

水工建筑物初生空化数及其比尺效应研究进展

郑雪玉^{1,2,3}, 吴时强³, 杨家修¹

(1. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081;

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;

3. 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)

摘要:水工建筑物结构水力设计中通常涉及防空蚀设计, 一般规定水流空化数 $\sigma_i < 0.3$ 的区域或者流速大于15 m/s的部位要进行防空蚀设计。水工建筑物不同部位结构, 初生空化数不同, 该值的分析一方面通过理论计算, 另一方面则是通过减压模型试验, 试验不可避免地存在比尺效应。对目前国内外初生空化数的计算公式加以总结, 指出不同公式的优缺点及适用条件; 对初生空化的比尺效应进行相应归纳, 为模型试验测定初生空化数提供新的思考方法; 同时总结了水工建筑物不同部位初生空化判断标准, 为相应的设计研究提供具体详细的指导。

关键词:水工建筑物; 初生空化; 空蚀; 比尺效应; 判断标准

中图分类号: TV131.3+2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2021)01-0087-08

Research progress of incipient cavitation number and its scale effects in hydraulic structures//ZHENG Xueyu^{1,2,3}, WU Shiqiang³, YANG Jiaxiu¹(1. Power China Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydropower Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Anti erosion design is usually involved in the hydraulic design of hydraulic structures. It is generally stipulated that the anti-erosion design should be carried out in the area with cavitation number $\sigma < 0.3$ or with the flow velocity greater than 15m/s. The initial cavitation number is different in different parts of hydraulic structures. The value is analyzed not only through theoretical calculation, but also through pressure reduction model tests in which scale effect inevitably exists. The calculation formulas of primary cavitation number at home and abroad were summarized, and the advantages and disadvantages of different formulas and applicable conditions were put forward. The scale effects of primary cavitation were summarized, providing a new thinking method for the determination of incipient cavitation number in model experiment. The criteria of incipient cavitation in different parts of hydraulic structures were summarized, which provides specific and detailed guidance for corresponding design and research.

Key words: hydraulic structure; incipient cavitation; cavitation erosion; scale effects; criteria

空化空蚀现象于1893年最先在军用驱逐舰和汽轮机螺旋桨中发现, 30年后在水电水利工程的高水头泄水建筑物中出现。直到现在水工建筑物中空化空蚀问题时有发生, 并且严重危害泄水建筑物的安全运行。有许多专著和论文对水工建筑物的空化空蚀及掺气减蚀技术问题进行了专门叙述并收集大量实例^[1-2]。国内比较典型的破坏案例有: 刘家峡泄洪洞反弧段及下游底板空蚀破坏; 龙羊峡泄洪洞左

右边墙严重空蚀破坏; 丰满水电站溢流坝面的空蚀破坏; 盐锅峡溢流坝导流孔空蚀破坏; 丹江口导流底孔出口空蚀破坏; 柘溪溢流坝挑流鼻坎空蚀破坏等。水工建筑物的空化空蚀问题严重威胁工程的安全运行, 加深对初生空化数的研究, 按照不同水工建筑物结构部位研究其初生空化数, 并深入分析其比尺效应, 能在设计阶段对规范规定的防空蚀设计做到精确响应, 极大保障结构安全, 从根源上减免空化空

基金项目: 贵州省科技支撑计划([2017]2865); 中国华能集团科技项目(HNKJ15-H12)

作者简介: 郑雪玉(1988—), 女, 工程师, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: 529104960@qq.com

通信作者: 吴时强, 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

蚀。季斌等^[3-5]针对空化水动力学非正常特性、空化机理以及减免空化的掺气减蚀技术等方面的进展及尚存在的问题进行了全面论述。本文在此基础上从初生空化数计算公式、初生空化数的比尺效应及水工建筑物不同部位的初生空化数研究情况三方面进行综述。

1 初生空化数计算公式

空化的本质现象是由于最小压强 p_{\min} 小于液体饱和蒸汽压强 p_v , 气核界面处的液体相变成蒸汽, 使气体急剧膨胀而成空泡。但流场中的气核微小多变, 具体参数难以测定, 所以无法用这些量判断水流空化与否。那么通过研究可采用初生空化数来判断空化与否。好比雷诺数用来判断层流和紊流, 弗劳德数用来判断急流和缓流。而初生空化数则是水流是否发生空化现象的判断标准, 若水流空化数小于对应的初生空化数, 则为空化流, 反之, 则为非空化流。空化数还有另外两方面的意义^[6]: ①描述设备对空化破坏的抵抗能力; ②衡量不同流场空化现象的相似性。关于初生空化数具体计算方式, 国内外已有不少研究, 但各家得出的结果不尽相同, 本文对部分初生空化数公式汇总对比见表 1。

表 1 各公式不尽相同, 分析认为一方面由于具体研究对象的边界条件、结构形式、运行条件等不同, 及所考虑的影响因素及权重不同所致; 另一方面则是由于试验条件、测量方法、分析方法差异所致。但公式也呈现出了一定的共性, 比如大部分衍生公式都是在经典 Thomas 定义式基础上, 加入影响因子

