

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230625

挑坎体形对泄洪雾化特性的影响研究

余凯文¹, 韩昌海¹, 韩康¹, 余之光²

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;
2. 湖北省水利水电规划勘测设计院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 随着一大批具有“高水头、大流量、地质条件复杂”特点的重大水利工程建成,泄洪雾化诱发的环境问题日益突出,亟待开展泄洪雾化缓解技术研究。挑坎体形对泄洪雾化具有直接影响,为此应用水工模型试验和数学模型计算相结合的方法,研究了不同挑坎体形对泄洪雾化特性的影响。结果表明,相同条件下,连续坎的水舌风速值沿下游河道轴线两侧对称并呈单峰分布,窄缝坎和扩散坎的水舌风速值近似呈对称双峰分布;泄洪降雨分布与挑坎体形密切相关,较连续坎、窄缝坎、扩散坎的溅水量大大增加。因此,在实际工程中可通过合理优化挑坎体形,以达到减轻泄洪雾化的目的。

关键词: 泄洪雾化; 挑坎体形; 降雨强度; 水舌风; 水力特性

中图分类号: TV135 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)12-0121-04

1 引言

泄洪雾化是一种复杂的水气两相流,基于原型观测、大比尺水工模型试验、数值模拟计算等方法,立足泄洪雾化的发生、发展过程,以明确泄洪雾化机理、识别雾雨场共性特征为目标向导,国内对泄洪雾化现象的认知先后经历了定性描述、定性分析、定量评测和定区防护等阶段^[1]。现有研究形成了覆盖泄洪雾化识别、预测、防护的关键技术,为泄洪雾化研究奠定了良好基础。但泄洪雾化受多因素共同制约,不仅与温度、湿度、地形、地貌等条件密切相关,还受挑坎体形、消能方式、运行调度方式^[2]等影响。目前的挑流消能工多采用“纵向拉开、横向扩散、空中碰撞、分层入水”的设计原则^[3],挑流水舌纵、横向的充分扩散,提高了水舌在空中的消能率,但同时导致了严重的泄洪雾化问题,如二滩水电站采用带齿坎的挑坎后,水流纵向充分扩散,底板的冲击压力小于无齿坎工况,但 10 mm/h 等降雨强度线影响范围明显增加。本文在已有泄洪雾化研究基础上,采用模型试验与数值计算相结合的方法,探讨挑坎体形对泄洪雾化的影响,以期通过合理的挑坎体形有效缓解泄洪雾化的影响。

2 试验设计与方法

2.1 模型设计

试验模型由设有挑坎的泄洪洞、蓄水池、水泵、管道、矩形堰及下游水池等组成,泄洪洞由有机玻璃制成,见图 1。上游水箱尺寸为 10.0 m × 10.0 m × 6.0 m (长 × 宽 × 高),下游水池尺寸为 10.0 m × 3.0 m × 0.7 m (长 × 宽 × 高)。以挑坎最低点在地面投影为坐标原点,顺水流方向为 x 轴正向,挑坎垂直高度为 90 cm,上游水位 410 cm,下游水位 38 cm,上下游水位差 372 cm,分别由管阀及下游尾水控制,水位差 ± 1 mm。

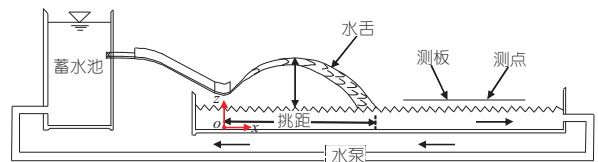


图 1 模型布置

Fig. 1 Layout of the model

2.2 试验测量

为量化并对比不同体形挑坎下游的喷溅雨量和水舌风分布,在河床上方 16 cm (即 $z = 85$ cm 平面)处布设测板用于测量雾化溅雨强度及水舌风沿横断面分布,测板上共布设 56 个控制点,见

收稿日期: 2023-04-19, 修回日期: 2023-05-25

作者简介: 余凯文(1992-),女,硕士,研究方向为水力学及河流动力学, E-mail: kaiwyu@163.com

通讯作者: 韩昌海(1965-),男,教授级高级工程师,研究方向为水力学及河流动力学, E-mail: chhan@nhri.cn

图2。在控制点处安装集雨盒,集雨盒内填充吸水棉(集雨盒长×宽×高为15 cm×10 cm×4 cm)^[4-5],喷溅雨量采用电子称(最大量程1 kg,精度0.01 g)称量,为充分收集溅雨量,试验中溅雨收集时间为90 min。采用数字风速仪测量水舌风速,测量精度为0.1 m/s,每个测点测量时间为200 s。

