



工业和信息化部“十二五”规划专著

高温高压多相流体 动力学理论与应用

THEORIES AND APPLICATIONS OF
MULTIPHASE FLOW DYNAMICS IN
HIGH TEMPERATURE AND HIGH PRESSURE

袁亚雄 张小兵 著



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



工业和信息化部“十二五”规划专著

高温高压多相流体 动力学理论与应用

THEORIES AND APPLICATIONS OF
MULTIPHASE FLOW DYNAMICS IN
HIGH TEMPERATURE AND HIGH PRESSURE

袁亚雄 张小兵 著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

高温高压多相流体动力学理论与应用 / 袁亚雄, 张小兵著. —北京: 北京理工大学出版社, 2016. 4

ISBN 978-7-5682-2166-5

I. ①高… II. ①袁… ②张… III. ①相流体力学-研究 IV. ①O359

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 076730 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中华美凯印刷有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 22.75

字 数 / 426 千字

版 次 / 2016 年 4 月第 1 版 2016 年 4 月第 1 次印刷

定 价 / 85.00 元

责任编辑 / 孟雯雯

文案编辑 / 多海鹏

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

多相流是在流体力学、传热传质学、燃烧学、化学等学科的基础上发展起来的一门新兴学科,是流体力学的重要分支和学科前沿,在航空航天、国防、能源、化工、环境保护、冶金、轻工、食品加工等领域有着广阔的应用前景。在高温(3 000 K)、高压(300~700 MPa)的兵器发射领域,涉及到固体发射药火炮和固体火箭的气固多相流动、液体发射药火炮的气液多相流动、电热化学炮的气固等离子体及气液等离子体多相流动、冲压发射技术的混合气体流动等,它们的流动特征和各种本构关系不同于常温常压下的多相流动。编写本书的宗旨就是密切结合高温高压状态下的兵器发射技术,把多相流领域的基础理论和最新成果编写进来,努力推进我国兵器科学与技术的研究和发展。

近代发射理论的研究与现代兵器中高温高压伴随化学反应的瞬态流场的理论与实验技术密切相关。本书以多次得到国家自然科学基金和重点实验室基金等资助的有关高温、高压、等离子体流体动力学方面的研究成果为基础,在介绍多相流动基础理论的同时,努力结合近几十年来,在国防新技术开发和兵器安全性工程方面的研究成果,如含能材料的点火燃烧与控制、异常压力产生机理及抑制技术、异常压力下含能材料的破坏机理、高温高压连续介质和颗粒轨道模型多相流数值模拟与仿真、膛内压力波数值模拟与预测、高密实床中燃烧转爆轰机理、高温高压条件下的本构关系、高密实床动态压强测试及发射安全性评估技术,把国内外与高温高压多相流体力学有关的理论研究成果和近年来多相流体力学领域的测试技术编写进来。

为了完成一本适合兵器学科专业的、系统介绍多相流理论的教材(专著),在撰写过程中,考虑了以下几方面的目标与要求:(1)内容完整性。在大纲中包含了基本概念和基础知识部分、各种数值模型及方程组部分、

实验与测试部分以及工程应用部分。工程应用的内容除了高温高压伴随化学反应的多相流场的理论与实验外,还包含了气固流动、液体雾化与气泡动力学、通过多孔介质的流动、等离子体动力学等内容,涵盖了多相流动应用的大部分工程领域。(2)内容先进性。书中介绍的各种数学模型是在综合有关文献的基础上编写而成的,其中有无滑移连续介质模型、Soo-Drew 小滑移颗粒轨道模型、离散粒子(颗粒轨道模型)、双流体(多流体)模型、湍流模型等。同时把我们的最新研究成果格子 Boltzmann 方法在气固两相流中的应用,高阶近似黎曼解模型多相流中的应用,以及 CFD-DEM 耦合模型及在内弹道中的应用等。在介绍各种模型时,交待了模型产生的背景、物理假设、数学推导及计算方法,使读者了解到本学科的最新成果和发展动态。(3)系统性与知识的连贯性。由于多相流动是单相流动的延伸与发展,它必然服从流体力学的所有基本定律。在介绍本课程基本概念时,除了介绍本课程用到的一些预备知识外,特别安排了雷诺输运定理的内容,将流体力学的概念拓展与加深,采用张量工具,推导三大守恒方程,在此基础上,还介绍了相关的边界层知识及湍流基础知识。(4)强调国防领域应用的特色。考虑到高温高压多相流体力学的应用背景是国防领域,因此在撰写过程中注重高温高压流体力学在火炮、火箭、装药等领域的工程应用。介绍的许多工程实例紧密结合火炮、火箭以及许多兵器领域新型发射原理等方面的最近发展动态,反映当前的最新研究成果。

