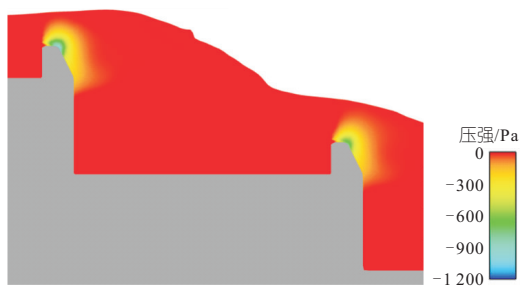


图 5 体型 2 断面负压分布

Fig. 5 Type two cross-sectional negative pressure distribution

在降低台阶受到的空化空蚀危害的同时, 自身也存在受到空蚀破坏的可能。

4.2 掺气效果

为进一步分析梯形消能墩—台阶组合式消能工发生空化空蚀破坏的风险, 引入台阶面掺气浓度 C 进行研究。一般认为, 当掺气浓度达到 5% 时, 能有效减小台阶面发生空蚀破坏的风险^[9]。图 6 为 $\zeta=0.936$ 时梯形消能墩—台阶组合式消能工第 5 级台阶水平面和竖直面的掺气浓度分布。由图 6 可知, 台阶水平面掺气浓度低于 5% 的区域均为正压区间; 在台阶无消能墩纵断面($y=0.10\text{ m}$) $0.92l\sim l$ 存在负压的区域, 其掺气浓度达到 10% 以上, 可有效减小凸角附近空化空蚀的危害。台阶竖直面有消能墩纵断面($y=0.08\text{ m}$)和无消能墩纵断面($y=0.10\text{ m}$)在 $0\sim 0.4h$ 区域掺气浓度相同, $0.4h$ 之后有消能墩纵断面($y=0.08\text{ m}$)与无消能墩纵断面($y=0.10\text{ m}$)掺气浓度差值逐渐增大; 在台阶竖直面 $0.8h\sim h$ 存在负压区域, 有消能墩纵断面($y=0.08\text{ m}$)掺气浓度远大于 5%, 而无消能墩纵断面($y=0.10\text{ m}$)仅在负压较大的 $0.95h\sim h$ 区域掺气浓度大于 5%。因此, 台阶水平面与竖直面存在负压区域, 其掺气浓度基本均大于 5%, 可有效防止空化空蚀危害出现。

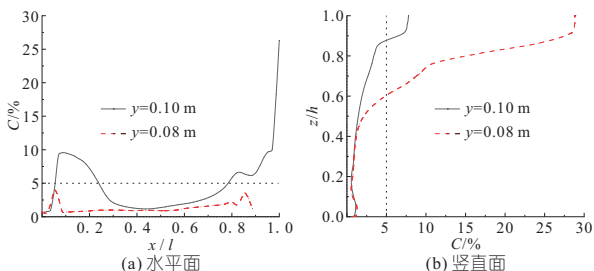


图 6 梯形消能墩—台阶组合式消能工台阶面掺气分布
Fig. 6 Trapezoidal energy dissipator pier-step combination energy dissipator step surface air entrained distribution

图 7 为梯形消能墩—台阶组合式消能工消能墩附近的掺气分布。由图 7 可看出, 在消能墩顶部与背水面, 其掺气浓度均达到 5% 以上, 可有效防止空化空蚀产生。

4.3 消能率分析

为对比分析各体型台阶消能工的消能效果, 选取上游引水渠末端与最后一级台阶下游附近 2 个断面, 以下游底板为基准面, 计算消能率 η :

$$\eta = [(E_0 - E_1)/E_0] \times 100\% \quad (6)$$

式中, E_0 为上游总能量; E_1 为下游总能量。

计算结果见图 8。结果表明, 在所研究工况下, 各体型台阶消能工消能率均在 70% 以上; 梯形消能墩—台阶组合式消能工相较于传统台阶消

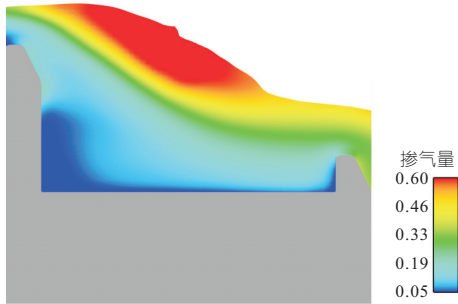


图 7 梯形消能墩—台阶组合式消能工消能墩附近的掺气分布

Fig. 7 Air entrained distribution near the energy dissipation pier of trapezoidal energy dissipation pier-step combination energy dissipator

