

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2020.0062

李广宁,孙双科,柳海涛,等.泄洪洞反弧段末端水力特性指标分布规律[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(3):174-183. LI G N, SUN S K, LIU H T, et al. Study on the distribution law of hydraulic characteristic index at the end of the anti-arch section of spillway tunnel[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(3): 174-183. (in Chinese)

## 泄洪洞反弧段末端水力特性指标分布规律

李广宁<sup>1</sup>, 孙双科<sup>1</sup>, 柳海涛<sup>1</sup>, 郑铁刚<sup>1</sup>, 郭子琪<sup>1,2</sup>, 王岑<sup>1,3</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 河北农业大学, 河北 保定 071001; 3. 三峡大学, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:**龙抬头式泄洪洞在水利水电工程中应用十分普遍,但是由于反弧段流态复杂,其产生空蚀破坏的原因尚不明晰。对不同泄洪洞体型掺气前后的工况进行三维数值计算,对其水力特性指标的分布规律进行研究。结果表明:随着落差  $\Delta z$  增大,反弧段流速逐步增大,水流空化数逐步减小;反弧半径  $R$  的改变对反弧段水力参数的影响有限。掺气水流的反弧段水力学指标主要取决于  $\Delta z$ ,而受反弧半径  $R$  的影响相对较小。当  $\Delta z$  减小时,反弧段末端的水力参数在掺气前后变化不大,反弧段末端下游 30 m(等于 15 倍的挑坎高度)处的掺气水流的流速明显降低,空化数明显增高,掺气水流的保护作用对空腔下游部分的水力参数影响更加明显。在反弧末端有二次流出现,两侧边墙附近存在对称涡,不仅对边墙附近的流速压力分布产生一定影响,也加剧了反弧段内的水力特性的复杂程度。

**关键词:**泄洪洞;掺气;反弧半径;空化数;二次流

中图分类号:TV135 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



### Study on the distribution law of hydraulic characteristic index at the end of the anti-arch section of spillway tunnel

LI Guangning<sup>1</sup>, SUN Shuangke<sup>1</sup>, LIU Haitao<sup>1</sup>, ZHENG Tiegang<sup>1</sup>, GUO Ziqi<sup>1,2</sup>, WANG Cen<sup>1,3</sup>

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China; 3. Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** Dragon-raise-head spillway tunnel is widely used in water conservancy and hydropower projects, due to its complex flow pattern at the anti-arch section the cause of cavitation damage is not clear. To better study this problem, this paper carried out three-dimensional numerical calculations on the working conditions of different spillway tunnels before and after aeration and made exploratory research on the distribution law of the hydraulic characteristics. The results showed that with the increase of drop  $\Delta z$  the velocity of flow in the anti-arch section increased, and the number of cavitation decreased gradually. The change of the radius had a limited influence on the hydraulic parameters of the anti-arch section. The hydraulic parameters at the end of the anti-arc section did not change much before and after aeration when the drop of  $\Delta z$  increased. With the increase of drop  $\Delta z$ , the velocity of aerated flow at 30m(equal to 15 times the height of the flip bucket)downstream of the end of the anti-arc section decreased visibly, and the number of cavitation increased apparently. The protective effect of aerated flow on the hydraulic parameters at the downstream part of the cavity was more obvious. Secondary flow occurred at the end of the arc, and symmetrical vortices exist near the sidewalls on both sides. The secondary flow phenomenon associated with the flow in the reverse arc section was a characteristic of the flow in the anti-arch section. It not only affected the velocity and pressure distribution near the sidewall but also made the hydraulic characteristics in the anti-arch section more complex.

收稿日期:2019-06-26 修回日期:2019-10-30 网络出版时间:2019-11-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20191122.1035.006.html>

基金项目:中国华能集团科技项目(HNKJ16-H12);云南省 2016 院士自由探索项目(HY2017/D03)

作者简介:李广宁(1983—),男,河北人,高级工程师,博士,主要从事水力学研究工作。E-mail:lgchina@163.com

**Key words:** spillway tunnel; aeration; reverse arc radius; cavitation number; secondary flow

龙抬头式泄洪洞在水利水电工程中得到了普遍应用。高坝大型龙抬头泄洪洞反弧段下游具有“流速高、单宽流量大、佛氏数低、底坡小”四个特点<sup>[1]</sup>,反弧末端、反弧段下游底板和侧墙均易产生空蚀破坏<sup>[2]</sup>。

有学者针对反弧段空蚀破坏的原因和水力特性开展了大量研究,但由于反弧段水流流态十分复杂,其产生空蚀破坏的根本原因尚不明晰。目前的学术成果普遍聚焦于壁面粗糙度<sup>[3-4]</sup>、掺气盲区<sup>[5-6]</sup>等问题,并提出了利用泄洪洞作用水头、反弧末端平均流速及反弧段水流空化数等3项水力特征值<sup>[7]</sup>判断反弧段是否会发生空蚀破坏。也有者为防止反弧段空蚀,提出了空间三维连续变动的V型掺气坎<sup>[8-9]</sup>、底部突跌凸型坎和侧墙加贴角联合掺气坎<sup>[10-11]</sup>等新型掺气措施。还有相者结合工程实例,如白鹤滩<sup>[12]</sup>、溪洛渡<sup>[13-14]</sup>、锦屏一级<sup>[14-15]</sup>、猴子岩<sup>[16]</sup>等水电站,对泄洪洞掺气减蚀问题进行了研究,并提出了优化建议。

随着研究的深入,数值模拟计算被广泛应用于掺气水流的相关研究中。水利工程的掺气水流主要是水气二相流<sup>[17-18]</sup>,并且需要考虑湍流扩散的影响<sup>[19-20]</sup>。张宏伟等<sup>[21-22]</sup>详细研究了水流的空化特性,并分析了不同反弧圆心角和反弧半径对反弧段及其下游水力特性的影响。许文海等<sup>[23]</sup>对甘肃九甸峡水电站左岸双洞式溢洪洞联合泄洪情形进行了数值模拟研究,获得了水深、流速、压力、空化数等水力要素的沿程分布规律。罗永钦等<sup>[24]</sup>对溪洛渡水电站3号泄洪洞的掺气减蚀问题进行了数值模拟,认为泄洪洞各掺气坎布置合理且具有稳定掺气空腔,掺气坎的体型基本合理。谭立新等<sup>[25]</sup>应用FLOW-3D分别模拟了三种不同坡度的前置掺气坎式与传统式阶梯溢洪道泄流壁面上的高速掺气水流,认为前置掺气坎坡度为1:5的阶梯溢洪道要优于其他三种体型。

高速水流空蚀破坏与掺气保护一直是水工水力

学的核心技术问题,由于问题的复杂性,目前有许多深层次的技术问题尚未明晰,开展相关研究工作任重而道远。

本文依托二滩水电站1号泄洪洞体型,改变进水口底板与反弧段末端挑坎高程间的高差( $\Delta z$ )及反弧段半径( $R$ )形成一系列泄洪洞体型。针对未掺气水流和掺气水流的水力参数进行对比,分析掺气对水力参数的影响程度,确定关键水力学指标。并对多个体型的水力学指标(流速、压强、弗劳德数、空化数等)的分布规律进行计算分析,为相关体型设计提供参考。

