

水工建筑物的空化与空蚀

CAVITATION AND CAVITATION DAMAGE OF
HYDRAULIC STRUCTURES

倪汉根 刘亚坤 著



大连理工大学出版社

DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

九江学院图书馆



1823600

1530537

水工建筑物的空化与空蚀

CAVITATION AND CAVITATION DAMAGE OF
HYDRAULIC STRUCTURES

倪汉根 刘亚坤 著

不外借

九江学院图书馆
藏书章

TV6/
243



大连理工大学出版社
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

1230233

图书在版编目(CIP)数据

水工建筑物的空化与空蚀 / 倪汉根, 刘亚坤著. —
大连 : 大连理工大学出版社, 2011. 12

ISBN 978-7-5611-6627-7

I. ①水… II. ①倪… ②刘… III. ①水工建筑物—
空化②水工建筑物—空蚀 IV. ①TV6②TV131.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 238217 号



大连理工大学出版社出版

地址: 大连市软件园路 80 号 邮政编码: 116023

发行: 0411-84708842 邮购: 0411-84703636 传真: 0411-84701466

E-mail: dutp@dutp.cn URL: <http://www.dutp.cn>

大连美跃彩色印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸: 170mm×240mm	印张: 22.5	字数: 416 千字
2011 年 12 月第 1 版	2011 年 12 月第 1 次印刷	

责任编辑: 于建辉

责任校对: 李云霄

封面设计: 宋明亮

ISBN 978-7-5611-6627-7

定 价: 58.00 元

大连理工大学出版社
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS



前 言

国内外关于空化空蚀的专著已有不少。国外,如美国 Knapp, Daily, Hammit 合著的《Cavitation》(1970)中译本《空化与空蚀》(1981,水利水电科学研究院译),Hammit 著的《Cavitation and Multiphase Flow Phenomena》(1980),苏联 Перник 著的《Проблемы кавитации》(1966)、Певковский 著的《Структура кавитационных течений》(1978);国内,如黄继汤教授编著的《空化与空蚀的原理及应用》(1991)及本书第一作者著的《气核—空化—空蚀》(1993)。上述专著都以阐述空化空蚀的原理为主,有的虽亦包含水工建筑物的空化与空蚀,但篇幅不多。苏联 Гальперин 著的《Кавитация на гидросооружениях》(1977)是关于水工建筑物空化空蚀的专著,类似的专著并不多。

人类发现空化、空蚀已有一百多年的历史,但是国内外水工建筑物的空蚀现象仍时有发生。这主要归结于两个原因:一是坝越来越高,通过泄水建筑物的流速越来越大,原有的防空蚀经验不够用;二是对空化空蚀还缺乏足够准确的认识和预报手段。

以前,或者误认为空化必然空蚀,或者从安全角度考虑,规定泄水建筑物必须按无空化标准设计。这样规定有下面两个问题:

第一,能不能做到?事实表明没有做到。假如按无空化标准设计的泄水建筑物真的没有空化发生,为什么世界上还有那么多水工建筑物发生空蚀呢?所谓按无空化标准设计,就是要求泄水系统运行时的水流最小空化数必须高于相应的系统初生空化数。为此,对比较重要的泄水建筑物都做专门测定初生空化数的模型试验。但是,由于对初生空化数的比尺效应认识不够,常误认为水工模型试验测得的初生空化数就是原型的初生空化数。而实际情况是原型的初生空化数都高于模型的初生空化数。当流场中有大分离区时,原型的初生空化数远高于小比尺模型测定的初生空化数。因此,按无空化原则设计的泄流系统的水流空化数虽高于水工模型中测定的初生空化数,但却低于原型的实际初生空化数,空化仍然发生,在一定条件下形成空蚀。现在,大多数有关专业人员都已认识到初生空化数存在比尺效应,而且也有了可操作的比尺效应修正方法的建议。所以,以前没有真正实现的无空化设计以后有可能做到。

