

Cavitation and Erosion

# 空化与空蚀

张林夫 董地清 编著



天津大学出版社

# 空化与空蚀

张林夫 夏维洪 编著

河海大学出版社

## 内 容 提 要

本书系统论述空化与空蚀问题，反映了国内外多年来的主要研究成果。

全书共分七章。前四章介绍空化现象，空化的初生，空泡动力学等，为讨论研究空蚀的基础；五、六两章介绍空蚀的机理和空蚀的防护，并联系工程应用讨论避免空蚀结构的设计；第七章介绍空化与空蚀的试验设备及相似准则。

本书可作为水利水电，水力机械，船舶、石油、化工、冶金等领域中水动力学专业研究生学习该课程的教材，也可供有关科技人员及高等院校师生使用、参考。

## 空 化 与 空 蚀

张林夫 夏维洪 编著

\*

河海大学出版社出版  
江苏省新华书店发行  
江苏省如东彩印厂印刷

\*

开本787×1092 1/32 印张8.5 字数194千字

1989年11月第一版，1989年11月第一次印刷

印数 1—1000册

\*

ISBN 7-5630-0163-8/TV·25

定价：1.70元

# 前 言

自从本世纪初在船舶螺旋桨中出现空蚀破坏的实例以来，空化与空蚀问题已成为水利水电、水力机械、船舶、石油、化工、冶金以及宇宙航行等部门十分关切的课题，国外曾开展了广泛而深入的研究。50年代以来，随着我国高水头水工建筑物的大量兴建，水力机械及船舶工业的发展，国内水利水电、水力机械及船舶等有关部门也开始对这一课题进行探讨，积累了不少有价值的成果。

1979~1980年间，本人相继给河海大学（原华东水利学院）及南京水利科学研究院研究生讲授“气穴与气蚀”课程。在讲稿的基础上，于1980年10月印成讲义，1984年5月又修订重印。该讲义曾多次在研究生暨流体力学师资班及流体力学专门化本科生中使用。这次出版时，在1984年印本的基础上，又作出了较大的修订和补充。

迄今，国外已出版若干本有关空化与空蚀问题的专著，各有特色。本书博采众家之长，尽量搜集国内外主要的最新成果，其中也包括作者多年的实践经验和研究成果。作为一本教材，本书强调基本理论及基本概念，所涉及的问题比较广泛，公式推导也较详尽，便于读者自学。本书很注意联系工程实际，尤对水工建筑物的防空蚀措施介绍较多，可供有关科技人员参考。

本书共分七章，前四章介绍空化理论，五、六两章介绍空化机理及免蚀措施，第七章介绍模型试验。其中第七章由夏维

洪同志供稿，其他各章均由本人执笔，并负责全书定稿。

在本书定稿过程中，先后经汪胡桢教授、顾兆勋教授、张长高教授审阅，谨表谢忱。但限于作者水平，不当或谬误之处在所难免，敬请读者批评指正。

张林夫 于河海大学

1988年9月

# 目 录

## 前 言

第一章 导 论	( 1 )
§ 1—1 空蚀破坏实例	( 1 )
§ 1—2 空化现象	( 4 )
§ 1—3 空化的类型	( 7 )
§ 1—4 空化的影响后果	( 11 )
§ 1—5 空蚀问题的研究概况	( 13 )
第二章 空化的初生	( 15 )
§ 2—1 概 述	( 15 )
§ 2—2 热力学特性函数简介	( 16 )
§ 2—3 发生相变时压强与温度的关系	( 19 )
§ 2—4 液体的抗拉强度	( 23 )
§ 2—5 气核及其稳定	( 29 )
§ 2—6 固体边界和液体中杂质的作用	( 37 )
§ 2—7 液体中含气量的作用	( 40 )
§ 2—8 紊流和边界层的作用	( 45 )
§ 2—9 空化数与初生空化数	( 50 )
第三章 瞬变空泡力学	( 55 )
§ 3—1 概 述	( 55 )
§ 3—2 Rayleigh 问题	( 55 )
§ 3—3 Plesset 问题	( 64 )
§ 3—4 考虑粘性效应的影响	( 73 )
§ 3—5 考虑含气量及温度效应的影响	( 81 )
§ 3—6 考虑气体扩散的影响	( 87 )
§ 3—7 空泡溃灭压强	( 96 )
第四章 固定空泡力学	( 100 )