及权重而得。除此之外, Roger^[14] 针对圆盘绕流进行研究, 认为其具有较大的分离区, 雷诺数影响最小压力系数, 从而影响空化初生, 建立了适用于汽型空化的圆盘绕流初生空化数计算公式。Roger 等^[15] 还研究了水质对尾涡流初生空化的影响, 给出相应公式。黄建波^[16-17] 建立的公式表明几何相似的两系统中, 初生空化数只与最小时均压力系数及脉动压力强度有关; 还提出从失稳气核与液体的体积比、单位时间内的失稳气核个数两种比较直观的方式定义空化初生现象和初生空化数。夏洪维^[9-10] 建立了考虑水流和水质效应的初生空化数公式。Zhang 等^[18] 建立了初生空化数与雷诺数的关系。倪汉根对初生空化数有着多方面研究, 不仅建立了凹槽中的旋涡初生空化数计算公式^[12], 还对弓形凸体和孔板泄洪洞^[1,19] 进行了概率估计及直观表达式的计算, 并将结果与实测初生空化数进行对比, 3 种结果相当接近, 且与实测值差别不大。

从表 1 初生空化数公式发表年份来看, 早期相关研究较多, 主要集中于 20 世纪八九十年代, 到 21 世纪以后, 研究成果相对较少。针对已有成果无论从哪类因素出发建立的新初生空化数公式, 都是基于经典公式。该式更具普适性, 形式简单, 适用性较强。然而, 经典公式只能提供初步参考, 仅考虑了液体的饱和蒸汽压强, 未计入影响初生空化的其他因素。在实际工程中, 还应根据具体工程特点, 通过模型试验对经验值进行修正。

2 初生空化数的比尺效应

空化现象本身相当复杂, 到目前为止, 要准确预

表 1 初生空化数公式对比

序号	提出者	公式	发表年份	特点
1	Thomas	$\sigma_i = \frac{p_\infty - p_v}{0.5\rho v_\infty^2}$		经典公式, 反映空化现象的本质。式中: σ_i 为初生空化数; p_∞ 为流动系统中某一选定点的绝对压强; ρ 为液体密度
2	Ni 等 ^[7]	$\sigma_i = E[K_i(R_0)] = \int_{R_{0\min}}^R f(R_0) K_i(R_0) dR_0$	1986 年	从数学力学角度给出了初生空化数的概率定义。式中: R_0 为气核初始半径; $E[K_i(R_0)]$ 为气核大小分布的期望; $f(R_0)$ 为气核大小分布的概率密度函数
3	杨志明 ^[8]	$\sigma_i = \frac{p_\infty - (p_v - Mp_i)}{0.5\rho v_\infty^2}$	1990 年	从零液体抗拉强度出发, 从液体抗拉强度角度对经典公式进行了修正。式中: P_i 为实测的液体抗拉强度; M 为试件的模型系数, 其数值与试件的流体力学特性有关
4	夏维洪 ^[9-10]	$\sigma_i = \frac{4}{27} \frac{(2\tau/R_0)^3}{1/2\rho v_0^2 Z^2}$	1993 年	基于液体抗拉强度, 从液体内气核初始半径出发, 加入气核表面张力影响建立初生空化数公式。式中: τ 为水的表面张力系数; Z 为液体抗拉强度; Z 为液体抗拉强度
5	Keller ^[11]	$\sigma_i = \sigma_0(1+S/4)$	1997 年	该计算方法考虑的是在零抗拉强度条件下的流体来流紊动度对初生空化的影响。式中: σ_0 为试件在来流紊动度为零时的基本初生空化数; σ_i 为在来流的紊动为 S (用脉动的均方根值表示) 时试件的初生空化数
6	倪汉根等 ^[12]	$\sigma_i = \frac{\mu_b^2 \left(5 + \frac{1}{K_1^2}\right)}{3} - 1$	2000 年	适用于凹槽中的旋涡初生空化现象。其中: $K_1 = \frac{B_0}{D_0}$, $\mu_b = 1 - \frac{3\alpha'}{K_1 + \alpha'}$ 。式中: K_1 为凹槽的深高比; B_0 为凹槽的水深; D_0 为凹槽的高度; μ_b 、 α' 为常数, $\alpha' \approx 0.4$
7	张敬威等 ^[13]	$\sigma_i = \frac{P_\infty - (P_v + N\tau)}{0.5\rho v_\infty^2}$	2014 年	该公式从液体表面张力出发, 认为并没有克服液体抗拉强度。式中: N 为衡量水体空化敏感性的参数, 单位为 m^{-1} , 暂称为水流空化敏感性参数

报水工建筑物的初生空化仍然存在一些问题,众多学者研究发现:初生空化数存在比尺效应或尺度效应,即所谓的“空化数偏离”^[20]。

目前对空化的研究手段主要还是采用物理模型试验。模型与原型之间必然存在比尺效应^[21],故把模型上测的初生空化数直接应用于原型是不合理的,也是不安全的。为了较好反应原型初生空化数,必须对模型所测结果进行比尺效应修正。国内外学者进行了大量研究,代表成果有 Keller 等^[22-28]、任静等^[29]、倪汉根^[30]、夏维洪^[10,31]、潘森森等^[20]修正公式。

2.1 Keller 等^[22-28]公式

Keller 博士用自己发明的“涡流腔抗拉强度仪”测量,在大量试验研究的基础上,综合考虑几何尺度、速度、紊流度和水质条件等各种因素,将修正关系合并成一个公式:

$$\sigma_i = K \left(\frac{L}{L_0}\right)^{1/2} \left(\frac{v_0}{v}\right)^{1/4} \left[1 + \left(\frac{v_\infty}{v_0}\right)^2\right] \left(1 + \frac{KS}{S_0}\right) \quad (1)$$

