

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.04.011

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. (YU Kaiwen, HAN Changhai. Analysis of influences of flood discharge dispatching modes on atomization by high arch dams[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(4): 74-82. (in Chinese))

高拱坝枢纽工程泄洪调度方式对雾化的影响分析

余凯文, 韩昌海

(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)

摘要: 结合已建典型高拱坝枢纽工程泄洪雾化原型观测、数值模拟及物理模型试验成果, 分析高拱坝枢纽部分孔口开启泄洪的雾化规律, 探讨通过泄洪调度方式减轻泄洪雾化所带来危害的途径, 保证电站枢纽安全有效运行。结果表明, 坎身表、深(中)孔泄洪时雾雨区分布与下游水舌入水流速、水舌入水面积以及入水角度密切相关, 其中入水流速对深(中)孔泄洪雾雨区分布的影响更加明显。当库水位和泄洪量一定时, 泄洪洞运行雾化雨强及其影响范围最小, 且雾化影响区集中在远离坝体的下游河段, 而深(中)孔单独运行雾化雨强及其纵向影响范围明显大于表孔和泄洪洞单独运行工况, 雾雨区垂向范围受泄洪调度方式影响较小。

关 键 词: 高拱坝; 泄洪雾化; 表孔; 深(中)孔; 泄洪洞; 调度方式

中图分类号: TV135 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2019)04-0074-09

高坝泄洪雾化是一种复杂的水气两相流问题, 涉及水舌的空中破碎、掺气、扩散、碰撞、入水激溅等多个物理过程, 既受泄洪流量、上下游水位差和泄洪方式等水力因素的影响, 又受地形、气象等外界条件的制约。近年来, 结合具体工程围绕单个或多个因素作用下雾雨强度及分布开展了较多研究。陈慧玲^[1]以二滩水电站为例, 通过1:35的三孔水工模型试验, 初步研究了泄流运行方式及加设齿坎的表孔体型对雾化影响; 刘宜烈等^[2]在假定喷溅水滴为圆形体且做反弹斜抛运动下, 研究了在空气阻力、水舌风、重力作用下的喷溅运动, 提出了考虑空气阻力作用的雾雨纵横向分布规律; 刘昉^[3]利用挑流泄洪雾化数学模型, 研究了环境风和地形地貌单独作用下泄洪雾化降雨强度分布及其影响范围的变化; 黄财元^[4]基于二滩水电站原型观测成果, 通过随机喷溅数学模型, 分析了雾雨区在水舌风作用下的分布特性; 刘昉等^[5]通过物理模型专项溅水试验并结合原型观测资料, 研究了流量、水舌入水速度、入水角度对雾化影响的规律。上述研究为分析多因素作用下的泄洪雾化特性提供了很大帮助, 但高水头大流量的泄洪需求、高海拔低气压的复杂气候环境, 以及高边坡窄河谷的复杂地形环境, 使得高拱坝泄洪消能与雾化间的矛盾日益突出, 成为高坝泄洪急待解决的难题之一。

目前高拱坝枢纽工程大多采用“坎身表孔+深孔双层泄水孔口布置、下游设水垫塘与二道坝、并辅以岸边泄洪洞”的“二滩模式”泄洪消能^[6]。工程实践表明, 枢纽运行调度方式对雾化的影响十分显著, 也是在工程的泄洪消能方式确定后缓解雾化影响的最有效措施。尤其是具备多孔口、多层次出流泄洪消能方式的高坝工程, 其泄洪消能调度就显得十分重要。工程中常遇泄洪工况为部分孔口开启泄洪, 为此, 以锦屏一级、二滩、白鹤滩等枢纽工程的原型观测、数值模拟以及水工模型试验成果为基础, 研究部分孔口开启泄洪时雾化规律, 并提出合理的水电站运行调度方式, 探讨通过泄洪调度方式减轻泄洪雾化带来危害的途径。

收稿日期: 2018-10-12

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0401704); 国家自然科学基金资助项目(U1765202); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(Y11806)

作者简介: 余凯文(1992—), 女, 湖北黄石人, 硕士研究生, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: 2837074532@qq.com

通信作者: 韩昌海(E-mail: chhan@nhri.cn)

1 高拱坝泄洪雾化影响因素分析

高拱坝多建于峡谷地区,其突出特点是高水头、大泄量、窄河谷,多通过优化孔口体型、孔口相对位置及多层孔口分散出流,使下泄水流纵向拉开、横向扩散、分层入水,达到较好的消能效果,减小水舌对水垫塘的冲击压力,但伴随着严重的雾化现象,我国典型工程泄洪水力特性见表1。

表1 典型高拱坝工程泄洪方式和规模

Tab. 1 Flood discharge mode and scale of typical high arch dams in China

| 枢纽名称 | 坝高/m | 泄量/(m ³ ·s ⁻¹) | 泄洪方式 |
|------|-------|---------------------------------------|-------------------|
| 锦屏一级 | 305.0 | 13 913 | 4个表孔+5个深孔+1条岸边泄洪洞 |
| 小湾 | 292.0 | 20 683 | 5个表孔+6个深孔+1条岸边泄洪洞 |
| 溪洛渡 | 285.5 | 52 300 | 7个表孔+8个深孔+4条岸边泄洪洞 |
| 白鹤滩 | 279.0 | 44 107 | 6个表孔+7个深孔+3条岸边泄洪洞 |
| 二滩 | 240.0 | 23 900 | 7个表孔+6个深孔+2条岸边泄洪洞 |
| 构皮滩 | 225.0 | 26 950 | 6个表孔+7个深孔 |
| 大岗山 | 220.0 | 8 814 | 4个深孔+1条岸边泄洪洞 |

