

郭志萍 著

Study on Dynamics Characteristics of
Aerated Flow Cavitation Bubble

掺气水流空泡动力学 特性研究



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

本书出版由

2018年山西省高等学校科技创新项目(项目编号:201804040)

资助

掺气水流空泡动力学 特性研究

郭志萍 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书是一本关于掺气水流空泡动力学特性研究成果的著作,重点从理论、数值模拟和试验方面阐述掺气条件下水流空化区、空蚀区的空化特性及黏性可压缩液体中空泡与掺气泡相互作用的控制方程,系统探讨不同空泡初始半径和不同掺气泡初始半径对空泡泡壁脉动特性的影响,旨在促进掺气减蚀理论在空化空蚀方面的深入研究,以及为优化设计掺气设施减免空蚀危害提供指导。

本书可供水利工程、流体机械、船舶工程等有关科技人员、研究生及高等院校师生阅读,也可供从事水利水电工程设计、施工和科学研究的工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

掺气水流空泡动力学特性研究 / 郭志萍著. — 北京:
中国水利水电出版社, 2019.5
ISBN 978-7-5170-7681-0

I. ①掺… II. ①郭… III. ①掺气水流—水动力学—
研究 IV. ①TV131.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第092843号

| | |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书 名 | 掺气水流空泡动力学特性研究 CHANQI SHULIU KONGPAO DONGLIXUE TEXING YANJIU |
| 作 者 | 郭志萍 著 |
| 出版发行 | 中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心) |
| 经 售 | 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点 |
| 排 版 | 中国水利水电出版社微机排版中心 |
| 印 刷 | 天津嘉恒印务有限公司 |
| 规 格 | 170mm×240mm 16开本 9.25印张 176千字 |
| 版 次 | 2019年5月第1版 2019年5月第1次印刷 |
| 印 数 | 001—500册 |
| 定 价 | 58.00元 |

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

随着水利水电事业的发展，高坝泄洪建筑物日益增多，高速水流成为普遍关注的问题，如掺气、空化空蚀、脉动振动、消能防冲、雾化等，其中空化空蚀是国内外水力学专家最为关注的重点和难点之一。当水流速度达到一定程度时，水流压强低于相应的饱和蒸汽压强，水流内部形成空穴，即产生空化现象。空穴流由低压区流到较高压力区便会产生空蚀破坏，为了减免高速水流空化产生的空蚀破坏，经济且有效的措施是在低压空化区或在易发生空蚀部位上游设置掺气设施强迫掺气。迄今为止，人们主要对空泡与空泡之间的相互作用进行过研究，而对水流掺气后形成的掺气泡与空泡之间相互作用的研究少有文献报道。因此，开展掺气泡与空泡相互作用的研究是非常必要的。

空化空蚀是一个高速、微观、瞬时、随机、多相的复杂物理现象，随着科技的进步，空化现象的理论及内容已经有了很大的发展，涉及空化现象的领域也越来越多，例如宇航、原子能、生物学和医学等方面。因此，直到现在，空化空蚀问题的研究始终占据重要的地位。本书系2018年山西省高等学校科技创新项目（项目编号：201804040）研究成果，基于作者在掺气水流空泡动力学研究方面的工作积累，对高速水流掺气后空化区、空蚀区空化特性进行了理论叙述和试验研究，并对空泡与掺气泡的相互作用进行了初步理论探讨。

本书较为系统地阐述了掺气水流空化区能量守恒方程、掺气水流空蚀区空泡溃灭压力脉冲方程、黏性可压缩液体中球形和偏离球

形空泡与掺气泡相互作用的运动方程组以及有无固壁影响下不可压缩液体中球形空泡与掺气泡相互作用的耦合方程组。叙述上力求清晰、思路简明，尽可能严谨阐明掺气水流空泡动力学空化特性。

本书共分7章：第1章回顾空化空蚀机理、影响因素、掺气减蚀的国内外研究现状，并对本书的研究内容进行了简单的介绍；第2章介绍试验设备与量测技术；第3章研究掺气条件下水流空化区的空化特性；第4章研究掺气条件下水流空蚀区的空化特性；第5章研究掺气条件下水流空化流场PIV特性；第6章建立空泡与掺气泡相互作用理论；第7章研究不同半径掺气泡对空泡脉动特性的影响。

在本书出版之际，首先，诚挚地感谢作者的导师董志勇教授，他在专业知识上的教诲和敬业精神上的熏陶为本书的完成奠定了基础。感谢辛运强先生，在本书撰写和出版过程中，帮助作者完成资料整理、绘图、电子排版及校对等工作所付出的辛勤劳动。衷心感谢山西水利职业技术学院党委和老师们的长期以来对作者的关爱和鼓励。最后，感谢在本书撰写和出版过程中所有给予关心、支持和帮助的人们。

