

泄水建筑物过流壁面不平整体 初生空化与空蚀研究述评

梁川

(四川联合大学,成都,610065)

倪汉根

(大连理工大学,大连,116024)

摘要 泄水建筑物过流壁面不平整体初生空化与空蚀的研究进展,本文作了扼要的综述与评论。内容包括不平整度的定义及其初生空化与空蚀的理论分析、试验研究、比尺效应和理论预测,以及尚存在的问题。文中也包括了作者在上述工作中所作的研究和相应的看法。

关键词 不平整体 空化与空蚀 模型试验 比尺效应 理论预测

当今,世界性地兴建高水头,高流速的泄水建筑物正方兴未艾,其过流壁面上的最大泄流速度早已超过 40m/s,水流空化数显著降低。某些过流部位(如泄水隧洞进出口收缩部份、溢流坝反弧段、闸门槽,过流面上的各种不平整处等)常常发生极为严重的工程空蚀。过去认为是局部的空化空蚀现象,已发展成为影响整个水利工程枢纽、水电站和泵站正常运行的关键性问题。从水工建筑物空蚀实例统计情况看,因过流壁面不平整所引起的空蚀就达 20%以上^[1]。众所周知,溢流坝和泄洪隧洞的空蚀问题主要是固壁表面不平整的问题;尤其是过流速度接近 50m/s 时,水流空化数小于 0.1,不平整体的空化空蚀将更加突出。为了保证高坝大型水电站安全可靠,对水工建筑物过流壁面不平整体的初生空化与空蚀进行更深入地探讨与研究,是一项十分迫切的课题。为此,总结一下已有的共识和实践经验是很有益的。

1 不平整度的定义及其空化初生

所谓不平整度,是指水工泄水建筑物过流固壁局部表面跟设计要求不相符合的程度,包括局部粗糙面、模板接缝、错台、坑槽、歪斜与弯曲等施工误差和施工后残留的各种

突出物所形成的不平整。不平整可分为均布不平整和孤立不平整两种类型。一般比较容易引起空化与空蚀的是孤立不平整,它可以有三角形、矩形、弓形、锥形和半球形突体、圆角坎和降坎等型式。在实际泄水建筑物中,不平整往往是混合型的,但不同的不平整引起的初生空化与空蚀破坏位置和程度是不一样的。

不平整在边界层内产生的效应是改变位移厚度、引起流线位移和水流分离产生涡流,同时使垂直于边界的速度梯度和压力梯度发生改变。通常均布不平整粗糙面在整个流域范围内普遍改变流体的流速和紊动,而孤立不平整突体则引起突体附近产生局部高流速与高紊动,导致边界层的动水压力降低。当不平整引起的扰动压强低于该液体相应温度下的饱和蒸汽压强(或临界压强)时,液体蒸发使得微汽泡爆发性生长,水流内部的气核将惯性失稳形成含气型或含汽型空泡。出现局部空化现象。如果用水流空化数 σ_1 与壁面不平整的初生空化数 σ_{i0} 相比较,随水流速度增加,在突体附近会依次出现阵发性游移空化 ($\sigma_{i0} = \sigma_1$)、游移型空化 ($\sigma_{i0} < \sigma_1$) 和固定型空化 ($\sigma_{i0} \ll \sigma_1$);若流速继续增大,局部空化便发展成超空化。与此同时,若有一些游移型空泡随流向下游移动进入高压区,空泡本身溃灭

将产生一个很高的冲击压力,当它发生在靠近壁面附近且经过一定的持续时间之后,就可能出现初生空蚀。

2 初生空化方面的研究

1960年,霍尔(Holl)在光滑平板上分别放置三角形和弓形两种突体的初生空化试验中,首次获得了突体后最小压力系数 C_{pmin} 与突体相对高度、紊流边界层厚度和来流速度及其分布的形状参数三者间的函数关系,^[2]即

$$C_{pmin} = f(\Delta/\delta, \delta^*/\theta, V_\Delta \cdot \Delta/\nu) \quad (1)$$

