

CAVITATION AND CAVITATION EROSION
IN THE WATER TURBINES AND PUMPS

水轮机与水泵的 空化与空蚀

常近时 著



科学出版社

水轮机与水泵的空化与空蚀

Cavitation and Cavitation Erosion in the Water
Turbines and Pumps

常近时 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统阐述水轮机与水泵中经常发生的空化与空蚀。论述空化与空蚀的基本原理和基本特性。经大量实验证实,水利水电工程实际引用的并非清水,且含有大量泥沙、化学污染物,致使引用水的空化压力显著升高,水轮机与水泵极易发生空化与空蚀。本书基于实际引用水空化压力特性的研究成果,给出水轮机与水泵安装高程正确的计算方法,给出水轮机与水泵空化安全运行的基本条件,论述水轮机与水泵转轮中空化流场计算的理论和方法。

本书的读者对象为高等学校流体机械与流体工程、水力发电、排灌机械、水电站动力设备等专业的本科生、研究生,以及水轮机与水泵制造厂、水利水电勘测设计单位和科研机构、水电站与水泵站等的工程技术人员和科研人员。

图书在版编目(CIP)数据

水轮机与水泵的空化与空蚀 = Cavitation and Cavitation Erosion in the Water Turbines and Pumps / 常近时著. —北京:科学出版社, 2016. 7
ISBN 978-7-03-049190-9

I. ①水… II. ①常… III. ①水轮机-空化-研究②水轮机-空蚀-研究
③水泵-空化-研究④水泵-空蚀-研究 IV. ①TK73②TH38

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 147071 号

责任编辑:耿建业 陈构洪 赵晓廷 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:铭轩堂

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 7 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2016 年 7 月第一次印刷 印张:15 1/2

字数:301 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

水轮机与叶片式水泵是两类工作过程相反的能量转换机械;前者为水电站中将水能转换成旋转机械能的原动机,再由发电机将机械能转换成电能;后者是将电动机或内燃机等动力机的旋转机械能转换成水能的工作机械。这两类水力机械实现能量转换的主要部件均为带叶片的旋转的工作轮,又称转轮或叶轮,而且两者形状相近。水轮机转轮水流进口为高压边,出口为低压边;水泵情况与此相反,叶轮水流进口为低压边,出口为高压边。空化与空蚀多发生在转轮水流压力低的一边。

从现代水力机械出现至今的百年间,一直伴生着空化与空蚀,长期、严重影响水轮机与水泵的安全、可靠、稳定的运行,并带来巨大的经济损失,因而吸引了国内外许多学者和工程技术人员关注。

当引用水中压力降低至某一限度时,在该处便产生与之相应的不同程度的空泡或空穴,这种物理现象就称为空化。当空泡沿固体表面移至压力较高的位置时,发生溃灭(或称崩解),造成长时间主要由高频高压的微冲击作用,使该处表面金属疲劳破坏和金属流失,则称为空蚀。在我国,空蚀给水轮机与水泵运行带来严重的不利恶果。大多数水电站与水泵站决定机组大修周期的主要因素都是水轮机与水泵空蚀破坏的严重程度。因检修停机、补焊或更换叶轮等,给电站与泵站造成很大的经济损失。空化与空蚀还会诱发机组强烈的振动和噪声。

目前,我国水轮机与泵制造业的设计和制造工艺水平较 30 年前有了很大提高。特别是伴随三峡大型水电工程建设,大量引进国外的先进技术和设计软件,结合国内实际大力推动自主研发,使水轮机与泵的设计、制造水平显著提升,能量指标和空化安全性能有了明显的改善,转轮较多采用抗空蚀稳定性良好的专用不锈钢材料制作,转轮的加工精度、叶片表面光洁度已与过去大不一样,减少了因加工质量差诱发的局部空蚀。

但是,到目前为止,我国许多水轮机与水泵的空化与空蚀现象还比较严重,特别是在泥沙含量较高的北方河流上修建的水电站、水泵站,空化与空蚀仍然是运行中的主要难题。一些新建的大型水电站与水泵站运行时间不长,水轮机与水泵制作材料优良,抗空蚀稳定性高,因而空蚀破坏的潜伏期长,最近几年严重空蚀破坏的发生率可能还不高,但随着运行时间延长,潜伏期一过,情况将会发生改变。

多年来,尽管世界各国都对空化与空蚀开展各自所需的基础性研究工作,但在该领域仍然存在一些有待解决的问题。此外,早年对于空化与空蚀基本理论问题的解答和认识还存在一些谬误,有些计算方法甚至已经过时,很需要知识更新,并

