



西安交通大学

研究生创新教育系列教材

多相流及其应用

车得福 李会雄



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



西安交通大学

0359/3

2007

研究生创新教育系列教材

多相流及其应用

车得福 李会雄

主编 车得福

副主编 李会雄

编委 车得福、李会雄、王德胜、王德胜、王德胜

编委 车得福、李会雄、王德胜、王德胜、王德胜

编委 车得福、李会雄、王德胜、王德胜、王德胜

编委 车得福、李会雄、王德胜、王德胜、王德胜

编委 车得福、李会雄、王德胜、王德胜、王德胜

编委 车得福、李会雄、王德胜、王德胜、王德胜

编委 车得福、李会雄、王德胜、王德胜、王德胜

编委 车得福、李会雄、王德胜、王德胜、王德胜

编委 车得福、李会雄、王德胜、王德胜、王德胜

编委 车得福、李会雄、王德胜、王德胜、王德胜

编委 车得福、李会雄、王德胜、王德胜、王德胜

西安交通大学出版社

西安·西大街

内 容 提 要

本书阐述了多相流的基本概念、主要参数、基本研究方法;紧密结合工程应用实际介绍了不同流动方式下多相流的流动特性、理论模型、实验研究及应用研究等方面的成果。本书可作为能源、动力、石油、化工、核能、航空航天、环保等专业的研究生教材,也可作为相关领域工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

多相流及其应用/车得福,李会雄编著. —西安:西安交通大学出版社,2007.11
(西安交通大学研究生创新教育系列教材)
ISBN 978-7-5605-2536-5

I. 多… II. ①车… ②李… III. 多相流动-研究生-教材 IV. 0359

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 155944 号

书 名	多相流及其应用
编 著	车得福 李会雄
出版发行	西安交通大学出版社
地 址	西安市兴庆南路 10 号(邮编:710049)
电 话	(029)82668357 82667874(发行部) (029)82668315 82669096(总编办)
印 刷	陕西丰源印务有限公司
字 数	743 千字
开 本	727 mm×960 mm 1/16
印 张	40
版 次	2007 年 11 月第 1 版 2007 年 11 月第 1 次印刷
印 数	000 1~3 000
书 号	ISBN 978-7-5605-2536-5/O·268
定 价	60.00 元

总 序

创新是一个民族的灵魂,也是高层次人才水平的集中体现。因此,创新能力的培养应贯穿于研究生培养的各个环节,包括课程学习、文献阅读、课题研究等。文献阅读与课题研究无疑是培养研究生创新能力的重要手段,同样,课程学习也是培养研究生创新能力的重要环节。通过课程学习,使研究生在教师指导下,获取知识的同时理解知识创新过程与创新方法,对培养研究生创新能力具有极其重要的意义。

西安交通大学研究生院围绕研究生创新意识与创新能力改革研究生课程体系的同时,开设了一批研究型课程,支持编写了一批研究型课程的教材,目的是为了推动在课程教学环节加强研究生创新意识与创新能力的培养,进一步提高研究生培养质量。

研究型课程是指以激发研究生批判性思维、创新意识为主要目标,由具有高学术水平的教授作为任课教师参与指导,以本学科领域最新研究和前沿知识为内容,以探索式的教学方式为主导,适合于师生互动,使学生有更大的思维空间的课程。研究型教材应使学生在在学习过程中可以掌握最新的科学知识,了解最新的前沿动态,激发研究生科学研究的兴趣,掌握基本的科学方法,把教师为中心的教学模式转变为以学生为中心教师为主导的教学模式,把学生被动接受知识转变为在探索研究与自主学习中掌握知识和培养能力。

出版研究型课程系列教材,是一项探索性的工作,有许多艰苦的工作。虽然已出版的教材凝聚了作者的大量心血,但毕竟是一项在实践中不断完善的工作。我们深信,通过研究型系列教材的出版与完善,必定能够促进研究生创新能力的培养。