式中 V_Δ 为突体高度 Δ 处的特征流速; δ 、 δ^* 和 θ 分别为边界层厚度、位移厚度和动量厚度; ν 为水的运动粘滞系数。同时,他又在假设最小压强等于饱和蒸汽压时出现空化初生的条件下,建议了初生空化数的迭加方程为^[3]

$$\sigma_{ir} = -C_{ps} + (1 - C_{ps})\sigma_{i0} \quad (2)$$

式中 σ_{ir} 为带有孤立突体的母体的初生空化数; C_{ps} 为突体所在位置母体的压力系数。这样,一旦给定了 σ_{i0} ,用式(2)就可以方便地确定任一光滑母体上附有平整突体的 σ_{i0} 。但是并没有给出式(1)的具体形式。后来,鲍尔, (Ball, 1963)、罗扎诺夫(1965)、本森(Benson, 1966)和博恩(Bohn, 1972)等都研究过不平整体的初生空化问题,但未取得实质性的进展。直到1979年,阿恩特(Arndt)把当时能收集到的实测资料,重新归纳并整理,得到了比较带有普遍性的表达式^[4],

$$\sigma_{i0} = c(\Delta/\delta)^m (V_0 \cdot \delta/\nu)^n \quad (3)$$

式中 c 、 m 、和 n 由试验数据确定的常数。按该式整理不同试验者给出的数据,可获得良好的线性关系。另外,他通过平板表面均匀加糙为横向三角形凹槽的紊流边界层内空化初生的观察,认为初生空化起源于紊流压力脉动,且跟边界层内的剪切力密切相关,从而建立了实测消失空化数与相对糙率呈线性关

系的结论,其经验表达式为^[5]

$$\sigma_{i0} = 16C_f \quad (4)$$

式中 $C_f = 2\tau_0/\rho V_0^2$ 为局部切应力系数, ρ 、 τ_0 和 V_0 分别是水的密度、剪应力和水流速度。几年后,霍尔又研究了压力梯度对光滑平板上孤立突体初生空化数的影响,在式(3)中增加了一个因子变成式(5)^[6],

$$\sigma_{i0} = c(\Delta/\delta)^m (V_0 \cdot \delta/\nu)^n G^d \quad (5)$$

式中 d 为常数, G 是与压力梯度有关的形状参数。比较而言,式(5)能较好地反映决定不平整突体初生空化数的主要因素,但由于包含有 δ 作为参数,使用时不太方便,得到的成果还受到较大的限制。为了实用文[7]引入水力设计中大家非常熟悉的谢才系数和糙率系数代替 δ ,并综合考虑了突体高度及形状、边界层厚度和水流速度等因素,建议等腰三角形突体初生空化数采用如下的计算式

$$\sigma_{i0} = c\left(\frac{V_\Delta}{V_0}\right)^a \left(\frac{V_\Delta \cdot \Delta}{\nu}\right)^b \left(\frac{\Delta}{L}\right)^d \quad (6)$$

式中 L 是半底宽,系数 c 、 a 、 b 和 d 由相应的试验实测数据经拟合得到。

近10多年来,国内也有不少研究者实测过平板上不平整突体的初生空化数。譬如,刘曼聆和丁道扬(1976)曾发表过边界层内不平整突体的试验结果;严忠民(1982)基于试验推导了三角形突体边坡与初生空化数的关系;周胜和刘长庚比较了几种突体的初生空化数,结论是垂直升坎的初生空化数最大,三角形突体次之,斜坡坎最小,但各种突体的初生空化数都随 Δ 和 Re (雷诺数)的增加而加大;胡去劣(1983)从减压试验结果认为影响三角形突体初生空化数的主要因素是 Δ/K (K 为当量糙度),等。概括来说,上述这些实验资料均不太完善,况且仅以 Δ 、 H/Δ (H 是水深)、 Δ/K 或 Re 为单参数给出的初生空化数会隐含着很强的比尺效应,不便于施工中使用。

