

掺气减蚀技术及掺气设施研究进展

高 昂^{1,2}, 吴时强¹, 王芳芳¹, 朱森林¹

(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. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要:为优化掺气设施体型并对其水力特性进行研究,在已有理论研究成果与工程实践经验基础上,从水流掺气减蚀机理、掺气水流运动特性及掺气设施体型及布置三方面评述了水流掺气减蚀技术研究进展。针对目前掺气减蚀技术研究中存在的不足,认为今后应进一步加强多泡情况下空化泡-空气泡-边壁微观作用机制,近壁(底板、侧壁)水体掺气浓度、气泡特征的沿程演变规律,复杂条件下掺气设施体型优化等方面的研究。

关键词:高速水流;空蚀破坏;掺气减蚀机理;掺气水流特性;掺气设施;综述

中图分类号:TV131.3

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2019)02-0086-09

Research progress of aeration cavitation reduction technology and aeration devices//GAO Ang^{1,2}, WU Shiqiang¹, WANG Fangfang¹, ZHU Senlin¹(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to optimize the shape of aeration devices and study their hydraulic characteristics, based on previous research achievements and engineering application experience, the mechanisms of flow aeration on mitigating cavitation erosion, dynamic characteristics of aeration flow, and shape and arrangement of aeration devices are reviewed in this study. Aiming at the shortcomings of the current research, it is suggested that research on the microcosmic mechanism of multi-bubble interaction such as cavitation bubble-air bubble-boundary interaction, the evolution law of aeration concentration and bubble characteristics in near-wall (floor, side wall) water body, and the optimization of aeration facility shape under complex conditions should be further strengthened.

Key words: high speed flow; cavitation damage; mechanism of mitigating cavitation by aeration; aeration flow characteristics; aeration devices; review

一些泄水建筑物因具有高水头、大流量、高流速等特点,如不采取一定的措施,高速水流有可能引发过流面空蚀破坏。国内外水利工程泄水建筑物发生空蚀破坏的例子很多,如巴拿马 Madden 坝泄水道进水口,美国 Hoover 坝泄洪洞反弧段、伊朗 Karun I 溢洪道底板和侧墙、苏联 Bratsk 水电站溢流坝面以及我国的二滩水电站泄洪洞反弧末端下游等都发生过较严重的空蚀破坏。因此,在高速水流过流建筑物的设计中,必须充分考虑减免高速水流空蚀破坏的措施。常用减免水流空蚀破坏的工程措施主要有:采取合理的过流建筑物结构体型,控制过流面的平整度,采用抗空蚀能力强的建筑材料,向可能发生空蚀区域上游一定位置的水体通气,即掺气减蚀。

国内外试验研究和工程实践表明^[1],相比于其他几种措施,掺气减蚀措施的操作性好且效果显著,是一种行之有效地减免高速水流过流面空蚀破坏的坝工技术。它通过在高速水流流道底部或侧壁设置掺气设施,胁迫空气掺入水流,改变来流运动特性,使之形成具有一定压缩性的水、气混合两相流,减轻或消除水流对过流面的空蚀破坏。目前,溪洛渡、小湾、锦屏一级等超高坝工程的超高速水流空化空蚀问题更为突出,掺气减蚀研究仍是目前的重要研究课题。

国外在 20 世纪 40 年代就开始了掺气减蚀方面的研究与实践,而我国从 20 世纪 70 年代才开始,目前,国内外已有上百座水利工程的泄水建筑物应用了掺气设施,掺气减蚀技术在高水头、大泄量泄水建

基金项目:国家自然科学基金(51379128);国家国际科技合作专项(2015DFA01000)

作者简介:高昂(1991—),男,博士研究生,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:gaoang@whu.edu.cn

通信作者:吴时强(1964—),男,教授级高级工程师,博士,主要从事环境水力学研究。E-mail:sqwu@nhri.cn

筑物中迅速推广应用,也极大地促进了高速水流问题的理论与泄水建筑物减蚀工程技术发展,保证了泄水建筑物的高效安全运行。本文基于已有研究,从掺气减蚀机理、掺气水流运动特性及掺气设施体型及布置三方面对掺气减蚀技术进行综述,提出了研究中存在的不足之处,并对需进一步深入研究的内容作了展望。

1 掺气减蚀机理

向水流中掺入适量空气来抑制高速水流空蚀破坏的做法已得到普遍认可,Hammit^[2]指出水流空蚀破坏程度与其掺气量关系密切,给出了 α/α_s 值(α 为掺气量, α_s 为空气在水中的溶解度)与空蚀破坏程度的定性关系。然而,由于掺气减蚀问题本身的复杂性及研究方法的局限性,人们对掺气减蚀的微观动力学机理解释还不能达成一致^[3],目前主要存在以下3种关于掺气减蚀机理的解释:

a. 掺气提高水流绝对压强,增加当地水流空化数^[4-5]。黄建波等^[6-7]通过试验发现水流掺气后低压区水体压强有所提高,当地的水流空化数增大,而边界轮廓一定的情况下,初生空化数是定值^[1],因此,掺气对水流空化起到了抑制作用。然而,Hammit等^[2,8]认为水流的初生空化数并非一成不变,而是与水流掺气量呈正相关关系,也就是说,水流掺气也会提高其初生空化数,使得水流具有了易于空化的特性。刘继广^[9]指出空化数是以对空化现象的简单量化和便于比较为目的而定义的,其应用有一定的局限性,并不能全面反映水流空化的真实状态。因此,从水流空化数的角度来解释掺气对空化空蚀的减免作用的理论依然受到质疑。

b. 掺气形成“气-汽”空化泡,消减空化泡溃灭时释放的能量。掺入水流的气体可以部分进入空化泡内,在其内部形成“气-汽”混合物,空化泡内气体的存在减小了空化泡溃灭初始半径与溃灭结束时半径的差值,并延长溃灭时间,进而降低了空化泡溃灭时释放的能量,且溃灭空化泡内残留的可压缩性空气又能吸收部分空化泡溃灭时的能量^[10-12]。刘士和^[1]利用空泡动力学理论对掺气水流进行简化分析,得到了水流掺气量与空化泡溃灭时压强之间的负相关关系。然而,也有学者对这种机理提出质疑,张法星等^[3]认为空气在水中的扩散系数很小,空化泡发育与溃灭时间为微秒量级,空气在如此短时间内向空化泡内的扩散量是非常有限的,因此对空化泡溃灭时释放能量的消减作用也十分有限。

c. 掺气形成的“海绵层”削弱空化泡溃灭时释放能量的通量。韩伟等^[13-14]试验研究了空气泡与

空化泡相互作用关系,结果表明水流掺气后,空气泡与空化泡之间、空化泡与空化泡之间的作用逐渐增强,形成了具有较强压缩性的“海绵层”,能削弱空化泡溃灭时形成的微射流及辐射冲击波的能量,进而削弱或消除空化泡破灭对边壁的空蚀破坏^[15]。