在水电建设中发挥积极作用。

众所周知,纯水即不含任何其他杂质,只以单纯的 H_2O 分子存在的水,具有与金属相近的抗张强度,不可能发生空化。由于水中存在数量巨大、尺寸很小(用肉眼无法看见)的气体微团,或称气核,水的抗张强度很低。当外部压力降低时,气核膨胀,形成空泡,即发生空化。显然,空化现象的发生最主要最直接的影响因素是引用水中气核的数量与尺寸,二者越大,发生空化的压力越高,越易发生空化。

最近一些年作者对清水和 10 余座电站实际引用水的初生空化压力与临界空化压力进行了大量的实测,获得了重要的试验成果和理论成果,并先后公之于世。这些理论成果概括地说,首次证实了清水中的气核状况及其空化压力特性是由宇宙射线电离量即站址所在的海拔高度决定的;含沙水中泥沙浓度越大、粒径越小则空化压力越高,水越易发生空化;当水库遭到化学污染时,以金属原子为核形成的配合物改变了水中气体原子的集聚状态和气核尺寸,从而显著改变水的空化压力特性,极易引发水的空化;当水中进入亲水性良好的、溶解度较高的气体(如氨、氯)时,也会改变水的空化压力特性,使引用水极易发生空化,当然叶轮就很容易发生空蚀破坏。

长期以来,许多水力机械科技书籍乃至专门论述空化与空蚀的文献中,都将空化与水的汽化混为一谈,并将发生空化时的水压认定为当时温度下水的汽化压力或饱和蒸汽压力,这显然是错误的。事实上,空化与汽化乃是两种完全不同的物理现象,前者是基于水中气核初始状况的气体多变过程,后者则为水由液相变为气相蒸汽的相变过程。空化主要与压力有关,与温度 T 几近无关;而汽化则主要与温度 T 有关,但也与压力 P 有关。作者的试验证实:在 $0\sim 36^\circ\text{C}$ 即水轮机与泵引用水工作温度可能变动的范围内,空化压力值,即初生空化压力值与临界空化压力值都与温度 T 几近无关,为常数值,而水的汽化压力在此范围内却增大近 10 倍。

基于上述这些基础性研究成果,作者还提出了水轮机与水泵根据所在站址实测的引用水空化压力特性,计算确定其安装高度的正确方法;给出了分析和确定保障水轮机与水泵空化安全运行的基本条件;建立了水轮机与水泵转轮中空化流场的计算方法。这些方法都在过去的 20 年间在水电工程上获得实用。而上述所有这些具有重要理论和实用价值的内容,已在本书的第 1、4、5、6 章中分别详细论述,成为本书最显著的特点和创新点,希望对我国的水轮机、水泵制造业和水利水电事业的发展产生积极的促进作用。

在第 2、3 章中,主要介绍了水轮机与水泵空蚀的特征、空化与空蚀的试验研究设备与方法、减少空蚀破坏的技术措施、抗空蚀材料的开发以及叶轮表面抗空蚀强化手段等。这里,有关水泵空蚀的内容较水轮机的要少些,因为许多内容对于水轮机与水泵两者的情况大同小异,不宜重复论述。

虽然本书提出的许多新理论、新观点都建立在科学试验结果的基础上,且都先后经过本行专家的评审后正式公开发表,但由于涉及的科学范畴广泛,理论与应用实际的知识梯度较大,内在联系复杂,难免出现不当之处,切望读者批评指正。

最后,在本书撰写过程中,我的博士研究生蒋文山为全书稿的打印整理付出很大劳动,在此表示衷心的感谢。

常近时

2016年2月于北京

目 录

前言

第 1 章 空化与空蚀基本原理	1
1.1 空化与空蚀的发生机理	1
1.2 空化与流体动力学参数的关系	9
1.3 水轮机空化系数与吸出高度	15
1.4 叶片泵的空化系数与吸上高度	22
1.5 天然引用水的成分与性质	25
主要参考文献	29
第 2 章 水轮机的空蚀	31
2.1 水轮机空蚀概述与分类	31
2.2 水动力空化与空蚀的实验室研究	40
2.3 水轮机模型空化试验装置	47
2.4 水轮机空化的比尺效应	57
2.5 空蚀破坏强度及其度量	63
2.6 运行条件对水轮机空蚀破坏的影响	69
2.7 水轮机材料的抗空蚀稳定性	76
2.8 改善水轮机空化性能的途径	82
2.9 超空化的叶片式水力机械	95
2.10 水轮机尾水管的涡带空蚀	100
2.11 水轮机转轮的糙率局部空蚀	104
2.12 三峡水电站水轮机的空蚀	108
主要参考文献	113
第 3 章 叶片式水泵的空蚀	114
3.1 叶片式水泵空蚀性能	114
3.2 叶片泵的空化试验	116
3.3 叶片泵叶轮抗空蚀的表面强化技术	119
3.4 混流式水泵水轮机的空化	121
3.5 城市自来水供水泵的空蚀	125
3.6 叶片式水力机械中泥沙磨蚀与空蚀的联合作用	131
主要参考文献	141

