

空化机理和比尺效应综述

杨庆, 张建民, 戴光清, 王海云, 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:对空化的形成机理、液体气核存在机理、空化发生的判别指标等进行了总结回顾, 综合分析了液体粘性、表面张力、气核含量和压强分布等因素对空化初生的影响, 对空化试验中存在的比尺效应, 介绍了相关比尺效应的经验公式及应遵循的模型比尺, 指出空化机理和比尺效应的研究还有待进一步深入。

关键词:空化; 比尺效应; 初生空化数

中图分类号:TV131.3+2

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2004)02-0059-04

从自19世纪后半叶在螺旋桨叶片上发现空化(cavitation)现象以来, 空化现象的理论已经有了很大的发展, 并且空化现象所涉及的领域也越来越多, 但到目前为止对空化的机理仍需进一步研究。随着对水力资源的进一步开发, 一些巨型电站陆续出现, 如溪洛渡、向家坝、乌东德、虎跳峡等。由高坝导致的高速水流容易发生空化, 空化所引起的空蚀破坏会严重影响系统的正常运行, 甚至造成重大的灾难性工程事故, 如不及时采取措施, 将造成无法估量的损失。为了采取有效的防范措施, 必须对空化进行全面深入的研究。

1 空化形成机理

空化是由于液流系统中的局部低压(低于相应温度下该液体的饱和蒸气压)使液体蒸发而引起的微气泡(或称气核)爆发性生长现象^[1]。通常见到的液体都不是纯液体, 里面含有许多微粒杂质。这种微气泡的半径一般在20 μm以下, 叫做气核或空化核^[2]。假如一个球状泡悬浮于液体中, 则泡内外压强的平衡关系为

$$p = p_b - \frac{2\sigma}{R} \quad (1)$$

式中: p_b , p 分别为泡内、外压强; R 为泡半径, σ 为表面张力系数。

由于空泡中的气体是由没有溶解的可溶解气体或水蒸气组成, 显然大的气核受浮力的作用将逐渐上升到水面而溃灭。若气核的内部含有不可溶解的

气体, 那么当气核半径小到一定程度时, 靠液体分子的布朗运动可以维持稳定悬浮。由于泡内的气体溶解需要较长时间, 因此对于短暂的历时, 可以认为气核内的气体是不可溶解的。当气核半径 R_0 很小时, 由液体表面张力引起的附加压力 $2\sigma/R_0$ 较大, 于是核内气体压强将高于泡壁处的流体压强, 核内的气体慢慢通过泡壁扩散而逐渐溶解, 最后气核消失。从以上分析可以得到如下结论: 大气核因浮力作用上升至水面而逸出, 小气核则由于气体的不断溶解而溃灭, 称为气核悖论。但实际上, 却观察到液体中气核的持久悬浮。

1944年, Harvey提出了稳定的气泡核子机理假说: 未溶解的气核可存在于憎水性的固体缝隙中, 因为在这样的情况下, 表面张力将起着减小而不是增加压力的作用, 因而气体并不是被强迫溶解, 而仍可能保持气相。

1954年, 福克斯等提出, 微小气核之所以不会溶解, 是因为气核被有机薄膜所包围。

高秋生^[3]应用热力学原理, 对气泡核子作了进一步探讨, 并得出在平面平衡条件下, 液体内部不可能稳定地存在纯蒸气泡, 在亲水性裂隙中气核是不可能稳定存在的, 而在憎水性裂隙中气核是可以稳定存在的。近30年来测核技术有了较大的发展, 各种测核方法也随之出现, 如超声波法、激光散射法^[4]和水动力学法等, 各种测量方法均证实了气核的存在。

F.R. Gilmore引用Kirwood-Bethe假设, 引入了粘性可压缩性流体后对空泡运动方程进行了修正, 建

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50209010)

作者简介: 杨庆(1976—), 男, 重庆人, 博士研究生, 主要从事工程水力学及水利工程研究。

立了泡壁运动的 Gilmore 方程.倪汉根^[2]、刘小兵和程良骏^[5]等对前人的工作进行了总结,在假定流场为稀疏空泡流场,忽略固壁对空泡的影响,空泡运动过程中保持球形和恒温的基础上,从理论上较全面地分析了空泡在任意流场中的受力和影响因素,建立了空泡在任意流场中运动的三维控制微分方程.