式中: L 、 v 、 v_∞ 、 S 分别为模型特征长度、介质动力黏性系数、来流速度和来流紊流度; L_0 、 v_0 、 v_0 、 S_0 分别为 L 、 v 、 v 、 S 的参考值; K 为试件形状和空化类型特征; v_0 为一个几乎稳定的常数,一般取 12 m/s。该式主要以不同线型的轴对称头体和不同剖面的水翼试验结果为依据。他还在考虑了水流阻力以及流速和绕流体试件尺寸对空化数影响时得出如下关系式:

$$\sigma_i = C_w^2 \left(\frac{L}{L_0}\right)^{1/2} \left[1 + \left(\frac{v_\infty}{v_0}\right)^2\right] \quad (2)$$

Keller 提出的修正公式是经验推导的,是有量纲的。流速比尺效应 C_w 引用的是经验参数,给它一个速度量纲,在物理意义上还没有做出解释。该式基本来源于有限数据的经验总结归纳,一旦试验装置和测试条件不同,就会产生偏差,在一定范围内可能适用,但不能推广,要按无量纲数来归纳比尺效应才是最可靠的。

2.2 任静等^[29]公式

综合考虑水质影响因素,在安东和普列达提出的水轮机组相似率基础上,得到比较全面的电站水力机械的空化比尺效应公式:

$$\sigma_H - \sigma_m = \left(\frac{R_H}{H_H} - \frac{R_m}{H_m}\right) + \left(\frac{\Delta h_m}{H_m} - \frac{\Delta h_H}{H_H}\right) + 8.48 \left(\frac{\sqrt{\alpha_H}}{H_H} - \frac{\sqrt{\alpha_m}}{H_m}\right) + \frac{32}{27\gamma} \left(\frac{\tau_H^3}{H_H Z_H^3 R_{0H}^3} - \frac{\tau_m^3}{H_m Z_m^3 R_{0m}^3}\right) \quad (3)$$

式中: σ 为空化数; R 为转轮叶片上最低压力点的半径; Δh 为转轮叶片上最低压力点到水轮机出口的水力损失; H 为工作水头; α 为水中空气的相对体积

含量; τ 为水的表面张力; γ 水的表面张力;下标 H 和 m 分别表示原型和模型值。该式可在已知模型空化系数的前提下,通过计算比较精确地确定原型空化数。

2.3 倪汉根^[30]公式

倪汉根对空化问题研究较多,提出的空化数比尺效应公式为

$$\sigma_c = -C_{P_{\min}} - \frac{30.62 - 17.65 (R_0/R_c)^2}{v_\infty^2} \quad (4)$$

因模型与原型是几何相似的,当模型中与初生空化状态相应的水流雷诺数足够高时,略去很小的项 $\frac{17.65 (R_0/R_c)^2}{v_{\infty,H}^2}$ 后得原、模型之间的初生空化数间的关系为

$$\sigma_{c,H} = \sigma_{c,m} + \frac{1}{v_{\infty,m}^2} \left[30.62 \left(1 - \frac{1}{\lambda_L}\right) - 17.65 \left(\frac{R_0}{R_c}\right)_m^2\right] \quad (5)$$

式中: $-C_{P_{\min}}$ 为最小压力系数; λ_L 为模型的长度比尺; σ_c 为气核失稳的临界空化数; R_c 为气核失稳的临界半径。应用碧口水库孔板洞系列减压模型试验对该进行了验证,基本上反映了减压试验中原型和模型初生空化数的关系。但也做了一些假定,因此其要求最好满足 $v_\infty > 5.0$ m/s,否则因修正值占比很大,预报的原型初生空化可靠性不高。

他还提出含沙水流中初生空化数的表达式^[1]:

$$\sigma_i = \left(\frac{\bar{v}_{\max}}{v_\infty}\right)^2 + \xi - 1 + -\beta \frac{\sigma'_H}{2\rho v_{\infty,i}^2} + \frac{5}{4} \left(\frac{w}{v_{\infty,i}}\right)^2 - \beta \left[\frac{4S}{3R_{c,m}} + \left(\frac{\mu}{\rho v_{\infty,i} L}\right)^2 \right] \quad (6)$$

式中: ξ 为用 v_∞ 表示的从参考点到 P_{\min} 点之间的水头损失系数; w 为在 P_{\min} 处沙粒与液体的相对速度; β 为反映与气核生长过程有关的惯性、溶解气体扩散等影响的一个因子; β 为时均压强和脉动压强均方根的峰值系数。式(6)为讨论含沙水流中的各种因素(如阻力损失系数、沙粒与液体相对运动、黏性变化、 σ'_p 变化、表面张力变化、密度影响、空化核数量变化)对初生空化数的影响提供了基础。

2.4 长江科学院^[31]公式

长江科学院总结了 5 种泄水管的类型,推导出短泄水管末端的空化数为

$$\sigma = \frac{2gCD_2^3}{v^2} + \frac{2gD_2^2(h_a - h_v)}{v^2 Re^2} \quad (7)$$

式中: D_2 为进口曲线与管道直线交界断面处的直径; C 为与泄水管形式有关的常数; h_a 为大气压; h_v

为水的饱和蒸气压; Re 为雷诺数。

式(7)说明空化数与雷诺数相关,当雷诺数足够大时, σ 可接近常值。模型试验表明,只有模型雷诺数 $Re_m > 10^6$ 时,才有可能接近自动模型区。为此原型和模型的特征线性比尺应该为 $L_r < 10^{-4} (Re_H)^{2/3}$ 。

2.5 潘森森^[20]公式

潘森森给出了形式上较完整的空化数表达式:

$$\sigma_{\text{new}} = -C_{p_{\text{loc}}} + \frac{P_{\text{ls}}}{2\rho u_{\infty}^2} + \frac{\Delta p_{\text{loc}}(t) + \Delta p_{\text{Tu}} + \Delta p_{\text{rough}} + \frac{p_{\infty} - 2\tau/R}{2\rho u_{\infty}^2}}{\frac{1}{2}\rho u_{\infty}^2} \quad (8)$$