第二,有没有必要?葛·阿·伏拉比约夫在其所著的《水工建筑物的空蚀防

护》一书的绪言中说:“严格遵循无空化条件会恶化泄水建筑物的经济指标,以致不得不增加其单个部件尺寸和外形复杂化,并对施工工艺的要求变得更加严格。”因此,无空化设计虽有可能,但无空化的要求在工程实践中常常是不经济的。于是,无空化设计的观念正在逐渐演变成如下的观念:“水工建筑物的空化问题不应该看作确保不产生空化的问题,而应当作为在可能产生空化时保证结构能可靠工作的问题。视具体情况,可将空化的可靠度理解为无空化的概率,或无空蚀的概率,或已知前后相邻的两次检修的间隔期不超出允许极限空蚀指数的概率。”其实,这个观念由来已久,关键在于如何在实际工作中把它变成可操作的具体设计方法。

近20年来,国内外在初生空化数的比尺效应、空泡在固壁附近的溃灭压强、固壁材料(尤其是混凝土类材料)的空蚀强度、各种添加剂对混凝土空蚀强度的影响、掺气减蚀效应、空蚀的原型观测等方面都取得了大量研究结果,这些成果有助于推进防空蚀设计。为了进一步发挥这些研究成果的作用,有必要对它们进行分析整理,这就是我们编写本书的初衷。

本书分10章:第1章,泡动力学基础;第2章,空化;第3章,空化噪声;第4章,空蚀;第5章,过流表面不平整引起的空化与空蚀;第6章,坝身泄水孔进口及闸槽的空化特性;第7章,孔板与洞塞的空化特性;第8章,有压弯曲管道和岔管的空化空蚀特性;第9章,其他水工建筑物的空化空蚀特性;第10章,掺气减蚀。前4章用相对简短的篇幅阐明空化和空蚀的力学机制,内容基本取自《气核—空化—空蚀》一书(倪汉根著,成都科技大学出版社,1993)及《空化与空蚀》(倪汉根著,泄水工程水力学,吉林科学技术出版社,2002);第5~9章叙述了具体水工建筑物的空化与空蚀特性;第10章说明了掺气减蚀的原理及其工程措施。后6章基本上涵盖了国内外关于水工建筑物空化空蚀的最新研究结果。

硕士研究生杨涛、孙韵、黄伟、于野、张帝为本书的整理出版付出了辛勤劳动,在此,谨向他们表示衷心的感谢。

倪汉根 刘亚坤

2011年4月1日

目 录

第 1 章 泡动力学基础	1
1.1 水中的气核分布	1
1.1.1 气核半径 R 的实测分布函数	1
1.1.2 气核半径密度函数的经验表达式	2
1.2 球泡的静平衡方程与稳定性条件	3
1.2.1 泡内只含蒸汽	3
1.2.2 泡内只含不溶解气体	4
1.2.3 泡内同时含有蒸汽和不溶解气体	5
1.3 球泡运动的动力方程	7
1.3.1 球泡在静止液体中运动时的动力方程	7
1.3.2 球泡在流场中运动时的动力方程	9
1.4 球状汽泡在静止液体中的生长和溃灭	11
1.4.1 球状汽泡的生长	11
1.4.2 球状汽泡的溃灭	13
1.5 静水中一般球泡及气泡的生长和溃灭	17
1.5.1 运动方程和运动特性	17
1.5.2 泡的振荡频率与振幅	18
1.5.3 泡壁的最大溃灭速度与流场压强	20
1.6 液体中溶解气体的扩散与气核在流场中运动的简化算例	21
1.6.1 液体中溶解气体向泡内扩散量的估计	21
1.6.2 气核在流场中运动的简化算例	21
1.7 一个值得研究的问题	23
1.8 计及相对平移时非球形泡的运动特性	25
1.8.1 坐标系与广义坐标	26
1.8.2 流场的诱生速度势 Φ	26
1.8.3 诱生流场的动能 T	27
1.8.4 广义力向量 Q	28
1.8.5 计及相对平移时非球形泡的运动方程	29
1.8.6 数值算例	29

