装备科技译著出版基金

Grenoble Sciences

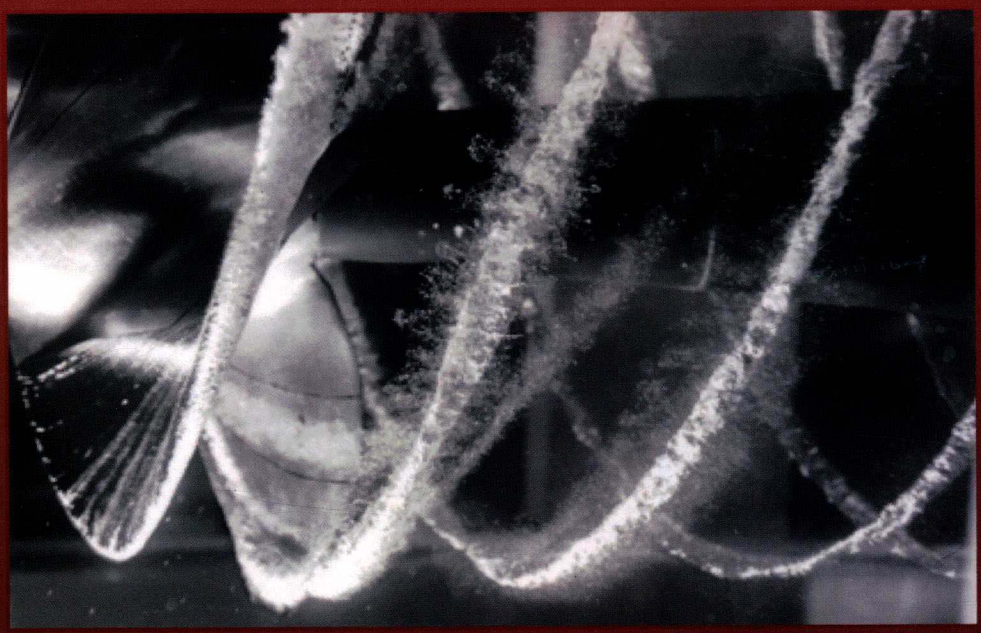
UNIVERSITÉ Grenoble Alpes

Springer

空化基础

Fundamentals of Cavitation

[法]让-皮埃尔·佛朗（Jean-Pierre Franc）
让-玛丽·米歇尔(Jean-Marie Michel) 著
宋云露 冯 光 译



-P. Franc - J.-M. Michel

国防工业出版社
National Defense Industry Press

需要全本请访问 www.ertongbook.com

装备科技译著出版基金

空化基础

Fundamentals of Cavitation

Jean-Pierre Franc　Jean-Marie Michel
[法] 让－皮埃尔·佛朗　让－玛丽·米歇尔　著
宋云露　冯　光　译

国防工业出版社
·北京·

著作权合同登记　图字:军-2015-014号

图书在版编目(CIP)数据

空化基础/(法)让-皮埃尔·佛朗(Jean-Pierre Franc),(法)让-玛丽·米歇尔(Jean-Marie Michel)著;宋云露,冯光译. —北京:国防工业出版社,2017.5

(科工精译)

书名原文:Fundamentals of Cavitation

ISBN 978-7-118-10575-9

Ⅰ.①空… Ⅱ.①让… ②让… ③宋… ④冯… Ⅲ.①空化 Ⅳ.①TV131.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 146064 号

Translation from the English language edition:
Fundamentals of Cavitation by Jean-Pierre Franc and Jean-Marie Michel
Copyright © 2005 Springer Netherlands
Springer Netherlands is a part of Springer Science + Business Media
All Rights Reserved
本书简体中文版由 Springer Science + Business Media, LLC 授权国防工业出版社独家出版发行。
版权所有,侵权必究。

※

國防工業出版社出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号　邮政编码 100048)
北京京华虎彩印刷有限公司印刷
新华书店经售
*
开本 710×1000　1/16　**印张** 16½　**字数** 333 千字
2017 年 5 月第 1 版第 1 次印刷　**印数** 1—1000 册　**定价** 158.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777　　发行邮购:(010)88540776
发行传真:(010)88540755　　发行业务:(010)88540717