潘森森说明空化的内涵是式中右边第1项低压条件和第2项介质影响,他们是构成新空化相似参数的基本项。由水动力学因素引起的空化比尺效应是式中第3项低压因素,第4项是时间因素对 σ 数的修正,即由泡动力学因素引起的空化比尺效应,第3、4两项可以不包含在上式对空化数的定义中,属于空化数的外延,可称为空化的比尺效应修正。

上述各家从不同角度计及空化比尺效应的影响因素,当然也包括空化概念的定义范畴及空化数的定义等问题的讨论,他们重点找出空化数定义中的缺陷、修订并补充完整,以寻求空化数与空化现象偏离的解决途径。这些因素主要包括流体黏性、紊动、表面张力、气核含量或抗拉强度等介质条件,归结为模型的“尺度效应”和“速度效应”等等。从各家表述的修正理念与检验结果来看,也不尽如人意。这就表明,仍有某些未计的重要影响因素存在。

3 水工建筑物不同结构的初生空化数

3.1 过流表面平整度

过流表面平整度通常分为均布不平整糙面和孤立不平整凸体,比较容易引起空化与空蚀的是孤立不平整凸体。国内外学者针对不平整凸体初生空化数研究较多。Colgate^[32]通过研究指出混凝土表面不平整引起的空化初生与均布糙体的当量高度和边界层厚度的比值密切相关。Numachi 等^[33]验证了 Colgate 的观点。Arndt 等^[34-35]指出空化初生都起源于紊流压力脉动,且跟边界层内的剪切力密切相关,得出初生空化数公式为

$$\sigma_i = 16C_f \quad (9)$$

其中

$$C_f = \frac{\tau_0}{\rho v_0^2/2}$$

式中: v_0 、 τ_0 分别为均匀流速度和板面剪应力。

倪汉根^[19]在以上基础上,从工程实用角度出发

发,给出了下式:

$$\sigma_i = \frac{32gn^2}{R^{1/3}} \quad (10)$$

式中: R 为水力半径; n 为糙率; g 为重力加速度。

Holl^[36]在 $\sigma_i = -C_{p_{\text{min}}}$ 假设下,得到:

$$C_{p_{\text{min}}} = f\left(\frac{\Delta}{\delta}, \frac{\delta^*}{\theta}, \frac{u_{\Delta}\Delta}{\nu}\right) \quad (11)$$

式中: Δ 为不平整凸体高度; u_{Δ} 为未受扰动流速场中与凸体最高点处相应的流速; δ 、 δ^* 、 θ 分别为边界层厚度、位移厚度和动量厚度。

由于 Holl 只给出了关系式,没有给出具体表达式, Borden^[37]通过研究,给出 Holl 式中因子替换式,

$$\sigma_{\Delta} = \sigma_i \frac{v_0^2}{v_{\Delta}^2} \text{和} Re_{\Delta} = \frac{v_{\Delta}\Delta}{\nu}$$

1979年, Arndt 等^[38]提出了比较带有普遍实用性的经验公式:

$$\sigma_i = c \left(\frac{\Delta}{\delta}\right)^a \left(\frac{v_0\delta}{\nu}\right)^b \quad (12)$$

式中: c 、 a 、 b 均为根据试验数据定出的常数系数,他们与孤立不平整凸体的形状有关,需由减压试验确定。该式是在综合了当时能收集到的孤立不平整凸体的全部实测资料,重新归纳并整理后得出的。

Holl 等^[39]随后研究了压力梯度对光滑平板上孤立不平整凸体初生空化数的影响,在式(12)中增加了一个反映压力梯度的修正项,提出:

$$\sigma_i = c \left(\frac{\Delta}{\delta}\right)^a \left(\frac{v_0\delta}{\nu}\right)^b G^d \quad (13)$$

其中 $G \approx 6.1\sqrt{\beta + 1.8} - 1.7$, $\beta = \frac{\delta^*}{\tau_w} \frac{dp}{dx}$

式中: G 为与压力梯度有关的形状参数因子,但一般情况下(如溢流坝面和泄洪洞),压力梯度不太大,对 a 的影响也较小,可忽略不计; d 为常系数。

SL253—2018《溢洪道设计规范》也建议了两种不平整体的初生空化数,该规范的建议考虑了比值 Δ/δ 的影响,没有考虑 $\frac{v_0\delta}{\nu}$ 的影响,因此并不完全合理。

周胜等^[40]指出各种接近流线型突体的初生空化数近似等于最小压力系数,针对多种接近流线型突体的最小压力系数应用有限元法按照势流分析进行了计算,计算成果和试验成果比较一致,但该计算分析中未考虑黏性的影响。

梁川等^[41]通过试验拟合,给出 50 m/s 流速级时三角形凸体初生空化数为

$$\sigma_{\text{id}} = 0.114P_{\text{max}}^{0.306} \left(\frac{v_0}{v_{\Delta}}\right)^2 \sigma_i \quad (14)$$

