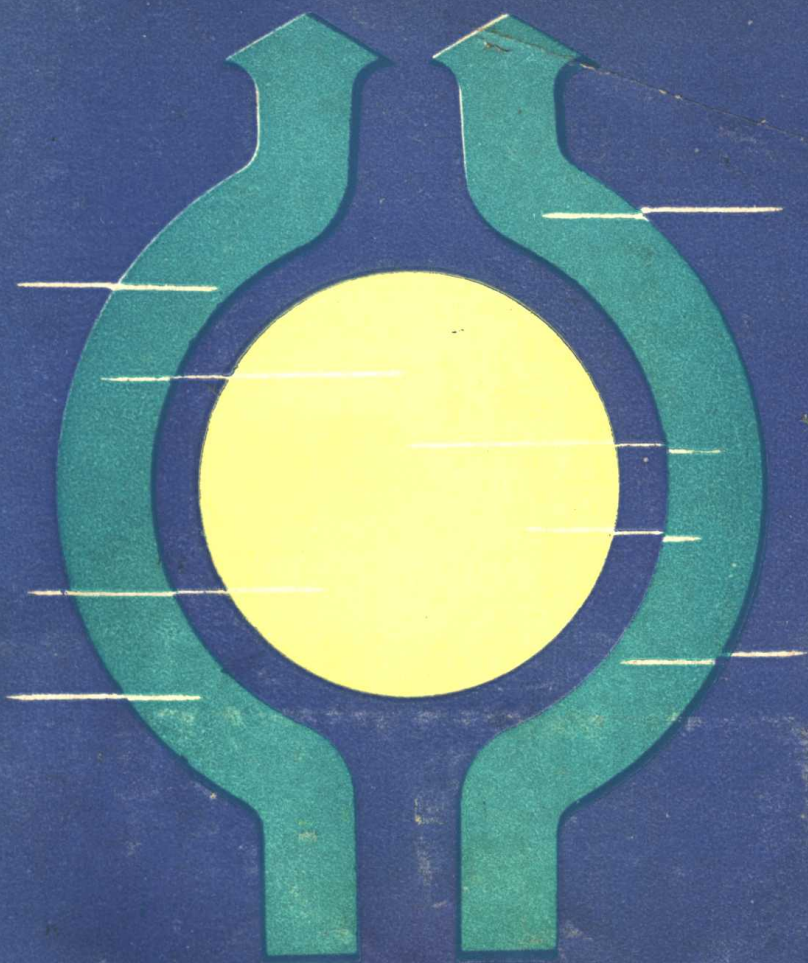




方丁酉 编著

两相流动力学

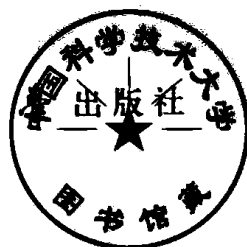
国防科技大学出版社

LIANG XIANG LIU
DONG LI XUE

两相流动力学

方丁酉 编著

国防科技大



内 容 简 介

本书系统地介绍了两相流动力学的基础,包括两相混合物热力学、颗粒相特性、两相流动的基本方程和一维两相流动。以喷管两相流动为例,详细地讨论了坐标变换、二维两相跨音速流和二维两相超音速流的有限差分解法和特征线解法。论述了颗粒尺寸可变的两相流动,介绍了光测两相流动参数的原理和方法。

本书在阐明基本概念的基础上注重工程应用,可作为火箭发动机、气体动力学和流体力学等专业研究生教材(前五章可供本科生教学使用),也可供航空、航天、能源、化工、水利、冶金等工业部门从事两相流动、两相燃烧研究的科研人员以及有关专业的研究生参考。

两 相 流 动 力 学

方丁酉 编著

责任编辑 唐羽章

国防科技大学出版社 出版发行

湖南省新华书店经销

国防科技大学印刷厂印装

•

开本: 787×1092 1/32 印张: 17.3125 字数: 397千字

1988年9月第1版第1次印刷 印数: 1-3 000册

ISBN 7-81024-031-5
TB·3 定价: 4.30元

前 言

随着科学技术的进步，流体力学的重要分支学科——两相流动力学也得到了飞速的发展，并已广泛应用于航空、航天、热能、冶金、化工、水利、环境保护和医学等现代工程技术。

本书系作者根据多年的科研实践和教学经验写成的，着重于阐述基本概念和数值解方法。前五章阐述了两相流动力学的基础，它包括两相混合物热力学、颗粒相的特性、两相流基本方程和一维两相流动。这部分内容可用于本科生的教学。其后六章，以喷管流动为例介绍了坐标变换及跨音速、超音速和颗粒尺寸变化的两相流动的数值解方法，它包括特征线方法和有限差分法。这部分内容可用于研究生的教学。最后一章介绍了两相流动参数的测量方法。附录中给出了坐标变换的计算程序。