格勒诺布尔科学

“格勒诺布尔科学”由法国约瑟夫傅里叶大学(即格勒诺布尔第一大学,为法国在科学、技术和医学领域教学和研究的顶尖大学)创建于 10 年前。“格勒诺布尔科学”由 Jean Bornarel 教授主编,负责筛选和出版优秀论文。匿名的审阅人初选优秀的文章,然后由审阅委员会指导作者提高文稿的质量。

(联系方式:editions@ univ - grenoble - alpes. fr)

负责“空化基础”的审阅委员会成员为:

Hiroharu Kato 教授,日本东京大学工学院;

Kirill V. Rozhdestvensky 教授,俄罗斯圣彼得堡国立海洋技术大学;

Bernd Stoffel 教授,德国达姆斯塔特科技大学。

Front Cover Photo: Photograph Bassin d' Essais des Carènes, Délégation Générale à l' Armement (DGA), Val de Reuil, France.

原书序

本书论述空化，它是水动力学领域中的独特物理现象，可能发生在诸如泵、螺旋桨、人工心脏等任何流体机械中。空化不仅发生在水中，也可在液氧等的任一流体中发生。空化可引起水力机械的严重损伤。所以，如何防止空化是水力机械设计人员十分关心的问题。与此相反，在许多实际应用如环境保护中，空化的利用也大有潜力。

一些学者（包括本书作者）在空化领域已经出版了一些专著。与已出版的同类著作不同，本书更长于空化的物理分析和理论推导。众所周知，试图用某种理论去解释空化现象是非常困难的，本书作者为此做出了艰辛的努力并在一定范围内取得了突破，因此通读此书能够更好地理解相关的方程。研读本书对理解空化现象大有裨益。本书并非空化领域的入门教材，更适合学者或学生在做深入研究时参考。

然而，这并不意味着本书对初学者太过深奥，因为书中采用大量的图片生动地解释了空化现象。所以，即使是一名初次涉及空化的学者，也能通过阅读本书理解空化究竟是什么。通过深入细致地研读本书，刚刚接触空化现象的初学者也能熟练地掌握空化机理。

总之，本书内容全面、指导性强，是决心掌握空化真谛的研究学生、科学家和工程师的理想读物。

本书作者，让－玛丽·米歇尔博士和让－皮埃尔·佛朗博士是格勒诺布尔大学的教授，在空化的研究和教学上有丰富的经验。两位学者在国际认可的学术期刊（如《流体力学杂志》）上发表了许多重要的论文，这些论文本书均有引用。

鉴于米歇尔博士和佛朗博士卓有成效的研究工作，他们是撰写空化专著的极佳人选。我很高兴地见到他们在这独特而又迷人的领域中取得的最新成就，祝贺他们。

2003 年 3 月日本东京
东京大学名誉教授加藤弘治博士

需要全本请访问 www.ertongbook.com

中译本序

空化是水力机械中常见的物理现象。大凡学习过水动力学专业的学生或研究水动力学的专业人士多多少少都得接触或了解一些空化方面的专业知识。但几十年来国内正式出版的有关空化方面的教科书或专著较少，以致新入学的研究生或新进入该领域的研究人员难以找到合适的空化基础理论方面的中文参考书籍。翻译出版国外相关专业著作实属必要。

原书的作者，让－皮埃尔·佛朗博士和让－玛丽·米歇尔博士是我在法国进修流体力学时的指导老师。1994—1995 年，我在法国格勒诺布尔第一大学进修期间，阅读学习了他们所领导的空化研究小组发表的大量论文，获益匪浅，对他们的研究思路、方法以及独到的见解印象极深。1995 年，他们联合欧美的八位作者出版了法文版的名为 *LA CAVITATION—Mécanismes Physiques et Applications Industrielles*（空化——物理机制与工业应用）的空化专著。该书是他们十位作者集几十年之研究成果写成的，对空化进行了深入的物理描述，是当时国际上最为优秀的空化专著之一。但因为这本书是法文版的，多数人无法拜读，全文翻译出来又十分费时费力，故我心有余而力不足，只好遗憾作罢。因此，我当时离开格勒诺布尔大学时，对佛朗先生和米歇尔先生讲希望他们出版本书的英文版，便于全世界的学生与学者都能读到这部优秀的专著。