西安交通大学研究生院

序

多相流是以流体力学、传热传质学和燃烧学等为主要基础发展起来的一门新兴交叉学科,在动力(包括常规动力和核动力)、能源、化工、石油、航空航天、管路输送以及海水淡化、环保等工程中得到广泛应用。西安交通大学早在20世纪60年代就开展了多相流研究工作。自上世纪80年代末在校内建成动力工程多相流国家重点实验室后,多相流研究工作取得了更迅速的发展。不仅培育了一批高层次人才,而且取得了不少有国际前沿水平的研究成果,为我国经济建设和社会发展贡献了力量。

为了进一步培养研究生的创新意识和创新能力,西安交通大学能源与动力工程学院在1994年就开设了一系列具有创新意义的博士生课程以期拓宽博士生的知识领域和创新能力,“多相流及其进展”即是其中一门深受研究生欢迎的课程。这门课程在十多年教学积累的基础上,由车得福、李会雄两位教授扩展成书是一件有利于创新教学的可喜之事。

该书的特点首先体现在不是按照多相流的不同组分分别论述,而是按照流动方式分章,亦即在同一章中对类同流动方式的各种多相流统一叙述。这样有便于读者进行对比、思考各种多相流的异同,触类旁通,达到融会贯通的目的;其特点之二为不仅论述了国内外研究成果而且紧密结合本校研究成果综合写成,故而具有内容的独特性和创新意义;其特点之三为该书不是从纯理论上论述多相流而是结合工程应用主业叙述各种现实多相流问题的理论研究、试验成果和解决方法。

该书前3章论述了多相流的基本概念、主要参数、基本方法和力学分析;第4章到第7章论述了多相流在各种流动工况下的特性及研究成果;第8章介绍了多相流的数值模拟;第9章介绍了一些新发展的多相流专题。全书具有较好的系统性和完整性。

该书内容丰富,每章后均列出众多参考文献。这样既可供教师按需选择相关章节讲授现有成果,再补充最新进展形成讲稿;也可供研究生及其他读者对相关内容进行参考和跟踪,进一步深入学习。

我们祖国现在正在向建设创新型国家前进。培养创新型人才更是建立创新型国家的重要支柱。相信本书的出版必定会促进和加强创新型高层次人才的培养。

在本书出版之际,我欣然为之作序。

西安交通大学教授 林宗虎
中国工程院院士

2006 年 12 月

前 言

多相流是在流体力学、传热传质学、物理化学、燃烧学等学科的基础上发展起来的一门新兴学科,它广泛应用于能源、动力、核能、石油、化工、冶金、制冷、低温、环境保护及航天技术等许多工业部门,对国民经济的发展有十分重要的作用。尽管多相流形成一门独立学科的时间不长,但由于它具有非常强的工业应用背景,发展速度很快。各工业发达国家都投入了巨大的经费展开研究。我国自 20 世纪 50 年代开始也陆续进行研究,改革开放后的二十几年中,研究工作异常活跃,取得丰硕成果。各高等院校陆续开设了有关多相流内容的课程。

西安交通大学是国内最早开展有关多相流研究工作的重点大学之一。几十年来,在中科院院士陈学俊教授、中国工程院院士林宗虎教授、国家级有突出贡献的专家陈听宽教授、徐通模教授等的带领下,许多研究工作处于国内领先地位,在国际上也有重要影响。西安交通大学能源与动力工程学院是开展多相流研究工作最为集中的学院。1994 年学院成立时,在林宗虎院士的提议下,由我们两位面向全院博士研究生开设院级学位课程“多相流及其进展”,并由林宗虎院士拟就了授课大纲的初稿,并由他于 1995~1996 学年亲自讲授。1996 年春我从美国进修回校至今,这门课程一直由我讲授,每年选课人数均有 20 余位。在教学工作中,我深深地体会到,一方面,多相流这门学科涉及的领域非常广,许多出版物中都会发现有关多相流的内容。另一方面,多相流这门学科的发展异常迅速,文献浩如烟海,新理论、新方法不断引入。涉足这一研究领域的学者跟踪阅读全部文献是不现实的,也是没有意义的。