式中: v_{Δ} 为突体顶点处的流速; P_{max} 为近壁空泡溃灭

压强; v_d 为突体点处流速。该研究成果为后续进行不平整度控制标准提供了相应依据。

3.2 闸门及门槽

水流流经门槽, 流态复杂, 若出现空化, 会对闸门正常运行造成严重影响。对于门槽的初生空化数, 首先是苏联学者的试验研究, 但其成果提出的公式较复杂, 不便于工程设计人员参考应用。DL 5039—1995《水利水电工程钢闸门设计规范》推荐了 I 型、II 型钢闸门的体型参数和适用范围, 还对应给出了初生空化数的经验公式, 该规范中给出的相关内容对于设计人员应用简单方便。宋昉^[42]研究了门槽空化的相关问题, 指出门槽发生空化现象的部位先后是门槽下游方角、导轨顶面、侧轨顶面、进口墩弧面。他提出影响门槽空化的几何参数宽深比和错距比是最主要的, 该观点与 SL 74—2013《水利水电工程钢闸门设计规范》一致。黄荣彬等^[43]研究了斜交门槽初生空化数, 表明门槽初生空化数随斜角 β 的增大而增大, 同时也随宽深比 (W/D) 的增大而增大。其拟合关系为

$$\sigma_i = 0.0225\beta + 0.4 \frac{W}{D} - 0.31 \quad (15)$$

该研究同时指出, 除了宽深比和错距比以外, 斜坡比及圆角比也很大程度上影响这门槽初生空化。

3.3 孔板及洞塞

孔板和洞塞主要用作高水头大直径泄洪洞内消能, 小浪底水利枢纽中首次成功应用孔板进行消能, 美国 Glen Canyon 坝首先成功采用洞塞消能, 二者的成功消能经验都具有很高的参考价值。但孔板和洞塞消能的同时很容易出现空化空蚀问题。孔板和洞塞的初生空化数计算尤为重要, Ball^[44]将其表示为

$$\sigma_1 = \frac{H_2 - H_v}{H_T - H_2} \quad (16)$$

式中: H_T 为孔板上游总水头; H_2 为在孔板下游选择的参考点压强水头; H_v 为与水温相应的相对饱和蒸汽压强水头。

Tullis^[45]将孔板和洞塞的初生空化数表示为:

$$\sigma_2 = \frac{p_d - p_v}{p_u - p_d} \quad (17)$$

式中: p_u 和 p_d 分别为孔板上游和下游 1 倍管径处的压强; p_v 为与水温相应的饱和蒸气压。

李中义等^[46]认为孔板初生空化数主要取决于孔板的体型, 同一孔径比的孔板, 阻力系数越大, 消能率越高, 孔板后的紊动也越强烈, 因而也就越容易空化。对同一阻力系数的孔板, 孔径比越大, 要求孔口顶部越尖, 也就越容易发生空化。因此, 初生空化数是孔径比和阻力系数的函数。

徐福生等^[47]提出了初生空化数随着孔径比的变化而变化。各级孔板的初生空化与消能率成反比, 设计中要平衡孔板初生空化与消能率之间的关系。

倪汉根^[48]还提出了新的公式:

$$\sigma_i = \frac{2(\bar{p}_1 - p_v)}{\rho \bar{V}_0^2} \quad (18)$$

式中: \bar{p}_1 为孔板上游未扰动流场管道顶部或座部的时均压强; \bar{V}_0 为孔断面的时均流速。几个公式之间是可以相互转换的, 并无本质的区别。

Hamittan^[49]洞塞的初生空化数公式为

$$\sigma_i = (p_2 - p_v) / \left[\frac{\rho v_{pl}^2}{2} + (p_0 - p_2) \right] \quad (19)$$

式中: p_0 为洞塞喉管中部压强; p_2 为洞塞喉管突扩约 $6.5D_i$ 处压强; D_i 为隧洞内直径; v_{pl} 为洞塞过流断面平均流速; A_{pl} 为洞塞中各过流通道的面积之和; A_i 为隧洞过流面积。分析可知洞塞的初生空化数不仅和 A_{pl}/A_i 有关, 还和洞塞中过流通道的布置方式有关。倪汉根等^[1]还对孔板和洞塞的消能方式进行了简单比较, 分析可知孔板的消能效果不如洞塞好。

3.4 有压弯曲管道

在水利工程中, 常采用纵轴弯曲的管道。有位于水平面内的, 也有位于铅直面内的; 断面有圆形的, 也有矩形的; 管道中的水有直接流入大气的, 也有流入尾水渠的。关于有压弯曲管道的初生空化数, 倪汉根等^[1]总结了若干水利枢纽中有压弯曲管道的主要几何特性及相应水流空化数与初生空化数, 各枢纽有压管道的初生空化数大部分在 0.3 ~ 0.65 范围内, 在前人的研究, 总结出有压矩形断面弯管的初生空化数修正公式:

$$\sigma_i = \frac{1}{R_r} + \frac{p'}{v_0^2/(2g)} + \frac{Dg}{v_0^2} \quad (20)$$

式中: R_r 为弯管相对曲率半径; D 为管道直径。该式建立了初生空化数与弯管曲率半径的直接关系, 同时考虑了脉动压力的影响。

倪汉根等^[1]还建立了光滑有压圆形断面弯管中的初生空化数估算式:

$$\sigma_i = \frac{p_0 - p_v}{\rho v^2/2} = k_1 k_2 + \sigma_p \quad (21)$$

式中: p_0 为弯管上游直管段中的时均压强; k_1 、 k_2 分别为离心压强的变化系数与极限系数。但该式估计的结果远低于试验值, 考虑因素不够全面, 还需进一步研究。

