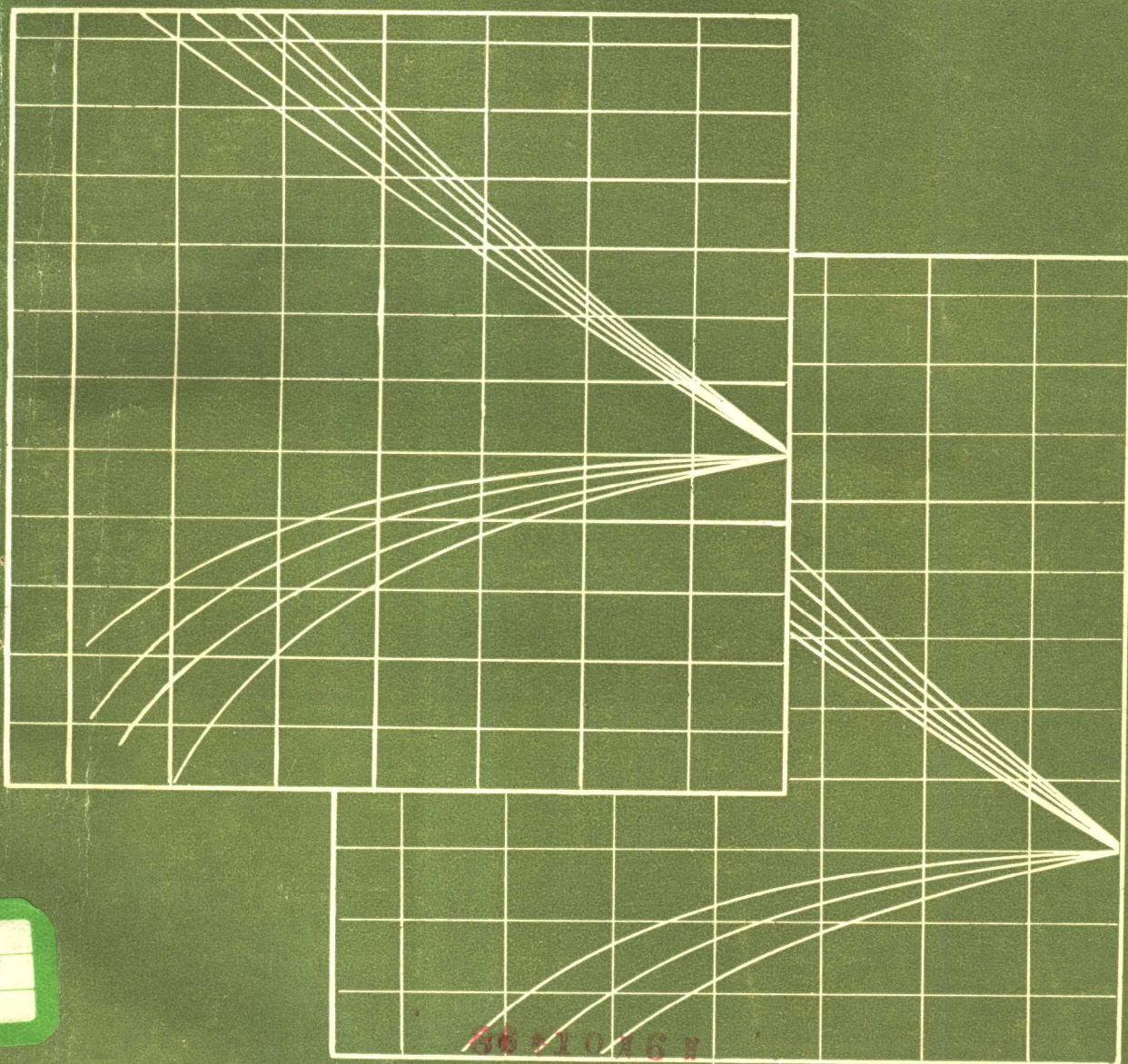


湿蒸汽两相流

蔡颐年 王乃宁 著



西安交通大学出版社

湿 蒸 汽 两 相 流

蔡颐年 王乃宁 著

西安交通大学出版社

内 容 简 介

湿蒸汽两相流是一门研究水蒸汽凝结过程和蒸汽与水珠两相物质运动规律的学科。本书系统地阐述了这门学科的理论,并结合大功率蒸汽透平和轻水反应堆核电站湿蒸汽透平的工作进行了全面的分析。此外,本书还专门介绍了湿蒸汽的光学测试技术。全书论述了大量国内外有关文献的论据与观点,涉及了不少生产与科研的实际问题。它既是一本具有较高水平的学术专著,又是一本较好的科技参考书。

本书可以作为动力机械、低温技术、化学工程与环保工程等专业高等院校师生的教学用书,也可供与这些专业有关的科研,设计与运行的工程技术人员参考。

湿 蒸 汽 两 相 流

蔡 颐 年 王 乃 宁 著

责任编辑 早 雪

西安交通大学出版社出版

(西安市咸宁路28号)

西安交通大学出版社印刷厂印装

陕西省新华书店发行·各地新华书店经售

开本: 787×1092 1/16 印张: 15.25 字数: 364 千字

1985年8月第一版 1985年8月第一次印刷

印数: 1-4,000 册

统一书号: 15340·026 定价: 3.45 元

序

湿蒸汽两相流是一门新的学科。本书比较系统地介绍了这门与大功率蒸汽透平和轻水反应堆核电站湿蒸汽透平有着密切关系的学科的理论与实践。大功率常规蒸汽透平和轻水反应堆核电站湿蒸汽透平，为现代热力发电工业的不断发展以及热电联产工业规模的日益扩大提供了所需的动力机械条件，因而对我国国民经济建设具有重要的意义。这也是湿蒸汽两相流这门学科在我国四化建设过程中形成和发展的重要条件。