第4章 引用水的空化压力特性	142
4.1 水的空化压力特性的测量	142
4.2 宇宙射线电离强度对清水空化压力特性的决定性影响	146
4.3 含沙浓度相同沙粒粒径不同对含沙水空化压力特性的影响	150
4.4 水的空化压力特性与水的温度近于无关的试验研究	153
4.5 水电站水轮机引用水空化压力综合特性	156
4.6 水库遭化学污染对水质空化压力特性的影响	157
4.7 实测水电站浑水的空化压力特性及其应用	164
主要参考文献.....	173
第5章 空泡动力学基本理论	174
5.1 球形空泡的动力学基本方程	174
5.2 球形纯空泡崩解的雷列解	176
5.3 球形含空气的气泡崩解的雷列解	179
5.4 黏性对空泡动力性能的影响	184
5.5 空泡破灭时冲击压力	187
5.6 空泡的数量与尺寸同引用水空化压力的关系	188
5.7 附着空穴的形成和内部结构	193
主要参考文献.....	196
第6章 空化流动的计算理论与方法	197
6.1 概述	197
6.2 翼型的平面空化绕流	199
6.3 直列厚翼栅局限空化流动的面元奇点解法	205
6.4 任意环列厚翼栅局限空化流动的奇点解法	210
6.5 水轮机转轮准三元空化流动的奇点解法	218
6.6 水轮机转轮三元空化湍流的计算	224
6.7 转轮中实际引用水局限空化流场的三元湍流解法	230
主要参考文献.....	238

第 1 章 空化与空蚀基本原理

1.1 空化与空蚀的发生机理

1. 空化的基本概念

在静止的与流动的液体中,当压力降低到一定限度时,液体内部将发生体积破坏,产生空泡或空穴,这一物理现象称为空化^[1]。

空化只在液体中发生。以天然水为工质的叶片式水力机械中,在某些通流部位流速较高、压力较低,极易发生空化。本书讨论的主要对象是天然水的空化。

对应发生空化状态的压力称为空化压力。水体因压力降低产生第一批气泡时的空化压力称为初生空化压力;当产生大量气泡而使水处于犹如沸腾状态时的空化压力称为临界空化压力。

当气泡或气穴移至压力较高的位置时,会重新崩解,并产生微观冲击压力。当大量气泡在固体构件表面附近崩解时,长时间的高频微观冲击会使材料疲劳破坏,这种破坏称为空蚀。在所有以水为工作介质的机械与设备中,如水轮机、泵、水工建筑物中都存在空化与空蚀造成构件表面的破坏、材料的流失以及机器性能变坏,从而带来每年数百亿元的经济损失。

研究表明,纯水具有同金属相近的抗张强度。使水体破坏的最大张应力为

$$P_p = \frac{2\tau}{R_m} \quad (1-1)$$

式中, τ 为表面张力,在标准状态下水的表面张力 $\tau = 7.4 \times 10^{-3} \text{ kg/m}$; R_m 为表面张力作用的有效距离,对于水来说, $R_m = 10^{-10} \text{ m}$ 。不难算出,纯水的分子破坏强度超过数千大气压。因此,要使纯水破坏,即产生空化是不可能的。

在实际的天然水中,存在一定数量的空气和固体颗粒以及可溶性与不可溶性的化合物,因而大大降低了水的体积强度。水中这些异相介质由各种原因形成数量庞大的、用肉眼难以辨识的、体积很小的气核。当水中压力降低至某一空化压力时,气核膨胀发生空化。显然水的空化与空化压力大小同水质和水中气核的数量与大小,有着十分密切的关系。

在没有泥沙等固体介质的清水中,空气含量 $\alpha = 1.8\% \sim 2.0\%$,其中多数为可溶性氧和氮气,少数为不可溶性呈微团状态的气核。清水中气核是由于宇宙射线

射入水体后,可溶性空气激发聚集形成尺寸在 10^{-9}m 左右、由几个或几百个空气原子组成的团簇(cluster),即气核^[2]。

天然本底辐射主要由宇宙射线和大地 γ 射线组成,其中宇宙射线带电粒子的剂量当量占 30%~40%。在 20km 以下的大气层中,宇宙射线主要由高能的 μ 介质、电子与质子组成。宇宙射线带电粒子射入某介质中时将使其激发或电离,这是大气处于微弱电离状态的原因。宇宙射线在大气中的电离量就是这些带电粒子在空气中产生的绝对电离强度,其单位为 I。

20 世纪后半期,各国学者都曾做过大气中宇宙射线电离量的测量。尽管大气中宇宙射线电离量值与多种因素有关,测量的地理位置与采用的测量仪器有所不同,但电离量随海拔高度的变化规律大体相近;海拔高度越大,电离量越大,且在低大气层中关系曲线是单调上升的。文献[3]给出了地磁纬度为 $12^{\circ}\sim 33^{\circ}\text{N}$ 的 6.4km 以下低大气层中以宇宙射线电离量的实测值为基础的拟合曲线,如图 1-1 所示。可以看出,随着海拔高度的增大,宇宙射线在空气中的绝对电离强度非线性迅速增大。