1.9 近壁泡的溃灭特性	31
1.9.1 近壁泡溃灭过程的基本特征	32
1.9.2 参数对溃灭时间的影响	35
1.9.3 β 与泡心位移的关系	36
1.9.4 β 与微射流特性的关系	38
1.9.5 β 与 $p_{1\max}$ 和 $p_{2\max}$ 的关系	39
参考文献	42
第2章 空化	44
2.1 空化与空化数	44
2.1.1 空化	44
2.1.2 空化数	45
2.2 初生空化数及其测定方法	46
2.2.1 初生空化数的定义	46
2.2.2 初生空化数的测定方法	47
2.2.3 初生空化数与消失空化数	48
2.3 初生空化数的比尺效应	49
2.3.1 从 Rayleigh-Plesset 方程考察初生空化数的比尺效应	50
2.3.2 含气量对初生空化数的影响	51
2.3.3 流速对初生空化数的影响	53
2.3.4 尺度对初生空化数的影响	55
2.3.5 表面张力、黏性对初生空化数的影响	56
2.3.6 水流挟沙对初生空化数的影响	57
2.4 减压相似模型试验初生空化数比尺效应的修正	67
2.4.1 流场有大分离区	67
2.4.2 流场无大分离区	69
2.5 其他几种特征空化数	71
2.5.1 临界空化数	71
2.5.2 初蚀空化数	71
2.5.3 阻塞空化数	72
2.5.4 特征空化数的相对关系	72
2.6 初生空化数的概率估计	73
2.6.1 初生空化数的数学力学定义	73
2.6.2 初生空化数理论预测的步骤	75
2.6.3 弓形凸体初生空化数的计算和实测结果	78
参考文献	82

第3章 空化噪声	84
3.1 空化噪声的基本参数、基本特性与声压的控制方程	84
3.1.1 空化噪声的基本参数	84
3.1.2 声波在两种不同介质面上的折射与反射	86
3.1.3 声波在水中传播时的声压控制方程	88
3.2 单空泡噪声频谱	89
3.3 原、模型中空化噪声的关系	93
3.4 用噪声谱判定初生空化数	98
3.4.1 用空化数与噪声强度或噪声脉冲数的关系判定初生空化数	98
3.4.2 用背景噪声谱比较判定初生空化数	99
参考文献	103
第4章 空 蚀	105
4.1 空蚀率	105
4.1.1 常用的空蚀率指标及其测定装置	105
4.1.2 空蚀率和试验时间的关系曲线	106
4.2 试验参数对空蚀率的影响	109
4.2.1 速度效应	110
4.2.2 压强效应	114
4.2.3 尺寸效应	116
4.2.4 温度效应	118
4.2.5 含气量对空蚀率的影响	119
4.2.6 液体特性对空蚀率的影响	121
4.2.7 空蚀试验材料特性对空蚀率的影响	123
4.3 空蚀率的相关量	125
4.3.1 空化噪声	125
4.3.2 空蚀量与空泡溃灭压强	130
4.4 空蚀机制	134
4.4.1 空蚀荷载	135
4.4.2 空泡溃灭荷载作用下固壁中的应力	139
4.4.3 固壁的破坏模式	142
4.5 初生空蚀的比尺效应	143
4.5.1 若干有压系统初蚀空化的试验结果	143
4.5.2 有压系统初蚀空化数没有尺寸效应的理论说明	146
4.5.3 流速和压强对初蚀空化数的影响	151
4.6 混凝土的抗空蚀强度	153

