

**Basic Theory and
Numerical Simulation of Cavitation
in Thermosensitive Fluids**

**热力学敏感流体空化基础
理论与数值计算**

邹 丽 孙铁志 马相孚/著



科学出版社

热力学敏感流体空化基础理论 与数值计算

邹 丽 孙铁志 马相孚 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

空化问题广泛存在于船舶与海洋工程、航空航天、动力工程与工程热物理等研究领域。涉及热力学效应的流体介质空化问题更是由于其伴随两相流动、介质属性改变、相变等物理过程而变得非常复杂。数值计算作为当前空化多相流领域的主要研究手段之一,极大地促进了对热力学效应下空化流动规律和机理的认识。本书根据对作者多年来工作的整理,通过若干实例,对热力学敏感流体空化流动的数值计算模型和方法进行了介绍,并分析了不同热力学敏感介质的空化流动特性和规律,使读者能够对涉及热力学效应的空化流动问题有一个更加全面和深入的了解。

本书可供高校研究生、研究所的科研人员和对空化流动感兴趣的读者参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

热力学敏感流体空化基础理论与数值计算/邹丽,孙铁志,马相孚著.
—北京:科学出版社,2018.12

ISBN 978-7-03-058292-8

I. ①热… II. ①邹… ②孙… ③马… III. ①热力学-空化-流体力学-数值计算 IV. ①0414.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 161044 号

责任编辑:刘凤娟 / 责任校对:杨 然
责任印制:吴兆东 / 封面设计:无极书装

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年12月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2018年12月第一次印刷 印张: 9

字数: 181 000

定价: 69.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

空化常见于流场局部压力变化迅速的物体表面上,如船舶螺旋桨、火箭涡轮泵、水中兵器、径向轴承、调节阀和喷嘴等。空化区域压力的降低和非定常特性通常会导致机械振动、噪声、材料汽蚀等,从而造成设备表面疲劳损坏、断裂以及机械性能下降等负面影响。而高温水、液氢、液氮和液氧等流体介质物理属性随温度变化敏感,导致空化区域温度发生改变,进而使空化流场变得更加复杂。鉴于以试验研究的途径开展此类流体介质空化流动问题的安全性和复杂性,数值计算是目前的主要研究手段之一。

本书的内容是属于基础研究层面的,重点讨论了涉及热力学效应的空化流动数值建模及流动特性分析问题,试图初步建立热力学敏感流体介质空化问题的基本理论体系与数值计算框架,旨在揭示涉及热力学效应的空化流动机理。

本书的安排如下:第1章介绍空化热力学效应基本特性及研究概述;第2章介绍空化流动数值计算基本方法;第3章介绍定常流动计算模型评价与流动特性;第4章介绍定常空化流动影响因素规律;第5章介绍非定常空化二维流动及参数影响规律;第6章介绍非定常空化三维流动及旋涡结构特性;第7章介绍不同流体介质非定常空化三维流动特性。

本书得到了公益性行业科研专项——浮式保障平台工程(二期)专题一:岛礁环境与海床地质结构等基础统计数据的实地测量分析(工信部联装[2016]22号)、大连理工大学“星海杰青”资助计划、国家自然科学基金青年科学基金项目(51709042)和中央高校基本科研业务费专项资金(DUT16RC(3)085)的资助。

由于时间仓促,本书只介绍了有限的一部分内容,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2018年5月25日

目 录

第 1 章 空化热力学效应基本特性及研究概述	1
1.1 空化热力学效应基本特性	1
1.2 空化热力学效应试验研究概述	4
1.3 空化热力学效应理论研究概述	8
1.4 空化热力学效应数值计算研究概述	10
1.5 小结	13
参考文献	13
第 2 章 空化流动数值计算基本方法	21
2.1 基本控制方程	21
2.2 空化模型	22
2.2.1 Merkle 空化模型	23
2.2.2 Kunz 空化模型	23
2.2.3 Zwart 空化模型	23
2.2.4 考虑热力学效应的修正 Zwart 空化模型	25
2.3 湍流模型	26
2.3.1 标准 $k-\varepsilon$ 模型	28
2.3.2 局部时均化湍流模型	28
2.3.3 壁面函数	29
2.4 小结	31
参考文献	31
第 3 章 定常流动计算模型评价与流动特性	33
3.1 计算几何模型与网格划分	33
3.2 空化热力学效应影响	34
3.3 空化模型在预测热力学敏感流体空化流动方面的应用与评价	38
3.3.1 Zwart 空化模型系数敏感性分析	38
3.3.2 不同空化模型预测液氮空化流动对比与分析	43

