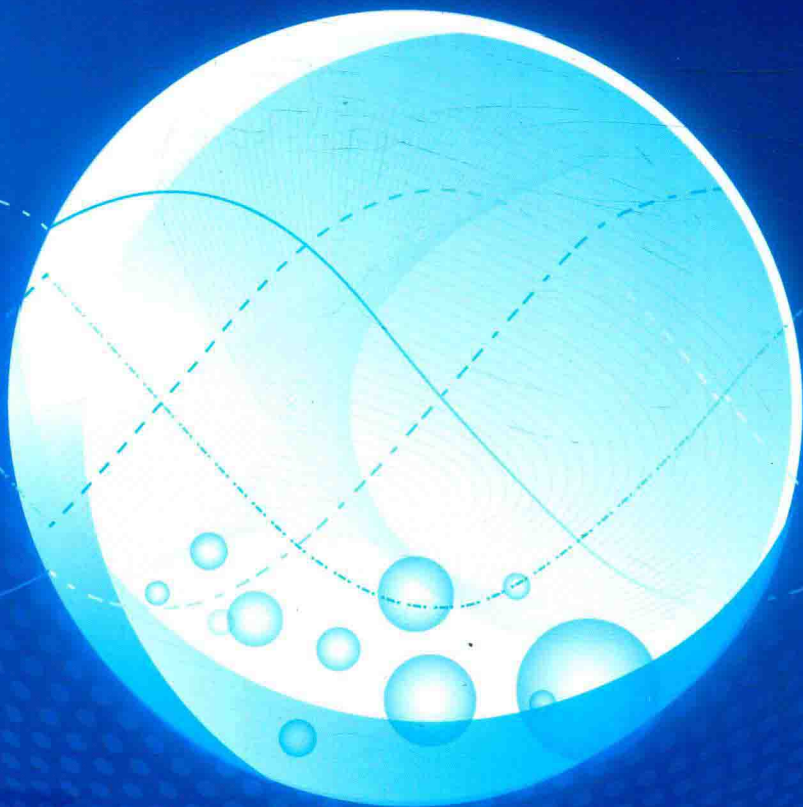


# 液体空化技术应用

APPLICATION OF LIQUID CAVITATION TECHNOLOGY

蔡军 淮秀兰 刘斌 陶跃群 著



科学出版社

# 液体空化技术应用

Application of Liquid Cavitation Technology

蔡 军 淮秀兰 刘 斌 陶跃群 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书以液体空化现象的正面利用为切入点,首先对液体空化基础理论及相关的基本知识进行介绍,然后从最为基础的空泡动力学研究出发,对空泡动力学特性及其研究方法进行总结和归纳,之后,重点总结和介绍笔者团队在超声空化强化传热、水力空化强化微通道传热、水力空化降解污水中有机污染物,以及水力空化制备纳米颗粒悬浮液等领域的最新研究成果。希望本书能给相关领域读者带来帮助。

本书可作为工程流体力学、传热学、环境工程以及多相流等相关领域专业本科生和研究生的教材或参考书,也可供从事空化技术工程应用研究的相关人员阅读和参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

液体空化技术应用 = Application of Liquid Cavitation Technology / 蔡军等著. —北京: 科学出版社, 2019.6

ISBN 978-7-03-061685-2

I. ①液… II. ①蔡… III. ①空化 IV. ①TV131.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第117704号

责任编辑: 范运年 王楠楠 / 责任校对: 王 瑞

责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 蓝正设计

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>

天津文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019年6月第一版 开本: 720×1000 1/16