2 空化初生

当流速不变而压强降低(或压强不变流速增加)时,流场内极小区域内偶然初次出现微小空穴的临界状态称为空化初生.影响空化发生的因素主要是压强和流速.空化初生的经典理论把液体的饱和蒸气压视作液体发生空化的临界压强,定义了下面的空化数表达式:

$$\sigma = \frac{p_{\infty} - p_v}{\frac{1}{2} \rho v_{\infty}^2} \quad (2)$$

式中: p_{∞} 和 v_{∞} 为流动系统中某一选定点的绝对压强和流速; p_v 为某一温度下的饱和蒸气压; ρ 为液体密度.

理论物理学家计算纯水的抗拉强度可达 200 MPa,认为在纯水中发生空化是不可能的,但水中含有杂质和气核后,水的抗拉强度大大降低,故 Keller^[6]、杨志明^[7]、夏维洪^[8]等用临界压强来代替饱和蒸气压定义了空化数:

$$\sigma = \frac{p_{\infty} - (p_v - p_t)}{\frac{1}{2} \rho v_{\infty}^2} \quad (3)$$

式中 p_t 为液体抗拉强度.

由于实际工程应用中,初生空化数的离散度较大,出于工程安全考虑的需要,通常采用消失空化数来描述空化的产生.消失空化数是流场中出现初生空化以后,进一步降低压强或提高流速使流场中出现比较严重的空化状态,然后逐步提高压强或降低速度,在空化区的范围逐渐缩小至压力最低点附近,间歇性空泡趋于消失时的空化数.消失空化数一般要大于初生空化数.判断空化初生的方法主要是目测法和噪声法.

3 影响空化初生的因素

从空化产生的条件可知,影响水中空化产生与发展的主要因素是绝对压强及与压强相关的流速,此外,液体粘性、表面张力、气核、边壁表面条件和所受的压力梯度等有一定影响.

a. 液体粘性.液体粘性的影响^[9]实际上是雷诺数的影响.粘性或雷诺数影响边界层的分离,因而影响壁面上最小压力点的位置,即影响空化初生的位

置.黄继汤等^[1]的实验结果与理论计算均表明液体粘性使空泡压缩和膨胀过程都明显变缓.

b. 表面张力.根据空泡动力学方程可知,表面张力使空泡溃灭时的速度增大,使空泡的振荡周期缩短、振荡幅值减小.

c. 气核.水中含有的大量气核使得水的抗拉强度大大降低,空化初生对气核的分布非常敏感.真正参与空化的气核是那些微气泡,对泡状空泡而言,气核数目的增加导致空化状态的进一步发展^[10],从而引起水力机械的水动力和噪声水平的显著变化并在一定的气核密度条件下发生气核的饱和现象.气核状态对泡状空泡和稍涡空泡初生空化数有较大影响;对片空泡的初生空化数几乎没有影响.

d. 边壁表面条件.壁面粗糙度对空化初生和发展有重要影响.一般来说,粗糙壁面要比光滑壁面上空化初生偏早,这是因为在粗糙凸起后面的流动易发生分离,从而使负压脉动增加,导致空化初生偏早.但 Nie Ment-Xi^[11]认为,粗糙的表面可以减少糙化断面下游的压力降,从而降低空化发生,减小空蚀破坏的可能性.在具体工程中,在溢流坝下游反弧面上加糙,可降低反弧段下游切点的空蚀破坏程度.壁面的浸润性对空化初生也有影响,这是由于疏水材料的初生空化主要是表面气核的作用,而亲水材料的空化初生是流动气核起主要作用.