因为本书的编写在国内还是第一次，而且类似性质的书籍在国际上出版的也不多见，所以全书的结构和体系只能按照著者的主观考虑拟定。我们认为，本书虽然作为一本科学专著出版，但终究不是一篇科学论文，也不是一本文集，所以它主要应该充分系统地反映有关领域内比较成熟的知识，以及为大多数学者所公认的论点和所接受的实践。至于那些尚在形成过程之中，尚未完全得到定论的研究内容，则不妨过一段时期之后再加以吸收。

《湿蒸汽两相流》，更加确切一些应该叫作《膨胀湿蒸汽凝结两相流》，是一门研究水蒸汽凝结过程的机制和蒸汽与水珠两相物质运动规律的学科。概括地说，这种两相流基本上服从气体与固体微粒两相流的一般统计规律，但又反映膨胀气流和凝结相变过程的许多特点。在理论上，它涉及到气体动力学、分子结构理论、热力学、传热学、表面物理化学和悬浮体学科以及微粒统计特性的许多基本知识；在实验方法上，它十分依赖于近代光学的知识和光学测量技术；在实践应用方面，它所探讨的不少问题可以直接在核电站湿蒸汽透平及装置，如汽水分离器、湿蒸汽泵、冷凝器、蒸发器等设备中找到例证。

本书共分八章。除第一章概论外，第二至六章阐述湿蒸汽两相流的基本理论；第七、八两章则主要介绍湿蒸汽光学测量的基本知识及技术。概论一章扼要地阐述了著者对湿蒸汽两相流这一学科的内容范围，历史背景，演变过程及发展方向等问题的理解和看法。第二章共谈了五个主要问题，都是从静态的观点来回答蒸汽在什么条件下和为什么会凝结为液体的问题。通过第五个问题，即毛细管现象出现的问题引出过饱和度的概念，为第三章凝结动力学的讨论提供必要的前提条件。凝结动力学这一章较系统地阐述了经典的成核理论和水珠生长理论，但并未对非经典理论一一加以分析。第四章“湿蒸汽流”的中心内容是用数学方法描述并求解流动蒸汽中的过饱和凝结过程。这一内容共分七节给以充分的论述。“统计方法在微粒数群中的应用”一章的目的，第一是阐明广义微粒学的研究范围、分科以及各种微粒系统在各种学科之中所处的地位；第二是对广泛应用于微粒数群研究工作的统计学方法的基本概念作一简单介绍。这样，就使湿蒸汽两相流中关于珠滴这一相问题的研究，具有更普遍的科学意义。第六章“运动气悬体中的液珠特性”，主要是扼要讨论微粒在气悬浮状态下的诸种重要特性，包括运动特性，阻力特性，以及液珠尺寸小到一定程度时所出现的聚合特性和各种泳动现象等。最后两章讨论了蒸汽湿度的测量原理、测量方法和测量装置。鉴于利用光散射原理的光学法在蒸汽湿度的测量中获得了日益广泛的应用，在七、八两章中扼要地介绍了有关光和光散射的基本知识。严格的光散射理论属于物理光学中很深奥的一个光学分支，已远远超出了本书的讨论范围。这里只对瑞利散射，米氏散射以及衍射散射的一些主要结论

作了介绍。此外，着重对湿蒸汽湿度的各种测量原理和方法展开了讨论，并对利用光学原理测量水滴直径的方法进行了分析。同时，还介绍了几个先进国家所研制的湿蒸汽光学探针及其在汽轮机中的实际应用。

本书著者，虽然强烈地感觉到湿蒸汽两相流这门学科的理论性相当高深，并具有很大的钻研价值，但考虑到自己的专业训练背景和学识水平的限制，仍然维护了本书的原定编写宗旨，即保持它的工程应用的面貌，而不企图过分强调其学科体系。但是另一方面，我们又认为应该在可能的情况下应用有关的物理、化学、力学的基本概念来对湿蒸汽两相流中的许多问题作出充分的说明和解释。所以，书中有一定篇幅是用来阐明这些基本原理的。原则上，我们是使各章所需的理论分散在各章之中加以叙述，而不是将全书分为理论和应用两大部分。我们希望在各章之后所附的参考文献目录，能在一定程度上为部分读者对理论问题的深入钻研提供线索。

著者希望本书的出版能对我国发展湿蒸汽两相流的教学和科研，以及对迅速提高我国湿蒸汽透平工业的水平有所贡献。虽然著者重点介绍的是比较成熟的论点，但仍不能保证本书完全避免了任何大小错误。如果本书的读者在阅读之余就所发现的错误向著者不吝赐教，我们将是十分感谢的。许多单位和个人对本书的出版直接或间接地提供了帮助，我们在此谨致以衷心的感谢。

著者谨志

1985年元月

目 录

第一章 概 论

| | |
|-------------------|-------|
| 1.1 工程两相流分类及发展方向 | (1) |
| 1.2 湿蒸汽两相流的发展及特点 | (2) |
| 1.3 湿蒸汽两相流研究 | (4) |
| 1.4 湿蒸汽两相流研究的历史回顾 | (5) |
| 1.5 湿蒸汽两相流研究现状 | (6) |
| 1.6 我国情况 | (8) |
| 参考文献 | (9) |

第二章 凝结静力学

| | |
|----------------------------------|--------|
| 2.1 引 言 | (10) |
| 2.2 $p-V-T$ 图 | (10) |
| 2.2.1 基本概念 | (10) |
| 2.2.2 两类物质的 $p-V-T$ 图 | (11) |
| 2.2.3 相图, 三相点, 临界点 | (12) |
| 2.2.4 相变过程在 $p-V-T$ 图上的表示 | (14) |
| 2.2.5 固态水(冰)的 $p-V-T$ 图结构 | (15) |
| 2.3 分子水平的物相 | (16) |
| 2.3.1 三相物质的分子结构特点* | (16) |
| 2.3.2 水分子的物理模型 | (18) |
| 2.3.3 分子间的相互作用力 | (19) |
| 2.3.3.1 分子作用力的推理实验 | (19) |
| 2.3.3.2 分子之间的势能 | (20) |
| 2.3.3.3 势能和作用力的表达式 | (21) |
| 2.3.4 冰的分子结构 | (22) |
| 2.4 表面能及表面张力 | (23) |
| 2.4.1 汽液界面 | (23) |
| 2.4.2 分子结合能和液体表面能 | (24) |
| 2.4.3 表面张力 | (25) |
| 2.4.4 表面张力实用数据 | (26) |
| 2.4.4.1 不同液体的表面张力 | (27) |
| 2.4.4.2 表面张力与温度之间关系的线性化公式 | (28) |
| 2.4.4.3 $\sigma-T$ 曲线的其它公式[2-19] | (28) |
| 2.4.5 表面张力和总表面能 | (29) |
| 2.5 液滴热力学及静力学 | (31) |
| 2.5.1 液体的存在形式 | (31) |
| 2.5.2 座固液滴* | (32) |
| 2.5.2.1 接触角与润湿 | (32) |

