高水头泄水建筑物掺气设施研究综述

王海云，戴光清，张建民，杨　庆，吴健强，苏华英

（四川大学高速水力学国家重点实验室，四川 成都　610065）

摘要：根据国内外大量的工程实例，在前人研究的基础上，总结了高水头、高流速下泄水建筑物掺气设施的几个主要水力特性，包括掺气坎体型尺寸、空腔长度、空腔负压、掺气井通风量与掺气保护长度等，同时对具有高水头、高流速、小底坡、低弗劳德数等特点的泄水建筑物掺气设施体型研究成果进行了综述，指出目前掺气减蚀理论研究落后于工程实践，有待进一步的深入研究.

关键词：高水头泄水建筑物；掺气减蚀；掺气设施；水力特性

中图分类号：TV135.2⁺9　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1006-7647(2004)04-0046-03

早在 1937 年，人们就已经认识到水流掺气可以减轻对过流表面的空蚀破坏，但把这一认识付诸于工程实践则始于 1960 年，美国的大古力坝（Grand Goulee Dam）泄水孔锥形管出口下游正式设置掺气槽，掺气减蚀被证明是解决空蚀破坏的最有效的途径；国内第一个采用掺气减蚀设施技术的是冯家山水库的泄洪洞. Peterka① 等的实验表明，当水中的掺气浓度为 1% ~ 2%时，能大大减轻固体边壁的空蚀破坏，当掺气浓度为 5% ~ 7%时，空蚀破坏完全消失；还有一些研究表明[1]，当水中近壁处的掺气浓度为 1.2% ~ 2.5%时，混凝土的空蚀破坏显著减少，为 7% ~ 8%时，空蚀破坏基本消失. 随着坝工技术的提高和水电建设事业的发展，我国高坝建设发展迅速，坝高不仅突破了 200 m，而且已进入 300 m 量级，高水头、大流量泄水建筑物不断增多，与之相关联的脉动、振动、空化、空蚀、冲刷、雾化等一系列高速水力学问题日益突出[2]. 目前掺气减蚀已在溢洪道、泄洪洞、陡槽、闸下出流、竖井等高水头大单宽流量的泄水建筑物中得到广泛的应用，并取得了很大成功. 虽然使用掺气减蚀技术已有了一定的工程经验，但因掺气减蚀技术涉及水流与掺气两方面，属于两相流研究领域，因此对掺气减蚀的机理、掺气减蚀措施和通气量的预测等问题还不是十分清楚，有待进一步研究.

1　掺气设施设计及水力特性

1.1　掺气减蚀设施的型式

使水流形成负压，过流面底部掺气设施的基本型式有掺气挑坎、掺气跌坎和掺气槽；组合式有挑坎和槽组合式、挑坎和跌坎组合式、跌坎和槽组合式以及挑坎、槽和跌坎组合式.

1.2　掺气坎（槽）体型、尺寸

设置掺气坎（槽）后，要求在各种运行条件下过坎水流下面都能保持稳定的空腔，否则，掺气坎（槽）将转化为人工突体，有可能产生分离型空穴，导致人为的破坏. 为了在水流中形成稳定的掺气空腔，文献[3]建议掺气挑坎的下限坎高 Δ_1 须满足以下要求：

$$\frac{\Delta_1}{R} \geqslant \frac{23.5}{X^3} \tag{1}$$

式中：R 为坎上水流水力半径；X 为参数，

$$X = \frac{v_0}{\sqrt{gh}} \frac{1}{\cos\alpha\cos\theta} \tag{2}$$

其中：v_0 为坎上水流速度；α 为槽底坡角；θ 为挑坎挑角.

对于组合方式，文献[4]建议挑坎高度 Δ_1 和跌坎高度 Δ_2 须满足：

$$\Delta_1 = \Delta_2 = 7.5h_0 \frac{\cos^2\alpha}{\theta Fr^4} \tag{3}$$

式中：Fr 为弗劳德数，$Fr = \dfrac{v_0}{\sqrt{gh_0}}$，其中 v_0，h_0 分别为挑坎前的来流流速和水深.

已有的工程实例和模型试验表明，Δ_1 的变化范围在 5.1 ~ 85 cm 之间，一般而言单宽流量大时挑坎较高，单宽流量小时挑坎较小；挑坎的坎坡在 1∶5 ~ 1∶15 之间，溢流坝面大多采用 1∶5 ~ 1∶6，泄洪洞大

基金项目：国家自然科学基金资助项目（50209010）

作者简介：王海云（1978—），男，山西石楼人，硕士研究生，主要从事工程水力学研究.