高拱坝枢纽泄洪雾化降雨强度及分布的共性特征体现在以下几方面^[3, 7-12]:①水力条件相关性,上下游水位差与泄洪流量越大,入水角度(水舌与水平面夹角)越小,下游水垫越浅,泄洪雾化越严重。②边界条件相关性,边界条件包括消能工体型、下游地形条件等。纵、横向扩散好的挑流鼻坎,可增加水舌在空中的分散度,提高消能率,但随之也会加重泄洪雾化程度;河道开阔地区雾雨爬高较河谷狭窄地区低;缓坡一侧大暴雨区范围及降雨梯度比陡坡一侧小;河道转弯及岸坡山体变化时,凹岸雾化比凸岸严重。③气象条件相关性,晴天比阴雨天、中午比早晚天雾雨范围小;当风向与泄流方向一致或相反时,环境风对雾化范围纵向影响较大,横向影响不大;湿度、气压也不同程度影响雾化形成与发展。④消能方式相关性,底流消能的雾化源是通过水跃产生,雾雨影响范围小、强度小;挑流消能的雾化源来自水舌空中裂散掺气和水舌入水喷溅,雾雨影响范围大,且强度大。

2 坝身表孔泄洪雾化特征

表孔超泄能力强,布置简单,运行灵活、可靠,应用于工程实践。高拱坝工程的表孔主要采用横向扩散来增加水舌分散度,同时辅助增加纵向扩散,以解决表孔泄洪消能问题,但在增加水舌纵、横向扩散的同时加大了空中掺气量,从而增大了空中水舌的雾化源量。

锦屏一级、二滩、白鹤滩水电站表孔出口分别采用底部透空的收缩式窄缝坎、相邻大差动跌坎+分流齿坎、差动式跌坎,以调整表孔水舌纵、横向扩散。各电站表孔单独泄洪工况下雾化降雨强度分布见图1。锦屏一级水电站4表孔单独泄洪时(上游水位1 880.00 m、下泄流量3 636 m³/s),最大雾化雨强为766.4 mm/h,雾雨最大纵向影响范围为370 m,左、右岸最大爬高达175 m;二滩水电站7表孔单独泄洪时(上游水位1 199.70 m、下泄流量6 024 m³/s),最大雾化降雨强度为833 mm/h,纵向、横向影响范围分别为669和590 m,左、右岸最大爬高达220 m;小湾水电站4表孔单独泄洪时(上游水位1 241.87 m、下泄流量6 512 m³/s),100,50和10 mm/h降雨强度横向影响范围分别为524,594和699 m;白鹤滩水电站6表孔单独泄洪时(上游水位825.00 m、下泄流量9 446 m³/s),降雨强度超过500 mm/h,雾雨区横向影响范围约450 m,两岸爬升高度达190 m,纵向最远至坝下游900 m处。