2019年6月第一次印刷 印张: 13 1/2

字数: 272 000

定价: 118.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

## 序

空化作为一门“显学”已有百余年的历史，在国内的研究应用历史也超过一个甲子，近年来空化研究在我国方兴未艾，从参加国内外各种空化学术会议的中国代表绝对人数与他国代表的相对比例上就可见一斑。在笔者开始从事空化研究的 20 世纪 80 年代，全国从事空化研究应用的部门和人员主要集中在船舶、水力机械和水工等传统领域，研究的内容主要涉及空化的预报和空蚀的防护。进入 21 世纪之后，空化的研究应用领域被大大扩展了，其中主要是对空化效应的广泛应用，应用领域涉及医疗、生物制药、环保、化工、地质钻探、清洗切割等。但遗憾的是，在相当长的时间内，对空化效应机制的研究和阐述远远滞后于对空化效应的应用，这种现状不仅常导致应用研究事倍功半，也严重阻碍了大量研究成果的应用和推广，本书的出版可以说恰逢其时。

近年来国内陆续出版了几部空化方面的专著，但专门论述空化效应的书尚不多见。潘森森老师和我合著于 2013 年出版的《空化机理》最后一章中，曾对空化效应做过一个大致介绍，对空化效应的工程应用寄予厚望。前几年我有幸到北京中国科学院工程热物理研究所拜访《液体空化技术应用》的笔者蔡军研究员，并参观他的实验室，对他严谨的治学态度和多年在空化效应研究领域的坚持印象深刻。非常高兴几年之后，蔡军研究员及其团队拿出这样一部关于空化应用的专著，填补了该方向的空白。下面就该书特色谈几点粗浅的看法。

该书的显著特点是强调空化应用的基础问题，在纯粹的空化理论和空化应用之间搭起桥梁。在不冲淡空化技术应用这个主题的前提下，笔者花了大量笔墨探讨各项应用背后的物理机制，力图使读者知其然，更知其所以然。例如，在许多章节中均可看到“影响因素及规律分析”，反映了笔者扎实的学理，可供后来研究者借鉴，对正在从事空化效应应用的广大工程技术人员理解原理和改进设计也是非常有益的。

特别关注空泡溃灭的热效应是该书的特色，这自然与该书笔者及其团队在传热学方面的学识背景是分不开的。空化的物理本质就是伴随着传热过程的相变，在传统的宏观尺度空化问题中主要考虑水动力特性而热效应常被忽略，但在空泡溃灭过程中产生的微观尺度上的热效应是空化应用不可或缺的因素，该书第二、三、四章对此问题的描述和最新研究成果，不仅对空化应用贡献良多，也拓展了人们对空化机理的理解。

空化作为一门学科仍在不断发展完善之中，空化应用更是处于起步阶段，需

要从事该领域研究应用的专家持续工作。而该书的另一个特点就是展示了笔者大量最新的研究成果，反映了该书笔者及其团队近年来不断深入的研究工作。该书最后两章包含许多应用实例，不仅在原理方面有清晰的阐述，也给出了结构设计方法，在进一步增加效能方面也提供了明确有益的建议，非常有益于相关应用的实施和改进。

深秋时节，窗外枫红草黄，时值我在洛桑瑞士联邦工学院访学期间，受笔者之邀为该书作序，实感诚惶诚恐。祝贺该书笔者及其团队在空化应用领域取得的成果，同时深信该书的出版将有力推动我国在空化应用领域的学术研究和工程应用。

是为序。

彭晓星 研究员

中国船舶科学研究中心

2018年11月7日

## 前 言

18 世纪中叶,瑞士著名数学家莱昂哈德·欧拉从理论角度证明了液体内部发生空化的可能性,不过直到 19 世纪末,人们才从船用螺旋桨的破坏现象中第一次真正体会到空化的真实存在及其带来的严重危害,从此引发了学术界和工程界对于液体空化现象的研究。早期的研究多集中在液体空化产生机理及其危害(空蚀)防治等方面,随着人们对于液体空化现象及其微观产生机理的认识的加深,其积极意义逐渐被挖掘出来,由此形成的液体空化技术在军事、石油、化工、食品、环保等领域展现出广阔的应用前景,相关的科学与工程应用研究也得到蓬勃发展。