在本书撰写过程中，作者虽力求审谨，但限于作者水平和对掺气水流的认识，书中缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正。

作者

2019年1月

目 录

前言

| | |
|--------------------------------------|----|
| 第 1 章 引言 | 1 |
| 1.1 概述 | 1 |
| 1.2 空化空蚀机理的研究现状 | 3 |
| 1.3 空化空蚀影响因素的研究现状 | 16 |
| 1.4 掺气减蚀技术的研究现状 | 18 |
| 1.5 研究背景和主要内容 | 18 |
| 第 2 章 试验设备与量测技术 | 20 |
| 2.1 水洞系统 | 20 |
| 2.2 DANTEC - PIV 三维粒子图像测速仪 | 21 |
| 2.3 PHOTRON APX - RS 高速摄影机 | 22 |
| 2.4 SINOCERA - YE6263 压力数据采集系统 | 23 |
| 2.5 SCANIVALUE 多点压力扫描阀系统 | 24 |
| 2.6 UFLO 2000P 超声波流量计 | 24 |
| 第 3 章 掺气条件下水流空化区空化特性的研究 | 26 |
| 3.1 空泡与空泡之间的膨胀及压缩 | 26 |
| 3.2 空化区空化特性的试验分析 | 28 |
| 3.3 掺气后空化区空化特性的理论分析 | 30 |
| 3.4 空化现象的高速摄影分析 | 32 |
| 3.5 本章小结 | 35 |
| 第 4 章 掺气条件下水流空蚀区空化特性的研究 | 36 |
| 4.1 掺气对空化特性的理论分析 | 36 |
| 4.2 水流空化特性的试验研究 | 39 |
| 4.3 高速摄影下的空化结构分析 | 41 |

| | | |
|--------------|----------------------------------|------------|
| 4.4 | 本章小结 | 45 |
| 第 5 章 | 掺气条件下水流空化流场 PIV 研究 | 46 |
| 5.1 | 圆柱突体空化区流场 PIV 分析 | 46 |
| 5.2 | 无突体空蚀区流场 PIV 分析 | 56 |
| 5.3 | 本章小结 | 68 |
| 第 6 章 | 空泡与掺气泡相互作用的理论研究 | 69 |
| 6.1 | 基本方程和边界条件 | 69 |
| 6.2 | 可压缩液体中球形空泡与掺气泡相互作用的控制方程 | 72 |
| 6.3 | 不可压缩液体中球形空泡与掺气泡相互作用的控制方程 | 76 |
| 6.4 | 本章小结 | 78 |
| 第 7 章 | 不同半径掺气泡对空泡脉动特性影响的研究 | 79 |
| 7.1 | 空泡脉动理论分析 | 79 |
| 7.2 | 空泡与掺气泡相互作用理论模型 | 82 |
| 7.3 | 不同空泡初始半径下不同半径掺气泡对空泡脉动特性的影响 | 83 |
| 7.4 | 空泡与掺气泡不同间距对空泡脉动特性的影响 | 119 |
| 7.5 | 本章小结 | 131 |
| 参考文献 | | 132 |
| 附录 | 不同温度下水的饱和蒸汽压力..... | 140 |

第 1 章

引 言

1.1 概述

空化是流动液体中一种特有的物理现象，当液体以较高流速流经局部区域时，其压强低于该温度下的饱和蒸汽压强所产生的一种流体动力学现象。空穴流由低压区流到高压区便会产生空蚀破坏，危害既广泛又明显，严重阻碍了科学与工程等方面的发展。随着科技的进步，空化现象的理论及内容已经有了很大的发展，涉及空化现象的领域也越来越多，例如宇航、原子能、生物学和医学等方面。因此，直到现在，空化空蚀问题的研究始终占据重要的地位。

液体中空化现象的作用后果可分为 3 类^[1]：一是改变液体流动的水动力的作用，多数情况下空化的出现会增加水流的总阻力，机械效率显著下降；二是对水流固体边界产生空蚀破坏的作用，空泡溃灭时产生巨大的瞬时压强，当溃灭发生在固壁面附近时，液体中不断溃灭的空泡产生高压与固壁面的反复作用可使其表面遭受破坏；三是其他可能伴随或不伴随着显著改变水动力学特性或固体边界空蚀的一些作用。空化噪声和空化激发的振动，是两种最为普遍的空化影响。空化过程是不恒定的，并可能包含强烈的脉动力，如果这种脉动力的某一频率分量和机械设备某一部件的自振频率相吻合，那就可能发生振动。空化噪声以及激发的振动降低了舰艇、潜艇以及鱼雷等水下兵器的隐蔽性和动态保密性，干扰了探测设备的性能。由此可见，空化现象的研究对于水动力学不仅具有重要的理论意义，还具有重要的工程应用和军事应用的现实意义。

