

768819

5215

1996

水轮机中的空化与空蚀

聂荣昇 主编

12
96

水利电力出版社

水轮机中的空化与空蚀

聂荣昇 主编

水利电力出版社

水轮机中的空化与空蚀

聂 荣 昇 主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 8.5印张 185千字

1985年10月第一版 1985年10月北京第一次印刷

印数0001—3330册 定价1.80元

书号 15143·5861

内 容 提 要

本书是高等学校水电站动力设备专业的选修教材。全书共分九章，介绍了空泡动力学的有关知识，着重对水轮机中的空化现象及空蚀破坏的发生、发展进行了分析。同时用一定篇幅对水轮机的空化与空蚀的研究方法、空蚀防护及修理工艺进行了论述。

本书除做为水电站动力设备专业的选修教材外，亦可供从事水电站设计、安装、运行的有关技术人员参考。

前 言

本书是根据“水电站动力设备”教材编审小组，1982年西安会议制订的“教材编审规划”编写的，是水动专业的选修教材。内容包括：空泡动力学基础、空化的压力脉动、空化相似理论、空蚀机理、水轮机中空化与空蚀的特点、水轮机空蚀防护及修理工艺等。

本书由华北水电学院编写，全书共分九章。其中第三章由李胜才编写；第四章由段昌国编写；其余七章由聂荣昇编写；全书由聂荣昇统稿。最后经华东水利学院刘大恺副教授审阅。

本书在编写过程中，力图概括国内外有关水轮机空化与空蚀的研究成果，但限于编者的水平和篇幅限制恐难达到。书中的错误和不足之处，敬请读者指正。

本书在编写过程中，曾参阅了国内外有关研究成果及技术总结报告，并得到有关单位和同行的赞助、支持，在此一并表示感谢。

编 者

一九八四年十一月

目 录

前 言

第一章 空化的基本概念	1
1-1 空化现象	1
1-2 空化的分类	2
1-3 空化的发展过程	5
1-4 空化核	6
第二章 空泡动力学基础	9
2-1 液体中球型空泡的平衡条件	9
2-2 理想液体中球型空泡的压缩和膨胀	11
2-3 含气型空泡的动力特性	15
2-4 粘滞性、表面张力和可压缩性的影响	18
2-5 空泡的非对称溃灭	20
第三章 空化的压力脉动	24
3-1 研究空化压力脉动的意义	24
3-2 研究的方法和实验技术	25
3-3 空泡脉冲波的基本方程	27
3-4 空化流场中的压力脉动分析	32
3-5 空泡脉冲特性与空蚀效应的关系	42
第四章 水轮机空化的模拟理论	44
4-1 概述	44
4-2 空化现象的模拟范围	44
4-3 空化的模拟准则	45
4-4 水轮机空化现象的基本模拟要求	52
4-5 比尺效应	54
第五章 空化的破坏作用	58
5-1 空化的破坏作用	58
5-2 空蚀区的部位	58
5-3 蚀坑的形成及材料的剥蚀过程	60
5-4 空蚀机理	61
5-5 空蚀强度的影响因素	64
第六章 水轮机的空蚀破坏	67
6-1 水轮机中的空化现象	67
6-2 反击式水轮机的空化特性	69
6-3 水轮机吸出高度的确定	74

6-4	水轮机空蚀破坏的特征	76
6-5	运行条件对空蚀强度的影响	79
6-6	空蚀和磨损的联合作用	84
第七章	水轮机空化与空蚀的研究方法	88
7-1	空化系数的数值计算	88
7-2	水轮机空化特性的模型试验及原型观测	90
7-3	材料抗蚀能力的测定	94
第八章	空蚀防护	101
8-1	叶片整型和加设导流板	101
8-2	非金属保护涂料	103
8-3	补气	107
8-4	尾水管内装设限流装置	111
第九章	空蚀修复	115
9-1	水轮机最优检修周期的确定	115
9-2	空蚀破坏的检查和标示	116
9-3	补焊材料及其选择	118
9-4	修复工艺	119
9-5	叶型测绘	122
参考文献		126

第一章 空化的基本概念

1-1 空化现象

日常生活中我们大家熟知的沸腾,是液体汽化的一种形式。沸腾的发生主要取决于液体内部温度的变化,同时也与液体表面压力有关。例如液态水在一个大气压下加温到100℃,水就沸腾了。当表面压力降到0.24个大气压时,只要加温到20℃水也能沸腾。表面压力不同沸点也就不同。通常把液体在一定压力下加温而汽化的现象叫做沸腾。而在一定温度下降低压力也可使液体汽化。例如流动中的液体,根据理想不可压缩流体的伯努力方程,单位重量的液体在流线上任意两点的压能、动能和位能有如下关系