Tullis^[45]通过研究, 建议弯度为 90° , 曲率半径为 1.5 的圆形断面弯管初生空化数经验式为

$$\sigma_i = 7.80D^{0.46} \quad (22)$$

该式能较好地估算该种弯管的初生空化数,研究表明圆形断面弯管的初生空化数远高于矩形断面弯管^[50]。

另外关于堰面的初生空化数控制,我国 SL253—2018 和 DL/T 5166—2002《溢洪道设计规范》中均对 WES 实用堰规定了最大负压值,堰面初生空化数的控制准则主要是不平整体,可参照平整凸体初生空化数计算公式。

4 研究展望

长期以来,空化空蚀问题一直威胁着水工建筑物的安全运行,影响着设计人员结构设计的合理性,规范上明确指出对于流速接近 15 m/s 的过水建筑物要慎重选择体型,对于流速超过 20 m/s 的区域要重视,此规定充分说明空化空蚀问题是水电工程中的重要难题,目前针对该问题已有大量研究成果,尤其针对某些具体工程问题,也进行了相应研究。然而,由于水工建筑物各种特有的复杂水流现象基本上都是发生在细观尺度,大多具有微观、瞬时、随机、多相的特性,目前不少相关研究成果还不能令人满意。概括来讲,今后还应进一步加强以下几个方面的研究:

a. 空化空蚀机理的研究还不甚充分,应进一步探索空化空蚀问题的微观动力学机制。根据我国“十三五”水利发展规划预测 2050 年全球水电装机容量将达 20.5 亿 kW,面对目前全球水电工程迅速发展之势,研究复杂多变环境下的水工建筑物不同结构部位的空化空蚀微观机理,从微观角度保障结构安全尤为重要。

b. 应重视水工建筑物水流空化空蚀的合理数值模拟。目前虽然也有较为可靠的空化模型,但是多用于精细网格、模拟时间较短的问题中,如水轮机空化等。对于较大体型的水工建筑物难以实现,其仍然以空化数作为空化判断标准。因此对于空化的数值模拟,应合理选取关键方程及初始条件,实现对水工建筑物各结构空化空蚀问题的合理数值模拟。

c. 重视具体水工建筑物不同结构空化空蚀问题控制标准及相关规范研究。目前 SL 253—2018《溢洪道设计规范》给出了闸墩墩头、闸门槽、堰面局部变坡、泄槽不平整度、挑流鼻坎分流墩、消力池内消力墩规定了部分体型及初生空化数,而 DL/T 5166—2002《溢洪道设计规范》则仅以空化数和流速来规定。鉴于目前水工建筑物结构体型多变,且控制标准较笼统,应具体按照结构部位对已有体型进行相应初生空化数规定。

参考文献:

- [1] 倪汉根,刘亚坤.水工建筑物的空化与空蚀[M].大连:大连理工大学出版社,2011.
- [2] HENRY T F. Cavitation in chutes and spillways[M]. Washington D. C.: United States Department of the Interior, 1990.
- [3] 季斌,程怀玉,黄彪,等.空化水动力学非定常特性研究进展及展望[J].力学进展,2019,49(1):201906. (JI Bin, CHENG Huaiyu, HUANG Biao, et al. Research progresses and prospects of unsteady hydrodynamics characteristics for cavitation[J]. Advances in Mechanics, 2019, 49(1): 201906. (in Chinese))
- [4] 杨庆,张建民,戴光清,等.空化机理和比尺效应综述[J].水利水电科技进展,2004,24(2):59-62. (YANG Qing, ZHANG Jianmin, DAI Guangqing, et al. A review of cavitation mechanism and scale effect[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2004, 24(2): 59-62. (in Chinese))
- [5] 高昂,吴时强,王芳芳,等.朱森林.掺气减蚀技术及掺气设施研究进展[J].水利水电科技进展,2019,39(2):86-94. (GAO Ang, WU Shiqiang, WANG Fangfang, et al. Research progress of aeration cavitation reduction technology and aeration devices[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(2): 86-94. (in Chinese))
- [6] HAMMITT F G. Cavitation and multiphase flow phenomena[M]. New York: McGraw-Hill Book Co., 1980.
- [7] NI Hangen, HUANG Jianbo, XU Fusheng. Estimation of incipient cavitation number by a probability method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1986(10):281-285.
- [8] 杨志明.初生空化与液体抗拉强度的关系[J].水动力学研究与进展: A 辑, 1990, 5(4): 27-34. (YANG Zhimin. Relationship between primary cavitation and tensile strength of liquid [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 1990, 5(4): 27-34. (in Chinese))
- [9] 夏维洪.水质对空化初生的影响[J].水利学报, 1993, 24(11):48-55. (XIA Weihong. Effect of water quality on cavitation inception [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 24(11):48-55. (in Chinese))
- [10] 夏维洪.水质和空化比尺效应[J].水动力学研究与进展: A 辑, 1993, 8(1): 9-16. (XIA Weihong. Water quality and cavitation scale effect[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 1993, 8(1): 9-16. (in Chinese))
- [11] KELLER A P. The effect of flow turbulence on cavitation inception[C]//ASME 2017 Fluids Engineering Division Summer Meeting. Vancouver: ASME, 1997.
- [12] 倪汉根,陈霞.凹槽中的旋涡及初生空化数的估算[J].水利学报, 2000, 15(2): 16-21. (NI Genhan, CHEN Xia. Estimation of vortex and incipient cavitation number in grooves[J]. Journal of Hydrodynamics, 2000, 15(2): 16-