本书可作为高等院校火箭发动机、气体动力学及有关专业的本科生和研究生的教材或参考书，并可供从事这方面工作的教师、科技人员参考。

代绪恒、叶万举副教授审阅了全书，常显奇副教授审阅了第六、七、八、十和十一章，王承尧副教授审阅了第九章，曹泰岳同志审阅了第四章，陈定安同志审阅了第十二章。他们在审阅中都提出了许多宝贵的意见，在此谨向他们表示衷心的感谢。

本书吸取了本校研究两相流动力学的研究生们的许多成

果，在此特致谢意。

由于作者水平有限，书中缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正。

作者

1988年4月于长沙

目 录

前 言

第一章 绪 论

§1-1 什么是两相流动	1
§1-2 研究两相流动的方法	2
§1-3 两相流动原理在工程技术中的应用	7
§1-4 两相流动理论在火箭发动机中的应用	8
参考文献	8

第二章 两相混合物热力学

§2-1 混合物中颗粒的容积分数、质量分数和质量流分数	10
§2-2 两相混合物的压强	14
§2-3 两相混合物的热力参数	17
§2-4 两相混合物状态的等熵变化	20
§2-5 两相混合物的音速	21
参考文献	24

第三章 颗粒相的特性

§3-1 颗粒相的物理特性	25
§3-2 颗粒相的形状和尺寸特性	28
§3-3 流体作用于刚性球形颗粒上的阻力	42
§3-4 作用于颗粒上的其它力	61
§3-5 颗粒的热量传递	68
§3-6 颗粒的质量传递	74
§3-7 可变形颗粒的阻力系数简介	80
§3-8 动量传递和热量传递的松弛时间	82
§3-9 颗粒内部的温度松弛	85
§3-10 稠密颗粒群和稀疏悬浮体	87

参考文献	91
------------	----

第四章 两相流动的基本方程

§4-1 雷诺输运定理——守恒方程的一般形式	94
§4-2 质量守恒方程	98
§4-3 动量守恒方程	109
§4-4 能量守恒方程	121
§4-5 两相流动的基本方程	137
§4-6 多分散颗粒群两相流动的控制方程	139
§4-7 非守恒型的控制方程	143
§4-8 不同坐标系中的两相流动控制方程	145
参考文献	152

第五章 一维两相流动

§5-1 一维两相流动的控制方程	153
§5-2 一维两相平衡流动	162
§5-3 一维两相常滞后流	169
§5-4 一维定常两相喷管流动	185
§5-5 用特征线法解一维非定常两相流动	208
§5-6 用有限差分法解一维非定常两相流动	248
§5-7 两相平衡混合物通过激波的流动	264
参考文献	270

第六章 两相超音速喷管流动

§6-1 轴对称喷管两相流动的控制方程	271
§6-2 控制方程的类型	273
§6-3 用特征线法解两相超音速喷管流动	276
§6-4 用空间步进法解两相超音速喷管流动	310
参考文献	326

第七章 坐标变换

§7-1 一般变换关系式	327
§7-2 贴体坐标系统	329

§7-3	差分方程	333
§7-4	差分方程解法	335
§7-5	边值和初值计算	342
§7-6	简单变换	343
§7-7	算例	344
	参考文献	345
第八章 两相平衡跨音速喷管流动		
§8-1	控制方程	347
§8-2	内部点的有限差分格式	351
§8-3	喷管跨音速流场入口和出口边界的计算	374
§8-4	固体壁边界的计算	880
§8-5	喷管对称轴线边界的计算	385
§8-6	算例	387
	参考文献	394
第九章 用特征线法解轴对称非定常流		
§9-1	控制方程	397
§9-2	特征方程和相容性方程	400
§9-3	流面和流面内的相容性方程	402
§9-4	波面和波面内的相容性方程	406
§9-5	数值积分法	412
§9-6	内部点的计算	413
§9-7	固壁点的计算	417
§9-8	用有限差分法数值解相容性方程	421
	参考文献	444
第十章 两相跨音速喷管流动		
§10-1	控制方程	446
§10-2	数值解法	450
§10-3	用特征线法对边界点参数求解的计算方程	457
§10-4	算例	461