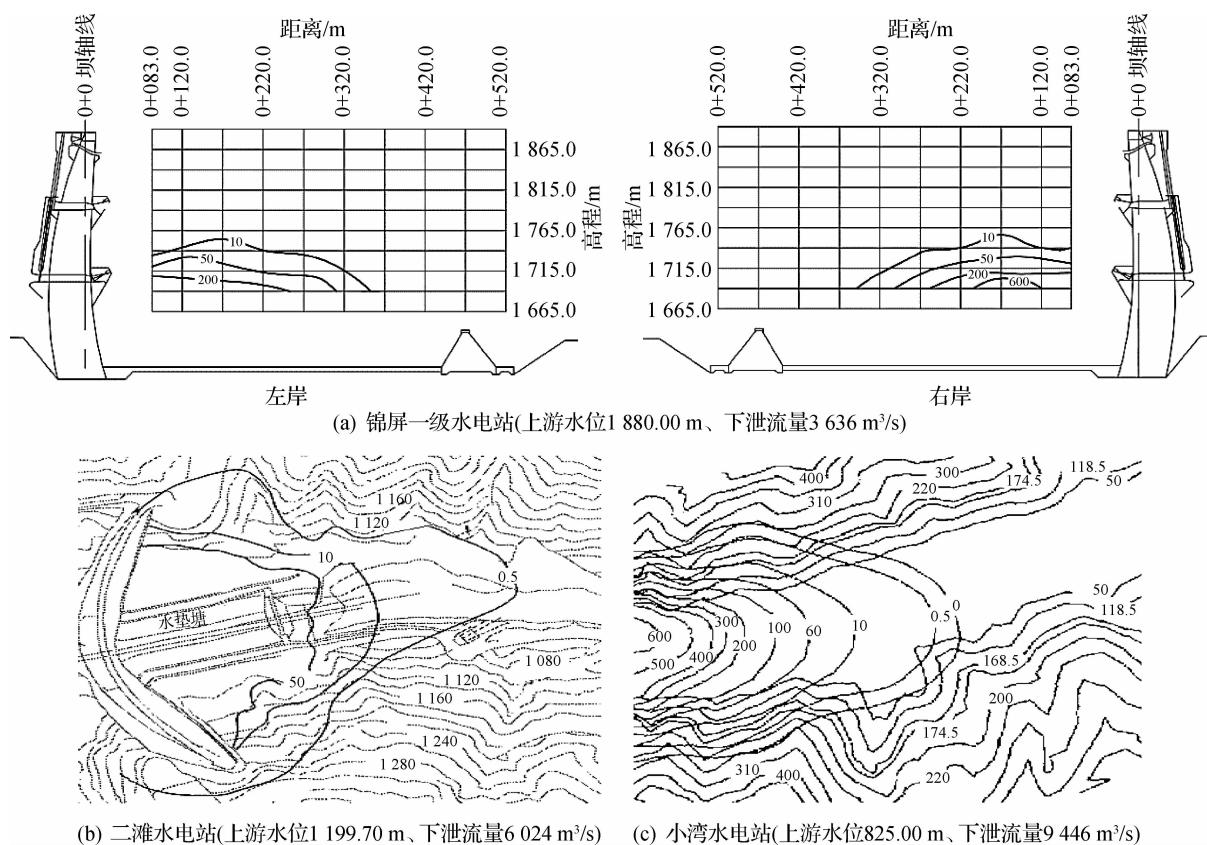


图1 各水电站表孔单独泄洪工况下雾化降雨强度分布(单位: mm/h)

Fig. 1 Distribution of atomization intensity under flood discharge conditions of crest outlets of hydropower stations (unit: mm/h)

表孔水流流程短,水舌出口作用水头小,水舌出坎流速低,入水集中,入水位置离坝趾较近,雾雨区主要集中在坝址区附近。基于二滩原型观测及锦屏一级、白鹤滩等水电站物理模型试验测得的表孔泄洪雾雨区纵向范围即0 mm/h等降雨强度线纵向长度,采用量纲分析法得到表孔泄洪雾雨区纵向范围(L)与下泄流量(Q)、入水角度(θ)余弦函数、水舌入水速度(V_c)、重力加速度(g)之间满足:

$$L = 17.531 \left(\frac{Q}{V_c} \right)^{0.223} \left(\frac{V_c^2}{2g} \right)^{0.554} (\cos \theta)^{0.115} \quad (1)$$

由式(1)计算各表孔雾雨区纵向范围如表2所示,各个电站雾雨区纵向影响范围实测值与理论计算值相对误差不超过15%。从雾雨区纵向长度 L 的构造式(1)可以看出表孔泄洪产生的雾雨区分布与水舌入水面积、入水流速及入水角度密切相关,表孔单独开启泄流工况下,流速对雾雨区分布的影响最为显著,入水面积次之,而入水角度对雾雨区分布的影响相对较小。

表2 各电站表孔单独运行工况下雾雨区纵向长度

Tab. 2 Longitudinal length of atomization area under separate operation conditions of crest outlets of hydropower stations

| 枢纽名称 | 泄量/ (m ³ ·s ⁻¹) | 入水流速/ (m·s ⁻¹) | 入水角度/° | 雾雨区纵向长度/m | | 相对误差/% |
|------|---|-------------------------------|--------|-----------|-----|--------|
| | | | | 实测值 | 计算值 | |
| 锦屏一级 | 3 366 | 40.00 | 73.26 | 370 | 414 | -11.89 |
| 白鹤滩 | 9 446 | 51.73 | 71.02 | 886 | 830 | +6.32 |
| 二滩 | 6 024 | 49.00 | 71.10 | 669 | 728 | -8.82 |
| 小湾 | 6 512 | 57.36 | 73.20 | 500~1 010 | 852 | |
| 白山 | 830 | 37.60 | 41.20 | 400 | 373 | +6.75 |

3 坝身深(中)孔泄洪雾化特征

深(中)孔下泄水流为有压流,水舌出坝流速大,入水位置离坝趾远,水舌在水压力作用下被压得较小,分散激烈,水翅喷射严重,使得泄洪雾化现象更加严重。各电站深(中)孔单独泄洪工况下,雾化降雨强度分布见图2。锦屏一级水电站5深孔单独泄洪时(上游水位1 880.00 m、下泄流量5 390 m³/s),试验观测到溅水区内的最大降雨强度为930.6 mm/h,雾雨最大纵向影响范围480 m,左、右岸最大爬高达170 m;二滩水电站6中孔全开单独泄洪时(上游水位1 199.70 m、下泄流量6 856 m³/s),最大雾化降雨强度为850 mm/h,纵向、横向影响范围分别为728和622 m,左、右岸最大爬高达240 m;溪洛渡水电站8深孔单独泄洪时(上游水位600.00 m、下泄流量12 360 m³/s),纵向最大雾化降雨长度870 m,左、右岸最大爬高可达225 m,实测最大雾化降雨强度为5 239.4 mm/h;白鹤滩水电站7深孔单独泄洪时(上游水位825.00 m、下泄流量11 657 m³/s),雾化雨强超过800 mm/h,雾雨区最大横向影响范围约500 m,最大纵向影响范围可至坝下1 000 m附近,左、右岸最大爬高达220 m^[13]。