21. (in Chinese))
- [13] 张敬威,张亚磊. 初生空化数公式的优化研究[J]. 吉林水利,2014(5):25-28. (ZHANG Jingwei,ZHANG Yalei. Optimization of the formula of incipient cavitation number [J]. Jilin Water Conservancy, 2014 (5): 25-28. (in Chinese))
- [14] ROGER E A A. Semiempirical analysis of cavitation in the wake of a sharp-edged disk [J]. Journal of fluids engineer, 1976, 98(3):560.
- [15] ROGER E A A, ANDREAS P K. Water quality effects on cavitation inception in a trailing vortex [J]. Journal of Fluids Engineering, 1992, 114: 430-438.
- [16] 黄建波. 一种测量水的抗拉强度的新方法[J]. 水利水运科学研究,1987(2):39-46. (HUANG Jianbo. A new method for measuring tensile strength of water [J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1987 (2):39-46. (in Chinese))
- [17] 黄建波. 初生空化数及空化荷载的预测[D]. 大连:大连工学院,1987.
- [18] ZHANG Dong, LIU Zhiping, JIN Tailai. Cavitation inception witnessed by sound pressure level in model test and prototype observation[J]. Journal of Hydrodynamics, 2004, 16(2):227-232.
- [19] 倪汉根. 孔板泄洪洞初生空化数的估计[J]. 水动力学研究与进展:A辑,1995,10(4):419-428. (Ni Genhan. Estimation of incipient cavitation number of orifice spillway tunnel [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 1995,10(4):419-428. (in Chinese))
- [20] 潘森森,彭晓星. 空化机理[M]. 北京:国防工业出版社,2013.
- [21] 辜晋德,赵建钧,安建峰. 挑流水垫塘掺气比尺效应试验[J]. 水利水电科技进展,2019, 39(2): 61-65. (GU Jinde, ZHAO Jianjun, AN Jianfeng. Experimental study on scale effect of a aerated jet in a plunge pool [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(2): 61-65. (in Chinese))
- [22] KELLER A P, EICKMANN G. Velocity and size scale effects for incipient cavitation of axisymmetric bodies in-water of different quality [R]. San Francisco: American Society of Mechanical Engineers,1989.
- [23] KELLER A P, KUZMAN-ANTON A F. Scaling of cavitation inception in liquids of higher viscosity than water, under consideration of the tensile strength of the liquids [R]. Paris: Societe Hydraulique de France,1992.
- [24] KELLER A P. New scaling laws for hydrodynamic cavitation inception [C]//The 2th International Symposium on Cavitation,Tokyo:[s. n.],1994.
- [25] KELLER A P. The effect of flow turbulence on cavitation inception[C]// ASME 1997 fluid Engineering Division Summer Meeting. Vancouver:[s. n.],1997.
- [26] KELLER A P. Cavitation scaling effects; empiricall found relations and the correlation of cavitation number and hydrodynamic coefficients [R]. 4th International Symposium on Cavitation. Pasadena:[s. n.],2001.
- [27] KELLER A P, PAN S S, YANG Z M. Comparison tests for checking relations for cavitation scale effect [R]. Honolulu:[s. n.],2003.
- [28] KELLER A P, HUBERT K R, Scale effects on tip vortex cavitation inception [C]//1999 ASME/JSME Fluid Engineering Symposium on Cavitation Inception. San Francisco:[s. n.],1999.
- [29] 任静,常近时. 大型水力机组中空化现象的比尺效应[J]. 水利水电技术,1998(4):22-25. (REN Jing, CHANG Jinshi. Scale effect of cavitation in large hydraulic units [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,1998(4):22-25. (in Chinese))
- [30] 倪汉根. 初生空化数比尺效应的修正[J]. 水利学报,1999,14(9):28-32. (NI Hangen. Correction of scale effect of incipient cavitation number [J]. Journal of Hydrodynamics, 1999,14(9):28-32. (in Chinese))
- [31] 夏维洪. “国际水工建筑物及水力机械空化、空蚀学术讨论会”论文内容综述[J]. 水利水电科技进展,1992, 12(4):54-61. (XIA Weihong. A summary of the papers of “international Symposium on cavitation and cavitation of hydraulic structures and hydraulic machinery” [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1992,12(4):54-61. (in Chinese))
- [32] COLGATE D. Cavitation damage of roughness concrete surface[J]. Journal of the Hydraulics Division,1959,86(11):1-10.
- [33] NUMACHI F, OBA R, CHIDA I. Effect of surface roughness on cavitation performance of hydrofoils; report 1 [J]. Journal of Basic Engineering,1965,87(2):493-503.
- [34] ARNDT R E A, IPPEN A T. Cavitation near surface of distributed roughness[R]. Boston :MIT. Hydrodynamics Laboratory,1967.
- [35] ARNDT R E A, IPPEN A T. Rough surface effects on cavitation inception [J]. Journal of Basic Engineering, 1968, 90(3):249-261.
- [36] HOLL J W. The inception of cavitation on isolated surface irregularities[J]. Journal of Basic Engineering,1960,82(2):169-183.
- [37] BORDEN A. Prediction of cavitation inception speed on rough hydrodynamic bodies[J]. The 6th Symposium on Naval Hydrodynamics. Washington D. C.:[s. n.],1966.
- [38] ARNDT R E A, HOLL J W, BOHN J C, et al. Influence of surface irregularities on cavitation performance [J]. Journal of Ship Research,1979,23(3):157-170.
- [39] HOLL J W, BILLET M L, TADA M, et al. The influence of pres-sure gradient on desinent cavitation from isolated surface protrusions [C]// International Symposium on Cavitation Inception. [S. I.]:IEEE,1984:55-67.
- [40] 周胜,孙晓霞,高需生. 管道中圆化突体的压力分布和初生空化数[J]. 水利学报,1984(6):36-45. (ZHOU