参考文献	465
第十一章 颗粒尺寸可变的两相流动	
§11-1 颗粒温度变化和相变对颗粒尺寸的影响	467
§11-2 液滴在流动中的碰撞聚合	470
§11-3 液滴在流动中的破碎	474
§11-4 颗粒尺寸可变的一维两相流动的控制方程	483
§11-5 算例	488
参考文献	491
第十二章 两相流参数测量	
§12-1 激光多普勒测速 (LDV)	492
§12-2 颗粒尺寸测量	504
§12-3 用全息摄影测量颗粒场	515
参考文献	529
附录 喷管坐标变换程序	531

第一章 绪 论

§ 1-1 什么是两相流动

相的概念通常是指某一系统中具有相同成分及相同物理、化学性质的均匀物质部分，各相之间有明显可分的界面。例如空气是一个相，水和冰是两个相，两块晶形相同的硫黄是一个相，两块晶形不同的硫黄（如斜方晶形和单斜晶形）则是两个相^[1]。但在不同的学科中，根据研究对象的特点，对相各有特定的说明。例如在热力学中，所谓相主要指物态，具有相同物态的物质是一个相，在通常条件下，物质有固态、液态和气态，也称为固相、液相和气相。在多相流体力学中，所谓相不仅按物态，而且也按化学组成、尺寸和形状等来区分，即不同化学组成、不同尺寸和不同形状的物质属于不同的相。在两相流动研究中，把物质分为连续介质和离散介质。气体和液体属于连续介质，也称为连续相或流体相。固体颗粒、液滴和气泡属于离散介质，也称为分散相或颗粒相。流体相和颗粒相组成的流动叫做两相流动。因为颗粒相可以是不同物态、不同化学组成、不同尺寸或不同形状的颗粒，因此，这样定义的两相流动不仅包含了多相流体力学中所研究的流动，而且把复杂的流动概括为两相流动，大大简化了数学模型。

当流体相是气体时，颗粒相可以是固体颗粒、液滴或两者

兼有；当流体相是液体时，颗粒相可以是固体颗粒、气泡、不溶于液体相的另一种液滴、或其中两种、三种兼有。最简单的两相流动仅由一种流体相和一种颗粒相组成，它们有下列五类：

1. 气体—固体颗粒两相流动，简称气—固两相流动，例如粉末气力输送等。

2. 气体—液滴两相流动，简称气—液两相流动，例如液体喷雾雾化等。

3. 液体—固体颗粒两相流动，简称液—固两相流动，例如水力输送等。

4. 液体—液滴两相流动，简称液—液两相流动，例如乳化等。

5. 液体—气泡两相流动，简称液—气两相流动，例如沸腾冷却等。

本书主要研究固体颗粒和小液滴在流体中的悬浮流动。对于液—气两相流动，有兴趣的读者可参阅文献[2]。

§ 1-2 研究两相流动的方法

两相流动力学是 60 年代开始迅速发展起来的流体力学的一门分支，属于近代流体力学的范畴，它主要研究两相间的相互作用和两相的宏观运动规律。

两相流动的研究方法和一相流动一样，可以分为实验研究和理论研究两个方面。由于许多两相流动现象、机理和过程目前还不甚清楚，某些工程设计只能依靠大量观察和测量建立起来的经验关系式。本书最后一章将讨论实验研究中的某些测量技术，本节主要阐述两相流动研究中关于颗粒相的拟流体假设

和研究两相流动的数值模型。

§1-2-1 拟流体假设

在流体力学中，尽管流体分子间有间隙，但总是把流体看成是充满整个空间没有间隙的连续介质。对于悬浮于流体中的颗粒，人们自然会想到类似的假设。由于两相流动研究的不是单个颗粒的运动特性，而是大量颗粒的统计平均特性，虽然颗粒的数密度（单位混合物体积中的颗粒数）比单位体积中流体的分子数少得多（在标准状态下，每 cm^3 体积中有 2.7×10^{19} 个气体分子），但当悬浮颗粒较多时，人们仍可设想离散分布于流体中的颗粒是充满整个空间没有间隙的流体。这就是拟流体假设。引进拟流体假设后，两相流动恰如同两种流体混合物的流动，就可用流体力学、热力学的相关知识来解决两相流动问题，使两相流动的研究大大简化。

但必须注意两点，一是拟流体并不是真正的流体，颗粒与气体分子之间、两相流与连续介质流之间有许多差异，二是使用拟流体假设时要特别注意适用条件。

气体分子与悬浮颗粒的主要差别在于气体分子间有很强的相互作用，而颗粒间的相互作用很弱。当气体速度降低时，其温度会升高，而当速度增加时温度又会降低，但悬浮于气体中的颗粒，只能在气体粘性力的带动下才能运动，而且颗粒温度不随颗粒速度而变化。气体分子热运动能贡献压强，但颗粒布朗运动所贡献的压强非常微小（见§2-2）。气体中扰动通过压强波（分子间相互作用）传播，而颗粒中扰动只能沿着颗粒轨线传播。所以，稀颗粒群的控制方程是双曲型的。除此之外，气体能膨胀、压缩，因此它的比热可分为定压比热和定容比热，但固体颗粒和液滴只有一个比热；颗粒在流体中运动时，其表面有附面层，其后还有尾流，这是气体分子运动中所没有的。