3 初生空蚀方面的研究

目前,对初生空蚀的判别常用空蚀率的大小来量度。由于要准确预测空蚀率也不易,所以就间接地分析流场特性或与空蚀相联系的空化噪声谱和空化区的压力脉冲谱等相关量,试图通过对相关量的研究来达到预测空蚀率的目的。不平整体的空蚀指标常用麻点率表示,即某种材料在单位时间单位面积上的空蚀破坏麻点数。柯乃普(Knaap,1971)在文丘里装置中得到空蚀麻点率与流速有近似6次方关系,事实上,不同流场条件同种材料实测的方次指数并非都一样。日本学者宫代裕(1978)曾用磁致伸缩仪测量具有不同表面糙度的两种金属空蚀率,结果表明同种材料的空蚀率与表面糙度成正比。黄继汤(1985)得出同种材料表面光滑的比表面粗糙的抗空蚀能力有明显提高。1988年,倪汉根在假定形成麻点的空泡数跟总空泡数比值相等的前提下,由泡动力学方程从理论上推证了单位时间内空泡生成率平均而言与流速6次方成正比^[8]。后来他又在两种孔板洞空蚀初生的研究中,测定了不同的砂浆标号初生空蚀的临界空化荷载及分布,得到最大空泡溃灭压强 P_{max} 与砂浆标号 R_{28} 之间的关系^[9]。

$$P_{max} = K \cdot R_{28} \quad (7)$$

式中 K 为比例常数。

该式说明:当固壁表面某点达最大空泡溃灭压强时,相应标号的砂浆试件将出现空

$$C_T(t) = \frac{P_v(T_\infty) - P_v(T_R(t))}{\rho V_0^2/2} \quad (9)$$

$$\varphi = \frac{1}{T_c} \int_C^{T_c} \left[\frac{4\mu R}{R} + \rho(R\ddot{R} + 3\frac{\dot{R}^2}{2}) dt \right] / \rho V_0^2/2 \quad (10)$$

式中 $T_R(t)$ 是随时间变化的泡壁温度; μ 是水的动力粘滞系数; \dot{R} 、 \ddot{R} 分别为气核泡壁径向膨胀运动的速度和加速度。压力系数 C_p 也可展开写成如下形式

蚀初生。于是,只要找到不同流速情况下的 $P_{max} \sim R_{28}$ 关系,就可能作出用流速效应加以修正的空蚀状态数值预报。不过从本方法的试验过程和假设条件看,还不能被延伸到有自由水面的水流系统中去。

到现在为止,从理论上研究壁面不平整体空蚀现象进行得还不令人满意,且主要集中于空化荷载方面,将空化荷载与材料性质结合起来的研究还极少。

4 初生空化与空蚀的比尺效应和理论预测

同样形状的不平整在不同条件下测定的初生空化数是不一样的,通常称这一现象为比尺效应,它主要包括尺寸效应、流速和压强效应、含气量效应以及滞效应等。按照其形成原因可归结为水动力效应和热动力效应两大类。前者是指影响流场压强和流速分布(包括平均场和脉动场)的各种因素;后者是指影响气核生长过程使空化临界压强和相应温度下的饱和蒸汽压不相等的各种因素。从Rayleigh-Plesset方程出发可以得到初生空化数 σ_1 的表达式为

$$\sigma_1 = -\bar{C}_{pmin} + \frac{\bar{P}_g - 2(\frac{S}{R})}{\rho V_0^2/2} - \bar{C}_T - \varphi \quad (8)$$

式中 字母上的“—”表示该量在空化过程中的特征时间 T_c 内的平均值; \bar{P}_g 为气体压强; S 为水的表面张力系数; R 为气核半径; \bar{C}_T 是 P_v 差系数; φ 为泡动力特性因子。 \bar{C}_T 和 φ 分别定义为

$$-\bar{C}_p = -\bar{C}_{ps} + \frac{\Delta\bar{p}_T + \Delta\bar{p}_R}{\frac{1}{2}\rho V_0^2} \quad (11)$$