上述掺气减蚀的机理均有一定的理论与试验基础,也较符合人们的客观认识规律,但由于尚缺乏可靠的试验证明和完备的理论支撑,某些解释仍处于猜想与分析阶段^[16]。

近年来,随着高速摄影技术的快速发展及空化泡、空气泡模拟技术的逐渐成熟^[17],不少学者开展了空化泡与空气泡微观作用过程的精细研究,Xu等^[18-19]试验研究了边壁附近单个空化泡与单个空气泡相互作用规律,指出当空化泡大于空气泡时,空化泡溃灭过程中向空气泡靠近,反之则远离空气泡溃灭;相对位置、气泡间距、气泡与边壁距离是决定空化泡-空气泡-边壁作用模式及强度的关键参数;空气泡和边壁对空化泡运动的影响可用矢量叠加来表示。Wakana等^[20]试验研究了水流流速、水中含氧量及气核浓度对空化的影响,指出气核浓度是影响空化初生的关键指标,当气核浓度较大时会产生空泡式空化,当气核浓度较小时会产生片状空化。上述类似研究,为不同掺气减蚀机理的解释提供了试验参考及数据支撑,为揭示掺气减蚀机理提供了可能。

2 掺气水流运动特性

在高速水流泄水建筑物中,水流在流动过程中受到干扰(边界突变、水流交汇等),水流结构或状态发生较大变化时,会造成水体破碎而发生强迫掺气^[1]。对于设有掺气设施的泄流建筑物,水流在掺气设施扰动作用下,原有运动状态被打破,以强迫掺气形式掺入空气,呈现出一种新的水、气两相流运动状态,这种状态具有非稳定性,即在水、气两相流自调节作用下,其运动状态及成分随着远离掺气设施而逐渐改变,最后趋于稳定。在此过程中,掺气水流实现了自身物理状态和运动特征的改变,呈现出较为复杂的演变规律。

2.1 掺气水流演变规律

来流在掺气设施调控掺气后呈现出一种新的非稳定状态,这种非稳态混合物随着距掺气设施距离不同,而呈现出不同的规律^[21]。Pfister等^[22]在室内精密水槽中研究了“挑跌坎”掺气设施下掺气水流运动特性,根据掺气水流运动特点及水流掺气浓度的空间分布规律,将掺气水流分为4个区域:喷射区、附着区、飞溅区、远场区。喷射区是实现水流掺气的主要区域,水流脱离固壁边界后过渡为自由射

流,上下水气交界面处水体以强烈紊动的漩涡形式存在,这种强烈的紊动克服了水流表面张力,卷吸临近空气实现掺气,掺入的气体又通过水体的紊动扩散进一步向射流中心区域传递;附着区的掺气水流产生压缩,靠近底板处水体压缩最为严重,导致该区域底部水体部分气体排出,近底板处水体掺气浓度降低;飞溅区水体处于膨胀散裂状态,特别是表层水体的强烈翻滚与飞溅,实现了较高强度的表层水体掺气;远场区水体已基本不受掺气设施的影响,其运动状态的变化强度也十分微弱,该区域水体掺气浓度也基本趋于稳定。无论是喷射区上下交界面掺入的气体向射流中心水体扩散,还是在其余3个区域中,表层水体掺入的气体向近底水体扩散,其扩散强度均与水体的紊动强度密切相关。

2.2 掺气空腔长度的估算

掺气空腔长度是掺气设施研究中一个非常重要的特征尺度^[23-24],它一定程度上反映了掺气设施的掺气能力,空腔长度越长,水流掺气越充分,减蚀效果越好。其大小主要与来流条件、掺气设施体型、供气系统通风特性及射流再附区底板形式等有关。目前空腔长度的求解方法主要有4种:抛射体公式^[23,25-26]、因次分析法^[22,27]、基于势流理论的数值计算法^[28]和射流微元体受力平衡法^[29]。其中,修正后的抛射体公式精度较高,运算方便,应用较为广泛;因次分析法是基于试验数据或者原型观测资料的统计分析,其适用性取决于统计资料的完备程度;势流理论公式计算量偏大,应用不够方便;射流微元体受力平衡法忽略或者假设条件较多,计算精度不高。相对而言,目前采用前两种方法计算空腔长度的研究较多,其代表性成果如下:

a. 修正后的抛射体公式。采用该方法推求的空腔长度是以刚体抛射体运动轨迹曲线为基础,考虑流体与刚体运动特性的差异,通过引入修正系数,得到适用于射流的轨迹曲线。Wu等^[26]考虑了来流水深 h 、来流流速 v_0 、空腔负压 Δp 、挑坎上游底坡 α_1 、挑坎下游底坡 α_2 及射流的径向脉动流速 u' 的影响^[30],得到的空腔长度算式为

$$L = v_0 T \cos\beta + 0.5gT^2 \sin\alpha_2 \quad (1)$$

其中

$$T = \frac{v_0 \sin\beta}{g \left(\cos\alpha_2 + \frac{\Delta p}{\gamma h} \right)}$$

$$\left[1 + \sqrt{1 + 2(t_r + t_s) \frac{g \left(\cos\alpha_2 + \frac{\Delta p}{\gamma h} \right)}{(v_0 \sin\beta)^2}} \right]$$

$$\beta = 0.48 \left[\theta \sqrt{\tanh\left(\frac{t_r}{h\theta}\right)} + \alpha_2 - \alpha_1 \right] +$$

$$0.52 \left[\theta + \alpha_2 - \alpha_1 - \arctan\left(\frac{u'}{v_0}\right) \right]$$

$$u' = 1.36 \frac{nv_0}{R^{1/6}} \sqrt{g}$$

式中: L 为空腔长度; R 为水力半径; n 为曼宁系数; t_r 为挑坎高度; t_s 为跌坎高度; θ 为挑坎挑角; γ 为水的容重; g 为重力加速度。

b. 因次分析法。Pfister等^[22]在精密水槽中对“挑+跌”组合坎作用下的射流空腔长度进行了较为系统的研究,忽略空腔负压对空腔形态的影响,基于试验数据得到空腔长度算式为

$$\frac{L}{h} = 0.77 Fr_0 (1 + \sin\alpha_1)^{1.5} \left[\sqrt{\frac{(t_r + t_s)}{h}} + Fr_0 \tan\theta \right] \quad (0 < L/h < 50) \quad (2)$$