4.6.1	混凝土抗空蚀强度的测定	154
4.6.2	试验结果	155
4.6.3	水泥砂浆的抗空蚀强度	158
4.6.4	混凝土的抗空蚀指标	163
参考文献		165
第5章 过流表面不平整引起的空化与空蚀		169
5.1	表面不平整引起空蚀的工程实例	169
5.2	表面不平整体空化研究概况	171
5.2.1	对过流壁面均布不平整空化初生的研究	171
5.2.2	平板表面孤立不平整体的初生空化数	172
5.3	有关规范、手册推荐的不平整体初生空化数	179
5.3.1	我国《溢洪道设计规范》SL 253—2000 建议值	179
5.3.2	文献[29]对不平整体初生空化数的推荐值	180
5.4	不平整体度的控制	181
5.4.1	我国有关规范规定的不平整度标准	181
5.4.2	文献[29]建议的允许不平整体度	182
5.4.3	其他一些国家的规定	184
5.5	非平板母体上凸体的初生空化数	185
5.6	混凝土表面不平整体引起的空蚀量的估计	186
5.6.1	混凝土破坏的物理机制与不平整体下游的空蚀图案	186
5.6.2	混凝土衬砌上不平整体后单空蚀坑的极限深度	188
5.6.3	总空蚀量的估计	188
5.7	水流掺气后表面不平整体度控制的理论考虑	192
5.7.1	不掺气条件下初蚀空化数 σ_{id} 与相应的气核失稳半径 R_c	193
5.7.2	不掺气条件下空化区的平均长度及空泡溃灭前的最大半径 R_{max}	193
5.7.3	不掺气条件下作用在固壁上的最大空泡溃灭点压强	195
5.7.4	掺气后不产生初生空蚀的等腰三角形不平整体凸体的估计	196
参考文献		197
第6章 坝身泄水孔进口及闸槽的空化特性		200
6.1	坝身泄水孔进口的空化特性概述	200
6.2	进口曲线段的压力系数与门槽空化	204
6.3	进口段有不平整体时的初生空化数	206
6.3.1	与式(6-1)、式(6-2)相应的叠加原理	206
6.3.2	曲率半径很小部位处不平整体对进口初生空化的影响	207

6.4 底孔明流段的空化特性及允许不平整体的试验确定	209
6.5 闸槽的空化特性	211
6.5.1 概 述	211
6.5.2 凹槽与二维门槽的初生空化数	213
6.5.3 表孔门槽	218
参考文献	225
第7章 孔板与洞塞的空化特性	227
7.1 孔板的空化特性	227
7.1.1 孔板的阻力系数 ξ	227
7.1.2 最小压强系数 $C_{p_{\min}}$	230
7.1.3 孔板下游水流的脉动特性	233
7.1.4 孔板的空化特性	235
7.1.5 孔板的初蚀空化数	241
7.1.6 多级孔板水力设计的等空化原则	241
7.2 洞塞的空化特性	244
7.2.1 洞塞的阻力系数	245
7.2.2 洞塞的初生空化数与初蚀空化数	249
7.3 以初生空化数为水力设计准则时洞塞消能与孔板消能的比较	250
参考文献	252
第8章 有压弯曲管道和岔管的空化空蚀特性	255
8.1 有压弯曲管道的空化特性	255
8.1.1 概 述	255
8.1.2 有压矩形断面弯管的空化特性	257
8.1.3 有压圆形断面弯管的空化特性	262
8.1.4 有压圆形断面弯管有升坎时的初生空化数	264
8.2 岔管的空化空蚀特性	265
8.2.1 概 述	265
8.2.2 卜形岔管的水力特性	268
参考文献	272
第9章 其他水工建筑物的空化空蚀特性	274
9.1 突扩突跌掺气设施	274
9.1.1 概 述	274
9.1.2 几个已建和在建的工程实例	274
9.1.3 突扩突跌下游的水翅高度与出口挑坎高程及明流段的最小长度	284