笔者及其所在科研团队自 2008 年开始,在国家多渠道基金项目的资助下,持续开展了液体空化基础理论及其在传热强化、污水处理以及纳米颗粒悬浮液制备等方面的应用基础研究,包括国家自然科学基金面上项目和青年基金项目,如“水力空化降解有机废水作用机理研究”(No.51376181)、“微通道热沉耦合水力空化强化换热机理研究”(No.51076151)、“水力空化热效应及强化传热机理研究”(No.50806078)、“微通道内纳米流体空化流动特性及其复合强化传热机理研究”(No.51606190);科学技术部 863 计划项目,如“声空化多角度强化传热与节能新技术”(No.2006AA05Z203)。通过笔者所在团队成员的共同努力,我们取得了一些被同行认可的研究成果,在国内外相关领域刊物和学术会议上发表了一系列学术论文,得到国内外同行的肯定和好评。笔者在充分总结相关领域前人研究成果的基础上,以笔者及其所在科研团队取得的研究成果为基础撰写了本书。

在本书即将出版之际,特别感谢研究所传热学科带头人淮秀兰研究员,自从进入研究所工作以来,她不断在科研和生活上给予笔者帮助,本书展现的研究成果与她的帮助密不可分。

感谢研究团队的刘斌、陶跃群、席文宣、李虹霞、崔振东以及徐根花等博士、硕士研究生,正是他们前赴后继不懈地努力,液体空化研究方向才有了今天的成绩。现在他(她)们都已毕业,衷心祝愿他(她)们新的工作岗位上取得更大、更辉煌的成就。

感谢笔者的妻子,撰写本书期间恰逢儿子出生,她负担了大量照顾孩子的工作,使笔者能够专心写作,正是有了她对我研究工作的理解、支持和包容,本书才得以顺利完成。

感谢国家自然科学基金委员会和科学技术部对笔者团队开展基础研究工作的的大力支持与帮助。

液体空化理论研究虽然起源较早，但从正面角度利用液体空化的研究仍处于初步阶段，尽管笔者及其所在科研团队在液体空化方面持续进行了近十年的研究，但受研究条件、理论基础以及专业知识水平等限制，书中给出的结论和表达的观点不一定具有普适性，恳请读者批评与指正。

蔡 军

2018年9月25日

# 目 录

序	
前言	
第一章 液体空化基础理论与基本知识	1
第一节 空化的基本概念	1
第二节 空化的形成条件	2
一、空化产生的物质基础	2
二、空化产生的动力因素	3
第三节 空化现象的分类	6
一、按空化产生方式分类	6
二、按空化对象分类	8
三、按空化形状分类	8
四、其他分类	9
第四节 空化特征的定量描述	11
一、空化数的定义	11
二、初生空化数与压力系数的关系	12
三、空化数的偏离与修正	12
四、空化数与空化强度的关系	15
第五节 空化效应	16
一、机械效应	17
二、热效应	18
三、化学效应	20
四、空化效应阈值与测量方法	21
五、空化效应正确利用与强化	22
第六节 空化应用及其原理	23
一、军事用途	23
二、水处理	25
三、生化工程	28
四、食品处理	29
五、均质混合与破乳	31
六、海水淡化	33
七、纳米涂料制备	34