因此，在处理颗粒相运动时，在某些方面把它看成和流体一样，在另一些方面则要考虑颗粒相本身的特点，这就是拟流体的“拟”字的含义。

根据拟流体假设，颗粒相的密度可以和连续介质的密度一样来定义：

$$\rho_f = \lim_{V \rightarrow V_r} (M_f/V) \text{ 和 } \rho_p = \lim_{V \rightarrow V_r} (M_p/V)$$

式中 M_f 和 M_p ——体积 V 中的流体质量和颗粒质量；

ρ_f 和 ρ_p ——流体相和颗粒相的密度；

V_r ——极限容积。

对于气体，为了得到统计平均值波动小于 1%，极限容积 V_r 中应包含有 10^4 个分子。标准状态下包含 10^4 个气体分子的容积是 $0.1 \mu\text{m}^3$ 。对于许多实际工程应用，这个尺寸比气体流动系统的特征尺寸小得多，可以把这个容积看成一个点，可以把气体看成是连续介质。

对于两相流动，仿照上面的说法，极限容积中应包含 10^4 个颗粒[4]。对于悬浮于空气中的煤粉颗粒，装填比（控制体中颗粒质量流量/气相质量流量）为 1 时包含 10^4 个颗粒的立方体的边长与颗粒直径之比约 10^2 ，如果煤颗粒的直径为 $100 \mu\text{m}$ ，则立方体的边长应为 1cm。这个容积比标准状态下的气体极限容积大得多。但如果流动系统的特征尺寸远大于这个尺寸，仍可将该容积看成是一个点，可以把颗粒相视为连续介质。

在气体动力学中，通常认为 $\lambda/S < 0.01$ 时，连续性假设才适用（ λ —气体分子平均自由行程， S —流动系统的特征尺寸）[9]，在两相流动中，由于颗粒的布朗运动较弱，可认为 $L/S < 0.01$ 时拟流体假设才成立（ L —颗粒质心间的距离）。

例 1-1 管道输送煤粉，已知颗粒间距为 10^{-3}m ，试求拟

流体假设成立的最小管道直径。

解 取管道直径为流动系统的特征尺寸，则拟流体假设成立的最小管道直径 D 为

$$D = L / 0.01 = 10^{-3} / 0.01 = 0.1 \text{ m}$$

§1-2-2 研究两相流动的数值模型

两相流动以两相耦合为特征。例如液滴喷入热燃气中，通过热气向液滴传热、液滴承受气动阻力和液滴蒸发而出现两相间的热量传递、动量传递和质量传递。对于稠液滴群，还要考虑液滴间的相互作用，液滴可能因气动力和碰撞作用而发生破碎或聚合等。因此，两相流动比一相流动复杂的多。根据拟流体假设，可以写出两相流动基本方程（也称两流体方程）。为了对基本方程进行数值求解，根据颗粒的稀稠、两相间的耦合程度、所考虑的空间维数、流体相的速度和所选择的计算方法有各种各样的数值模型。根据颗粒的稀稠有

1. 稀颗粒群两相流动。颗粒运动主要取决于气动力。
2. 稠颗粒群两相流动。颗粒运动主要取决于颗粒间的碰撞。

本书主要研究稀颗粒群两相流动。根据两相间的耦合程度有

1. 两相平衡流模型（也称均相流模型）。
该模型假设两相的速度和温度彼此相等。这是最简单的两相流动模型，广泛应用于各种设备的理论性能计算中。例如固体火箭发动机用化学平衡和两相平衡的热力计算来得到发动机的理论性能。
2. 单颗粒动力学模型（也称一方耦合模型）。该模型假设流体流动不受颗粒存在的影响，但颗粒在流体的带动下运动。该模型适用于颗粒浓度非常低的两相流动。

3. 两相不平衡流模型（也称两方耦合模型，简称两相流模型）。该模型中两相的速度和温度彼此不相等。

本书主要研究两相流模型。根据所考虑的空间维数有

1. 一维两相流动
2. 二维两相流动
3. 三维两相流动

本书主要研究一维和二维两相流动。根据气相的速度有

1. 亚音速两相流动，气相马赫数小于 1
2. 跨音速两相流动
3. 超音速两相流动，气相马赫数大于 1

本书主要研究跨音速和超音速两相流动。根据计算方法有

1. 两流体法。该数值模型把两相流动看成是流体相和拟流体组成的流动，对两相流基本方程联立数值求解。例如文献[7]用守恒型不定常两流体方程和麦克科马克(Mac Cormack)格式完成的二维和轴对称喷管的气相和颗粒流场的计算。

