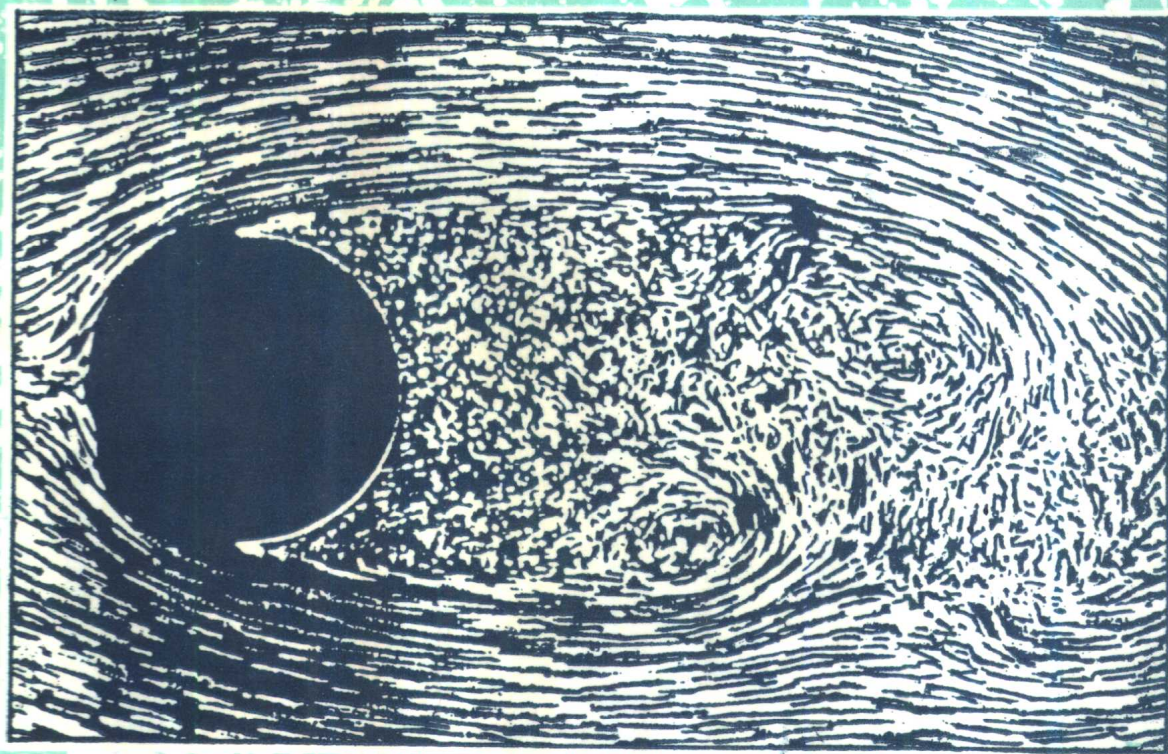


空化与空蚀的原理及应用

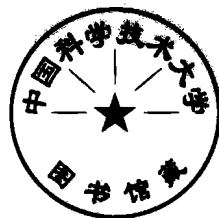
黄继汤



清华大学出版社

空化与空蚀原理及应用

黄继汤



清华大学出版社

内 容 简 介

本书综合了近年来国内外有关空化与空蚀的主要研究成果。系统地介绍了有关空化的形成、发育与溃灭、空泡动力学、固定型空穴力学以及有关空蚀的基本理论,并就水利工程和水力机械中的空化与空蚀特性及其防护措施做了介绍。

书中着重介绍了近年来我国在空化与空蚀方面所取得的某些科研成果。

本书可作为高等院校及中等专业学校水利水电、农水、力学、水力机械和造船各类专业的教学参考书,也可供从事这些专业的技术管理、设计、科研和制造等方面技术人员参考。

空化与空蚀的原理及应用

黄 耀 汤

责任编辑 尹芳平

☆

清华大学出版社出版

北京 清华园

清华大学印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本: 787×1092 1/16 印张: 14.75 字数: 346 千字

1991年2月第1版 1991年2月第1次印刷

印数: 0001~2000

ISBN 7-302-00670-9/TV·11

定价: 4.20 元

前 言

随着我国水利水电事业的发展，高水头水工建筑物、水电站、泵站陆续出现，使过流部位的水流流速不断增大，致使空化与空蚀破坏愈来愈严重，从过去认为是局部的现象已发展成为影响整个枢纽、电站、泵站正常工作的关键问题；在造船、交通运输及动力机械各领域中空化与空蚀现象也很普遍，美国三里岛核电站 1979 年发生的震惊世界的运行事故也与空化有关。因此，有必要对空化现象发生的原因、有关机理、对工程的影响以及各种行之有效的防护措施加以系统介绍。

本书系在作者于 1979 年起为清华大学水电系研究生开设的“空化与空蚀”课程编写的讲义基础上几经充实改编而成。编写过程中除主要参考了美国 Knapp, Daily, Hammitt 合著的“Cavitation” (1970)，Hammitt 著的“Cavitation and Multiphase Flow Phenomena” (1980)，苏联 Перник 著的“Проблемы Кавитации”(1966) 等著作以及国内外有关书刊、资料外，还引用了国内有关的研究成果，其中包括清华大学近年来的研究及试验。