## 1 计算体型设计

计算的泄洪洞体型依托于二滩1号泄洪洞进行设计,泄洪洞由进口段、洞身段和出口段组成。其中进水口底板高程与反弧段末端挑坎高程之间的高程落差为变量 $\Delta z$ ,反弧段的半径为 $R$ 和圆心角为 $\theta$ 。泄洪洞断面为矩形,尺寸为13 m×13.5 m(宽×高),泄洪洞直坡段底坡坡度7.9%,沿洞身只设1道挑坎型掺气坎,(坡度为1:10,长10 m,挑坎总高度2 m),见图1。为了分析不同泄洪洞体型内的水力特性,对具有不同高程落差 $\Delta z=36.34\sim 76.34$  m和反弧半径 $R=100\sim 300$  m的多个体型进行计算,见表1。

模型进流边界,设定进流流量 $Q=3\ 573$  m<sup>3</sup>/s;出流边界为自由出流;采用无滑移壁面;水面为自由表面。模型采用嵌套加密的矩形网格,网格尺寸0.02 m到0.5 m不等,网格总数约79万个。

## 2 控制方程及其解法

采用FLOW-3D<sup>[27]</sup>进行计算,其控制方程不仅包括连续方程、动量方程、RNG k- $\epsilon$ 方程,还包括变密度方程和空气运动方程用于掺气水流的计算。

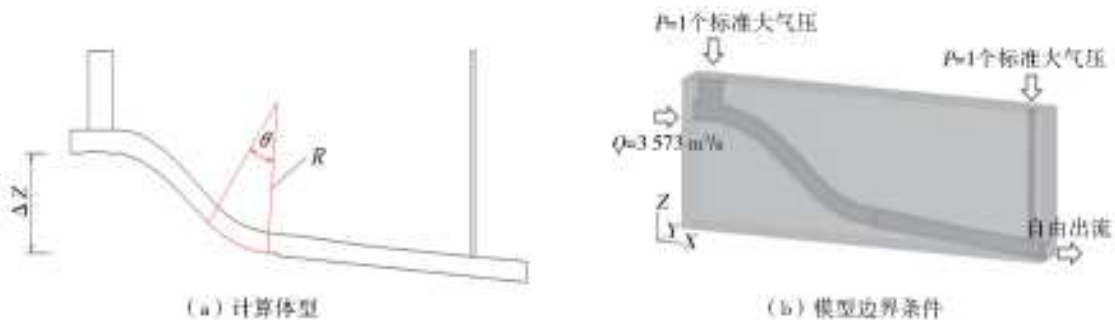


图1 计算体型及边界条件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of calculation body type and boundary conditions

表 1 各泄洪洞体型参数

Tab. 1 Shape parameters of spillway tunnels

体型	进口底板 高程/m	反弧段半径 R/m	反弧段末端挑坎 高程/m	进口底板与挑坎 末端高差 Δz/m
1			1 086.66	76.34
2			1 096.66	66.34
3		100	1 106.66	56.34
4			1 116.66	46.34
5	1 163		1 126.66	36.34
6		150		66.34
7		200		66.34
8		250	1 096.66	66.34
9		300		66.34

## 2.1 基本控制方程

连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u\rho) + \frac{\partial}{\partial y}(v\rho) + \frac{\partial}{\partial z}(w\rho) =$$

RSOR+RDIF (1)

式中:  $U=(u, v, w)$  为流体速度, m/s;  $\rho$  为流体密度, kg/m<sup>3</sup>; RSOR 为质量源项; RDIF 为紊流扩散项。若在直角坐标系内且为不可压缩流可表示为:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\text{RSOR}}{\rho} \quad (2)$$

动量方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} =$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x - \frac{1}{\rho} \Delta \tau_x - Ku - \frac{\text{RSOR}}{\rho} u - F_x \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} =$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + G_y - \frac{1}{\rho} \Delta \tau_y - Kv - \frac{\text{RSOR}}{\rho} v - F_y \quad (4)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} =$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z - \frac{1}{\rho} \Delta \tau_z - Kw - \frac{\text{RSOR}}{\rho} w - F_z \quad (5)$$

式中:  $V_F$  为流体通过网格时所占体积与网格总面积的比;  $A_x, A_y, A_z$  为 X、Y、Z 方向流体通过网格时所占面积与网格总面积的比;  $U=(u, v, w)$  为流体速度;  $P$  为压力, Pa;  $G$  为重力, N;  $\tau$  为黏度应力张量;  $K$  为多孔挡板或障碍造成的拖拽力, N; RSOR 为质量源项;  $F$  为其它力, N。

k 方程

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} =$$

$$v_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial u_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( a_k v_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \epsilon \quad (6)$$

ε 方程

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = c_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} v_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}$$

$$\left( a_\epsilon v_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) - c_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} - R \quad (7)$$

$$\text{式中: } R = \frac{c_\mu \eta^3 \left( \frac{\eta}{\eta_0} \right) \epsilon^2}{(1+c_3 \eta^3) k}; v_{eff} = v_t \left[ 1 + \sqrt{\frac{c_\mu k}{\mu \sqrt{\epsilon}}} \right]^2;$$

$\eta = \sqrt{\left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial u_j} \frac{\kappa}{\epsilon}}$ ;  $v_t$  为过流黏滞系数;  $\mu$  为动力黏滞系数;  $c_{\epsilon 1} = 1.42$ ;  $c_{\epsilon 2} = 1.68$ ;  $c_3 = 0.012$ ;  $\eta_0 = 4.38$ ;  $c_\mu = 0.085$ ;  $a_k = 0.7194$ ;  $a_\epsilon = 0.7194$ 。

掺气水流计算。

FLOW-3D 中液体表面掺气的基本原理是水流紊动充分且强烈发展后, 水体中的漩涡上升并推动较小水涡跃离自由表面, 随后小水涡挟带一定量的空气落回水体。计算掺气水流时在应用变密度方程的同时, 还会开启空气的运动方程(drifting of air in water)考虑浮力效应的影响, 来模拟空气在水流中的移动和从自由水面溢出的过程。计算不考虑温度的影响, 不考虑膨胀效应, 气泡粒径为默认值。

变密度方程

$$\bar{\rho}(i, j, k) = f(i, j, k)\rho_1 + (1-f(i, j, k))\rho_2 \quad (8)$$

空气运动方程

对于水和气两种介质, 分别有如下方程:

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \times \nabla u_1 = -\frac{1}{\rho_1} \nabla P + F + \frac{K}{f\rho_1} u_r \quad (9)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} + u_2 \times \nabla u_2 = -\frac{1}{\rho_2} \nabla P + F + \frac{K}{f\rho_2} u_r \quad (10)$$

$$u_r = u_2 - u_1 \quad (11)$$

$$\bar{u} = fu_1 + (1-f)u_2 \quad (12)$$

$$\nabla \times \bar{u} = 0 \quad (13)$$

由(8)和(9)式可得:

$$\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_2 \times \nabla u_2 - u_1 \times \nabla u_1 =$$

$$\left( \frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} \right) \nabla P - \left( \frac{1}{(1-f)\rho_2} - \frac{1}{f\rho_1} \right) Ku_r \quad (14)$$

式中:  $u_1$  和  $u_2$  是连续介质(水)和分散介质(水中的气)的微观流速, m/s;  $f$  是连续介质的容积率;  $F$  是体积力, N;  $K$  是拖曳系数;  $u_r$  是  $u_1$  和  $u_2$  的速度差;  $\bar{u}$  是体积平均流速。

## 2.2 计算方法

计算采用 VOF(volume of fluid)法<sup>[28]</sup>对液面进行跟踪计算。对每一相引入体积分数变量  $\alpha_q$ , 通过求解每一控制单元内体积分数值确定相间界面。

设某一控制单元内第  $q$  相体积分数为  $\alpha_q$  ( $0 \leq \alpha_q \leq 1$ )。则当  $\alpha_q = 0$  时,控制单元内无第  $q$  相流体;  $\alpha_q = 1$  时,控制单元内充满第  $q$  相流体;  $0 < \alpha_q < 1$  时,控制单元包含相界面。在每个控制单元内各相体积分数之和等于 1,即

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (15)$$

$\alpha_q$  应满足以下方程:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + U_i \frac{\partial \alpha_q}{\partial X_i} = 0 \quad (16)$$

计算中所有控制单元表面体积通量的计算采用隐式差分格式,即

$$\frac{\alpha_q^{n+1} - \alpha_q^n}{\Delta t} V + \sum_f (U_f^{n+1} \alpha_{q,f}^{n+1}) = 0 \quad (17)$$

式中: $n+1$  为当前时间步指示因子; $n$  为前一时间步指示因子; $\alpha_{q,f}$  为单元表面第  $q$  相体积分数计算值; $V$  为控制单元体积; $U_f$  为控制单元表面体积通量。

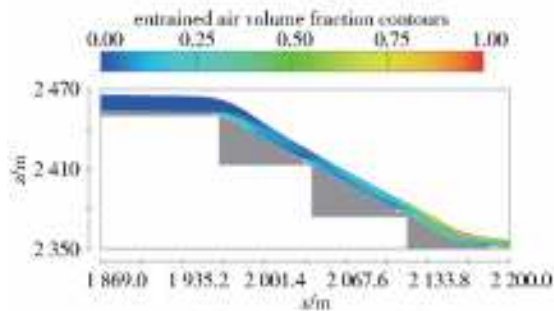
模型求解采用有限体积法,二阶迎风格式,压力—速度耦合采用压力校正法,离散方程的求解采用 GMRES 法,时间差分采用全隐格式。

## 2.3 模型验证

采用双江口溢洪道模型试验的结果<sup>[29]</sup>对 FLOW-3D 数学模型进行验证。双江口溢洪道在明流段桩号 1+928.173 m、2+003.173 m、2+078.173 m 断面布置三道掺气设施,第一道采用跌坎式,跌坎高度 1.5 m,第二道与第三道采用坎槽式,挑坎高度 0.4 m、槽深 1.4 m。出口鼻坎采用斜切扩散挑坎,底弧半径 80 m,两侧侧墙扩散段圆弧半径均为 300 m,斜切坎溢流前缘出射角度为  $-3.594 \sim 4.082$  度。水工模型试验几何比尺选用 1:45。掺气浓度测量采用 CQG-2004 型掺气浓度仪。

模型进口为桩号为 1+869 m 的断面,入流流速 21.1 m/s,水深 11.7 m,对应泄量为 4 138.44 m<sup>3</sup>/s。模型出口为出口鼻坎下游桩号 12+220 m 的断面,自由出流。其求解方法参照 2.2 节。

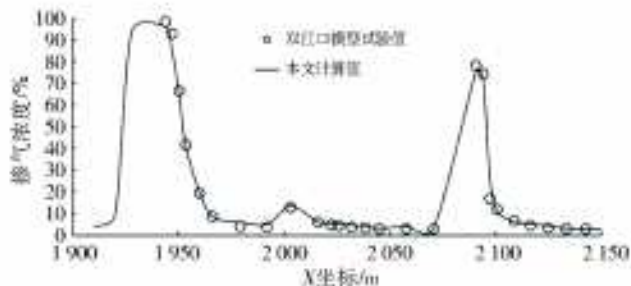
比较模型试验及数值模拟结果,掺气浓度误差为 6~15%,模拟值与试验值的误差在合理范围内,见图 2。可知,本文所选用的模拟方法与试验结果吻合较好,所选模型合理。



(a) 掺气浓度分布云图, 计算结果



(b) 坡度段水流流态, 试验照片



(c) 溢洪道底板掺气浓度沿程分布对比

图 2 双江口溢洪道试验结果与本文计算结果对比

Fig. 2 Comparison between the experimental results of Shuangjiangkou spillway and the calculated results

## 3 计算结果及分析

### 3.1 掺气对高速水流的影响

未掺气水流是在计算过程当中不开启卷气模型中的变密度方程和空气运动方程,不会计算空气因水流表层的紊动而被卷携带走的过程,该过程计算

的水流为掺气前的纯水状态的水流。掺气水流是在计算未掺气水流的基础上,增加了变密度方程和空气运动方程,可模拟空气从水流表面掺入、在水流中运动、溢出的全过程。将掺气水流与未掺气水流所得水力参数进行对比,从而识别出受掺气影响较大的关键水力参数。

对设计泄洪洞体型 2( $R=100\text{ m}$ ,  $\Delta z=66.34\text{ m}$ ) 掺气前、后的水力特性进行对比研究,对反弧段末端的水力参数(流速、压强、弗劳德数、空化数等)进行分析。反弧段末端挑坎处掺气前后的各水力参数的变化均较小,主要水力参数变化体现在掺气空腔之后的部分,采用挑坎下游 30 m(等于 15 倍的挑坎高度)处的数据进行比较。

挑坎下游 30 m(等于 15 倍的挑坎高度)处的出流流速,掺气前为 40.96 m/s,掺气后为 39.57 m/s,

减小了 3.4%;挑坎下游 30 m 处的压强,掺气前为  $29.26 \times 9.8\text{ kPa}$ ,掺气后为  $16.21 \times 9.8\text{ kPa}$ ,减小了 44.6%;挑坎下游 30 m 处的弗劳德数,掺气前为 4.73,掺气后为 4.36,减小了 7.8%;挑坎下游 30 m 处的空化数,掺气前为 0.21,掺气后为 0.23,增大了 9.5%,见图 3。