①Peterka A J. The effect of entrained air on cavitation pitting. Joint Meeting Paper, IAHR/ASCE, Minneapolis, USA, 1953.

多采用 1:8 ~ 1:10. 已建工程中的跌坎高度 Δ_2 = 0.60 ~ 2.75 m,通常取

$$\frac{\Delta_2}{h_0} = 0.10 \sim 0.50 \tag{4}$$

基于水力学和经济两方面考虑,坎高的优化可以定义以下目标函数[5]:

$$\varepsilon = \frac{T_{\max}}{L_{\text{jet}}} = \varepsilon_{\min} \tag{5}$$

式中:$T_{\max}$为水舌上缘最大上升高度;L_{jet}为空腔长度.式(5)意义为挑流水舌横向尺寸与纵向空腔长度之比为最小.$T_{\max}$的值可作为度量须开挖的明流泄洪洞和溢洪道边墙高度的参数,而 L_{jet}的值可以作为度量掺气保护长度的参数.式(5)表明,ε 的值越小,则掺气坎高度就越优,也即在一定的泄洪洞洞身或溢洪道边墙高度下,获得最大的掺气保护范围.

1.3 空腔长度

影响空腔长度 L 的因素有掺气设施的体型、尺寸、水力条件和空腔压力等.

夏毓常归纳乌江渡、冯家山等水利枢纽水工模型试验资料[6,7],分析整理得出挑坎水舌下缘抛距公式:

$$\frac{L}{h} = \frac{1}{\cos\alpha}\left[\frac{\Delta}{h}\sin\alpha + Fr\frac{\cos(\alpha-\theta)}{\cos\alpha}\cdot\left(Fr\sin\theta + \sqrt{Fr^2\sin^2\theta + 2\frac{\Delta}{h}\cos\alpha}\right)\right] \tag{6}$$

式中:L 为空腔长度;Δ 为挑坎高度;α 为坝面底坡;θ 为掺气坎挑角.

时启隧等[3]通过较为系统的试验研究,得出了空腔长度的计算经验关系式:

$$\frac{L}{h} = 0.155 + 2.961x - 1.674x^{-1} \tag{7}$$

$$x = \frac{v}{\sqrt{gh}}\sqrt{\frac{\Delta}{h}}\frac{1}{\cos\alpha\cos\theta} \tag{8}$$

式中:L 为空腔长度;v 为掺气坎前来流流速;h 为掺气坎前来流水深;Δ 为挑坎高度;α 为坝面底坡;θ 为掺气坎挑角.

由因次分析结合实测空腔长度资料得出的经验公式通常局限性较大,其中的系数随工程而异,运用复杂的模型,在一定程度上可以反映较为全面的影响因素,但也增加了计算的困难,不易于实际工程的应用.杨永森等采用了简单模型方法,建立模型时全面反映了影响空腔长度的主要因素,通过对射流底缘运动轨迹的研究[8]得出了空腔长度的计算公式:

$$L = v_1\cos\Phi_1 T + \frac{1}{2}g(\sin\alpha - 0.00625Fr^2)T^2 \tag{9}$$

$$T = \frac{v_1\sin\Phi_1}{g(\cos\alpha + p_N)}\left[1 + \sqrt{1 + \frac{2g(t_r - t_s)(\cos\alpha + p_N)}{(v_1\sin\Phi)^2}}\right] \tag{10}$$

式中:L 为空腔长度;p_N 为空腔负压指数;t_r 为挑坎高度;t_s 为跌坎高度;v_1 和 Φ_1 分别为挑坎末端端面射流的实际出射流速和出射角.

杨永森的公式通过射流底缘的运动轨迹进行研究,较为全面地计入了影响空腔长度的各种因素,模型简单,便于工程实际的应用.文献[9]结合小湾泄洪洞的实测资料,应用公式(9)和(10)的计算结果和实测资料对比证明,计算结果合理.

1.4 空腔负压与通风量

空腔压力应以保证空腔顺利进气、挑射水流接近自由射流状态为原则,空腔内的压力可在 -2 ~ -14 kPa 之间选取.从减小空腔内的旋滚和增大通气井的通气量考虑,设计应尽量扩大自由空腔的范围,减小甚至要避免在空腔内产生强烈的旋滚.