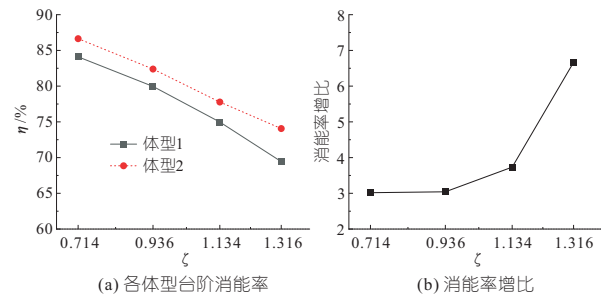


图 8 各体型台阶消能率与消能率增比

Fig. 8 Energy dissipation rate of each type step

能工,消能效果提升明显,最大消能率可提升 6.67%;各体型台阶消能工消能率均随流量增大而降低。随着流量的增加,梯形消能墩—台阶组合式消能工消能率增比越大。因此,在台阶凸角布置梯形消能墩,不仅可提升台阶消能效果,减小水流对下游的冲刷破坏,且在流量较大时可减缓消能率的递减速率,保持较好消能效果。

5 结论

a. 在台阶凸角增设梯形消能墩,改变了传统台阶水平面与竖直面压强分布,降低了台阶竖直面的负压面积,减小了产生空蚀破坏的面积,但

最大负压值大于传统台阶,且消能墩顶部与背水面存在负压,易引起空化空蚀危害。

b. 梯形消能墩—台阶组合式消能工台阶水平面与竖直面存在负压区域,消能墩顶部与背水面,其掺气浓度基本大于 5%,可有效降低发生空化空蚀的概率。

c. 梯形消能墩—台阶组合式消能工在各流量工况下,消能率均大于传统台阶消能工,具有更好的消能特性,且其负压分布范围更小,发生空化空蚀破坏的概率更低,适用流量范围更广。

参考文献:

- [1] CHANSON H. Hydraulic design of stepped spillways and downstream energy dissipators[J]. Dam engineering, 2001,11(4):205-242.
- [2] 田嘉宁,安田阳一,李建中,等. 台阶式溢洪道中跌落水流的消能[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2004,19(1):114-119.
- [3] RAZA A, WAN W, MEHMOOD K. Stepped spillway slope effect on air entrainment and inception point location[J]. Water, 2021, 13(10):1428.
- [4] 张志昌,曾东洋,郑阿漫,等. 台阶式溢洪道滑水水流压强特性的试验研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑),2003,18(5):652-659.
- [5] 邱毅,杨具瑞,陈卫星,等. 阶梯坝面坡度对阶梯面掺气特性及负压影响试验研究[J]. 排灌机械工程学报,2021,39(8):811-817.
- [6] 赵相航,解宏伟,郭馨. 台阶式溢洪道水流空化特性及空化空蚀位置的确定[J]. 水电能源科学,2016,34(9):110-114.
- [7] 伍平,王波,陈云良,等. 阶梯溢洪道不同坡比消能研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2012,44(5):24-29.
- [8] 常晓巍,李兵,李锦涛,等. 台阶式泄洪槽水工模型试验研究[J]. 水电能源科学,2020,38(1):104-107.
- [9] PETERKA A J. The effect of entrained air on cavitation pitting [C]// Sminnesota international hydraulic convention. ASCE,1953:507-518.

Research on Hydraulic Characteristics of Trapezoidal Energy Dissipating Pier and Step Combined Energy Dissipator

TIAN Yu, SUN Xi-huan, LI Yong-ye, CHEN Run, GENG Kuan

(College of Hydro Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to reduce the negative pressure of the steps, reduce the influence of cavitation erosion and improve the effect of step dissipation, the trapezoidal energy dissipation pier was added into the convex angle of the traditional steps to form trapezoidal energy dissipation pier and step combined energy dissipator. The method of combining hydraulic model tests and numerical simulations was used to study the hydraulic characteristics of trapezoidal energy dissipation pier and step combined energy dissipator. The results show that there is negative pressure on the horizontal and vertical surfaces of the trapezoidal energy dissipation pier and step combined energy dissipator near the convex angle, and there is a possibility of cavitation failure; However, the aeration concentration of the negative pressure area in the horizontal level and the vertical surface of the step is basically greater than 5%, which can effectively reduce the harm of cavitation erosion; Within the study range, the trapezoidal energy dissipation pier and step combined energy dissipator energy consumption rate can reach more than 70%, and the energy dissipation rate decreases with the increase of the flow rate. This combined energy dissipator is conducive to reducing the cavitation hazard of step and improving the effect of step energy consumption, which can provide a certain reference basis for the design of step energy dissipator and existing step spillway reinforcement.

Key words: step energy dissipator; trapezoidal energy dissipation pier; pressure characteristics; aeration effect; energy dissipation characteristics