3.3.3	不同空化模型预测液氢空化流动对比与分析	46
3.3.4	热力学效应下不同空化模型质量传输特性对比	48
3.4	考虑热力学效应的修正空化模型应用与评价	49
3.5	液氢和液氮空化流动特性对比	51
3.5.1	压力及温度分布特性	51
3.5.2	汽液两相分布及质量传输特性对比	53
3.6	小结	55
	参考文献	56
第 4 章	定常空化流动影响因素规律	57
4.1	计算模型和边界条件	57
4.2	液氮空化流动的热力学效应	60
4.3	液氢空化流动的热力学效应	62
4.4	流场参数对低温空泡的影响	65
4.4.1	来流速度对低温空化的影响	65
4.4.2	来流温度对低温空化的影响	68
4.4.3	远场压强对低温空化的影响	71
4.5	小结	74
	参考文献	75
第 5 章	非定常空化二维流动及参数影响规律	76
5.1	温度对液氢绕翼型非定常空泡的影响数值模拟	76
5.1.1	几何模型和边界设置	76
5.1.2	无量纲数的定义	77
5.1.3	空泡形态的变化过程	78
5.1.4	温度分布及变化规律	79
5.1.5	压强和速度分布	79
5.1.6	温度对升、阻力系数的影响	82
5.2	流动参数对液氢绕翼型非定常空泡的影响数值模拟	82
5.2.1	空化数对液氢非定常空泡的影响	82
5.2.2	翼型攻角对液氢非定常空泡的影响	85
5.3	小结	87
	参考文献	88

第 6 章 非定常空化三维流动及旋涡结构特性	89
6.1 计算模型和网格	89
6.2 PANS 湍流模型控制参数敏感性分析	92
6.3 氟化酮非定常空化流动空泡发展和脱落特性分析	97
6.4 氟化酮非定常空化流动旋涡特性分析	104
6.4.1 氟化酮非定常空化流动旋涡结构特性分析	104
6.4.2 氟化酮非定常空化流动涡动力特性分析	106
6.5 小结	109
参考文献	109
第 7 章 不同流体介质非定常空化三维流动特性	111
7.1 氟化酮绕水翼非定常空化流动特性分析	111
7.1.1 非定常空化流动空泡演变特性	111
7.1.2 非定常空化流动温度场特性	113
7.1.3 非定常空化流动流体动力特性	117
7.2 液氢绕水翼非定常空化流动特性分析	120
7.2.1 空化数对液氢非定常空化流动特性影响分析	120
7.2.2 液氢非定常空化流动瞬时热梯度和涡量场分布特性	122
7.3 液氮绕水翼非定常空化流动特性分析	124
7.3.1 空化数对液氮非定常空化流动特性影响分析	124
7.3.2 液氮绕水翼空泡脱落机理特性研究	127
7.4 热力学敏感流体非定常空化流动空泡演变特性	129
7.5 小结	132
参考文献	133

第 1 章 空化热力学效应基本特性及研究概述

1.1 空化热力学效应基本特性

当液体内的压强降低到当地热力学状态下的饱和蒸气压时, 流体介质将会发生从液相到气相的转变, 这种现象称为空化^[1-3]。空化常见于流场局部压力变化迅速的物体表面上, 如船舶螺旋桨、火箭涡轮泵、水中兵器、径向轴承、调节阀和喷嘴等。空化区域压力的降低和非定常特性通常会导致机械振动、噪声、材料汽蚀等, 从而引起设备表面疲劳损坏、断裂以及机械性能下降等负面影响^[4-6]。因此, 国内外学者广泛地开展空化流动问题的研究。

空化发生时, 流体介质从液相向气相转变的过程中由于气化潜热的作用会从周围流体吸收热量, 从而引起空化区域温度降低, 即空化热力学效应^[3,7]。常温下水介质空化可以忽略热力学效应的影响, 即空化发生时假设空化区域温度不发生改变。而高温水、液氢、液氮、液氧等热力学敏感流体介质物理属性随温度变化敏感, 在空化流动过程中热力学效应显著, 从而引起空化区域温度的改变, 使空化流场变得更加复杂^[8-10]。

液氢和液氧等流体常被用作液体运载火箭发动机的推进剂。由于发动机涡轮泵的重量和尺寸受到严格设计要求, 就要通过增加涡轮泵功率密度来提高发动机推力。同时为保证有效的运载能力, 需要减小推进剂容器的体积, 这将会导致诱导轮入口处压强降低。在高速旋转和较低入口压强条件下, 诱导轮叶片周围会很容易发生空化, 使得其内部流场变得不稳定而引起强烈的机械振动, 从而降低了火箭发动机的可靠性和稳定性^[11,12]。欧洲阿里安 5(Ariane5) 推进系统的诱导轮中发生的旋转空化使转子承受了很大的不平衡载荷, 从而引起轴承的磨损^[13]。P&W 公司研制航天飞机高压液氧涡轮泵的初期遇到了很严重的超同步振动, 诊断发现, 旋转空化是激发超同步响应的主要因素, 导致诱导轮叶片和密封装置严重磨损^[14]。1999 年日本的 H-II 发射失败, 就是因为诱导轮内液氢的空化流动引起的压力脉动与导流叶片发生共振, 所以叶片发生疲劳和断裂^[15], 进而影响着液体火箭发动机的稳定性和安全性能^[11]。因此, 深入开展热力学敏感流体空化流动特性的研究具有重要理论价值和工程应用意义。