e. 压力梯度.空化现象是由于压强低而产生的,所以压强分布直接影响空化初生.有的学者认为物体壁面上的逆向压强梯度很大时,气核易稳定在物体表面上成为表面气核;而当物体壁面上的逆向压强梯度小时,气核不易稳定在边壁上的裂隙内,这时流动气核对空化起主要作用.胡明龙^[12]对溢流坝下游反弧段进行空化特性研究,得出反弧段下切点与水平段联结处,局部绕流速度增大,压力大幅降落,水流紊动加剧,边界层中心附近紊流强度和切应力均达最大,空化数最小使得易发生空化.研究表明,只要流场中某点的总压强(时均压强与脉动压强之和)低于流体的临界压强,就会发生空化,而且当水流压力呈现周期脉动时,会使气核增长,这种生长机理与周期性脉动引起气核半径的非线性效应有关.因为随脉动压力周期性变化,气核中空气浓度也在不断变化.袁新明等^[13]得出脉动压力对不平整突体的空化初生影响显著.试验资料^[13]表明,非流线型突体空化初生时的脉动压力强度可达 13%,圆化升坎空化初生时的脉动压力强度可达 2%.水流压强梯度对不平整突体的空化初生和脉动压力及边界层的发展都有不同程度的影响,在较大负压力梯度状况下,边界层的发展受到抑制和压力沿程降低,在

这种状况下易产生空化.同一突体在负压力梯度状况下的初生空化数高于正压力梯度状况下的初生空化数.胡明龙^[14]也同样得出在水流强烈的紊动下,由于压力脉动的影响,气核交替地膨胀和收缩,脉动负峰值可使瞬时压力降低,气核发育时间明显缩短,促使空化提前发生,初生空化数与压力脉动强度呈直线关系.

f. 高分子聚合物. Van der Meulen^①试验结果表明,高分子聚合物使不锈钢模型的初生空化数减小了约 30%.他分析是聚合物对边界层流态的影响,抑制了边界层中的脉动现象,从而导致初生空化数明显减小.

g. 热力学.文献[15,16]从非平衡态热力学理论出发,建立了有相变发生时球形气核与周围液体之间能量流和物质流的方程式.在此基础上,确定了自由气核空化初生的条件,得出判断是否满足空化初生的条件不能以系统压力 p_∞ 为标准,而应以气核壁面的液体压力 p (实际上主要是气核内压力 p_i) 为指标.

4 比尺效应修正

由于影响空化初生的因素众多,目前对空化的研究主要采用物理模型试验.由于模型与原型之间存在着明显的比尺效应,因此把模型上测定的初生空化数直接作为原型的初生空化数是不安全的,模型越小越不安全.为了较好地预报原型的初生空化数,必须对模型测定的初生空化数进行比尺效应的修正.

Keller^②根据六种旋转对称试件得出空化速度比尺效应的经验公式为

$$\sigma = \sigma_0 \left[1 + \left(\frac{V_\infty}{V_{rel}} \right)^2 \right] \quad (4)$$

式中: σ_0 为基准空化数,与试件的体型、尺寸等特性有关; V_{rel} 为相对速度,所有试件均取 12.7 m/s,为由势流速度增大与紊流压力波动而引起的两部分压力降相等时的速度值,故此值与来流紊动度有关.

以空化数基准值 σ_0 的变化表示试件尺寸的比尺效应:

$$\sigma_{02} = \sigma_{01} + \Delta\sigma_0 \cdot \log_2 \left(\frac{d_2}{d_1} \right) \quad (5)$$

式中: σ_{01}, σ_{02} 为试件 1 和试件 2 的基准值; $\Delta\sigma_0$ 为试件尺寸加倍时基准值的生长系数; d_1, d_2 为试件 1 和试件 2 的特征长度值.

McCormick^[17]在假设涡流初生空化数与水翼受压面上边界层密度成正比的条件下,据此提出了空化数与雷诺数 Re 关系物理模型思路,其假设归纳为

$$\sigma_i = K_1 \alpha^n Re^m \quad (6)$$

式中: K_1 为常数; α 为冲角(弧度);指数 n 和 m 依据经验确定,McCormick 提出 $n = 1.4, m = 0.4$.

