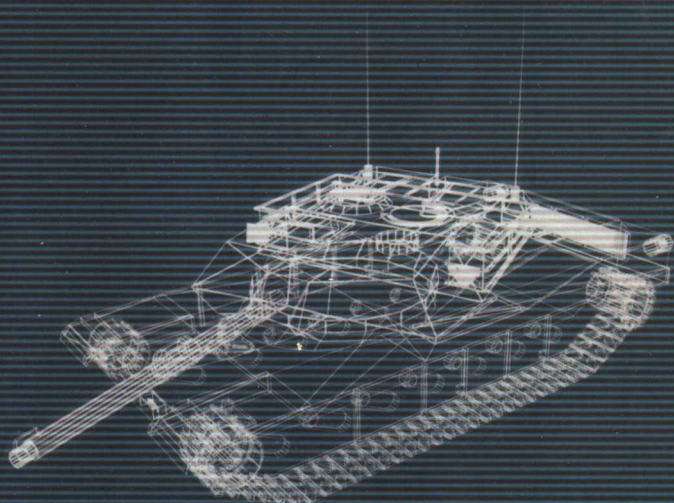


兵器科学与技术



# 高温高压多相 流体动力学基础

袁亚雄 张小兵 编著



哈尔滨工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社  
西北工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

国防科工委「十五」规划专著



国防科工委“十五”规划专著·兵器科学与技术

# 高温高压多相流体动力学基础

袁亚雄 张小兵 编著

哈尔滨工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社

西北工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

## 内容简介

本书介绍了与兵器发射领域密切相关的高温高压多相流体动力学的基础知识与工程应用。主要内容包括多相流动的基本概念、湍流基础、颗粒及颗粒群特性、数值计算模型、液体雾化和气泡动力学、通过多孔介质的流动、高温高压气固多相流工程应用、气固等离子体高温高压多相流工程应用、高温高压气液多相流工程应用及多相流场测试技术。本书可作为高等学校相关专业本科生及研究生用教材,也可供从事本专业的科研、教学及管理人员阅读参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

高温高压多相流体动力学基础/袁亚雄编著. —哈尔滨

滨:哈尔滨工业大学出版社,2005.8

ISBN 7-5603-2154-2

I. 高… II. 袁… III. 多相流体力学 IV. 0359

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 097805 号

## 高温高压多相流体动力学基础

袁亚雄 张小兵 编著

责任编辑 李艳文

哈尔滨工业大学出版社出版发行

哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号(150006)

发行部电话:0451-86416203

E-mail:press@0451.com

肇东粮食印刷厂印刷

开本:850×1168 1/32 印张:13 字数:338 千字

2005 年 9 月第 1 版 2005 年 9 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 7-5603-2154-2/TJ·2 定价:20.00 元



## 总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。党的十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转



移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济做出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研、高技术研究难题和生产当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版200种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的100多位专家、学者,对经各



单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,当人类社会跨入 21 世纪的时候,我国进入全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创



新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



# 前 言

多相流动理论是近 40 年来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 左右)、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《高温高压多相流体动力学基础》一书的宗旨就是密切结合高温高压状态下的兵器发射技术,把多相流领域内的基础理论和最新研究成果编写进来,努力推进我国兵器科学与技术的研究与发展。

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 20 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





火燃烧控制、异常压力产生机理及抑制技术、异常压力下含能材料破坏机理、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动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专业的、系统介绍多相流理论的教材(专著),在编写过程中,考虑了以下方面的目标与要求:(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。工程应用的内容中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成的,其中有无滑移连续介质模型、Soo-Drew 小滑移颗粒连续介质模型、离散粒子(颗粒轨道)模型、双流体(多流体)模型、湍流模型等。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,使学生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宽与加深,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)考虑不同层次、不同专业学生的要求。考虑研究生教学的需要,在颗粒及颗粒群特性中,加入了颗粒群尺寸分布的概率知识;在虚拟质量力公式推导中应用勒让德函数;在贝塞特力公式中,应用余误差函数。在内容安排上,由浅入深,考虑了不同层次、不同专业学生的知识结构要求。(5)强调兵器领域应用的特色。考虑到高温高压多相流体动力学的应用背景是兵器领域,因此在编写过程中注重高温高压多相流体动力学在火炮、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新发展动态,反映当前最新研究成果。