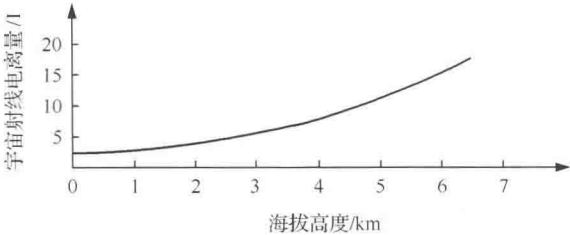


图 1-1 宇宙射线电离量随海拔高度的变化^[3]

文献[4]中首次通过试验证实宇宙射线电离强度对清水空化和空化压力特性的决定性影响。将封闭的瓶装纯净水置于不同海拔高度的地点暴露在大气中,隔绝了除温度与宇宙射线以外的所有外环境影响,经 30 天后取回,在实验室温度保持 20°C 不变时分别测量水样的初生空化与临界空化压力值。这些瓶装水样的空化压力特性只与宇宙射线电离量即清水水样所在的海拔高度相关。表 1-1 所示为 6 种水试样实测的初生空化与临界空化压力的平均值;图 1-2 则示出清水初生空化与临界空化压力值随海拔高度的变化曲线。

表 1-1 6 种水试样实测的初生空化与临界空化压力平均值

地点	北京	青铜峡	八盘峡	龙羊峡	拉萨	那曲
图 1-2 中代号	A	B	C	D	E	F
海拔高度/m	35	1132	1552	2448	3648	4507
初生空化压力/(mH_2O)	4.12	4.87	5.3	5.68	6.47	7.23
临界空化压力/(mH_2O)	0.25	0.48	0.58	0.74	0.94	1.19

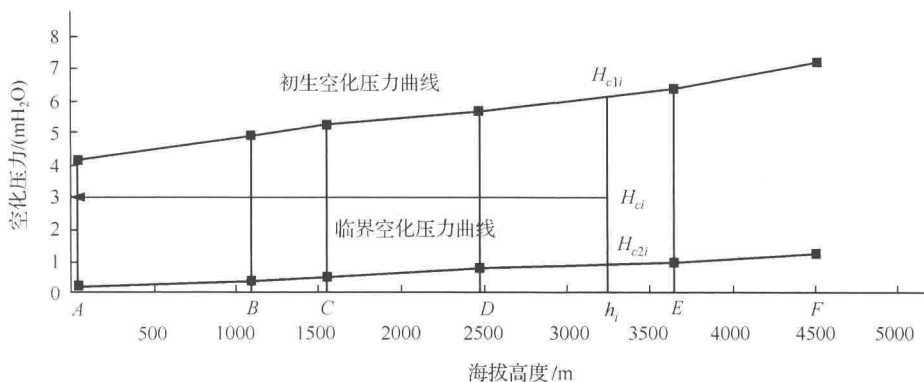


图 1-2 清水初生空化与临界空化压力随海拔高度的变化曲线

可见海拔高度越大则空化压力值越高,其实质是宇宙射线电离量越大,清水中气核的数量与尺寸越大;清水中的气核是宇宙射线辐照的结果。

天然引用水中一般都含有固体杂质,特别是浑水(即含沙水)中存在大量尺寸不同的泥沙。沙粒表面因节理发育存在许多缝隙,其中含有大量不同尺寸的气核。这些气核在水中沙子缝隙内的平衡状态早有文献做过理论分析。但是沙粒表面缝隙中的气核究竟有多少?它们与清水中的气核有什么差别?文献[5]采用清水置入一个长 0.69mm 的沙粒,逐步降低水压,由空化压力测定仪、显微观测仪与数码录像机等设备组成的记录装置,观测记录了沙粒表面发生空泡、空泡增大、增大直至气泡脱离沙粒表面的全过程。图 1-3 示出试验记录的单个沙粒表面的空化过程。

通过这一试验可以得出如下结论:在含沙水中,每个沙粒表面缝隙中确实寄存数量很多、尺寸不等且较清水中要大的微小气核;在其他条件不变的情况下,沙粒越多,即含沙浓度越高,则气核数量越多,越容易发生空化和较严重的空化^[6]。

计算表明,当水中含沙浓度为 $8\text{kg}/\text{m}^3$ 时,假定泥沙粒径 $D=0.02\text{mm}$,每个沙粒表面寄存 10 个气核,则每立方厘米含沙水中比清水时约多 700 万个气核。