9.2 坝面跌坎掺气体形空化特性	288
9.2.1 突跌掺气体形的流态、压力与掺气特性	289
9.2.2 突跌掺气体形的空化特性	291
9.3 消力坎及消力池中其他辅助消能工的空化特性	293
9.3.1 连续式消力坎	294
9.3.2 消力池中其他辅助消能工的初生空化数	295
9.4 堰面的空化特性	300
9.4.1 堰顶部位的空化	301
9.4.2 反弧段与挑流鼻坎的空化与空蚀	303
9.5 闸门及闸门底缘的空化空蚀	308
9.5.1 弧门的空蚀	308
9.5.2 平面闸门底缘的初生空化数	309
参考文献	310
第10章 掺气减蚀	313
10.1 概 述	313
10.2 掺气水体的声速与掺气减蚀机制	317
10.2.1 掺气水体的声速	317
10.2.2 掺气减蚀的机理	318
10.3 掺气减蚀的工程设施	321
10.3.1 掺气减蚀工程设施的形式	322
10.3.2 掺气设施的尺寸	322
10.3.3 掺气减蚀设施的位置	323
10.3.4 我国有关规范对掺气装置的要求及形式与尺寸的建议	323
10.4 掺气设施的水力指标	324
10.4.1 掺气减蚀设施的空腔长度 L	325
10.4.2 空腔水舌上、下缘压差水头 $\Delta p/(\rho g)$	328
10.4.3 掺气量	330
10.4.4 掺气装置的保护长度	335
参考文献	349

第1章 泡动力学基础

空化与空蚀的根本原因是气核在低压区的生长和失稳转化成空泡后在高压区的溃灭,所以泡动力学是阐明空化与空蚀现象的理论基础。

1.1 水中的气核分布

江、河、湖、海中的水都不是纯水,它含有许多微粒杂质,如固体微粒、微生物和微气泡等。微气泡的半径一般都在 $20\ \mu\text{m}$ 以下,它叫做气核或空化核。没有气核就不会有空化。

1.1.1 气核半径 R 的实测分布函数

可以采用光测法、声测法和水动力学法测定液体中的气核分布,国内外测得的空化核分布汇集于图 1-1。图中除注明了年份外还有不在括号内的数字,如 12.5,它表示水中的溶解气含量为 1.25×10^{-5} , (1)、(2) 分别表示采用散射法和全息法; Gavrilov(1)、(2) 分别表示试验水未经搁置和搁置 5 h; Medwin(1)、(2) 分别表示 2 月份和 8 月份在海洋中测定。图中纵坐标的因次是 m^{-4} 。若测得半径在 R_i 与 $R_i + \Delta R_i$ 之间的的气核数为 N (个/ m^3), 则在 R_i 处的纵坐标 $N(R_i) = \frac{N}{\Delta R_i}$ 个 $\cdot \text{m}^{-4}$ 。如图中的 A 点, 它的纵、横坐标分别为 10^9 个 $\cdot \text{m}^{-4}$ 和 $16\ \mu\text{m}$, 它是什么意思呢? 为清楚起见, 把纵坐标改写成 10^3 个/ $(\text{m}^3 \cdot \mu\text{m})$, 它表示半径为 $15.5 \sim 16.5\ \mu\text{m}$ 的气核在每立方米中有 1 000 个。从图 1-1 大致可以得到两点结论: ①各组实测数据在双对数图上是近似平行的直线; ②各组数据间可以差 2~3 个数量级, 这表明气核分布的实测结果无论对测量方法还是水质都是十分敏感的。应该说明的是图 1-1 中的 $N(R)$ 包括了各种悬浮于水中的微粒, 但现代测量技术已经可以区别不同性质的微粒。从海水中的测量结果看, 微气泡只约占总微粒的 10%。