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 = \text{常数} \quad (1-1)$$

式中 γ ——液体比重(公斤/米³);

g ——重力加速度(米/秒²);

V ——绝对速度(米/秒);

P ——压力(公斤/米²);

z ——位置高度(米)。

由式(1-1)可知,如果液体在运动过程中,速度进一步加大或使位置升高,那么该点的压力 P 就要减少,当流线上某点的压力降到相应温度下的饱和蒸汽压力 P_v 时,液体便由液态变成水蒸汽。在工程上把静止的或流动的液体,在一定温度下降低压力使其汽化的现象通称空化。空化过程能在极短的时间内突然发生,使液体的连续性遭到破坏,在液体中形成明显的充满蒸汽(或气体)的空泡。如果液体是流动的,空泡将随着液体一起运动,空泡的尺寸将因液体内部压力的变化涨大或缩小。当空泡移入高压区时,泡内的水蒸汽将凝聚,气体将被溶解,空泡即溃灭消失。同时产生极高的压力并伴随有高温、放电、化学反应产生,使固体边壁遭到剥蚀破坏。

空泡将因内部所含气体的不同有不同的特性。充满气体的空泡称为含气型空泡,这种空泡的生长主要取决于外部压力的变化,当外部压力降低到低于泡内压力时空泡即开始涨大,通常这种空泡的发展速度比较缓慢。当液体内部某点压力降低到低于该温度下的汽化压力时就会产生蒸汽型空泡,蒸汽型空泡的发展非常急速。空泡在膨胀过程中,如果遇到外压力的增加则空泡的增长就会受到限制而停止膨胀或向相反方向变化而缩小。

通过以上分析可以把空化现象概括为如下几个要点:

(1) 空化是静止的或流动的液体中的一种动态过程。无论固体或气体,在正常情况下都不会发生这种现象。

(2) 空化是液体中压力降低的结果,只要使压力降低并保持在液体的性质所决定的临界压力以下一定时间,空化就可能发生。所以可以通过控制压力来控制空化的出现及其

变化过程。

(3) 空化现象是一种物理变化过程，它涉及空泡生长、压缩和溃灭的全过程。

1-2 空化的分类

根据实验观察，发现空泡的存在形式与空化区的压力场有密切关系。同时还受固体边界形状、液体的物理特性和所含杂质的特性的影响。空化现象按空泡存在形式和产生原因分为如下四类：

1. 游移型空化

游移型空化是由在液体中移动的孤立的瞬态空泡或空泡群组成的空化现象。这些空泡是在液体中生成并随着液体一起流动的。空泡在流动中随着流场压力的变化膨胀、收缩、溃灭。游移的瞬态空泡，可以沿固体边壁的低压点初生或在液体内部移动的漩涡的核心部位出现。这种空化的显著标志是空泡随液体的流动而移动。图 1-1 是典型游移空化照片^[3]，空泡的形状基本呈球型，泡的最小尺寸为 2.86×10^{-3} 厘米。