近些年我国河流污染严重,水质变坏。许多水电站的水库和水泵站的吸水池中的水质为 V 类或劣 V 类。这种水不能饮用也不能直接用来灌溉;引用这种污染严重的水发电,将因极易发生空化而使水轮机运行状况变坏。贵州乌江上最大的梯级电站构皮滩水电站水库,遭到两家磷化工厂固体废弃物磷石膏的严重污染,水质为劣 V 类。单机功率 600MW 的水轮机尾水管排出的水中,总磷(TP)含量平均为 $2.20\text{mg}/\text{L}$ 。TP 为水溶性有机磷与无机磷的总和,该水样透明度良好,实测的初生空化与临界空化压力值却较清水值高出 $2\sim 2.5\text{mH}_2\text{O}$ ^[7]。

水中的可溶性磷化合物以带点离子状态的水合结晶物质存在,且溶质的微团较大,其中吸附溶解于水中的气体原子形成气核,它的尺寸和数量均较大,因而基于这种气核尺寸的空化压力显著提高。该电站设计时没有考虑受 TP 污染的水质

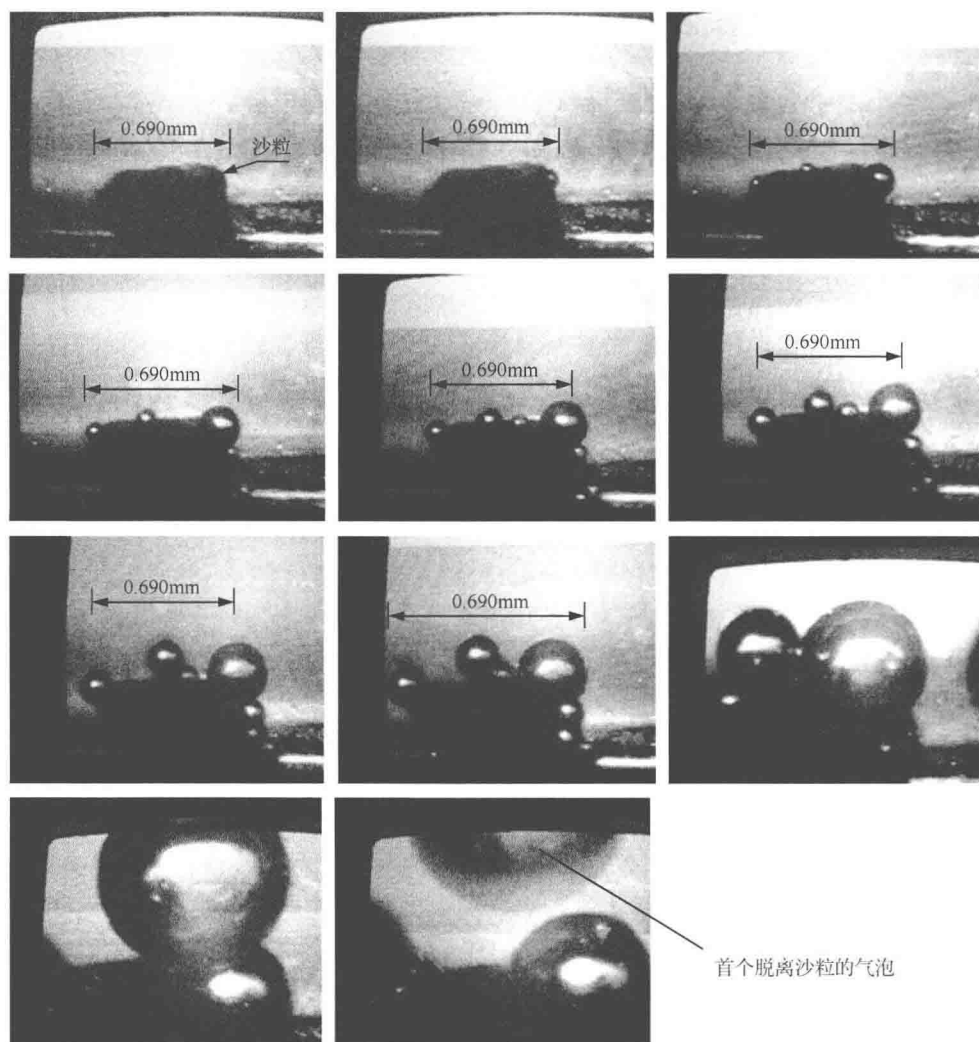


图 1-3 单个沙粒表面的空化过程

空化压力高的实际,以清水条件计算确定了水轮机的安装高度,在运行中将无法满足不发生空化的基本条件。

自然界的静水中大尺寸的用肉眼可见的气泡在浮力的作用下都将浮升,并从水面逸出。观察这些用肉眼可见的气泡可知,尺寸越大,浮升的速度越快。而对于那些看不见的、尺寸很小的气核,将长时间地存在水中,难以逸出。