式中: Fr_0 为来流弗劳德数, $Fr_0 = v_0 / \sqrt{gh}$ 。而后基于量纲和谐,采用 Fr_L (x 方向的跃长弗劳德数, $Fr_L = v_0 / \sqrt{gL}$)和 Fr_D (y 方向的坎高弗劳德数, $Fr_D = v_0 / \sqrt{g(t_r + t_s)}$)对式(2)进行等价变换得到如下算式:

$$Fr_L^2 = 0.77 (1 + \sin\alpha_1)^{1.5} \tan\theta [1 + (Fr_D \tan\theta)^{-1}] \quad (0 < L/h < 50) \quad (3)$$

式(3)反映空腔长度与来流水深无关,与来流流速、挑坎角度、跌坎高度、底坡坡度有关。需要指出的是,上述算式成立是以一定的假设为前提,在具体工程中仅能作为参考,想要得到符合实际工程的较为理想的结果,还应通过具体的模型试验或数值模拟计算。

2.3 掺气保护长度的估算

对于确定的掺气设施、水流条件及护面材料,掺气设施对过流面的掺气保护长度也基本确定^[24],掺气保护长度反映了减蚀护壁效率,它代表了掺气水流保护过流面免受空蚀破坏的最大范围。掺气保护长度与掺气浓度沿程演变规律及过流面临界免蚀标准有关。

2.3.1 过流面临界免蚀标准

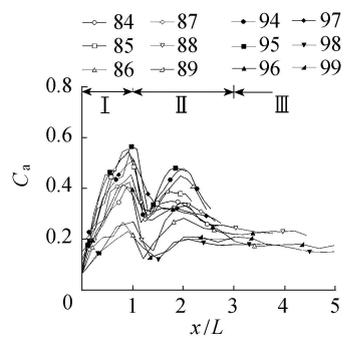
过流面临界免蚀标准反映了过流面抵抗水流空蚀破坏的能力,是确定掺气保护长度的关键指标,目前广泛采用临界免蚀掺气浓度作为临界免蚀标准来判断过流面的抗空蚀能力。Peterka等^[31-32]的试验结果表明:若水流不掺气,即使混凝土的抗拉强度很高,也会发生空蚀破坏;而当近底掺气浓度为2%左右时,混凝土的空蚀破坏程度显著降低;当近底水体掺气浓度达7%~8%时,即使强度较低的混凝土试样也可以很好地避免空蚀破坏。冯家山、乌江渡、丰满等水库的泄水建筑物的原型观测资料表明,一般水利工程临界减蚀掺气浓度可取2%^[33-34]。随着新型混凝土材料及专用混凝土材料密实度、强度等的

提高以及泄水建筑物施工工艺技术水平提升^[35],泄水建筑物的抗空蚀能力逐渐增强。陈先朴等^[36]对掺气减蚀机理进行了微观分析,认为掺气减蚀作用主要依靠近壁水体中小尺寸气泡数量,而非所有尺寸的气泡,指出以近壁水体内较小尺寸(如气泡直径为0.2 mm或0.5 mm)气泡的数量作为过流面临界免蚀标准更为合理。张亚磊等^[37]同样指出除了掺气浓度,气泡尺寸与气泡数量对空化的影响至关重要。

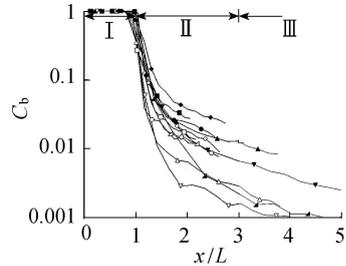
无论是采用掺气浓度还是掺气泡尺寸与数量,仅将单一指标作为判别过流面是否发生空蚀破坏的做法并不合理,它忽略了流速是引起空化空蚀的关键,且不同泄水建筑物的混凝土材料及壁面平整度的差异也会导致其抗空蚀能力的不同。更合理的做法是在确定过流建筑物的临界免蚀标准时,除考虑水流掺气指标外,还应考虑水流流速、壁面平整度及混凝土强度、密实度等因素的影响,采用一个综合指标作为过流面临界免蚀标准。

2.3.2 水流掺气浓度沿程演变规律

在射流掺气后形成的水气两相流中,近壁水体掺气浓度的沿程演变规律是确定掺气设施有效防蚀范围的重要依据^[21]。时启燧等^[27]通过室内试验,研究了掺气坎下游距底板1 cm处水体掺气浓度沿程演变规律,并将其与冯家山水库溢洪洞、苏联Bpaktek水库溢流坝的原型观测数据资料进行对比分析,得出如下结论:试验与原型近壁掺气水流中气泡逸离规律相似;在空腔下游1~3倍空腔长度范围内($1 < x/L \leq 3$),近壁水体掺气浓度沿程急剧下降;在其下游($x/L > 3$)范围内,气泡逸离近底水体的速率明显减缓,并逐渐过渡到一准稳定值。Pfister等^[22]通过水槽试验得到了水体断面平均掺气浓度 C_a 和近底水体($2 \text{ mm} < y < 3 \text{ mm}$)掺气浓度 C_b 演变规律(图1,图例中数字为试验组次编号)。从图1(a)中看出,在I区($0 < x/L \leq 1$),平均掺气浓度沿程逐渐增加,这是由于空腔上下水气交界面水体掺气所致;在II区($1 < x/L \leq 3$),平均掺气浓度在 $x/L=1.5$ 附近出现谷值,这是由于水体接触底板产生压缩而造成逸气所致,而后在 $x/L=2$ 附近出现掺气浓度峰值,这是由于水体反弹膨胀,特别是表层水体散裂飞溅掺入大量空气所致;在III区($x/L > 3$),水体平均掺气浓度沿程缓慢降低。从图1(b)中看出在I区,底部水体掺气浓度维持在1,这是由于抛射水体在空中掺气所致;在II和III区,近底水体掺气浓度沿程递减,即使在 $x/L=2$ 附近表层水体较大强度的掺气也没有导致近底水体掺气浓度的增加,这说明表层散裂水体掺入的气体并没有传递至近底水体。



