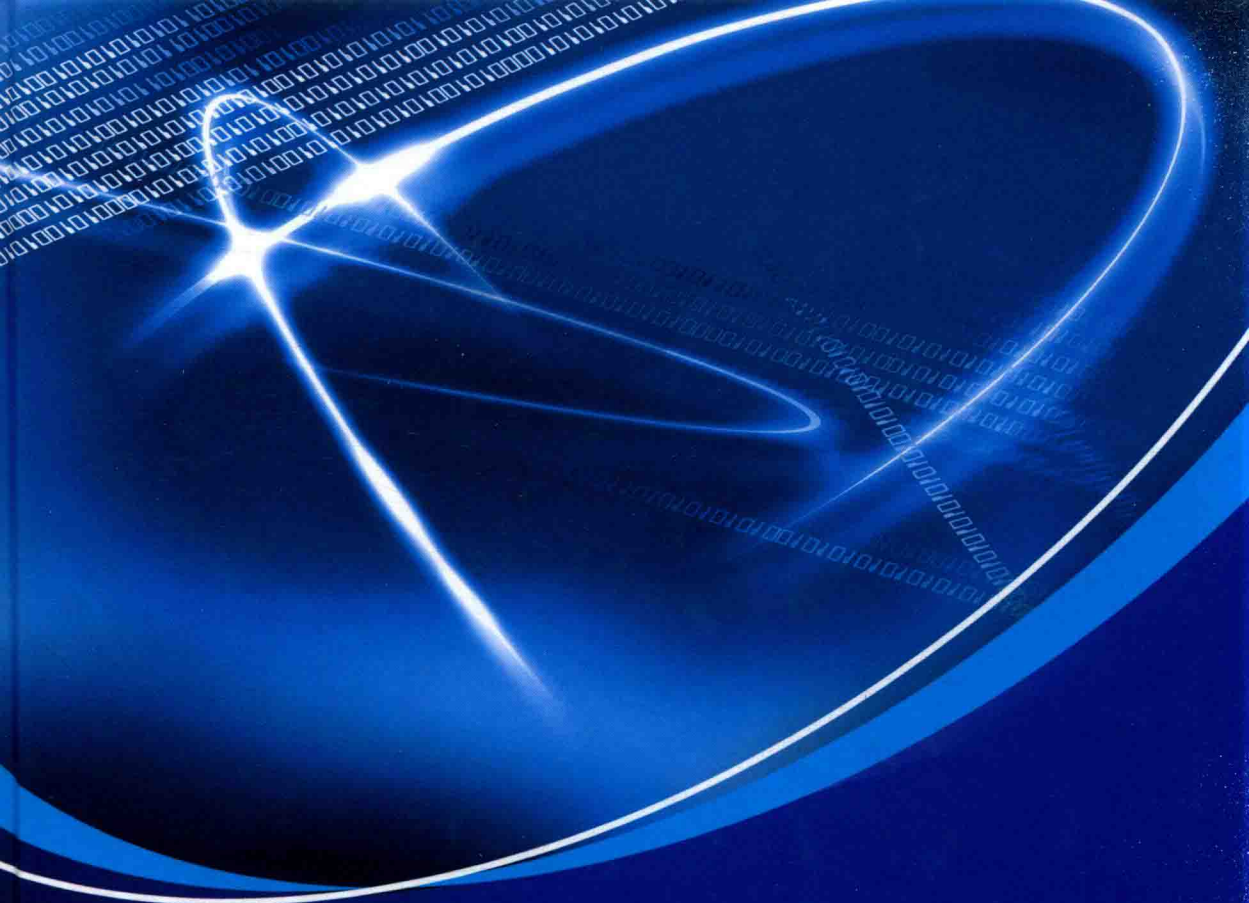




激光诱导 空泡空化强化理论与技术

任旭东 袁寿其 著



科学出版社

激光诱导空泡空化强化 理论与技术

任旭东 袁寿其 著



科学出版社

内 容 简 介

激光空化强化技术是一种新型的材料表面改性处理技术。本书详细阐述激光诱导空泡空化强化并抑制空蚀的理论和技術。在总结激光空化强化技术的理论、应用和发展成果的基础上,较系统地阐述激光诱导空泡及空化强化的基本理论,研究激光诱导水下空泡的冲击波力学效应,分析激光空化的机械效应和化学效应,给出各种材料在激光空化强化的表面形貌、残余应力、抗空蚀性能等,充分反映激光诱导空泡空化强化技术的先进性与实用性。本书还给出诸多具体的应用实例,具有较好的可读性和借鉴性。

本书适用于高等院校相关专业的大学生、研究生和教师,也适用于从事流体机械、水力机械、空化空蚀、材料加工、激光加工的技术人员、推广应用人员和研究人员。

图书在版编目(CIP)数据

激光诱导空泡空化强化理论与技术/任旭东,袁寿其著. —北京:科学出版社, 2017. 12

ISBN 978-7-03-055545-8

I. ①激… II. ①任…②袁… III. ①空化-激光-光诱导 IV. ①TV131.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 287685 号

责任编辑:惠 雪 曾佳佳/责任校对:彭 涛

责任印制:张克忠/封面设计:许 瑞

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 12 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017 年 12 月第一次印刷 印张:13