由以上结果可知,掺气对挑坎下游 30 m(等于 15 倍的挑坎高度)处水力参数影响较大,其中压强和空化数变化比较明显,弗劳德数和流速变化相对较小。

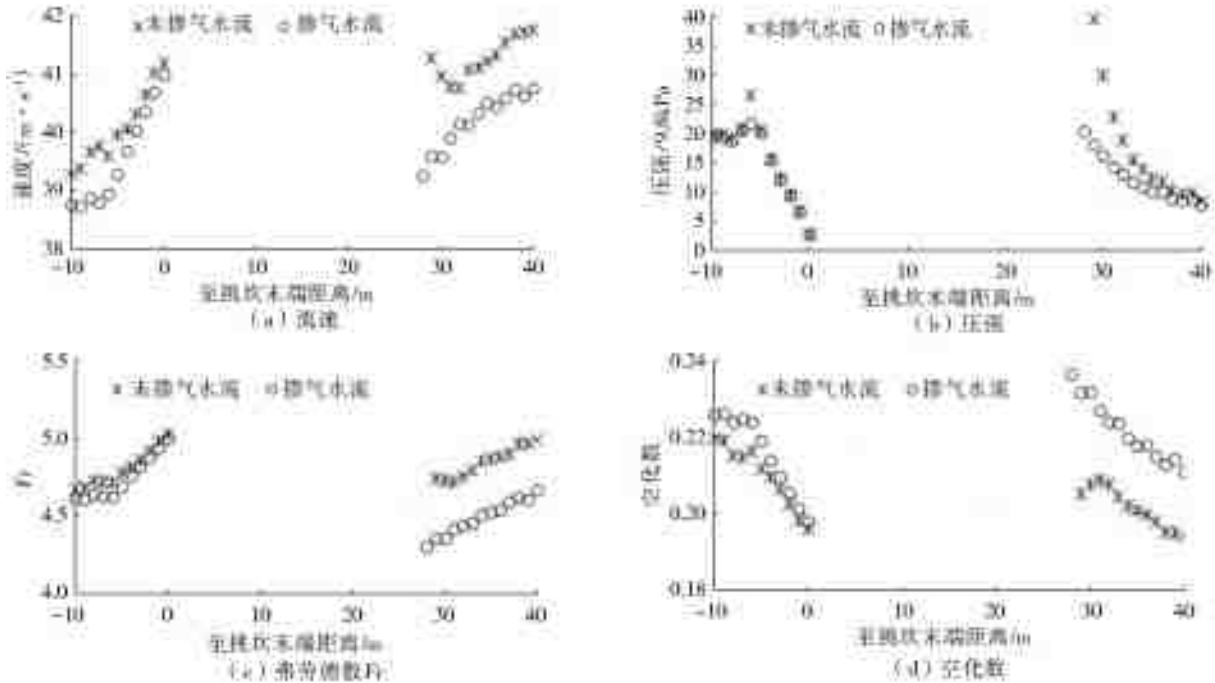


图 3 掺气前后泄洪洞体型 2 底板中心处水力参数对比

Fig. 3 Comparison of hydraulic parameters at the center of bottom plate of spillway tunnel body shape 2 before and after aeration

### 3.2 相同半径 $R$ , 不同 $\Delta z$ , 掺气水流水力参数对比

反弧段流速分布相似,反弧段末端流速数值大小基本一致,空腔下游的掺气水流流速数值略有降低。反弧段压强分布相似,反弧段末端压强数值大小基本一致,空腔下游的掺气水流压强数值明显降低,尤其水流冲击点的压强降低最为明显,见图 4。反弧段弗劳德数  $F_r$  分布相似,反弧段末端弗劳德数  $F_r$  数值大小基本一致,空腔下游的掺气水流弗劳德数  $F_r$  数值明显降低。反弧段空化数分布相似,反弧段末端空化数数值大小基本一致,空腔下游的掺气水流空化数有明显升高,落差越大,升高幅度越大,见图 5。

### 3.3 相同 $\Delta z$ , 不同半径 $R$ , 掺气水流水力参数对比

反弧段流速分布相似,反弧段末端流速数值大

小基本一致,空腔下游的掺气水流流速数值在空腔后流速分布更分散,且数值更小。反弧段压强分布相似,反弧段末端压强数值大小基本一致,空腔下游的掺气水流压强数值明显降低,尤其水流冲击点的压强降低最为明显。反弧段弗劳德数  $F_r$  分布相似,反弧段末端弗劳德数  $F_r$  数值大小基本一致,空腔下游的掺气水流弗劳德数  $F_r$  数值明显降低,见图 6。反弧段空化数分布相似,反弧段末端空化数数值大小基本一致,空腔下游的掺气水流空化数有明显升高,落差越大,升高幅度越大,见图 7。

### 3.4 反弧段边墙压强与流速

由于边界层效应,反弧段边墙流速相比与中间流速较低,同一断面靠近边墙处水流离心力比中间小,存在横向压力梯度,进而引起水流压力的重新分布,边墙水面随压力分布的变化升高。反弧段断面中间水深沿程减小,边墙水深沿程壅高。在反弧末端有二次流出现,两侧边墙附近存在对称涡,如图 8