1996 年，米歇尔先生应我所邀请到无锡给青年学生主讲空化课。2003 年，佛朗先生应邀到无锡作空化方面的专题学术报告。他们讲课的教案与所做的报告都是他们课题组 40 年来研究成果的结晶。经整理后成为这本英文版的《空化基础》的主要内容。该书一经出版，就被国内多家高校和科研院所作为研究生的主要教材。这本书比前一本法文专著内容更加精炼，增加了一些理论推导的内容，可读性大大增强！该书最显著的特点也正在于此，使得无论是初学者还是专业人士都能通过研读理解空化的物理本质。

2013 年，佛朗先生找到我，希望组织研究所里的技术人员把这本书译成中文出版，我告诉他我所的一位老专家已有译文的初稿，我可以安排出版事宜。通过多方联系，法方的出版社与中方的国防工业出版社达成了版权转让的协议。

中国船舶科学研究中心已退休的研究员宋云露先生毕生从事水下发射技术的研究工作，与水下航行体的空化问题也打了一辈子交道。读了本书后如获至宝，为了深刻理解其实质内容，他字斟句酌地把它译成了中文。并请沈慧女士协助书稿

的排版与打印工作。

译文草稿完成后，宋云露先生邀请冯光博士进行全文的校对工作和语法行文的梳理工作。冯光博士为此付出了艰辛的劳动，通过细致繁杂的工作确保了译著的文字质量。

感谢国防工业出版社编辑同志们的辛勤劳动。本书的出版还得到了中国船舶科学研究中心和上海交通大学的资助。在此表示衷心的感谢。

中国船舶重工集团公司第七〇二研究所
颜　开
二〇一七年五月

前　言

本书对空化现象进行了详细的介绍。书中的内容聚焦在水动力空化方面，即发生在流动液体中的空化现象，而对在几乎静止的液体中由振荡压力场引起的声学空化没有做太多的阐述。不过，主导水动力空化和声学空化的原理是基本相同的。

简单地说，空化是在液体中产生了蒸汽空泡。众所周知，在静止条件下如果压力低于所谓汽化压力，则液体变为蒸汽。在液体流动过程中，相变通常是由于局部区域的高速流动导致低压而发生的。此时，在液体介质中一个或几个点处破碎并出现空穴，其形状与流动结构紧密相关。

本书论述了发生在流动液体中所有类型的空化，包括泡空化（在最简单情况下就是球泡）、片空化、超空化和通气超空化、在剪切和漩涡流动中的空化以及其它类型。主要内容涵盖了空化起始，以及在高速水动力学中遇到的充分发展的空化等领域。

本书旨在面向面临空化问题的大学毕业生、研究人员和工程师，特别是水力机械和舰船推进等工程领域的研发人员。文中对影响空化的各种因素，如表面张力、质热交换、黏性和边界层、可压缩性、核浓度、湍流等进行了细致的论述，以求解释空化机理。除了阐述这些现象的物理机制，还介绍了多种研究方法，有的是试验手段，有的是仿真计算，相信读者通过学习能应对空化的基本问题。

本书源自 40 多年来在格勒诺布尔大学进行的有关空化领域的研究成果，这些研究工作得到了数家单位和学会的财政支持，特别是法国海军。最初，J. DUDO 教授创建空化研究团队主要基于：格勒诺布尔相关公司丰富的水动力学工程经验和有声望的外籍科学家（M. S. PLESSET, M. P. TULIN, B. R. PARKIN, A. J. ACOSTA 等学者）的倡议。这些外籍科学家向 J. DUDO 教授提交了一份详细的科学计划。这类科研院所与工业界紧密联系、相互促进的模式至今仍充满活力。这里要特别感谢来自 Y. LECOFFRE 先生卓越的贡献，如实验装备设计、创新研究计划的制定等。我们也必须记起 A. ROWE 博士，他对水动力学的洞察能力和空化流动数值模拟的领先工作使我们受益匪浅。