图 1-4 示出静水中一个直径为 d_0 的球形气泡,在浮力 F 的作用下,克服黏性阻力 W 向上运动。假定气泡的浮升速度为常数 v_0 ,且不大,因此气泡浮升阻力 W 可采用斯托克斯给出的圆球在黏性液体中做匀速移动的总阻力公式计算,即

$$W = 3\pi\rho\nu d_0 v_0 \quad (1-2)$$

式中, ν 为水的运动黏性系数; ρ 为水的密度。

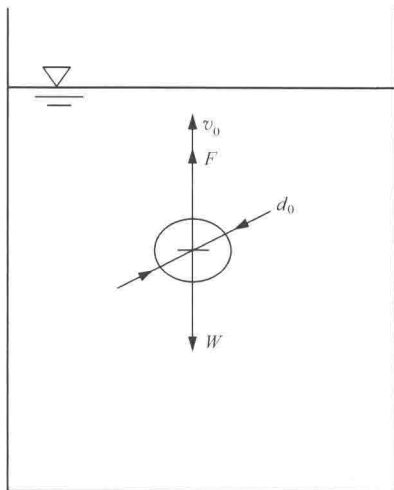


图 1-4 静水中的气泡浮升

球形气泡在静水中所受的浮力,根据阿基米德定律为

$$F = \frac{1}{6} \pi d_0^3 g \rho \quad (1-3)$$

式中, g 为重力加速度。

由于假定 v_0 为常数,所以 $W=F$ 时,由式(1-2)和式(1-3)可得到气泡的浮升速度为^[3]

$$v_0 = \frac{g d_0^2}{18\nu} \quad (1-4)$$

可见气泡直径越小则其浮升速度也越小。

如果取气核直径 $d_0 = 10^{-9} \text{ m}$,代入式(1-4),可求得浮升速度 $v_0 = 0.81 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ 。一年之内气核向上浮升的距离仅为 $2.55 \mu\text{m}$,即气核几乎是不动的。这就揭示了水中气核长期存在而不逸出的机制。

由上述可知,清水、含沙水和化学污染的水,气核的产生机理有着根本的不同,引起空化与空化压力的改变也有所不同,应当分别加以研究,本书第4章将详加介绍。然而,自然界引用水均遭到宇宙射线的照射,水库中均有泥沙和化学污染物,只是其含量有多有少;因此,取用站址实际引用水来研究和确定其空化压力特性,应是值得推荐的好方法。

2. 空蚀的机理

当空泡或空穴随同水流一起连续不断地进入高压区时,气泡或气穴发生瞬间的凝聚,造成频率很高、压力很大的微冲击。如果气泡或气穴崩解的部位发生在固体表面处,由于持续性的微观水击的作用,固体壁面疲劳破坏。此外,在气泡或气穴的崩解过程中还伴有温度升高、发光、电离、化学腐蚀等现象的发生,从而加速了固体材料破坏的进程。这种因空化现象对材料产生的破坏称为空蚀破坏。

造成材料空蚀破坏的主导因素是气泡或气穴突然崩解过程的微观机械冲击,其他因素则是第二位的。关于微观机械冲击作用尚有两种不同的说法。一种认为,空蚀破坏是由气泡崩解过程产生的冲击波造成的,这种冲击波从气泡的中心向外放射,具有很大的冲击力。这种观点获得了很广泛的支持,但根据这种理论计算所得的冲击压力有时很高,有时当计算大尺寸气穴崩解时,计算所得冲击压力很小。另一种观点则认为,空蚀破坏是由气泡或气穴崩解过程液体的微观射流造成的。在气穴完全崩解之前,气穴变形,而后分裂成若干个小气泡的过程中,引起很大的射流流速。由高速摄影拍下这一过程的照片,说明了这一观点的正确性。图 1-5 示出了根据实际拍摄的照片简化的这一过程。

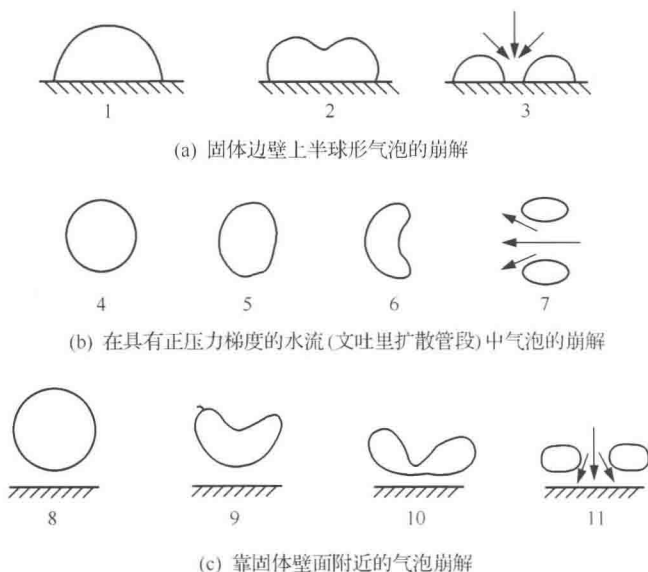


图 1-5 形成微观射流的气泡崩解模型^[1]