字数:260 000

定价:99.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

空化问题一直是水力机械领域研究的核心问题，也是众多流体工程领域关键技术的核心问题。空化对于水力机械的危害主要在于：改变液体的水动力作用，降低水力机械性能；产生空蚀，损坏转轮表面；辐射空化噪声，引起振动和噪声。正是因为空化空蚀现象带来了较大的不良影响和后果，因此一直是人们研究的热点问题。空泡现象是伴随激光击穿液态物质时产生的物理现象之一。激光空泡产生原理为：激光聚焦于水中，击穿水形成等离子体，激光聚焦区压力急剧上升并对外膨胀，从而导致泡内压力急剧下降，形成具有与螺旋桨空化空泡相似的空泡，激光空泡在固壁面附近溃灭时将产生冲击波和射流，并具有脉动特性，即膨胀—压缩—膨胀过程。研究并抑制空化产生的空蚀问题一直是水力机械设计和制造领域非常重视的问题，也是提高水力机械性能必须考虑的重要因素。激光空化强化技术是一种对材料性能进行改性的全新技术和解决水利机械空蚀问题的全新手段，其理论和应用研究对于水利机械、激光技术等领域具有重要的现实意义。本书阐述了激光空化强化技术的理论、应用和发展，系统地研究激光空泡的冲击波力学效应对材料表面的加工和改性，获得抗空蚀性与耐腐蚀性较好的材料表面，解决了空化空蚀机理复杂、解决方法传统、危害大的突出问题，具有很重要的科学意义与广阔的工程应用前景。

全书共 8 章，第 1 章是全书的铺垫，主要是对空化和空蚀现象进行介绍。区分了空化与沸腾现象，指出液体中存在大量空化核是空化发生的一个必要条件，造成空蚀现象的原因有两种：一种是空泡溃灭冲击波作用，另一种是空泡溃灭过程中微射流作用。此外，介绍了空化初生和空化数的意义，提出利用激光空化的能量效应对材料进行强化的新思路。

第 2 章，介绍了激光击穿液态物质和等离子体冲击波在水中的传播特性，提出利用激光空化诱导产生空泡以及空泡溃灭对材料进行强化的新方法，简称为激光空化强化；之后介绍球形空泡惯性生长、溃灭和回弹过程，讨论了含气量、表面张力、液态黏性和可压缩性对空泡溃灭压力的影响；最后，介绍近壁面附近空泡的脉动作用，空泡在溃灭阶段等温过程和绝热过程的冲击波压力数值计算，结合国内外学者的研究成果阐述空泡在强化材料过程中的微射流强化机理和冲击波强化机理。

第 3 章，主要在激光诱导水下空化泡的基础上利用水听器探测所产生冲击波声压信号，并根据声压信号，将电信号换算成力信号，由此定量地测量作用在靶材表面上的力学效应，并将该数值与材料的屈服强度进行对比，以此分析在此条件下

的激光空化是否对材料起到了空化强化作用。同时从激光能量的角度出发,探究激光参数与作用在靶材表面上的力学效应的关系,进而根据靶材本身屈服强度的对比得出其强化规律,为进一步研究激光诱导空泡的强化机制提供实验数据上的参考。

第4章,从单一激光空化泡入手,采用数值模拟法来研究空化泡动力学特性及其对材料表面产生的强化作用。仿真模拟空泡在固壁面附近的膨胀、脉动和溃灭过程,采用 FLUENT 软件中的 VOF 多相流模型和全空化模型来获取空泡整个脉动过程气液两相分界面的动态变化序列图,并通过求解质量连续方程、Navier-Stokes 方程和界面方程来研究空泡溃灭时产生的微射流现象,探究微射流的产生机理。

第5章,从激光空化的机械效应和化学效应两方面作为切入点,实验探索激光能量对于靶材性能的影响,分析了激光空化对于羟自由基含量的影响,通过检测羟自由基含量间接探究羟自由基含量与 2A02 铝合金表面残余应力值之间的关系,提供了另外一种表征材料空化强化效果的途径。

第6章,通过对比空化前后 2A02 铝合金近壁面组织和力学性能的差异,进一步验证激光诱导空泡对材料的强化理论及其机制的有效性和可行性。在水、乙醇、硅油三种不同液体中,利用激光在 2A02 铝合金靶材近壁面产生空泡,描述并分析激光空泡在靶材壁面附近的整个脉动过程。通过对比不同液体、不同激光能量和泡壁距离靶材的表面形貌,分析空泡溃灭时的射流和冲击波对于靶材表面的作用机制,将残余应力实验值与仿真射流压力对比,分析不同液体中激光空化对 2A02 铝合金表面作用机制。

第7章,介绍激光空化强化对金属材料抗空蚀性能的影响,分析铸铁和铝合金两种材料的抗空蚀性能,采用激光空化与超声波空蚀实验相结合,对比分析激光空化作用前后区域的力学性能和微观形貌变化趋势,阐述激光空化作用下材料抗空蚀机理,同时为材料抗空蚀性能实验的探讨提供较为完全的理论依据。