本书由 12 章组成，每章内容对应一次或者两次讲座，是我们多年课堂教学和学术讲座的结晶。参考目录（在每章结尾）罗列了主要贡献者，囊括了空化研究领域尽可能丰富的文献。

在第1章(引言)之后,与液体破裂相关的经典结果在第2章阐述。它表明液体能经受比汽化压力(即使加上张力)小得多的绝对压力而不空化。这引出了所谓气核的概念(即液体连续介质中的弱点),它是空化的基础概念。在特别强调稳定性时提出了微气泡作为气核的机理。在第2章最后给出了以核含量表征液体性质的定义,一个预示液体流动中空化类型的关键概念。

第3章~第5章是关于孤立泡的。第3章中,阐述了球泡动力学方面的基本结果,推导了瑞利-普莱斯特方程。本书中,这一基本方程式用来解决空化现象的基本问题,比如尺度效应。第4章讨论了单个泡在不对称环境中的演变,还讨论了液流中泡的轨迹问题。液体的可压性和热扩散的影响在第5章阐述。

第6章~第9章描述了片空化,经常出现在螺旋桨叶片、船的水翼或诸如鱼雷等轴对称体的后面。第6章和第9章分别用来表述超空泡和通气超空泡领域的问题。特别阐述了由俄罗斯和乌克兰同事基于轴对称空泡的"洛格维洛维奇空泡截面独立膨胀原理"推导的分析方法。我们特别感谢V. V. SEREBRYAKOV教授、Y. N. SAVCHENKO教授及其基辅大学的研究团队。通过他们,我们了解了这些国家这些年进行的很有意义的研究工作。一个典型的例子(见第9章)是莫斯科大学E. V. PARISHEV教授关于通气空泡脉动现象的理论模拟。

局部片空化安排在第7章,并特别关注云空化、回射流及更为普遍的空化不稳定性。因为它们在实践中的重要性,就这些课题近年来进行了大量的试验研究。我们特别感谢Y. TSUJIMOTO教授(大阪大学)在空化不稳定性方面富有成效的研究。对于游移泡和附着片空泡的相互作用则放在第8章。文中的结论表明,壁面边界层与气核含量一起强烈影响着空化的类型,本书还提出了预报水翼或泵的叶片上空化类型的基本原则。

第10章和第11章分别用于介绍涡空化、梢涡空化和剪切空化。第10章给出了几个由法国海军支持的联合计划中取得的结果。我们特别感谢D. H. FRUMAN教授指导的研究计划和联合实验室的同事:Bassin d'Essais des Carenes(瓦·勒伊,法国),Ecole Navale(比斯特,法国)、以及水力机械学院(洛桑,瑞士)。第11章阐述剪切空化,主要采用由明尼苏达大学R. E. A. ARNDT教授推导的物理分析方法来处理这一难题。

空化对水力机械设备的主要影响也在本书中得到表述。对空化剥蚀的概述在第12章中给出,而读者将在几个章节中找到空化噪声的信息。

我们很感谢东京大学H. KATO名誉教授、圣彼得堡国家海军技术大学K. V. ROZHDESTVENSKY教授和达姆施塔特科技大学的B. STOFFEL教授,他们热情地审阅了书稿,并提出了宝贵的意见和建议。同时,也感谢我们的同事F. MCCLUSKEY教授,他承担了繁重困难的英文校对工作,花了大量时间修改我们的原稿。也感谢格勒诺布尔大学空化研究小组的同事们(J. C. JAY, M. MARCHADIER, M. RIONDET和J. F. VERDYS),他们卓越的技术能力使我们得以在这本书上呈现许