| | |
|---------------------------------------|--------|
| 2.5.2.2 润湿热 | (33) |
| 2.5.3 座固液滴的形状与表面张力 | (34) |
| 2.5.3.1 弯曲表面两侧的压力差 | (34) |
| 2.5.3.2 Young-Laplace 方程 | (34) |
| 2.5.3.3 液滴形状与表面张力之间的关系 | (35) |
| 2.5.4 垂悬液滴 | (37) |
| 2.5.4.1 液滴重量法 | (37) |
| 2.5.4.2 液滴形状法 | (38) |
| 2.6 弯曲界面与毛细管现象 (<i>capillarity</i>) | (38) |
| 2.6.1 气液界面曲率对 σ 的影响 | (38) |
| 2.6.2 毛细管现象与过饱和度 | (40) |
| 2.6.3 表面自由能与 Kelvin 公式 | (42) |
| 2.6.4 Kelvin 公式的数量概念 | (43) |
| 参考文献 | (45) |

第三章 过饱和水蒸汽凝结动力学

| | |
|--|--------|
| 3.1 过饱和蒸汽的产生条件及过程 | (47) |
| 3.1.1 过饱和蒸汽在 p - V - T 图上的状态点 | (47) |
| 3.1.1.1 等温过程和等压过程 | (47) |
| 3.1.1.2 等熵过程 | (47) |
| 3.1.1.3 过冷液相状态点 | (48) |
| 3.1.2 均质性与相变 | (48) |
| 3.1.3 透平喷管中的蒸汽膨胀 | (49) |
| 3.1.3.1 从过热区开始的膨胀过程 | (49) |
| 3.1.3.2 从饱和线或湿蒸汽区开始的膨胀过程 | (51) |
| 3.2 动态凝结过程 | (51) |
| 3.2.1 基本概念 | (52) |
| 3.2.1.1 凝结核 | (52) |
| 3.2.1.2 热力(化学)势及液珠的蒸发和凝结 | (52) |
| 3.2.1.3 液珠的化学势与 Kelvin 公式 | (54) |
| 3.2.2 成核理论 | (55) |
| 3.2.2.1 自发核心的分布规律 | (55) |
| 3.2.2.2 Gibbs 公式 | (56) |
| 3.2.2.3 自由能障 | (57) |
| 3.2.2.4 不同过饱和度下的 $\Delta\Phi_n$ - r 曲线 | (59) |
| 3.2.2.5 不同过饱和度下的 N_n - r 曲线 | (59) |
| 3.2.3 自发成核率 | (61) |
| 3.2.3.1 成核率公式 | (61) |
| 3.2.3.2 各种因素对 I 的影响 | (62) |
| 3.2.3.3 成核过程延续时间 | (64) |
| 3.2.4 成核率理论的局限性 | (64) |
| 3.3 湿蒸汽的传热传质特性及水珠生长 | (66) |
| 3.3.1 基本概念 | (66) |

| | |
|------------------------------------|--------|
| 3.3.2 水珠与蒸汽之间的传质及传热 | (67) |
| 3.3.2.1 凝结过程中的两种传质模型 | (67) |
| 3.3.2.2 水珠内部温度 闪蒸 | (69) |
| 3.3.2.3 传热系数公式 动力粘性系数 | (69) |
| 3.3.2.4 湿蒸汽中的热迟滞 | (71) |
| 3.3.3 水珠生长率公式 | (72) |
| 3.3.3.1 生长率基本方程 | (72) |
| 3.3.3.2 分子动力论公式 | (74) |
| 3.3.3.3 低压气体公式 | (75) |
| 3.3.3.4 应用于连续流的 Langmuir-Maxwell 法 | (76) |
| 参考文献 | (78) |

第四章 湿蒸汽流

| | |
|---------------------------|---------|
| 4.1 流动蒸汽中的凝结过程 | (80) |
| 4.1.1 加热对于可压缩流的影响 | (80) |
| 4.1.2 湿蒸汽缩放喷管内的冲波 | (82) |
| 4.2 湿蒸汽的热力学特性及弛复现象 | (84) |
| 4.2.1 湿蒸汽状态方程式 | (84) |
| 4.2.2 过饱和和湿蒸汽图表 | (86) |
| 4.2.3 过饱和和蒸汽表的应用 | (89) |
| 4.2.4 过饱和和蒸汽的弛复 | (91) |
| 4.2.4.1 简单系统的弛复 | (91) |
| 4.2.4.2 湿蒸汽的热弛复 | (91) |
| 4.3 湿蒸汽的干度 | (93) |
| 4.3.1 概论 | (93) |
| 4.3.2 瞬时干度和流动干度[2-17] | (93) |
| 4.3.3 当量流管 | (94) |
| 4.4 水珠数目守恒的等焓湿蒸汽流方程 | (96) |
| 4.4.1 水珠数目守恒方程 | (96) |
| 4.4.2 连续方程(质量守恒方程) | (98) |
| 4.4.3 流量方程 | (100) |
| 4.4.4 能量守恒方程 | (101) |
| 4.5 超音速膨胀湿蒸汽凝结双相流方程组 | (103) |
| 4.5.1 概论 | (103) |
| 4.5.2 方程组的推导 | (104) |
| 4.5.3 方程组的求解方法, 程序及主要计算结果 | (107) |
| 4.5.4 理论计算与实验数据的比较 | (111) |
| 4.6 凝结湿蒸汽流领域中几个尚待解决的问题 | (115) |
| 4.6.1 凝结传热模型的问题 | (115) |
| 4.6.2 成核过程与水珠数目守恒问题 | (115) |
| 4.6.3 湿蒸汽流损失 | (117) |
| 4.7 湿蒸汽喷管的通流能力 | (118) |
| 4.7.1 湿蒸汽喷管通流能力的特点 | (118) |

| | |
|-------------------------|---------|
| 4.7.2 湿蒸汽喷管通流能力实验 | (119) |
| 4.7.3 对过饱和蒸汽喷管通流能力的认识过程 | (121) |
| 4.7.4 部分凝结对湿蒸汽喷管流量系数的影响 | (122) |
| 4.7.5 新的喷管流量系数理论计算曲线 | (123) |
| 参考文献 | (127) |