八、其他应用 .....	35
参考文献 .....	35
<b>第二章 空泡动力学特性及其影响因素 .....</b>	<b>40</b>
第一节 空泡动力学研究方法 .....	40
一、Rayleigh 方程 .....	40
二、Rayleigh-Plesset 方程 .....	40
三、Gilmore 方程 .....	41
四、Keller-Miksis 方程 .....	42
第二节 稳态空化流动中的空泡动力学特性 .....	43
一、物理与计算模型 .....	43
二、空泡运动影响因素 .....	45
第三节 湍流作用下的空泡动力学特性 .....	48
一、湍流脉动压力计算模型 .....	48
二、空泡的膨胀与溃灭 .....	50
三、空泡内部温度演变 .....	56
第四节 双空泡动力学特性 .....	61
一、双空泡相互作用动力学模型 .....	61
二、基于 VOF 方法的双空泡相互作用研究 .....	64
第五节 空泡群溃灭特性研究 .....	66
一、空泡群溃灭模式 .....	66
二、空泡群溃灭研究方法 .....	67
参考文献 .....	69
<b>第三章 超声空化强化传热 .....</b>	<b>71</b>
第一节 概述 .....	71
第二节 超声空化阈值 .....	72
第三节 空化捕获模型及其运用 .....	73
一、Singhal 空化模型 .....	74
二、Zwart-Gerber-Belamri 空化模型 .....	75
三、Schnerr-Sauer 空化模型 .....	75
四、Kunz 空化模型 .....	76
五、多相格子玻尔兹曼模拟方法 .....	76
六、空化模型的运用 .....	77
第四节 超声空化强化传热机理 .....	78
一、单相液体对流传热 .....	78
二、沸腾相变传热 .....	84

第五节 超声空化强化传热特性	85
一、实验研究装置及方法	85
二、影响因素及规律分析	86
第六节 超声空化防除垢特性	90
一、超声空化防除垢机理	90
二、实验研究装置及方法	91
三、影响因素及规律分析	93
参考文献	101
<b>第四章 水力空化强化微通道传热</b>	<b>104</b>
第一节 概述	104
第二节 水力空化强化传热微观机理	105
一、研究模型与方法	105
二、空泡强化传热微观机理	107
三、空泡强化传热影响因素	120
第三节 水力空化强化传热宏观机理	124
一、物理模型与研究方法	124
二、水力空化流动宏观特征	125
三、宏观流动特征与传热强化的关系	126
第四节 微通道内水力空化流动传热特性	128
一、实验研究装置及方法	128
二、空化结构设计与微通道封装	129
三、影响因素及规律分析	131
第五节 微通道内水力空化流动的数值模拟	138
一、基于 N-S 方程的空化流动模拟	138
二、基于 LB 方法的空化流动模拟	142
参考文献	148
<b>第五章 水力空化降解污水中有机污染物</b>	<b>151</b>
第一节 概述	151
第二节 空化降解有机污染物作用机制	152
第三节 水力空化降解有机污染物影响因素	154
一、液体温度影响	154
二、空化装置运行压力影响	154
三、液体 pH 影响	154
第四节 涉及化学反应的空泡动力学模型	155
一、模型研究现状	155
二、水力空化条件下单空泡羟基自由基产量计算模型	157

三、空化流场中羟基自由基总产量计算模型	161
四、空化反应器参数优化	163
第五节 水力空化污水处理实验装置与系统	167
第六节 水力空化与其他高级氧化技术的联合	172
一、与过氧化氢氧化方法结合	172
二、与芬顿法结合	172
三、与光催化氧化方法结合	173
四、与超声空化方法结合	173
五、与臭氧氧化方法结合	174
第七节 新型空化对冲射流降解方法	174
一、对冲射流概念	174
二、空化对冲射流作用强化指数	175
三、空化对冲射流构建与实验系统	176
四、空化对冲射流降解效果测试	179
第八节 水力空化降解技术应用前景	189
参考文献	189
<b>第六章 水力空化用于纳米颗粒悬浮液制备</b>	<b>193</b>
第一节 概述	193
第二节 纳米颗粒制备方法	193
第三节 纳米颗粒在液体介质中的分散	194
第四节 纳米颗粒悬浮液的空化制备	195
一、制备原理	195
二、实验制备装置	195
三、实验制备工艺	197
四、纳米颗粒分散效果	198
第五节 制备过程中的影响因素	200
第六节 空化制备技术应用前景	203
参考文献	204