第8章,介绍用于激光空化强化的激光器系统,再介绍了几套利用激光诱导空化强化技术的强化装备及技术原理,通过改变激光能量以及空泡产生的位置,控制冲击波传播速度和微射流冲击力大小,实现激光空化强化材料表面性能的自动化和高效率空化强化的目的。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金项目 (No. 51479082, 51239005, 5140-5200)、水利部科技推广计划项目 (TG1521) 的资助,特此向支持和关心作者研究工作的所有单位和个人表示衷心的感谢,感谢出版社为本书出版付出的辛勤劳动。作者还要感谢张洪峰、罗春晖、王杰、佟艳群、李祥、石佑敏等为本书付出的辛勤劳动。书中有部分内容参考了有关单位或个人的研究成果,均已在参考文献中标出,在此一并致谢。

作 者

2017 年 9 月

目 录

前言

第 1 章 空化简介	1
1.1 概述	1
1.2 空化与空蚀	1
1.3 空化汽化与空化液化	6
1.4 空化内涵与分类	8
1.4.1 空化的内涵	8
1.4.2 空化的分类	9
1.5 空化核与空化数	10
1.5.1 空化核	10
1.5.2 运动平衡与气核悖理	11
1.5.3 空化初生和空化数	13
1.6 空化效应与空化强化	15
1.6.1 空化的能量效应	15
1.6.2 空化强化与激光空化方法	16
1.7 本章小结	18
参考文献	18
第 2 章 激光等离子体冲击波和空化空泡特性	21
2.1 概述	21
2.2 激光击穿液态物质	21
2.3 激光诱导等离子体冲击波	23
2.3.1 激光等离子体冲击波形成	23
2.3.2 水下冲击波的基本方程	25
2.4 气泡动力学与气泡特性	30
2.4.1 气泡动力学 Rayleigh-Plesset(R-P) 方程	30
2.4.2 气泡的生长、溃灭与回弹	31
2.5 激光诱导水下空泡脉动作用	33
2.5.1 球形蒸气泡溃灭过程	34
2.5.2 含气量修正	36
2.5.3 液体黏性、表面张力和可压缩性影响	39

2.6 近壁面的激光诱导空泡脉动	41
2.6.1 球形空泡的非对称溃灭和微射流机理	42
2.6.2 空泡溃灭的冲击波压力	45
2.6.3 球形空泡溃灭后的回弹与冲击波	50
2.7 本章小结	52
参考文献	52
第 3 章 激光空化的力学强化效应	55
3.1 概述	55
3.2 脉冲激光对声压信号探测	55
3.2.1 声压信号探测系统	55
3.2.2 水听器探测原理	57
3.3 多参数脉冲激光实验对比分析	59
3.3.1 声压信号对比分析	59
3.3.2 靶材作用对比分析	61
3.4 激光脉冲能量对声压信号的影响	63
3.4.1 声压信号与力学效应转换关系	63
3.4.2 激光能量与靶材作用力的关系	63
3.5 本章小结	65
参考文献	65
第 4 章 激光空化仿真研究	66
4.1 概述	66
4.2 近壁面空泡脉动模拟研究	66
4.2.1 模型建立与边界条件设置	66
4.2.2 湍流模型及参数设置	69
4.2.3 模拟结果与分析	71
4.3 激光空泡不同液体近壁面仿真	78
4.3.1 模型建立与边界条件设置	78
4.3.2 模拟结果与分析	80
4.4 不同离焦量下的激光空化仿真	87
4.4.1 模型建立与边界条件设置	87
4.4.2 模拟结果与分析	90
4.5 本章小结	96
参考文献	96
第 5 章 激光空化强化和化学强化效应	98
5.1 概述	98

5.2 激光空化强化理论	98
5.2.1 空化泡理论基础	98
5.2.2 激光空化化学强化	101
5.3 金属材料激光空化强化机理	102
5.3.1 2A02 靶材激光空化作用	102
5.3.2 激光空化强化实验	103
5.3.3 实验方案的选择	105
5.3.4 激光能量和离焦量对靶材机械性能的影响	107
5.4 激光空化的化学强化效应	111
5.4.1 羟自由基与化学强化作用效果	111
5.4.2 激光空化羟自由基的检测	111
5.4.3 激光能量对羟自由基含量的影响	117
5.4.4 激光空化强度与靶材性能对应关系	120
5.5 本章小结	124
参考文献	124
第 6 章 近壁面激光空化强化	127
6.1 概述	127
6.2 激光空化对机械性能的影响	127
6.2.1 激光空化对材料作用分析	127
6.2.2 激光能量对表面形貌的影响	128
6.2.3 激光能量对硬度的影响	131
6.2.4 激光能量对残余应力分布的影响	135
6.3 不同液体近壁面激光空化效果	139
6.3.1 不同液体激光空化强化实验系统	139
6.3.2 近壁面激光空泡的脉动过程	140
6.3.3 液体对合金表面性能的影响	142
6.4 本章小结	147
参考文献	147
第 7 章 激光空化抗空蚀性能提升	149
7.1 概述	149
7.2 水机材料的抗空蚀性	149
7.3 抗空蚀机理与表征	150
7.3.1 机械冲击机制	151
7.3.2 热、化学腐蚀机制	151
7.3.3 抗空蚀研究方法	152