(a) 水体断面平均掺气浓度



(b) 近底水体掺气浓度

图1 掺气浓度沿程变化^[22]

在常规水工模型中,由于缩尺效应的影响,对水流掺气现象的模拟是在一定的相似性假定前提下进行的,试验结果并不一定能准确反映原型情况。鉴于此,不少学者尝试采用数学模型的方法对掺气水流现象进行研究。崔陇天^[38]采用紊动扩散理论描述挑坎下游水体掺气浓度分布规律,假定紊动扩散系数、气泡上浮速度及水流流速为常数的前提下,推导出近底水体掺气浓度的沿程衰减符合指数分布,分布式形式为 $C_b = A_0 e^{-kx} + A_1$,式中: A_1 为与远场区水体自掺气强度及紊动强度有关的数值,即上文提到的准稳定值; A_0 、 k 为待定参数,需由试验数据拟合求得。王鹏举^[39]指出崔陇天在寻求浓度扩散方程解析解的过程中,对水流流速与紊动扩散系数的简化使计算结果偏差较大,在其基础上对紊流扩散理论方法进行了改进,得到了更符合实际流速和紊动扩散系数的确定方法,数值计算结果与原型观测资料具有较好的一致性。罗铭^[40]建立了符合简化马尔科夫链过程的气泡随机运动数学模型,实现了掺气坎后水气两相流中掺气浓度沿程演变的近似模拟,但由于在求解过程中,对水流及气泡运动特性进行了简化处理,模拟精度还有待提高。Teng^[41]采用VOF模型和两相流模型模拟研究了掺气坎后水流运动规律及掺气浓度演变规律,但由于模型对气泡破灭和质点碰撞进行了简化,其模拟精度及可靠度有待提高。

2.3.3 掺气保护长度及掺气设施间距

崔陇天^[38]通过对原型观测和模型试验资料的分析,得到掺气保护长度的经验公式为: $L_p = 25(t_1 +$

$t_s)(Fr_1 - 1)/\cos\alpha_1$, 其中 Fr_1 为挑坎处水流弗劳德数。文献[42]根据布拉茨克溢流坝沿程水流掺气浓度资料,估算出该溢流坝掺气设施下接直线段的掺气保护长度约为 100 ~ 150 m;下接反弧段的掺气设施的掺气保护长度缩短为 70 ~ 100 m。时启燧^[33]通过对掺气浓度沿程分布的试验资料与原型观测数据统计分析,建议掺气保护长度取空腔长度的 20 倍左右。需要指出的是,掺气保护长度的确定受多方面因素影响,已有的经验公式或求解方法普适性不强,仅能作为工程设计的参考。掺气保护长度是确定多级掺气设施间距的关键,为便于工程设计参考,表 1 统计了部分国内外工程多级掺气设施间距。

表 1 部分工程掺气设施间距

泄水建筑物	间距/m	泄水建筑物	间距/m
冯家山水库溢洪洞	52	Alicura 水电站溢洪道	67
石头河水库泄洪洞	48	Calacuccia 坝溢洪道	10
乌江渡水电站右岸泄洪洞	213	Emborcaao 坝溢洪道	105
东江拱坝滑雪道	54 ~ 66	Foz do Areia 坝溢洪道	74 ~ 93
鲁布革水电站左岸溢洪道	58	Karakaya 水电站溢流坝	129
鲁布革水电站左岸泄洪洞	92	Tarbela 坝泄洪洞	90 ~ 110
糯扎渡水电站溢洪道	98 ~ 133	Toktogul 水电站溢流坝	181
小湾水电站左岸泄洪洞	84 ~ 161	San Roque 坝溢洪道	52 ~ 62
锦屏一级水电站泄洪洞	80 ~ 88	Guri 水电站溢流坝	149 ~ 165

上述分析表明,虽然目前对掺气水流运动特性的研究还不完善,但已有研究成果在一定程度上揭示了掺气设施体型设计与掺气水流运动特性之间的紧密关系,对掺气设施的工程应用起到了一定的指导作用。特别是掺气空腔长度、掺气保护长度的影响因素及计算方法的明确,为掺气设施的体型优化与高效应用提供了重要的理论支撑。

3 掺气减蚀设施体型及布置

掺气减蚀设施广泛应用于工程实践中,如溢洪道、泄洪洞、陡槽等高水头、高流速泄水建筑物,取得了显著效益。科学合理的掺气设施体型及布置形式是保证其充分发挥减免过流面空蚀破坏的关键。掺气设施基本体型有掺气挑坎、掺气跌坎、掺气槽、侧壁突扩 4 类。掺气挑坎易于形成稳定的空腔,但如果坎高过大,对来流的扰动过强,将会过度抬高来流而降低洞顶余幅,且水舌跌落至底板时冲击力较大;掺气跌坎对来流扰动较小,但在小底坡过流道使用时,跌落水流旋滚较强,容易回溯,降低空腔长度;掺气槽对来流扰动小,凹槽体型利于进气,但在小底坡过流道使用时,掺气槽内容易出现积水,且在含沙水流中应用时易被堵塞,很少单独使用;侧壁突扩掺气设施则主要起到保护侧壁免受空蚀破坏的作用,在反弧段末端及其下游侧壁应用较多。在工程实际应用中,为了充分发挥掺气设施的护壁效果,更多的是