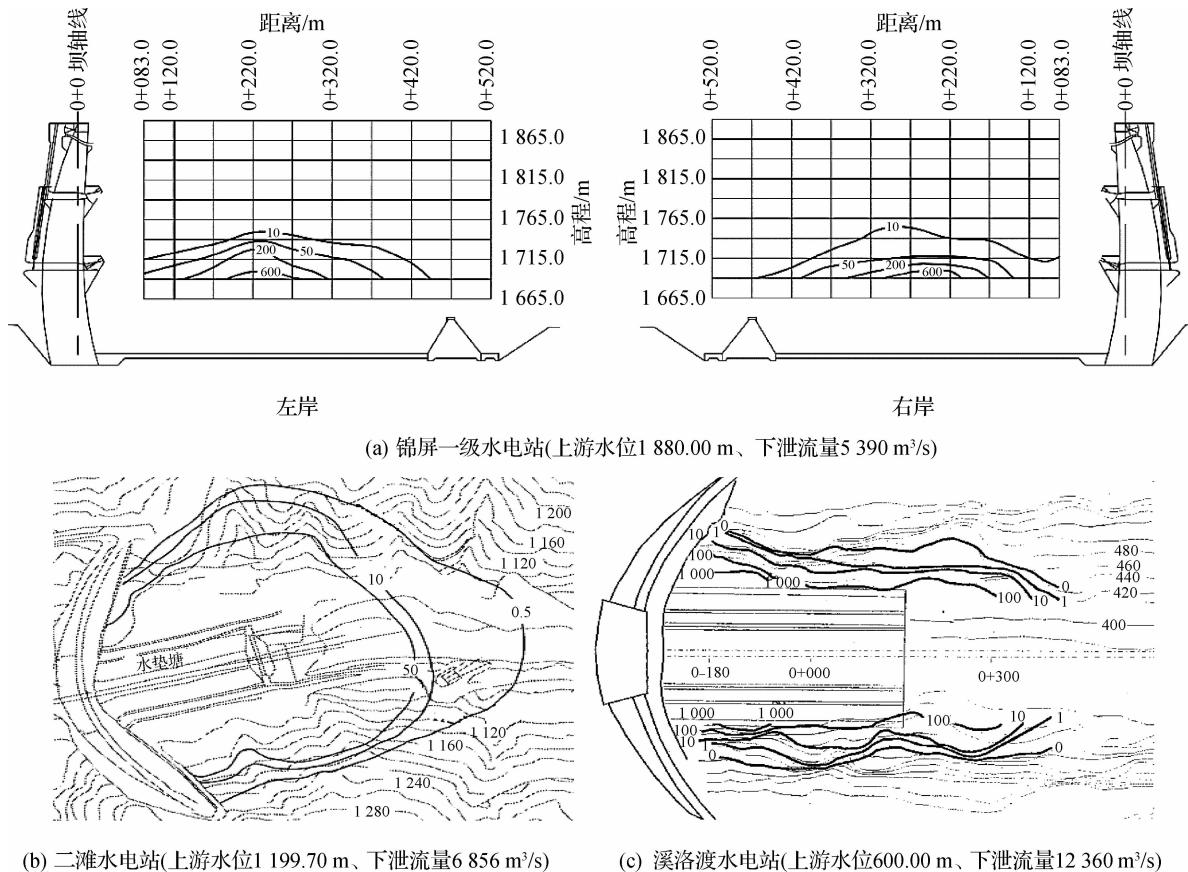


图2 各水电站深(中)孔单独泄洪工况下雾化降雨强度分布(单位: mm/h)

Fig. 2 Distribution of atomized rainfall intensity under flood discharge conditions of bottom (mid-level) outlets of hydropower stations (unit: mm/h)

深(中)孔水流流程长,水舌出口作用水头大,水舌出坎流速高,雾雨区范围明显大于表孔单独泄洪工况。基于二滩原型观测及锦屏一级、溪洛渡等水电站物理模型试验实测的深(中)孔泄洪雾雨区纵向范围即0 mm/h等降雨强度线纵向长度,采用量纲分析法得到深(中)孔泄洪雾雨区纵向范围(L)与下泄流量(Q)、入水角度(θ)余弦函数、水舌入水速度(V_c)、重力加速度(g)之间满足:

$$L = 15.895 \left(\frac{Q}{V_c} \right)^{0.193} \left(\frac{V_c^2}{2g} \right)^{0.613} (\cos \theta)^{0.043} \quad (2)$$

由式(2)计算各深(中)孔雾雨区纵向范围如表3所示,各个电站深孔泄洪工况下雾雨区纵向影响范围实测值与理论计算值接近,相对误差不超过15%。深(中)孔单独开启泄洪工况下,雾雨区纵向长度与流速水头、水舌入水面积、入水角度相关,其中流速水头对雾雨区范围的影响最为显著。

表3 各电站深(中)孔单独运行工况下雾雨区纵向长度

Tab. 3 Longitudinal length of atomization area under separate operation conditions of bottom (mid-level) outlets of hydropower stations

| 枢纽名称 | 泄量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) | 入水流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | 入水角度/ $^\circ$ | 雾雨区纵向长度/m | | 相对误差/% |
|------|---|---|----------------|-------------|-----|--------|
| | | | | 实测值 | 计算值 | |
| 锦屏一级 | 5 390 | 43.00 | 56.50 | 460 | 523 | -13.73 |
| 白鹤滩 | 11 657 | 52.78 | 51.78 | 1 003 | 940 | -6.28 |
| 二 滩 | 6 856 | 50.10 | 51.90 | 728 | 794 | -8.81 |
| 溪洛渡 | 12 360 | 53.00 | 49.90 | 870 | 955 | -9.77 |
| 小 湾 | 6 072 | 58.08 | 57.20 | 500 ~ 1 220 | 914 | |
| 东 风 | 999 | 41.90 | 39.40 | 480 | 461 | -3.96 |
| | 522 | 38.20 | 42.20 | 369 | 370 | -0.27 |