本书在编写过程中注意由浅入深，着重说明现象的物理本质以及介绍近期的科研成果与实践经验的总结，在有些方面还指明了需要进一步深入研究的课题。因此，本书既适于作教材，也适于科研及生产管理人员参考。

在本书编写过程中，清华大学水电系及水力学教研组有关同志给予了大力支持，梅祖彦教授审阅了初稿，张受天副教授曾提出宝贵意见，李志民等同志也给了帮助，在此一并致谢。

作 者

1959 年 12 月

目 录

前言

第一章 概述

§1-1 空化与空蚀	1
§1-2 空化现象研究简史及空蚀破坏实例	2
参考文献	5

第二章 气核、空化数与空化类型

§2-1 水中的气核	7
§2-2 空化数	9
§2-3 空化的分类	12
参考文献	14

第三章 空泡动力学基础

§3-1 球形空泡的静力平衡条件	16
§3-2 理想球形空泡动力学	20
§3-3 在变压场中充满气体的空泡	36
§3-4 液体粘性对空泡膨胀和压缩的影响	40
§3-5 球形空泡的稳定性	47
§3-6 液体可压缩性的影响	51
§3-7 壁面及压强梯度对空泡的影响	58
参考文献	63

第四章 研究空化的设备及空化初生

§4-1 研究空化现象的试验设备	67
§4-2 空化的初生	77
§4-3 空化的模拟	80
§4-4 影响空化初生的各种因素	81
参考文献	94

第五章 固定型空化简介

§5-1 固定型空化的分类及形成条件	99
§5-2 固定型空穴的周期现象	100
§5-3 超空穴	102

• 1 •

参考文献	105
第六章 空化对水流的影响	
§6-1 空化初生和发展对水流的影响	106
§6-2 空化对水流其它方面的影响	107
参考文献	111
第七章 空蚀及其研究设备和影响因素	
§7-1 空蚀破坏及其机理	113
§7-2 研究空蚀的试验设备	115
§7-3 空蚀程度的表示方法	122
§7-4 影响空蚀程度的因素	123
§7-5 材料的抗空蚀指标	141
参考文献	143
第八章 泄水建筑物的空蚀及其防止和减免措施	
§8-1 泄水建筑物表面的空蚀破坏	146
§8-2 防止和减免泄水建筑物空蚀的措施	154
§8-3 泄水建筑物过流部分的体型问题	155
§8-4 过流壁面的不平整度问题	169
§8-5 掺气减蚀问题	176
§8-6 抗蚀材料问题	193
参考文献	200
第九章 水力机械中的空化与空蚀	
§9-1 水轮机中的空化现象及其特性	203
§9-2 水轮机空化数、空化发展阶段及吸出高度的选定	204
§9-3 水轮机空蚀程度、各种类型水轮机的空蚀破坏特征	209
§9-4 影响水轮机空蚀程度的主要因素	213
§9-5 水轮机空蚀的防护	216
§9-6 水泵的空化与空蚀简介	219
§9-7 船用螺旋桨的空化与空蚀简介	226
参考文献	228

第一章 概 述

从 19 世纪后期在螺旋桨叶片上发现空化 (Cavitation) 现象以来^[1], 空化现象的理论及内含已经有了很大的发展。随着科技的进步, 涉及空化现象的领域也愈来愈多, 例如高速螺旋桨、高速鱼雷雷体、高速潜艇、水翼、水泵、水轮机、水工泄水建筑物、原子能、宇航甚至生物学和医学等。

长期以来, 空化现象被认为是一个不易解决的问题。其原因在于, 到目前为止对空化的机理尚未研究得很清楚。随着我国国民经济建设的发展, 各有关的科技部门均迫切要求对这一问题深入研究解决。

§1-1 空化与空蚀

在常温常压下, 液体分子逸出液体表面而成为气体分子的过程, 称为“汽化”。从微观来看, 汽化是液体中动能较大的分子克服液体表面分子的引力而逸出液体表面的过程, 它有蒸发和沸腾两种方式, 任何温度下都会在液体表面发生蒸发, 而沸腾则是剧烈的汽化过程, 此时液体内部涌现大量气泡, 汽化发生于整个液体内部, 常压下沸腾仅在沸点时才能发生。

如果维持水温不变, 使水面的压强降低到某临界值后, 水体内部原来含有的很小的气泡 (通称气核) 将迅速膨胀, 在水中形成含有水蒸气或其它气体的明显气泡, 这种现象类似于沸腾。为了与沸腾相区别, 常把由于压强降低使水 (或其它液体) 汽化的过程称为“空化” (Cavitation)。空化在水中形成的空洞称为“空穴” (Cavity), 球形空穴常称为空泡, 较大的空穴称为空腔, 带有空穴的水流称为空穴流。图 1-1 表示文德利型空化管中所产生的空化现象。实际观察表明, 有时空穴中大部分是气体, 而有时则大部分为蒸汽, 因此又引进了气体空穴和蒸汽空穴二词以资区别。

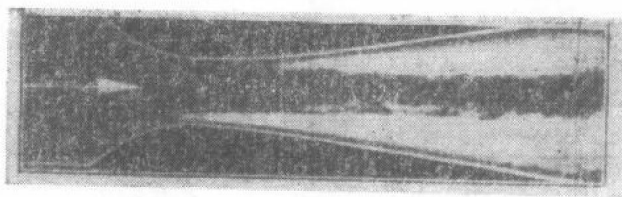


图 1-1 空化现象

液流流经的局部地区, 压强若低于某临界值时, 液体也会发生空化。在低压区空化的液体挟带着大量的空泡形成了“两相流”运动, 因而破坏了液体宏观上的连续性, 水流挟带着的空泡在流经下游压强较高的区域时, 空泡将发生溃灭 (Collapse)。因此空化现象包括空泡的发生、发育和溃灭, 它是一个非恒定过程。