本书内容分十章。第一章为多相流动的基本概念;第二章为湍流基础;第三章为颗粒及颗粒群特性;第四章为数值计算模型;第五章为液体雾化和气泡动力学;第六章为通过多孔介质的流动;第七章为高温高压气固多相流工程应用;第八章为气固等离子体高温高压多相流工程应用;第九章为高温高压气液多相流工程应用;第十章为多相流测试技术。第一、二、三、四、五、六、十章由袁亚雄撰写,第七、八、九章由张小兵撰写。

由于我们学术水平有限,书中难免还有许多不当之处,敬请广大读者批评指正,我们将在以后的版本中予以修正。

编 著

目 录

CONTENTS

第一章 基本概念	1
1.1 引言	1
一、多相流定义	1
二、多相流实例	1
三、学科发展概况	2
1.2 多相流特点	2
1.3 流型与流型图	3
1.4 主要参数定义	6
一、物质密度和表观密度	6
二、气相体积分数或空隙度	7
三、气相质量分子、气相质量流量分数及装填比	7
四、体积比与质量比	8
五、颗粒间距	8
六、颗粒的拟流体假设	9
1.5 混合物热力参数	9
一、密度	9
二、压强及状态方程	9
三、比内能、比焓与比熵	10
四、比热容	10
1.6 张量表示法	11
一、向量	11
二、向量点积和约定求和法	11
三、坐标系统的旋转	11
四、克罗尼克尔符号	12
五、向量叉积与置换张量	12
六、张量场的微分	13
1.7 雷诺输运定理	14

一、流体运动的描述	14
二、雷诺输运定理	15
1.8 牛顿内摩擦定律	17
一、流体微团运动的分析	17
二、运动流体的应力	18
三、应力和变形的关系，本构方程	19
1.9 流体力学基本方程	20
一、连续方程	20
二、运动方程	21
三、能量方程	22
1.10 二维层流边界层	24
一、边界层概念	24
二、平面边界层微分方程	25
三、边界层动量积分关系式	26
第二章 湍流基础	27
2.1 湍流运动的现象与性质	27
一、湍流与雷诺实验	27
二、湍流运动特点	27
2.2 流态过渡（层流稳定性与湍流起源）	29
一、层流稳定性	29
二、小扰动方程组	29
三、奥尔-索默菲尔德方程	31
四、拇指曲线	32
五、影响层流稳定性的其他因素	32
2.3 统计平均法	33
一、时间平均法	33
二、空间平均法	34
三、系综（统计）平均法	34
四、各态遍历假设	34
五、时间平均法则	34
2.4 湍流的连续方程	35
2.5 湍流的运动方程——雷诺方程	36
2.6 湍流的能量方程	37

一、湍流瞬时流动的能量方程	37
二、湍流时均流动的总能量方程	38
三、湍流时均流动的部分能量方程	39
四、湍流流动的部分能量方程	40
2.7 湍流模型	40
一、基本方程组的封闭性	40
二、湍流脉动动能方程 (k 方程)	40
三、雷诺应力方程	41
四、湍流能量耗散率方程 (ε 方程)	42
五、工程计算中的双方程模型	43
第三章 颗粒及颗粒群特性	45
3.1 作用在颗粒上的力	45
一、体积力	45
二、表面力	46
3.2 压力梯度力	46
3.3 定常阻力	47
一、阻力系数	47
二、斯托克斯定律	48
三、各种因素对阻力系数的修正	50
3.4 作用于颗粒的非常定力	54
一、虚拟质量力	54
二、贝赛特力	57
3.5 贝塞特-鲍瑟内斯克-奥森方程	58
一、贝塞特 (Basset) - 鲍瑟内斯克 (Boussinesq) - 奥森 (Oseen) 方程	58
二、颗粒在均匀流场中的运动	59
3.6 速度梯度力	61
一、马格努斯 (Magnus) 力	61
二、滑移-剪切升力	62
三、综合运动方程	62
3.7 颗粒的传热特性	63
一、斯托克斯流情况	63
二、大雷诺数的修正	64
三、稀薄效应修正	64

