

泄槽底部掺气坎后水流掺气浓度分布模型试验

马关博, 徐一民, 乔梁, 荣 岩

(昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要:针对泄槽底部掺气坎后的掺气浓度分布规律较为复杂、研究成果较少的问题,为了更清楚地探究泄槽底部掺气坎后上游直段、反弧段及下游直段水流掺气浓度分布规律,采用含有反弧段的泄槽进行模型试验研究。试验结果表明:上游直段、反弧段及下游直段水流中不同水深处掺气浓度的沿程变化规律是不相同的;其他条件不变时,水流掺气浓度随掺气坎高度的增加而增大,随反弧段反弧半径的减小而减小;掺气坎高度和反弧半径对掺气设施的有效保护范围有一定的影响,适当提高掺气坎的高度和反弧段的半径对增大掺气设施的有效保护长度有利。

关键词:泄槽;掺气坎;反弧段;高速水流;空蚀;掺气浓度;高坝

中图分类号:TV131.3⁺4 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)05-0012-05

Experimental study on the distribution of air concentration in flow after bottom aerator//MA Guanbo, XU Yimin, QIAO Liang, RONG Yan(*Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China*)

Abstract: Setting an aerator on the chute contained ogee section is an important subject of cavitation erosion. The distribution of air concentration in flow after bottom aerator still a challenge task and relevant research results are quite limited. In order to explore the distribution of air concentration on straight section after aerator, ogee section, and straight section after ogee section on chute, we use the chute with ogee section to set up an experiment. By doing it so, different size of aerator with different radius of ogee section have been tested, measured and analyzed. The overall experiment results show that when other conditions remain unchanged, the air concentration in the flow increases with the increase of aerator's height and decreases with the decrease of the anti-arc radius of the chute. According to the air concentration in the flow, the length of protective segment of the chute may vary with aerator's height and the radius of anti-arc of the chute. To some extent, increasing aerator's height and the anti-arc radius of the flow chute can prolong the length of protective segment.

Key words: chute; aerator; ogee section; high-speed flow; cavitation erosion; air concentration; high dam

在高坝泄水建筑物中,高水头带来的高速下泄水流是高坝泄水建筑物的关键水力学问题之一,而高速水流在经过过流边壁的局部低压区或者负压区时,容易发生对过流边壁的空蚀破坏,不但影响泄流能力,甚至引起振动,导致泄水建筑物被不断侵蚀破坏,且振动破坏的维修费用可能很高。高速水流自掺的空气往往难以扩散到底部或者边壁,工程上常常采用掺气设施进行强迫掺气或者采用抗蚀能力较强的材料,并同时严格控制过流壁面平整度,李建中等^[1]研究表明:高强度抗冲刷耐磨混凝土材料的选择、配比、施工工艺以及过流面平整度的较好控制是减小空蚀破坏的方法之一。对于掺气设施而言,掺气减蚀具有工艺简单、工程量小、减蚀效果明显的特点,具有很高的实用性和经济价值,因此掺气减蚀的研究一直是高速水力学研究的关键课题。

对于掺气减蚀的机理而言,蒋买勇^[2]研究表明:当泄水建筑物近壁处掺气浓度(体积分数,下同)达1.5%~2.5%时,高速水流过流面的空蚀破坏程度显著减轻;当近壁处掺气浓度达7%~8%时,混凝土试件基本无空蚀现象。杨永森等^[3]认为掺气槽过流的掺气存在两种机理,即水舌气水界面紊动交换作用掺气和冲击射流的局部掺气两种。不管掺气机理如何,要有效地减免空蚀破坏必须使水流达到一定的掺气浓度,泄水建筑物近壁处的掺气

基金项目:国家自然科学基金(51069002,51269005)
作者简介:马关博(1988—),男(回族),云南昭通人,硕士研究生,主要从事工程水力学研究。E-mail:49017900@qq.com
通信作者:徐一民(1962—),男,云南昆明人,教授,博士,主要从事工程水力学研究。E-mail:yiminxu@sina.com