1-初始状态;2-气泡表面被干扰;3-形成朝向表面的高速射流;4-开始的球形气泡;5-压力高的一侧气泡变形;6-继续变形;7-形成与流动方向相反的高速射流;8-原始球形气泡;9-气泡背向壁面的表面受干扰;10-水流的侵入;11-形成高速射流

空蚀破坏的冲击波理论常被用来分析小气泡崩解过程的冲击压力,而射流理论则常用来分析大气泡或气穴崩解过程的冲击压力,两种理论均获得普遍的应用。

雷列(Rayleigh)曾对无限大静止的理想不可压缩液体中球形纯空泡的崩解速度进行了数学分析。如果某一原始半径为 R_0 的气泡由于外部压力 P 增大而崩解,压力 P 所做的功应等于气泡表面向心速度动能的增加值,即有如下关系:

$$\frac{4}{3}\pi(R_0^3 - R^3)P = 4\pi R^3 \rho \frac{V^2}{2} \quad (1-5)$$

式中, R 为气泡崩解后的半径; ρ 为液体的密度; V 为气泡表面的向心速度。

由式(1-5)不难得出向心速度,即纯空泡表面的收缩速度为

$$V = \sqrt{\frac{2gH}{3}} \sqrt{\frac{R_0^3 - R^3}{R^3}} = \frac{dR}{dt} \quad (1-6)$$

式中, $H = P/(\rho g)$ 。

由式(1-6)可列出气泡崩解的时间方程:

$$t = \frac{\int_R^{R_0} \sqrt{\frac{R^3}{R_0^3 - R^3}} dR}{\sqrt{\frac{2gH}{3}}} = \frac{R_0 \int_\beta^1 \frac{\beta^{3/2}}{1 - \beta^3} d\beta}{\sqrt{\frac{2gH}{3}}} \quad (1-7)$$

式中, $\beta = R/R_0$ 。当 $\beta \rightarrow 0$ 时,对式(1-6)求精确解是不可能的,只能借助于 Γ 函数求其近似解:

$$t = 0.747 \frac{R_0}{\sqrt{\frac{2gH}{3}}} \quad (1-8)$$

可见,在其他条件相同的情况下,气泡的原始半径 R_0 越小,崩解的时间越短。

从式(1-6)可以看出,如果气泡崩解的终了半径为零,则气泡表面的向心速度 V 将达到无穷大。为了避免这一不可能的状态,可以认为气泡内并非全空,其中含有少量的气体,当气泡崩解时,一部分能量消耗于气体的压缩,因而气泡最终并不完全消失。即使考虑水的压缩性,气泡崩解的速度仍然是十分惊人的。当气泡由原来的半径 R_0 压缩到 $1/50R_0$ 时,可以达到音速,因而冲击力很大。亥勒(Haller)在1933年曾用晶体传感器测量了气泡崩解过程的冲击压力,达数百大气压。由于冲击压力的作用时间甚短,测量结果不够准确。如果用射流理论分析,气泡崩解的冲击压力可达数千大气压,这样大的冲击压力足以使金属材料发生塑性变形,乃至破坏。

在美国鲍尔德水电站,水轮机在变负荷下运转时,在尾水管中可以看到由空蚀

引起的闪光。1964 年加尔曼首次摄录了循环水洞文吐里管中流体动力空蚀的闪光现象,从此,流体动力空蚀的发生同时伴有闪光现象的事实才被众人所公认。但是,产生闪光现象的原因却有不同的说法。多数人认为,由于气泡或气穴崩解时气体受压缩达到很高的温度,从而引起闪光,也就是说,光和热两种现象同时存在。此外,在苏联古比雪夫水电站水轮机上采用电气防蚀措施曾经显著减弱空蚀区域的破坏程度,这说明空蚀破坏过程中电化学腐蚀因素的客观存在。由于发热、电化学腐蚀等因素的作用,加速了空蚀对材料破坏的进程。

图 1-6 示出了单翼型的空化绕流,其中图 1-6(a)表示局限空化绕流的情况,此时在翼型背面形成长度为 l_0 的局限气穴。在气穴的尾部 A 点附近发生气泡的瞬间凝聚,从而发生空蚀破坏。即固体壁面的空蚀破坏区并不在空化的发生部位,而在紧接该部位之后水流连续性重新恢复的地方。如果气泡的崩解过程不发生在固体壁面上,即气穴区域的长度大大超出翼型的长度范围,如图 1-6(b)所示,此时虽然发生较强的空化,但不会对绕流物体的壁面发生任何损坏。气泡崩解过程,即水流连续性恢复的过程完全发生在物体外部,即后面的水中,这种现象称为超空化^[8]。