章福仪根据国内外原型和模型掺气槽的试验资料,最后整理得到通气井进气量的经验公式为[2]

$$Q = 20.54A\sqrt{2g\Delta H} \tag{11}$$

$$\Delta H = 2.58\times10^{-6}\left(\frac{LB}{A}\right)^2\frac{v^2}{2g} \tag{12}$$

式中:Q 为通气井的进气量;ΔH 为通气井两端的压力差;B 为过水建筑物的宽度;L 为空腔长度;A 为通气井的面积;$\frac{v^2}{2g}$为坎顶流速水头.

1.5 射流挟气量

射流挟气量的影响因素有来流条件、壁面糙率、掺气槽型式和空腔负压等.Pinto①根据巴西福兹杜阿里亚溢洪道通气量的原型观测,得出的经验公式为

$$\frac{q_a}{q_w} = 0.033\frac{L}{h} \tag{13}$$

$$q_a = 0.033vL \tag{14}$$

式中:L 为空腔长度;h 为坎上水头;v 为坎上流速;q_a 为单宽空气流量;q_w 为单宽水流流量.

掺气槽上射流挟气量的正确预估是掺气减蚀设施合理设计的重要基础,由于掺气机理的复杂性,理论预测的资料较少,文献[8]采用数学模型的方法来研究挟气量,通过验证挑坎、跌坎和坎槽组合形式,提出了反映影响射流的各种因素和相互间的关系式:

$$q_a = \frac{n\sqrt{g}}{R^{\frac{1}{6}}}\left(1 - \frac{v_c}{v_0}\right)Lv \tag{15}$$

$$v_c = 0.14243\left(\frac{v_0}{n^3R^{\frac{1}{2}}}\right)^{\frac{1}{4}}\sqrt{1 + 13.76\left(\frac{R^{\frac{7}{6}}}{nv_0}\right)p_N} \tag{16}$$

①Pinto N L. 射流通气量的模拟. 国际水工模拟缩尺影响专题讨论会译文选集. 长江科学院,1985. 112 ~ 116.

式中：L 为空腔长度；R 为水力半径；n 为壁面糙率系数；p_N 为空腔负压指数；v_c 为临界掺气流速；v_0 为掺气坎前来流的平均流速.

关于通气井的允许风速，SL253-2000《溢洪道设计规范》[10]指出，乌江渡工程原型观测通气井的最大风速为 83.03 m/s，冯家山溢洪道通气井的最大风速为 64.25 m/s，除了噪声较大外，运行均正常.但是通风井内的最大风速应小于 60 m/s，否则可能危害附近的建筑物及造成噪音污染.

1.6 掺气槽(坎)的有效保护长度

有效保护长度指在一定范围内近壁掺气浓度应大于临界免空蚀的有效掺气浓度，它取决于掺气槽的型式、临界免空蚀掺气浓度和沿近壁底的掺气浓度递减率.

文献[11]根据苏联布拉茨克溢流坝沿程各断面距离底板以上 2 cm，7 cm 和 15 cm 处的水流掺气量资料，得出陡坡段沿程每米掺气量的递减率为 0.4% ~ 0.8%；在反弧段由于离心力作用使水中的气量逸离加剧，递减率为 1.2% ~ 1.5%.按照工程资料估算，直线段的掺气坎可以保护下游的长度约为 100 ~ 150 m；若挑坎下游接反弧段，保护范围将缩短，其下游的保护范围约为 70 ~ 100 m.但掺气保护长度的影响因素复杂，掺气模型律等问题还有待进一步研究，目前还不能从理论上得到解决，只能从试验和实测资料得出经验公式，供工程设计参考.

崔陇天根据原型观测和模型试验资料提出掺气保护长度的计算公式①为

$$L_p = \frac{25\Delta(Fr - 1)}{\cos\alpha} \tag{17}$$

式中：L_p 为掺气保护长度；Δ 为挑坎高度；α 为渠底坡；Fr 为挑坎上的弗劳德数.

1.7 掺气减蚀的模型试验的相似率

由于表面张力、糙率和粘性等因素的影响，掺气存在缩尺效应.对掺气的缩尺影响，目前国内进行模型试验时，如果水流速大于 6.0 m/s，则进行掺气量的换算可以不考虑缩尺影响.Frvine[12]指出，要做到原型和模型相似必须满足：

$$\left(\frac{Q_a}{Q_w}\right)_r = \left(1 - \frac{v_1}{v_0}\right)_r = 1 \tag{18}$$

式中：Q_a 为空腔区的进气量；Q_w 为来流流量；v_0 为来流平均流速；v_1 为掺气最小流速，取 1.1 m/s；下标 r 表示原型与模型之比.