我国是水能资源大国，水电资源丰富，理论蕴藏量为 6.94 亿 kW，技术可开发容量为 5.42 亿 kW，经济可开发量为 4.02 亿 kW，水能资源蕴藏量和可开发量均居世界首位。随着我国经济和水电建设事业的飞速发展，能源需求不断提高，政府高度重视水电资源的综合开发和利用，高坝建设发展迅速。到目前为止世界上已建、在建和待建 200m 以上的超高级坝约有 60 座，有的坝高已进入 300m 级^[2]。这种高坝建设趋势在国内更为突出，我国已建、在建和待建多座 200m 以上的大规模高坝水电站，如位于红水河上的龙滩水电站（坝

高 216m)、清江上的水布垭水电站(坝高 233m)、雅砻江上的二滩水电站(坝高 240m)、金沙江上的溪洛渡水电站(坝高 278m)、澜沧江上的小湾水电站(坝高 292m)、雅砻江上的两河口水电站(坝高 293m)、雅砻江上的锦屏一级水电站(坝高 305m)等^[3]。但是我国深山峡谷众多,水流湍急,水头高,流量大,在这样的自然条件下,我国将近 40%的水电设施面临严重的空化空蚀磨损问题^[4]。一方面大型水电站在总体布局和技术设计中面临着高速水流空化和泄水建筑物的空蚀问题^[5];另一方面水电站内部的水轮机组也面临着转轮叶片空蚀和振动等问题。空蚀引起水轮机效率下降,产生振动和噪声,迫使机组频繁停机检修,带来巨大的经济损失,而且水轮机叶片的损伤和机组的剧烈振动严重威胁水电站的运行安全^[6-7]。

国内外有很多泄水建筑物都曾发生过空蚀破坏。在国外,较早的如位于巴拿马恰格莱斯河上的麦登坝^[8],1935年在泄水道进口处发生了严重的空蚀破坏;美国的胡佛坝,1941年8月6日东岸泄洪洞开始运行,同年12月12日在泄洪洞内进行检查时发现反弧段发生了严重的空蚀破坏,形成一个长约 35m、宽约 9.15m、最大深度达 13.7m 的大坑^[9];1967年7月,美国黄尾坝泄洪洞反弧段下端及水平段底部发生空蚀破坏,产生长 38m、宽 7.3m、深 2.14m 的空蚀坑^[10];苏联布拉茨克水电站的溢流坝溢流段经连续过水 11 昼夜后,在溢流面上形成了深 1.2m、体积约 12m³ 的空蚀坑^[11]等。在我国,发生空蚀破坏的实例也很多,如 1962 年柘溪水电站的溢流坝^[12]汛期过后,矩形差动式鼻坎处有 12 个高坎的 23 个侧面上,钢筋被成排切断,混凝土剥蚀现象严重,总剥蚀面积近 24m²,坑深最大达 1.1m,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^[13]。1972 年 6 月,我国的刘家峡水电站^[14]右岸泄洪洞是由施工导流洞改建而成,水库正常蓄水位至泄洪洞反弧段落差为 120m,反弧末端最大流速为 45m/s。1972 年泄洪时反弧段及其下游底板遭到严重的空蚀破坏,100 多 m 长的底板表面遭到破坏,最大空蚀坑深达 4.8m。此外,还有丰满水电站溢流坝面^[15]、龙羊峡水电站底孔泄水道^[16]等也曾遭到空蚀破坏。总之,国内外泄水工程中发生空蚀破坏的实例举不胜举。柴恭纯^[17]对水工泄水建筑物的空蚀研究与应用中指出,由于过流壁面的不平整突体所引起的空蚀就达 20% 以上。因此,在实际的水利工程中人们对建筑物表面结构的要求越来越严格,例如美国曾在部分工程施工中要求混凝土表面要达到光滑如镜面的程度^[18],以确保工程运行安全;我国学者梁川^[19]等人也对过流壁面的不平整度进行过研究,提出了不平整度的控制标准。

为了减少和防止高水头泄水建筑物过流壁面上发生空蚀破坏,早期采用的措施主要是选用合理的体型,控制过流壁面的不平整度;采用抗空蚀材料,改

善材料的物理性能；减小水流的空泡溃灭的冲击压强。然而，当泄水建筑物工作水头超过 100m，流速超过 40m/s 时，采用上述措施往往不能奏效。自 20 世纪 60 年代开始应用掺气减蚀措施，减少空蚀破坏取得了很大成功。国内外大量工程实践证明，为了避免高速水流空化产生的空蚀破坏，经济且有效的措施是在低压区或易发生空蚀部位上游设置掺气设施强迫掺气，如美国的大古力坝和格伦峡泄洪洞、苏联托拉克拉克尔、中国龙羊峡和冯家山水库的泄洪洞等。因此，为了保证高坝大型水电站安全可靠的运行，对水工建筑物过流壁面的空化与空蚀的减免进行更深入的探讨与研究，从微观上弄清掺气减蚀的机理，提出更为有效的掺气减蚀措施，是一项十分迫切而意义重大的课题。