采用上述基本体型的组合形式^[43]。表 2 总结了部分国内外典型泄水建筑物掺气设施布置形式。

表 2 部分泄水建筑物掺气设施布置

水利工程	国家	坝高/ m	泄水 建筑物	最大 流速/ ($m \cdot s^{-1}$)	掺气 设施	数量	建成 年份
锦屏一级	中国	305	泄洪洞	>50	挑坎+跌坎	4	2014
			左岸泄洪洞	37.5	挑坎+跌坎+突扩	5	
糯扎渡	中国	261.5	右岸泄洪洞	41	跌坎+突扩	5	2014
			溢洪道	52	挑坎+槽	5	
			泄洪洞	50	挑坎+跌坎	7	2014
溪洛渡	中国	285.8	泄洪洞	>50	挑坎+跌坎	7	2010
小湾	中国	294.5	泄洪洞	>35	环形坎	1	2006
公伯峡	中国	139	泄洪洞	>35	环形坎	1	2006
三峡	中国	181	深孔	40	跌坎	1	2006
Guri 2	委内瑞拉	162	溢流坝	35	挑坎+跌坎+突扩	2	1986
Alicura	阿根廷	130	溢洪道	30	坎+槽	4	1985
Colbun	智利	116	溢洪道	38	挑坎	2	1984
Nurek	前苏联	300	泄洪洞	45	坎+槽	8	1980
Sirikit	泰国	169	泄洪洞	37	坎+槽、跌坎	2	1972
Yellow Tail	美国	160	泄洪洞	48	坎+槽、环形挑坎	3	1966
Glen Canyon	美国	216	泄洪洞	55	环形挑坎	1	1964

肖兴斌^[44]总结了国内外 31 项采用掺气设施的泄水建筑物运行情况,归纳认为当过流面某处水流空化数小于 0.22 (或流速大于 37 m/s) 时,应在其上游一定距离处设置掺气设施。Volkart 等^[45]建议第一个掺气设施位于弗劳德数 Fr 约为 4 的位置,Chanson^[46]建议挑坎型掺气设施应设在 Fr 约为 7 的位置。樊博等^[47]统计了国内外 31 个大型水利工程泄洪洞中安全运行的 73 个掺气设施的结构参数、水力参数和空腔长度等资料,发现约 85% 的掺气设施的挑坎高度介于 0 ~ 0.8 m 之间,约 60% 的挑坎角度在 4° ~ 8° 之间,坎前底坡和坎后底坡在 0 ~ 0.15 之间的数量占 59%,98% 的空腔长度集中于 6 ~ 36 m 之间。

李隆瑞^[48]对上世纪 90 年代前国内外部分泄水建筑物掺气设施结构体型及尺寸进行了较为详细的介绍。这些传统的掺气设施在工程应用中取得了显著的效益,为掺气减蚀技术的发展提供了丰富的理论依据及工程经验。然而,针对某些低 Fr 水流泄水建筑物(如龙抬头或龙落尾泄洪洞反弧段下游小坡度段),传统的掺气设施形成的空腔区流线受重力影响显著,易造成空腔回水阻碍进气,降低掺气设施的使用效率^[49]。针对这一问题,不少学者从优化掺气设施体型和改变掺气坎后底坡衔接形式两方面进行了研究。支拴喜等^[50]提出了齿墩式掺气坎,试验研究表明其掺气性能、掺气保护长度均优于传统的掺气坎。Su 等^[51]推荐了一种适用于低 Fr 明流泄洪洞的“梯型槽掺气坎”,模型试验表明该体型可有效地消除坎后回流。漆力健等^[52]提出了一种“U 型坎+陡坡”的组合式掺气设施,该设施利用底部水舌的冲

击作用,有效地抑制了水流回溯,保证了掺气空腔的稳定,增大了水气交界面积,提高了掺气效率,较好地解决了大岗山水电站泄洪洞低 Fr ($Fr < 3$) 水流的空化空蚀问题。王海云等^[53]提出了“V型坎”,模型试验表明该体型掺气坎可有效破除低 Fr 水流引起的坎后水流回溯,此外,其稳定的三维射流扩散形态还增加了通风井进气量与水流的掺气量。吴伟伟等^[54]采用掺气坎下游加贴坡的设计,有效地抑制了空腔回水,获得了稳定的掺气空腔,改善了通气量、气水比等掺气特性指标。吴时强等^[55]提出了“燕尾坎+贴坡”的组合掺气结构,能有效解决小底坡、低 Fr 水流的掺气空腔积水问题。

上述新型掺气设施一定程度上解决了低 Fr 水流底板空蚀破坏问题,然而仍可能会出现边墙的空蚀破坏,如龙羊峡、二滩等工程泄洪洞反弧段下游,虽然设置了适合低 Fr 水流的掺气设施,有效地保护了底板的空蚀破坏,但是侧墙却出现了不同程度的空蚀破坏^[56]。王海云等^[57]在详细介绍反弧段水流特性易空化的基础上,提出了在反弧末端加折流器(突扩)与突跌组合的掺气方式,该设计保证了侧空腔和底空腔的协同供气,对底板和侧壁均起到了较好的保护作用。张宏伟等^[58]指出在设计侧壁掺气设施时应对掺气底坎和侧坎进行整体优化,给出了侧壁掺气设施体型设计原则及优化方法。王芳芳等^[59]认为突扩突跌掺气坎后空腔积水及折冲水翅的诱因是两个“积水源”和一个“退水机制”,给出了一种局部变坡的掺气坎体型。目前,三维全断面掺气设施已被应用于二滩、白鹤滩、锦屏一级水电站等高水头、大泄量泄洪洞反弧段,并取得了一定的效果。

掺气设施体型及布置在大量的工程应用中逐渐完善,总的来说经历了两个阶段,由最初的4类基本体型单独应用到组合体型协同应用为第一阶段,在这一阶段,掺气减蚀技术及工程设施得到普遍认可,在减免高速水流引发的空蚀破坏方面发挥了非常重要的作用,证实了掺气减蚀设施的工程可行性与实用性,但是在解决低 Fr 水流特别是反弧段末端水流空化问题仍显不足,这也就促使了传统掺气减蚀设施的体型优化与创新,即掺气减蚀设施体型发展的第二阶段,该阶段以更加高效、全面地解决特定水流条件下水流空化空蚀问题为目标,实现了掺气减蚀设施的细节优化与水流三维掺气,为解决小底坡、低 Fr 水流底板与边墙的空化空蚀问题提供了思路。然而,需要指出的是新型掺气设施相对复杂的体型对水流变化较为敏感,对体型的合理设计要求较高^[60]。