第五章 统计方法在微粒数群中的应用

| | |
|---|---------|
| 5.1 概论 | (129) |
| 5.1.1 微粒系统的概念及研究范围 | (129) |
| 5.1.2 胶体状态及胶态弥散体(<i>colloidal state and colloidal dispersion</i>) | (132) |
| 5.1.3 液珠气悬浮体。湿蒸汽 | (133) |
| 5.1.4 微粒系统的统计学特性与整体性质之间的关联实例 | (135) |
| 5.2 微粒数群的统计学处理 | (136) |
| 5.2.1 微粒尺寸的统计平均值 | (136) |
| 5.2.2 微粒尺寸分布 | (137) |
| 5.2.3 液珠数群统计学 | (139) |
| 5.2.4 液珠的中值参数[5-9] | (141) |
| 5.3 数据表达和机率曲线 | (142) |
| 5.3.1 表格法 | (142) |
| 5.3.2 机率曲线图 | (144) |
| 5.3.3 湿蒸汽中球形液珠的机率曲线 | (146) |
| 5.4 统计方法的应用实例 | (147) |
| 5.4.1 汽水分离器研究工作中的人工造湿试验[5-11] | (147) |
| 5.4.2 数据处理结果和分析 | (148) |
| 参考文献 | (149) |

第六章 运动气悬体中的液珠特性

| | |
|--|---------|
| 6.1 运动液珠及微粒的动力学 | (150) |
| 6.1.1 不同尺寸液珠的动力学特性 | (150) |
| 6.1.2 阻力系数 C_D | (152) |
| 6.1.3 几种运动情况中的应用公式 | (155) |
| 6.1.3.1 一元运动、液珠的沉淀 | (155) |
| 6.1.3.2 二元运动 | (156) |
| 6.1.3.3 一元水平运动 | (156) |
| 6.1.3.4 一元垂直运动 | (157) |
| 6.2 液珠的聚合(聚凝) | (158) |
| 6.2.1 热聚合(扩散聚合)[6-2] | (159) |
| 6.2.2 内力作用下的液珠的聚合 | (161) |
| 6.2.2.1 <i>van der Waals</i> 力作用下的液珠聚合 | (161) |

| | |
|------------------------|---------|
| 6.2.2.2 带电荷的液珠聚凝 | (162) |
| 6.2.2.3 偶极子液珠 | (162) |
| 6.2.3 外力场作用下的液珠聚合[6-2] | (163) |
| 6.2.3.1 电力场及磁场中的液珠聚合 | (163) |
| 6.2.3.2 重力场和离心力场中的液珠聚合 | (164) |
| 6.3 气悬体中的微粒泳动现象 | (165) |
| 6.3.1 几种泳动现象[6-5] | (165) |
| 6.3.2 固体微粒的热泳与扩泳 | (165) |
| 6.3.3 湿蒸汽透平中的水珠泳动 | (166) |
| 6.4 微粒沉积[6-25、26] | (167) |
| 6.4.1 概论 | (167) |
| 6.4.2 重力沉积 | (168) |
| 6.4.3 惯性沉积 | (170) |
| 6.4.4 截获沉积 | (172) |
| 6.4.5 扩散沉积 | (172) |
| 参考文献 | (173) |

第七章 蒸汽湿度的测量方法

| | |
|----------------------|---------|
| 7.1 概述 | (175) |
| 7.2 蒸汽湿度的热力学测量法 | (178) |
| 7.2.1 节流式量热计 | (178) |
| 7.2.2 过热式量热计 | (180) |
| 7.2.3 凝结式量热计 | (181) |
| 7.2.4 蒸汽-空气混合式量热计 | (182) |
| 7.3 热力学法测量蒸汽湿度的缺点 | (183) |
| 7.4 光散射的基本知识 | (185) |
| 7.4.1 光的基本性质 | (185) |
| 7.4.2 光的散射现象 | (186) |
| 7.4.3 散射系数、吸收系数和消光系数 | (188) |
| 7.4.4 瑞利散射、衍射散射与米氏散射 | (189) |
| 7.4.4.1 瑞利散射 | (189) |
| 7.4.4.2 衍射散射 | (190) |
| 7.4.4.3 米氏散射 | (191) |
| 7.5 测量蒸汽湿度的角散射法 | (193) |
| 7.5.1 全周散射法 | (193) |
| 7.5.2 侧向散射法 | (201) |
| 7.5.3 前向散射法 | (202) |
| 7.6 测量蒸汽湿度的全散射法 | (203) |
| 7.7 角散射法与全散射法的比较 | (206) |
| 参考文献 | (207) |