四、辐射热流强度	65
3.8 颗粒-流体间的质量输运	65
一、颗粒表面的质量运输	65
二、 d^2 定律	66
3.9 颗粒群尺寸分布	67
一、分布的基本概念	67
二、对数正态分布	68
三、洛辛-雷默勒 (Rosin-Rammler) 分布	69
3.10 颗粒群流态化动力学	70
一、非稳态情况下阻力的一般公式	70
二、稳态条件下固定床压降公式	71
三、流化床阻力公式	71
第四章 数值计算模型	72
4.1 面积分数的统计关系式	72
4.2 单流体模型	73
一、基本假设	73
二、基本方程	74
三、颗粒质量源的物理解释	77
4.3 小滑移连续介质模型	80
4.4 分散颗粒群模型	82
4.5 颗粒轨道模型数值解法 (PSIC 方法)	85
一、流体场诸守恒方程及其离散化	85
二、颗粒运动方程式	86
三、颗粒轨道	87
四、颗粒群源项	87
五、PSIC 方法的求解过程	88
4.6 颗粒群的湍流扩散及其数值计算	88
4.7 多流体模型	92
一、基本假设	92
二、基本方程	92
4.8 多流体模型的平均场守恒方程	95
一、平均的概念	95
二、局部瞬时守恒方程及边界突跃条件	97

三、平均场守恒方程推导	98
4.9 颗粒悬浮体多流体模型数值解法	101
第五章 液体雾化和气泡动力学	103
5.1 引言	103
5.2 液体射流的不稳定性	103
一、液体射流过程	103
二、射流稳定曲线	104
三、失稳过程	104
5.3 液体的雾化	105
一、扰动振幅的影响	105
二、液体系统的外形	106
三、雾化装置中的各种力	106
5.4 孔口气泡的生成	107
一、气泡形成过程	107
二、作用于气泡上的力	108
三、气泡尺寸	108
5.5 单个液滴的运动	109
5.6 气泡运动	111
一、小气泡的运动	111
二、非常大的气泡	113
三、适用于各种范围的经验公式	113
5.7 液滴的破碎与合并	114
5.8 液体推进装置中液滴散布的理论模型	117
一、气象流场	117
二、湍流场	118
三、液滴方程	119
四、相互作用时间	119
第六章 通过多孔介质的流动	121
6.1 多孔介质	121
一、多孔介质的特点及分类	121
二、多孔介质的基本结构参数	122
三、基本特性描述	123

6.2	达西定律	124
	一、一般表达式	124
	二、渗透率	125
	三、达西定律物理解释	125
	四、达西定律的推广	126
	五、连续方程	127
6.3	均匀流体通过多孔介质的定常流动	127
	一、基本方程	127
	二、一维平行流	128
	三、平面径向流	128
	四、球形向心流	129
6.4	均匀流体通过多孔介质的非定常流动	130
	一、基本方程	130
	二、一维水平流的例子	131
6.5	混合流体通过多孔介质的流动方程组	133
第七章	高温高压气-固多相流工程应用	135
7.1	火炮膛内过程描述	135
7.2	火炮内弹道零维模型及应用	135
	一、物理模型	135
	二、内弹道零维方程组	136
	三、内弹道零维模型的求解方法	139
	四、例题计算	139
7.3	点火管内多相流场数值模拟	140
	一、金属点火管多相流数值模拟	140
	二、可燃点火管数值模拟	146
	三、可燃点火管与金属点火管比较	147
7.4	火炮膛内一维多相流数值模拟	147
	一、某大口径坦克炮一维两相流数值模拟	147
	二、串联多药室内弹道两相流数值模拟	155
	三、平衡炮发射技术两相流数值模拟及安全性分析	169
	四、高密实火药床燃烧转爆轰的数值模拟	180
7.5	多维多相流工程应用	184
	一、分装式复杂结构轴对称两维多相流数值模拟	185