# 第一章 液体空化基础理论与基本知识

空化是发生在液体内部的一种特有现象(固体和气体中不能发生空化现象,但处于液态的固体和气体除外),其实质是一个由液到汽,再由汽到液的相变过程。本章将从空化的基本概念、空化的形成条件、空化现象的分类、空化特征的定量描述、空化效应、空化应用及其原理等方面,对液体空化的基础理论和基本知识进行概要介绍。

## 第一节 空化的基本概念

早在 18 世纪中叶,瑞士著名的数学家莱昂哈德·欧拉就已经从理论角度证明了液体中发生空化的可能性,不过直到 19 世纪末,人们才从船用螺旋桨的破坏现象中体会到了空化的真实存在及其危害。当时,英国的一条驱逐舰和一条汽轮机船先后在航行中出现航速突然下降的情况,检查发现螺旋桨叶片被不知名的东西击穿了,后来才知道这是螺旋桨叶片上发生空化作用的结果,这是人们对空化现象的第一次直观认识。自此,学者开始对其展开研究,以期查明空化形成的原因,从而找到克服空化产生及防治其危害的办法。

对空化过程进行研究,首先必须准确了解空化的基本概念及其内涵。空化过程本质上是一个相变过程,既包含了空化前期的汽化过程(空化初生, cavitation inception),又包含了空化后期的液化过程(空泡溃灭, cavity collapse),而且这些过程均在液体内部发生,因此与传统的液体汽化和气体凝结过程不同。液体的汽化可区分为蒸发(evaporation)和沸腾(boiling)两种方式<sup>[1]</sup>。蒸发可在任何温度下发生(受气体分压影响),且仅发生在液体表面,其过程较为温和;沸腾过程只有在液体达到沸点温度时才可以发生,且发生在整个液体内部,其过程从温和(起始沸腾)向剧烈(稳定膜态沸腾)逐渐转变。空化过程与液体的蒸发和沸腾过程虽然有相似之处,但三者之间亦存在本质上的不同。空化是由于液体内部局部区域压力先后经历降低和上升(恢复)过程而引发的汽化及液化现象。其中,汽化过程发生在液体压力降低时段,发生得很突然但是过程不剧烈,而液化过程发生在液体压力上升阶段,发生得较为突然也很剧烈。

空化的汽化过程(空化初生)与蒸发的不同主要表现在:空化是发生在液体内部的气液表面上,而非自由液面上,而且,并不是在任何外界条件下都能发生,只有当作用于液体内部气泡外表面的压力降低到一定程度后才会发生,本章第二

节将对此进行介绍。

空化的汽化过程与沸腾过程从力学角度来看有相似之处，而不同之处主要表现在空化是在液体的局部区域内发生，且发生的动力因素是液体压力的变化，而沸腾是在整个液体内部发生，发生的动力因素是液体温度的升高，因此两种过程发生的热力学路径是有差别的，克里斯托弗·厄尔斯·布伦南<sup>[2]</sup>在其《空化与空泡动力学》一书中对此进行了深入分析。表 1-1 列出了空化过程与蒸发和沸腾过程的区别。

表 1-1 空化过程(空化初生与空泡溃灭)与蒸发和沸腾过程的区别<sup>[3]</sup>

相变过程	蒸发	沸腾	空化初生	空泡溃灭
发生部位	自由表面	液体内部	液体内部	液体内部
发生范围	整个自由表面	整个液体内部	液体内部局部区域	液体内部局部区域
发生温度	任何温度	沸点温度	常温	常温
发生过程	平静的	剧烈的	突然但不剧烈	突然且剧烈
动力因素	温度或压力	温度	压力	压力

通过上述对比分析，可以将空化的内涵总结为以下几点：

- (1) 空化是液体特有的瞬变现象。
- (2) 空化过程的本质是一个相变过程。
- (3) 空化产生的动力因素是液体压力参数的作用。
- (4) 空化只在液体内部的局部范围内发生。
- (5) 空化是一系列过程的总称，涉及空泡的形成、发展和溃灭。