4 研究展望

掺气减蚀技术已在水利工程实践中发挥了重要

的作用,这与掺气减蚀理论研究的逐渐完善是密不可分的。然而,由于空化空蚀微观、瞬时、多相的内禀特性,目前研究成果还不能令人满意,今后还应进一步加强以下几个方面的研究:

a. 已有几种掺气水流减蚀机理的解释还不完善,应进一步采用高速摄影、图像识别等先进技术探索空化泡-空气泡-边壁微观作用机制,尤其是多泡情况下的相互作用机制。

b. 在合理模拟的基础上,实现对水气两相流动力过程的准确定量描述,如探寻近壁(底板、侧壁)水体掺气浓度、气泡特征的沿程演变规律,水流参数、泄槽坡度等与气泡逸出过程的关系,水流紊动强度与均衡掺气浓度间的关系,过流面临界免蚀标准与水流参数、边壁材料及平整度的关系等。

c. 基于掺气水流运动特性,进行掺气设施的体型优化研究,特别地,如破除低 Fr 水流空腔回水、侧空腔和底空腔协同稳定供气等复杂条件下的体型优化问题,提高掺气及减蚀效率。

参考文献:

- [1] 刘士和. 高速水流[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [2] HAMMITT F G. Cavitation and multiphase flow phenomena [M]. New York: McGraw-Hill,1980.
- [3] 张法星,徐建强,徐建军,等. 掺气减蚀机理的研究进展及讨论[J]. 水力发电学报,2010,29(2):7-10. (ZHANG Faxing, XU Jianqiang, XU Jianjun, et al. Overview and discussions on the advances in the mechanism studies of air entrainment against cavitation erosion[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2010,29(2):7-10. (in Chinese))
- [4] 郭志萍,董志勇. 掺气条件下水流空化特性的研究[J]. 水力发电学报,2013,32(1):113-117. (GUO Zhiping, DONG Zhiyong. Study of cavitation characteristics in aeration condition [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,32(1):113-117. (in Chinese))
- [5] 郭志萍,董志勇,韩伟. 不同掺气孔径下水流空化特性试验研究[J]. 水动力学研究与进展:A辑,2013,28(1):30-34. (GUO Zhiping, DONG Zhiyong, HAN Wei. An experimental study on cavitation characteristics of aeration hole with different diameters [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics,2013,28(1):30-34. (in Chinese))
- [6] 黄建波. 掺气对流场压强的影响[J]. 水利学报,1987,18(5):43-46. (HUANG Jianbo. The influence of air entrainment for flow pressure [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1987,18(5):43-46. (in Chinese))
- [7] 黄建波,倪汉根. 初生空化的主要影响因素及比尺影响[J]. 大连理工大学学报,1987,28(2):87-92. (HUANG Jianbo, NI Hangan. Scale effects on cavitation inception [J]. Journal of Dalian University of Technology,

- 1987,28(2): 87-92. (in Chinese))
- [8] BILLET M L, HOLL J W. Scale effects on various types of limited cavitation [J]. Journal of Fluids Engineering, 1981,103: 405-414.
- [9] 刘继广. 空化水流与水流空化数的压强差当量表述 [J]. 水力发电学报, 2012, 31 (1): 140-145. (LIU Jiguang. Cavitation flow and the description to pressure equivalent of cavitation numbers [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31 (1): 140-145. (in Chinese))
- [10] 水利水电泄水工程与高速水流信息网. 泄水工程与高速水流 [M]. 长春: 吉林人民出版社, 2010.
- [11] 罗铭. 掺气减蚀挑坎与水流紊动特性 [J]. 水利学报, 1995,26(7): 1-7. (LUO Ming. Relationship between the aerator and the characteristics of turbulent [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995,26(7): 1-7. (in Chinese))
- [12] 郭志萍. 不同半径掺气泡对空泡动力学特性影响的研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.
- [13] 韩伟, 董志勇, 俞小伟, 等. 掺气条件下空化特性的高速摄影分析 [J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2010, 25 (3): 352-358. (HAN Wei, DONG Zhiyong, YU Xiaowei, et al. High speed photographic analysis of cavitation characteristics on the condition of aeration [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2010, 25 (3): 352-358. (in Chinese))
- [14] 俞小伟, 董志勇, 韩伟, 等. 掺气泡对空泡影响的高速摄影分析 [J]. 浙江工业大学学报, 2011, 39 (3): 268-272. (YU Xiaowei, DONG Zhiyong, HAN Wei, et al. High speed photographic analysis of effect of aeration bubbles on cavitation bubbles [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2011, 39 (3): 268-272. (in Chinese))
- [15] 黄建波, 李士豪, 倪汉根. 掺气对空泡溃灭压力的影响 [J]. 水利学报, 1985, 16 (4): 12-19. (HUANG Jianbo, LI Shihao, NI Hangen. The effect of air entrainment on the collapsing pressure of a cavitation bubble in a liquid [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985, 16 (4): 12-19. (in Chinese))
- [16] van RIJSBERGEN M, SLOT J. Bubble-induced sheet cavitation inception on an isolated roughness element [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2015, 656 (1), 012172.
- [17] BRUJAN E A, MATSUMOTO Y. Collapse of micrometer-sized cavitation bubbles near a rigid boundary [J]. Microfluidics & Nanofluidics, 2012, 13 (6): 957-966.
- [18] XU Weilin, BAI Lixin, ZHANG Faxing. Interaction of a cavitation bubble and an air bubble with a rigid boundary [J]. Journal of Hydrodynamics, 2010, 22 (4): 503-512.
- [19] LUO Jing, XU Weilin, NIU Zhipan, et al. Experimental study of the interaction between the spark-induced cavitation bubble and the air bubble [J]. Journal of Hydrodynamics, 2013, 25 (6): 895-902.
- [20] WAKANA T, TAKAFUMI K, SATOSHI W, et al. Observation of inception of sheet cavitation from free nuclei [J]. Journal of Thermal Science, 2017, 26 (3): 223-228.
- [21] BAI Ruidi, ZHANG Faxing, LIU Shanjun, et al. Air concentration and bubble characteristics downstream of a chute aerator [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2016, 87: 156-166.
- [22] PFISTER M, HAGER W H. Chute aerators. I: air transport characteristics [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 136 (6): 352-359.
- [23] 潘水波, 邵瑛瑛, 时启燧, 等. 通气挑坎射流的挟气能力 [J]. 水利学报, 1982, 13 (9): 72-75. (PAN Shuibao, SHAO Yingying, SHI Qisui, et al. The self-aeration capacity of the water jet over the aeration ramp [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1982, 13 (9): 72-75. (in Chinese))
- [24] 马关博, 徐一民, 乔梁, 等. 泄槽底部掺气坎后水流掺气浓度分布模型试验 [J]. 水利水电科技进展, 2014, 34 (5): 12-16. (MA Guanbo, XU Yimin, QIAO Liang, et al. Experimental study on the distribution of air concentration in flow after bottom aerator [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34 (5): 12-16. (in Chinese))
- [25] RUTSCHMANN P, HAGER W H. Air entrainment by spillway aerators [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 116 (6): 765-782.
- [26] WU Jianhua, RUAN Shiping. Cavity length below chute aerators [J]. Science China Technological Sciences, 2008, 51 (2): 170-178.
- [27] 时启燧, 潘水波, 邵瑛瑛, 等. 通气减蚀挑坎水力学问题的试验研究 [J]. 水利学报, 1983, 14 (3): 3-15. (SHI Qisui, PAN Shuibao, SHAO Yingying, et al. Experimental investigation of flow aeration to prevent cavitation erosion by a deflector [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1983, 14 (3): 3-15. (in Chinese))
- [28] 杨永森, 杨永全. 掺气减蚀设施后二维空腔流动计算 [J]. 水利学报, 2000, 31 (6): 54-60. (YANG Yongsen, YANG Yongquan. Numerical calculation for two dimensional cavity flow downstream of an aerator [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 31 (6): 54-60. (in Chinese))
- [29] 徐一民, 王伟, 许唯临, 等. 掺气坎 (槽) 射流空腔长度的计算 [J]. 水利水电技术, 2004, 35 (10): 7-9. (XU Yimin, WANG Wei, XU Weilin, et al. Calculation of the cavity length of jet flow from chute aerators [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, 35 (10): 7-9. (in Chinese))
- [30] GLAZOV A I. Calculation of the air-capturing ability of a flow behind an aerator ledge [J]. Hydrotechnical Construction, 1984, 18 (11): 554-558.
- [31] PETERKA A J. The effect of entrained air on cavitation pitting [C] // Minnesota International Hydraulic