浓度值也成为掺气减蚀的可靠指标,如何让过流边壁保持一定的掺气浓度是掺气减蚀研究的关键。

虽然掺气浓度成为掺气减蚀的重要指标已经获得相关研究群体的普遍认可,但相关学者又提出了水流局部掺气浓度才是制约空蚀破坏的关键,例如张法星等^[4]研究认为以总平均掺气浓度作为减蚀效果指标的做法不完全合理,过流面附近的局部掺气浓度、气泡的概率分布是更重要的指标。因此,如果能更清晰地得到整个断面掺气浓度的分布规律,也就可以更清晰地分析过流面附近的局部掺气浓度,进而可以更准确地确定掺气保护长度。

在实际水电工程中,溢洪道或泄洪洞底板往往含有反弧段,反弧段的掺气减蚀特性比直段要复杂且研究相对较少。刘超等^[5]认为提升反弧段上游掺气坎的掺气能力,一定程度上可以改善反弧段下游边墙的掺气效果,但是掺气设施与掺气浓度之间的定量关系难以确定。庞昌俊等^[6]对明流泄洪洞的掺气设施布置为:在反弧段上游设置一道掺气坎,防止反弧段的空蚀破坏,在反弧段末端设置另一道掺气坎以保护紧邻反弧段的下游直段。刘超等^[7]认为:龙抬头泄洪洞的反弧段末端掺气坎后空腔段水流动水压强小、水流空化数低,容易出现空化现象,且容易形成较大范围的掺气盲区,因此反弧段末端的侧壁容易发生空蚀破坏。杨永森等^[8-9]认为反弧段的水流受到离心力的作用,影响了动水压强分布,由于压力梯度的变化使反弧段前半段边界层变厚,反弧段后半段边界层变薄并且在末端达到最薄,水流近壁切应力最大,在反弧段末端容易形成空蚀破坏。

鉴于含有反弧段的泄槽中掺气减蚀特性复杂,且相关研究较少,本文通过含有反弧段的泄槽模型试验进行相关研究。在试验设计上,采用了5级水深的全断面掺气浓度采集方法,可更清楚地分析掺气浓度的局部分布规律,并以掺气坎体型、反弧段边界条件的变化分析掺气浓度的影响规律,使掺气减蚀能够更好地应用于具有反弧段复杂边界条件的泄水建筑。

1 试验方案

1.1 试验模型及测点布置

如图1所示,试验泄槽由上游直段、反弧段和下游直段3部分构成,用有机玻璃制作,其断面为矩形,宽20 cm、高15 cm。上游直段泄槽底坡固定不变,底坡角 $\alpha=45^\circ$ 。反弧段与上、下游直段相切,分别采用反弧半径 $R=0.6\text{ m}$ 、 0.9 m 、 1.2 m 共3种尺寸的反弧段,其圆心角 φ 均为 35° 。周菊华^[10]等普遍认为,尺寸合适的挑流底坎易于形成稳定空腔,而过大的底坎容易造成扰动水面,水舌回落冲击力较大。

跌坎虽然对水面扰动较小,但有时不易形成稳定空腔,因此本试验在试验模型设置上,为了能获得稳定的掺气空腔,采用了在泄槽底板设置挑流底坎的方法。杨永森等^[11-12]对掺气体型的优化研究结果表明,掺气坎坡比应为 $1:5\sim 1:15$,坎高应为 $5.1\sim 8.5\text{ cm}$ 。根据来流及泄槽条件,试验采用3种掺气坎高度($\Delta=1\text{ cm}$ 、 2 cm 、 3 cm),其坡比 i 均为 $1:9$,即挑角 $\theta=6.34^\circ$ 。掺气坎布置在上游直段泄槽底板,其位置固定不变,末端距反弧段起点的距离 $L_0=80\text{ cm}$ 。图1中 A 为泄槽两侧设置的通气孔面积,为了保证在掺气坎后有足够的通气量以达到最佳掺气效果,根据试验测试,选定掺气坎后边墙通气孔面积 $A=176.6\text{ mm}^2$ 。