- Sheng, SUN Xiaoxia, GAO Peishen. Pressure distribution and initial cavitation number of a circular bulge in a pipeline[J]. Journal of Hydrodynamics, 1984(6):36-45. (in Chinese))
- [41] 梁川,倪汉根. 三角形突体初生空化与空蚀的试验研究[J]. 成都科技大学学报, 1996(2):32-40. (LIANG Chuan, NI Hangen. Experimental study on primary cavitation and cavitation erosion of triangular protuberances[J]. Journal of Chengdu University of Science and Technology, 1996(2):32-40. (in Chinese))
- [42] 宋昉. 门槽空化若干问题[C]//国际水利工程与研究协会中国分会,中国水利学会水力学专业委员会,中国水力发电工程学会水工水力学专业委员会. 第三届全国水力学与水利信息学大会论文集. 北京:中国水利学会, 2007:7.
- [43] 黄荣彬,杨纪元,刘长庚. 泄水孔斜交门槽的压力特性和空化特性[J]. 水力发电, 1997(4):45-47. (HUANG Rongbin, YANG Jiyuan, LIU Changgen. Pressure and cavitation characteristics of inclined gate slot with discharge hole[J]. Water Power, 1997(4):45-47. (in Chinese))
- [44] BALL J W. Sudden enlargements in Pipelines [J]. Journal of the Power Division, 1962, 88(4):15-27.
- [45] TULLIS J P. Rangachari covindaragian [J]. Cavitation and Size Effects for Orifices, 1973, 99(2):417-430.
- [46] 李中义,陈霞,陈美法. 多级孔板的若干空化特性[C]//徐秉衡. 泄水工程与高速水流论文集. 成都:成都科技大学出版社, 1994:80-89.
- [47] 徐福生,于明祥,刘树军. 多级孔板空化与脉动壁压特性[J]. 水动力学研究与进展:A辑, 1988, 3(3):68-76. (XU Fushen, YU Mingxiang, LIU Shujun. Cavitation and fluctuating wall pressure characteristics of multistage orifice plate [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 1988, 3(3):68-76. (in Chinese))
- [48] 倪汉根. 孔板泄洪洞初生空化数的估计[J]. 水动力学研究与进展:A辑, 1995, 10(4):419-428. (NI Hangen. Estimation of incipient cavitation number of orifice spillway tunnel [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 1995, 10(4):419-428. (in Chinese))
- [49] HAMITTAN W S. Preventing cavitation damage to hydraulic structures [J]. Water Power & Dam Construction, 1983(12):48-50.
- [50] 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, 19(4):36-40. (HU Minglong. Experimental study on cavitation characteristics in pressure gradient zone [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1996, 19(4):36-40. (in Chinese))

(收稿日期:2019-11-07 编辑:郑孝宇)

(上接第 86 页)

- [55] 安智敏,岑国平,吴彰春. 雨水口泄水量的试验研究[J]. 中国给水排水, 1995(1):21-24. (AN Zhimin, CEN Guoping, WU Zhangchun. Experiment on discharge for inlets[J]. China Water & Wastewater, 1995(1):21-24. (in Chinese))
- [56] 胡维芬. 城市道路排水设施水力特性研究[D]. 天津:天津大学, 2009.
- [57] 吴鹏,杨敏,何京莲,等. 雨水口算子的孔口流量系数试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(6):65-68. (WU Peng, YANG Min, HE Jinglian, et al. Experiment on discharge coefficients for orifices of gutter grates[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2014, 12(6):65-68. (in Chinese))
- [58] 陈倩,夏军强,董柏良. 城市洪涝中雨水口泄流能力的试验研究[J]. 水科学进展, 2020, 31(1):10-17. (CHEN Qian, XIA Junqiang, DONG Boliang. Experimental study on discharge capacity of street inlet in urban flooding[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(1):10-17. (in Chinese))
- [59] RUBINATO M, MARTINS R, KESSERWANI G, et al. Experimental calibration and validation of sewer/surface flow exchange equations in steady and unsteady flow conditions [J]. Journal of Hydrology, 2017, 552(4):21-32.
- [60] LEANDRO J, CARVALHO R, MARTINS R. Experimental scaled-model as a benchmark for validation of urban flood models [J]. Novatech, 2010, 15:1-8.
- [61] LEE S, NAKAGAWA H, KAWAIKE K, et al. Study on inlet discharge coefficient through the different shapes of storm drains for urban inundation analysis [J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers, 2012, 68(4):31-36.
- [62] VALENTÍN M G, MACCHIONE F, RUSSO B. Comportamiento hidráulico de las calles durante lluvias extremas en zonas urbanas [J]. Tecnología y Ciencias del Agua, 2009, 24(3):51-62. (in French)
- [63] 赵江,张林洪,吴培关,等. 公路雨水口篦子泄水量试验研究[J]. 城市道桥与防洪, 2004(4):67-70. (ZHAO Jiang, ZHANG Linhong, WU Peiguan, et al. Experimental study on the drain discharge of road storm drain[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2004(4):67-70. (in Chinese))
- [64] BAZIN P H, NAKAGAWA H, KAWAIKE K, et al. Modeling flow exchanges between a street and an underground drainage pipe during urban floods [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 140(10):1-8.
- [65] FRAGA I, CEA L, PUERTAS J. Validation of a 1D-2D dual drainage model under unsteady part-full and surcharged sewer conditions [J]. Urban Water Journal, 2017, 14(1):74-84.

(收稿日期:2020-08-26 编辑:雷燕)