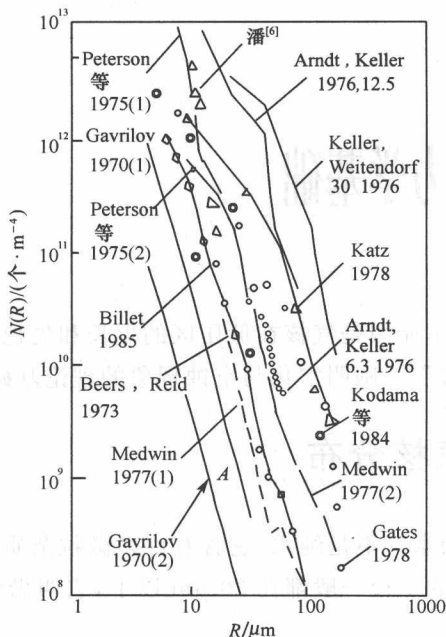


图 1-1 气核半径的实测分布函数

1.1.2 气核半径密度函数的经验表达式

气核半径 R 的密度函数迄今还无法进行理论计算,现在通用的气核半径密度函数的经验表达式都是以图 1-1 为基础的,其一般形式为

$$N(R) = A(R/R_{\min})^{-B} \quad (1-1)$$

可以推测在一定的环境压强和含气量下,微气泡有某一最小半径 $R_{\min}$, 小于 $R_{\min}$ 的微气泡将会溶解,其具体数值可参考图 1-1 确定。给定 $R_{\min}$ 后,由式(1-1)可得系数 A 的表达式:

$$A = N(R_{\min}) \quad (1-2)$$

从已有的实测结果知,系数 B 值的变化范围为

$$2 < B < 5 \quad (1-3)$$

与图 1-1 中 Gavrilov 的量测结果相应的 $B=3.5$,它大体上是现有量测结果的平均值。

令单位体积内的总核数为 N_0 ,它与常数 A 、 B 和 $R_{\min}$ 的关系为

$$N_0 = \int_{R_{\min}}^{\infty} N(R) dR = \int_{R_{\min}}^{\infty} A \left(\frac{R}{R_{\min}} \right)^{-B} d \left(\frac{R}{R_{\min}} \right) = \frac{A}{B-1} R_{\min} \quad (1-4)$$

在具体计算时必须注意因次间的协调,为了应用方便,把图 1-1 中有代表性的几条曲线的近似拟合方程及参数列在下面(R 的因次是 μm):

(1)Gavrilov(1970),放置 5 h 的水

$$N(R)=13.78R^{-3.50} \text{ 个}/(\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m}) \quad (1-5A)$$

$$N_0=0.17 \text{ 个}/\text{cm}^3, \text{ 气核体积浓度 } \alpha=3.95 \times 10^{-10}$$

(2)Gavrilov(1970),新鲜水

$$N(R)=157.8R^{-3.52} \text{ 个}/(\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m}) \quad (1-5B)$$

$$N_0=1.66 \text{ 个}/\text{cm}^3, \quad \alpha=5 \times 10^{-9}, \quad R_{\min}=4.22 \mu\text{m}, \quad R_{\max}=36.5 \mu\text{m}$$

(3)Beers 等(1973)

$$N(R)=1584.9R^{-3.60} \text{ 个}/(\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m}) \quad (1-5C)$$

$$N_0=2.99 \text{ 个}/\text{cm}^3, \quad \alpha=6.71 \times 10^{-8}, \quad R_{\min}=7.73 \mu\text{m}, \quad R_{\max}=100 \mu\text{m}$$

(4)Keller 等(1976),溶解气体浓度为 30×10^{-6}

$$N(R)=8.5 \times 10^4 R^{-2.97} \text{ 个}/(\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m}) \quad (1-5D)$$

$$N_0=51.39 \text{ 个}/\text{cm}^3, \quad \alpha=6.14 \times 10^{-6}, \quad R_{\min}=30.5 \mu\text{m}, \quad R_{\max}=200 \mu\text{m}$$

1.2 球泡的静平衡方程与稳定性条件

假如一个球泡悬浮于液体中(图 1-2),则泡内外压强的平衡关系为

$$p=p_b-2S/R \quad (1-6)$$

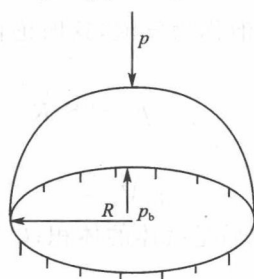


图 1-2 球状气核平衡

式中, p_b 、 p 分别为泡内外压强; R 为泡半径; S 是液体的表面张力系数(对常温的水可取 $S=7.32 \times 10^{-2} \text{ N/m}^2$)。下面对泡内含物分三种情况进行讨论。