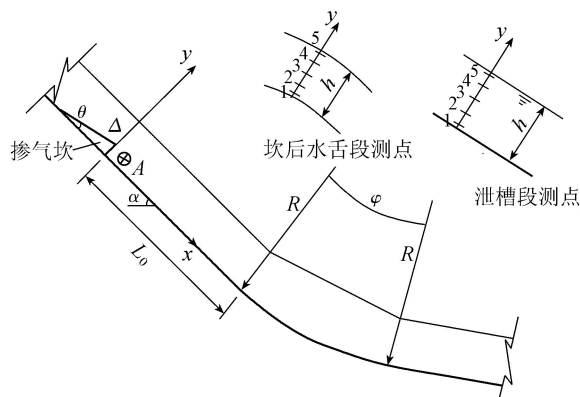


图1 试验装置以及测点坐标布置示意图

本试验主要测量的水力参数为掺气浓度。测量仪器为CQ6-2005型掺气浓度仪,该仪器只有一个独立测量探头,采用单片机进行数据采集,分辨率为 0.1% ,测量范围为 $0.0\%\sim 100.0\%$ 。浓度测量方法为:直接将仪器探头对泄槽各水深测点进行逐个实测,然后对实测值进行整理、分析。测点布置如下:以掺气坎底部末端为原点,垂直于泄槽为 y 轴,沿着泄槽底边壁为 x 轴,在 x 轴上每间隔 10 cm 设置沿程观测点;对于每个断面水深,由水流底面至水流表面依次设置5级水深测点,测点1~5水深 y 与实际水深 h 之比 $y/h=0.05、0.25、0.50、0.75、0.95$ 。

1.2 来流条件

泄槽的下泄水流,在保证有足够大的水流流速的同时,也应该保证下泄水流流态稳定、不发生溅射、易于测量。根据试验测试,本试验采用 $Q=45\text{ L/s}$ 的下泄流量作为来流条件可以满足上述条件。

2 试验结果及分析

2.1 坎后掺气浓度沿程分布规律

当流量 $Q=45\text{ L/s}$ 、掺气坎高度 $\Delta=3\text{ cm}$ 时,掺气坎后相对水深 $y/h=0.05、0.50、0.95$ 的实测掺气浓度 c 沿程变化如图2所示。

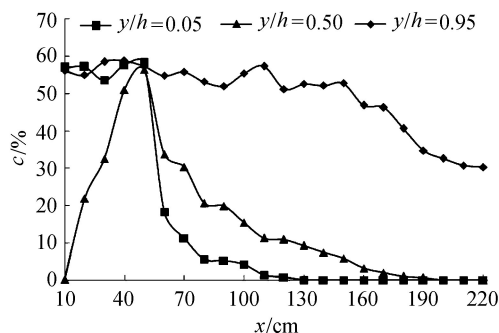


图2 不同相对水深掺气浓度沿程分布

a. 当 $y/h=0.95$ (近表水深测点) 时, 掺气浓度沿程变化规律是在较高的浓度处上下浮动, 且浮动很小, 后缓慢衰减, 但始终不会衰减为 0。其原因是: ①在坎后挑流水舌段, 水流近表面的掺气浓度基本呈平缓波动且未发生明显衰减; ②在水舌落点附近由于水流紊动作用的增强, 水流近表面的掺气浓度还有一定程度的增加; ③随着流程的增大, 到 $x>140$ cm 时, 水流流出反弧段, 由于泄槽坡比减小, 且底部补给的气体沿程逐渐从水面溢出, 所以水流近表面的掺气浓度开始沿程衰减, 且相对于上游段衰减较快; ④ $x\geq 190$ cm 后, 掺气浓度衰减趋于平缓。由于表面自掺气一直存在, 因此该近表面测点的掺气浓度始终不会衰减为 0, 大致保持在 30% 左右。