多有价值的实验结果。

我们出版商——克吕韦尔学术出版集团和“格勒诺布尔科学”两个机构的编辑,应得到特别的感谢。我们还特别感谢 René MOREAU 教授,“流体力学及其应用”的编辑,以及“格勒诺布尔科学”的团队:格勒诺布尔大学 Jean BORNAREL 教授(他从一开始就支持这一计划),提供后勤保障工作的 Nicole SAUVAL,承担原稿整理工作的 Sylvie BORDAGE、Julie RIDARD 和 Thierry MORTURIER。

最后我们再次感谢我们的同事和朋友 H. KATO 博士,他为了我们的科学研究与我们倾力合作,付出了大量精力,并且为本书(英文版)撰写了序言。

目　录

第 1 章　空化流的主要特征 …… 1

1.1　物理现象 …… 1

1.1.1　空化的定义 …… 1

1.1.2　汽化压力 …… 1

1.1.3　蒸汽空泡的主要形式 …… 3

1.2　真实液体流动中的空化 …… 4

1.2.1　空化状态 …… 4

1.2.2　利于空化形成的典型工况 …… 4

1.2.3　空化对水力学的主要影响 …… 5

1.3　空化流动的特点 …… 5

1.3.1　压力和压力梯度 …… 5

1.3.2　液－汽界面 …… 7

1.3.3　空化的热效应 …… 7

1.3.4　一些典型的数量级 …… 8

1.4　无因次参数 …… 8

1.4.1　空化数 σ_v …… 8

1.4.2　起始空化数 σ_{vi} …… 9

1.4.3　相关压力下空化数 σ_c …… 10

1.5　研究空化的历史 …… 10

参考文献 …… 11

第 2 章　气核和空化 …… 12

2.1　引言 …… 12

2.1.1　液体的张力 …… 12

2.1.2　空化核 …… 12

2.2　核的平衡 …… 13

2.2.1　平衡条件 …… 13

2.2.2　核的稳定性与临界压力 …… 15

2.2.3　低压区内核的发展 …… 16

需要全本请访问 www.ertongbook.com

2.3 热扩散和物质扩散 …… 17
2.3.1 气体含量的热性能 …… 17
2.3.2 气体扩散和核稳定性 …… 19
2.4 气核群 …… 23
2.4.1 测量方法 …… 23
2.4.2 泡空化起始的条件 …… 25
参考文献 …… 26
第3章 球泡动力学 …… 28
3.1 基本方程 …… 28
3.1.1 引言 …… 28
3.1.2 假设 …… 28
3.1.3 边界条件和初始条件 …… 28
3.1.4 瑞利－普莱斯特方程 …… 29
3.1.5 用能量守衡解释瑞利－普莱斯特方程 …… 30
3.2 蒸汽泡的溃灭 …… 30
3.2.1 假设 …… 30
3.2.2 界面速度 …… 31
3.2.3 压力场 …… 32
3.2.4 表面张力的影响 …… 33
3.3 气核的爆炸 …… 34
3.3.1 界面速度 …… 34
3.3.2 平衡状态($p_\infty = p_{\infty 0}$) …… 35
3.3.3 核增长情况($p_\infty < p_{\infty 0}$) …… 35
3.3.4 动态临界值 …… 37
3.3.5 两种特殊情况的评述 …… 37
3.4 黏性的影响 …… 38
3.4.1 泡的线性振荡 …… 38
3.4.2 黏性对泡爆炸和溃灭的影响 …… 38
3.5 泡的非线性振荡 …… 39
3.6 相似分析 …… 39
3.6.1 瑞利－普莱斯特方程的无因次形式 …… 39
3.6.2 瑞利－普莱斯特方程的特征时间尺度 …… 40
3.6.3 瑞利－普莱斯特方程的定性讨论 …… 41
3.6.4 翼附近瞬态泡的情况 …… 42