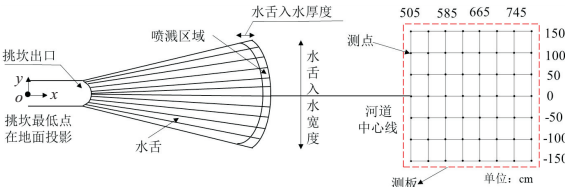


图2 下游河道测点布置

Fig. 2 Layout of measuring points on the downstream

2.3 挑坎体形方案

随着高水头、大流量的泄洪需求不断增加,传统消能工体形难以满足高效消能、安全和经济的要求。结合水利工程特点,在传统消能工体形的基础上创造了一系列具有高效消能特征的消能工体形,如扩散式体形、收缩式体形等,通过增大水舌的纵、横向扩散来减小水舌的单宽入水能量,提高水舌空中消能率,缓解高速下泄水流对下游河床的冲刷。本文基于已有众多挑坎体形的特点,设计了具有代表性的3种基本挑坎体形,即连续坎、窄缝坎、扩散坎,其具体结构尺寸见图3。

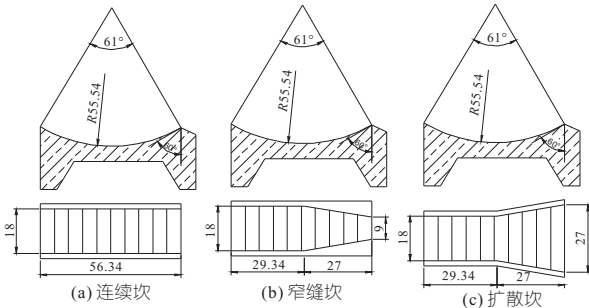


图3 模型试验挑坎体形(单位:cm)

Fig. 3 The flip bucket types of the model test

试验中连续坎挑射水流较为集中,挑射水流的纵、横向扩散程度有限。窄缝坎水流的横向扩散程度较小,但由于两侧边墙的急剧收缩产生了冲击波,加剧了水流内部的紊动和碰撞,同时收缩段水面线急剧上升,水深沿程增加,水舌在纵向空间充分扩散,挑射水舌在空中形成巨大的扇形状。扩散坎下泄水流呈横向扩散挑流流态,水舌横向扩散较为显著。

3 挑坎体形对下游水舌风和喷溅特性的影响

3.1 不同挑坎体形下游水舌风分布

泄洪雾化水舌风主要是由于高速水流与周围气流发生动量交换、冲量作用,使得周围气流受到扰动而产生。泄洪挑坎的体形决定了挑流水舌的运动轨迹,水舌风的分布及其水力特性与挑坎的型式密切相关。

在相同泄洪条件下,试验水舌风风速值沿横断面和 $z=85$ cm平面风场分布分别见图4(a)~(c)、图5(a)~(c)。同一测量断面上,连续坎的水舌风风速沿下游河道轴线两侧呈单峰对称分布,最大值出现在轴线上($y=0$ cm);随着 x 值的增加,水舌风风速值逐渐减小,其单峰形态逐渐变宽,水舌风风速范围为0.205~1.730 m/s。窄缝坎和扩散坎的水舌风风速近似呈对称双峰分布,窄缝坎水舌风风速范围为0.417~1.925 m/s,扩散坎水舌风风速范围为0.956~2.861 m/s。