b. 当 $y/h=0.50$ (中间水深测点) 时, 掺气浓度沿程变化规律为从 0 开始迅速增大, 达到峰值后先在 $x=50\sim 80$ cm 区间急剧下降, 随后缓慢衰减, 最终逐渐衰减为 0。其原因是: ①在坎后挑流水舌段, 水舌上下表面的掺气还未到达水舌中部, 因此掺气浓度很小 (基本为 0); ②随着流程的增大, 在底部强迫掺气和表面自掺气共同的扩散作用下, 掺气浓度在 $x=10\sim 50$ cm 区间迅速增大, 并在 $x=50$ cm 左右到达最大值; ③水流离开掺气空腔区后, 进入掺气耗散区, 不再获得掺气补给, 只有水流紊动产生的自掺气, 而气泡的密度远低于水流, 导致气泡的运动方向自底向上, 表面自掺气的气泡很难进入水流的中下部, 因此, 掺气浓度在 $x=50\sim 80$ cm 区间急剧下降; ④在 $x\geq 80$ cm 后, 掺气浓度缓慢下降, 水流依然没有空腔的掺气补给, 只有水流紊动产生的微弱自掺气, 但这些掺入的气体很难补给到水流的中下部, 因此水深中部掺气浓度表现为缓慢衰减, 最终在下游直段 ($x>200$ cm) 衰减为 0。

c. 当 $y/h=0.05$ (近底水深测点) 时, 掺气浓度沿程变化规律是先是在较高的浓度处上下浮动, 且浮动很小, 在 $x=50\sim 70$ cm 区间急剧下降, 后缓慢下降, 并在反弧段末端 ($x=140$ cm) 时基本衰减为 0。其原因是: ①在坎后挑流水舌段, 水流处于掺气空腔

区域, 底部强迫掺气处于主导作用, 掺气浓度较高且稳定; ②随着流程增加, 水流离开掺气空腔区域后完全进入掺气耗散区, 将不再获得掺气补给, 而水流表面紊动产生的自掺气很难进入水流的底部, 因此, 掺气浓度在 $x=50\sim 80$ cm 区间急剧下降; ③随着流程的增大, 水流进入反弧段, 离心力加剧了气体向外的扩散作用, 近底水流的掺气浓度在反弧段内 ($x=130$ cm) 就已经衰减为 0。

2.2 上游直段掺气浓度分布规律

当 $Q=45$ L/s, $i=1:9$ 和 $\Delta=1$ cm、2 cm、3 cm 时, $x=20$ cm、40 cm、60 cm、80 cm 断面的实测掺气浓度与相对水深的关系曲线如图 3 所示。

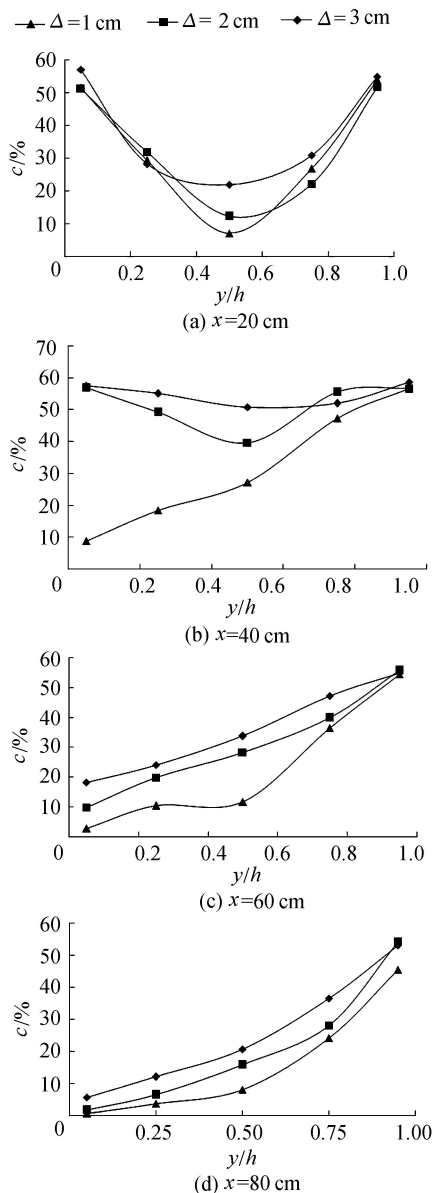


图3 上游直段掺气浓度与相对水深的关系

a. 当 $x=20$ cm 时 (图 3(a)), 由于水流刚越过掺气坎, 处于挑流水舌区, 水舌上缘与空气接触, 下缘与空腔接触, 在底部强迫掺气和表面自掺气共同作用下, 近表水深 ($y/h=0.95$) 和近底水深 ($y/h=$