除水以外, 其它液体中也常会发生空化现象, 例如原子能电站中常用的传热介质——液态金属钠、液态金属钾、液态金属铯、一些飞行器中的液态氢等, 油泵和轴瓦中的润滑

油等。研究这些液体中的空化现象在 60 年代后逐渐开展起来, 但本书主要讨论以水为对象的空化现象。

由于空泡在溃灭时产生很大的瞬时压强, 当溃灭发生在固体表面附近时, 水流中不断溃灭的空泡所产生的高压强的反复作用, 可破坏固体表面, 这种现象称为“空蚀”(Cavitation Damage)。

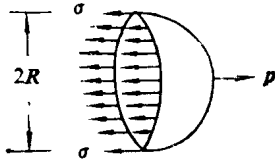


图 1-2 球形微团静平衡

对于不存在任何空泡的“纯水”而言, 它的抗拉强度相当大; 可用图 1-2 所示的球形微团模式求出其极限抗拉强度。

设 p 为使“纯水”破坏的最大拉应力; σ 为“纯水”的表面张力系数, 对于和空气接触的水面, 在 20°C 时; $\sigma = 0.0728\text{N/m}$; R 为表面张力作用的有效距离。则静平衡方程为:

$$2\pi R\sigma = \pi R^2 p$$

即

$$p = \frac{2\sigma}{R} \tag{1-1}$$

水的 $R \approx 10^{-10}\text{m}$; 可算出“纯水”被拉断时所需的拉应力约为 1456000kN/m^2 (超过 10000 个标准大气压力)。

不少学者曾用各种办法^[2]对“纯水”的极限抗拉强度进行实测所得结果差别较大, 见表 1-1。

表 1-1 水的极限抗拉强度 (kN/m^2)

试 验 者	时 间	液 体	极 限 抗 拉 强 度
Bertholet	1850	水	5050
Dixon	1909	水	5050—15150
Meyer	1911	水	3434
Vincent	1943	水	15857
Blake	1950	水	27775

试验还表明, 水的抗拉强度与水温有密切关系, 在 10°C 时水的抗拉强度最大。

由表 1-1 可以看出, 要使“纯水”破坏需要很大的拉应力。实际上, 水所能承受的拉应力是很小的, 因为一般情况下实际水体中经常存在气体核子及固体微粒等异相介质, 因而大大地降低了水的抗拉强度, 水体很容易被“拉断”而发生空化现象。

§1-2 空化现象研究简史及空蚀破坏实例

1753 年欧拉 (Euler) 指出^[3]: “水管中某处的压强若降到负值时, 水即自管壁分离, 而该处将形成一个真空空间, 这种现象应予避免”。19 世纪后半叶, 随着蒸汽

机船的发展,发现螺旋桨转数提高到一定程度反而会使航行速度下降,1873年雷(O.Reynolds)曾解释这种现象^[1]是因为当螺旋桨上压强降低到真空时吸入空气所致。1897年巴纳比(S.W.Barnaby)和帕森斯(C.A.Parsons)在英国“果敢号”鱼雷艇和几艘蒸汽机船相继发生螺旋桨效率严重下降事件以后^[4],提出了“空化”的概念,并指出在液体和物体间存在高速相对运动的场合可能出现空化^[5]。1896年C.A.帕森斯建立了世界上第一个研究空化的小型水洞^[6],其外形如图1-3所示。该水洞为铜制,全长约1m,工作段为15cm²,用闪频观测器观察空化现象。20世纪初期,在水泵和水轮机中也相继出现了同样现象;20世纪30年代,高坝的泄水建筑物上也发生了空蚀破坏,因此,美国托马斯(H.A.Thomas)于40年代设计并制造了减压箱^[7],在减压条件下研究泄水建筑物的空化问题。直到现在,船舶、水力机械及水利工程中空化问题的研究始终占有重要地位。

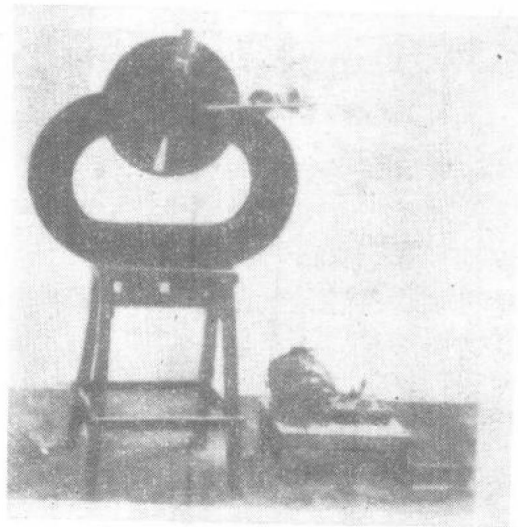
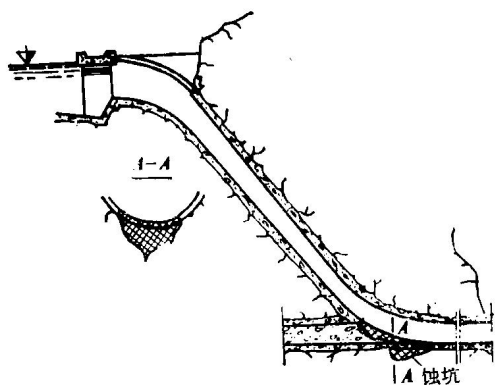