4 泄洪洞泄洪雾化特征

泄洪洞是水利水电枢纽工程中十分重要的岸边泄水建筑物,其出口高程较低,挑流水舌空中流程短,水舌裂散区小,激溅也不严重,泄洪雾化影响范围有限。各电站泄洪洞单独泄洪工况下,雾化降雨强度分布见图3。

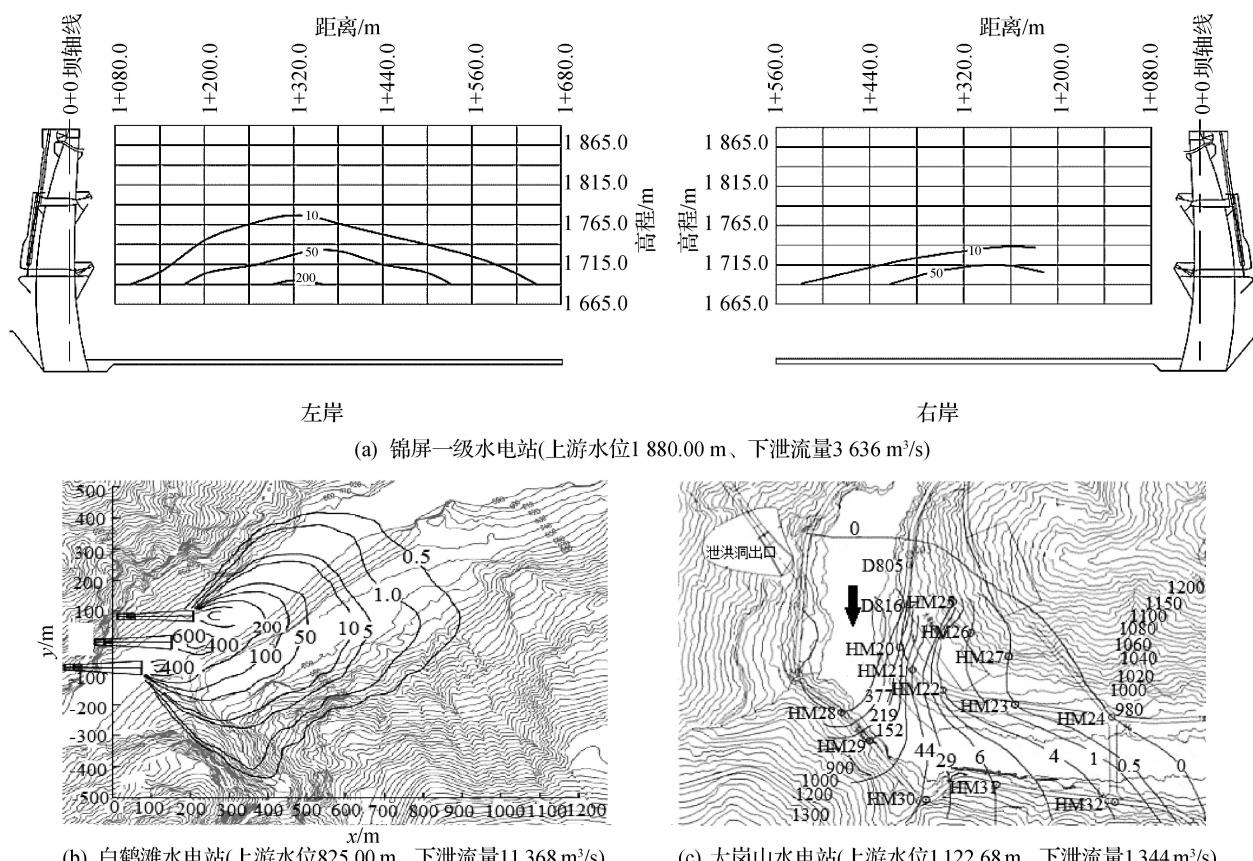


图3 各水电站泄洪洞单独泄洪工况下雾化降雨强度分布(单位: mm/h)

Fig. 3 Distribution of atomized rainfall intensity under flood discharge conditions of spillway tunnels of hydropower stations (unit: mm/h)

锦屏一级水电站1条泄洪洞单独泄洪时(上游水位1 880.00 m,下泄流量3 636 m^3/s),水舌入水纵向范围在坝1+200.0 m~坝1+320.0 m,位置偏左岸,水舌入水喷溅影响区内降雨强度达100~300 mm/h (高程1 710.0 m以下),在高程1 690.0 m,右岸坝1+260 m处,模型试验观测到最大雾化雨强为273.9 mm/h ;白鹤滩水电站3条泄洪洞单独泄洪时(上游水位825.00 m,下泄流量11 368 m^3/s),出口下游100 m范围内分别形成3个暴雨中心,降雨强度可达600 mm/h ,雾雨区纵、横向影响范围分别约750和800 m,两岸爬升高度约140 m;大岗山水电站1条泄洪洞单独泄洪时(上游水位1 122.68 m,下泄流量1 344 m^3/s),泄洪洞出口上游侧区域无降雨,最大雾化降雨强度达377 mm/h ,两岸可爬升至1 145 m高程处。