3.7 球界面的稳定性 …… 43
参考文献 …… 45
第4章 不对称环境中的气泡 …… 47
4.1 引言 …… 47
4.2 球泡在静止液体中的运动 …… 47
4.2.1 一个固体球在静止液体中的移动 …… 47
4.2.2 同时伴有体积变化的球的运动 …… 48
4.2.3 应用于泡的运动 …… 49
4.3 非球泡的演变 …… 50
4.3.1 普莱斯特-查普曼数值模拟的原理 …… 50
4.3.2 一些通用结果 …… 50
4.3.3 布莱克分析方法 …… 52
4.4 球泡的轨迹 …… 56
参考文献 …… 59
附录(泡动量微分的推导) …… 61
第5章 对泡物理学的深化理解 …… 64
5.1 可压缩的影响 …… 64
5.1.1 泰特状态方程 …… 64
5.1.2 基本方程 …… 65
5.1.3 准声速解 …… 66
5.1.4 吉尔摩方法 …… 67
5.2 气泡噪声 …… 68
5.2.1 基本方程 …… 68
5.2.2 气泡的弱振荡 …… 70
5.2.3 溃灭气泡的噪声 …… 70
5.3 热效应 …… 71
5.3.1 热迟后 …… 71
5.3.2 布伦南分析 …… 73
5.4 典型的数值解 …… 76
参考文献 …… 78
附录 考虑液体可压缩性的瑞利-普莱斯特方程 …… 79
第6章 超空泡 …… 81
6.1 超空泡现象的概述 …… 81
6.1.1 空泡压力 …… 81

6.1.2 空泡分离 …… 82
6.1.3 空泡闭合 …… 84
6.1.4 空泡长度 …… 85
6.2 用稳定的势流理论模拟超空泡流动 …… 88
6.2.1 主要参数 …… 88
6.2.2 方程和边界条件 …… 89
6.2.3 空泡闭合模型 …… 90
6.2.4 数值计算概况 …… 91
6.3 典型结果 …… 92
6.3.1 无穷流场中平板后面的无穷长空泡($\sigma=0$) …… 92
6.3.2 无穷流场中对称体后的有限空泡 …… 93
6.3.3 无穷流场中圆弧后的有限空泡 …… 94
6.3.4 升力和阻力系数随空化数的变化 …… 95
6.3.5 浸没深度对 $C_L(\alpha)$ 曲线斜率的影响 …… 96
6.4 轴对称空泡 …… 97
6.4.1 稳定超空泡的加拉贝迪安近似解 …… 97
6.4.2 动量守衡与阻力 …… 97
6.4.3 稳定超空泡的近似解析解 …… 99
6.4.4 不稳定的轴对称超空泡流 …… 101
6.5 特殊问题 …… 104
6.5.1 不稳定的二维超空泡 …… 104
6.5.2 可压缩性对超空泡流的影响 …… 105
参考文献 …… 105
附录(分离点的奇异性) …… 108
第7章 局部空泡 …… 110
7.1 二维水翼上的局部空泡 …… 110
7.1.1 局部空泡的主要类型 …… 110
7.1.2 空泡闭合 …… 112
7.1.3 空泡长度 …… 112
7.1.4 由于闭合线的倾斜导致的三维效应 …… 113
7.1.5 二维水翼上的多处脱落 …… 115
7.2 内流中的局部空泡 …… 115
7.3 云空泡的不稳定性 …… 117
7.3.1 云空泡不稳定性的条件 …… 117

7.3.2 总体性能 …… 118
7.3.3 振荡频率 …… 119
7.3.4 射流厚度 …… 120
7.4 局部空泡的尾流 …… 121
7.4.1 平均压力分布 …… 121
7.4.2 蒸汽泡的产生 …… 122
7.4.3 压力脉动 …… 122
7.4.4 空泡闭合处的壁面压力脉冲 …… 123
7.4.5 脉冲谱的相似模拟 …… 124
7.4.6 局部空泡辐射噪声的主要特征 …… 126
7.5 局部空化的热效应 …… 126
7.5.1 斯捷潘诺夫 B 因子 …… 127
7.5.2 卷吸法 …… 128
7.6 系统稳定性 …… 131
7.7 局部空泡流模拟 …… 133
参考文献 …… 134
附录 在有相变的液/汽混合物中的声速 …… 137
第 8 章 二维水翼上的气泡和空泡 …… 139
8.1 附着空化 …… 139
8.1.1 圆柱上空化的初生 …… 139
8.1.2 二维水翼上的空泡类型 …… 141
8.1.3 细长水翼上边界层特征 …… 142
8.1.4 层流分离和空泡分离之间的联系 …… 144
8.2 游移泡空化 …… 147
8.2.1 水质和输送气核的影响 …… 147
8.2.2 泡空化发展的相似律 …… 149
8.2.3 饱和 …… 150
8.3 泡与空泡间的相互作用 …… 152
8.3.1 迅猛增长的泡对空泡的影响 …… 152
8.3.2 附着空化和游移空化之间过渡的临界核浓度 …… 153
8.3.3 空化类型的预测 …… 154
8.4 粗糙度和空泡初生 …… 155
参考文献 …… 156
第 9 章 通气超空泡 …… 158
9.1 二维通气空泡 …… 158