7.4 典型铸铁的抗空蚀性能提升	154
7.4.1 激光空化及空蚀实验过程	154
7.4.2 激光空化对铸铁性能的影响	158
7.4.3 铸铁材料超声空蚀实验	162
7.4.4 激光能量对抗空蚀性能的影响	165
7.4.5 空化作用铸铁材料表面的抗空蚀机制	170
7.5 铝合金抗空蚀性能提升	171
7.5.1 铝合金实验设备及方法	171
7.5.2 3.5%NaCl 溶液对材料空蚀性能的影响	174
7.5.3 激光空化对空蚀速率的影响	175
7.5.4 激光空化对材料硬度的影响	176
7.5.5 激光空化对空蚀形貌的影响	177
7.6 本章小结	179
参考文献	180
第 8 章 激光空化强化技术与成套试验装备	182
8.1 概述	182
8.2 激光空化强化技术	182
8.3 激光空化强化成套试验装备	184
8.3.1 激光诱导空化强化效果研究平台	184
8.3.2 激光器及相关设备介绍	185
8.3.3 激光诱导高性能水泵材料空化强化试验装备	187
8.3.4 激光诱导泵阀芯空化强化试验装备	189
8.3.5 激光诱导空化提高水泵叶轮强度试验装备	191
8.3.6 多系统自动化协调工作的激光诱导空化强化试验装备	193
8.3.7 高空化激光强化效率试验装备	195
8.4 本章小结	196
参考文献	196
索引	197

第1章 空化简介

1.1 概 述

空化指的是当液体内部局部温度高于常压下饱和蒸气温度或者液体内部局部压力降低时,固液交界面会产生空穴,该空穴随着液体流动,将经历形成、发展和溃灭三个阶段。空化一般认为是液体中局部区域压强低于一个常温下约为零的正值,从而破坏液体流动的连续性,随后出现一系列充满溶于液体的气体或液体蒸气小气泡的流体特有的物理现象。液流中空化现象的进程大致可以分为三个阶段:空化初生阶段,此时液体中出现单个分散的空泡,并以游移空泡的形态随流体移动;空化发展阶段,在固壁面附近会造成局部层状空化,同时许多空泡在其后端聚集成云状的空化现象;空化完全阶段,空泡不断向固体后部区域运动,其尺寸大于固体的尺寸,发展为超空泡形态。本章主要介绍了水力机械上由于空化而引起的空蚀现象以及造成空蚀现象的原因,对空化内涵进行介绍并分类。简要介绍了不同类型的空化核模型,并对空化核运动平衡和气核悖理进行了讨论。此外,介绍了空化初生和空化数的概念,以及空化的能量效应,最近的一些研究开始逐步把研究方向转移到对于空化能量的利用,即利用空化产生的能量,来强化一些物理、化学过程,并提出利用激光诱导产生的空泡对材料强化的新思路和方法。

1.2 空化与空蚀

空化现象最早于 1753 年被 Euler^[1]观察到,当水管中局部压强降低至某值时,水中会产生真空区域,并第一次提出了空化现象。19 世纪 90 年代,研究学者 Barnaby 和 Berkowitz^[2]在调查蒸汽机船上效率降低的螺旋桨工况后,阐明了“空化”的观点,建立了该领域第一个实验型水洞,通过闪频观察器成功地观测到了空化现象,并提出空化现象可能发生在固体与液体间相对高速运动的区域。100 多年前,当英国研制的驱逐舰下水实验时,发现螺旋桨推进器在水中会产生很明显的振动,由于当时科研水平有限,一直不清楚具体原因,Thornycroft 等^[3]研究表明,推进器在水下运行时,会造成水中局部区域水压降低,产生大量的气泡,气泡在水压的作用下会产生周期性的膨胀收缩,最终破灭,而振动就是由气泡的破灭造成的,这是历史上第一次对空化现象做出合理的解释。随着水上航运技术的发展,越来越多

的水力机械得到发展,由空化空蚀现象导致的水力机械受损成为亟待解决的问题,关于空化的科学研究也变得日益重要。目前空化产生的机理、空泡的脉动等方面都已经有了较深入的研究。

随着对空化问题研究的深入,人们开始探究造成液流中局部压强降低的原因。目前,这方面的研究主要集中于超声波空化和水力空化。

超声波空化是指将声信号作用于液流中,与液流场间产生的一种非线性效应。声信号作用于液流中,液流中的微颗粒即空化核被声波激活,随着声信号的加强或减弱,空化核表现为振荡、初生、长大、收缩以及溃灭等一系列过程。超声波空化中存在着多相流、空泡群等复杂的物理现象,已成为目前空化领域十分重要的基础性研究。同时,也由于超声波空化的动力学和热力学特点,被广泛应用于水力机械、水中兵器、微生物处理及医疗中。计时鸣等^[4]分析气泡溃灭在推动磨粒改变其动能时所起的增强湍流效果的作用,在此基础上搭建了超声辅助磨粒流实验装置。吴书安等^[5]对抛光后的6061铝进行超声振动空蚀实验,发现材料表面粗糙度和硬度随着空蚀时间的增大而增大,在超声振幅为 $10.8\mu\text{m}$ 时达到最大空蚀效果。何洪波等^[6]利用超声空化产生特殊的物理化学环境来强化化学键的生成,同时实现半导体从无定形态到固定晶型转变,采用超声辅助共沉淀法制备了长为 $0.2\sim 1\mu\text{m}$ 、直径为 $20\sim 30\text{ nm}$ 的 $\text{Ag}_2\text{S}/\text{Ag}_2\text{WO}_4$ 微米棒复合光催化剂。陈思忠^[7]利用超声波空化过程中空泡溃灭产生的热点效应,减弱污垢与清洁件之间的黏着力,将超声空化应用于机械清洁领域;于凤文等^[8]利用超声空化过程中的热点效应,改变化学催化剂的结构,增强其化学活性,加快了化学反应的进行。但是,超声空化的最大弊端是难以实现工业化,于是人们开始研究另一种产生空化的方法,即水力空化^[9]。