所示,不仅对边墙附近的流速压力分布产生一定影响,也加剧了反弧段内水力特性的复杂程度。

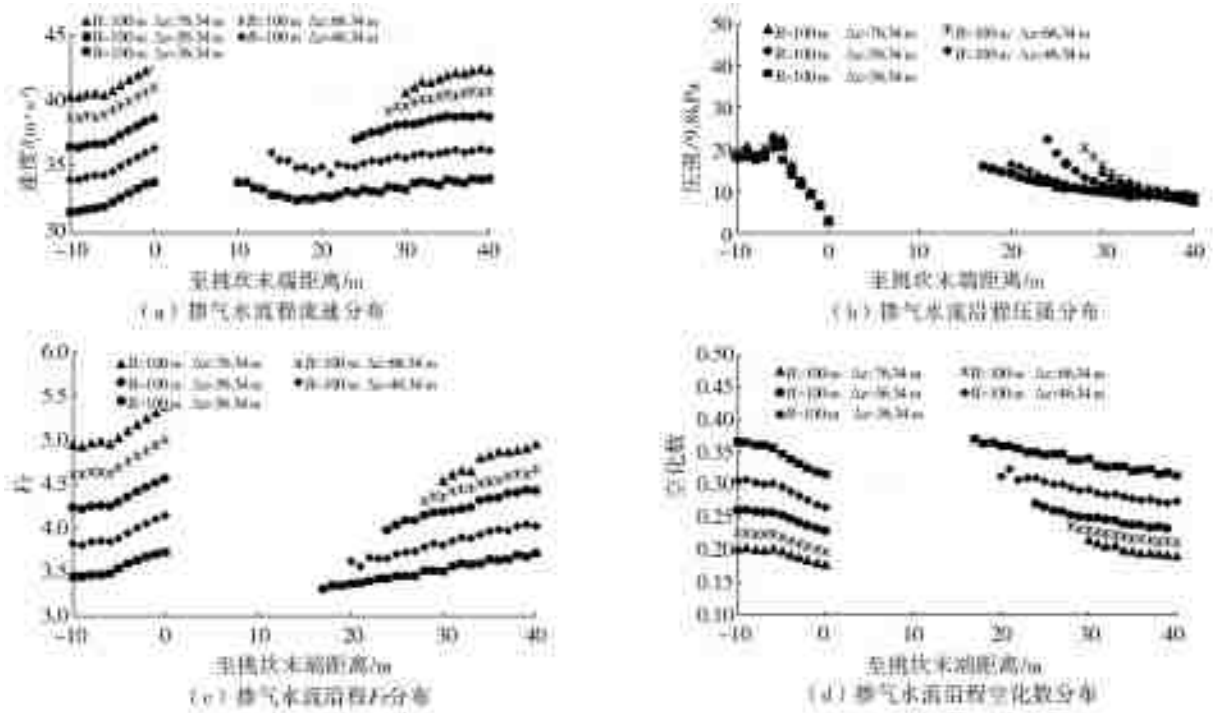


图4 不同  $\Delta z$  泄洪洞体型底板中心线相关水力参数对比

Fig. 4 Comparison of hydraulic parameters related to the central line of floor of different  $\Delta z$  spillway tunnels

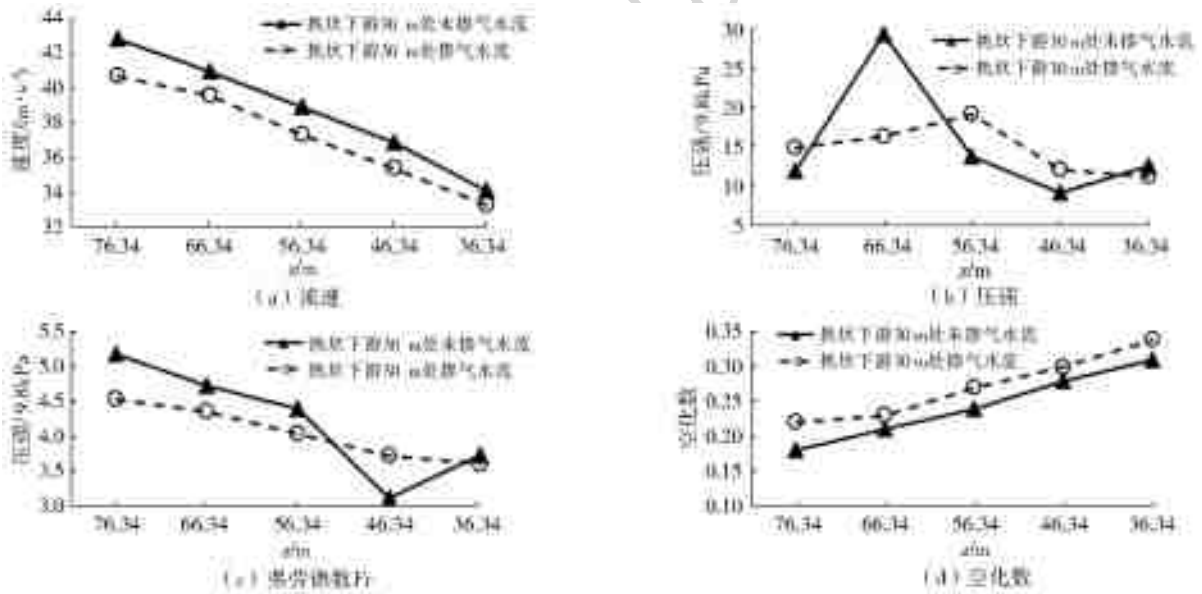


图5 不同  $\Delta z$  泄洪洞体型反弧段下游 30 m(等于 15 倍的挑坎高度)处水力参数

Fig. 5 Hydraulic parameters at 30 m (equal to 15 times the height of the flip bucket) downstream of anti-arc section of different  $\Delta z$  spillway tunnels

相同  $\Delta z$ ,不同半径  $R$ ,针对二次流对挑坎末端上游 10 m 处的流速和压强进行分析。由于  $\Delta z$  相同,各体型挑坎末端流速分布基本相同。受二次流影响,挑坎上游 10 m 处边墙的压力有所变化,反弧半径越大,边墙压力越小,见图 9。不同  $\Delta z$  与反弧半径  $R$  条件下,各计算体型掺气水流反弧段及其下游边墙的流速分布大体表现出“中间大,上下小”的垂向分布规律。

### 3.5 综合分析

各个泄洪洞体型掺气前后的水力特性,以反弧段末端为分界,其上游部分主要依靠水流表面掺气,掺气能力有限,对水力参数影响较小。而掺气空腔之后的水流受掺气影响较大,各水力参数的变化也较为明显,其掺气后水流流速降低,压强减小,弗劳德数减小,空化数增大。掺气对挑坎下游 30 m 处水力参数影响较大,其中压强和空化数变化比较明