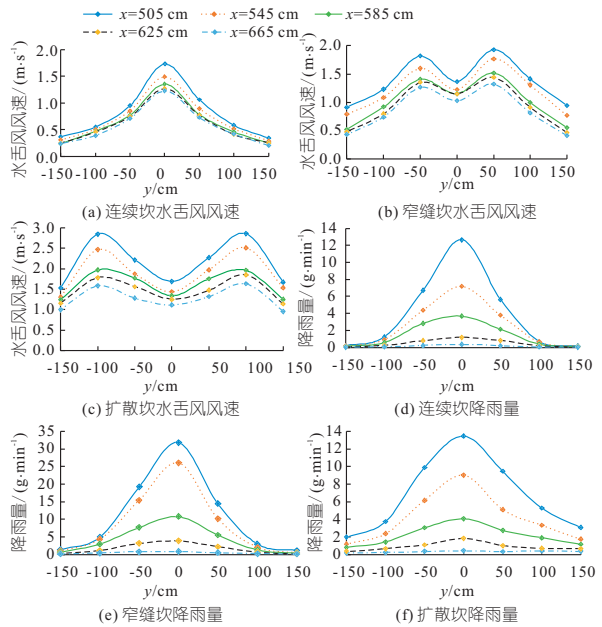


图4 水舌风风速值、降雨量沿断面分布

Fig. 4 Cross-sectional distribution of velocity of the nappe wind and rainfall

在周围空气阻力和地面摩擦的共同作用下,水舌风携带的动能不断耗散,距水舌入水点越远,动能越小,水舌风风速值也越小。在相同泄洪条件下,窄缝坎和扩散坎的水舌风最大风速值均大于连续坎的水舌风最大风速值。与连续坎相比,窄缝坎水舌由于两侧边墙的急剧收缩使得水舌在纵向空间充分扩散,加强了水流与周围气流发生动量交换,使得周围气流更易受到扰动,从而增大了水舌风风速值。在本试验中,扩散坎水舌的横向扩散较其他挑坎体形明显增加,水舌入水处排开水体的体积增加,更多的水块、水滴发生喷溅,增强了液滴对气体的瞬时冲量作用,从而增加了

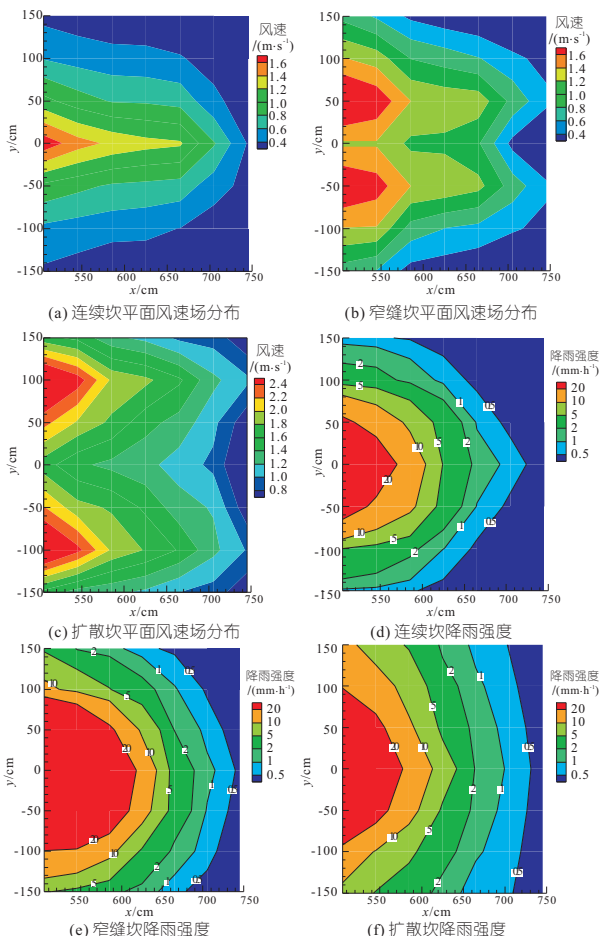


图 5 $z = 85$ cm 平面风速场、降雨强度等值线分布

Fig. 5 Horizontal distribution of velocity of the nappe wind and rainfall intensity contour on $z = 85$ cm

喷洒水舌风速值,使得扩散坎下游的水舌风速值及影响范围较连续坎和窄缝坎增大。

3.2 不同挑坎体形下水舌喷溅特性

相同泄洪工况下,下游布设的雾化测量装置内连续坎、窄缝坎、扩散坎在 90 min 分别共收集溅水 5 373.0、16 254.0、9 117.0 g。与连续坎相比,窄缝坎、扩散坎的溅水量大大增加。喷溅雨量沿横断面及 $y=0$ 平面等降雨强度线分布分别见图 4(d)~(f)、5(d)~(f)。3 种挑坎体形的溅水量均呈明显的单峰分布,但随着挑坎出口宽度的增加,单峰形态逐渐变宽。连续坎、窄缝坎、扩散坎最大降雨强度分别为 50.56、127.22、53.90 mm/h。窄缝坎最大降雨强度明显大于连续坎和扩散坎最大降雨强度,但其主要分布在河道内,对岸边的影响较小;扩散坎 1~10 mm/h 等降雨强度线明显大于窄缝坎和连续坎对两岸的影响范围。