结合冯家山(模型比尺 1:40)和乌江渡(模型比尺 1:30)模型试验成果与原型观测资料可知，当韦伯数 $We \geqslant 750$、雷诺数 $Re > 3.5 \times 10^6$ 时，模型的通气量基本上可以按照重力相似引申到原型，此时模型中掺气挑坎上的流速应大于 7 m/s.

2 掺气设施体型研究

目前广泛使用的传统掺气设施已经在工程实际中取得了显著的效果，前人对高速泄水建筑物掺气减蚀也进行了很多研究[13-21].我国正在兴建一批坝高在 200 m 以上的高坝和高速水流工程，这些工程大多具有水头高、流速大和弗劳德数低等特点，传统的掺气设施存在着一些不足之处，需要进行改进和研究一些新型的掺气设施，进一步提高掺气效率.孙双科等[14]结合小湾泄洪洞掺气减蚀设施优化试验研究，提出了缓坡条件下凹型掺气坎，支栓喜等[20]提出了齿墩坎，其掺气性能、保护长度显著大于传统的掺气坎，庞昌俊等[21]提出了一种适合于高流速、大单宽流量的新型 U 形槽式掺气坎.

笔者通过对掺气空腔三维形态和空腔稳定性的研究[22]，在试验的基础上提出一种新颖的 V 形掺气坎.V 形掺气坎适合于高水头、大流量、小底坡泄水建筑物.对于某一具体水流条件和底坡而言，存在着保持空腔稳定的一个最小空腔长度——空腔稳定的临界值.空腔射流的挑距大于临界值，则空腔稳定；小于临界值，则射流回灌，空腔消失.通常的连续挑坎的空腔长度只有一个值，一旦水流条件变化到空腔长度小于临界值，则水流回灌，空腔消失，且不能再恢复；而 V 形坎的空腔长度沿水流的横断面方向是连续变化的，射流挑距两边长、中间短，尽管最小空腔长度已小于临界值，但最大空腔长度仍远大于临界值，在其作用下，便可使回流退去，空腔恢复，保证一定的通气量.

3 结 语

水流掺气是解决由于表面不平整度而引起的高速水流空蚀问题的主要方法，而良好的掺气设施(体型)能显著提高减蚀效果.目前掺气减蚀理论研究落后于工程实践，同时由于掺气减蚀问题涉及水流与掺气两方面，属于两相流研究领域，故难度较大.国内外已做过的一些模型(包括系列比尺)试验和原型观测表明，其研究难点是水流掺气的缩尺影响和相似关系的引申.目前还不能通过模型试验满意地对原型预测，系列比尺模型试验和理论分析、水气两相流的基础理论研究，仍将是掺气减蚀设施研究的主要途径.过去关于掺气坎的研究多数是将掺气空腔

①肖兴斌.泄水建筑物掺气减蚀措施的进展与综述.高速水流情报网第二届全网大会论文集，1986.113 ~ 120.

(下转第 56 页)

[C]. Swansea: Pineridge Press, 1984. 85 ~ 117

[14] De Borst R, Nauta P. Non orthogonal cracks in a smeared finite element model[J]. Engineering Computations, 1985, 2(3): 35 ~ 46

[15] 巫昌海，汪基伟. 混凝土三维非正交弥散裂缝模型[J]. 河海大学学报(自然科学版)，1999，27(5)：17 ~ 20.

[16] 于骁中. 岩石和混凝土的断裂力学[M]. 长沙：中南工业大学出版社，1991.

[17] Oritz M, Leroy Y, Needleman A. A finite element method for localization failure analysis[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1987, 61(2): 189 ~ 214.

[18] Belytschko T, Fish J, Engelmann B E. A finite element with embedded localization zones[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1988, 70(1): 59 ~ 89.

[19] Fish J, Belytschko T. Elements with embedded localization zones for large deformation problems[J]. Computers Structures, 1988, 30: 247 ~ 256.

[20] Dvorkin E N, Cuitino A M, Gioia G. Finite elements with displacement interpolated embedded localization lines insensitive to mesh size and distortions[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1990, 30(3): 541 ~ 564.

[21] Dvorkin E N, Assanelli A P. 2D finite elements with displacement interpolated embedded localization lines: the analysis of fracture in frictional materials[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1991, 90: 829 ~ 844.

[22] Klisinski M, Runesson K, Sture S. Finite element with inner softening band[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1991, 117(3): 575 ~ 587.