图 1-3 世界上第一个水洞外貌

国内外水工泄水建筑物因受空蚀而损坏的例子很多。

1935年在巴拿马地峡恰格采斯河上的麦登(Madden)坝输水道进口发生了严重的空蚀破坏,美国陆军工程兵团从那年开始着手研究空化现象。

美国鲍尔德水利枢纽东岸泄洪隧洞直径为15.2m^[8],1941年8月6日开始运用,低于设计流量运行了四个多月;于12月12日进行洞内检查,发现弯段处洞底已被破坏,并在岩基中形成一个深13.7m、长35m、宽9.5m的大坑,从坑中冲走的混凝土和岩石达4500m³(图1-4)。



(a) 空蚀位置

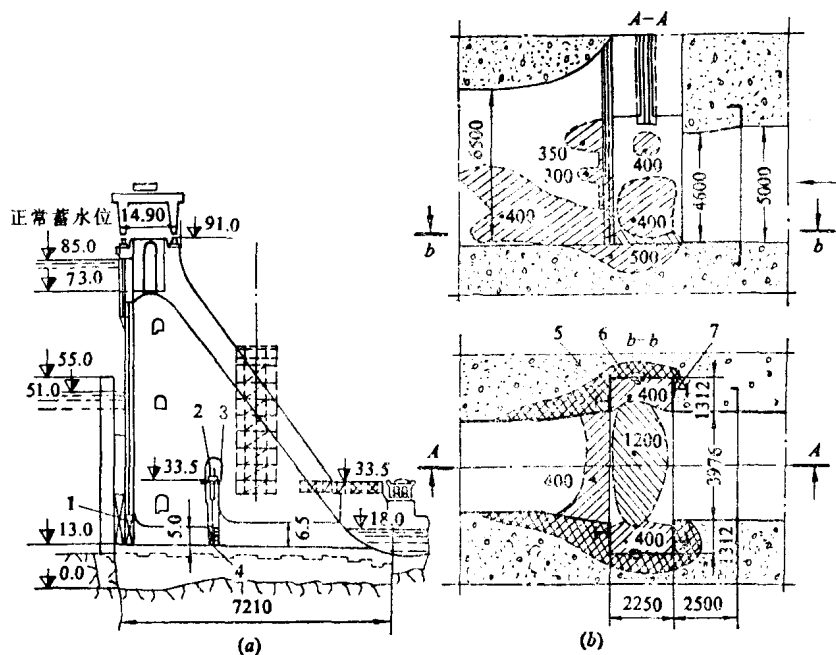


(b) 空蚀区全貌

图 1-4 美国鲍尔德水利枢纽泄洪隧洞的空蚀破坏

苏联的赫塔尔明坝^[9],设有三个临时泄水底孔,压力段的断面尺寸为4.0×

$\times 5.0\text{m}^2$, 无压段为 $4 \times 6.5\text{m}^2$ (图 1-5), 在 54m 水头下运行 78 到 250 昼夜后检查发现, 各闸室的埋件及混凝土均受到空蚀破坏, 形成了深 0.4~1.2m 的蚀坑。



(a) 坝的横断面; (b) 闸门段的底孔剖面及平面图 (数字表示冲蚀坑的深度以 mm 计)
1—事故检修闸门; 2—油压启闭机; 3—密封盖; 4—主闸门; 5—轨道; 6—钢板护面; 7—30号工字钢

图 1-5 重力坝导流底孔主闸门的空蚀破坏

苏联布拉茨克水电站的溢流坝面^[10], 由于拆模板时遗留的突出体、未填塞的施工缝以及其它不平整体等原因, 其溢流段经连续过水 11 昼夜后, 在溢流面上形成了深 1.2m, 体积约 12m^3 的冲蚀坑, 在其它溢流面上, 冲蚀坑深度平均为 0.2~0.4m。见图 1-6。

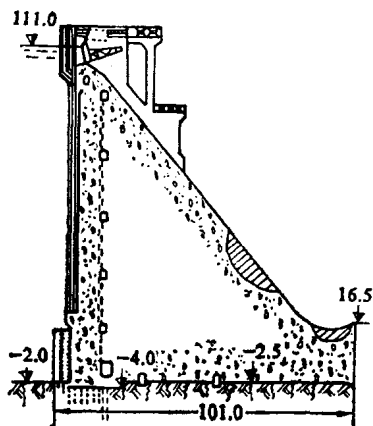


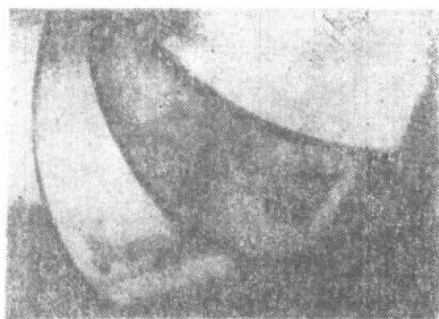
图 1-6 布拉茨克水电站溢流坝面空蚀破坏

刘家峡水电站右岸泄洪隧洞, 在混凝土溢流面尚未全部衬砌完毕的情况下, 于 1969 年 3 月开门放水, 当时水头约为 80m, 流量为 $900 \sim 1000\text{m}^3/\text{s}$, 最大流速约为 38m/s, 短期内即发现反弧段下游有一个深 6~9m、宽 10 余 m 的空蚀破坏坑。随即进行修复, 于 1972 年 5 月 9 日又开门放水, 25 日洞内有雷鸣声, 当即停水检查, 发现反弧与水平段联结处有大片空蚀破坏, 坑深为 4.8m, 长 23m, 宽 13m。