空化空蚀过程涉及力学、热力学、物理、化学和材料学等众多学科的研究的对象，有很强的关联性与耦合性，从单一视角出发无法全面了解演变规律，难以获得解决问题的关键技术。为此，需要多学科共同研究，从基础研究层面深入研究相关规律之间的耦合性，就空泡产生、生长和溃灭，形成冲击波、微射流和激波的过程，以及与此相关参数之间的关系给出明确的解释。

1.2 空化空蚀机理的研究现状

空化空蚀现象描述的是空泡产生、成长和溃灭，直至形成冲击波和微射流的瞬态过程。高速摄影技术和 PIV 技术推动了空化空蚀机理过程的研究，但仍存在局限性。虽然通过高速摄影能够获得空泡溃灭时形状变化的图片，利用 PIV 技术进而可以计算出射流速度，然而射流速度极快、空泡的尺寸很小，无法获得准确数据，也无法测定溃灭时泡内的物理量变化，只能从空泡溃灭后对周围环境造成的影响来判断，因此需要发展高速、微观、瞬时、动态的测量技术更准确地研究空化空蚀机理。

空化空蚀机理主要包括空泡的产生、成长、溃灭过程及产生的物理、化学效应，空泡演变过程中各种效应向边壁的传递和作用，以及边壁材料的响应和失效等过程。科学技术人员进行了大量的试验和理论研究，空化现象的机理可以归纳为 3 个方面：①空泡的形成机理；②空泡的成长和溃灭过程；③空化空蚀破坏的作用机理。

1.2.1 空泡形成机理的研究现状

1.2.1.1 液体中的气核

通常情况下的液体都不是纯液体，含有许多微粒杂质，如固体微粒、微生物和微气泡，统称为气核。气核直径为 $0.1\sim 10\mu\text{m}$ ，但数量很多，每立方厘米可多达 50 万个。根据 Henry 定律，假设一个球状泡悬浮于液体中，则泡内

外压强的平衡关系为

$$p = p_0 + \frac{2S}{R} \quad (1.1)$$

式中： p 为气核内压强； p_0 为液体压强； S 为气核与液体边界上的表面张力系数； R 为气核半径。

当气核周围的压强下降或温度上升到一定程度时，周围液体不断汽化并扩散到气核内，气核就会膨胀生长成空泡。空泡中的气体是由水蒸气或未溶解的可溶性气体组成，虽然其他气体的含量很小，但它们在空泡形成的最初阶段和溃灭的最后阶段有显著的影响^[20-21]。

尺寸较大的气核在浮力作用下逐渐上升到水面而逸出。而尺寸很小的气核，由式 (1.1) 可知，液体表面张力引起的附加压力较大，核内气体压强将高于泡壁处的流体压强，于是核内气体压强很大，核内的气体会受压而被周围的液体所吸收，也称为气核悖论。这样得到一个奇怪的结论：一方面液体中如果存在大量气核，液体中在某种低的临界压强下就会出现空化；另一方面，液体中的气核又处于不稳定的状态，气核不可能在液体中长期存留。但在实际中，却可以在液体中观察到气核的持久悬浮。

为此，许多学者进行了长时间研究，曾提出各种不同设想的观点与看法，目前公认的理论是 1947 年 E N Harvey 提出的疏水性固体表面缝隙模型^[22]的机理假说。他认为气核是水中疏水性悬浮固体表面缝隙中未被溶解的一些气体，将形成一个凹形自由表面，如图 1.1 所示。设缝隙为锥形，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，有 $\theta_e > \frac{\pi}{2} + \alpha$ ，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：