9.1.1 通气水翼 …… 158
9.1.2 主要参数 …… 159
9.1.3 空泡长度 …… 161
9.1.4 通气流量和空泡压力 …… 162
9.1.5 脉动状态 …… 165
9.1.6 脉动频率 …… 167
9.1.7 通气空泡脉动的机理 …… 168
9.2 轴对称通气超空泡 …… 170
9.2.1 通气空泡的不同状态 …… 170
9.2.2 环形涡泄气模式 …… 171
9.2.3 重力对空泡的影响 …… 171
9.2.4 双涡管泄气模式 …… 172
9.3 通气空泡脉动分析 …… 174
9.3.1 基本方程 …… 175
9.3.2 压力脉动方程 …… 177
9.3.3 与试验的比较 …… 178
参考文献 …… 179
第10章 涡空化 …… 181
10.1 理论结果 …… 181
10.1.1 涡的基础理论 …… 181
10.1.2 空化对旋转流动的主要影响 …… 182
10.1.3 轴对称空化涡 …… 183
10.1.4 环形空化涡 …… 184
10.2 无空化梢涡 …… 187
10.2.1 梢涡的形式 …… 187
10.2.2 黏性流体中涡的模型 …… 187
10.2.3 梢涡结构 …… 188
10.3 梢涡中的空化 …… 192
10.3.1 空化初生的相似律 …… 192
10.3.2 空化数与升力系数的关系 …… 193
10.3.3 气核含量的影响 …… 195
10.3.4 约束的影响 …… 196
参考文献 …… 197
第11章 剪切空化 …… 199
11.1 射流空化 …… 199
11.1.1 气核含量与流速的影响 …… 200

11.1.2 射流空化的统计分析 …… 202
11.2 尾流空化 …… 203
11.2.1 圆盘尾流中的初生空化 …… 203
11.2.2 尾流空化初生的模拟 …… 204
11.2.3 二维楔尾流中的空化 …… 206
参考文献 …… 211
第12章 空化剥蚀 …… 213
12.1 经验方法 …… 213
12.2 一些总体结论 …… 214
12.2.1 流速的影响 …… 214
12.2.2 质量损失的时间历程 …… 214
12.2.3 其他说明 …… 215
12.3 聚能的基本水动力学机理 …… 216
12.3.1 球形气泡溃灭的回弹 …… 216
12.3.2 微射流 …… 216
12.3.3 聚能溃灭 …… 216
12.3.4 空化涡的影响 …… 217
12.4 空化流的侵蚀 …… 217
12.4.1 单个溃灭泡的侵蚀 …… 218
12.4.2 撞痕试验 …… 219
12.4.3 力的测量 …… 220
12.4.4 流动侵蚀的相似律 …… 222
12.4.5 撞痕率在高速时的渐近特性 …… 224
12.5 材料的响应 …… 225
12.5.1 液体流动和固壁间的相互作用 …… 225
12.5.2 空化剥蚀和应变率 …… 226
12.5.3 体积损失与撞击能量的相关性 …… 227
12.5.4 质量损失的预报模型 …… 227
参考文献 …… 231
人名翻译表 …… 233
地名翻译表 …… 242
字符表 …… 243

需要全本请访问 www.ertongbook.com