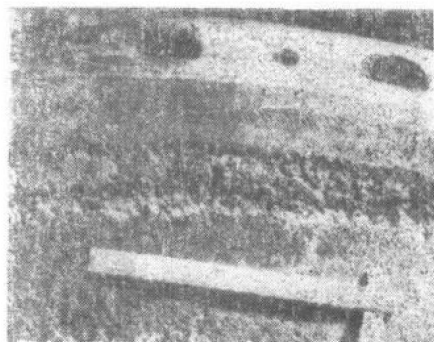
盐锅峡水电站溢流坝下游挑坎, 原为矩形差动式, 运用两年后, 12 个高坎中有 23 个侧面混凝土被空蚀, 其总面积达 24m^2 ; 空蚀严重处坑深达 1.1m, 面积达 2m^2 。改为梯形差动挑坎后, 空蚀

情况虽有所改善,但仍比较严重。此外,溢流坝面上凡是能引起水流分离的地方(如坝面曲线施工走样、施工造成高低坎、残存的钢筋头等)后面几乎都发生空蚀破坏。

水轮机、水泵以及船舶螺旋桨推进器受到的空蚀破坏也比较严重。我国水轮机通常使用1~2年就要停机检修一次。某些水泵使用1000小时左右即出现严重的空蚀,见图1-7。船舶螺旋桨在使用一段时间后也因空蚀而效率大大降低。



(a) 混流式水轮机的叶片空蚀



(b) 轴流泵转轮室的间隙空蚀

图 1-7 水轮机和泵的空蚀破坏

新安江水电站4号水轮机在1964年检查时,叶片空蚀破坏面积达 41321cm^2 ,占转轮叶片总面积的 $1/3$,破坏最深处达 $30\sim 33\text{mm}$,该电站另一台水轮机1972年7月检查时发现,14个转轮叶片中有7个叶片因空蚀破坏而穿孔。六朗洞水电站水轮机在空蚀与泥沙磨蚀的作用下,某台水轮机曾发生平均12天检修一次的情况。

由于空蚀现象比较普遍,对工程的影响也较为突出,而且随着国民经济的发展,空蚀问题将更为复杂;国内外都在积极进行研究。但到目前为止,有关空化与空蚀的理论及不少研究成果还不能令人满意,许多问题还有待进一步深入探索。

参 考 文 献

- [1] W. B. Wargan, "Cavitation effects on marine devices", Trans. of the ASME, Vol. 91, No.5, 1969.
- [2] R.T.Knapp, J.W. Daily and F.G. Hammitt, "Cavitation", McGraw Hill Book CO., 1970.
中译本“空化与空蚀”水利水电科学研究院译,水利出版社,1981年。
- [3] Historie de l'Academie royale des sciences et belles lettres, T. 10, Berlin, 1756.
- [4] А. С. Горшков, А. А. Русецкий, "Кавитационные грубы", Издательство "Судостроение", Ленинград, 1972.
- [5] 中国大百科全书,力学卷,“空化”条,中国大百科全书出版社,1985.
- [6] 中国大百科全书,力学卷,力学大事年表。
- [7] H.A. Thomas, and E.P. Schuleen, "Cavitation in Outlet Conduits of High Dams, Trans. ASCE, Vol. 107, 1942.
- [8] 高速水流论文译丛,第一辑,第一册,科学出版社,1958年。

- [9] С. М. Слиский, "Гидравлические расчёты высоконапорных гидротехнических Сооружений", "ЭНЕРГИЯ", МОСКВА, 1979. 中译本 "高水头水工建筑物的水力计算", 毛世民、杨立信译, 水利电力出版社, 1984 年。
- [10] Р. С. Гальперин, А. Г. Осколков, В. М. Семенов, и Г. Н. Цедров, "Кавитация на гидро-сооружениях", "ЭНЕРГИЯ", МОСКВА, 1977. 中译本 "水工建筑物的空蚀", 赵秀文译, 水利出版社, 1981 年。

第二章 气核、空化数与空化类型

§2-1 水中的气核

特殊处理的“纯水”可以承受拉力，自然界中的水却只能承受很大的压力，其原因是水中常存在很多含有气体或蒸汽的小泡，水中的这些小泡称为“气核”或“空化核”，简称“核子”（Nuclei）。