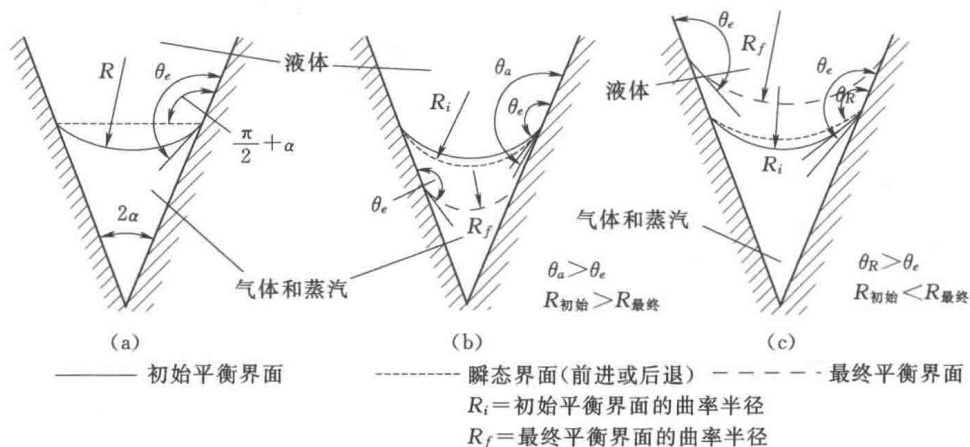


图 1.1 气体-蒸汽空腔在疏水性缝隙内的稳定作用

$$p_g + p_v - p_0 = -\frac{2S}{R} \quad (1.2)$$

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

表面张力所造成的压力为负值，意味着液体在界面下凹一侧。

假设 p_v 和 S 都和曲率半径无关。首先考虑的问题是液体局部未被气体饱和的情况，即 p_g 大于饱和值，如图 1.1 (b) 所示，气体将被溶解，液体向前推进，进入缝隙，其推进的接触角， $\theta_a > \theta_e$ ，因此，半径 R 小于平衡值。与此同时，气体的溶解使 p_g 减小。当扩散已达平衡时，接触角仍趋于 θ_e ，界面稳定在一个新的位置上，这时， $R_f > R_i$ 。显然，当 R_f 接近于零，如果表面张力机理保持与尺度无关，要使气体完全溶解是不可能的。其次考虑液体局部被气体过饱和的情况，即 p_g 小于饱和值。从液体扩散过来的气体将使空腔增大，如图 1.1 (c) 所示。起初，这仅仅是由于当接触角减小到其后退值 θ_R 时，界面曲率改变；然后界面以 $\theta = \theta_R$ 后退而造成空腔增大。同时， R 增大， p_g 也增大到趋于扩散平衡值。当扩散达到平衡时，接触角仍回到这种情况下的平衡值 θ_e 。这样在缝隙内扩散就有可能处于平衡状态以及随后界面处于平衡位置，只要 $\theta_R \geq \frac{\pi}{2} + \alpha$ ，当然也要被释放的气体在达到平衡之前不超过缝隙

体积。对于 $\theta_R < \frac{\pi}{2} + \alpha$ 的情况，液-气界面的曲率改变正负号，随着 R 的增大，界面后退引起 p_g 减小。若在 $\theta_R < \frac{\pi}{2} + \alpha$ 之前不能达到平衡，气体将继续释放，气腔将从缝隙鼓出，像球体的一部分那样突出，或甚至逐渐发育直到浮力或动水作用把一部分气体分离出去为止。

Harvey 气核形成模型可以很好地解释观察到的所有空化现象，无需假设一些不可能有的水的性质，并且于 1958 年被 Knapp 的大量实验数据所证实^[1]。但由于实际环境中缝隙尺寸和形状的不确定性以及固体表面的疏水性质也不尽相同，给数学分析带来的困难很大，因此 Harvey 模型迄今仍缺乏完善的数学描述。

1.2.1.2 空化数及空化的主要类型

影响水流空化产生与发展的因素很多，如流动边界层形状、绝对压强、流速、液体黏性、表面张力、气核、水中杂质、汽化特性、边壁表面条件和所受的压力梯度等。其中最基本的物理量为绝对压强和流速，所以一般均以这两个量为基础来建立标志空化特性的参数，表示形式如下：

$$\sigma = \frac{p_0 - p}{\frac{1}{2} \rho V_0^2} \quad (1.3)$$

式中： V_0 为来流未受扰动的流速； ρ 为液体的密度； p 为绕流物体上讨论点的绝对压强； p_0 为未受绕流物体扰动的参考压强。

当研究的目标点压力刚好等于液体的饱和蒸汽压力时，空化现象将发生，这时的空化数称为初生空化数，为

$$\sigma_i = \frac{p_0 - p_v}{\frac{1}{2}\rho V_0^2} \quad (1.4)$$

依据空化发生条件、空泡区结构以及水动力特性诸因素将空化形态划分为4种类型。

(1) 游移型空化。

它是单个随水流一起运动的不稳定空泡，常常出现在固体边壁、流体低压区以及高紊动剪切区。当这种游移的空泡从低压区流经高压区时，空泡要经历若干次膨胀、收缩的振动衰减往复过程，以至最后溃灭消失。

(2) 固定型空化。

此种空化形态常在初生空化的临界状态后发生。大量尺寸很小的游移型空泡附着在空腔的内表面，并且具有强烈的紊动，这些空泡随水流沿固定的空腔内表面移动到尾部，然后逐渐溃灭消失。固定型空化的最大长度与水体内的压力场分布有关。