§4-1	概 述	( 100 )
§4-2	脱体水流与固定空化	( 102 )
§4-3	固定空化的周期性	( 110 )
§4-4	尾流空化	( 114 )
§4-5	超空化	( 118 )
<b>第五章</b>	<b>空蚀基础</b>	<b>( 130 )</b>
§5-1	概 述	( 130 )
§5-2	空蚀的机理	( 134 )
§5-3	流速对空蚀的影响	( 139 )
§5-4	材料的抗空蚀性能	( 144 )
§5-5	影响空蚀的其他因素	( 151 )
§5-6	减免空蚀的措施	( 154 )
<b>第六章</b>	<b>免空蚀边界的设计与控制</b>	<b>( 165 )</b>
§6-1	概 述	( 165 )
§6-2	表面不平整	( 167 )
§6-3	闸门槽	( 182 )
§6-4	泄水道进口段	( 192 )
§6-5	差动式挑流坎	( 200 )
§6-6	消能工	( 212 )
§6-7	掺气减蚀设施	( 216 )
<b>第七章</b>	<b>空化与空蚀的模型试验</b>	<b>( 223 )</b>
§7-1	概 述	( 223 )
§7-2	空化水流相似准则	( 224 )
§7-3	空化模型试验的比尺效应	( 225 )
§7-4	空泡式空化的相似问题	( 235 )
§7-5	空蚀模型相似准则	( 240 )
§7-6	减压箱	( 247 )
§7-7	循环水洞	( 253 )
<b>参考文献</b>		<b>( 262 )</b>

# 第一章 导 论

## §1—1 空蚀破坏实例

首先介绍几个工程破坏实例。

1. 美国包尔特 (Boulder) 坝泄洪洞。该泄洪洞由于在  
施工时定线不准, 发生局部偏折, 在1941年汛期连续泄洪四个  
月后检查发现, 下游形成了长35m、宽3.5m、深13.7m的巨大  
蚀坑。泄洪时最大流量为 $1070\text{m}^3/\text{s}$ 。破坏区的情况如图1—1所  
示。