倪汉根^[18,19]由空泡动力学方程出发,忽略泡壁温度变化等因素得出原型的初生空化数 σ_i 由式(7)表示:

$$\sigma_{i,P} = \sigma_{i,M} + \frac{1}{v_{\infty,M}^2} \left[30.62 \left(1 - \frac{1}{\lambda_L} \right) - 17.65 \left(\frac{R_0}{R_i} \right)_M^2 \right] \quad (7)$$

其中 $\lambda_L = \frac{L_P}{L_M}$

式中: v_0 为适当选定的参考点的断面平均速度; R_0, R_i 分别为初始气泡半径和临界半径;下标 P 为原型, M 为模型.

除上述的比尺修正外,夏维洪^[20]、任静^[21]等分别针对某一具体的试件建立了不同的空化比尺修正公式.

式(4)和式(5)为纯经验推导的比尺关系式,是无量纲的,式中流速比尺效应引用了一个经验参数,与试件形式、试验方法和试验条件有关.经验计算仅仅是给出一个数值,而一旦试验装置和测试条件不同,就会产生偏差. McCormick 式综合考虑了冲角与 Re 之间的关系,但式中 a 的指数 $n = 1.4, Re$ 的指数 $m = 0.4$ 还有待进一步研究.根据 K_1 值的特性,曾有学者建议 $n = 2.0, m = 0.5$. 式(7)对空泡动力方程进行简化并作了一些假定,认为原、模型的压强系数相等,实际上,初生空化状态与最小瞬时压强有关,而往往模型最小压强系数大于原型最小压强系数,此外式(7)也没有反映水中溶解气体扩散对初生空化的影响,对于气泡临界半径的取值也需做进一步的研究.以上的各个修正公式都有一定的局限或假设,为了进一步探索空化比尺效应还需进行大量深入的研究,例如气核半径、含气量和水流脉动的比尺效应对空化比尺效应的影响.

5 结 语

从国内外的研究情况可以看出,对空化机理及其影响因素的认识和研究已取得了很大进展,但由

① Van der Meulen J H J. Cavitation suppression by polymer injection. ASME Cavitation and Polyphase Flow Forum, 1973.

② Keller A P, Hubert K R. Scale effects on tip vortex cavitation inception. 1999 ASME/JSME Fluids Engineering Symposium on Cavitation Inception, San Francisco, July, 1999: 452 ~ 468.

于空化是微观、瞬时、随机、多相的复杂现象,到目前为止,有关空化的理论及不少研究成果还不能令人满意,许多问题还待进一步深入研究和探索。

参考文献:

[1] 黄继汤.空化与空蚀的原理及应用[M].北京:清华大学出版社,1991.1~15.
[2] 倪汉根.气核-空化-空蚀[M].成都:成都科技大学出版社,1993.12~44.
[3] 高秋生.对液体空化机理的进一步探讨[J].河海大学学报(自然科学版),1999,27(5):63~67.
[4] Oba R, Yasu S. Spatial cavitation-nuclei measurement by means of laser velocimeter[J]. Rep Inst High Speed Mech, 1978, 310 (38):47~54.
[5] 刘小兵,程良骏.空泡在任意流场中的运动研究[J].水动力学研究与进展,1994,9(2):150~162.
[6] Keller A.空化现象及其模型试验预测的可靠性[J].水电站设计,1994,10(4):89~94.
[7] 杨志明.初生空化的对比试验——中德合作研究项目[J].水动力学研究与进展,1994,7(2):96~103.
[8] 夏维洪.液体抗拉强度与空化比尺效应[J].水动力学研究与进展,2001,16(3):366~373.
[9] 夏维洪.水质对空化初生的影响[J].水利学报,1993 (11):48~54.
[10] 颜开.气核对空化的影响——法国的研究进展[J].船舶