水力空化是指流体流经限速区域(如文丘里管、几何孔板),由于流体压强的降低,在液流中的空化核附近产生压降,当压力继续降低到低于液流在常温下的蒸气压时,空化核开始膨胀,液流中气体随之释放,液流的汽化以及空化核的膨胀,形成了大量的空化泡;随着液流的流动,空化泡随之流动,当遇到液流中压强较大的区域时,空化泡的体积会发生急剧的变化,并伴随着多次的“膨胀—收缩”过程,最终在空泡溃灭时,会产生局部高温高压区域。李奎等^[10]采用多孔板空化反应器处理石油污水,考察了不同入口压力、石油初始含量、温度和空化时间等影响因素对水中石油污染物去除效果的影响。黄永春等^[11]采用单因素方法研究了环境因素对撞击流—水力空化深度处理焦化废水的影响,通过响应面法优选出最佳反应环境条件,结果表明,水力空化能有效处理焦化废水。Hammit^[12]研究了用于描述空化初生以及空化状态的参量(空化数),探究了空化数对于空泡群的影响,从而解释了空化中存在的白雾状即超空化现象。以上是关于水力空化的机理性研究,随着机理研究的进一步发展,水力空化技术的应用也发展到了一定的程度。Kumar等^[13]研究了水、蓖麻油和红花油在几何孔板中发生的水力空化水解过程,证明了

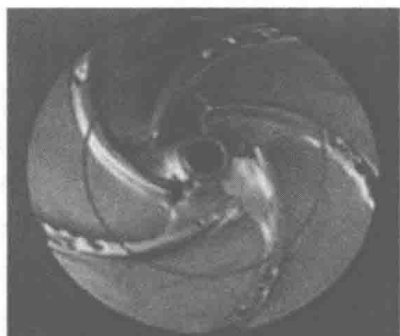
水力空化的高能量利用率; Pandit 等^[14] 研究了水力空化中空泡破灭时能量对细胞的破坏作用, 对空泡破灭用于微生物有机污水的降解进行了原理性研究。水力空化在废水处理方面也发挥着重要的作用, 反应装置简单、运行和管理费用低、大规模化投入运行相对容易、空化装置经济, 但目前实验研究的规模较小, 主要在实验室进行小型的试验, 存在着空化器放大的问题等。

自激光诱导产生空泡的新方法出现之后, 空泡研究得到了长足的发展。当激光聚焦液体中, 聚焦点激光功率密度达到或超过液体的击穿阈值时, 由于激光的高能辐射产生高温等离子体, 等离子体以超声速膨胀, 产生高压波前, 击穿区域腔体内的液体蒸气因膨胀使腔体温度降低, 从而使等离子腔体膨胀速度锐减, 高压波前与腔体脱离。此时, 在液体内部形成空腔, 即空泡, 空泡将在液体静压力及腔体内部压力的共同作用下进行脉动运动。Yang 等^[15] 研究了不同空泡半径和泡心到壁面距离下空泡的非对称溃灭以及微射流现象。Orthaber 等^[16] 使用高速摄像机拍摄了激光诱导空泡在弹性薄膜附近的运动和薄膜破裂的形态。Ren 等^[17] 使用水听器检测了空泡释放的冲击波, 通过改变不同的无量纲参数研究激光空化强化机制。Koch 等^[18] 使用 OpenFOAM 开源软件结合 FVM 方法模拟了近壁面激光诱导空泡冲击波释放和空泡溃灭过程, 并与实验结果进行对比。Chen 等^[19] 使用激光诱导空泡对铝箔进行冲击成形, 发现冲击波对成形的影响大于微射流的冲击作用。采用激光击穿水介质带来的空泡效应研究空化问题, 实验条件较简单, 产生的空化泡球对称性好, 可用数值方法求解, 且空泡的运动过程易通过激光参数进行时间的控制和过程的测量, 因此研究激光空泡对揭示空化与空蚀机理, 防止空化和空蚀的发生, 减轻空化的危害有重要的意义。