0.05)附近获得较多的掺气,掺气浓度较大;由于掺气还没有完全扩散到水舌中部($y/h=0.5$),因此该处掺气浓度较小,所以在整个断面上,掺气浓度分布呈现底部和表面大、中间小的规律。对不同的掺气坎高度,基本呈现出随坎高增大而增大的规律。随着坎高的增大,水舌与底板形成的空腔体积也越大,形成对水舌的补气渠道自然也就更大,那么水舌获得的掺气就会越多,掺气浓度也随之增大。

b. 当 $x=40\text{ cm}$ 时(图 3(b)),与 $x=20\text{ cm}$ 断面所不同的是,除了 $\Delta=1\text{ cm}$ 外,水舌中部的掺气浓度增大,且沿水深方向,掺气浓度虽然仍然呈上下表面附近大、中间小的规律,但其分布已较为均匀。由于 $\Delta=1\text{ cm}$ 的掺气空腔相对较小,水流底部掺气不充分,底部掺气较微弱而表面自掺气占主导作用,故掺气浓度分布规律呈现自底而上逐渐变大的规律。

c. 当 $x=60\text{ cm}$ 、 80 cm 时(图 3(c)(d)),3 种坎高的水流都完全离开掺气空腔区间,跌落到泄槽底板上。这两个断面的表面自掺气占主导作用并且相对稳定,随着重力作用以及扩散作用,底部掺气浓度是随之逐渐衰减的,呈现自底而上逐渐变大的规律。此外,从图 3(c)(d)可以看出坎高是直接影响掺气浓度的关键因素,掺气浓度随着坎高的增高而增大。

2.3 反弧段掺气浓度分布规律

2.3.1 $x=100\text{ cm}$ 断面处掺气浓度分布规律

当 $Q=45\text{ L/s}$ 、 $\Delta=3\text{ cm}$ 、 $i=1:9$ 和 $R=0.6\text{ m}$ 、 0.9 m 、 1.2 m 时, $x=100\text{ cm}$ 断面(反弧段内)实测掺气浓度与相对水深的关系曲线见图 4。由图 4 可见,水流在通过该反弧段时,反弧半径大小对掺气浓度的分布有显著影响,掺气浓度随反弧半径的减小而减小,掺气浓度在反弧半径较小的断面衰减较为剧烈,随着反弧半径的增大,掺气浓度的衰减速率逐渐降低。原因为:在来流条件一致的情况下,水流在通过不同半径反弧段时,反弧半径越小,受到的离心力越大,掺杂在水流中的气泡由于相对密度较低,越大的离心力促使气泡越易消散。另一方面,在离心力的作用下,流场流速重新分布,底面流速增大,沿程压力梯度也增大,使得掺气浓度降低,容易引起空蚀破坏。

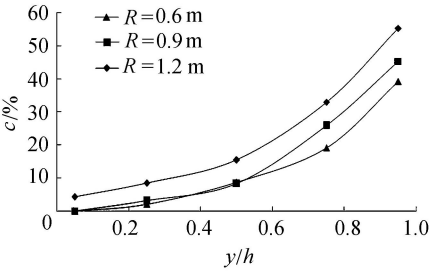


图 4 $x=100\text{ cm}$ 断面掺气浓度与相对水深的关系

2.3.2 反弧段掺气浓度沿水深分布规律

图 5 为 $Q=45\text{ L/s}$ 、 $\Delta=3\text{ cm}$ 、 $i=1:9$ 和 $R=0.9\text{ m}$ 、 1.2 m 时, $x=80\text{ cm}$ 、 110 cm 、 130 cm 断面处实测掺气浓度与相对水深的关系。不同半径的反弧段,由于掺入水流中的空气沿程不断地溢出,因此反弧段内掺气浓度的变化规律都是沿程递减的,且自水流底部至水流表面呈递增式变化。