(3) 漩涡型空化。

空泡存在于漩涡核心的高紊动剪切区中，涡心压强最低，气核可以在此区域中长时间停留，因此空化首先在漩涡中心形成。显然，漩涡空化的空化特性与漩涡的强度密切相关。

(4) 振荡型空化。

此种空化形态发生在静止的水体中，物体表面振动形成的高频压强脉动促使空泡的产生和溃灭。当高频振动的振幅较大时，蒸汽压强高于水体局部压强即可形成空化，可经受多次空化循环过程。

1.2.2 空泡生长和溃灭的研究现状

空化是由于液体中气核在低压场作用下生长、发展和溃灭的结果。如果空泡用电火花、激光、超声波等方法在静水中产生，空泡将在同一位置上产生、膨胀、收缩和溃灭，利用高速摄影、PIV技术观测分析空泡的形态变化、运动特性以及泡内的动力特性；如果空泡是在流动的水体中产生，则空泡随水流向下游运动的过程中膨胀、收缩，在较高压力区发生溃灭，由于流动水体中空泡变化的动态瞬时性，目前还没有较为成熟的理论。

无论何种形式产生的空化，基本单元是由单个空泡发展而成。如果空间中

空泡的密度不太大,则每个空泡将独立运动,而邻近空泡运动对其影响可忽略。因此,研究单个空泡的运动特性和动力特性具有重要意义。考虑初始状态为静止的孤立球形空泡,空泡的静力平衡条件为

$$p_R = p_g + p_v - \frac{2S}{R} \quad (1.5)$$

式中: p_R 为空泡泡壁压强; p_g 为泡内气体的分压强; p_v 为饱和蒸汽的分压强; R 为随时间 t 变化的空泡半径; S 为空泡周围液体的表面张力系数。

假设 $p_R < p_g + p_v - \frac{2S}{R}$, 即空泡泡外的压强小于空泡泡内的压强,空泡在内外压差的作用下对外膨胀,推动周围液体对外径向流动。泡内压力随着空泡膨胀而不断下降,当下降到与泡外的液体静压力一致时,由于液体的惯性,空泡将继续做“过度”的膨胀,一直达到最大泡半径。这时由于泡内压力低于泡外的平衡压力,即 $p_R > p_g + p_v - \frac{2S}{R}$, 因此周围液体在压差作用下又开始反向运动,即向空泡中心聚合,同时压缩空泡,使之不断收缩,空泡半径逐渐减小,而其腔内压力逐渐升高。继而因聚合液流惯性的作用,气泡被“过度”压缩,使其内部压力再次高于周围液体的平衡压力,直到腔内压力高到能够阻止空泡压缩而达到新的平衡。此时,空泡膨胀与压缩的第一次循环结束。但此时由于泡内压力比泡外的静压力大,空泡发生反弹,经历第二次膨胀和压缩过程,上述过程称为空泡脉动。由于水的密度和惯性均比较大,空泡通常要经历多次的脉动过程^[23-24]。随着泡能和泡内含气量的逐渐减少,空泡最终衰减溃灭,同时空泡在脉动过程中将对外辐射出若干冲击波和微射流。

1.2.2.1 球形空泡动力学研究现状

高速水流空化空蚀涉及空泡动力学问题,Reynold 最早对空泡做了研究,观察了空泡在狭窄管内水流中产生和在下游高压区的溃灭。Besant 曾根据质量和动量守恒原理,描述了无限黏性、不可压缩流体域中球形空泡的运动情况,并提出预测流体中任一点的压力和空泡溃灭时间这一问题,但他没有把数学结果与工程实践结合起来。Lord-Rayleigh^[25] 最早对空泡进行了理论分析,也是空化和空泡动力学现代研究的基础。他采用能量守恒的原理求解了带有一个真空的或内压力为常数的球形空洞的无穷域流场的流动问题。对流体中一个空泡的溃灭进行求解,并对空泡的溃灭时间、溃灭速度和液体中最大压力脉冲均做了计算,从而奠定了空泡动力学的发展基础,得到了著名的空泡径向运动 Reyleigh 方程:

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{1}{\rho}(p_R - p_\infty) \quad (1.6)$$

式中： R 为空泡半径； \dot{R} 为空泡的泡壁速度； \ddot{R} 为空泡的泡壁加速度； p_R 为空泡泡壁处的压强； p_∞ 为液体内部的压强。

但是，Rayleigh 方程忽略了空泡可压缩性、黏滞性、表面张力、含气量和热传导等因素的影响，当空泡半径接近零时，球对称溃灭晚期空泡被包裹在一个高压球壳内，高压球壳上压力极高，空泡表面的速度趋于无穷大，且不会出现反弹，这与实际情况不符合，不能完全解释空泡在液体中的生长和溃灭过程。Reyleigh 的这一理想模型提示了空泡球对称溃灭的内爆机制。