泄洪洞单独泄洪时,泄洪雾化对泄洪洞出口上游侧影响很小,雾雨区分布明显受到对岸地形的影响,暴雨中心及雾雨影响区均位于远离坝体下游河段,对电站枢纽影响相对较小,可保证枢纽安全而有效运行。

5 泄洪调度对雾化影响的分析

5.1 调度方式对雾化雨强的影响

库水位和泄量($\pm 15\%$)一定时,锦屏一级、溪洛渡水电站不同泄洪调度方式下各观测断面雾化雨强沿高程及纵向变化分别如图4和5所示。雾化降雨强度及其变化梯度随高程的增加逐渐减小,在一定高程范围内,泄洪调度运行方式对雾化雨强分布有显著影响,在同一观测断面上,深孔单独泄洪时雾化雨强及其变化梯度明显大于表孔单独泄洪工况;在超过一定高程范围后,雾化雨强明显减小,雾雨强度分布受泄洪调度方式影响较小。雾化降雨强度沿纵向分布与水舌入水点有关,在水舌入水点附近出现最大值。深孔单独泄洪时水舌入水点比表孔远,但深孔单独泄洪时纵向雾雨强度明显大于表孔泄洪工况。

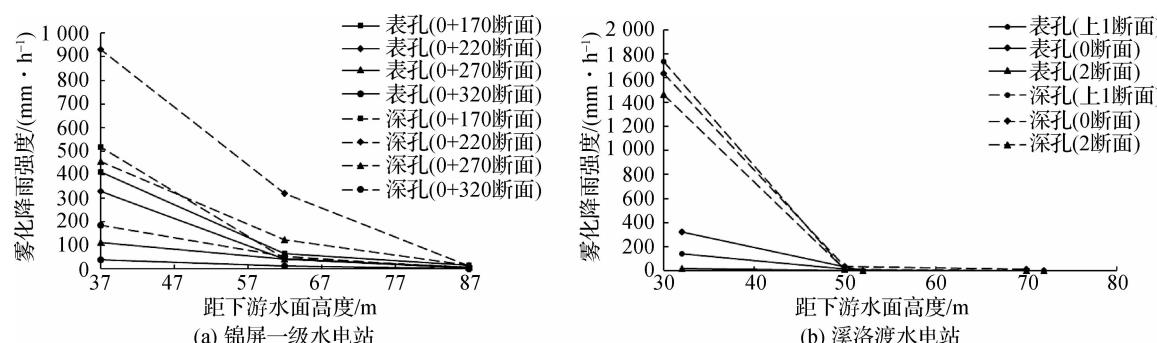


图4 各水电站雾化降雨强度沿高程变化

Fig. 4 Variation curves of atomized rainfall intensity along elevation of hydropower stations

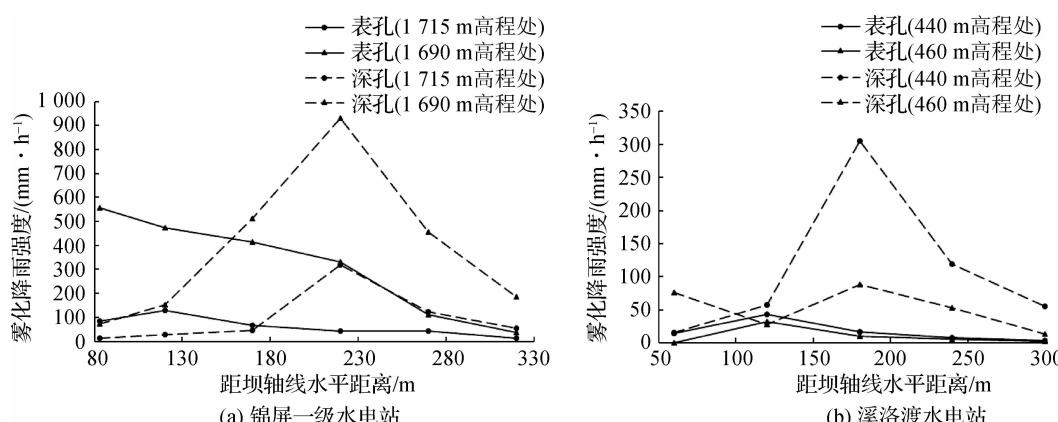


图5 各水电站雾化降雨强度沿纵向变化

Fig. 5 Longitudinal variation curves of atomized rainfall intensity of hydropower stations

5.2 调度方式对雾雨区纵向范围的影响

库水位和泄量($\pm 15\%$)一定时,表、深(中)孔单独泄洪工况下,各电站水舌入水参数分别如表2和3所示。表孔单独泄洪时水舌入水角度明显大于深(中)孔单独泄洪工况,而入水流速略小于深孔水舌入水流速。根据表、深(中)孔单独泄洪时雾雨区纵向长度计算式(1)和(2),雾雨区纵向长度与流速水头、水舌入水面积成正比,而与入水角度成反比,即泄流量与入水流速越大,入水角度(水舌与水平面的夹角)越小,泄洪雾雨区影响范围越大。深孔单独开启泄洪时,水舌入水面积、入水角度对雾雨区分布的影响较表孔小,但流速水头作用更明显,一方面大流速会加剧水舌紊动、扩散,促进水气交界面上涡体的混掺和交换,使水舌破碎和掺气更充分;另一方面又会使伴随产生的水舌风及水舌入水激溅作用更强烈。深(中)孔挑流水舌的初始流速大、入水角小,因此雾化纵向范围比同一条件下表孔、泄洪洞单独泄洪工况严重。