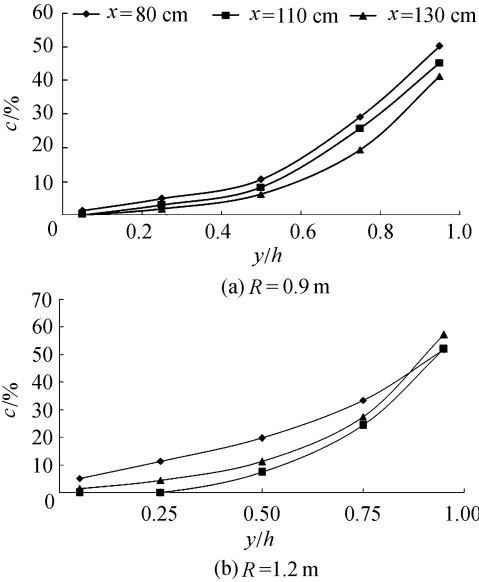


图 5 反弧段掺气浓度与相对水深的关系

2.4 下游直段掺气浓度分布规律

图 6 为 $Q=45\text{ L/s}$ 、 $\Delta=3\text{ cm}$ 、 $i=1:9$ 和 $R=0.6\text{ m}$ 、 0.9 m 、 1.2 m 时,下游直段($x=150\sim 230\text{ cm}$)断面平均掺气浓度 $\bar{c}$ (5 个测点实测掺气浓度的平均值)沿程分布。如图 6 可见:3 种半径的下游直段水流的平均掺气浓度都是沿程逐渐减小的,并且反弧半径越小,下游直段水流的平均掺气浓度也越小。可见反弧段反弧半径的大小不仅对反弧段内水流掺气浓度有影响,而且对下游直段水流的平均掺气浓度也有显著影响,因此当反弧段的反弧半径过小时将会缩短掺气设施的有效保护长度。

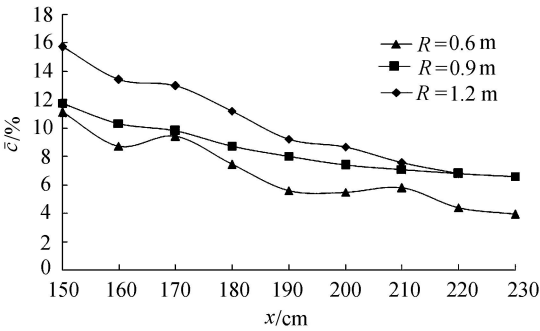


图 6 下游直段平均掺气浓度沿程分布

图 7 为 $Q=45\text{ L/s}$ 、 $\Delta=3\text{ cm}$ 、 $i=1:9$ 和 $R=0.9\text{ m}$ 时,下游直段泄槽不同水深处 ($y/h=0.50$ 、 0.75 、 0.95) 实测掺气浓度沿程变化情况(由于 $y/h=0.05$ 、

0.25 时掺气浓度极小,几乎为 0,在图中未画出)。由图 7 可见,即使位于水深中部($y/h=0.50$),掺气浓度都很小,且当 $x>190$ cm 后水深中部的掺气浓度为 0。只有 $y/h=0.75$ 、 0.95 时,掺气浓度才相对较大,且 $y/h=0.75$ 时沿程衰减也较快; $y/h=0.95$ 近表水深时,掺气浓度衰减较为平缓,并且处于高位变化,主要为水面自掺气所致。图 7 说明在该试验条件下, $R=0.9$ m 的下游直段泄槽的近底壁水流掺气浓度已很小,对减免泄槽的空蚀破坏是不利的。