对比图 4 可知,喷溅降雨强度的分布与水舌风的分布有关,在挑流水舌与周围空气的相互作用下,液相与气相发生能量、动量交换,产生强烈的水舌风,溅水雨滴在水舌风的作用下进一步向下游扩散。

4 挑流水舌水力特性

泄流雾化降雨强度分布特性与挑流水舌在空中的运动轨迹及其落点密切相关。基于 CFD 数值模拟方法,建立了三维数学模型(体形参数与物理模型保持一致),研究挑流水舌水力特性,进一步探究造成不同挑坎体形雾化降雨强度分布差异的原因。

上游水位 410 cm,下游水位 38 cm 泄洪工况下,连续坎、窄缝坎、扩散坎水舌入水参数见表 1,挑距取水舌落至下游水面到挑坎的水平距离。随着挑坎体形的收缩,水舌入水宽度明显减小,水舌厚度逐渐增大,挑距和挑高明显增加。挑宽和挑距在一定程度反映了水舌的空中扩散特性。与连续坎相比,窄缝坎和扩散坎促使水舌分别沿纵向和横向拉开,水舌在空中的掺气、扩散、破碎更加充分,增大了水舌空中扩散这一雾源量。

表 1 挑流水舌入水参数

Tab. 1 The parameters of the water tongue entering the water

挑坎体形	挑距/cm		挑高	水舌入
	内缘	外缘	/cm	水宽度/cm
窄缝坎	315	405	184	75
连续坎	325	395	148	90
扩散坎	290	350	136	210

挑流水舌在空中的运动扩散特性取决于水舌初始断面的水流条件和周围流体的运动,不同挑坎体形出口断面水气分布及水流流速分布见图 6、7。3 种体形挑流水舌均由挑坎对称挑出,窄缝坎由于两边边墙的急剧收缩,窄缝坎出口断面平均流速为 5.01 m/s,出射角度为 $31^\circ \sim 45^\circ$;连续坎出口断面平均流速为 3.97 m/s,出射角度为 $22^\circ \sim 25^\circ$;扩散坎出口断面平均流速为 3.72 m/s,出射角度为 $15^\circ \sim 20^\circ$ 。窄缝坎的出口断面平均流速值明显大于连续坎和扩散坎,且出口断面整体流速值分布较为集中,集中的高流速水流加剧了水舌的紊动尺度,促进了水气交界面上漩涡体间

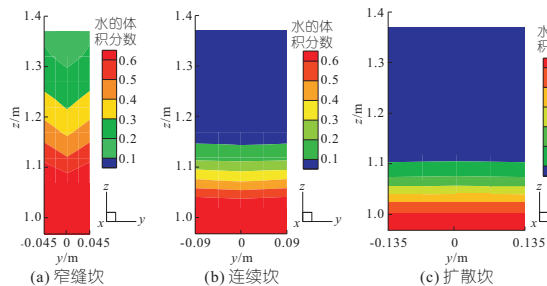


图 6 挑坎出口断面水气分布

Fig. 6 Distribution of water and gas distribution at the exit section of the flip bucket