式中 \bar{C}_{ps} 相应于光滑形体的压力系数, $\Delta\bar{p}_T$ 和 \bar{P}_R 分别是因素流脉动和表面加糙引起的

附加压力降。

不平整突体特征尺寸的改变同时影响流场特征和气核生长发育,故其比尺效应主要是尺寸、速度和压力效应。在边界层脱体的情况下会产生不同的 C_p 分布,属第一类比尺效应;当突体绝对尺度增大,溶解气体向核内的扩散量也有所增加,则属第二类比尺效应,这两类比尺效应均使 σ_0 值增大。对于分离型突体来讲,涡心处的压力始终与分离点处的边界层有关,即与来流速度有关,是第一类比尺效应。这时第二类比尺效应有两种不同的机制对流速变化起作用。一种是保持水流空化数不变的条件下加大 V_∞ ,气核经过拉应力区的时间缩短,承受的拉应力强度增大,相当于减小了时滞效应。另一种是保持初生空化数不变,水流流速和自由水面上的压强相应降低,水中的溶解气体逸出而扩散进入核内的气体量增加,即 \bar{P}_s 加大;在这一过程中,气核经过低压区的时间延长而助长了气核的生长发育,初生空化数增大。对相同的空化数而言,压强必须与流速协调变化,因此压强效应的影响同流速效应的影响基本一致。

很多文献的试验结果已表明,尺寸一定的孔板或弯管,流速对初生空化数几乎没有影响,相反地,流速一定,改变孔板或弯管尺寸,初生空化数的变化极为明显,所以 Re 数中的速度和尺度两个因子应予分别讨论^[9]。初生空化数基本上没有尺寸效应,但却存在强烈的速度效应和压力效应;文[8]假设几何相似的两个系统,在相同流速和相同空化数的情况下形成空蚀麻点率,从理论上证明了这一结论。各种不平整体的空化数总是存在严重的比尺效应,所以不同文献报告的实测空化数值不会完全相同,也不能定量地估计流速和压强对它的影响。

由于各种比尺效应难以较准确地定量修正,降低了用模型测得的空化数预测原型空化数的可靠性,国内外学者希望能够直接估计某水流系统的空化数。霍尔(1960)在研究

圆弧形突体的初生空化数时曾建议过冻结流线法,但对该法对非光滑突体不适用,即使对圆弧形突体,计算值与实测值的差异也较大。1965年他又建议过特速度法,用该法预测弓形突体的初生空化数,误差不大,可是用来预测三角形突体,并不成功。许协庆和周胜(1982)曾用复变函数理论分析过圆弧弓形和半弓形两种突体的压力分布,因为基于势流理论的方法不可能反映边界层的影响,故也不可能较好地预测有分离的流场特征。王学庚等人(1984)报道了涡模拟法数值计算弓形突体和矩形突体附近的最小压力系数和初生空化数,这种方法虽适用于各种突体,但方法本身也还有一些不够明确的因素。进入80年代后期,为了克服比尺效应和消除原模型间的引伸问题,以倪汉根教授及其研究生们开始另辟途径,从直接求解原型工程流场入手,在群空泡溃灭时作用于固壁的压强及诱生压强功率谱、空蚀潜能、比尺效应、绕流体初生空化数的概率理论预测等众多领域展开了大量的理论分析和模拟计算,已取得了一定的成果^[8],从而开辟出一条由紊流数学模拟与空泡动力学数值计算相结合,并辅以模型试验的空化与空蚀研究新方向。

5 存在的问题与难点

迄今为止,国内外有关不平整体初生空化与空蚀的研究,无论是理论分析还是室内试验,主要是按时均流速和压力进行的,未计及紊流边界层内脉动压力和压力梯度的影响,并且试验资料多数是在30m/s流速以下得到的,统计方式又是各式各样的,因而降低了他们的使用价值。当 $V_0 \geq 30\text{m/s}$ 时,假如 $\Delta = 2\text{mm}$,则 Re 已接近 10^5 量级,一般扰动流场都会在局部区域产生分离,形成回流旋涡流场,致使以往各种基于势流假定的空化数预测失去实际意义。当 $V_0 \approx 50\text{m/s}$ 时,不平整度引起的流场扰动量相当大,脉动流速和