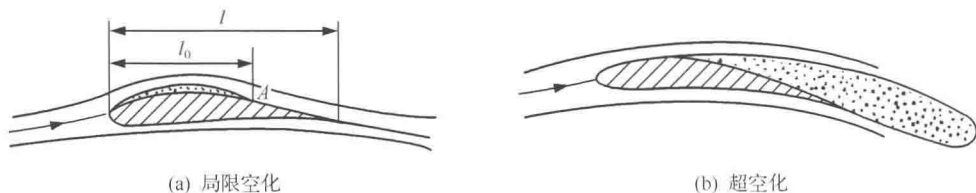


图 1-6 单翼型的空化绕流

长时间遭到空蚀的金属部件表面,呈现出蜂窝状与鱼鳞状的破坏,有时侵蚀深度达数十毫米。图 1-7(a)为铜试件表面片状空蚀凹坑照片;图 1-7(b)为水轮机碳钢叶片遭空蚀破坏的表面照片。有时,大型水轮机转轮遭严重空蚀破坏需大修补

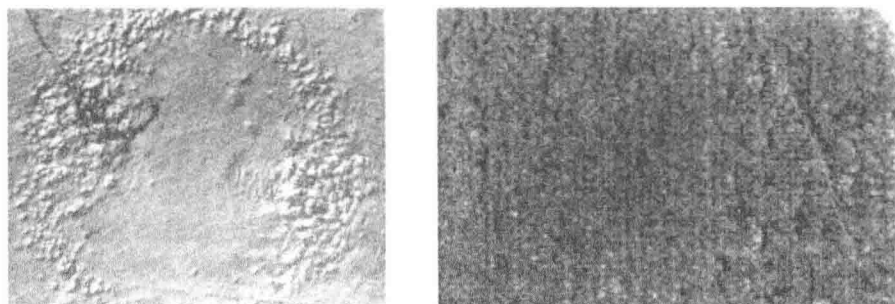


图 1-7 金属材料表面空蚀照片

焊,消耗的电焊条数量达数吨或数十吨,工作量巨大,耗工时很长,除检修费用外,机组停机电能经济损失很大。

1.2 空化与流体动力学参数的关系

对单个绕流物体空化特性的研究表明,伴随系统中的水压力降低与流速的提高,空化越发展。从无空化绕流到空穴已超出物体范围之外的超空化绕流,空化经过了若干阶段,即无空化绕流、初生空化绕流、局限空化绕流和超空化绕流4种状态。决定不同状态的主要流体动力学参数是水压与流速的大小。

图1-8示出某一对称翼型零冲角平面空化绕流和翼型表面的压力分布简图。如果无穷远来流压力 P_{∞} 较大,翼型表面最低压力点压力高于水的初生空化压力 P_{c1} ,将不发生空化。随着 P_{∞} 的连续降低或者来流速度 V_{∞} 的增大,开始发生初生空化、局限空化乃至超空化。

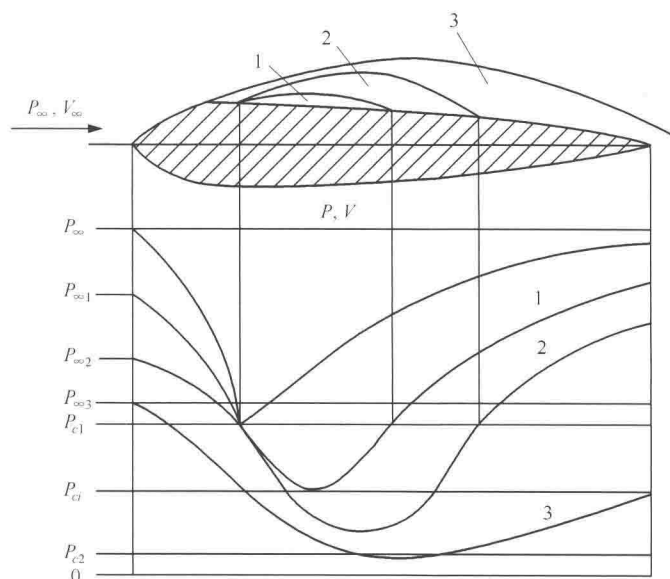


图1-8 某对称平面翼型冲角为零的空化与表面压力

绕流与压力分布:1-局限空化;2-发展的局限空化;3-超空化; P_{c1} -初生空化压力; P_{c2} -临界空化压力;
 P_{ci} -介于 P_{c1} 与 P_{c2} 的空化压力

根据伯努利方程,可以列出无穷远点和翼型表面任意点的比能方程:

$$\frac{P_{\infty}}{\rho} + \frac{v_{\infty}^2}{2} = \frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + hw \quad (1-9)$$

如果不计水力损失 hw ,则由式(1-9)可得