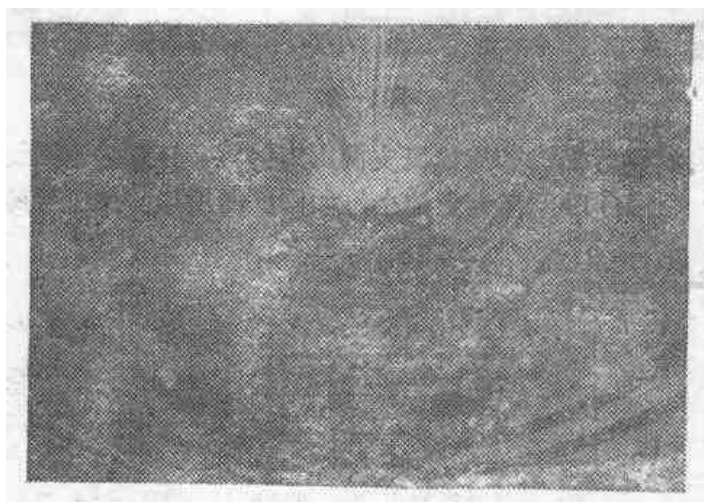


图1—1

2. 苏联伏尔加水电站闸墩。当1956年春汛经过尚未竣工  
的楔口接缝断面的坝体时, 闸墩表面发生轻重不同的剥蚀。最



严重的剥蚀大多发生在有支托的厚闸墩上，闸墩钢筋暴露，并形成深达1m的大坑。如图1—2所示。



图1—2

3. 浙江省横锦水库灌溉支洞压力钢管。该管为便于安装闸阀，将闸阀段洞径大大缩小，如图1—3所示。1961年竣工放

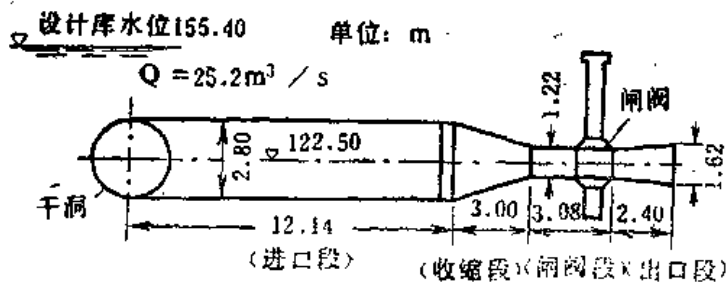


图1—3

水后检查，发现闸阀段洞壁上钢材严重剥蚀，点斑坑直径大小为1 cm~5 cm，深度为0.1 cm。

4.湖南省柘溪溢流坝差动式鼻坎。该坝于1962年汛期过水后，其矩形差动式鼻坎发生了严重的破坏，在12个高坎中的23个侧面上，混凝土大块剥蚀，钢筋成排切断，总剥蚀面积近 $24\text{m}^2$ ，坑深最大达 $1.1\text{m}$ 。1963年改建成梯形坎，运转后齿侧仍发生严重剥蚀，后经采用多种材料防护均无效。图1—4所示为5号墩右坎面的剥蚀情况。

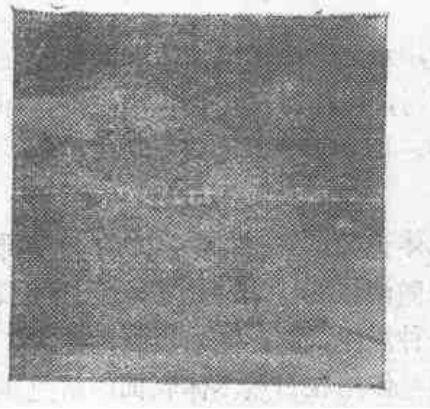


图1—4

本世纪初，在船舶螺旋桨中首先发现这一类破坏现象，随着高水头水工建筑物和水电站的相继兴建，从20年代以后，水利工程中也陆续发现这类破坏现象。近六十年来，国内外大量的工程破坏实例表明，在高、中水头水工建筑物中的某些部位（例如，落差大于 $40\text{m}$ 左右的溢流坝面，水头高于 $20\text{m}$ 左右的消力墩，水头高于 $10\text{m}$ 左右的闸门槽等），以及水轮机的叶片上，当设计不周或施工不慎，甚至运用不当时，常常会发生材料剥蚀的现象。在混凝土和金属的表面，轻则造成麻面，重则形成蜂窝状甚至巨大洞坑，这种现象工程上叫做空蚀（气蚀、或汽蚀）。空蚀的发生直接影响到建筑物或构件的正常运

转，甚至造成整个建筑物的坍塌。因此在修建高、中水头建筑物时，决不能对空蚀问题掉以轻心。

进一步的研究表明，空蚀是由于水流中产生过低的压强而形成空化以后引起的，下面我们先来介绍空化现象。

## § 1—2 空化现象

大家知道，水在常态下是液体。当其压强一定，温度升高到某一临界值时，水体便汽化而形成气泡，即在水体中出现气相，叫做沸腾。相应于一定压强下发生沸腾的临界温度，叫做沸点。