- Convention. Reston: ASCE Press, 1953: 507-518.
- [32] RUSSELL S O, SHEEHAN G J. Effect of entrained air on cavitation damage [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2011, 1(1): 97-107.
- [33] 时启燧. 高速水气两相流[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [34] 高盈孟, 李一丁, 冯家和, 等. 鲁布革水电站溢洪道水力学原型观测[J]. 水力发电, 1994, 20(1): 18-24. (GAO Yingmeng, LI Yiding, FENG Jiahe, et al. Hydraulic prototype observation at the Lubuge Hydropower Station [J]. Water Power, 1994, 20(1): 18-24. (in Chinese))
- [35] 张振忠, 陈亮, 汪在芹, 等. 水工泄水建筑物抗冲磨材料发展现状[J]. 化工新型材料, 2016, 44(10): 230-232. (ZHANG Zhenzhong, CHEN Liang, WANG Zaiqin, et al. Development of abrasion resistant material for hydraulic discharge structure [J]. New Chemical Materials, 2016, 44(10): 230-232. (in Chinese))
- [36] 陈先朴, 西汝泽, 邵东超, 等. 掺气减蚀保护作用的新概念[J]. 水利学报, 2003, 34(8): 70-74. (CHEN Xianpu, XI Ruize, SHAO Dongchao, et al. New concept of air entrainment effect on mitigating cavitation damage [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(8): 70-74. (in Chinese))
- [37] 张亚磊, 王伟, 张法星, 等. 气泡尺寸与气核数目对初生空化的影响综述[J]. 人民黄河, 2013, 35(7): 125-127. (ZHANG Yalei, WANG Wei, ZHANG Faxing, et al. Study on the effect of bubble sizes and gas nuclei number on incipient cavitation [J]. Yellow River, 2013, 35(7): 125-127. (in Chinese))
- [38] 崔陇天. 掺气挑坎下游的含气浓度分布[J]. 水利学报, 1985, 16(1): 47-52. (CUI Longtian. Aeration concentration distribution after aerator [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985, 16(1): 47-52. (in Chinese))
- [39] 王鹏举. 明渠气水两相混合物掺气浓度分布的计算[J]. 水利学报, 1997, 28(2): 73-78. (WANG Pengju. Analytical solution of unsteady flow in collector well [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 28(2): 73-78. (in Chinese))
- [40] 罗铭. 掺气减蚀设施后沿程掺气浓度的数学模拟[J]. 水利学报, 1987, 18(9): 19-26. (LUO Ming. Numerical simulation of air-concentration along the spillway floor downstream from aerator [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1987, 18(9): 19-26. (in Chinese))
- [41] TENG Penghua. CFD modelling of two-phase flows at spillway aerator [D]. Stockholm: KTH Royal Institution of Technology, 2017.
- [42] 中国水利水电科学研究院, 南京水利科学研究院. 水工模型试验[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [43] 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 high-head drain building aeration facility [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2004, 24(4): 46-48. (in Chinese))
- [44] 肖兴斌. 水工泄水建筑物掺气减蚀设施综述[J]. 人民长江, 1986(7): 24-31. (XIAO Xingbin. Review of hydraulic drain building aeration corrosion reduction facility [J]. Yangtze River, 1986(7): 24-31. (in Chinese))
- [45] VOLKART P, RUTSCHMANN P. Aerators on spillway chutes: fundamentals and applications [C]//Proceedings of the Conference on Advancements in Aerodynamics, Fluid Mechanics & Hydraulics. Reston: ASCE Press, 2011.
- [46] CHANSON M H. Predicting the filling of ventilated cavities behind spillway aerators [J]. Journal of Hydraulic Research, 1995, 33(3): 361-372.
- [47] 樊博, 林俊强, 彭期冬. 泄洪洞掺气设施效果影响因素的主成分分析[J]. 水利水电技术, 2018, 49(1): 114-120. (FAN Bo, LIN Junqiang, PENG Qidong. Principal component analysis on factors of influence on effect of aeration facility for spillway tunnel [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(1): 114-120. (in Chinese))
- [48] 李隆瑞. 高速水流掺气减蚀措施及工程应用[J]. 水资源与水工程学报, 1990, 1(2): 11-24. (LI Longrui. Measures for cavitation control by aerator in high velocity flow and their engineering application [J]. Water Resources & Water Engineering, 1990, 1(2): 11-24. (in Chinese))
- [49] 杨永森, 杨永全, 帅青红. 低 Fr 数流动跌坎掺气槽的水力及掺气特性[J]. 水利学报, 2000, 31(2): 27-31. (YANG Yongsen, YANG Yongquan, SHUAI Qinghong. The hydraulic and aeration characteristics of low Froude number flow over a step aerator [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 31(2): 27-31. (in Chinese))
- [50] 支拴喜, 阎晋垣. 齿墩式掺气坎的水力特性的研究[J]. 水利学报, 1991, 22(2): 42-46. (ZHI Shuanxi, YAN Jinyuan. Hydraulic characteristics research of tooth-pier aerator [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991, 22(2): 42-46. (in Chinese))
- [51] SU Peilan, LIAO Huasheng, QIU Yue, et al. Experimental study on a new type of aerator in spillway with low Froude number and mild slope flow [J]. Journal of Hydrodynamics, 2009, 21(3): 415-422.
- [52] 漆力健, 廖华胜, 李贵吉, 等. 低佛劳德数掺气坎空腔回水问题研究[J]. 水利学报, 2007, 38(7): 819-825. (QI Lijian, LIAO Huasheng, LI Guiji, et al. Numerical simulation on backwater downstream of aerators in spillway with low Froude number flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(7): 819-825. (in Chinese))
- [53] 王海云, 戴光清, 杨庆, 等. V型掺气坎在龙抬头式泄洪洞中的应用[J]. 水利学报, 2005, 36(11): 1371-1374.