通常用空化数来表征当地热力学状态下空化发生的难易程度, 空化数越小空化越容易发生, 空化数 σ_{∞} 定义为^[3]

$$\sigma_{\infty} = \frac{p_{\infty} - p_v(T_{\infty})}{0.5\rho_l U_{\infty}^2} \quad (1.1)$$

式中, p_{∞} 为远场环境压强; T_{∞} 为远场流体温度; $p_v(T_{\infty})$ 为远场热力学状态下的饱和蒸气压; ρ_l 为流体介质液相状态下的密度; U_{∞} 为流场来流速度。

通过空化数的定义可知, 对于给定的流场环境, 空化的发生不仅与流场中的环境压力和来流速度有关, 也与流体本身的物理属性密切相关。表 1.1 给出了水、液氢、液氮以及氟化酮流体介质的基本物理属性。从表中可以看出, 常温水介质的液气密度比值比液氢、液氮的大三个数量级, 常温氟化酮介质液气密度比与液氢和液氮的差别不大。由于空化区域主要被气相占据, 为保证相似的空化强度, 液气密度比小的介质则需要更多的质量转换。由于气化潜热的影响, 空化过程中需要从周围的液体吸收热量, 从而引起空化区域的温度降低。而液氢、液氮以及氟化酮等液气密度比小的流体空化过程需要更多的热量传递, 从而引起当地热力学状态发生改变, 所以在空化流动计算过程中不能忽略热力学效应。

表 1.1 水、液氢、液氮以及氟化酮流体介质的基本物理属性^[8]

介质	温度/K	液体密度/(kg/m ³)	液气密度比	比热/[J/(kg·K)]	气化潜热/(kJ/kg)
水	298	997	43272	4200	2257
液氢	20	71	57	9816	446
液氮	83	780	95	2075	190
氟化酮	298	1601	305	1103	88

气化潜热的影响会使得空化区域的温度降低, 结合公式 (1.1) 可知, 空化数的大小与流体介质的属性密切相关, 当空化区域热力学状态发生改变时会引起当地介质属性的变化, 所以公式 (1.1) 给出的空化数不能真实有效地反映热力学敏感流体空化的动力学特性。定义空化区域当地空化数 σ 为

$$\sigma = \frac{p_{\infty} - p_v(T)}{0.5\rho_l U_{\infty}^2} \quad (1.2)$$

式中, T 为空化区域的当地温度。

结合 Utturkar 等^[2] 和 Goel 等^[16] 的一阶近似处理得到

$$0.5\rho_l U_{\infty}(\sigma - \sigma_{\infty}) = \frac{dp_v}{dT}(T_{\infty} - T) \quad (1.3)$$

可以得到考虑热力学影响的当地空化数 σ :

$$\sigma = \sigma_{\infty} - \frac{dp_v}{dT} \frac{\Delta T}{0.5\rho_l U_{\infty}^2} \quad (1.4)$$

从式 (1.4) 可以看出, 热力学效应下当地空化数发生了改变。由于 $\Delta p_v = p_v(T) - p_v(T_\infty) < 0$, $\Delta T = T - T_\infty < 0$, 所以式 (1.4) 中 $\sigma > \sigma_\infty$, 即当地空化数升高。可见, 相比于常温水流体介质, 热力学效应抑制了热力学敏感流体空化的发生。

图 1.1 给出了液氢、液氮流体介质空化压力和液气密度比随温度的变化。当空化区域热力学状态发生改变时, 当地介质物理属性将发生较大变化, 所以引入与流体介质属性相关的热力学变化参数更有助于预测热力学敏感流体空化特性。

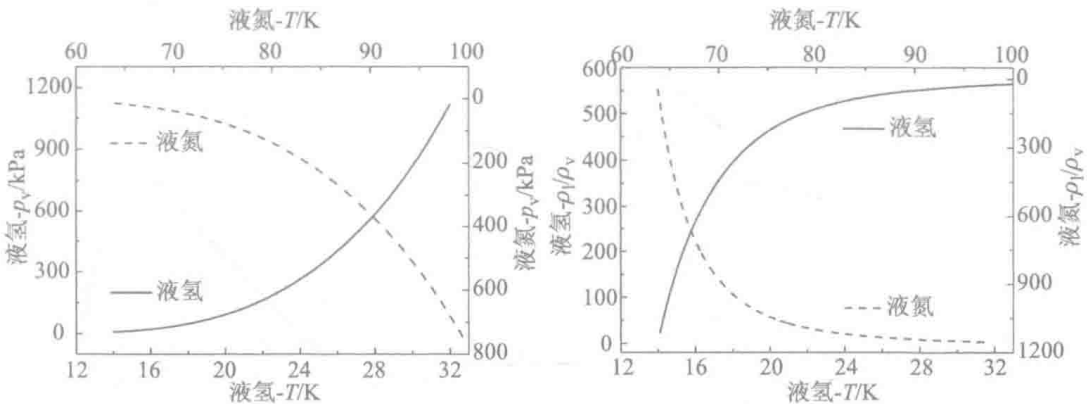


图 1.1 液氢、液氮流体介质空化压力和液气密度比随温度的变化 [8]