在此基础上，许多学者对理想空泡运动模型进行了修正，做出了巨大的贡献。Herring^[26] 在研究水下爆炸时，对空泡内部压强变化的情况进行了研究，应用拟声学近似法，即假设液体的流速与声音在液体中的传播速度相比总是很小的，略去了非线性微分方程中的高阶项，应用一阶近似来研究空泡溃灭时泡表面的情况，马赫数小于 1。Schneider 用数值方法处理了相同的简化模型，但马赫数达到约 2.2。Trilling^[27] 对液体的可压缩性进行了一阶修正，得到了含气型空泡溃灭的近似方程，并将其推广应用于空泡周围液体中，得到了速度场和压力场，并由此计算出空泡溃灭和回弹再生的条件。Gilmore^[28] (1952) 考虑了液体黏性和表面张力的影响，对可压缩性情况下应用 Kirkwood - Bethe^[29] 假设，即压强扰动的传播速度等于音速和液体局部速度之和，导出了可压缩液体中球形空泡内压力变化时泡壁运动的近似方程，更成功地处理了液体可压缩性的效应。Mellen^[30] 和 Flynn^[31] 等人利用修正的 Gilmore 方法处理了非线性可压缩液体问题，前者计算了空泡完全溃灭时的冲击波的传播，后者考虑含有气体的空泡，建立了一个特殊模型并提出了一个求解方法。Benjamin^[32] 指出，K - B 假设可能有局限性，并提出了另一种逐步逼近的解法。Hunter^[33] 在研究爆炸空泡时，用精确方法进行了数值计算。结果表明，在空泡临近溃灭时，有 $C \gg C_\infty$ 且最后阶段的 R 与 $R^{0.5}$ 成比例，并发现在相对半径约为 5%、马赫数超过 0.3 时，可压缩性的影响就开始变得重要。Hickling 以 Gilmore 为基础进一步考察了空泡内含有少量气体因而出现空泡反弹的情形。Hickling 和 Plesset^[34] 在考虑液体可压缩性和空泡含气量的情况下对 Rayleigh 方程进行分析，结果发现可压缩性对空泡溃灭影响很大。Ivany 和 Hammitt^[35] 进一步考虑液体可压缩性的影响，对泡壁压强进行了修正。研究表明，考虑液体的可压缩性在空泡溃灭的最后阶段是重要的，考虑可压缩性以后，计算得出的溃灭最大压强比不考虑可压缩性时小若干个数量级。Tomita^[36] 在求解非线性波动方程时利用 Poincare - Lighthill - Kuo (PLK) 摄动方法，并且考虑到液体可压缩性二阶项的影响，进而得到空泡运动方程，结果表明考虑液体压缩性的影响将使得空泡的运动大幅度衰减。Keller 和 Kolodner^[37] 将周围液体看作是可压缩的，进而考虑了声辐射效应的影响。Ep-

stein 和 Keller^[38]用同样的方法推导出了空泡的一维和二维方程。Keller 和 Miksis^[39]结合以上修正,在考虑了声辐射效应、液体黏性、表面张力的情况下推导了空泡的 KM-polytropic 振动方程。Lastman 和 Wentzell^[40]推导出一个精度很高的方程,并指出在马赫数较大时,该方程的结果与 Gilmore 方程的结果相差较大。Prosperetti 和 Lezzi^[41-42]通过小扰动理论导出了可压缩流体中球形空泡的泡壁运动的一阶近似和二阶近似方程,并进行了数值计算,结果表明流体的压缩性对空泡溃灭有很大的影响。张风华^[43]数值计算了液体可压缩影响下空泡径向运动的非线性动力学特性,揭示了空泡运动具有不确定性。

Poritsky^[44]对具有黏滞性的不可压缩液体中空泡的发育及溃灭过程进行了研究,发现液体的黏性会延缓空泡的发育和溃灭的速率,黏性增大将减小空泡的最大半径,但只有比水大得多的黏性才对空泡的发育和溃灭产生明显的影响。黄继汤^[45-46]等人通过数值计算和实验两种方法对黏性液体中空泡膨胀及压缩过程进行了研究,采用高速摄影技术得到空泡半径随时间的变化规律。研究指出液体黏性使空泡收缩过程明显变缓;当液体黏性很大时,空泡收缩现象不明显,液体愈黏,则黏性的变化对空泡收缩影响愈小;而且液体黏性也会使空泡膨胀过程明显变缓,但在膨胀初期,黏性的影响不明显,膨胀后期,黏性影响过程变缓的现象越明显。陆力^[47-48]通过高速摄影技术研究了液体黏性对空泡在边壁附近溃灭形态,空泡微射流形成过程以及液体黏性变化对空泡微射流速度和空泡溃灭历时的影响。梁柱^[49]对空泡在含有泥沙的水中的压缩溃灭过程进行了分析,研究指出泥沙的存在会增加水的黏性,因而在进行空化空蚀研究时,对于泥沙含量较少的长江水中工作的水轮机机械可以不考虑水的黏性的影响,而对于泥沙含量较大的黄河及其他河流的工作中,不应忽略黏性的影响。此后,很多学者研究了液体黏性对空泡生长过程、空泡变形、脉动空泡的球形稳定性以及射流的形成等的影响^[50-56]。赵瑞^[57]研究了含气量对黏性液体中空泡脉动特性的影响,指出脉动次数增加,空泡内含气量增大,受黏性影响空泡膨胀和收缩过程明显变缓。Ivany^[35]通过数值模拟和实验两种手段对液体中空泡的溃灭进行了研究,并把表面张力与黏滞性影响相比较,发现表面张力对空泡的溃灭影响很小,因此对于空泡溃灭的压力场来说,其影响一般可以忽略。但是研究发现表面张力对于运载火箭、人造卫星等航天器在微重力条件下工作的部件表面产生的空泡以及超声波在治疗人体组织中产生的微小空泡的影响却很大。