其它的液体也会产生同样的现象，只是沸点有所不同。沸点的大小不但随液体的性质而不同，而且随液体的压强而有异。对于同一种液体而言，随着压强的增大，沸点也增大。

大气压强是作用在自然水体表面的常见压强。大气压强 $p_a$ 往往随天气情况而变。例如，雷暴雨之前，气压一般较低，人们感到很闷。大气压强也随海拔高低而变。例如，高原山区，气压较低，相应沸点也低，不到 $100^{\circ}\text{C}$ 水便沸腾，煮饭就不容易熟。

大气压强随海拔的变化如表1—1所示。

表1—1

海拔(m)	0	500	1000	2000	3000	4000	5000
气压( $p_a/\gamma_{\text{水}}$ )(m)	10.3	9.7	9.2	8.1	7.2	6.3	5.6

与沸腾相似，对于一定的液体，当其温度一定，而液体内压强 $p$ 降低到某一临界值 $p_{cr}$ ，即 $p \leq p_{cr}$ 时，液体中也会出现汽

化，或在液相中出现气相，从而形成两相体或两相流。这时，由于在连续介质中出现空洞，连续性遭到破坏，液流连续性原理便不复适用。对于一定温度的液体，由于压强的降低而在其内部汽化或形成气相的现象，叫做空化（也称空穴或气穴）。

注意，电子学中也有气穴一词，概念迥然不同，应予区别。

相应于汽化的临界压强，叫（饱和）蒸汽压强，一般以  $p_v$  表示。显然，蒸汽压强的大小不但随液体的性质而不同，而且随液体温度高低而有异。对于同一种液体来说，随着温度升高，蒸汽压强也增大，水体的蒸汽压强如表1—2所示。

应当说明，空化与沸腾这两种现象，从物理本质上讲，至少在它们的初生问题上是一样的，只是液体在形成汽化的原因上有所不同。沸腾是由于升温而形成的，而空化是由于降压而引起的。从而，空化的发生条件一般可简单地归结为

$$p \leq p_v \quad (1-1)$$

式中  $p$  —— 液体内部某一点的压强；

$p_v$  —— 相应液体温度的蒸汽压强。对于水体，如表1—2所示。

还应指出，不要把液体中产生气体的现象都看做空化。除了上述沸腾和空化这两种发生相变的现象外，当液体中含有过饱和的气体而在压强降低时，大量气体就会释放出来，也可在液体中出现气泡，这种现象叫做起泡或伪空化。例如，当打开啤酒和汽水瓶塞时便可出现起泡现象；在减压箱试验中也可能出现起泡现象，应加以鉴别。此外，高速明渠中的天然掺气水流，或经人工掺气后的水流，甚至液体中出现某种化学反应，都会在液体中出现气泡。但这些现象与空化有着本质上的不同，切不可混淆。

表1—2

水温 T°C	0	2	4	6	8	10	12	14
蒸汽压强 $\frac{p_v}{\gamma}$ (m, 水)	0.062	0.072	0.082	0.095	0.109	0.125	0.143	0.163
T°C	16	18	20	22	24	26	28	30
$p_v/\gamma$	0.185	0.210	0.238	0.270	0.302	0.343	0.385	0.433
T°C	35	40	50	60	70	80	90	100
$p_v/\gamma$	0.573	0.752	1.26	2.03	3.18	4.83	7.15	10.33

根据上面的讨论，我们可以把影响空化的因素综合如下：

1. 液体的性质。各种液体有不同的内聚力和沸点，同一种液体的含气量和杂质含量也不同，这是产生空化的内因。沸点低的液体容易产生空化；含气或含杂质的液体也容易产生空化。

2. 液体的温度。蒸汽压强与液体温度呈递增关系，因此温度高的液体容易空化。这在热电站循环水管路系统和原子能水力学中要特别注意。

3. 液体内的压强。水流中的压强，可据水力学或流体力学方法分析和试验确定。但应着重指出，与一般工程问题不同，考虑空化问题时的压强均指绝对压强，即还包括了大气压强，而大气压强是因时因地有所差异的。