式 (1.5) 给出了单位体积流体由液相向气相转换过程中发生温降的特征常数:

$$\Delta T^* = \frac{\rho_v L_{ev}}{\rho_l c_{pl}} \tag{1.5}$$

式中, ρ_v 为流体介质气相密度; L_{ev} 为空化气化潜热; c_{pl} 为流体介质液态比热; ΔT^* 可用于评估流体空化过程中热力学影响程度。

图 1.2 给出了不同流体介质 ΔT^* 随温度的变化 [17-19]。从图中数据可知, 相

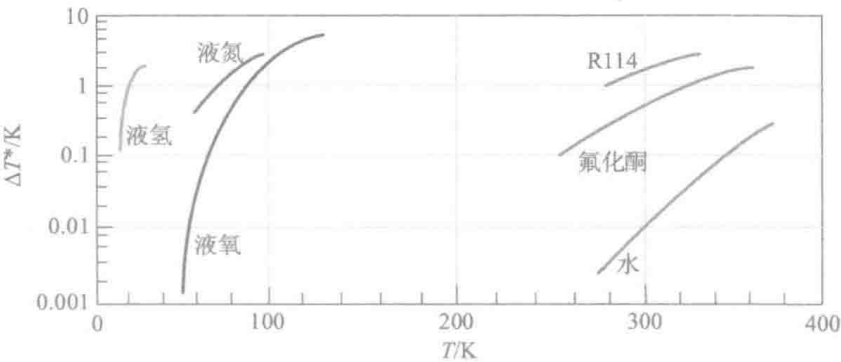


图 1.2 不同温度下液氢、液氧、液氮、R114、氟化酮和水的 ΔT^* 值 [17-19]

比于其他几种介质, 常温状态下水的 ΔT^* 值很小, 所以在计算常温水空化时忽略热力学效应的影响。

1.2 空化热力学效应试验研究概述

关于空化热力学效应试验研究可追溯到 20 世纪 60 年代。1961 年, Sarosdy 和 Acosta^[20] 在一套可加热的循环水洞中开展了氟利昂和水的空化对比试验, 两种不同介质绕圆盘模型空化的空泡形态如图 1.3 所示。通过试验他们发现, 两种介质发生空化时空泡形态特征不同, 水介质形成的空泡形态和轮廓较清晰; 而在氟利昂中, 空泡界面不清晰, 呈泡雾状, 且无论改变试验温度还是试验压力, 都没有出现清晰的空泡。虽然他们指出此种空化区别是由于热力学的影响, 但是当时对此现象未给出明确的物理解释或者数值数据。

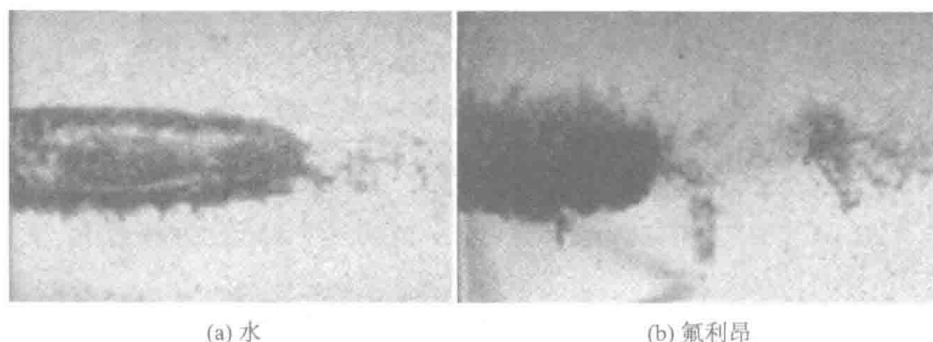


图 1.3 水和氟利昂绕圆盘模型空化的空泡形态^[20]

1969 年, Ruggeri 和 Moore^[21] 针对诱导轮和泵进行了大量的试验工作, 最早对空化中热力学影响进行了定量研究。他们对不同温度、旋转速度以及流体介质条件下的空化流动进行了测量和分析, 提出了空化余量的预测方法。其中, 饱和蒸气压与温度之间的关系可以用理想气体状态方程近似评估, 同时评价了不同流体介质在泵中的流动特性, 为后来学者研究空化热力学效应提供了重要参考。

Hord 等^[22-24] 在 1972 ~ 1973 年间开展了较为全面的低温流体 (液氢、液氮) 空化水洞试验, 试验模型主要为不同尺寸的文丘里管、水翼、尖顶拱。试验模型被安装在带有透明观测窗的水洞工作段中, 试验数据通过安装在模型表面的压力和温度传感器来测量。获得的不同空化数和温度下的试验数据被广泛地作为检验数值计算方法准确性的标准。图 1.4 给出了三种几何模型下不同流体介质空化流动试验结果。