Plesset^[58]考虑了表面张力的影响,应用 Rayleigh 方程研究了外压变化时蒸汽泡直径在膨胀和压缩过程中的变化,并用高速摄影对空泡直径图片进行观测。结果发现,在空泡生命周期的大部分时段数值计算和实验数据是相当吻合的,两者差异仅仅出现在空泡发育的起始片刻和溃灭的最后阶段,由于膨胀初

期与边壁影响有关,溃灭末期受到液体可压缩的影响。Nowotny^[59]、Iwai^[60-61]等人分别对不同表面张力对铝材料空蚀破坏的影响及空泡膨胀压缩过程进行了研究,并得出了一些定性的研究成果。Plesset^[62]在考虑了液体黏性和表面张力等情况下,对 Rayleigh 方程进行了修正,并以实际流动中随时间变化的环境压力 $p(t)$ 代替不变量 p_∞ ,得到了空泡动力学中著名的 Rayleigh-Plesset 方程:

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{1}{\rho} \left(p_g + p_v - \frac{2S}{R} - \frac{4\mu\dot{R}}{R} - p(t) \right) \quad (1.7)$$

式中: p_g 为空泡内的气体; p_v 为蒸汽压力; S 为表面张力系数; μ 为液体的动力黏性系数。

黄继汤^[63-65]分别研究了不同表面张力系数对空泡的膨胀和收缩过程及铝材料空蚀破坏程度的影响。王起棣、张慧生^[66]通过边界积分数值模拟方法,研究了表面张力对固壁近旁空泡的溃灭特性的影响。Noltingk 和 Neppiras^[67]在考虑空泡含气量对空泡动力学的影响情况下,推导出理想无黏不可压缩液体中含气气泡的运动方程,进而利用该方程得到了气泡溃灭的最小半径及最大速度。Boguslavskii^[68]对气体扩散到气泡中去的情况进行了数值计算,结果表明气泡内含气量随着气泡的成长相对减小。黄景泉^[69,70]考虑了表面张力和含气量的影响对空泡起始和溃灭阶段的速度、压力和空化噪声进行了理论研究。

Kausi^[71]考虑了热传导因素的影响,推导出空泡的运动方程,考察了热传导对空泡溃灭甚至剧烈发光现象的影响。胡影影^[72]通过引入等温、绝热和准绝热过程的不同热力学模型数值研究了固壁附近轴对称空泡溃灭问题。结果显示对于不同的热力学模型,绝热过程能最大程度抑制空泡溃灭,减弱对固壁造成的空蚀破坏。卢义玉^[73](2009)基于空化空泡发育和溃灭过程的热力学分析,提出了热传导-热辐射模型,数值计算了空泡发育和溃灭过程的 Rayleigh-Plesset 方程。结果表明,此模型可以较高精度地模拟空化空泡的变化过程,计算结果与试验结果吻合较好。Plesset^[74]考虑了液体温度变化对空蚀破坏程度的影响。Hammit^[75]、Hattori^[76]等人对材料空蚀破坏与温度关系进行了研究。结果表明,空蚀破坏程度随着液体温度的增加而增大,并在 50℃ 左右达到最大值,随后空蚀破坏随着温度继续上升却在减小。Zhang^[77]等人在研究材料失重中指出空泡体积越小温度影响越明显。Okawa^[78]分析了高温液体中空泡运动与常温液体中不同的原因。

1.2.2.2 空泡群动力学研究现状

由于实际工程中遇到的空化空蚀问题大多属于空泡群问题,而空泡相互之间的作用将使空泡的运动与单一空泡的行为有所不同。空泡群溃灭产生的巨大能量是空蚀破坏和对过程强化的基础,因此空泡群的研究对预防空化产生破坏