- (WANG Haiyun, DAI Guangqing, YANG Qing, et al. Experimental study on V-type aerator for spillway tunnel with inlet raised [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(11):1371-1374. (in Chinese))
- [54] 吴伟伟, 吴建华, 阮仕平. 平底泄洪洞掺气设施体型研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2007, 22(4): 397-402. (WU Weiwei, WU Jianhua, RUAN Shiping. Study of the geometries of aerators for flat-bottomed discharge tunnels [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2007, 22(4): 397-402. (in Chinese))
- [55] 吴时强, 王芳芳, 王威, 等. 一种“燕尾坎+贴坡”掺气方法及结构: 105220662A [P]. 2016-01-06.
- [56] 南海龙, 徐一民, 吕绪明, 等. 泄槽底板与侧墙联合掺气保护长度试验[J]. 水利水电科技进展, 2016, 35(1): 44-48. (NAN Hailong, XU Yimin, LÜ Xuming, et al. Experimental study on length of protective segment of combined bottom and side wall aerators on chute [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 35(1): 44-48. (in Chinese))
- [57] 王海云, 戴光清, 杨永全, 等. 高水头泄水建筑物侧墙掺气减蚀特性研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2006, 38(1): 38-43. (WANG Haiyun, DAI Guangqing, YANG Yongquan, et al. Characteristic study on preventing cavitation damage of hydraulic structures side-walls with high head [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2006, 38(1): 38-43. (in Chinese))
- [58] 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 Hongwei, LIU Zhiping, ZAHNG Dong, 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))
- [59] 王芳芳, 吴时强, 王威. 小底坡泄洪洞突扩跌掺气坎水力特性[J]. 水力发电学报, 2017, 36(7): 65-73. (WANG Fangfang, WU Shiqiang, WANG Wei. Hydraulic characteristics of sudden lateral enlargement and bottom drop aerators in spillway tunnels with mild slope [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(7): 65-73. (in Chinese))
- [60] 谢省宗, 吴一红, 陈文学. 我国高坝泄洪消能新技术的研究和创新[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 324-336. (XIE Shengzong, WU Yihong, CHEN Wenxue. New technology and innovation on flood discharge and energy dissipation of high dams in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 324-336. (in Chinese))

(收稿日期: 2018-06-03 编辑: 雷燕)

(上接第 55 页)

- [7] 金腊华. 水库引排水底孔前冲刷漏斗形态的探讨[J]. 武汉水利电力学院学报, 1991, 24(1): 93-101. (JIN Lahua. Study on the configurations of scouring funnels before the bottom sluices for diversion and drainage in reservoirs [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 1991, 24(1): 93-101. (in Chinese))
- [8] 熊绍隆. 深水孔口前冲刷漏斗形态研究[J]. 西北水电技术, 1983(4): 10-21. (XIONG Shaolong. Study on shape of scouring funnel with deep water level [J]. Northwest Hydropower, 1983(4): 10-21. (in Chinese))
- [9] 应强, 马进荣. 三峡坝区模型坝前冲刷漏斗形成及成因分析[J]. 水利水运科学研究, 1996(4): 343-348. (YING Qiang, MA Jinrong. Formation and cause analysis of scouring funnel in front of dam in model of Three Gorges Project [J]. Hydro-Science and Engineering, 1996(4): 343-348. (in Chinese))
- [10] 邢晨雄. 小浪底浑水动床模型验证及进水塔前冲刷漏斗试验研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2016.
- [11] 刘顺东, 黄尔. 等壳水电站冲刷漏斗模型试验研究[J]. 东北水利水电, 2008(5): 63-65, 72. (LIU Shundong, HUANG Er. Model test of scouring funnel model at Dengke Hydropower Station [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2008(5): 63-65, 72. (in Chinese))
- [12] 吴时强, 王芳芳. 澜沧江大古水电站整体水工模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2014.
- [13] 朱晓章. 水库泥沙淤积概述[J]. 四川水力发电, 1989(1): 20-26. (ZHU Xiaozhang. Overview on reservoir sedimentations [J]. Sichuan Water Power, 1989(1): 20-26. (in Chinese))
- [14] 苏凤玉, 任宏斌. 坝前冲刷漏斗形态的试验研究[J]. 西北水电技术, 1986(1): 31-45, 89. (SU Fengyu, REN Hongbin. Experimental research on scouring funnel shape in front of dam [J]. Northwest Hydropower, 1986(1): 31-45, 89. (in Chinese))
- [15] 负振星, 高学平, 耿新春, 等. 阿尔塔什坝前冲刷漏斗模型试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(1): 161-163. (YUN Zhenxing, GAO Xueping, GENG Xinchun, et al. Experimental study on the scouring funnel in front of Aertashi Reservoir [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014, 25(1): 161-163. (in Chinese))

(收稿日期: 2018-02-28 编辑: 骆超)