本书内容分为十章。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;第十章为多相流场测试技术。第一、二、三、四、五、六、十章内容由袁亚雄撰写,第七、八、九章内容由张小兵撰写。



由于我们学术水平有限,在本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。

袁亚雄 张小兵

2004年9月

# 目 录

|                            |    |
|----------------------------|----|
| <b>第一章 基本概念</b> .....      | 1  |
| 1.1 引言 .....               | 1  |
| 1.2 多相流特点 .....            | 3  |
| 1.3 流型与流型图 .....           | 5  |
| 1.4 主要参数定义 .....           | 9  |
| 1.5 混合物热力参数 .....          | 13 |
| 1.6 张量表示法 .....            | 15 |
| 1.7 雷诺输运定理 .....           | 19 |
| 1.8 牛顿内摩擦定律 .....          | 23 |
| 1.9 流体力学基本方程 .....         | 27 |
| 1.10 二维层流边界层 .....         | 32 |
| <b>第二章 湍流基础</b> .....      | 35 |
| 2.1 湍流运动的现象与性质 .....       | 35 |
| 2.2 流态过渡(层流稳定性与湍流起源) ..... | 38 |
| 2.3 统计平均法 .....            | 43 |
| 2.4 湍流的连续方程 .....          | 46 |
| 2.5 湍流的运动方程——雷诺方程 .....    | 47 |
| 2.6 湍流的能量方程 .....          | 48 |
| 2.7 湍流模型 .....             | 52 |
| <b>第三章 颗粒及颗粒群特性</b> .....  | 59 |
| 3.1 作用在颗粒上的力 .....         | 59 |
| 3.2 压力梯度力 .....            | 61 |
| 3.3 定常阻力 .....             | 62 |
| 3.4 作用于颗粒的非定常力 .....       | 71 |
| 3.5 贝塞特-鲍瑟内斯克-奥森方程 .....   | 76 |
| 3.6 速度梯度力 .....            | 78 |



|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 3.7 颗粒的传热特性 .....              | 81         |
| 3.8 颗粒 - 流体间的质量输运 .....        | 84         |
| 3.9 颗粒群尺寸分布 .....              | 86         |
| 3.10 颗粒群流态化动力学 .....           | 90         |
| <b>第四章 数值计算模型 .....</b>        | <b>93</b>  |
| 4.1 面积分数的统计关系式 .....           | 93         |
| 4.2 单流体模型 .....                | 95         |
| 4.3 小滑移连续介质模型 .....            | 104        |
| 4.4 分散颗粒群模型 .....              | 107        |
| 4.5 颗粒轨道模型数值解法(PSIC 方法) .....  | 111        |
| 4.6 颗粒群的湍流扩散及其数值计算 .....       | 115        |
| 4.7 多流体模型 .....                | 120        |
| 4.8 多流体模型的平均场守恒方程 .....        | 125        |
| 4.9 颗粒悬浮体多流体模型数值解法 .....       | 132        |
| <b>第五章 液体雾化和气泡动力学 .....</b>    | <b>134</b> |
| 5.1 引言 .....                   | 134        |
| 5.2 液体射流的不稳定性 .....            | 134        |
| 5.3 液体的雾化 .....                | 137        |
| 5.4 孔口气泡的生成 .....              | 139        |
| 5.5 单个液滴的运动 .....              | 142        |
| 5.6 气泡运动 .....                 | 144        |
| 5.7 液滴的破碎与合并 .....             | 148        |
| 5.8 液体推进装置中液滴散布的理论模型 .....     | 152        |
| <b>第六章 通过多孔介质的流动 .....</b>     | <b>157</b> |
| 6.1 多孔介质 .....                 | 157        |
| 6.2 达西定律 .....                 | 161        |
| 6.3 均匀流体通过多孔介质的定常流动 .....      | 166        |
| 6.4 均匀流体通过多孔介质的非定常流动 .....     | 169        |
| 6.5 混合流体通过多孔介质的流动方程组 .....     | 173        |
| <b>第七章 高温高压气固多相流工程应用 .....</b> | <b>175</b> |
| 7.1 火炮膛内过程描述 .....             | 175        |