2. 轨线法。该数值模型对气相方程和颗粒方程分别求

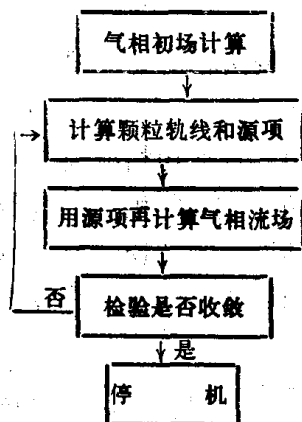


图 1-1 轨线法计算框图

解，其中对颗粒方程采用特征线法，沿颗粒轨线进行数值积分。轨线法的计算框图如图1-1所示。例如文献[8]对气相方程用时间相关法，对颗粒方程用特征线方法完成的轴对称喷管内气相和颗粒流场的计算。

§ 1-3 两相流动原理在工程技术中的应用

两相流动现象广泛存在于自然界和工程技术中。降雾、下雨、下雪、下冰雹、云层流动、流沙、尘暴等是自然界中的一些例子。各种发动机和窑炉中的喷雾燃烧，核反应堆的冷却，宇航飞行器的两相绕流，含铝推进剂固体火箭发动机中的燃气流动，石油和天然气的开采和运输，热力设备与制冷系统的工作过程，化学工艺中的流态化、吸收、蒸发、凝结和化学反应过程，采矿和冶金过程中的旋流分离和运输，气力和液力输送，煤的气化和液化，煤粉和煤浆燃烧，空气和水的污染，环境保护，粉尘爆炸，血液的循环与凝固，水利工程中的泥沙运动和高速渗气流等无不与两相流动有关。因此，两相流动不仅与国民经济建设紧密相关，而且与国防建设和人民生活密切相关。掌握了两相流规律就能对各种技术设备的最佳设计、安全运转以及改造自然环境和提高人民健康水平等起到指导作用。

我国为解决工农业生产中提出的两相流动问题广泛开展了研究。目前我国在流态化技术、两相燃烧、两相加速流动、两相传热、气力和水力输送、两相流动的物理模型、数值模型和计算、两相流的实验和检测以及自然界中的两相流动等方面都取得了可喜的成绩。但两相流动是复杂的，对于许多复杂的现象、机理和过程目前还处于不甚了解的状态。要完全解决这些问题，还要做大量、长期、艰苦细致的工作。

§ 1-4 两相流动理论在火箭发动机中的应用

为了提高现代固体火箭发动机推进剂的能量和密度及压抑某些频率的不稳定燃烧,广泛采用了含铝推进剂。铝粉燃烧后生成大量 Al_2O_3 颗粒,它在燃烧室中呈液态,在喷管喉部下流逐渐由液态相变为固态。因此,它属于典型的气体—颗粒(液滴和固体颗粒)两相流动。气动计算是发动机设计、研究的基础,固体火箭发动机研制中的许多问题都与两相流动密切相关。例如发动机比冲预估中要考虑两相流损失,内弹道预估中要考虑两相流动的影响,喷管气动型面设计中要计及喷管两相流动,喷管热结构设计中要计及颗粒的沉积、传热和对绝热层的机械冲蚀,点火器设计中要考虑点火药粒的燃烧与流动,旋转发动机设计中要计及铝颗粒的燃烧与流动,不稳定燃烧研究中要考虑颗粒对压抑不稳定燃烧的作用,在确定推进剂配方中铝粉最佳含量时要考虑两相流损失,发动机优化设计和模拟分析时要计及两相流动的影响等。可见,两相流动研究已日益成为固体火箭发动机研制中的重要课题。

现在不但固体推进剂含有铝粉,也在研究把轻金属(铝、铍、硼、锂等)或它们的化合物作为液体火箭发动机推进剂的组分之一,以提高推进剂的能量。另一方面,液体火箭发动机推进剂即使不含有轻金属,也存在许多两相流动问题,例如喷雾燃烧,低温推进剂流动,气穴文氏管工作和沸腾冷却等。

参 考 文 献

- [1] 辞海编辑委员会,“辞海”,1979年版(中),p2940,上海辞书出版社
- [2] Graham B. Wallis, “One-Dimensional Two-phase Flow,”