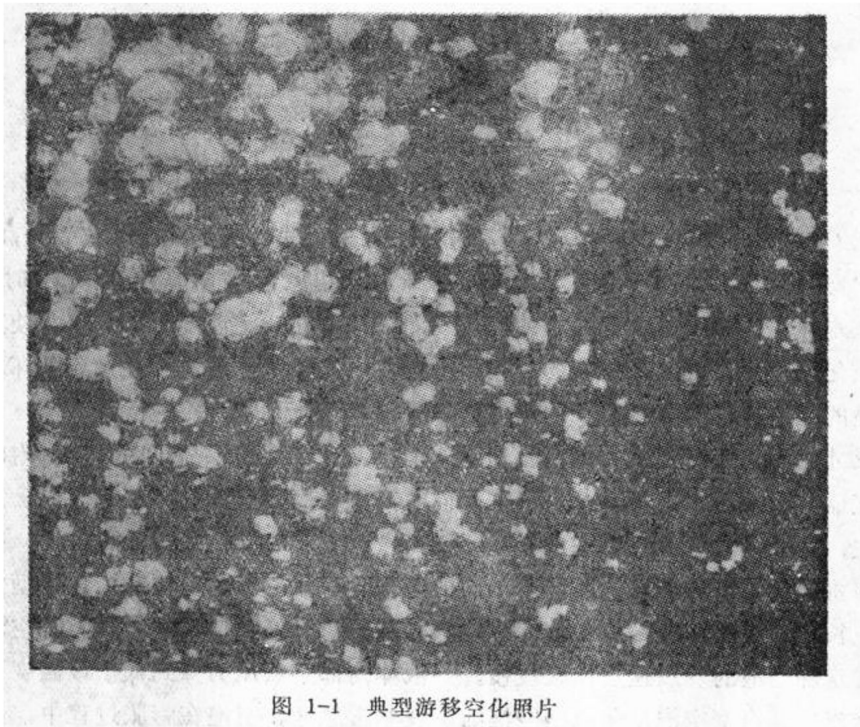


图 1-1 典型游移空化照片

图 1-2 是游移空泡发育过程的高速摄影照片。水的流动方向自右向左，照片按曝光顺序排列，每幅照片的时间间隔是 $1/20000$ 秒。从照片中可以清楚地看到空泡的尺寸是沿着流动方向变化的。水流在进入低压区以后，空泡开始发育并逐渐长大，空泡尺寸达到一定数值后，由于外压力的增大，而空泡的膨胀受到限制并逐渐收缩，收缩到最小尺寸以后，由于泡内压力大于外压力，空泡就再一次反向膨胀。一般空泡初生以后要经过 $2 \sim 3$ 次膨胀和收缩循环才溃灭消失。从空泡生存期间尺寸的变化，可以看出空泡周围有脉动压力

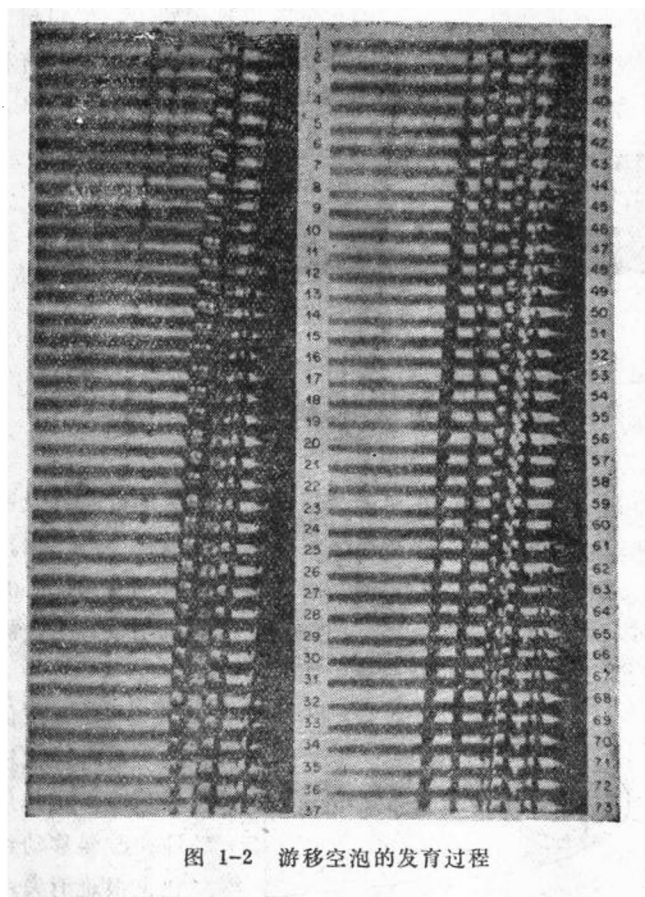


图 1-2 游移空泡的发育过程

存在。

2. 固定型空化

从相对意义来讲，固定型空化是一种相对稳定的空化形式。空化初生以后，形成附着在边界上的空腔，这种空泡称为固定空泡。固定空泡的表面有时还可以观察到强烈的无力脉动，并在固定空泡的表面，有许多小型的瞬态空泡掠过。固定空泡的长度与绕流体的几何形状、表面粗糙度、液体的物理性质以及流场中压力、速度的分布有关。