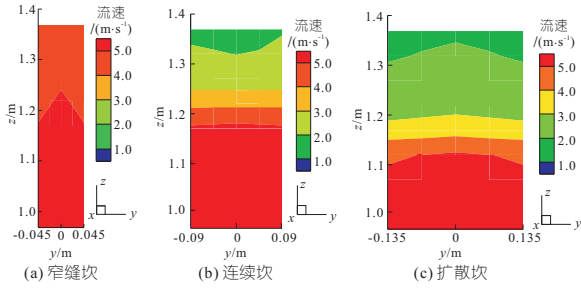


图 7 挑坎出口断面水流流速分布

Fig. 7 Distribution of flow velocity at the exit section of the flip bucket

的交换和混掺,使水舌的掺气、扩散、破碎更加充分,同时加剧了水流水舌入水激溅作用,从而增大了雾化降雨量。

挑流水舌入水激溅特性不仅与水舌初始运动状态有关,还与水舌入水时的水力特性密切相关^[6]。窄缝坎、连续坎和扩散坎挑流水舌入水角度分别为 41°~44°、30°~32°、28°~30°,最大入水速度分别为 5.78、5.42、4.41 m/s。通常而言,泄洪雾化雨区的纵向影响范围与水舌入水速度、入水角度有关,随水舌入水速度增大而增大,随入水角度的增大而减小,水舌入水的流速水头对泄洪雾化的影响较入水角度而言更为显著^[7],因此窄缝坎雾化降雨纵向影响范围增大。

5 结论

a. 在相同泄洪条件下,连续坎的水舌风风速沿下游河道轴线两侧对称分布,呈单峰分布,且随着 y 值的增加,其单峰形态逐渐变宽;窄缝坎和

扩散坎的水舌风风速近似呈对称的双峰分布,窄缝坎和扩散坎的水舌风最大风速值均大于连续坎的水舌风最大风速值。

b. 3 种挑坎体形的溅水量均呈明显单峰分布,但随着挑坎出口宽度的增加,单峰形态逐渐变宽。窄缝坎最大降雨强度明显大于连续坎和扩散坎,但其主要分布在河道内,对岸坡影响有限。扩散坎 1~10 mm/h 等降雨强度线对两岸的影响范围明显大于窄缝坎和连续坎。

c. 3 种挑坎体形,随着挑坎出口宽度的增加,挑流水舌入水速度逐渐减小,水舌入水角度逐渐增大,水舌入水的流速水头对泄洪雾化的影响更为显著,因此窄缝坎雾化降雨纵向影响范围增大。

参考文献:

- [1] 练继建,刘丹,刘昉. 中国高坝枢纽泄洪雾化研究进展与前沿[J]. 水利学报,2019,50(3):283-293.
- [2] 余凯文,韩昌海. 高拱坝枢纽工程泄洪调度方式对雾化的影响分析[J]. 水利水运工程学报,2019(4):74-82.
- [3] 韩喜俊,渠立光,程子兵. 高坝泄洪雾化工程防护措施研究进展[J]. 长江科学院院报,2013,30(8):63-69.
- [4] 练继建,冉聃,何军龄,等. 挑坎体型对下游雾化影响的试验研究[J]. 水科学进展,2020,31(2):260-269.
- [5] 练继建,何军龄,缙文娟,等. 泄洪雾化危害的治理方案研究[J]. 水力发电学报,2019,38(11):9-19.
- [6] 黄财元. 高拱坝泄洪雾化数学模型及人工神经网络模型研究[D]. 天津:天津大学,2005.
- [7] 孙双科,刘之平. 泄洪雾化降雨的纵向边界估算[J]. 水利学报,2003(12):53-58.

Study on the Influence of Flip Bucket Types on the Characteristics of Flood Discharge Atomization

YU Kai-wen¹, HAN Chang-hai¹, HAN Kang¹, YU Zhi-guang²

(1. State Key Laboratory of Hydrology Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
2. Hubei Institute of Water Resources Survey and Design, Wuhan 430070, China)

Abstract: With the completion of a large number of major water conservancy projects with the characteristics of "high water head, large flow, and complex geological conditions", the environmental problems caused by flood discharge atomization have become increasingly prominent, and it is urgent to carry out research on mitigation technology of flood discharge atomization. The types of flip bucket have a direct impact on flood discharge atomization. Based on the methods of physical model test and numerical simulation calculation, the influence of flip bucket types on flood discharge atomization is studied. The results show that: under the same test conditions, the distribution of the nappe wind velocity of the continuous bucket is symmetrical along the two sides of the downstream axis, showing a unimodal distribution; and the distribution of the nappe wind velocity of the contraction bucket and the expansion bucket is approximately symmetrical bimodal distribution. The distribution of flood discharge rainfall is closely related to the type of the flip bucket. Compared with the continuous bucket, the number of the splashed water droplets of contraction bucket and expansion bucket is greatly increased. In the actual project, the purpose of reducing the influence of flood discharge atomization can be achieved by reasonably optimizing the types of flip bucket.

Key words: flood discharge atomization; flip bucket types; rainfall intensity; nappe wind; hydraulic characteristics