关于空化过程每条内涵的具体阐述，在潘森森和彭晓星<sup>[3]</sup>所著的《空化机理》一书中有详细的说明，这里不再赘述。

## 第二节 空化的形成条件

### 一、空化产生的物质基础

要使液体产生空化，首先必须使液体从内部发生“撕裂”，而撕裂液体所需力的大小以液体所处温度下的抗拉强度来衡量。理论上，纯净液体分子的结合力非常强，因而具有极高的抗拉强度。以常温下的纯净水为例，按照热力学统计原理计算得到其抗拉强度约为  $1.7 \times 10^8 \text{Pa}$ ，按照液体的容积弹性计算，其抗拉强度为  $3.2 \times 10^8 \text{Pa}$ ，但是实际测试表明，液体的实际抗拉强度远低于上述理论值。由此可以设想，与纯净液体相比，在实际液体中的某些位置上一定存在薄弱环节，正是这些薄弱环节的存在，使得真实液体的抗拉强度急剧下降，远远低于理论的抗拉强度值。对于这种现象，目前普遍采用稳定气泡核学说来解释。空化首先从液体

中强度最薄弱的地方开始,这些地方由于种种原因出现了一些微小气泡,这些微小气泡称为空化核。在负压作用下,空化核膨胀产生空化。一定状态下,空化核只能以一定的大小存在于液体中。尺寸过大的空化核将会因为浮力迅速上浮到液面,然后失去表面张力而破裂,而尺寸太小的空化核在液体静压和表面张力的共同压缩作用下会很快溶于液体中。由此可见,具有一定数量且可以稳定存在于液体中的空化核是液体形成空化的物质基础(先决条件),并且空化核的大小和数量决定了液体空化的难易程度。

需要注意的是,只有包含不凝性气体(常温下不能液化的气体)的微小气泡才能称为空化核。根据气泡内外压力平衡的力学规律和理想气体定律可知,只含有液体蒸汽而没有不凝性气体的气泡若要稳定存在,其周围的液体压力必须降低到无穷小的程度<sup>[3]</sup>,这显然是不可能的。凝结核、尘埃固粒、带电粒子、极性分子以及表面活性物质都有可能成为空化核。

根据液体中产生的薄弱点的形式的不同,成核类型可以分为均质化成核和异质化成核两种<sup>[2]</sup>。均质化成核是由于液体分子热运动而形成的短暂性微观空隙,而异质化成核则发生在液体和固体容器壁面之间的边界或者液体与悬浮细小颗粒之间的边界上。关于均质化成核理论与异质化成核理论的详细介绍,请参见克里斯托弗·厄尔斯·布伦南所著的《空化与空泡动力学》一书<sup>[2]</sup>。需要着重指出的是,均质化成核理论并不适用于常温状态下的水。

## 二、空化产生的动力因素

液体要产生空化现象,除了必须具有一定数量的稳定空化核,还需要能够诱发这些空化核发生膨胀的动力因素,即液体内部静压降低到足以撕裂液体的程度。以实际的水为例,考虑处于静压为  $P_0$  的液体中半径为  $R_0$  的空化核,空化核中含有不凝性气体和水蒸气,根据力学平衡条件,核内气体压力可表示为

$$P_{g0} = P_0 - P_v + \frac{2S}{R_0} \quad (1-1)$$

式中,  $P_v$  为相应温度下液体的饱和蒸汽压;  $R_0$  为空化核的初始半径;  $S$  为液体的表面张力系数。

考虑当空化核半径变化到  $R$  时,假设空化核内的气体不扩散,而且表现为理想气体性质,空化核内气体压力变化到  $P_g$ , 根据理想气体状态方程,有

$$\frac{P_g}{P_{g0}} = \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \quad (1-2)$$

式中,  $\gamma$  为气体变化过程的多变指数,等温过程  $\gamma=1$ , 绝热过程  $\gamma=4/3$ 。将式(1-1)

代入式(1-2), 得到此时空化核内气体的压力为

$$P_g = \left( P_0 - P_v + \frac{2S}{R_0} \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \quad (1-3)$$