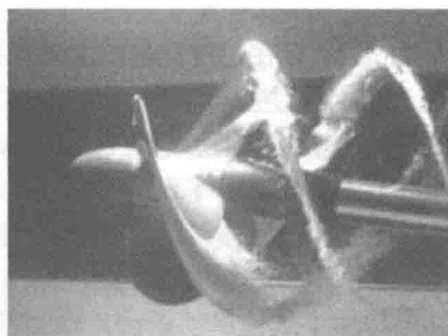
空化过程产生的气泡会经过初生、发育和溃灭的不恒定过程, 当空泡溃灭时, 伴随着很大的瞬间冲击力, 若气泡的破裂发生在固壁面附近, 固壁面在气泡破灭产生的冲击波的反复作用下被破坏, 此现象被称为空蚀 (cavitation damage) 现象。目前有很多水力机械由于受到空蚀而受到破坏的例子: 2000 年, 三峡电站的水轮机上发生了明显的空蚀现象; 2006 年, 美国胡佛大坝出现了空蚀现象。图 1.1 所示为几种典型的水力机械出现的空蚀损伤图^[20]。

空化引起的空蚀现象一直都是水力机械领域备受关注的焦点。空化空蚀现象对水力设备过流部件的危害大致表现为以下几个方面: 扰乱流体的连续性, 降低水力性能; 破坏叶片表面形貌, 降低其表面的光洁程度; 形成辐射空化噪声, 加剧水力机械工作时的振动问题, 并造成噪声污染。图 1.2 为南水北调工程某水利枢纽大型水轮机叶毂和叶壳空蚀损伤图, 图 1.2(a) 中圈出的部分是水轮机叶毂长时间运行后的空蚀情况, 水轮机运行过程中形成的空泡不断溃灭, 对水轮机轮毂造成冲击, 由于局部区域形成的瞬时冲击力非常大, 所以会形成永久损伤, 在长时间工作后, 水轮机的叶毂开始出现缺口, 表面也变得凹凸不平。图 1.2(b) 中虚线框标识区

域为超高强度不锈钢镀层,而其他区域则为普通材料,箭头所指区域也是空化空蚀作用后留下的痕迹,可以清晰地看出空化引起的空蚀对叶壳表面形貌造成损伤,这些损伤不仅严重影响水轮机的工作效率,还会大幅度降低水轮机工作的安全性能。



(a) 叶片上的空蚀



(b) 水泵螺旋桨叶片尾部空蚀



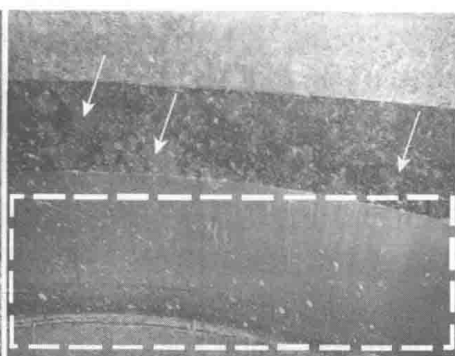
(c) 控制阀下缘的空蚀



(d) 管道内壁的空蚀

图 1.1 水力机械的空蚀现象^[20]

(a) 水轮机叶毂空蚀情况



(b) 水轮机叶壳空蚀情况

图 1.2 大型水轮机叶毂和叶壳空蚀损伤图^[20]

随着水力机械的发展,空化问题越来越多地出现在日常生活中,该问题已经严

重困扰到了水力机械的发展,正因如此,空化空蚀问题成为当今的热点之一^[21]。

对于空蚀,普遍认为是由于空泡溃灭时的机械作用导致的。实际上,无论什么液体(甚至惰性、金属液体),在动力的驱动下,作用于任何固体(包括强度高、硬度高的)都会产生空蚀破坏。目前针对空蚀破坏的机理有两种理论能够被人们普遍认可,同时也能得到实验验证。其中一种理论认为空泡在溃灭时,空泡的中心会辐射出冲击波,而当空泡靠近壁面时,辐射的冲击波压力就能够直接作用在壁面上,形成空蚀破坏。图 1.3 为游移空泡溃灭图^[22],空泡随液体流动至压力较高的部分,此时的压力大于空泡自身的汽化压力,于是空泡开始汽化溃灭,并辐射出压力冲击波,压力冲击波成球状向外扩散。此时,空泡溃灭点距离壁面较远,辐射的压力冲击波不足以对壁面产生破坏。事实上,仅仅是极小部分空泡能流动到壁面附近发生溃灭,造成空蚀破坏。