对博士研究生来说,除要求掌握坚实而宽广的基础理论,还要求掌握系统而深入的专门知识。对从事与多相流有关的研究工作的博士研究生,不仅需要对自己的研究课题直接相关的研究进展有深入的了解和掌握,而且还需要对相邻、相近研究领域的进展有所了解 and 掌握,这对博士生的研究工作将大有裨益。我在课堂上总是强调,如果通过本门课程的学习,能够对研究生们的研究工作有一点启迪,与研究生们正在思考的问题撞击出一个智慧的火花,设立本门课程的目的就达到了。

尽管我也认为,博士生课程不必或不应有专门教材,因为教材不可能反映出研究工作的最新进展,教材的撰写总是落后于科学技术的发展。但是,在博士生课程的讲授过程中,博士生手中若能有一本与讲课内容非常相近的参考

书,在课前、课后能经常翻阅,无疑对内容的理解和掌握以及文献的追踪是非常有益处的,而不必在课堂上忙于记笔记。况且,教师没有必要将全部内容不加选择地讲授,而是应在课堂上重点介绍有启发性的内容。

基于上述考虑,在博士生课程“多相流及其进展”讲义的基础上并重点结合西安交通大学的研究兴趣及研究成果写就了本书。讲义中许多内容曾与博士生们进行过讨论。这些讨论包括本门课程应涵盖的内容范围、深度及体系等,并且许多博士生希望能将讲课内容成书出版,所有这些都使我受到莫大的激励。其中值得提及是刘银河、闫晓、蒋立军、王国梁、唐人虎、张旭东、杨靖、吴海玲等博士研究生,书中有些内容引自他们的作业内容或受到他们作业内容的启发。在此对他们表示感谢。

虽然多相流可以简单地划分为气液、气固、液固和液液两相流及气液固、液液固、气液液三相流等,但本书却没有按这样的分类方法进行编排。本书是按照流动方式进行编排的,这样做的目的是使学过任何一种两相流的读者,能对其它的多相流问题进行对比,达到融会贯通的目的,不致于将各种两相流动相互割裂开来而各自成为孤立的封闭体系。

本书第1章~第7章及第9章由车得福编写,第8章邀请李会雄教授编写。本书除可作为高等学校开设有关多相流课程的教材或教学参考书外,也可作为涉及多相流研究的科技人员的参考资料。

值得指出的是,由于本书内容庞大,公式和符号较多,尽管作者作了努力,但符号、单位和术语的统一性仍不能令人满意,敬请读者包涵。对书中所引用的参考文献,作者尽最大可能注明出处,并同时对这些文献的作者表示衷心的感谢。

廿多年前,我的老师,中国工程院院士林宗虎教授把我带人多相流这一令人兴奋并极具挑战性的研究领域,老师的科学思想和处世哲学一直伴随着我的成长。本书初稿完成后,林宗虎院士进行了审阅,提出了指导性的修改意见,并欣然为本书作了序,对此作者表示深深的谢意。

由于作者学识有限,编写这样的大型著作,不论从内容的取舍,还是到内容的编排,总有力不从心之感。在本书即将问世之时,每每想到尽管编写过程中我们竭尽了全力,书中的缺点和错误还总难避免,心里总是忐忑不安。读者是最好的裁判,我们热切地期待着来自各方的批评和指正。