令  $P(R)$  为空化核表面上的液体静压, 则空化核内外压力平衡方程为

$$P(R) = P_g + P_v - \frac{2S}{R} = \left( P_0 - P_v + \frac{2S}{R_0} \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} + P_v - \frac{2S}{R_0} \cdot \frac{R_0}{R} \quad (1-4)$$

根据式(1-4), 可以绘制出水中空化核表面上的液体静压随  $R/R_0$  变化的曲线, 如图 1-1 所示, 图中  $R_{cr}$  为空化核临界半径。式(1-4)中, 取  $R_0=10\mu\text{m}$ ,  $\gamma=1$  (假设空化核的膨胀过程为等温过程),  $P_0=10^5\text{Pa}$ , 水温为  $20^\circ\text{C}$ , 对应的  $P_v=2300\text{Pa}$ , 表面张力系数  $S=0.0728\text{N/m}$ 。

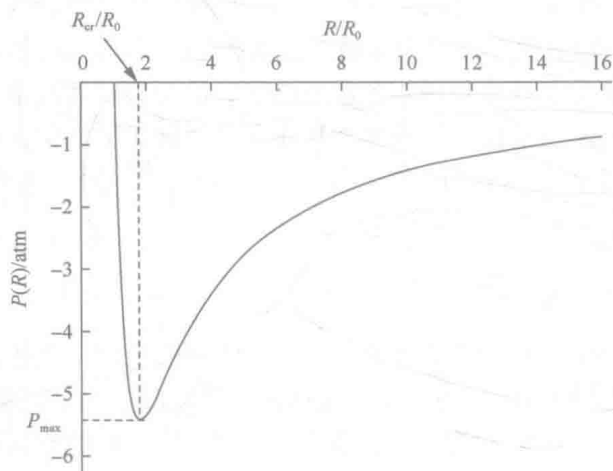


图 1-1 水中空化核表面上的液体静压随  $R/R_0$  的变化关系

$$1\text{atm}=1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$$

从图 1-1 可以看出, 需要很大的外部负压才能把空化核拉开。当空化核开始膨胀时, 随着空化核半径的增大, 所需外部负压急速增大, 当空化核半径为  $R_{cr}$  时, 所需外部负压达到极限值  $P_{max}$ 。当  $P < |P_{max}|$  时, 空化核半径缩小; 而当  $P > |P_{max}|$  时, 空化核迅速膨胀, 也就是说外部负压的绝对值必须超过  $|P_{max}|$  才能将空化核拉开。因此, 初始半径为  $R_0$  的空化核的液体, 其抗拉强度可表示为

$$P_t = -P_{max} \quad (1-5)$$

对应的半径  $R_{cr}$  称为空化核临界半径, 其值可以由  $P(R)$  的极值条件

$$\left. \frac{\partial P(R)}{\partial R} \right|_{R=R_{cr}} = 0 \quad (1-6)$$

求得。

将式(1-4)代入式(1-6)，得到

$$R_{cr} = \sqrt{3}R_0 \sqrt{\frac{R_0}{2S} \left( P_0 - P_v + \frac{2S}{R_0} \right)} \quad (1-7)$$

将式(1-7)代入式(1-4)，便可以得到把半径为  $R_0$  的空化核拉开的最小外部负压为

$$P_{max} = P_v - \frac{2}{3\sqrt{3}} \left[ \left( \frac{2S}{R_0} \right)^3 / \left( P_0 - P_v + \frac{2S}{R_0} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1-8)$$

则液体的抗拉强度为

$$P_t = -P_{max} = -P_v + \frac{2}{3\sqrt{3}} \left[ \left( \frac{2S}{R_0} \right)^3 / \left( P_0 - P_v + \frac{2S}{R_0} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1-9)$$