第八章 光学法在蒸汽湿度测量中的应用

| | |
|--|---------|
| 8.1 拉代尔喷嘴中水滴直径的测量..... | (209) |
| 8.1.1 测量方法和测量装置..... | (209) |
| 8.1.2 沿喷嘴轴线方向蒸汽压力分布的测量结果[8-4] | (211) |
| 8.1.3 水滴直径的测定..... | (212) |
| 8.2 测量蒸汽湿度及水滴直径的角散射式(散射式)光学探针..... | (213) |
| 8.2.1 莫斯科动力学院的角散射式光学探针..... | (213) |
| 8.2.2 西德阿亨工业大学的角散射式光学探针[8-6、7、8] | (214) |
| 8.3 测量蒸汽湿度和水滴直径的全散射式(消光法)光学探针..... | (216) |
| 8.3.1 以单色激光为光源的全散射式光学探针..... | (216) |
| 8.3.2 以可见光为光源的英国 <i>CERL</i> 全散射式光学探针..... | (217) |
| 8.4 双光束法全散射式光学探针..... | (220) |
| 8.4.1 测量原理和测量方法..... | (220) |
| 8.4.2 光学系统及探针构造..... | (222) |
| 8.4.3 测量结果[8-15、16] | (223) |
| 8.4.4 苏联斯大林金属工厂的光学探针[8-18]..... | (226) |
| 8.5 美国通用电气公司的水滴直径光学测量试验装置[8-17]..... | (226) |
| 8.6 探针光学系统的校验——硫磺悬浮液中硫磺颗粒直径的测量..... | (228) |
| 8.6.1 硫磺悬浮液的配制..... | (228) |
| 8.6.2 测量方法和测量装置..... | (228) |
| 8.6.3 测量结果..... | (230) |
| 8.6.4 双光束法测量硫磺悬浮液中的硫磺颗粒直径..... | (231) |
| 参考文献..... | (232) |

第一章 概 论

1.1 工程两相流分类及发展方向

两相流是多相流的一种。物质一般只有三态，即固态、液态和气态。因此，所谓多相流最多也不过是三相物质同时出现在其中的流动。但是物态虽然只有三种，而组成物质的成份却可以是多样的。如果把“相”的定义引伸到包括考虑不同成份的话，则所谓多相系统 (Multi-phase system) 就有可能大大超过三个了。在这种意义上，普通的空气流就是一种多相流，因为空气中不但包含着 N_2 和 O_2 ，还包含着少量其他气体，如 CO_2 、Ar 和 H_2O 等。而在温度降低的情况下， H_2O 首先就将凝结成液态水珠，其它气体也有可能先后依次凝结成液态。当其它气体凝结成液态时，水珠还有可能结成固态冰。这时大量的 O_2 和 N_2 仍旧保持为气态而流动。这样就构成了典型的多组份多相流。在工程实际中，这样的多相流的例子之一是高速风洞中的气流。

固态的合金物质是固态多组份体的熟知例子。各种可混合的溶液（例如水和酒精）是液态多组份体的熟知例子。当这些物体发生相变时也出现多组份的多相系统。

但是对工程实际最有意义的还是两相流动系统，也就是两相流。以上述空气流为例，一般情况下，空气中的不同组份并不单独地表现出什么热力学上的特点，而是作为理想的混合气体参与工作的。水的液态水珠和固态冰粒也不会在同样的温度压力条件下同时出现。这样，多相流实际上就简化为由气态空气和液态水珠或固态冰粒构成的两相流。又比如在蒸汽喷射真空泵的扩压管中的蒸汽空气混合物，虽然有可能出现空气、水蒸汽和凝结后的水珠这三相，但在通常工作条件下，空气和水蒸汽这两相还是完全的气体混合物，加上水珠也只有两相，而不是三相或多相。

我们似乎有理由认为，至少在与工程实践有关的范围内，对两相流的研究在相当大的程度上可以代替对多相流的研究，这也是在本书的以后各章中不再出现“多相流”这个术语的原因。

两相流可以分为气固两相流，液固两相流和气液两相流三大类。气固两相流在工程技术上的实例有：使用固体燃料的燃气轮机装置中的燃烧产物的运动；燃煤锅炉装置的烟道系统中工质的运动；或者更加一般的情况如用空气输送煤粉或面粉的管道中的气固混合物的运动。还有在自然科学中研究的气流夹带砂粒的运动，也是气固两相流。液固两相流的工程实例有：火力电站中的水力清灰系统中的介质流动；矿井中水力运送煤碳和选矿厂中水力选矿装置中出现的运动系统；在化工流程中也有很多液固两相流的实例。自然界的液固两相流实例，如含有大量泥沙的河水的流动是很典型的。气液两相流的工程实例除了湿蒸汽两相流之外，还有柴油机喷油系统中空气与雾化燃料油混合物在燃烧室内的运动；锅炉汽水管路中出现的各种汽水比例下的混合物的运动；地热动力装置中热井管口的汽水混合物的运动等。在自然科学方面，象夹带云雨的大气运动，台风的运动等，也是这类两相流的实例。

这些两相流的实例在自然界和工程技术中出现的历史是悠久的，特别是自然界含大量泥

沙的河流的运动以及带雨的气流运动更是古已有之。但是把这些现象统统归纳为两相流学科的研究对象,以两相流的科学概念和方法对这些现象或其中某一类现象进行定量的理论分析和实验研究的历史相对则是很短的。就工程技术方面说,各种两相流学科的建立也许只有二、三十年的历史。在这样短的时间内,还不大可能形成统一处理一切两相流现象的纯《两相流学》(或《多相流学》)。鉴于两相流的具体研究对象是如此之分散,也许在很长一段时期内都不会形成纯《两相流学》。换言之,也许客观上还没有形成一种纯《两相流学》的要求。目前的情况似乎是,只有应用两相流概念和方法,对各种具体的两相流现象进行研究的具体的两相流学,还没有一般的两相流学。

可能有人会指出,文献[1-1]和[1-2]从名称上已经说明1967年就出版了关于多相流系统的著作,1980年又出版了关于“气穴及多相流现象”的著作。诚然,这两本书的书名都有“多相流”或“多相系统”的字样,但据我们看,文献[1-1]的作者的主要兴趣还是在于阐明各式各样两相系统的特点,而不在于揭示纯多相系统的规律。一本讲各种两相流的书当然也可以叫作多相系统。至于文献[1-2],作者根本就无意区分两相和多相,不过是把两相流现象叫做多相流现象而已。