1.2.1 泡内只含蒸汽

泡内只含蒸汽的泡称为汽泡,这时泡内只有蒸汽压强 p_v , $p_b=p_v$, 所以有

$$p=p_v-2S/R \quad (1-7)$$

显然, 汽泡的平衡只有当 $p < p_v$ 时才有可能达到, p - R 平衡关系示于图 1-3。若有某一扰动, 使泡径增加一微量 ΔR , 这时原平衡关系被破坏, 形成新的不平衡关系:

$$p < p_v - 2S/(R + \Delta R)$$

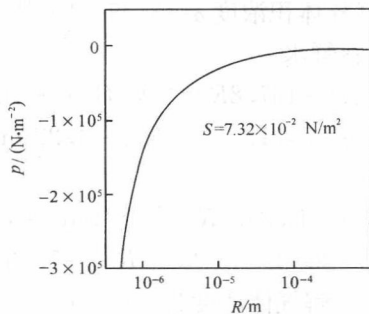


图 1-3 汽泡的 p - R 平衡关系

这个不平衡关系不是促使汽泡收缩, 而是进一步促使汽泡生长, 因此汽泡将无限生长; 若扰动的方向相反, 则汽泡消失; 所以汽泡的静平衡是不稳定的。这表明, 即使液体中的压强低于饱和蒸汽压强 p_v , 汽泡也不可能稳定存在于液体中。

1.2.2 泡内只含不溶解气体

泡内只含不溶解气体的泡称为气泡, 这时泡内只有气体压强 p_g , 所以气泡的静平衡关系为

$$p = p_g - 2S/R \quad (1-8A)$$

由气体状态方程知

$$p_g V_g^n = C \quad (1-8B)$$

式中, V_g 是与 p_g 相应的单位质量气体的体积; C 为常数; n 是多方指数, 等温状态时 $n=1$, 绝热状态时 $n=4/3$ 。

若一气泡的初始半径为 R_0 , 泡内压强为 p_{g0} 时与泡外的液体压强 p_0 相平衡, 由式(1-8A)知 R_0 、 p_{g0} 和 p_0 三者满足关系式

$$p_0 = p_{g0} - 2S/R_0$$

若气泡的半径变化很慢, 可近似认为等温过程, 可取 $n=1$, 又因

$$V_g = 4\pi R^3/3$$

所以根据式(1-8A)和(1-8B)可得

$$4\pi R^3 p_g/3 = 4\pi R_0^3 p_{g0}/3 = 4\pi R_0^3 (p_0 + 2S/R_0)/3$$

或

$$p_g = (p_0 + 2S/R_0)(R_0/R)^3$$

所以在等温状态下式(1-8A)也可写成

$$p = (p_0 + 2S/R_0)(R_0/R)^3 - 2S/R \quad (1-8C)$$

当泡外的压强变化时,气泡半径 R 也相应变化,如 $R_0 = 5 \mu\text{m}$, $p_{g0} = 1.29 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ (相应的 $p_0 = 10^5 \text{ N/m}^2$) 时,气泡的 p - R 关系示于图 1-4,它有一个极值点,与这极值点相应的临界半径 R_c 可由 $dp/dR=0$ 确定:

$$dp/dR = -3(p_0 + 2S/R_0)R_0^3/R^4 + 2S/R^2 = 0$$

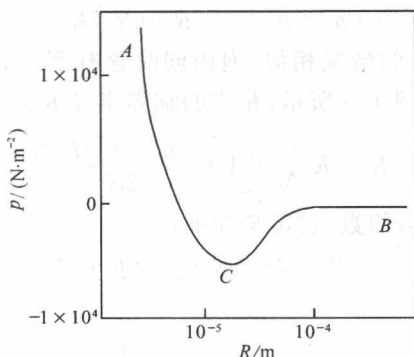


图 1-4 气泡的 p - R 关系

从而有

$$R_c = R_0 \sqrt{3 \left(1 + \frac{p_0 R_0}{2S} \right)} \quad (1-9)$$

图 1-4 中的 $R_c = 3.636R_0$ 。在曲线的 AC 部分,当气泡的半径增加时,泡内气体压强的下降速率高于由表面张力引起的附加收缩力的下降速率,因此气泡回缩,所以悬浮于液体中的气泡是稳定的。在曲线的 BC 部分则相反,当气泡半径增加时,泡内气体压强的下降速率低于由表面张力引起的附加收缩力的下降速率,因此气泡进一步增长,所以悬浮于液体中的气泡是不稳定的, C 点是气泡的失稳点。