水中所含的混合物一般可分为可溶质和不可溶质两大类。可溶质一般含量不大，通常它对水体抵抗破裂的性能影响不大，可不考虑。不可溶质的混合物可以是液体、悬浮的固体以及气体。专门的研究表明，液体混合物和水体接触面上的分子吸引力很大，以致于不能用具有不可溶解的液体混合物来解释水具有很小的抗拉应力的现象。水中所混合的悬浮固体，其表面上所受表面张力的将大小将与水和固体表面的湿润程度有关。理论和试验研究表明，对于表面被水体能很好湿润（亲水性表面）的固体来说，这种力是很大的，甚至在表面湿润性差的情况下，这种力也比实际水体破裂时的拉应力大得多^[1]。不被水湿润的固体表面（疏水性表面）可以形成气核，这可以作为水体不能承受拉力的一种解释。不溶解于水的气体也可以形成气核，这是水体不能承受拉力的主要原因。当这种气核随水运动时，则称为“流动核子”，当这种气核附着在疏水性固体壁面上时，则称为“表面核子”。水中的气体核子尺寸很小，通常其直径大约为 10^{-6} — 10^{-3} cm。人的肉眼一般看不见。核子在水中的分布也不均匀，常用核子的分布曲线（核谱）表示其分布特性，见图 2-1。有人还曾证明^[2]， 1cm^3 普通水中含有其它质点（固体及气体）多达 500,000 个。因此，气核数将远大于此值。

可是，水中存在气核同通常的物理概念相矛盾。实际上，尺寸较大的气核在水浮力作用下将浮向水面而消失。根据亨利（Henry）定律，气核中的压强为：

$$p = p_0 + \frac{2\sigma}{R} \quad (2-1)$$

式中： p 为气核内压强； p_0 为水静压强； σ 为气核与水体边界上的表面张力系数，通常在 20°C 时， $\sigma = 0.0728\text{N/m}$ ； R 为气核半径。

表 2-1 表明，尺寸很小的气核内部的压强是很大的。核子内部的气体会受压而被周围水体所吸收；故小的核子将处于不稳定状态；这样，便得到一个奇怪的结论：一方面为了解释水中之所以会发生空化，水中应该含有核子；另一方面，水中的核子又处于不稳定的状态，核子不可能在水中长期留存。

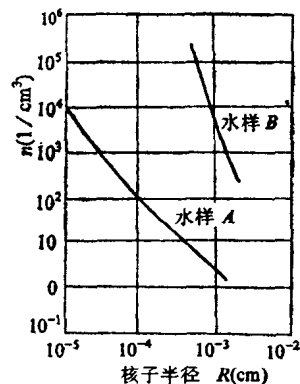


图 2-1 核谱示意图

这一矛盾的结论目前还无法正确解释。现有的空化核子理论在很大程度上还带有臆想性。由核子发展成为空化的过程还只是推测；但是，不假设气体核子的存在，就不能设想水体中在某种低的临界压强下会出现空化，因此就不得不再假定核子具有一系列附加特性，以保证它们能够存在于水中，并处于稳定动平衡状态。

许多研究者对这些附加特性提出过各种设想^{[1][3][4]}。目前，公认比较满意的是由美国 E.N. Hervey 于 1947 年提出的模式^[5]：气体核子是水中固体颗粒或绕流物体表面缝隙中未被溶解的一些气体，而这些固体表面是疏水性的，使得在缝隙中的气体形成一个凹面的自由表面，见图 2-2。

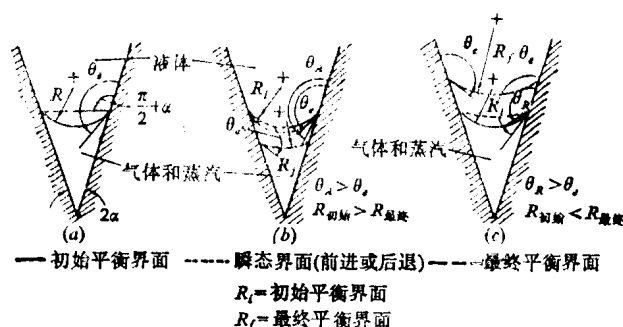


图 2-2 气体—蒸汽空腔在疏水性裂缝内的稳定作用

设缝隙成锥形，其夹角为 2α ，凹形自由表面的接触角为 θ_e ，对疏水性固体表面， $\theta_e > (\frac{\pi}{2} + \alpha)$ ，在这种情况下，表面张力作用将阻止液面进入缝隙，这样，液面平衡时应存在下列关系：

$$p_g + p_v - p_0 = - \frac{2\sigma}{R} \quad (2-2)$$

式中： p_g 为空穴内气体的压强； p_v 为空穴内的蒸汽压强； p_0 为水体内的压强； σ 为表面张力系数； R 为界面的曲率半径。

假设 p_v 和 σ 都和曲率半径无关，考虑下列两种不稳定的瞬态情况：当 p_g 大于饱和值时，如图 2-2(b) 所示，气体将扩散至水体，水面将向气体内部推进，此时接触角 $\theta_A > \theta_e$ ，半径 R 小于平衡值，同时气体中的 p_g 将减小。当气体扩散达到平衡时，接触角仍趋于 θ_e ；此时界面稳定在一个新的位置上，而且 $R_f < R_i$ ，显然，由于表面张力的作用， R_f 不可能等于零；当 p_g 小于饱和值时，如图 2-2(c) 所示，由水中向空穴扩散的气体将使空穴增大，此时，界面向水体内部后退，而接触角 $\theta_R < \theta_e$ ，半径 R 也将大于平衡值。由于空穴内气体逐渐增加，将使 p_g 增大而趋于平衡值。当达到扩散平衡时，接触角将仍趋于 θ_e ，而 $R_f > R_i$ 。