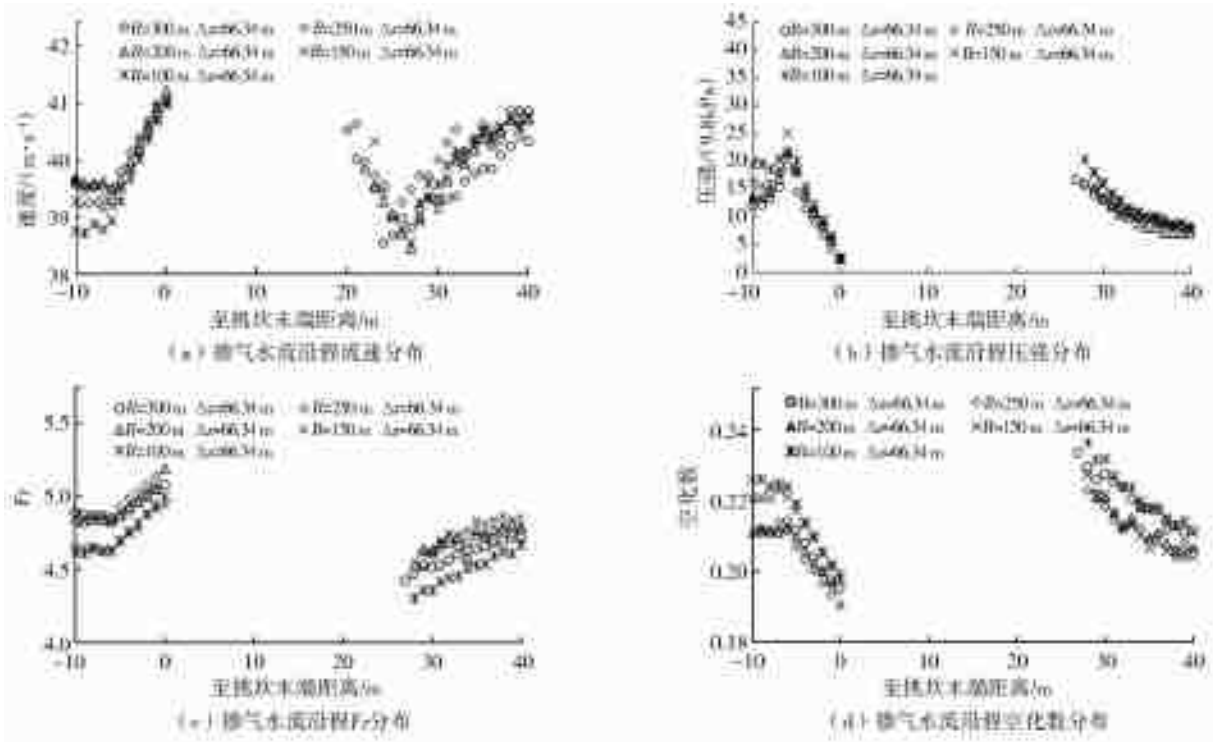


图 6 不同  $R$  泄洪洞体型中心纵剖面相关水力参数对比  
Fig. 6 Comparisons of hydraulic parameters of different  $R$  spillway tunnels

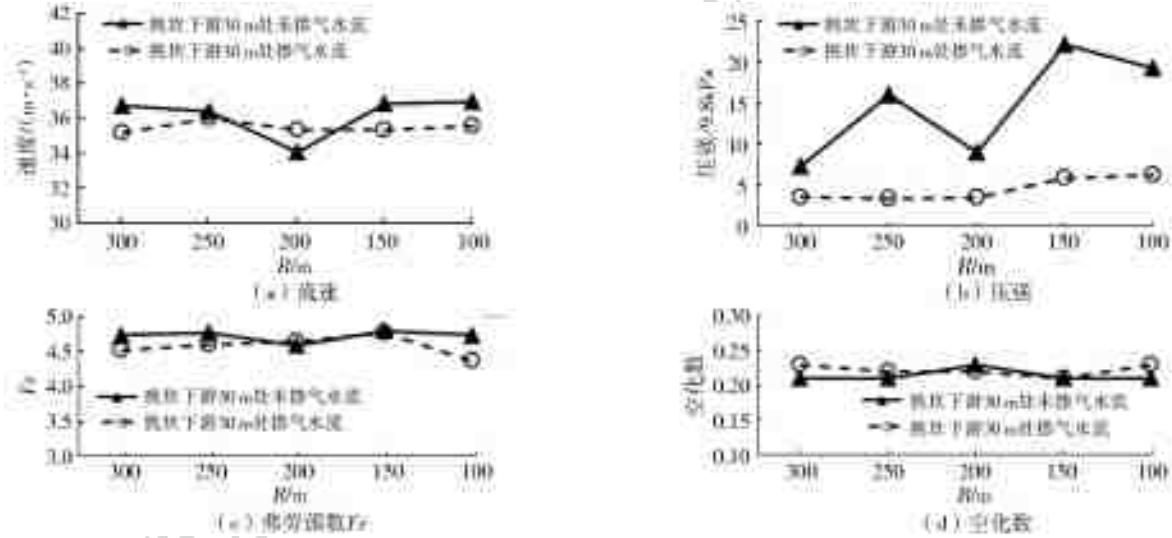


图 7 不同  $R$  泄洪洞体型反弧段下游 30 m(等于 15 倍的挑坎高度)处水力参数

Fig. 7 Hydraulic parameters at 30 m(equal to 15 times the height of the flip bucket)downstream of anti-arc section of different  $R$  spillway tunnels

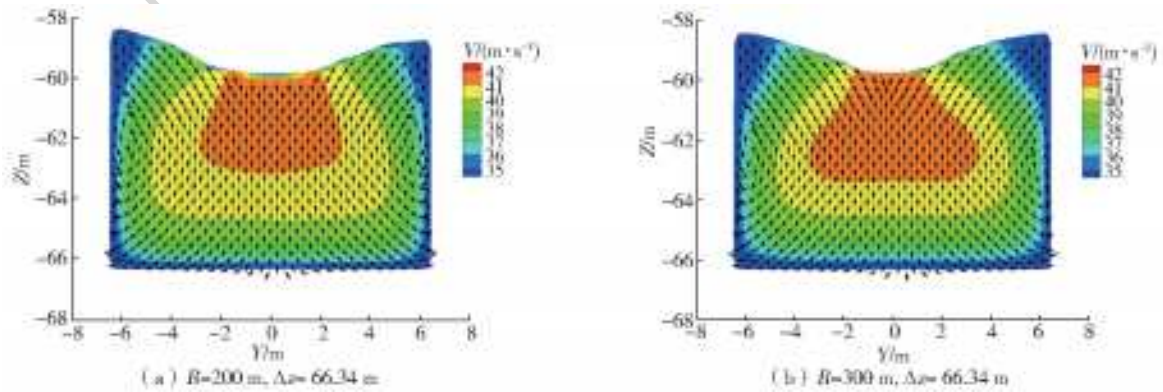
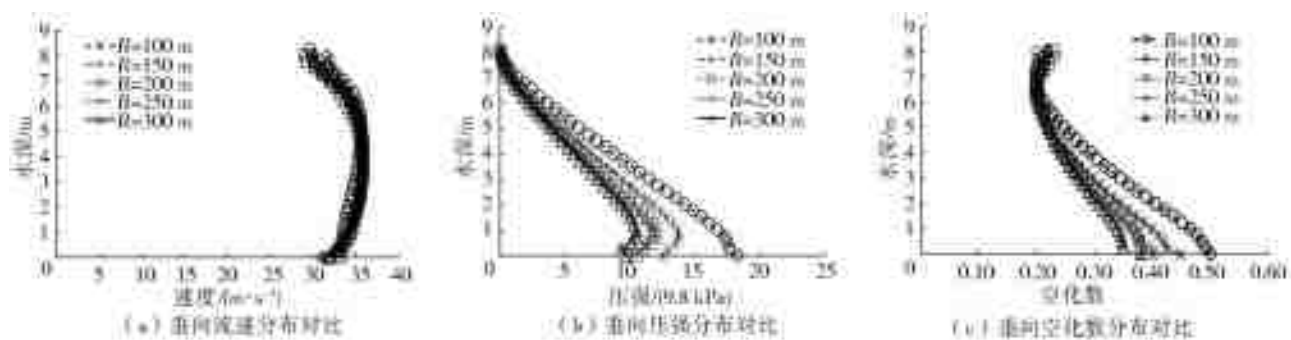


图 8 典型反弧半径  $R$  泄洪洞体型挑坎上游 10 m 处二次流截面

Fig. 8 Section diagrams of secondary flow at 10 m upstream of bucket with typical anti-arc radius  $R$