二、激光多点点火二维两相流数值模拟	198
三、中心点火装药结构三维多相流内弹道数值模拟	203
7.6 颗粒轨道模型及应用	211
一、混合颗粒床中一维颗粒轨道模型及其数值模拟	211
二、中心点火结构轴对称两维	218
7.7 格子 Boltzmann 方法在气固两相流中的应用	223
一、气固两相流动复杂动边界的格子 Boltzmann 方法研究与应用	224
二、气固相间相互作用的格子 Boltzmann 方法研究与应用	233
三、火炮点火管气固两相流动过程模拟与透气性研究	238
7.8 高阶近似黎曼解模型在某制导炮弹膛内双一维两相流中的应用	242
一、物理模型	243
二、数学模型	243
三、两相流近似黎曼解数值计算方法	244
四、双一维两相流近似黎曼数值模拟结果及分析	250
7.9 内弹道气固两相反应流动 CFD-DEM 耦合模型及应用	251
一、CFD-DEM 气固两相流数学模型	251
二、气-固两相作用源项	254
三、邻居搜索及接触判断	255
四、颗粒生成	257
五、数值求解方法	259
六、基于 CFD-DEM 耦合模型的某制导炮弹点传火特性研究	262
第八章 气固等离子体高温高压多相流工程应用	269
8.1 电热推进基本原理	269
8.2 高压放电等离子体的基本性质	270
一、等离子体存在的基本条件	270
二、等离子体状态方程	271
三、等离子体守恒方程	272
8.3 含能材料等离子体瞬态点火过程的数值模拟	273
一、等离子体点火过程的数学物理模型	273
二、数值计算结果与分析	274
8.4 含能材料等离子体点火过程的强瞬态二维热传导分析	275
一、含能材料等离子体点火过程的数学物理模型	275
二、数值计算方法	277

三、数值计算结果与分析	278
四、结论	281
8.5 等离子体点传火过程一维两相流数值模拟	281
一、引言	281
二、等离子体点火过程一维多相流模型	282
三、数值求解方法	288
四、等离子体点火过程两相流模拟及结果分析	288
8.6 电热化学炮内弹道二维模型及数值计算	290
一、基本方程	291
二、辅助方程	292
三、等离子体模型	293
四、数值方法	294
五、计算结果及分析	294
第九章 高温高压气液多相流工程应用	297
9.1 液体发射推进原理	297
一、整装式液体发射药推进装置的内弹道循环	297
二、再生式液体发射药推进装置的内弹道循环	297
9.2 液体射流破碎和雾化机理	300
9.3 再生式喷射模型	301
9.4 射流破碎雾化的轴对称颗粒轨道模型	304
一、物理模型	304
二、数学模型	305
三、初始条件和边界条件	306
四、数值模拟结果与分析	306
9.5 RLPG 内弹道过程的多维多相流数学物理模型及计算	307
一、物理模型	307
二、数学模型	308
三、RLPG 内弹道过程多维多相流模型的数值计算方法	313
四、RLPG 内弹道多维多相流算例	316
第十章 多相流测试技术	321
10.1 引言	321
10.2 颗粒尺寸及尺寸分布测量	321

一、显微镜法	322
二、筛分法	322
三、沉降法	322
四、气体筛分法	323
五、光散射法	324
六、利用光散射-脉冲的振幅测量液滴和气泡尺寸	324
10.3 孔隙度测量	325
一、射线吸收法	325
二、阻抗法	325
三、容积法	326
四、孔隙度的其他测量方法	326
10.4 粉尘浓度测量	327
一、直接测量法	327
二、粉尘浓度的间接测量法	330
10.5 多相流压力及压降测量	331
一、基本测量方法及特点	331
二、引压系统	331
三、压力波动问题	333
四、身管武器膛内压力测试	333
10.6 流速的测量	336
一、流速测量问题简介	336
二、用皮托-静压管测多相混合物流速	337
三、暗场摄影技术	338
四、激光多普勒风速仪	339
五、粒子图像测速技术	339
10.7 质量流量测量	340
一、差压法	341
二、科里奥利力式流量计	343
参考文献	344