这样，可以看出，不管处于哪种情况，微小的空穴（即核子）将永远处于缝隙之中。这种缝隙的尺寸不需要很大，约为 $10^{-2} \sim 10^{-4} \text{cm}$ ^[6] 即可，大气灰尘和工业灰尘不仅有很多这种固体质点，甚至还有更大的固体质点。这种核子模型还可以应用于完全没有流动核子的、在不可湿润表面附近运动的水体，因为这种表面上可能有“微观”的缝隙。

Hervey 的模式可以解释观察到的所有空化现象，也无须再假设一些不可能有的水的性质，并有很多试验数据（如 Knapp 于 1958 年进行的较大规模的试验^[1]）予以证实。但这一模式至今仍缺乏数学描述，这是因为缝隙的尺寸和形状的不确定性，以及固体表面疏水性的不同给数学分析造成了难以克服的困难。

荷兰船舶模型试验室 J.H.J. Van der Meulen 于 1971 年发表的报告^[7]中指

出：有机玻璃（疏水材料）制造的模型较不锈钢（亲水材料）模型易产生空化。这也从另一方面支持了 Hervey 的核子模式。

总之，不论核子的存在模式如何，它们客观存在于水中，了解它们在水中的情况对于空化研究是十分重要的。近十多年来，人们虽然在测量气核含量方面做了大量工作，但至今还没有找到一种比较完善的方法。

了解水中含气情况最早是测定水中的含气总量，测定方法通常有两类：一类是设法直接测定水中的含气量；另一类是分析水中溶解氧的含量以作为决定空气含量的直接指标。属于前者的、较普遍采用的有 Van Slyke 法^[8]，这是 20 年代就已采用的方法，所用仪器外形如图 2-3 所示，这种方法是利用真空将定量水样中的空气析出，测定其容积后，推算水样中的空气含量。方法本身原理比较简单，缺点是误差较大，而且要使用水银，若操作不慎，玻璃容器打破，水银溅撒污染环境。较新的方法是色谱法，根据水中含气多少会引起色谱图形的变化来测定水中总含气量。属于后者的有 Winkler 化学法，这是已有近百年历史的经典方法，其缺点是操作复杂，不便于连续自动分析，但至今仍作为标定其它分析方法的标准方法；还有称为 Clark 法的覆膜式电化学极谱法^[9]，它是一种以分析水中溶解氧的浓度来推算空气含量的方法。

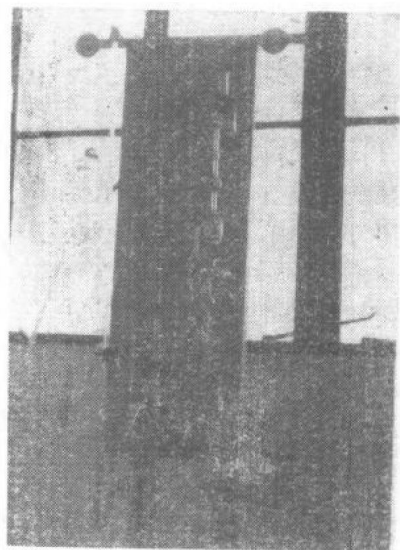


图 2-3 Van Slyke 含气量仪

近 20 年来，国内外测定核谱的技术发展很快，目前已有超声波法^[10]、激光散射法^[11]、动水力学法^[12]、电化学法和全息摄影法^{[13][14]}等。

在试验室内还可以采用各种除气和播种气核的办法^{[11][16]}尽力使试验用水中所含的气体总量和各种气核的大小比例（核谱）与天然状态水中的一样或相似，以避免“比尺影响”。

用动水法测量水的“空化敏感性”参数比较方便^{[16][17]}，这个参数完全避开了气核测量的困难，是表征水质的另一综合参量。Keller 等人^[18]设计了一种测量水的“抗拉强度”的仪器，这是一种避开测量含气量或气核而直接与水的抗空化性能联系的一种尝试。

承认了“核子模式”的设想，才能认为水体只能具有很小的抗拉强度。当水体中压强降到某负临界值后，该处的核子才可能不断长大而形成空化。

§2-2 空化数

影响水中空化产生与发展的主要变量有流动边界形状、绝对压强和流速等；此外，水流粘性、表面张力、汽化特性、水中杂质、边壁表面条件和所受的压力梯度等也有一定影响，其中最基本的量为压强与流速，一般均以这两个变量为基础来建立标志空化特

性的参数。

对绕流物体而言, 由于物体与水流间的相对运动, 物体上各处的压强会有所不同, 为了标志物体上的压强分布特性, 通常利用下式表示的压强系数:

$$C_p = \frac{p - p_0}{\rho V_0^2 / 2} \quad (2-3)$$

式中: C_p 为压强系数; p 为绕流物体上讨论点的压强; p_0 为未受绕流物体扰动的参考压强; ρ 为水的密度; V_0 为未受绕流物体扰动的参考流速。

物体上压强最小处 ($p = p_{\min}$) 的压强系数称为最小压强系数, 即:

$$C_{p_{\min}} = \frac{p_{\min} - p_0}{\rho V_0^2 / 2} \quad (2-4)$$

一般来讲, 无空化发生并忽略雷诺数的影响时, 该值仅取决于物体的形状。可以用使 p_0 不变, 加大 V_0 ; 或使 V_0 不变, 降低 p_0 的办法使 $p_{\min}$ 减小。这样, 当 $p_{\min}$ 减至某一临界值时, 在该压强最小处将会出现空化现象, 产生空穴。如设此时空穴内的压强为 p_b , 则可定义空化数为:

$$\sigma = \frac{p_0 - p_b}{\rho V_0^2 / 2} \quad (2-5)$$

通常认为空化所产生的空泡内部充满水蒸汽, 泡内压强应为饱和蒸汽压强 p_v , 而绕流物体上如果发生空化, 应首先发生在压强最低点, 且其值 $p_{\min}$ 应等于 p_v 。此时,

$$\sigma = \frac{p_0 - p_v}{\rho V_0^2 / 2} \quad (2-6)$$

故

$$\sigma = -C_{p_{\min}} \quad (2-7)$$

式中 p_v 见表 2-1。

空化数 σ 是无量纲数, 通常用它来表示空化状态的特性, 但这种表示方法并不很完善。

固体与水作相对运动时, 水的内部或水固交界面上的空化状态, 一般可分为亚空化状态 (即没有空化的状态)、临界空化状态 (即开始出现空化的状态)、局部空化状态 (即水固交界面上或邻近水体内部出现空化的状态) 和超空化状态 (即固体整个边界面上和靠近固体的尾端都出现空化的状态)^[19]。不同空化状态的 σ 值不一样, $(p_0 - p_v)$ 值愈大时, σ 值愈大, 水流愈不易空化; V_0 愈大, σ 值愈小, 水流愈易空化。

空化数可以在一定条件下表示两个水流系统间空化现象的相似。也就是说, 在雷诺数、佛汝德数、韦伯数等相似准数相等的情况下, 当两个水流系统的空化数相等时, 则可以认为其空化现象也一样; 这只是在理论上从力的对比关系上讲是对的, 但实际上由于空化数本身并未包括其它影响空化的因素在内, 故当两个水流系统间的比尺改变时, 这些因素的影响所表现的程度也不同, 表现出明显的“比尺影响”(也称“比尺效应”) 这点在应用时要予以足够的重视。

在亚空化的流场中, 如使其流速不变, 逐渐降低其压强 (或使压强不变, 逐渐增加

表 2-1 水的饱和蒸汽压强

温度 $t(^{\circ}\text{C})$	饱和蒸汽压强		温度 $t(^{\circ}\text{C})$	饱和蒸汽压强		温度 $t(^{\circ}\text{C})$	饱和蒸汽压强	
	(N/m^2)	水柱(m)		(N/m^2)	水柱(m)		(N/m^2)	水柱(m)
0	610.485	0.0623	16	1817.767	0.1854	32	4754.787	0.4848
1	656.765	0.0669	17	1937.226	0.1975	33	5030.167	0.5129
2	705.810	0.0720	18	2063.491	0.2104	34	5319.444	0.5424
3	757.963	0.0773	19	2196.817	0.2240	35	5623.030	0.5734
4	813.422	0.0829	20	2337.871	0.2384	36	5941.414	0.6058
5	872.362	0.0889	21	2486.535	0.2535	37	6272.322	0.6396
6	935.019	0.0953	22	2643.457	0.2695	38	6622.304	0.6753
7	1001.677	0.1021	23	2808.882	0.2864	39	6991.881	0.7129
8	1072.611	0.1094	24	2983.437	0.3042	40	7375.845	0.7521
9	1147.801	0.1170	25	3167.298	0.3230	50	12258.75	1.25
10	1227.797	0.1252	26	3361.016	0.3427	60	19810.14	2.02
11	1312.461	0.1338	27	3564.031	0.3634	70	31088.19	3.17
12	1402.323	0.1429	28	3779.764	0.3854	80	47269.74	4.82
13	1497.382	0.1527	29	4005.522	0.4084	90	70071.98	7.14
14	1598.178	0.1629	30	4242.969	0.4326	100	101325.	10.33
15	1704.976	0.1739	31	4492.430	0.4581			

流速)，直到流场内开始发生可见的微小空穴，则此时为临界空化状态，或称“初生空化”（Cavitation Incipient）。这个状态在研究空化现象时是很重要的，此时的水流空化数称为“初生空化数”，常用 σ_i 表示。当 $\sigma > \sigma_i$ 时，水流中不会发生空穴， $\sigma < \sigma_i$ 时，则水流中的空穴范围扩大。 σ_i 值除了主要随流场的边界形状改变而改变外，还受水质、来流特性等因素的影响。在研究过程中发现，由于各种原因的影响，通过试验求得的同样情况下的 σ_i 值比较分散，重复性较差。

随着压强继续降低（或流速继续加大），水流中的空穴将继续增大，形成了所谓“空穴发展期”（Developed Cavitation）。在物体绕流情况下，如果空穴区的长度小于绕流物体的“特征长度”，则可称其为“局部空化状态”；反之则称其为“超空化状态”。

处于空穴发展期的空化状态，若使压强增加（或使流速降低），则空穴区将逐渐减小以致最后消失，空穴最终消失的临界空化状态称为“消失空化”（Cavitation Desinent）。与该状态相应的空化数称为“消失空化数”，常用 σ_d 表示。试验中发现，在同样情况下 σ_d 值的重复性较好，故有时也用 σ_d 来标志空化的初生。 σ_i 与 σ_d 一