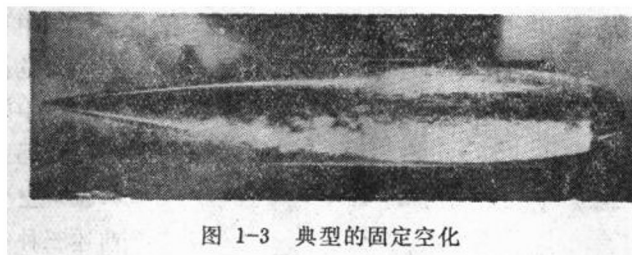


图 1-3 典型的固定空化

固定空泡并不总是稳定的，当空泡长度发展到一定程度，流场中的负压力梯度达到一定数值时，紧靠导流体的液体流速将降低到零，紧接着就会出现向上游移动的回注水流，空泡将逐渐脱离固体边界而随水流漂移。稍后将在同一位置观察到第二个和第三个固定空泡出现。

当固定空泡的长度发展到超过绕流体的尺寸时,这种固定空化叫超空化。超空化的重要标志是固定空泡的尾部跳离绕流体。这为防止空化剥蚀破坏提供了有利条件。因此,超空化近年来在水力机械的研究中引起广泛的重视。图1-4是典型的超空化。



图 1-4 典型超空化照片

游移空化和固定空化的一个共同点,是由于液体内部压力的降低,在液体中形成空腔。一般说来游移空化是这两种空化中较为简单的一种空化形式。

3. 漩涡型空化

漩涡型空化经常出现在水轮机、水泵的出口边、螺旋桨的叶梢以及钝头绕流体的尾部、淹没射流的界面上。由于这种空化形态多呈螺旋型,故称漩涡空化。通常漩涡的运动是不稳定的。所以,这种空化也是不稳定的、瞬息多变的。当漩涡中心的绝对压力降低到液体汽化压力以下时,就会产生漩涡空化。图1-5是水轮机尾水管中漩涡空化的现场临摹图^[6]。图1-6是螺旋桨上漩涡空化的高速摄影照片。

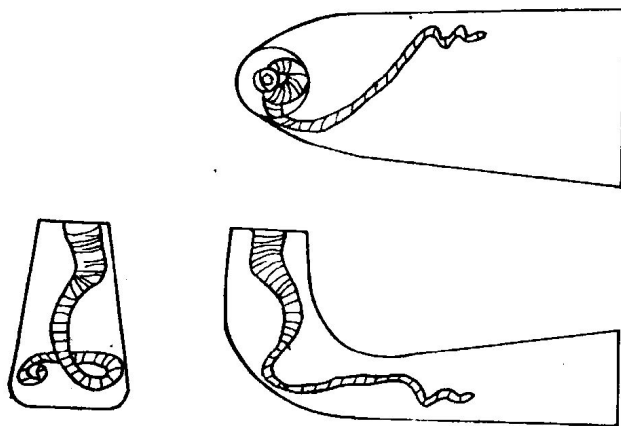


图 1-5 水轮机尾水管中的漩涡空化

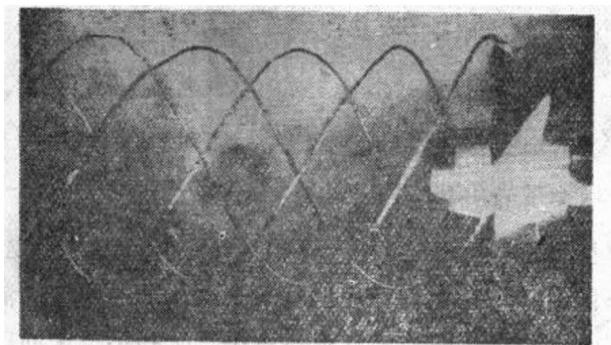


图 1-6 螺旋桨上漩涡空化高速摄影照片

与游移空化相比,漩涡空化的寿命可能比较长。因为漩涡一旦形成,在其角动量的维持下,即使漩涡移动到高压区,漩涡空化也很难消失。因此,漩涡空化的溃灭速率很缓慢,因而其溃灭压力比较小。由于漩涡只能在液体内部存在,所以,只有漩涡接触到绕流体的表面或邻近物体的表面溃灭时,才对物体起到破坏作用。同时,由于漩涡的不稳定又将在流场中引起压力脉动,此脉动压力将危及机器的稳定运行。水轮机中的间隙空化和空腔空化均属漩涡空化。