第一章 基本概念

1.1 引言

一、多相流定义

多相流动理论是流体力学的重要分支和学科前沿。所谓“相”是指具有相同成分和相同物理、化学性质的均匀物质部分。从热力学的角度来理解，相是指物质的单一状态，如气态、液态、固态等，若不考虑等离子体的电磁特性，也可将其归入气态类，这就是通常所说的气相、液相和固相。在气-固、液-固混合物中，固体颗粒大小很分散，为了研究方便，常常将其按大小分成若干组，每一组内颗粒大小相近，它们的动力学性质也相似，这就是从动力学角度来理解的相，也就是指具有共同速度、温度和尺度的颗粒群或物质群。相同的颗粒群可以用一组动力学方程来描述，不同组的颗粒群要用不同的动力学方程来描述。这里所讨论的相比热力学的相具有更广泛的意义，因此就有了“多相”的概念。多相流是指不同相态或不同组分的物质同时存在时的流动。我们研究它的流动特性，物质、动量、能量输运，化学反应及电磁效应等。

二、多相流实例

多相流现象在自然界、生产实践及生活中到处都有，几乎所有的流体都是以多相流的形式存在的。雾、雨、云、雪、流冰、流沙、尘暴、泥浆都是自然界遇到的多相流的例子。日常生活中，煮咖啡时壶中的水先煮沸后形成蒸汽泡，然后交替地有液团或蒸汽团流经中心管而上升，热水渗过咖啡渣，最后滴流到壶中；将啤酒从瓶中倒出时，泡沫气团与酒液共存，在玻璃杯面上形成人们喜爱的泡沫。厨房里煮稀饭、打鸡蛋、沏茶时都会伴随着多相流动现象发生。人体中的流体，如血液等都是多相流体。人们在进食时，唾液伴着食物进入胃腔，这也是最常见的多相流现象。

在工业生产中，多相流动的现象就更加普遍了，在能源工程中，固体与液体燃料在锅炉内的流动和燃烧过程，煤粉和水煤浆的制备与管道运送，蒸汽发生器内气液流动及传热，燃气轮机燃烧室内的流动及燃烧，蒸汽轮机内湿蒸汽的流动及凝结等；在化工生产中，各种反应、萃取、分离装置中都会遇到多相流动过程，如固定床、气体床及流体床反应器、填料塔等；在冶金工业中，各项转炉及高炉中氧气、空气、煤粉

的喷送；在采矿工业中，煤炭的洗选、矿石的预加工、矿石的粉碎、矿粉的输送；在石油工业中，原油伴着水、气、泥沙的流动，都是典型的多相流动过程。在建材工业中，水泥窑、玻璃窑、陶瓷隧道窑中都离不开多相流动的处理工艺。在环境工程中，各种除尘装置的结构都与多相流的特性密切相关。另外，还有烟气脱硫、脱硝装置内的多相反应、烟囱污染物的排放与扩散等。

兵器工业中，在火炮膛及火箭发动机燃烧室内，装药的点火、推进器的燃烧、异常压力的控制，异常压力下身管及火箭元件的应力分析、压力波、应力波的测试及模拟，兵器射击安全性的评估，均与多相流动现象的研究密切相关。