Franc 等^[25-27] 在 2001 年 ~ 2004 年采用制冷剂氟利昂 R114 作为热力学敏感流体介质, 进行了诱导轮空化试验研究。前期试验发现, 诱导轮叶片周围空泡长

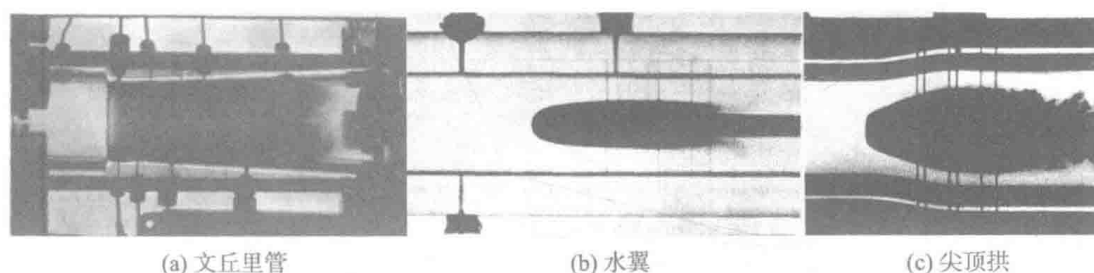


图 1.4 液氮绕文丘里管、液氮绕水翼和液氮绕尖顶拱试验结果 [22-24]

度随着温度的升高而减小,图 1.5 给出了三种不同温度下的空泡形态,由于测试手段的限制,上述试验结果主要作为可视化的研究。后来他们进行了氟利昂和水空化试验对比,试验发现在相同工况条件下,氟利昂的空泡长度较小,进一步验证了热力学效应抑制了空化的发展。



图 1.5 不同温度下的氟利昂绕诱导轮流动空泡形态 [25]

2006 年, Cervone 等 [28] 在热力学空化水洞中针对 NACA0015 模型,开展了不同攻角、空化数以及温度下的水介质空化试验研究,通过测量水翼表面压力以及空泡长度等数据,分析了热力学影响下空化的非定常特性。试验发现,当空化数相同时,温度较高的水形成的空泡较厚、较长;当温度较高时,出现云空化和超空化现象对应的空化数较大,从而为判断不同温度下的水介质空化特性提供了有利依据。

2009 年, Niiyama 等 [29] 在日本角田航天中心水洞开展了液氮空化流动试验,目的是研究湍流流动状态下热力学效应对空化的影响,图 1.6 给出了空化水洞设备图。试验测量结果进一步证明了热力学效应对空泡发展的延缓和抑制作用,且随着空化数的减小,空化区域温降值增加。当空化数相同,来流速度较小时,引起的温降值较高。他们结合理论分析和试验结果得出空化区域温降的差异是由空化气泡周围湍流流动引起的。

而后, Niiyama 等 [30] 和 Yoshida [31] 以 NACA16-012 水翼为试验模型,通过安装在水翼表面的五个温度传感器,测量了液氮绕水翼空化过程中的温降。通过

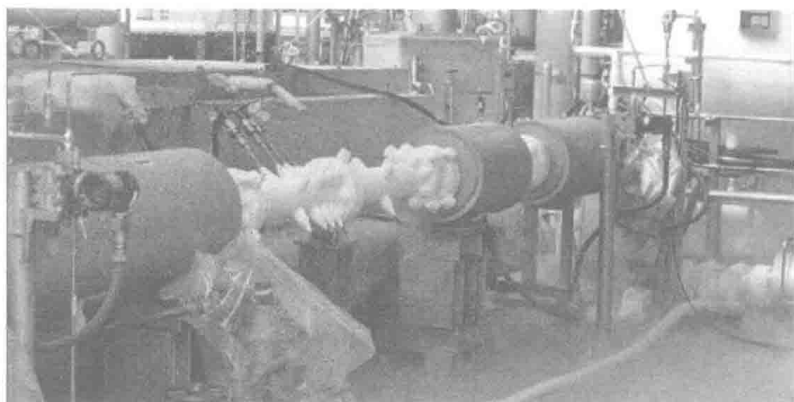


图 1.6 空化水洞设备 [29]

试验观测和数据分析,他们发现在水翼表面形成云状空泡;随着空化数的减小,空化区域向水翼下游发展,且空化区域温降增加;同时他们也发现当雷诺数较大时,空泡厚度较小,这是由于大量的细小气泡抑制了当地湍流强度和温度扩散。不同空化数下水翼表面空泡形态如图 1.7 所示。