4. 振动空化

前述三种空化有一共同特点,即某一流动单元仅通过空化区一次。对振动空化而言,造成空泡生长、溃灭的作用力是液体中一系列连续的高强度、高频率

的压力脉动, 这一压力脉动是由于受到物体的往复振动引起的, 当压力脉动幅值足够大时, 就使液体空化。所以, 脉动压力场的存在, 是这种空化的重要标志。

产生振动空化的例子很多, 如强烈振动的并与液体直接接触的机器部件的表面。象内燃机等机械的汽缸冷却套、磁致振动仪试件的表面、声纳系统中声波发生器的表面等。振动空化的强度取决于振源的振动强度和振动频率以及振动体表面的几何形状。振动空化出现的部位与波列的形式有关。如果波列是集成的或聚焦的, 则在液体中的焦点处空化强度最大; 如果波列是平面波或球型波, 则空化在振动体的表面出现。图 1-7 是不锈钢球表面云状振动空化的照片。

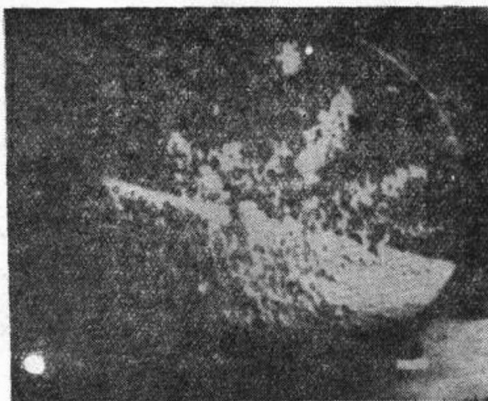


图 1-7 不锈钢球振动空化照片

1-3 空化的发展过程

如前所述, 空化现象是一种与液体的压力有关的动态过程。它的出现和发展, 都与液体流速和压力分布有着密切关系。就固定空化而言, 它的发展过程可以用空化初生、空化的发育以及回流充填和溃退再生几个阶段来描述。

空化的初生是指在绕流体的表面开始形成极小的可见空泡区而言。当绕流体表面沿水流方向有一个较陡的负压梯度时, 在绕流体上就会出现一极薄的透明层并在其端部可以看到一条与水流垂直的极细的分界线, 如果, 压力稍有升高此空泡即消失, 此即空化初生。如图 1-8 所示为一直径 5.08 厘米的半球头圆柱试体, 在流速大于 15.2 米/秒时空化初生的照片。

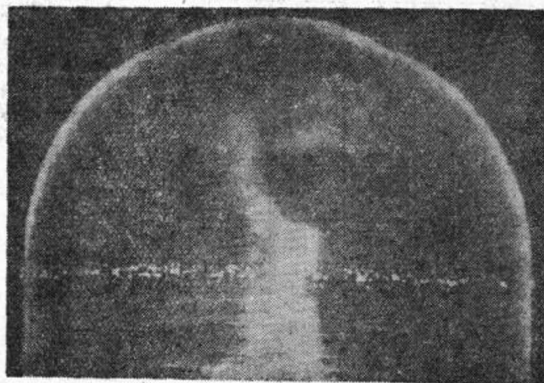


图 1-8 空化初生照片

如果用显微镜放大, 可以发现这一空化层系由许多微小空泡组成。空化初生受液体的物理性质、液体流速及压力分布的影响, 同时与过流表面的几何形状有关。如果流速较低、压力梯度比较平缓, 则空化的初生就难以用肉眼直接观察到, 在这种情况下空化的初生具有一定随机性。