## § 1—3 空化的类型

人们为了研究问题和讨论问题的方便，往往把空化现象的各种表现形式划分成不同的类型。但到目前为止，还没有一个统一的分类方法。常见的分类如下：

### 一、按空化发展阶段分

1. 初生空化 随着水流中压强的降低，当某一低压区的压强降低到某一产生空化的临界压强（即  $p = p_{cr}$ ）时，水流中开始出现不连续的阵发性的空泡，叫做初生空化。如图1—5 a所示。

2. 附体空化 当水流低压区的压强继续降低（即  $p < p_{cr}$ ）时，低压区范围扩大，空泡便持续存在，成为发展的空化。但这时空化的范围仍不大，贴附在绕流体上，故称为附体空化。（如图1—5 b）

3. 超空化 随着水流中低压区的压强进一步降低，低压区的范围不断扩大，空化区范围也不断发展，最后空泡长度超过了绕流体的范围，形成了稳定的尾流，这时称为超空化。如图1—5 c所示。

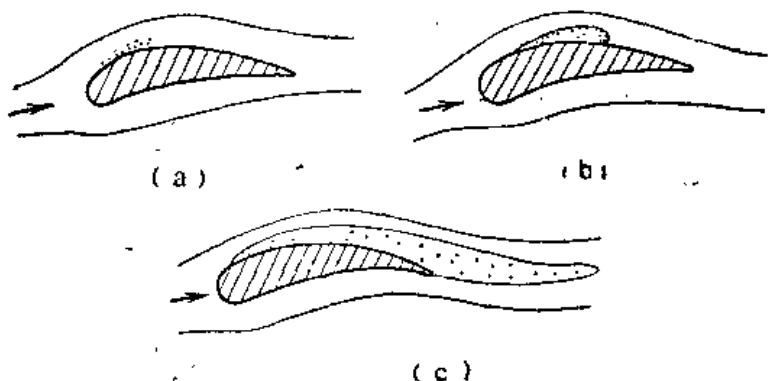


图1—5

## 二、按空化的形态分

1. 空泡式空化 空化区由无数独立的互不毗连的小气泡组成（如图1—6a）。这时的空化区为水、气掺混体，呈不透

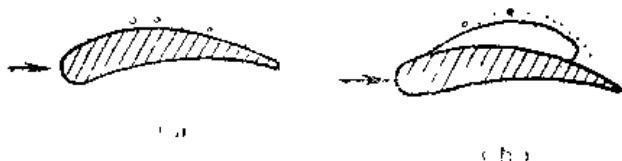


图1—6

明的乳白色云雾状，一般叫做空化云。对于每一个独立的空泡，当其在水流中的局部低压区产生后，随着水流运动过程，并随着水流中压力场的变化而呈现初生、长大、缩小以致溃灭。所以这种空化又叫迁移型空化。

2. 空腔式空化 空化区为毗连的大气囊，内中充满蒸汽，或有少量气体，因而呈透明状。空腔式空化是在形成空泡式空化后压强继续降低，空泡不断聚集扩大的结果。空腔的位置、大小及形状，在肉眼看来大致固定不变，故又叫固定型空化。由于空腔的存在，迫使液体脱离边界。空腔与液体的分界面附近又常夹杂大量的迁移型空化（图1—6b）。