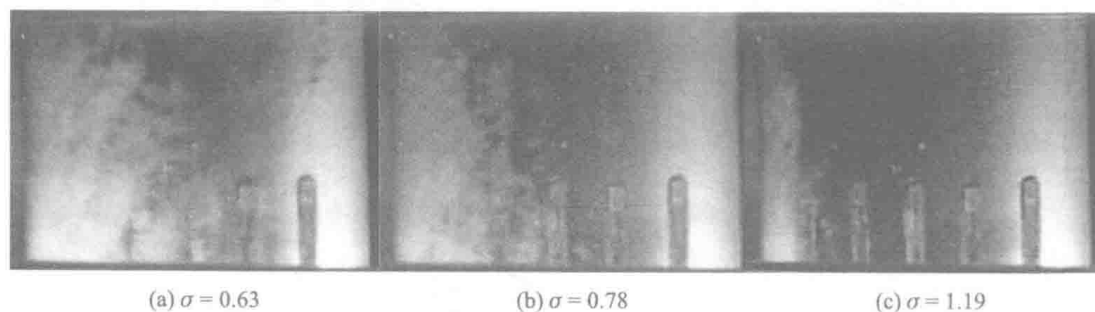
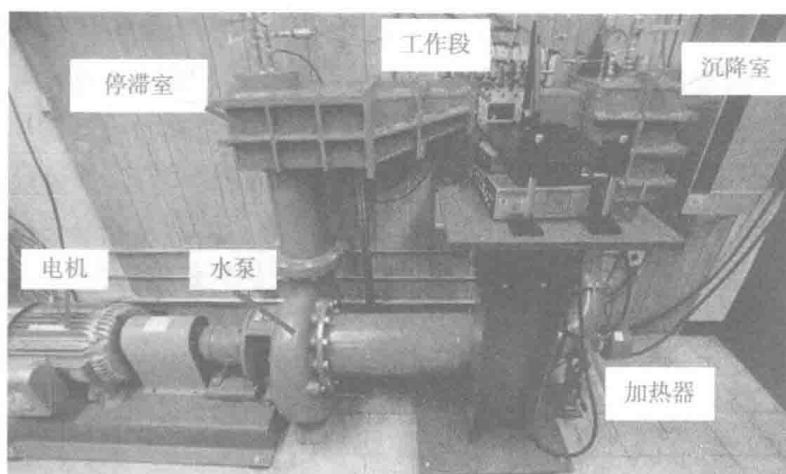
(a) $\sigma = 0.63$ (b) $\sigma = 0.78$ (c) $\sigma = 1.19$

图 1.7 三种空化数下液氮绕 NACA16-012 水翼表面空泡形态 [30]

由于液氮和液氢等低温流体介质工作条件的限制,增加了开展相关水洞试验研究的难度,所以采用具有相近热力学属性的常温流体代替液氢、液氮等介质进行实验研究可为分析热力学敏感流体空化特性提供便利。美国佛罗里达大学的 Segal^[19] 教授建立了一套循环水洞,如图 1.8(a) 所示。他们采用美国 3M 公司生产的一种热力学敏感流体氟化酮 (fluoroketone) 作为流体介质开展空化流动试验研究,通过高速摄影技术和翼型表面压力数据的记录,得到了不同空化数、温度和攻角条件下的氟化酮绕水翼非定常空化流动特性,分析了非定常空化流场流体动力特性和空泡演变规律,部分试验结果如图 1.8(b) 所示。

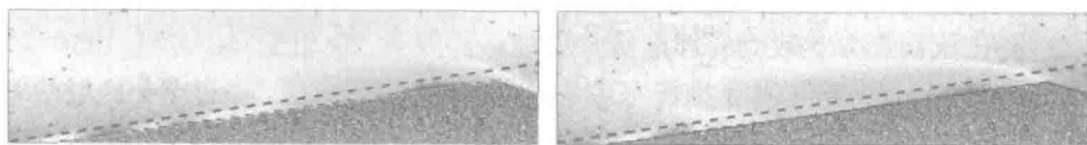
2015 年, Petkovšek 和 Dular^[32] 观测了文丘里管模型热力学空化试验,试验流体介质为 100°C 的水。他们通过红外摄像机记录了不同操作条件下的空化流场平均温度和动态温度分布,并首次实现了从文丘里模型底部记录空化热力学效



(a) 佛罗里达大学空化水洞

(b) 攻角为 7.5° 的水翼在 35°C 氟化酮中空泡形态的变化图 1.8 空化水洞设备及氟化酮空化试验结果^[19]

应影响,他们发现在喉部位置温降最大值为 0.5K ,试验测量流场温度分布结果如图 1.9 所示。

图 1.9 文丘里管模型在高温水介质空化试验温度场分布^[32] (彩图见封底二维码)

随着对空化热力学效应影响的关注,近几年国内学者也开始开展了热力学敏感流体空化流动的试验研究。2008 年, Huang 和 Zhuang^[33] 在较高温度的水中开展了半球形弹体热力学效应下空化流动水洞试验,通过布置在模型肩部的三个温度传感器的测量,发现空化发生时肩部空化区域发生温降。2011 年,浙江大学的曹潇丽^[34] 初步建立了进行低温流体空化流动的文丘里管模型试验平台。2012 年,北京理工大学的时素果^[35] 采用高速摄像机和粒子成像测速系统 (PIV) 对水