西安交通大学 车得福
热能工程系教授、工学博士

2006年12月于能源馆

dfche@mail.xjtu.edu.cn

目 录

第1章 概 论	(1)
1.1 多相流的定义及分类	(1)
1.1.1 多相流的定义	(1)
1.1.2 多相流的分类	(1)
1.2 多相流的特点、研究方法	(3)
1.2.1 多相流的特点	(3)
1.2.2 多相流的研究方法和理论模型	(4)
1.3 多相流的流动结构简介	(7)
1.3.1 流动结构的一般涵义及研究流动结构的重要意义	(7)
1.3.2 典型的两相流流动结构	(10)
1.4 多相流流动结构的判别	(12)
1.4.1 流动结构的判别方法	(12)
1.4.2 流型图	(13)
1.5 多相流研究的历史与现状	(15)
1.5.1 多相流研究简史	(15)
1.5.2 多相流研究的现状	(17)
1.6 多相流的应用背景	(17)
1.6.1 在石油工业中的应用	(17)
1.6.2 在煤炭、冶金工业中的应用	(20)
1.6.3 在动力、核能工业中的应用	(21)
1.6.4 在化学工业中的应用	(37)
1.6.5 在水利、水力及管道输送工程中的应用	(38)
1.6.6 在大气工程中的应用	(47)
1.6.7 在制冷、低温及航天工业中的应用	(50)
参考文献	(53)

第2章 多相流的基本方程及主要描述参数	(56)
2.1 多相流的基本方程	(56)
2.1.1 积分形式的守恒方程	(56)
2.1.2 简化模型	(59)
2.2 多相流的主要参数及其计算式	(64)
2.2.1 颗粒的性质	(64)
2.2.2 颗粒的描述	(68)
2.2.3 流动参数	(74)
参考文献	(78)
第3章 颗粒、气泡动力学	(80)
3.1 颗粒的受力分析	(80)
3.2 颗粒的阻力特性	(83)
3.2.1 单颗粒的阻力	(83)
3.2.2 颗粒群的阻力(刘大有,1993)	(85)
3.3 松弛过程	(86)
3.3.1 松弛现象	(86)
3.3.2 单颗粒的松弛	(88)
3.3.3 颗粒群的松弛	(90)
3.4 沉降与悬浮、浮泡流动	(91)
3.4.1 沉降现象	(91)
3.4.2 悬浮现象	(95)
3.4.3 浮泡流动	(106)
参考文献	(124)
第4章 管内多相流	(131)
4.1 管内气液两相流	(131)
4.1.1 流型	(131)
4.1.2 压力降	(141)
4.1.3 空泡份额	(161)
4.1.4 流动不稳定性	(177)
4.1.5 临界流	(199)
4.2 管内气固两相流	(214)
4.2.1 悬浮式气固两相流	(215)
4.2.2 栓塞式气固两相流	(224)

4.2.3 弯管内的气固两相流	(226)
4.3 管内液固两相流	(228)
4.3.1 固体颗粒的输送方式和流态	(228)
4.3.2 浓度和速度分布	(233)
4.3.3 摩阻损失	(234)
4.4 管内液液两相流	(236)
4.4.1 相转变点	(236)
4.4.2 油水乳状液表观粘度	(238)
4.4.3 流型	(239)
4.4.4 持水率	(240)
4.4.5 摩擦阻力	(242)
4.5 管内气液固三相流	(245)
4.5.1 基本原理	(245)
4.5.2 容积含量	(247)
4.5.3 压力损失	(250)
4.5.4 汽液固三相流沸腾传热	(254)
4.6 管内气液液三相流	(255)
4.6.1 流型	(255)
4.6.2 摩擦阻力	(260)
4.6.3 局部阻力	(261)
参考文献	(263)
第5章 管外多相流	(288)
5.1 单相流绕流流动、涡街与振动	(288)
5.1.1 旋涡脱落现象	(288)
5.1.2 旋涡形成和脱落机理	(288)
5.1.3 圆柱绕流	(290)
5.1.4 其它柱体绕流	(298)
5.1.5 管束的绕流	(302)
5.2 横掠单柱体时的多相流	(308)
5.2.1 气液两相流绕流单柱体的旋涡形成和脱落	(308)
5.2.2 气液两相流绕流引起的作用力	(316)
5.3 横掠管束时的气液两相流	(319)
5.3.1 气液两相流横掠管束时的旋涡脱落	(319)
5.3.2 气液两相流横掠管束时的流型	(326)