[23] Oliver J. Modeling strong discontinuities in solid mechanical by means of train softening constitutive equations, part Ⅰ: fundumentals[J]. Int J Num Meth Eng, 1996, 39(21): 3575 ~ 3600.

[24] Oliver J. Modeling strong discontinuities in solid mechanical by means of train softening constitutive equations, part Ⅱ: numerical simulation[J]. Int J Num Meth Eng, 1996, 39(21): 3601 ~ 3623.

[25] Sluys L J, Berends A H. Discontinuous failure analysis for model-I and mode-II localization problems[J]. Int J Solid Struct, 1998, 35: 4257 ~ 4274.

[26] 陈胜宏，汪卫明，徐明毅，等. 小湾高拱坝坝踵开裂的有限单元法分析[J]. 水利学报，2003(1)：66 ~ 71.

[27] Jirásek M. Comparative on finite elements with embedded discontinuities[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2000, 188(1): 307 ~ 330.

(收稿日期：2003-10-08　编辑：张志琴)

(上接第 48 页)

视为二元流，结合国内外掺气减蚀的发展，研究发现掺气空腔的三维形态对空腔的稳定性有很大的意义，其研究成果既有重要的理论意义，又对工程设计有普遍的指导意义.

参考文献：

[1] Russell S O, Sheenan G J. Effect of entrained air on cavitiaon damage[J]. Canadian Journal of Civil Engineer, 1974, 1(1): 68 ~ 86.

[2] 肖兴斌，王才欢. 岸边溢洪道掺气减蚀设施设计研究与实践综述[J]. 水电工程研究，2000，6(2)：28 ~ 39.

[3] 时启燧，潘水波，邵瑛瑛，等. 通气减蚀挑坎水力学问题的实验研究[J]. 水利学报，1983(3)：1 ~ 12.

[4] Rutschmann P, Hager W H. Design and performance of spillway chute aerators[J]. Water Power & Dam Construction, 1990, 36(6): 215 ~ 224.

[5] 杨永森，杨永全. 掺气设施体型优化研究[J]. 水科学进展，2000(6)：144 ~ 147.

[6] 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，1998，4(2)：49 ~ 53.

[7] 夏毓常，张黎明. 原型与模型若干水力特性对比分析[J]. 水利水电工程设计，1996，2(1)：41 ~ 49.

[8] 杨永森. 强迫掺气水流的数学模型[D]. 北京：清华大学，1993.

[9] 罗铭，杨永森. 掺气减蚀设施水力计算的改进[J]. 水利学报，1998(9)：28 ~ 31.

[10] SL253-2000，溢洪道设计规范[S].

[11] 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.

[12] Frvine D A. The entrainment of air in water[J]. Water Power and Dam Construction, 1976, 28(12): 45 ~ 77.

[13] 肖兴斌. 三峡工程泄洪深孔掺气设施研究述评[J]. 水利水电科技进展，2003，23(4)：51 ~ 54.

[14] 孙双科，柳海涛，王晓松，等. 缓坡条件下凹型掺气坎布置形式研究[A]. 李桂芬，李连祥. 水力学与水利信息学进展[C]. 北京：中国标准出版社，2003. 305 ~ 310.

[15] 刘韩生，张勇. 论掺气减蚀[J]. 西北水资源与水工程，1996(1)：42 ~ 47.

[16] 朱春英，凌霄，刘杰，等. 小浪底工程明流洞掺气减蚀设计研究[J]. 水力发电，2001(2)：23 ~ 26.

[17] 聂源宏，南晓红，崔华. 吉林台一级水电站深孔泄洪洞的水力学问题[A]. 李桂芬，李连祥. 水力学与水利信息学进展[C]. 北京：中国标准出版社，2003. 285 ~ 290.

[18] 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，2002(2)：27 ~ 31.

[19] 黄国兵，陈瑞. 高水头放空洞关键水力学问题研究[A]. 李桂芬，李连祥. 水力学与水利信息学进展[C]. 北京：中国标准出版社，2003. 315 ~ 318.

[20] 支栓喜，阎晋垣. 齿墩式掺气坎的水力特性的研究[J]. 水利学报，1991(2)：42 ~ 45.

[21] 庞昌俊，苑亚珍. 大型"龙抬头"明流泄洪洞小底坡掺气减蚀设施的选型研究[J]. 水利学报，1993(6)：61 ~ 66.

[22] 王海云，戴光清，杨永全，等. 明流泄洪洞掺气减蚀设施优化试验研究[J]. 水力发电，2003(11)：54 ~ 56.

(收稿日期：2003-09-25　编辑：熊水斌)