三、学科发展概况

人们在长期的生产实践中，积累了丰富的利用多相流动的经验。公元前阿基米德的蒸汽炮是早期多相流运用的实例。1877年，鲍瑟内斯克系统地研究了明渠水流中泥沙的沉降和输运。1910年，曼劳克研究了声波在泡沫、液体中传播时强度的衰减。20世纪40年代，人们开始用比较统一的观点，系统地研究和分析多相流动现象，二相流的名词开始出现在文献中。20世纪50年代，有关流型研究、流动沸腾烧蚀、二相及多相边界层、流动阻力及压降、激波在多相混合介质中传播、流化床技术、喷管流动方面的论文大大增加。20世纪60年代以后，越来越多的学者探索描述多相流运动的基本方程，有关多相流的专著也开始陆续出版。鲁丁格在1976年以“气体-颗粒流基础”为题在比利时冯卡门流体动力学实验室做了专题系列讲座，并在1980年整理成书出版。国际多相流杂志也于1974年创刊，多相流手册在1982年出版。至此，多相流动理论作为一门独立的学科，可以说已经逐渐形成。

1.2 多相流特点

比起单相流动，多相流动具有更广泛的普遍性和实用性，但是它的物理特性和数学描述却要复杂得多。概括起来，它大体上有以下几个方面的特点。

1. 流动形态复杂多变

在单相流中，流动形态有层流和湍流之分。除此之外，在多相流中，还要根据相间的相对位置、相对含量、相对速度、相对温度而分为种种流动形态（流型），而且流型又随物性（如密度、黏度、表面张力、传热系数等）、流动条件及边界条件、热负荷及压力等的不同而发生变化。流型改变，流动特性如压力损失特性、传热传质特性也会跟着变化。一个实际流场（如加热管道）中，可能同时存在几种流型，这就给多相流动的分析带来了很大的困难。在实际应用中，通常只能通过实验，建立各种流型的经验和半经验关系式，局限性较大，计算精度也不高。

2. 相间相互作用强

在多相流中, 不仅相与相之间存在着相互作用, 同一相之间如颗粒与颗粒间也存在着相互作用。这些相互作用除了极稀薄的流动外, 一般是比较强的, 如何来描述这些作用是多相流动研究中的一个重要课题。

3. 物性参数多且变化大

多相流中至少有两种成分或两种状态, 它的物性将随体积比、密度比和温度的变化而变化。多相流中将出现更多的物性参数, 例如密度, 故需要定义各相的真密度(物质密度)、分密度(表观密度)和混合密度, 除了定义各相的体积外, 还要定义体积分数。多相流的一些物性参数如临界参量会随着体积比的变化发生剧烈变化。

4. 阻力系数改变, 能耗改变

单相流中, 若不计黏性损失就没有能量消耗。但在多相流中, 即使不考虑壁面边界层黏性损耗, 也还存在相间摩擦损失和蒸发或凝结引起的速度能损失, 所以多相流能耗一般比单相流大, 但若在流体中加入少量高分子减阻物质, 也可以降低阻力系数。此时, 它的能耗将比单相流低。

5. 有松弛现象

在自然界中, 存在着许多随着时间延长而衰减的偏离平衡状态的过程, 例如, 振荡着的弹簧的阻尼过程。通常把这类现象称为松弛现象, 并且用松弛时间表示它的特征。在多相流动中, 由于相与相之间速度及温度的不同, 它们之间有力的作用及热能的交换, 相间相互作用的结果使它们的速度及温度相互接近而趋于平衡。这一类松弛过程出现在激波面后或固壁表面, 即所谓的激波松弛或滑动松弛。

6. 有电磁效应

离解或导电的多相流, 在电磁场中因离子与电磁波和物体相互作用, 会引起各种电磁效应, 改变流场中的流动状况。

7. 数学描述难度大

多相流中, 相间摩擦、传热、传质、化学反应等都发生在微元体内部, 相互作用强, 因此, 描述这类现象的守恒方程(质量、动量、能量和组分方程)、辅助公式和定解条件, 不仅数量多、形式复杂, 而且方程组的非线性程度和耦合程度都大为增加, 这就给数值解法提出了新的问题和要求。数值计算方法促进了多相流的研究与发展, 而多相流的复杂性既促进了数学模型的发展, 也促进了新计算方法的研究。

1.3 流型与流型图

流体力学中, 为了研究单相流的特性, 把流型分为层流和湍流。在多相流中, 为了研究其流动和传热特性, 也要根据各相参量的相对值分为各种流型。图 1.1 展示了固