注:各体型进口底板与挑坎末端高差  $\Delta z=66.34$  m。



注:各体型进口底板与挑坎末端高差  $\Delta z=66.34$  m。

图9 不同反弧半径  $R$  体型挑坎上游 10 m 处水力参数对比

Fig. 9 Comparison of hydraulic parameters at 10 m upstream of R-type flip bucket with different anti arc radius

显,弗劳德数和流速变化相对较小。

进水口底板高程与反弧段末端挑坎高程之间的高差  $\Delta z$  是影响水力参数的主要因素。当  $\Delta z$  变化时,流速,压强,弗劳德数,空化数均相应的规律性的变化,且变幅明显。 $\Delta z$  增大时,挑流空腔长度增加,落地点压强增大,弗劳德数增大,空化数减小。

反弧半径  $R$  对水力参数的影响相对较弱,是次要因素。反弧半径  $R$  的变化,同样也会引起水力参数的变化,但是尚未表现出明显的规律性,且变化幅度较小。

国内外发生空蚀破坏的泄洪洞工程泄洪水头均超过 100 m,破坏位置集中于反弧段末端。因此,完善掺气减蚀设施设计、控制施工不平整度、加强泄洪洞底板的锚固设计是确保泄洪洞与溢洪道不出现破坏的关键所在。夏毓常<sup>[7]</sup>在总结相关破坏实例的基础上提出了弧段末端平均流速大于 37 m/s,或反弧段水流空化数小于 0.22 以发生破坏的临界值。本文计算体型中  $R=100$  m,  $\Delta z=56.34$  m 的体型是满足该临界条件的体型,可以作为反弧段设计的参考。

## 5 结论

对不同泄洪洞体型掺气前后的工况进行三维数值计算,对其水力参数进行分析,得出以下主要结论:

(1)泄洪洞体型掺气前后的水力特性,以反弧段末端为分界,其上游部分主要依靠水流表面掺气,掺气能力有限,对水力参数影响较小。而掺气空腔之后的水流受掺气影响较大,其中压强和空化数变化比较明显,弗劳德数和流速变化相对较小。

(2)随  $\Delta z$  增大,反弧段流速逐步增大,水流空化数逐步减小;而反弧半径  $R$  的改变对反弧段水力参数的影响有限。掺气水流的反弧段水力学指标主要取决于  $\Delta z$ ,而受反弧半径  $R$  的影响相对较小。

(3)当  $\Delta z$  减小时,反弧段末端下游 30 m(等于 15 倍的挑坎高度)处的掺气水流的流速明显降低,

空化数明显增高,掺气水流的保护作用对空腔下游部分的水力参数影响更加明显。进水口底板高程与反弧段末端挑坎高程之间的高差  $\Delta z$  是影响水力参数的主要因素,反弧半径  $R$  对水力参数的影响相对较弱,是次要因素。

(4)反弧末端有二次流出现,两侧边墙附近存在对称涡,不仅对边墙附近的流速压力分布产生一定影响,也加剧了反弧段内水力特性的复杂程度。相同  $\Delta z$ ,不同半径  $R$ ,各体型挑坎末端流速分布基本相同,但是受二次流影响,挑坎上游 10 m 处边墙的压力有所变化,反弧半径越大,边墙压力越小。

## 参考文献(References):

- [1] 郭军,张东,刘之平,等.大型泄洪洞高速水流的研究进展及风险分析[J].水利学报,2006,37(10):1193-1198. (GUO J, ZHANG D, LIU Z P, et al. Achievements on hydraulic problems in lardge spillway tunnel with a high head and largedischarge flow and its risk analysis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(10): 1193-1198. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 0559-9350. 2006. 10. 007.
- [2] 陈文学,谢省宗,刘之平,等.龙抬头式泄洪洞反弧末端边墙掺气减蚀设施的研究[J].水力发电,2005,31(4):31-34. (CHEN W X, XIE S Z, LIU Z P, et al. Study on the sidewall aerators of high head ogee spillways[J]. Water Power, 2005, 31(4): 31-34. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 0559-9342. 2005. 04. 009.
- [3] 牛争鸣,李建中,张志昌,等.溢流反弧段的紊流边界层及摩阻特性[J].水利学报,1994(3):57-65. (NIU Z M, LI J Z, ZHANG Z C, et al. Turbulent boundary layer and friction characteristics of spillway buckets [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994(3): 57-65. (in Chinese)) DOI:10. 13243/j. cnki. slxb. 1994. 03. 008.
- [4] 胡明龙.压力梯度区空化特性试验研究[J].水利水电科技进展,1996,16(4):36-51. (HU M L. Experimental study on the pressure gradient zone cavitation charac-