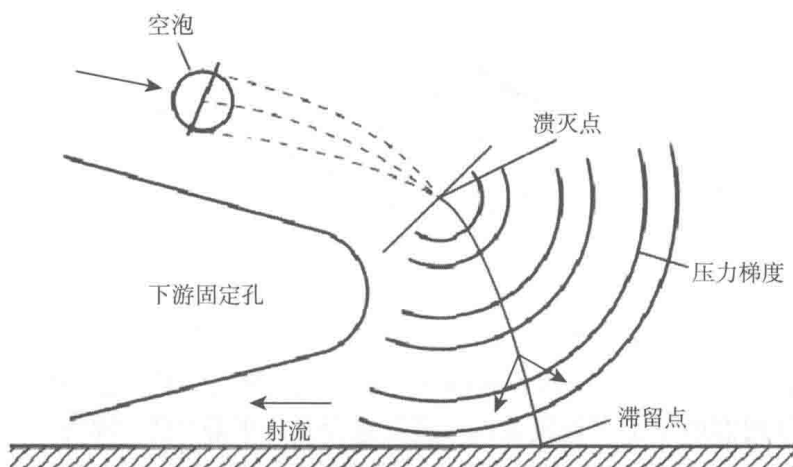
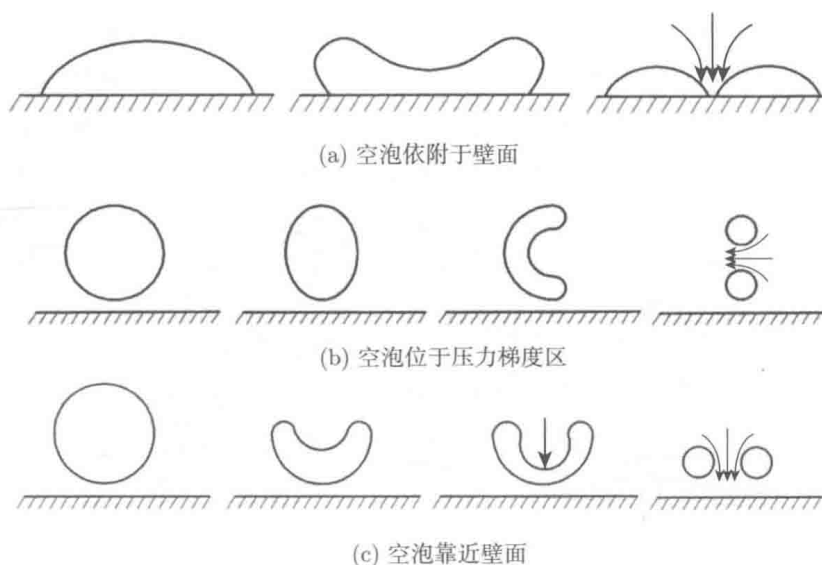


图 1.3 游移空泡溃灭图^[22]

另一种理论认为空泡在溃灭时,空泡会产生微射流作用在壁面上。当空泡在溃灭时发生变形,而变形的程度与压力的梯度以及到边界面的距离有关,具体为当压力梯度增加时空泡的变形量大,而到边界距离越大空泡的变形量越小。当空泡变形时,空泡会凹陷,此时射流会逐渐穿透空泡作用在壁面上,而当空泡位于壁面附近时,射流就能够直接作用在壁面上。图 1.4 所示为空泡射流形成的三种不同类型^[22]。图 1.4(a) 空泡开始时就依附在壁面上,由于空泡上下压力差的存在,空泡的中间开始形成凹坑并分裂成两个更小的空泡,射流从两个空泡间形成并作用于壁面。图 1.4(b) 中的空泡处于流场中,空泡两侧存在压力差,压力高的区域空泡壁被挤压变形、凹陷,最后形成射流穿透空泡。图 1.4(c) 为靠近壁面的空泡,开始时空泡远离壁面的那一侧被拉平,进而空泡逐渐凹陷成圆环形,随着空泡的进一步形变,最后形成了指向壁面的微射流。

图 1.4 空泡溃灭示意图^[22]

1.3 空化汽化与空化液化

空化是常温液体内部由于局部压力降低而发生的汽化和液化现象。而气/液相变中的汽化过程,从微观上讲,就是液体中动能较大的分子克服液体表面分子的引力而逸出液面的过程。汽化有蒸发和沸腾两种方式:蒸发是发生在液体表面的汽化过程,是在任何温度下都可以发生的,蒸发过程是“平静”的;沸腾是在整个液体内部发生的汽化过程,只有在该液体的沸点温度下才发生,其过程是“剧烈”的。提高温度,减小外界的束缚(如压力)等都能促使汽化过程的发展。

汽化的逆过程是液化过程,即气体分子相互吸引碰撞而凝结成液体的过程。汽化和液化是气/液相变中两种相反的过程。而空化这一类气/液相变,既包含汽化过程,又包含液化过程,前者对应于空化初生,后者对应于空泡溃灭。

空化的汽化过程(空化初生)是突然而不剧烈的,液化过程(空泡溃灭)是既突然而又猛烈的。空化的汽化过程(空化初生)与蒸发、沸腾之不同见表 1.1。

表 1.1 空化的汽化过程(空化初生)与蒸发、沸腾过程对比^[23]

项目	蒸发	沸腾	空化初生
发生部位	自由表面	液体内部	液体内部
发生范围	整个自由表面	整个液体内部	液体内部的局部区域
发生温度	任何温度	沸点	常温
发生过程	平静的	剧烈的	突然但不剧烈的
动力因素	温度或压力	温度	压力

空化初生与蒸发的主要不同是空化只发生在液体内部的气/液表面上,而不是液面上。液体中大大小小的气泡形成了液体内部的气/液表面,空化这一类气/液相变就在气泡的表面上发生。按平衡理论(图 1.5),可表示为^[23]

$$p_g + p_v = p + \frac{2\tau}{R} \quad (1.1)$$

$$p_g = p_{g0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 \quad (1.2)$$

$$p_v = p_v(T) \quad (1.3)$$

式(1.1)~式(1.3)联立可得到如图 1.6 所示的 $p=p(R)$ 曲线, R_c 为临界半径,在 $R=R_c$ 的左边,对于液体内部的气泡来讲,是稳定平衡;在 $R=R_c$ 的右边,是非稳定平衡,即液体内部的气泡得以自发生长,决定关键作用的量就是 $p_v = \text{const}$ (常数)。所以空化初生这一种汽化,不是在任何外界条件下都能发生的,仅仅当作用于此液体内部的气泡的外界压力降低到此气泡的临界压力以下时才会发生,因此空化初生是突发的而不是平静的,空化初生只发生在该气/液界面(气泡泡壁)的局部液体中而不是发生在整个自由表面的液体中^[23]。