由式(1-8)和式(1-9)可知，液体抗拉强度较理论值低的原因在于其中有微小的空化核，空化核半径越大，该处液体抗拉强度越弱；反之，空化核半径越小，要使液体发生空化，则必须施加越强的外部负压才行。附着在固体杂质、微尘或容器表面上的微小气泡，或者因结构不均匀造成液体抗拉强度减弱的区域析出的溶解气体都可以形成空化核。

上述分析过程，一方面解释了实际液体的抗拉强度远远低于理论计算值的原因；另一方面表明了要使液体发生空化，空化核外围的液体压力(静压)必须降低到液体抗拉强度以下，这说明空化现象是液体动力学参量(即压力)变化的作用结果，也就是说液体内部局部范围内静压的变化(即低压的产生)是空化产生的动力因素。需要注意的是，初始半径为  $R_0$  的空化核在低压作用下需要经过一定的时间才能发育成长为空泡，达到临界半径  $R_{cr}$ ，低压作用的这段时间称为空化产生的动力学条件。

从式(1-9)可以看出，由于微小气核的存在，液体介质的抗拉强度在数值上并不等于相应温度下液体的饱和蒸汽压，表明空化现象并非只在液体介质内局部区域压力降低到饱和蒸汽压( $P_v$ )以下时才发生，因此采用液体抗拉强度代替饱和蒸汽压参数作为空化介质的参量更为合适。不过，与饱和蒸汽压相比，实际液体介

质由于所含杂质及其数量的不同，其抗拉强度无处可查，只能通过实际测量得到，因此大多数研究仍以饱和蒸汽压为空化介质的参量。液体空化介质中所含杂质的量虽然不大，但对其抗拉强度的影响却较大。图 1-2 给出了液体介质抗拉强度对空化起始的影响。图中纵坐标为初生空化数，关于其定义将在本章第四节中给予介绍。

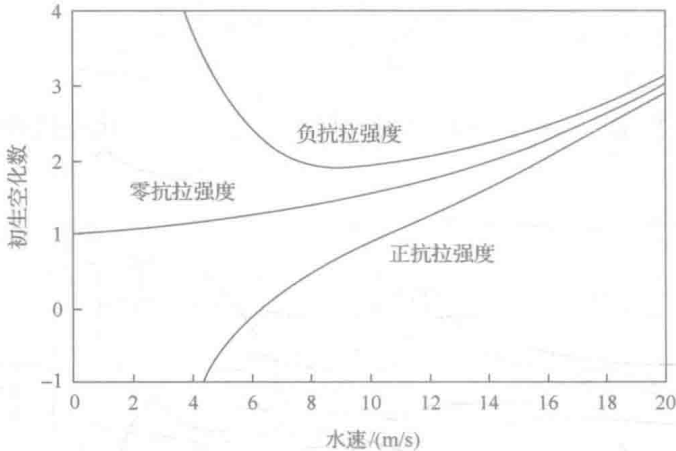


图 1-2 液体介质抗拉强度对空化起始的影响<sup>[4]</sup>

### 第三节 空化现象的分类

#### 一、按空化产生方式分类

按照产生方法的不同，空化可以分为水力空化、超声空化、光致空化和通气空化等。

##### (一) 水力空化

水力空化，顾名思义是通过一定的水力结构(如节流阀、孔板、文丘里管、高速涵洞、闸门槽或者其他能够引起流动液体压力变化的几何结构等)来实现液体的空化。当液体流经水力结构时，由于水力结构的某种限制作用，其流速急剧上升，作为代价，其压力急剧下降，当压力降低到工作温度下液体的饱和蒸汽压时就会产生空化，而随着液体的继续流动液体压力升高，前期产生的空泡塌缩、溃灭。对于某些水下旋转机械或者液体动力装置，如船用螺旋桨、水轮机、水泵以及液体火箭泵等，此类装置结构虽然不存在液体压力能与动能的转换过程，但由于叶片的旋转作用，叶片表面附近仍然会形成负压区，从而诱发空化现象，此类空化也可归于水力空化类型。