|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| 7.2 火炮内弹道零维模型及应用 .....              | 175        |
| 7.3 点火管内多相流场数值模拟 .....              | 182        |
| 7.4 火炮膛内一维多相流数值模拟 .....             | 191        |
| 7.5 多维多相流工程应用 .....                 | 239        |
| 7.6 颗粒轨道模型及应用 .....                 | 275        |
| <b>第八章 气固等离子体高温高压多相流工程应用 .....</b>  | <b>292</b> |
| 8.1 电热推进基本原理 .....                  | 292        |
| 8.2 高压放电等离子体的基本性质 .....             | 294        |
| 8.3 含能材料等离子体瞬态点火过程的数值模拟 .....       | 297        |
| 8.4 含能材料等离子体点火过程的强瞬态两维热传导分析 .....   | 301        |
| 8.5 等离子体点传火过程一维两相流数值模拟 .....        | 310        |
| 8.6 电热化学炮内弹道二维模型及数值计算 .....         | 322        |
| <b>第九章 高温高压气液多相流工程应用 .....</b>      | <b>331</b> |
| 9.1 液体发射推进原理 .....                  | 331        |
| 9.2 液体射流破碎和雾化机理 .....               | 336        |
| 9.3 再生式喷射模型 .....                   | 337        |
| 9.4 射流破碎雾化的轴对称颗粒轨道模型 .....          | 340        |
| 9.5 RLPG 内弹道过程的多维多相流数学物理模型及计算 ..... | 345        |
| <b>第十章 多相流场测试技术 .....</b>           | <b>365</b> |
| 10.1 引言 .....                       | 365        |
| 10.2 颗粒尺寸及尺寸分布测量 .....              | 365        |
| 10.3 空隙度测量 .....                    | 370        |
| 10.4 粉尘浓度测量 .....                   | 373        |
| 10.5 多相流压力及压降测量 .....               | 378        |
| 10.6 流速的测量 .....                    | 386        |
| 10.7 质量流量测量 .....                   | 391        |
| <b>参考文献 .....</b>                   | <b>395</b> |

# 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,也可将它归入气态类内,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、温度和尺寸的颗粒群或物质群。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为广泛的意义,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,质量、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呈蒸汽团流



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、奶液都是多相流体。人们在进食时,唾液拌着食物进入胃腔,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,固体和液体燃料在锅炉内的流动和燃烧过程,煤粉及水煤浆的制备与管道输送,蒸汽发生器内汽液流动及传热,燃气轮机燃烧室內的流动及燃烧,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、气流床及流化床反应器、填料塔等。在冶金工业中,各种转炉及高炉中氧气、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,在火炮膛内及火箭发动机燃烧室内,装药的点火、推进剂的燃烧、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(Archimedes)的蒸汽炮是早期工作的实例。1877年,鲍瑟内斯克(Boussinesq)系统地研究了明渠水流中泥沙的沉降和输运。1910年,曼劳克(Mallock)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(two-phase flow)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规律的基本方程,有关多相流的专著也开始陆续出版,如叶(Yih, 1965)、苏(Soo, 1967)、威廉斯(Wallis, 1969)等。鲁丁格(Rudinger)在 1976 年以“气体 - 颗粒流基础”(Fundamentals of Gas-particle Flow)为题在比利时冯卡门(Von Karman)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(Int. J. Multiphase Flow)也于 1974 年创刊,多相流手册在 1982 年出版。至此,多相流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,它大体上有如下几方面的特点。

### 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。在多相流中,除此之外,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改变。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或半经验关系式,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相互作用,同一相之间如颗