力学,1998,2(2):70~75.
[11] Nie Ment-Xi. Cavitation prevention with roughened surface [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 87(9):532~536.
[12] 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.
[13] 袁新明,郑国华.脉动压力及压力梯度对不平整突体空化初生的影响[J].水动力学研究与进展,1990,5(1):47~52.
[14] 胡明龙.紊动剪切流中气核振荡对空化的作用[J].水动力学研究与进展,1994,9(2):182~189.
[15] 何国庚,罗军,黄素逸.空化初生的热力学影响研究[J].华中理工大学学报,1999,27(1):66~68.
[16] 应崇福,安宇.声空化气泡内部的高温和高压分布[J].中国科学(Series A),2002,32(4):305~313.
[17] McCormick B W. On cavitation produced by a vortex trailing from a lifting surface[J]. Basic Eng, 1962, 84(3):567~574.
[18] 倪汉根.初生空化数比尺效应的修正[J].水利学报,1999(9):28~32.
[19] 倪汉根.泄水工程水力学[M].长春:吉林科学技术出版社,2002.129~140.
[20] 夏维洪.初生空化的模型数据应用到原型上的问题[J].水利水运科学研究,1993(4):371~379.
[21] 任静.大型水力机组中空化现象的比尺效应[J].水利水电技术,1998,29(4):22~25.

(收稿日期:2003-09-10 编辑:熊水斌)

(上接第38页)

由图2可见,随着选用的折现率不同, NPV 小于零的概率会不断变化,随折现率增加, NPV 小于零的概率快速增加,在折现率为0.20时, NPV 小于零的概率接近1,表明该项目实现资本回报率为0.20的可能性几乎为零.在选定的一组参数下,本文分析的特许权项目的资本回报率在0.10与0.20间,回报率小于0.10的概率不到10%,低于0.06的概率更小。

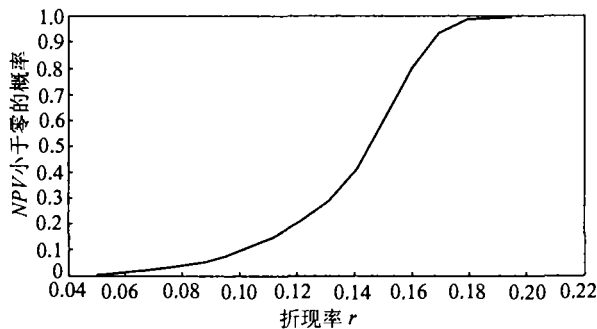


图2 折现率与 NPV 小于零的概率关系

4 结 语

实际进行特许权合约分析时,对于设定的允许的资本回报率,可以改变特许权合约的其它参数,如特许权期限、允许较高的债务比例,还可以改变产品价

格,甚至必要时由政府提供收益担保,比如当实际出现的需求量低于某个水平时,由政府的企业(自来水公司)弥补实际需求与担保水平间产生的收入差额.通过调整后的特许权合约条件,重新进行 NPV 概率分布的模拟分析,直到以投资回报率作为折现率时的 NPV 小于零的概率满足合约双方的要求为止.当政府准备采用浮动式回报率特许权合约时,政府也可以根据对回报率的风险分析来设定回报率的合理浮动范围,限定投资者的风险和超额收益。

参考文献:

[1] 武志,韩枫.对 BOT 融资中投资回报率的分析[J].山东经济,1999,90(1):53~54.
[2] 任宏,张国敏,竹隔生.风险分析在建设项目财务评价中的应用[J].重庆建筑大学学报,2000,22(2):20~24.
[3] 张国敏,任宏,竹隔生.模拟法在建设项目财务评价中的运用[J].重庆建筑大学学报,2000,22(3):39~45.
[4] 肖林,王海成,王方华,等.项目融资特许经营权价值风险[J].上海交通大学学报,2003,37(4):617~619.
[5] (英)弗兰根.工程建设风险管理[M].李世容译.北京:中国建筑工业出版社,2000.50~55.
[6] 扈文秀.用蒙特卡罗模拟法进行项目概率分析及微机实现[J].西安理工大学学报,1995(1):64~79.

(收稿日期:2003-12-16 编辑:熊水斌)