既然两相流现象的历史早于两相流学科的历史,则各种具体的两相流学都表现出一种沿着该学科发展的历史道路继续前进的倾向,就不是什么难于理解的事了。比方胶体和乳胶体,都包含着液体物质和固体物质两相,它们的形成过程都牵涉到液固两相流。但在历史上,这种问题一向是物理化学(physical chemistry)的研究对象。在两相流学科出现以后,这种情况并没有改变。在气固两相流方面,固体微粒悬浮在气流中的现象,从四十年代开始就逐渐发展成《悬浮微粒学》学科。这种学科也不因为后来出现了气固两相流学而改变名称或改变原来的基本研究路线。正相反,湿蒸汽的研究在某些方面倒可以借鉴于悬浮微粒学的研究成果,因为湿蒸汽中的微小水珠,就其运动力学特性来说,几乎等同于液固两相流中的固体微粒。

与两相流现象有关的研究还不断地出现在新的学科领域或工程应用之中。例如在大气物理学中有一个分支叫作云雾物理学,其中研究的主要内容和蒸湿汽凝结等问题很有相似之处。气悬浮体学科中所研究的关于“对微粒运动产生的流体阻力”,“微粒的气动捕获”等一类问题,在工业气体净化工程中和在环境污染的防治工程中,也是研究的对象。关于“微粒的漂散”问题和微粒的收集效率,终极速度,微粒沉积问题等,也都是这些新学科领域的研究课题。

两相流学科的出现和发展,也使许多较老、较成熟的工程技术领域获得新的面貌甚至新的生命。比方动力工程中的锅炉设计与制造已有多年的发展历史,在四、五十年代其汽水循环的设计还处于主要依靠经验公式的阶段。但自从引入两相流的概念之后,就逐渐由定性分析向定量分析过渡。即使实验研究工作,也由于得到理论分析的指导而获得更为普遍的意义。其它象冷凝器,特别是表面式冷凝器,各种热交换器,冷却塔,射汽抽气器等许多动力装置,都有类似的变化。在化学工程,制冷工程,制药工程,食品工业等等许多行业中,还可以举出大量的实例来说明这种情况。在所有这些应用领域内,正由于各有其相对悠久的历史传统,两相流新概念在其中的应用必须与其传统结合在一起,沿着传统的道路才能继续前进。

1.2 湿蒸汽两相流的发展及特点

湿蒸汽两相流这门新的学科,在各种两相流学科中占据一个比较特殊的地位。它的发展,

不用说，当然是以蒸汽透平装置的发展为基础和前提的。蒸汽透平差不多从一开始应用，即大约八、九十年以前，就遇到湿蒸汽问题，这是大家都知道的事。湿蒸汽给蒸汽透平主要带来两方面的问题。第一是湿蒸汽使蒸汽透平的低压级效率降低；第二是湿蒸汽中的水滴使低压级动叶片受到磨蚀。从实践效果来看，对于普通的电站蒸汽透平说，到四、五十年代为止，这两方面的问题都算基本解决了。这主要是因为这时蒸汽透平装置采用了中间再热循环，从而使透平的排汽湿度大为降低的缘故。

但是这种解决问题的方法从实质上来说，是解决了蒸汽动力装置中的热力循环问题而避开了湿蒸汽对透平本身的危害问题。因此从五十年代开始，当地热电站和饱和蒸汽核电站相继出现时，所应用的湿蒸汽透平中的湿蒸汽问题不但依然存在，而且更加严重起来。原因不需深究就很清楚。首先，地热电站和饱和蒸汽核电站的初参数低，不能采用中间再热循环，因而透平排气湿度不可避免地大大增加。其次，整个透平都在湿蒸汽中工作，所以各级都受到湿蒸汽的不利影响，透平效率降低较大。第三，对核电站蒸汽透平说，单机功率很大，低压叶片的圆周线速度很高，叶片受水滴磨蚀的作用也就更大。正是在这种情况下，随着湿蒸汽透平应用的日益广泛，对湿蒸汽研究的兴趣就重新增长起来，而且这种研究和从前的研究相比也进入了一个新的阶段。大体上说，和前述某些例子一样，是从过去两相流理论出现前的定性研究阶段进入了两相流理论出现后的定量研究阶段。现在仅举两三个例子加以说明。

第一、透平的湿蒸汽级的湿汽损失的计算问题，大概从1910年Baumann提出著名的定性修正公式以后[1-3]，在蒸汽透平设计计算中一直被采用着，也许直到现在还没有放弃。但是1976年出版的文献[4-2]开始出现定量计算这种损失的尝试。尽管这种尝试还是初步的，也许还没有得到透平制造界的普遍承认，但却毫无疑问地代表了一种由定性分析向定量计算转变的倾向。当然，转变倾向也是一种相当长期的过程。早在1934年，Soderberg发表的文章[4-28]已经予示了这种转变倾向的苗头，开始区分不同尺寸的水珠对汽流的不同作用。不象Baumann那样，只用一个笼统的修正因子来考虑湿蒸汽对流动效率的影响。但在三十年代中期，Soderberg还达不到完全定量计算的阶段。

第二、透平湿蒸汽级喷管的流量系数超过单位值的事实，虽然根据法国Rateau教授的著名实验早已为透平设计人员所熟知，但他们对这一事实的认识和对其意义的正确估价，直到五十年代后期D.J.Ryley的论文[4-31]发表以前并不深刻。在此以前对这种喷管尺寸的计算一直沿用传统的公式而缺乏理论的根据。到六十年代以后，随着湿蒸汽两相流学科的发展，人们逐渐感到不能满足于以往定性的理解，而要求从过饱和蒸汽凝结理论的高度对此系数大于1的事实作出新的定量计算。

第三、过饱和蒸汽膨胀极限—Wilson点位置的确定在四十年代以前都依靠实验观察和测量。虽然实验的结果是足够精确的，但在缺乏理论计算根据的情况下，总是不能对过饱和膨胀极限这一现象作出根本性的深入分析。直到1962年，G. Gyarmathy[3-19]才首先从理论上全面地阐述了为什么Wilson点位置的实验数据必然会引出现有的结果。Gyarmathy的论文不单单在理论上而且在实验上都对湿蒸汽两相流作出了重要的贡献，可以说是这门学科发展道路上的一块里程碑。