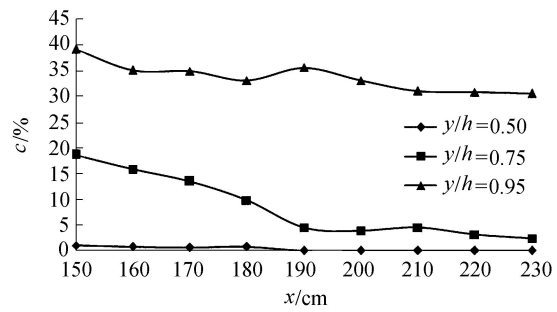


图 7 下游直段掺气浓度沿程分布

3 结 论

- a. 不同水深掺气浓度沿程变化规律不同:①近表水深掺气浓度高位平缓,缓慢衰减,最终不会衰减为 0;②中间水深掺气浓度先增大后减小,起始浓度较大,最终会逐渐衰减为 0;③近底水深掺气浓度先增大后减小,起始浓度为 0,最终会逐渐衰减为 0。
- b. 掺气坎后断面掺气浓度分布规律不同,掺气浓度在横断面先呈现底部和表面大、中间小的分布规律,后呈现自底部至表面逐渐增大的规律。
- c. 掺气坎高度和反弧半径对掺气浓度有一定的影响:①掺气浓度随着掺气坎高度的增大而增大;②反弧半径越小,掺气浓度的衰减越剧烈;③适当提高掺气坎的高度和反弧段的半径对增长掺气设施的有效保护长度是有利的。

参考文献:

[1] 李建中,宁利中. 高速水力学[M]. 西安:西北工业大学出版社,1994:12.

[2] 蒋买勇. 结合工程实例浅谈高速水流泄水建筑物抗空蚀破坏措施[J]. 湖南水利水电,2011(3):10-12. (JIANG Maiyong. Measures used to protect drainage buildings from high speed flow cavitation erosion with project case[J]. Hunan Hydro & Power,2011(3):10-12. (in Chinese))

[3] 杨永森. 挑坎掺气槽过流空腔区掺气特性的研究[J]. 水动力学研究与进展,1994,9(1):71-77. (YANG Yongsen. Aerator character of free jet above the cavity zone of ramp type aeration device [J]. Journal of Hydrodynamics,1994,9(1):71-77. (in Chinese))

[4] 张法星,许唯临,朱雅琴. 空蚀冲击波模式下气泡尺寸在掺气减蚀中的作用[J]. 水利水电技术,2005,36(10):5-7. (ZHANG Faxing, XU Weilin, ZHU Yaqin. Effects of bubble size distribution on aeration for cavitation alleviation under cavitating shock wave [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2005,36(10):5-7. (in Chinese))

[5] 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):46-50. (LIU Chao,ZHANG Guangke, FENG Lingxiao,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))

[6] 庞昌俊,苑亚珍. 大型龙抬头明流泄洪洞的体形设计[J]. 水力发电,1992(8):23-28. (PANG Changjun, YUAN Yazhen. The type design of huge longtaitou flow in open air flood discharging tunnel [J]. Hydraulic Electrogenating,1992(8):23-28. (in Chinese))

[7] 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: A 辑,2004,19(3):375-382. (LIU Chao, YANG Yongquan. Study on air entrainment to alleviate cavitations at the end of anti-arc in spillway tunnel[J]. Journal of Hydrodynamics: Ser A, 2004, 19(3):375-382. (in Chinese))

[8] 杨永森,吴持恭. 明流隧洞反弧段水力及空化特性研究[J]. 成都科技大学学报,1991(3):21-29. (YANG Yongsen,WU Gongchi. The research on ogee section on free flow tunnel hydraulic and cavitation characteristics [J]. Journal of Chengdu University of Science and Technology,1991(3):21-29. (in Chinese))

[9] 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):36-40. (HU Minglong. Experimental study on the pressure gradient zone cavitation characteristics[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,1996,16(4):36-40. (in Chinese))

[10] 周菊华. 水工建筑物掺气减蚀设施近况简介[J]. 云南水电技术,1991(2):14-19. (ZHOU Juhua. The brief aeration in cavitation-protection introduction of hydraulic structure with recent developments [J]. Yunnan Hydropower Technology,1991(2):14-19. (in Chinese))

[11] 杨永森,杨永全. 掺气减蚀设施体型优化研究[J]. 水科学进展,2000,11(2):144-148. (YANG Yongsen, YANG Yongquan. Optimum shape if the prototype spillway chute aerator[J]. Advances in Water Science,2000,11(2):144-148. (in Chinese))

[12] 王海云,戴光清,张建民,等. 高水头泄水建筑物掺气设施研究综述[J]. 水利水电科技进展,2004,24(4):46-48. (WANG Haiyun,DAI Guangqing,ZHANG Jianmin, et al. Review of the study of aeration facilities for high water head discharge structures [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2004,24(4):46-48. (in Chinese))

(收稿日期:2013-08-02 编辑:熊水斌)