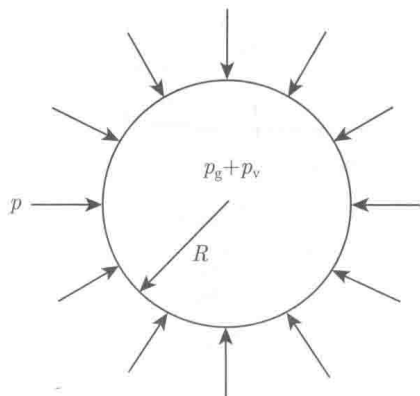


图 1.5 气泡的平衡^[23]

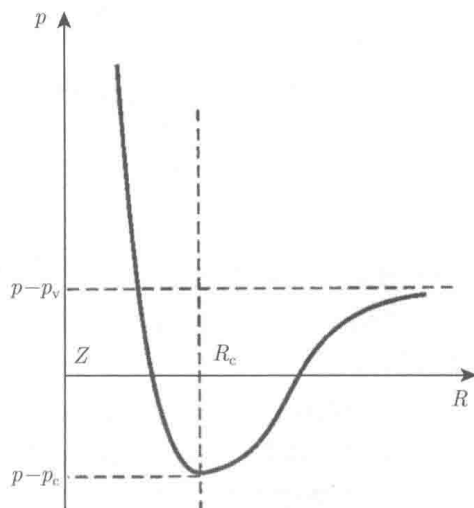


图 1.6 气泡平衡曲线^[23]

临界压力和临界半径的值,既与气泡的初始尺寸 R_0 有关,又与泡内气体的初始压力 p_{g0} 有关,与液体的物理特征如表面张力系数 τ 、饱和蒸气压力 p_v 有关,也间接地与液体的温度有关。对于常温下的水来说,水中的空化与水中气核的尺度密切相关。而对于蒸发来说,此气核的尺度为无穷大, $R \rightarrow \infty$,于是式(1.1)就直接退化为 $p = p_v$ 。所以气核尺度不同是空化初生区别于蒸发的根本特点。事实上,气

核尺度 R 的大小不仅影响空化这一类相变的临界压力, 也影响该气核周围液体的饱和蒸气压大小。

空化在常温下就能发生, 而沸腾只在沸点温度下才发生, 这是空化与沸腾的主要不同。沸腾的动力因素是温度, 温度越高, 液体分子的平均动能就越大, 冲出液体表面而变为气体分子的概率就越大。液体分子的平均动能的增大是就整个液体而言的。从宏观上讲, 热量要传递, 温度要趋于均匀, 所以“整块液体”会在短时间内同时沸腾; 空化的动力因素是流体的运动, 外界压力降低, 虽然液体分子的平均动能没有改变, 但冲出气/液界面而变为气体分子的概率增高了。外界压力的降低可以是整体的, 也可以是局部的, 但如果液体的外界压力降低到该液体的饱和蒸气压附近, 一般只是对局部范围而言的, 且对于运动着的液体来说, 压力总不会是均匀的, 有着其自身的压力分布规律, 所以空化只能在局部液体中发生。外界压力场的作用是空化初生区别于沸腾的根本点^[23]。

1.4 空化内涵与分类

1.4.1 空化的内涵

空化的发生主要是因为两个方面的因素: ①液流中存在气核 (空化核); ②液体中局部压强降低。一般的液流都不是纯液体的存在, 都会或多或少存在微粒杂质, 由于液流中局部压强的变化导致空化泡直径的变化, 进而产生了空化现象。

空化的内涵包含五个要点^[23]:

(1) 空化是液体特有的现象。固体中没有, 气体中没有, 但液态固体中或液化气体中可以有空化现象。水是自然界中数量最多、最常见的液体, 因此水利界、造船界、水机界遇到的空化问题最多, 研究也最集中, 但同时也要充分关注对于其他流体 (如油、液化氢、液态钠、液化氧、血液等) 空化问题的研究。

(2) 空化的本质是相变, 是液体与其蒸气之间的相变。液体内部的气泡因外界压力的改变而长大或缩小, 或者因通过泡壁的质量输运 (即扩散或溶解而长大或缩小), 这些在外观上有点像空化泡, 但它们都不属于空化的范畴。空化泡的产生是因为在空泡壁附近的一薄层液体分子变为蒸气分子而突然发生的, 类似于突变的现象; 空化泡的消失是由于泡内的蒸气分子穿过泡壁重新变为液体分子而形成的, 是一种颇为猛烈的过程。

(3) 空化的动力因素是流体动力学参量的作用。这主要是区别于另一类液体与其蒸气之间的相变即沸腾而言的, 后者的动力因素是热力学参量的作用。流体动力学参量作用, 主要是指液体流动而产生的在局部液体周围静压的变化。

(4) 空化是在液体内部局部范围内发生的现象。蒸发也是一种液体与蒸气之间