湿蒸汽两相流的特点，不言而喻，是相对于其它两相流来说的。我们觉得把有关湿蒸汽透平及其装置中工作介质的流动定名为“膨胀湿蒸汽凝结两相流”比较合适。它最能概括出这种两相流的特点，因为在自然界和工程中出现的既膨胀又凝结的湿蒸汽流的实例是不多的。仔

细分析一下，这种汽液两相流的具体特点有以下几个方面：

第一、由于汽相和液相水珠同时存在，液相物质的表面自由能在汽流的总能量中所占比重达到一定的份额。这与气固两相流中固体微粒作为气悬浮体而存在的情况，或与沸腾两相流中气泡群的产生和存在情况都有所不同，因为在两种情况下都没有表面自由能出现的问题。

第二、由于液相水珠在透平的通道壁上沉积而形成水膜，而水膜在高速汽流的夹带和雾化作用下又产生较大的水滴，并重新参加到透平排汽部分的汽液两相物质中去，就造成透平中湿蒸汽两相流前后两部分物质的不均匀性。这种复杂的情况在一般两相流中，基本上是不多见的。

第三、在湿蒸汽两相流中液相水珠是通过蒸汽的凝结而形成的，而凝结之后的水珠又有一个尺寸增长过程。所以在这种两相流中一般都包含着尺寸大小不一的各种水珠和水滴，其中，小水珠具有固体微粒的力学性质，而较大的水滴则表现出不同的特性。整个两相流表现出统计学上的运动特性。但在汽固两相流中，固体微粒在气体中的运动特性基本上是不变的。在沸腾两相流中很小的气泡群产生之后虽然可以有体积的变化，但变化的原因是由于液体压力的变化引起的，并不象水珠尺寸的增长是由于蒸汽的不断凝结而引起的。因此随着水珠尺寸的增加，汽相物质就相应地不断减少。

第四、湿蒸汽在透平内部通过弯曲的通道时不断地膨胀。由于蒸汽分子不断地凝结成水珠，整个膨胀流动实际上是一个加热的过程。这与许多其它两相流过程是完全不同的。由于蒸汽分子和水分子在热力学平衡状态下不断发生蒸发和凝结，这种汽液两相流中出现的物质交换、动量交换及传热现象，也是许多其它两相流中不常见的。

1.3 湿蒸汽两相流研究

两相流作为一门新兴的边缘学科，涉及的基础知识是十分广泛的。这一点已为学术界所公认。“湿蒸汽两相流”只是广义两相流的一个分支，它是否也可以作为一种边缘学科来对待呢？我们的回答是：它是一门与许多基础学科相互有关的学科。其实，湿蒸汽两相流学科的定义也并不十分明确，其范围也还在变动之中。作为湿蒸汽透平工质的湿蒸汽两相流，固然理所当然地属于这门学科，地热井管中的湿蒸汽两相流也不应被排除在这门学科之外。但这两种湿蒸汽两相流，就性质上看，区别又十分明显。前者可以名正言顺地叫作膨胀湿蒸汽凝结两相流，其主要基础学科还是气体动力学，因为其中气态相仍然占据着主导地位。按质量百分数看，液相物质只占10%以下，最多不超过14%；而按容积百分数看，液相物质所占比重就更加微不足道了。对比之下，后者的液相物质比重大得多，可以占到两相物质总量的50%或更多，是一种大湿度两相流，而膨胀程度则很小。但这种两相流由于热力过程的差别，又不能直接归并到锅炉的汽水两相流学科中去。本书的主要研究对象是前一类湿蒸汽两相流，即膨胀湿蒸汽两相流。

在这种两相流中，液相水珠的形成是通过蒸汽膨胀后自发凝结的结果。凝结静力学就是研究这种自发凝结过程的核心内容，而凝结静力学本身则建立在许多基础学科的理论基础之上。例如，高等工程热力学的部分内容是研究物质相变问题，包括汽液两相物质互相转变问题的必备基础；物性的分子理论对于理解分子水平的物性有极大的重要性；物理化学，高密度系统物理(凝聚态物理)，表面物理，表面化学等学科对于深入认识液体表面自由能和表

面张力理论都是不可缺少的基础。

关于自发凝结机制的理论、分析和计算是凝结动力学的基本内容，涉及到理论热力学、统计物理、统计力学中的一些基本概念，也牵涉到工程传热学、工程流体力学中的一些方法。为了对水蒸汽的凝结过程进行必要的定量计算，这些基础概念和方法都是不可缺少的。

除了凝结静力学和凝结动力学之外，汽液两相物质在弥散状态下的流动当然也是湿蒸汽两相流的核心问题之一。因为在这种汽流中存在着蒸汽凝结成水珠的相变过程，而凝结又伴随着热量的释放，所以这种两相流是一种加热过程而不是绝热流动。这就牵涉到传热学的问题，传热模型的问题，也牵涉到热弛复和惯性弛复的问题。

一粒水珠单独存在时，就它的力学特性说，与一粒固体微粒很相似。直径越小的水珠越是接近于完全的球体，而且在通常的外力作用下几乎与刚体一样，完全不会发生形状的改变。许多水珠同时存在时，它们的特征就在很大程度上决定于水珠在两相物质中分散的程度了。湿蒸汽透平中的湿蒸汽两相流既然水珠所占的比重很小，所以液相物质基本上是均匀散布在汽相物质中的，彼此极少机会发生碰撞。在汽液两相处于热力学平衡的条件下，蒸发与凝结两种过程也都停止，所以这时的湿蒸汽就与一般的气悬浮体（固体微粒散布在气体之中所形成的弥散物质）无异。气悬浮体科学(Aerosol Science)是一门相当庞大、发展又相当快的学问。湿蒸汽两相流依赖于这门学科而发展的程度，丝毫不亚于依赖于热力学、物质的分子结构等学科的程度。