- teristics[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 1996, 16(4): 36-40. (in Chinese) DOI:CNKI;SUN;SLSD. 0. 1996-04-007.
- [5] 刘超,杨永全. 龙抬头明流泄洪洞反弧段下游边墙防蚀探讨[J]. *水利水电技术*, 2003, 34(9): 26-73. (LIU C, YANG Y Q. Discussion on air entrainment to avoid cavitation for downstream sidewalls of ogee section in spillway tunnel[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2003, 34(9): 26-28. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0860. 2003. 09. 008.
- [6] 纪伟. 龙抬头泄洪洞反弧段空化空蚀研究综述[J]. *水科学与工程学报*, 2006(1): 51-53. (JI W. Summary of study on ogee-section cavitation in longtaitou spillway tunnels[J]. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2006(1): 51-53. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-9900. 2006. 01. 023.
- [7] 夏毓常. 判别泄洪洞反弧段发生空蚀的水力特性标准[J]. *长江科学院院报*, 1998, 15(2): 49-53. (XIA Y C. Discriminating standard of hydraulic characteristics on cavitation damage at concave reach of tunnel spillway [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 1998, 15(2): 49-53. (in Chinese))
- [8] 刘超, 杨永全. 泄洪洞反弧末端掺气减蚀研究[J]. *水动力学研究与进展*, 2004, 19(3): 375-382. (LIU C, YANG Y Q. Study on air entrainment to alleviate cavitations at the end of anti-arc in spillway tunnel[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2004, 19(3): 375-382. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-4874. 2004. 03. 019.
- [9] 刘超,张光科,冯凌霄,等. 泄洪洞反弧段上游掺气坎对反弧段下游侧墙的减蚀作用[J]. *水利水电科技进展*, 2007, 27(1): 46-49. (LIU C, ZHANG G K, FENG L X, et al. Effect of upstream aerator in ogee section of spillway tunnel on cavitation alleviation of downstream sidewall[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2007, 27(1): 46-50. (in Chinese) DOI: 10. 3880/j. issn. 1006-7647. 2007. 01. 012.
- [10] 王海云,戴光清,杨永全,等. 高水头泄水建筑物掺气坎体型研究[J]. *水动力学研究与进展*, 2006, 21(5): 646-653. (WANG H Y, DAI G Q, YANG Y Q, et al. Experimental study on aerator type of hydraulic structures with high water head[J]. *Journal of hydrodynamics*, 2006, 21(5): 646-653. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-4874. 2006. 05. 014.
- [11] 王海云,戴光清,刘超,等. 泄水建筑物反弧末端掺气坎的布置研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2010, 42(2): 9-14. (WANG H Y, DAI G Q, LIU C, et al. Study on aerator arrangement of concave reach bottom of discharge structures[J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2010, 42(2): 9-14. (in Chinese) DOI: 10. 15961/j. jsuese. 2010. 02. 014.
- [12] 张法星,徐建强,徐建军,等. 白鹤滩水电站#1泄洪洞反弧段水力特性的数值模拟[J]. *水电能源科学*, 2008, 26(6): 28-31. (ZHANG F X, XU J Q, XU J J, et al. Numerical simulation on concave flow through invert of No. 1 spillway tunnel in Baihetan Hydropower Station[J]. *Water Resources and Power*, 2008, 26(6): 28-31. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-7709. 2008. 06. 032.
- [13] 焦爱萍,张春满,刘宪亮. 溪洛渡泄洪洞掺气减蚀设施及体型优化的试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2008, 27(2): 70-73. (JIAO A P, ZHANG C M, LIU X L. Experimental research on air entrainment and decreasing erosion instrument and optimizing bodily form of Xiluodu Spillway Tunnel[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2008, 27(2): 70-73. (in Chinese) DOI: 10. 13522/j. cnki. ggps. 2008. 02. 006.
- [14] 张宏伟,刘之平,张东,等. 高水头大流量泄洪洞侧壁掺气设施水力特性研究[J]. *水力发电学报*, 2015, 34(10): 111-116. (ZHANG H W, LIU Z P, ZHANG D, et al. Study on hydraulic characteristics of sidewall aerators in high-head large-discharge spillway tunnel [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2015, 34(10): 111-116. (in Chinese) DOI: 10. 11660/slfdbx. 20151014.
- [15] 范灵,张宏伟,刘之平,等. 明流泄洪洞布置形式对水力特性影响的数值研究[J]. *水力发电学报*, 2009, 28(3): 126-131. (FAN L, ZHANG H W, LIU Z P, et al. Numerical study on hydraulic characteristic of free surface flow in spillway tunnel with different configuration [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2009, 28(3): 126-131. (in Chinese))
- [16] 于野,刘亚坤,倪汉根,等. 洞式溢洪道掺气减蚀设施的体型优化研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2010, 8(1): 7-9. (YU Y, LIU Y K, NI H G, et al. Optimization design and study for aerator's figure of spillway [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2010, 8(1): 7-9. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-1144. 2010. 01. 003.
- [17] 谭立新,许唯临,杨永全,等. 水气二相流特点及其单流体模型[J]. *西安理工大学学报*, 2000, 16(3): 280-283. (TAN L X, XU W L, YANG Y Q, et al. Behaviors of air-water two-phase flow and its homogeneous model[J]. *Journal of Xi'an University of technology*, 2000, 16(3): 280-283. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1006-4710. 2000. 03. 014.
- [18] 谭立新,许唯临,杨永全,等. 明渠气水二相流的双流体模型[J]. *应用力学学报*, 2001, 18(4): 28-31. (TAN

- L X, XU W L, YANG Y Q, et al. A two-fluid model of air-water two-phase flow in open channels[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2001, 18(4): 28-31. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-4939. 2001. 04. 005.
- [19] 张宏伟, 谭立新, 陈刚, 等. 水气二相流双流体模型研究现状[J]. 陕西水力发电, 2001, 17(4): 15-18. (ZHANG H W, TAN L X, CHEN G, et al. A brief review on two-fluid models of air-water two-phase flows[J]. Journal of Shaanxi Water Power, 2001, 17(4): 15-18. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1674-3814. 2001. 04. 005.
- [20] 张宏伟, 刘之平, 张东, 等. 挑坎下游高速掺气水流的数值模拟[J]. 水利学报, 2008, 39(12): 1302-1308. (ZHANG H W, LIU Z P, ZHANG D, et al. Numerical simulation of aerated high velocity flow downstream of an aerator[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(12): 1302-1308. (in Chinese) DOI: 10. 3321/j. issn: 0559-9350. 2008. 12. 004.
- [21] 张宏伟, 刘之平, 张东, 等. 掺气水流声速的研究[J]. 水利学报, 2013, 44(9): 1015-1022. (ZHANG H W, LIU Z P, ZHANG D, et al. Study on the sound velocity in an aerated flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(9): 1015-1022. (in Chinese) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2013. 09. 004.
- [22] 张宏伟, 张东, 吴一红, 等. 泄洪洞反弧连接段水流特性的三维数值分析[J]. 水动力学研究与进展, 2008, 23(3): 261-268. (ZHANG H W, ZHANG D, WU Y H, et al. Numerical study on the hydraulic characteristics of water flow in the anti-arc of spillway tunnel [J]. Journal of Hydrodynamics, 2008, 23(3): 261-268. (in Chinese) DOI: 10. 16076/j. cnki. cjhd. 2008. 03. 005.
- [23] 许文海, 党彦, 李国栋, 等. 双洞式溢洪洞三维流动的数值模拟[J]. 水力发电学报, 2007, 26(1): 56-60. (XU W H, DANG Y, LI G D, et al. Three dimensional numerical simulation of the bi-tunnel spillway flow[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(1): 56-60. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-1243. 2007. 01. 012.
- [24] 罗永钦, 刁明军, 何大明, 等. 高坝明流泄洪洞掺气减蚀三维数值模拟分析[J]. 水科学进展, 2012, 23(1): 110-116. (LUO Y Q, DIAO M J, HE D M, et al. Numerical simulation of aeration and cavitation in high dam spillway tunnels[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(1): 110-116. (in Chinese) DOI: 10. 1309. P. 20120104. 2014. 011.
- [25] 谭立新, 李梅玲, 唐敏, 等. 前置掺气坎坡度对阶梯溢洪道掺气水流影响的数值模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(4): 150-155. (TAN L X, LI M L, TANG M, et al. Numerical simulation of the influence of the slope of the front aerator on the aeration flow of the stepped spillway [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(4): 150-155. (in Chinese) DOI: 10. 11705/j. issn. 1672-643X. 2018. 04. 25.
- [27] FLOW-3D 1v 9. 4 User Manual[EB/OL]. <http://www.doc88.com/p-789476188402.html>.
- [28] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39: 201-225. DOI: 10. 1016/0021-9991(81)90145-5.
- [29] 柳海涛, 孙双科. 大渡河双江口水电站洞式溢洪道水工模型试验及泄洪雾化影响分析 HY2009035[R]. 中国水利水电科学研究院, 2009. (LIU H T, SUN S K. Hydraulic model test of tunnel spillway of Shuangjiangkou Hydropower Station on Dadu River and effect of flood discharge atomization hy2009035 [R]. China Institute of Water Resources and Hydro-power Research, 2009. (in Chinese))