空化初生后, 如果系统压力进一步降低, 初生空化区将沿着水流方向加长, 沿着水流的垂直方向加厚。图 1-9 为同一试件在压力进一步降低时空化发育情况的照片。

当空泡的长度和厚度发展到一定数值, 总的负压梯度持续到足够长的距离时, 紧靠导

流面的液体流速将下降到零，在反向压力的作用下，空泡的尾部将会出现一反向水流沿边界向上游推移，空泡将逐渐与边界分离，此即空泡的回注充填过程。随着过程的继续，主

流线向外排挤，进而使空泡完全脱离边界而随水流飘移。随后将有第二个新的空泡在原部位形成。这就是空泡的溃退再生阶段。图1-10为空泡回注充填及溃退再生过程的照片。

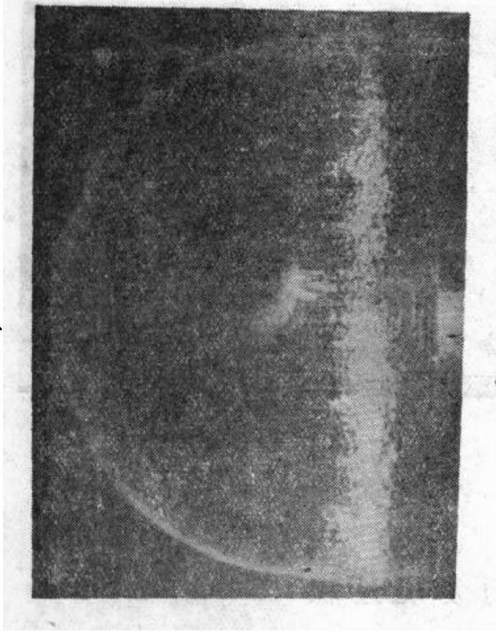


图 1-9 空化发育照片



图 1-10 空泡回注充填和溃退再生

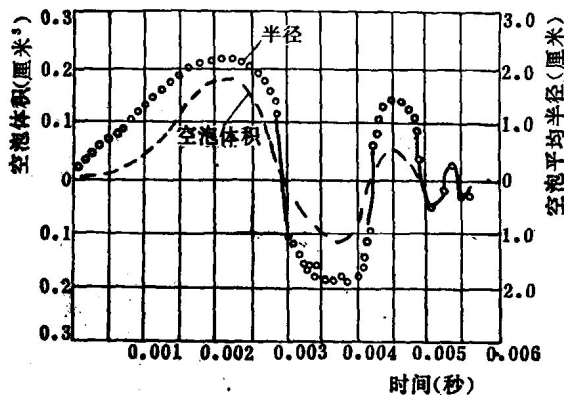


图 1-11 空泡生长、压缩和反弹过程的图解示意

大约为初始体积的65%，由此可见空泡膨胀压缩过程中将有能量消耗。图1-11示出了孤立空泡生长、压缩和反弹过程的图解示意^[4]。

1-4 空 化 核

和任何事物一样，外因是变化的条件，内因才是变化的根据。液体压力的降低只是空化产生和发展变化的条件，而不是空化产生的根据。这已为很多实验所证实。实验证明，

即使是同一种液体，由于纯度不同空化产生的条件也不相同。例如纯水在几千个大气压拉力的作用下，也不会破裂而出现空化。同一种液体经过不同方法的处理，空化初生压力也各异。由此说明，空化不仅与压力有关，而且还受液体本身特性的影响。长期研究表明，液体空化最根本的控制条件是液体的抗拉强度。表 1-1 给出了液态水用不同方法测得的抗拉强度值。

从表 1-1 可以看出水的抗拉强度，因测量方法的不同其值相差很大。造成这种结果的主要原因，首先是液体本身的纯净程度不同，其次是由于使用工具的不同。实验证明液体和固体分界面上的附着力，即使是湿润性很差的液体和固体界面，其值都比液体分子之间的吸引力大得多。因此，影响抗拉强度的主要因素，是液体本身所含杂质的影响。这些杂质包括固体的、液体的和气体的。根据实验测定，这些杂质中起主要作用

表 1-1 水的抗拉强度测量值

方 法	测 试 者	抗 拉 强 度 (大气压)
玻璃毛细管	伯索利特	50
	狄克逊	50~100
	迈耶	34
	文森特	157
钢合金细管	里斯，特里芬纳	13

的是那些不溶于水的、肉眼看不见的、直径大约在 10^{-5} ~ 10^{-6} 厘米的微小气(汽)泡，统称气核。但是人们都知道，气泡或水蒸汽泡很难在液体中保持稳定，首先一定尺寸的未溶解气泡会上升到表面而逸出。能稳定存在于液体中的气体，只有那些隐藏在容器壁上微观裂隙中的微量气体。下面简要介绍哈维等人提出的，固体容器边壁微观裂隙中寄生气核模型。