湿蒸汽两相流不是一门单纯依靠理论分析和计算就能完全解决一切问题的学问。在这里，理论分析和计算不能脱离实验的验证。除了各种其它实验之外，特别需要依靠利用光学方法来获得有关液珠的尺寸大小和浓度分布的数据，因为光学测量方法不会影响被测物体的实际状态。这样，又可看到湿蒸汽两相流这门边缘学科与几何光学以及波的传播等物理学分支学科的联系。随着研究工作的进展，激光技术也会在湿蒸汽两相流科学中得到相类似的应用，从而进一步促进它的发展。

1.4 湿蒸汽两相流研究的历史回顾

如果对国际蒸汽两相流文献作一次历史性回顾，就不难看出，英国和苏联（波兰、捷克等）与美国和德国（日本）之间，在这一领域中依稀出现的一条分界线。这条分界线并不是区分两种学术观点的界线，所以我们不说什么英、苏学派和美、德学派。但是就湿蒸汽两相流的理论研究与湿蒸汽透平的生产实际之间相互促进、相互影响的关系来说，就不能否认这种关系在英国和苏联十分明显，而在美国和德国则几乎不存在的事实。对这一事实，我们觉得用“两条历史发展道路”来概括还是比较恰当的。笼统地说，在两相流学科建立以后，英国和苏联较多地从解决湿蒸汽透平实际问题的角度来发展湿蒸汽两相流的理论研究；美国和西德（日本次之）则较多地从统计物理学、理论热力学的观点研究广义气液两相流的基本问题，如成核、凝结、相变等。

在气液两相流学科出现之前，虽然还没有原子能电站用的湿蒸汽透平，而常规蒸汽透平的湿蒸汽级早已有了。从1901年起就已经提出了透平低压级喷管中湿蒸汽工质的流动问题，而且关于过饱和湿蒸汽喷管的实际流量大于理论流量这一似乎相当神秘的现象的正确解释，在湿蒸汽喷管的研究史上竟然化费了20年的时间才为大多数学者所接受。在这段历史

中，英国学者差不多统治了整个学术论坛，说明英国从一开始就是走结合透平实际研究湿蒸汽流动问题的道路。这一时期不单是在透平技术上，就是在凝结理论方面的一些权威学者也几乎都是英国人，如，C.T.R. Wilson, Kelvin 爵士, Callender 教授等。德国方面只有 Stodola 一人参加了过饱和蒸汽问题的争论，而且他还不是德国人。论国籍他是捷克人；论居住国，他在瑞士。美国的 H.M. Martin 虽然在 1913 年和 1918 年都参加了这场争论，但他的文章都发表在英国杂志《Engineering》上。到三十年代，美国虽然有 J.I. Yellott 和 Ret-taliata 对喷管中的过饱和汽流的凝结过程作过有价值的研究，但他们恰如昙花一现，很快就消声匿迹，而且再也没有出现过第三个结合透平实际研究湿蒸汽理论问题的学者了。

在三十年代，德国有一批物理学家对蒸汽的凝结机理和成核问题进行了很有成绩的探讨，如 M. Volmer, A. Weber, L. Farkas, R. Becker, W. Döring 等。这些人的工作毫不结合蒸汽透平的实践，却很有助于膨胀工质的凝结两相流学科的奠基工作。

从四十年代到五十年代初，一批以德国 K. Oswatitsch 为首的德、美空气动力学专家，在研究超音速风洞中的气体流动问题时对水蒸汽的凝结现象进行了深入的研究。由此逐渐建立起气液两相流或多相流这一学科，并且促使美国和德国的湿蒸汽两相流科研进一步脱离了与湿蒸汽透平的实践相结合的道路，其中尤以美国在这条道路上走得更加坚决。

五十年代初，原子能动力开始迅速发展。英国虽然发展的是气冷反应堆和相应的常规蒸汽透平，但在蒸汽科研方面还没有放弃结合大功率蒸汽透平的设计和运行实际的道路。同时，在这条道路上又增加了苏联这一支一向强调理论与实践相结合的科技力量。苏联高等学校的庞大研究队伍，Деич, Кириллов, Стеианцюк 等人结合蒸汽透平实际进行研究的同时，程度不同地发展了湿蒸汽流的理论。在西德，随着上述一些物理学家退出科研工作舞台以及象 W. Traupel 及 G. Gyarmathy, Barschdorff 等透平专家的出现，湿蒸汽科研的道路多少有些转向英、苏的道路。唯独在美国，我们看到了不同情况。美国发展原子能动力从一开始就走制造轻水反应堆(BWR 和 PWR)和湿蒸汽透平的道路。到现在，美国拥有全世界最大的湿蒸汽透平发电能力(约9000万千瓦)。但是膨胀气液两相流和湿蒸汽透平科研分家的现象却愈趋明显。高等学校和科研单位致力于搞理论，使气液两相流的基本理论能在水蒸汽、有机工质蒸汽、化学溶液、甚至金属液体两相流物质的发展方面都能发生指导作用；工厂的实用性科研则集中力量解决与生产直接有关的课题，如湿度测量，对抗水蚀的有效方法等。我想，这种情况的出现大概与美国高等学校始终强调通才培养和工业企业独立搞科研的力量十分强大有关。所以虽然分家现象多年来确实存在，两相流科研和湿蒸汽透平两者的发展却都没有受到影响。

1.5 湿蒸汽两相流研究现状

目前世界上核动力中心电站的总发电能力已经接近二亿吨，发电量占总发电量的 10% 以上，其中绝大部分发电能力是湿蒸汽透平装置提供的。到 2000 年湿蒸汽透平装置所占的比重，预计还有较大的增长。独立发展湿蒸汽透平制造工业的国家有美国、英国、法国、苏联、日本、西德、波兰、捷克、瑞士等国。我国的核动力工业几经蹉跎，直到 1984 年才算正式上马。为了发展湿蒸汽透平工业，就不能不开展湿蒸汽两相流科研工作。所以，国际上对湿蒸汽两相流进行研究最有成绩的也正是这些国家。

在美国，严格地说，并没有专门从事湿蒸汽两相流研究的学者。因为所谓的两相流学