相应的临界压强 p_c 可由式(1-8C)确定:

$$p_c = (p_0 + 2S/R_0)(R_0/R_c)^3 - 2S/R_c = -4S/(3R_c) \quad (1-10)$$

1.2.3 泡内同时含有蒸汽和不溶解气体

一般都认为气核内部既有蒸汽又有不溶解气体,在这种情况下泡内压强由两部分组成,一部分是蒸汽压强 p_v ,它只和环境温度有关,不随气核体积的变化而变化,这实质上假定了空泡生长时泡壁处有相应的液体汽化进入泡内,空泡收缩时泡壁处有相应的蒸汽凝结减少了泡内的蒸汽,从而使泡内的 p_v 维持不变;

另一部分是气体压强 p_g , 它随气核体积的变化而变化。

$$p_b = p_v + p_g$$

相应的静平衡方程为

$$p = p_v + p_g - 2S/R = p_v + p_{g0} (R_0/R)^3 - 2S/R \quad (1-11A)$$

初始状态时的平衡关系为

$$p_0 = p_v + p_{g0} - 2S/R_0$$

所以式(1-11A)也可以写成

$$p = p_v + (p_0 - p_v + 2S/R_0) (R_0/R)^3 - 2S/R \quad (1-11B)$$

和泡内只含不溶解气体的情况相似, 泡内同时含有蒸汽和不溶解气体时的 p - R 曲线也存在极值点, 如图 1-5 所示, 相应的临界半径 R_c 由下式计算:

$$R_c = R_0 \sqrt{3 \left[1 + \frac{(p_0 - p_v) R_0}{2S} \right]} \quad (1-12A)$$

用 W 表示气核的韦伯数, 它定义如下:

$$W = 2S / [R_0 (p_0 - p_v)] \quad (1-13)$$

则式(1-12A)可改写成

$$R_c = R_0 \sqrt{3 \left(1 + \frac{1}{W} \right)} \quad (1-12B)$$

由此可得无因次临界半径 ξ_c 为

$$\xi_c = \frac{R_c}{R_0} = \sqrt{3 \left(1 + \frac{1}{W} \right)} \quad (1-14)$$

式(1-12)或式(1-14)是很有用的, 因为它们可作为判断气核生长时是否失稳的依据。若某一初始半径为 R_0 的气核在流场中运动时可达到的最大半径 $R_{\max} > R_c$, 该气核已失稳, 失稳后的气核称为空化泡, 简称空泡。

为方便起见, 也常用临界压强作为判断气核在流场中是否失稳的依据, 把 R_c 的表达式代入式(1-11B), 经运算后可得

$$p_c = p_v - 4S / (3R_c) \quad (1-15)$$

当流场中的最小压强 $p_{\min}$ 小于某一气核相应的临界压强 p_c 时, 可以近似认为该气核到达最小压强点时已经失稳而转变成空泡。

$R_0 = 5 \times 10^{-6} \text{ m}$, $p_{g0} = 1.29 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, $p_v = 2334 \text{ N/m}^2$ 时的 p - R 关系曲线示于图 1-5 中。它和图 1-4 的形状很相似, AC 部分对应于泡的稳定部分, BC

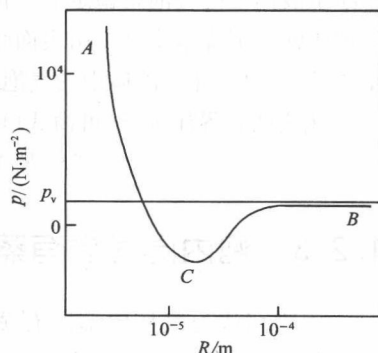


图 1-5 泡内同时含有蒸汽和不溶解气体时的 p - R 关系