设有一非亲水性容器壁，其裂缝的夹角为 2α ，在裂缝中形成一液—气分界面，如图 1-12(a)所示。接触角为 θ_e 。在平衡状态下有如下关系式。

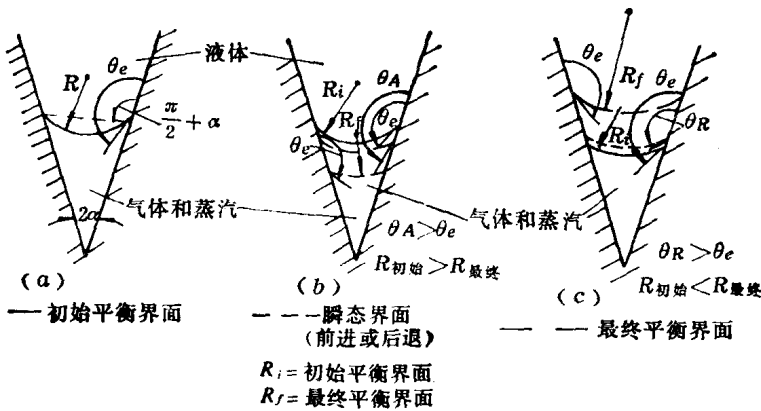


图 1-12 气体—蒸汽空泡的稳定分析

(a) 液体被气体饱和。平衡位置的界面半径为 R ，接触角 $\theta_e > \frac{\pi}{2} + \alpha$ ；(b) 液体未被气体所饱和， R 减小，液体进入裂缝， $\theta_A > \theta_e$ 。当气体被推向前进， θ_A 减小，直到平衡为止，这时接触角又恢复到 θ_e ；(c) 液体被气体所过饱和。 R 增大，液体后退， $\theta_R > \theta_e$ ，当气体停止前进时， θ_R 增大。为保持平衡，接触角又恢复为 θ_e 。

$$P_g + P_v - P_0 = -\frac{2\sigma}{R} \quad (1-2)$$

或
$$\Delta P = -\frac{2\sigma}{R}$$

式中 P_g ——泡内气体分压；

P_v ——饱和蒸汽压；

P_0 ——泡外液体压力；

σ ——液体的表面张力；

R ——分界面曲率半径。

式(1-2)中负号表示液体压力大于泡内压力，液体在界面凹面一侧。

首先分析界面附近的液体，所含气体没有达到饱和状态的情况。在此情况下泡内气体将向外扩散而被液体溶解，于是液体将向缝隙中推进。此时界面接触角 θ_A 将增大即 $\theta_A > \theta_0$ ，且界面的曲率半径将小于平衡状态下的值。气体被溶解后，泡内气体压力降低、界面在 P_0 的推动下继续前进。当界面附近液体含气达到饱和时，接触角又恢复到平衡值，于是界面又稳定在一个新的平衡位置。此时的界面半径 R_i 将小于起始半径 R_0 即 $R_i < R_0$ 。界面两侧在平衡状态下压力差总是负值，缝隙中寄存的气体永远不会被完全溶解。

当界面附近的局部液体含气达到过饱和时，气体将向泡内扩散从而使空腔体积增大、界面曲率半径增大、接触角减小，随着气体的扩散交界面继续后退。当扩散达到平衡时，接触角仍恢复到平衡值，于是交界面又处于一个新的平衡位置。如果在接触角 θ_R 小于 $\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right)$ 之前不能达到平衡，则气体和液体交界面的曲率将改变正负号，空泡将从缝隙中鼓出，一部分气体被释放出来。但仍会有部分气体被封闭在缝隙中。当外压力降低到低于泡内压力时，缝隙中的空腔将不断地向液体中播散微小气核。任何固体边壁都不可能是绝对光滑的，边壁上的裂隙、凹坑、划痕总是存在的。而且任何液体都不可避免含有一定数量的悬浮的固体粒子，这就更使液体中含核量大大增加。这种微小气体核子的存在是液体空化的根本原因。

第二章 空泡动力学基础

在第一章中简单的介绍了空化现象的一些基本概念。对空化现象有了一些初步了解。为了深入了解空化的破坏作用，还要对空泡的膨胀和压缩过程的力学特性有所了解。为此下面将就雷利等人^[12,13]建立的空泡动力学的一些基础知识，作简要的介绍。