3. 旋涡带空化 空化发生在旋涡中心的低压区，而随着涡丝的形状，而成各种形状的条带。螺旋桨和水轮机叶片后的旋涡带空化，是常见的实例（图1—7）。

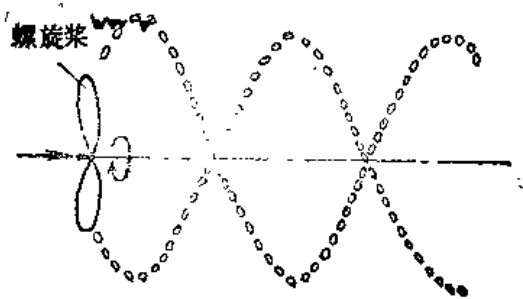


图1—7

### 三、按水流情况分

1. 恒定流空化 文德里管喉部之后出现的空化是常见的恒定流空化的实例（图1—8）。



图1—8

若不计损失，喉部压强为

$$\frac{p}{\gamma} = \frac{P}{\gamma} - \frac{U^2 - u^2}{2g} \quad (1-2)$$

或

$$\frac{p}{\gamma} = \frac{P}{\gamma} - \frac{Q^2}{2g} \left( \frac{\Omega^2 - \omega^2}{\Omega^2 \omega^2} \right) \quad (1-3)$$

式中  $\frac{p}{\gamma}$  ——文德里管喉部压强水头；

$\frac{P}{\gamma}$  ——文德里管缩窄前的压强水头；

$Q$  ——管中通过流量；

$\Omega$ 、 $U$  ——缩窄前的断面积及流速；

$\omega$ 、 $u$  ——喉部断面积及流速；

$g$  ——重力加速度。

通过文德里管喉部的水流，由于 $\omega$ 大为缩小， $u$ 增大，因而 $p$ 降低。在一定水温下，当 $p \leq p_{cr}$ ，便发生空化。

2. 旋涡流空气 旋涡流中心的低压区往往是产生空化的根源。设在压强为 $P$ ，流速为 $U$ 的流场中存在一圆形孤立旋涡（图1—9），若不计粘性影响，其涡心压强可推得为

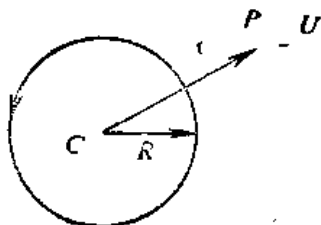


图1—9



$$p_c = P - \frac{\rho \Gamma^2}{8\pi^2 r^2} \quad (1-4)$$

式中  $p_c$ ——涡心压强；  
 $P$ ——流场中不扰动压强；  
 $\rho$ ——液体密度；  
 $\Gamma = 2\pi R$ ——涡旋环量；  
 $R$ ——涡旋半径；  
 $r$ ——以涡心为原点的极坐标。

在涡心处， $r = 0$ ，则  $p_c \rightarrow -\infty$ 。在实际液体中存在粘性，但  $p_c$  值仍可很低，当  $p_c \leq p_{cr}$ ，便发生空化。应当说明，螺旋桨和水轮机叶片后的旋涡带空化，固然属旋涡流空化，其他各种不良绕流体后紊流剪力层中出现的空化也属旋涡流空化。

3. 静止液体中的空化 空化产生的充分必要条件是液体中局部压强降低到某一临界值，因而并不一定要求液体流动，只要液、固间有相对运动即可。因此，高速运动的子弹射入水体，甚至射入人体，军舰发射的鱼雷，以及航天试验中的水刹车器等，均可在水体中产生低压区而引起空化。试验室中的磁伸缩振荡仪（图1-10）也是在静止液体中进行试验的，随着试件在静止液体中高频振动，试件接触面附近液体中出现周期性的低压或高压。当低压小于空化临界压强时，便会产生空化。机械工程中具有类似工作条件者，均可能产生空化。

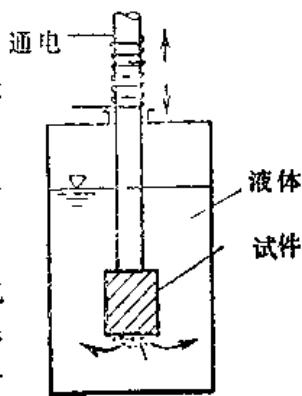


图1-10

#### 四、按空化发生的部位分

1. 沿界空化 对于绕流性较好的绕流体（如水轮机叶片