翼模型在不同温度水中的空化进行了测量, 获得了不同操作条件下各个空化阶段的流场流速和涡量分布; 同时应用动态测量系统测量了模型受到的阻力和升力特性, 并进行了频谱分析, 获得了不同温度下升力非定常空化阶段的频率特征。2015 年, 赵东方等^[36]建立了研究低温流体空化可视化的试验装置, 通过高速摄像系统初步获得了清晰的云状空化图像, 通过分析图像他们发现, 空化区尾部发生周期性脱落, 且由于二次流的作用引起空化中心区上下周期性摆动; 同时他们也发现, 空化程度、空泡脱落频率等现象受文氏管入口压力的影响。试验部分结果如图 1.10 所示。

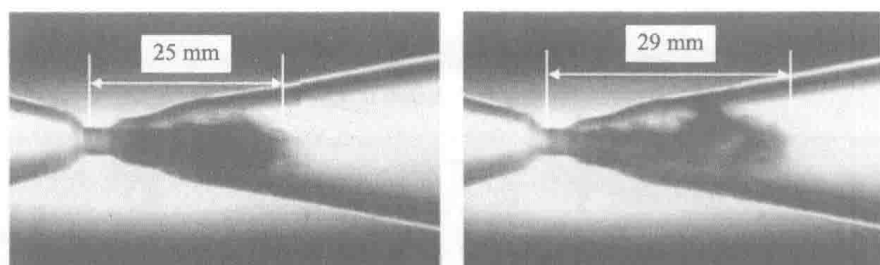


图 1.10 液氮云状汽蚀非稳态形态^[36]

从以上热力学效应影响空化试验研究进展可以看出, 无论是液氢、液氮等低温流体, 还是常温的氟化酮介质, 抑或是高温的水发生空化时都表现出了热力学效应的影响。由于试验设备和条件的限制, 所以增加了流场温度和压力等基本数据的测量难度, 但是试验可视化的记录使学者对热力学敏感流体空化形态有了清晰的认识, 为相关的理论分析和数值计算提供了有利的依据。

1.3 空化热力学效应理论研究概述

空化流动热力学效应的理论研究最早可追溯到 20 世纪 50 年代, 1956 年, Stahl 和 Stepanoff^[37]基于准静态理论提出了 B 因子方法, 通过空化区域的气相与液相的体积比值来估算温降。由于 B 因子是个抽象的量, 所以它不能很好地对空化流场热力学影响进行有效预测。后来 Ruggeri 和 Moore^[21]及 Hord^[23]通过考虑流体运动过程中的动力学影响对 B 因子进行了扩展, 提出了与 B 因子相关的半经验公式。Holl 等^[38]基于夹带理论建立了类似的半经验公式, 他们将温降与无量纲的流动参数直接联系到一起。这个理论假设汽-液交界面的质量对流可以忽略, 而热扩散作为控制空化过程中汽-液交界面分布特性的主要因素。

Franc 等^[27]提出了不同空化类型的 B 因子表达形式。图 1.11(a) 给出的是气液混合形式的空化类型, 空化区域内气相体积分数为 α_v , 空泡厚度为 δ_c , 来流速度为 U_∞ , 则气相的体积变化率 $\dot{v}_v \approx \alpha_v U_\infty \delta_c$, 液相的体积变化率 $\dot{v}_l \approx (1 - \alpha_v) U_\infty \delta_c$,

从而得到两相混合空化时的 B 因子表达式为

$$B = \frac{\dot{v}_v}{\dot{v}_l} = \frac{\alpha_v}{1 - \alpha_v} \quad (1.6)$$

当空化形式为全空化时 (图 1.11(b)), 由于空泡内部没有液体, 空化所吸收的热量只能由空泡周围液体提供。Kato [39] 和 Fruman 等 [40] 对图 1.11 所示的两种空化类型也进行了分析, 通过类似的处理方法得到气相的体积变化率 $\dot{v}_v \approx U_\infty \delta_c$ 。对于全空化形式, 在空泡周围形成一个厚度为 δ_T 的热力学层, 则液相的体积变化率 $\dot{v}_l \approx U_\infty \delta_T$ 。从而得到全空化状态下的 B 因子表达式:

$$B = \frac{\delta_c}{\delta_T} \quad (1.7)$$

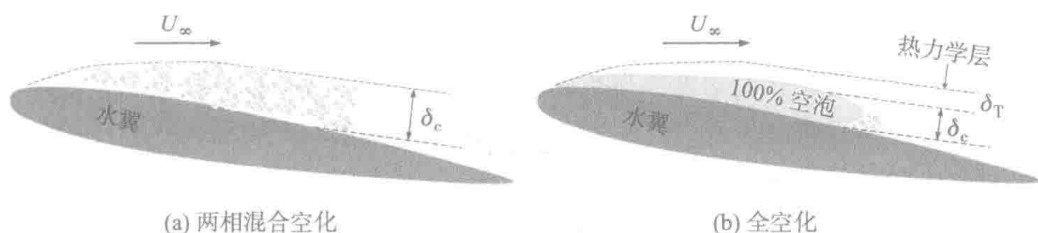


图 1.11 基于 B 因子分析的两种空化发展类型

虽然 B 因子可有效预测空化过程中的温降, 但它是基于定常的热平衡方程得到的, 对于非定常或者瞬时流动的预测具有局限性。Deshpande 等 [41] 发现当热力学效应明显时, 饱和蒸气压对空泡形态影响较大, 而 B 因子中并未考虑饱和蒸气压的影响, 所以 B 因子不能很好地预测温降对整个流场和空泡结构的影响。

Brennen [3,42] 基于 Rayleigh-Plesset 汽 (气) 泡动力学方程, 建立了更能反映空化过程中热力学影响的方法。基本 Rayleigh-Plesset 方程为

$$\frac{p_v(T_c) - p_\infty}{\rho_l} = R_B \frac{d^2 R_B}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR_B}{dt} \right)^2 \quad (1.8)$$

式中, $p_v(T_c)$ 为泡内压强; p_∞ 为远场压强; R_B 为气泡半径; ρ_l 为液体密度。

根据空化过程空泡界面能量平衡, 将空化过程中任何时间内的温降表示为

$$\Delta T \approx \frac{\dot{R}_B \sqrt{t} \rho_v L_{ev}}{\sqrt{\alpha_l} \rho_l c_{pl}} \quad (1.9)$$

温降 ΔT 是伴随着蒸气压强 Δp_v 降低产生的, Δp_v 表达式如下:

$$\Delta p_v = p_v(T_\infty) - p_v(T_c) \approx \frac{dp_v}{dT} \Delta T \quad (1.10)$$

公式 (1.10) 进一步处理后为

$$\Delta p_v = \rho_l \Sigma \dot{R} \sqrt{t}, \quad \Sigma = \frac{\rho_v L_{ev}}{\rho_l^2 c_{pl} \sqrt{a_l}} \frac{dp_v}{dT} \quad (1.11)$$

从而得到考虑热力学效应的 Rayleigh-Plesset 方程:

$$\left[R_B \frac{d^2 R_B}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR_B}{dt} \right)^2 \right] + \Sigma \dot{R}_B \sqrt{t} \approx \frac{p_v(T_\infty) - p_\infty}{\rho_l} \quad (1.12)$$

方程中的热力学项初始值是零, 但是随着时间的推移, 热力学项变得越来越重要。热力学效应对气泡动力学的影响主要体现在 Σ 项中, Σ 是判断空化过程是否有热力学效应的重要标志。然而热力学项仍可忽略不计, 只要满足

$$\Sigma \dot{R} \sqrt{t} \ll \frac{p_v(T_\infty) - p_\infty}{\rho_l} \quad (1.13)$$

由于气泡半径的增长率 $\dot{R}$ 与 $\sqrt{(p_v(T_\infty) - p_\infty)/\rho_l}$ 形式相关, 所以式 (1.12) 的条件就变成

$$t \ll \frac{p_v(T_\infty) - p_\infty}{\rho_l \Sigma^2} \quad (1.14)$$

在实际空化流动过程中, 特征时间 t 为特征长度与特征速度的比值, 计算后与 $(p_v(T_\infty) - p_\infty)/\rho_l \Sigma^2$ 比较, 从而确定热力学效应是否对空化过程有影响。

1.4 空化热力学效应数值计算研究概述

空化流动试验表明, 热力学效应对空化流动产生了影响, 使空化流动现象变得更加复杂。随着计算机硬件条件和计算流体力学 (CFD) 的发展, 数值计算方法逐渐成为研究热力学敏感流体空化流动问题的重要方式。目前对于空化流动问题的计算方法主要有界面追踪法和两相流法。界面追踪法基于压力的简化准则追踪气液两相交界面, 计算过程中假设空化区域压强等于当地热力学状态下气化压强, 并保持不变。但是界面追踪法对预测存在空泡回射流、溃灭以及脱落的非定常流场适用性较弱 [41,43]。

两相流方法的计算方式又可以分为分相流模型和均相流模型。分相流模型中为了能够很好地描述空化流动中的物理特性, 计算时考虑了两相之间的速度滑移, 各相都有独立的流场, 需对各相的连续性方程、动量方程和能量方程进行求解, 所以在计算过程中求解复杂, 对计算资源要求较高, 且不容易收敛。即便如此, 一些学者仍将该方法用于计算接近定常流动的流体、液氮以及一些高速流动的问题 [44-46]。均相流模型假设两相之间的压力和热力学平衡, 将气液两相混合区看作混合均匀的单相流, 通常认为气液两相之间没有速度滑移, 气液两相享有共同的速度场、压力场以及温度场等 [47-49]。