2-1 液体中球型空泡的平衡条件

这里首先对静止状态下孤立的球型空泡进行分析。设想有一球泡在液体中处于平衡状态，如图2-1所示。

在泡体上作用着液体压力 P_L ，泡内作用着气体压力 P_i ，在分界面上还作用有表面张力 σ 。如果取半球为分离体，可以写出其平衡方程

$$\pi R^2 P_i - \pi R^2 P_L = 2\pi R \sigma \quad (2-1)$$

化简 $P_i - P_L = \frac{2\sigma}{R}$

或 $P_L = P_i - \frac{2\sigma}{R}$

式中 P_L ——泡外液体压力；

P_i ——泡内气体分压；

R ——球泡半径；

σ ——液体的表面张力。

如果泡内不仅含有气体而且还含有水蒸汽，并令 P_g 表示气体分压， P_v 表示饱和蒸汽压力，则泡内压力即可写成

$$P_i = P_g + P_v$$

上式便改写成

$$P_L = P_g + P_v - \frac{2\sigma}{R} \quad (2-2)$$

在空泡体积变化过程中，泡内汽化压力可以认为是个常数，而气体分压则是变化的。它的变化规律根据物理学知道有三种情况：

按气态方程变化 $P_g = \frac{NT}{R^3} \quad (2-2a)$

等温变化 $P_g = P_{g0} \frac{R_0^3}{R^3} \quad (2-2b)$

绝热变化 $P_g = P_{g0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \quad (2-2c)$

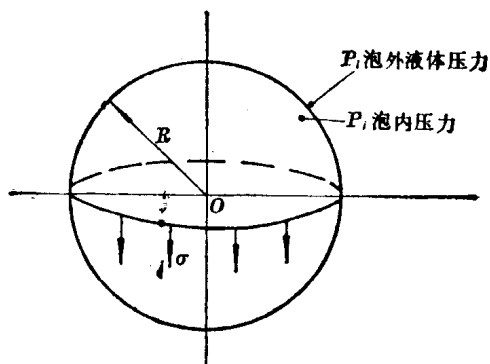


图 2-1 球泡的平衡状态

式中 T ——绝对温度;

N ——气体常数;

γ ——绝热指数。

与上述三种状态相对应, 式(2-2)便有三种不同形式

$$\left. \begin{aligned} P_L &= P_v + \frac{NT}{R^3} - \frac{2\sigma}{R} \\ P_L &= P_v + P_{g0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 - \frac{2\sigma}{R} \\ P_L &= P_v + P_{g0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - \frac{2\sigma}{R} \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

初始状态的气体分压 P_{g0} 可以表示为

$$P_{g0} = P_{L0} - P_v + \frac{2\sigma}{R_0} \quad (2-4)$$

把式(2-4)代入式(2-3), 可得三种状态的平衡方程, 就等温变化该方程式为

$$P_L = P_v + \left(P_{L0} - P_v + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \frac{R_0^3}{R^3} - \frac{2\sigma}{R} \quad (2-5)$$

由此可看出泡外任一点的压力不仅与所处位置有关, 而且与空泡的初始半径以及液体的物理性质有关。图2-2是根据式(2-5)绘制的不同半径的球泡泡外压力与半径的关系。

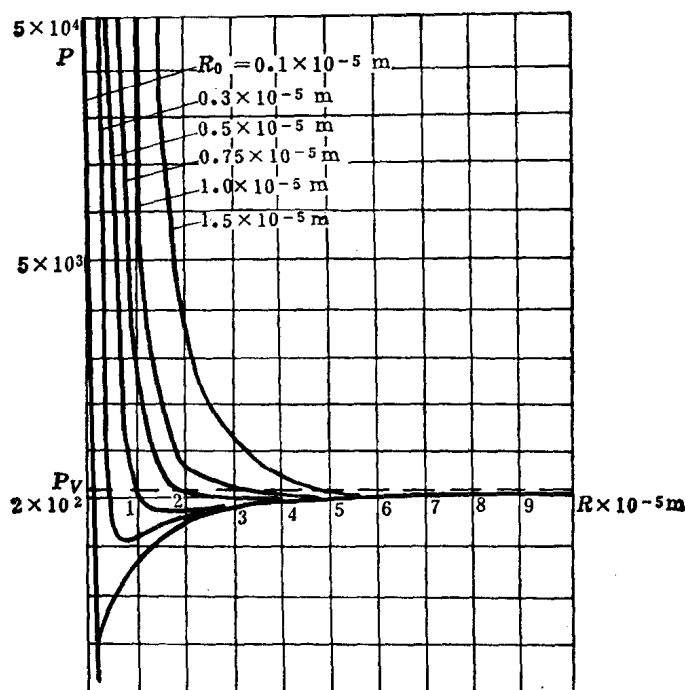


图 2-2 平衡压力与半径关系

由图2-2可以看出, 不同半径的球泡在平衡状态下外压力与半径的变化规律是不同的。每一个不同半径的球泡, 都有两个不同的变化过程。当所研究的空泡处于左半支时, 空泡