压力可能变成决定性的因素,使空化空蚀现象的机制更为复杂。如果把低流速的试验实测数据外延到50m/s 流速级,必须采用紊流数学模型计算流场,又会遇到解决比尺效应问题。然而要避免令人讨厌的比尺效应和模型引伸,不得不考虑紊流场计算与空泡动力学相结合进行数值模拟,但它同时取决于两方面的研究进展。一方面,高雷诺数的三维紊流场计算工作量很大,要从数值模拟获得比较可信的脉动流速和压力值常存在一些困难,故空化初生的数值预测还有相当难度;另一方面,群泡动力学研究才刚起步,对高强度紊动下的群泡行为也根本没有触及,既不能准确描述它们的溃灭过程,更何况空蚀又是流场、空泡和材料三方面特性综合作用的结果,可以说,初生空蚀的理论预测将比初生空化的理论预测难度更要大得多。

半个多世纪以来,在泄水建筑物过流壁面不平整体初生空化方面研究的比较普遍、深入,但初生空蚀方面研究成果尚十分贫乏,不同试验者通过不同手段取得的结果差别很大,有时甚至是相互矛盾的。要真正解决这些问题,尚有待在理论研究上有一个突破性进展。因此,从当前发展趋势看,为了满足水工建筑物的向高流速、大雷诺数发展之要求,该课题的研究仍只能是室内试验、紊流数值模拟计算和工程现场观测并重。随着空化空蚀

学科理论、试验设备、测试技术和计算机应用的飞速发展,只要充分吸收世界各国先进成果,可以相信,一定会出现更加良好的前景。

参考文献

- 1 柴恭纯. 水工泄水建筑物空蚀及空穴流研究和应用中的几个问题. 南京水利科学研究所, 1982
- 2 Holl J. W. The Inception of Cavitation on Isolated Surface Irregularities. Trans. ASME J. Basic Eng, Vol. 82, No. 1, March(1960)pp. 169~183
- 3 Holl J. W. The Estimation of the Effects of Surface Irregularities on the Inception of Cavitation, ASME symp. on Cavitation in field Mechanics, G. M. Wood et al, 1965. pp. 3~156
- 4 Arndt R. E. A, & Holl J. W, et al Influence of Surface Irregularities on Cavitation Performance. J. ship Research, Vol-23, No. 3 Sept. 1979. pp. 157~170
- 5 Arndt R. E. A, & Ippen A. T, Cavitation Near Surfaces of Distributed Roughness, MTT Hydrodyn Lab. Rep. 104, 1967
- 6 Holl J. W, & Billet, M. L, Limited Cavitation on Isolated Surface Irregularities— Unsolved Problems, Inter Symp. on Cavitation, April 1986
- 7 梁川, 倪汉根. 三角形突体初生空化数的研究. 泄水工程与高速水流. 1994
- 8 倪汉根. 《气核—空化—空蚀》. 成都科技大学出版社, 1993
- 9 倪汉根, 郭瑛, 孔板泄洪洞初生空蚀数的试验研究. Proc of the Inter. Symp. on Modelling Cavitation Phenomena, Wuhan, China, 1991

(收稿日期19940203)

Summary of Study about Initial Cavitation on Uneven Surface in Active Cross-sections of Release works

Liang Chuan

(Sichuan Union University)

Ni Hangen

(Dalian Science and Engineering College)

Abstract Study about initial cavitation on uneven surface in active cross-sections of release works is briefly summarized and evaluated. The summary give a definition to unevenness and show the theoretical analysis, experiment, scale effect and theory prediction for initial cavitation and existing problems. The study and views on the above analysis by the author are presented.

Key Words uneven surface cavitation model test scale effect theory prediction