5.3 调度方式对雾雨区垂向范围的影响

以各水电站坝底高程为基点,不同泄洪运行工况下,各水电站雾化雨强沿两岸边坡的爬高如图6所示。库水位和泄量($\pm 15\%$)一定时,同一电站在不同泄洪方式下沿两岸爬升高度相近,差值为($0.1 \sim 0.2$) H (H 为最大坝高),所以泄洪调度方式对雾雨区垂向分布影响较小。锦屏一级、溪洛渡、二滩等枢纽均布置在高窄河谷地区,这一地区为高山峡谷地貌,河谷狭窄,两岸岸坡陡峻,河谷宽高比较小;雾雨随水舌风扩散,当遇到阻挡时,将形成降雨落到地面。因此,泄洪雾化降雨的垂向分布受近坝区两岸河道形态、坡度、山坡峰壑等地形因素的制约。

从泄洪雾化角度考虑:表孔单独泄洪时雾化降雨强度及其纵向范围明显小于深(中)孔单独泄洪工况;泄洪洞单独泄洪时雾化降雨强度及其影响范围有限,且暴雨中心及雾雨影响区均位于远离坝体的下游河段,雾化降雨对泄洪洞出口上游侧影响很小。在电站运行中可利用这一特性通过合理运行调度减少泄洪雾化影响,保证电站枢纽安全正常运行。

6 结语

(1) 水电枢纽泄洪雾化是多种因素共同作用的结果,雾雨区范围与流速水头、水舌入水面积、入水角度密切相关,深孔单独开启泄洪时,水舌入水面积、入水角度对雾雨区分布的影响较表孔小,但流速水头作用更明显。

(2) 对具备多孔口、多层次出流泄洪消能方式的高坝工程,泄洪调度方式对雾化的影响十分明显,采取合理的泄洪调度方式,可有效减小雾化降雨强度及其纵向影响范围。库水位和泄量($\pm 15\%$)一定时,泄洪洞运行工况下雾化降雨强度及其纵向影响范围最小,且雾化影响区集中在远离坝体的下游河段,坝体等枢纽建筑物基本不受雾化降雨影响;深(中)孔单独运行工况下雾化降雨强度及其纵向影响范围最大,表孔单独运行工况下雾化降雨强度及其纵向影响范围介于两者之间。

(3) 库水位和泄量($\pm 15\%$)一定时,雾雨区垂向范围受泄洪调度方式影响较小,同一电站在不同泄洪方式下沿两岸爬升高度相近,差值为($0.1 \sim 0.2$) H (H 为最大坝高)。枢纽泄洪时可优先选择泄洪洞单独泄洪的枢纽运行调度方式,以减小泄洪雾化降雨影响,保证枢纽运行安全。

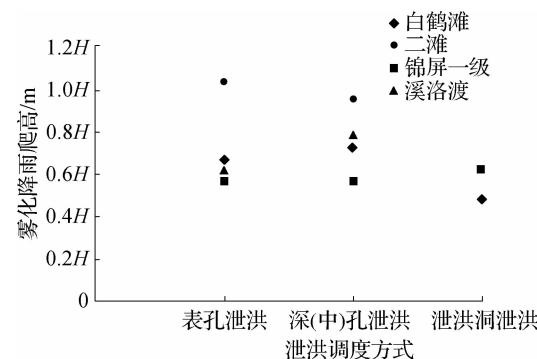


图 6 不同泄洪调度方式下各电站雾化降雨爬升高度(H 为最大坝高)

Fig. 6 Climbing height of atomized rainfall under different flood discharge operations of hydropower stations
(H - maximum dam height)

参 考 文 献:

- [1] 陈惠玲, 柴恭纯. 泄流运行方式对拱坝挑流雾化影响初步研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1989. (CHEN Huiling, CHAI Gongchun. Preliminary study on influences of discharge operation mode on spray atomization of arch dams[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1989. (in Chinese))
- [2] 刘宣烈, 安刚, 姚仲达. 泄洪雾化机理和影响范围的探讨[J]. 天津大学学报, 1991(特刊): 30-36. (LIU Xuanlie, AN Gang, YAO Zhongda. The investigation on the mechanism and sphere of influence of atomization by discharge flow[J]. Journal of Tianjin University, 1991(Special issue): 30-36. (in Chinese))
- [3] 刘昉. 挑流泄洪雾化数学模型改进与影响因素分析研究[D]. 天津: 天津大学, 2004. (LIU Fang. The improve of mathematic model for spray caused by jet from flip bucket and study on affecting factor[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004. (in Chinese))
- [4] 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. (HUANG Caiyuan. Study on the mathematic model and artificial neural networks model of high arch dam atomization by jumping jet[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. (in Chinese))
- [5] 刘昉, 练继建, 张晓军, 等. 挑流水舌入水喷溅试验研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(4): 113-117. (LIU Fang, LIAN Jijian, ZHANG Xiaojun, et al. Experimental study of atomization and splashing caused by a ski-jump jet into scour pool[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(4): 113-117. (in Chinese))
- [6] 尹大芳, 饶宏玲, 苏伟. 二滩拱坝的泄洪消能设计[J]. 水电站设计, 1998, 14(3): 27-31. (YIN Dafang, RAO Hongling, SU Wei. Flood discharge and energy dissipation design of Ertan arch dam[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 1998, 14(3): 27-31. (in Chinese))
- [7] CHOO Y J, KANG B S. A study on the velocity characteristics of the liquid elements produced by two impinging jet[J]. Experiments in Fluids, 2003(34): 655-661.
- [8] LASHERAS J C, VILLERMAUC E, HOPFINGER E J. Break-up and atomization of a round water jet by a high-speed annular air jet[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1998(357): 351-379.
- [9] 杨智鸿, 王愈. 泄洪雾化研究综述[J]. 中国水运, 2008, 8(7): 153-155. (YANG Zhihong, WANG Yu. Advances in research on flood discharge atomization[J]. China Water Transport, 2008, 8(7): 153-155. (in Chinese))
- [10] 练继建, 刘昉, 黄财元. 环境风和地形因素在挑流泄洪雾化数学模型中的影响[J]. 水利学报, 2005, 36(10): 1147-1152. (LIAN Jijian, LIU Fang, HUANG Caiyuan. Numerical study on effects of environmental wind and terrain on spray caused by jet from flip bucket[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(10): 1147-1152. (in Chinese))
- [11] 周辉, 吴时强, 陈慧玲. 泄洪雾化的影响及其分区和分级防护初探[C]//第二届全国水利学与水利信息学学术大会, 2005. (ZHOU Hui, WU Shiqiang, CHEN Huiling. Study on the influence of flood discharge atomization and its zoning and grading protection[C]//The Second National Symposium on Water Conservancy and Water Informatics, 2005. (in Chinese))
- [12] 周辉, 陈慧玲. 挑流泄洪雾化降雨的模糊综合评判方法[J]. 水利水运工程学报, 1994(1/2): 165-170. (ZHOU Hui, CHEN Huiling. Method of fuzzy synthetic evaluation for atomization-rain of jet overflow[J]. Hydro-Science and Engineering, 1994(1/2): 165-170. (in Chinese))
- [13] WU S Q, WU X F, ZHOU H, et al. Analysis and application of the scale effect of flood discharge atomization model[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(1): 64-71.
- [14] 张东, 刘继广, 刘之平, 等. 二滩水电站表孔水力学原型观测[C]//2000 全国水工水力学学术讨论会论文. 成都: 中国水力发电工程学会水工水力学专业委员会, 2000: 94-99. (ZHANG Dong, LIU Jiguang, LIU Zhiping, et al. Prototype observation of surface holes hydraulics for Ertan Hydropower Station [C]// 2000 National Symposium on Hydraulic and Hydraulics. Chengdu: Hydraulic Engineering Committee of China Hydroelectric Engineering Society, 2000: 94-99. (in Chinese))
- [15] 南京水利科学研究院. 雅砻江锦屏一级水电站枢纽泄洪雾化模型试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2003. (Nanjing Hydraulic Research Institute. Model test report on flood discharge atomization for Jinping I Hydropower Station at Yalong River[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2003. (in Chinese))

- [16] 陈惠玲, 黄国情. 溪洛渡水电站枢纽泄洪雾化物理模型试验报告 [R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2002. (CHEN Huiling, HUANG Guoqing. Model test report on flood discharge atomization for Xiluodu hydropower station [R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2002. (in Chinese))
- [17] 陈惠玲, 柴恭纯, 刘春阳. 小湾水电站泄洪雾化研究报告 [R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1995. (CHEN Huiling, CHAI Gongchun, LIU Chunyang. Report on flood discharge atomization for Xiaowan Hydropower Station [R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1995. (in Chinese))

Analysis of influences of flood discharge dispatching modes on atomization by high arch dams

YU Kaiwen, HAN Changhai

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Based on the prototype observation data, numerical simulation and physical model test results of atomization caused by the flood discharging of typical high arch dams, we analyze the atomization law of the high arch dams when the flood discharging outlets (tunnels) are partially open, and probe into the ways to mitigate the hazards caused by the atomization through flood discharge dispatching, so as to ensure the safe and effective operation of the hydro-power stations. The analysis results show that the distribution of atomized rain area generated by the crest outlets or bottom (mid-level) outlets flood discharging is closely related to the flow inflowing velocity, and the area and angle of the downstream water jet, and the influences of the inflowing velocity on the distribution of the atomized rain area given by the bottom (mid-level) outlets flood discharging are more obvious. When the reservoir water level and discharge amount are constant, the atomized rainfall intensity and its influence range of the flood discharging tunnel operation are the smallest, and the atomization influence area is concentrated in the lower reaches far from the dam body, while the atomized rainfall intensity and its influence range caused by the bottom (mid-level) outlets flood discharge are significantly larger than those of the crest outlet flood discharge or spillway tunnel operation. The analysis results can provide references for the reasonable flood discharge dispatching of high arch dam projects.

Key words: high arch dam; atomization caused by flood discharging; crest outlet; bottom (mid-level) outlets; flood discharging tunnel; dispatching mode