5.4 气固两相流绕流时的积灰与磨损	(333)
5.4.1 积灰	(333)
5.4.2 磨损	(336)
参考文献	(339)
第6章 多相流的分离和分配	(344)
6.1 分离机理与分离效率	(344)
6.1.1 分离机理	(344)
6.1.2 分离效率	(345)
6.2 重力分离	(349)
6.2.1 气液两相的重力分离	(349)
6.2.2 气固两相的重力分离	(352)
6.2.3 液固两相的重力分离	(357)
6.3 惯性分离	(361)
6.3.1 气液两相的惯性分离	(362)
6.3.2 气固两相的惯性分离(岑可法等,1998)	(369)
6.4 离心分离	(378)
6.4.1 单相流的旋转流场	(379)
6.4.2 颗粒在旋转流场中的运动	(383)
6.4.3 气固旋风分离	(388)
6.4.4 汽液旋风分离	(392)
6.4.5 液固旋流分离	(399)
6.4.6 液液旋流分离	(402)
6.5 过滤分离	(407)
6.5.1 一般过滤机理	(407)
6.5.2 袋式除尘	(410)
6.5.3 颗粒层除尘	(421)
6.6 分叉管中的多相流	(428)
6.6.1 T型管中的两相流	(428)
6.6.2 Y型管中的两相流	(439)
6.7 集箱中的多相流	(443)
参考文献	(455)
第7章 旋转机械中的多相流	(463)
7.1 多相流泵	(463)

7.1.1	气液两相流泵	(463)
7.1.2	固液两相流泵	(472)
7.1.3	气液固多相流泵	(481)
7.2	叶轮机中的气固两相流	(482)
7.2.1	流动模型、处理方法及数值计算	(483)
7.2.2	磨损类型、磨损机理及防磨措施	(485)
7.3	蒸汽轮机中的汽液两相流	(489)
7.3.1	湿蒸汽两相流的基本问题	(489)
7.3.2	湿蒸汽两相流的研究进展	(491)
7.4	水轮机中的固液两相流	(492)
	参考文献	(496)
第8章	多相流的数值模拟	(505)
8.1	多相流数值模拟的特点	(505)
8.1.1	数值模拟方法的特点与优势	(505)
8.1.2	多相流数值模拟的主要困难和关键问题	(506)
8.2	多相流数值模拟中的常用特殊参数	(510)
8.2.1	相分布参数	(510)
8.2.2	加权参数	(512)
8.3	多相流数值模拟方法分类	(513)
8.4	连续介质力学模型	(515)
8.4.1	欧拉-拉格朗日类模型	(516)
8.4.2	欧拉-欧拉类模型	(520)
8.5	气-液两相流相界面迁移过程的数值模拟方法	(529)
8.5.1	高度函数法	(529)
8.5.2	相界面追踪的 PIC 方法	(530)
8.5.3	MAC 方法,	(531)
8.5.4	线段法和边界积分法	(533)
8.5.5	Level Set 方法	(534)
8.5.6	VOF 方法	(534)
8.6	Level Set 方法及其在气-液两相流数值模拟中的应用	(536)
8.6.1	Level Set 方法概述及基本方程	(536)
8.6.2	Level Set 方法中不同介质区域的识别和物性参数的表示方法	(538)
8.6.3	相界面几何特性参数的表示方法	(538)

8.6.4	气-液两相流的流场控制方程	(539)
8.6.5	应用 Level Set 方法时应注意的几个问题	(540)
8.6.6	Level Set 方法的应用	(541)
8.7	VOF 模型及其在气液两相流数值模拟中的应用	(546)
8.7.1	VOF 方法的基本思想与相函数	(546)
8.7.2	VOF 方法中气-液两相流的动量控制方程	(546)
8.7.3	VOF 方法中气-液相界面的控制方程及其求解方法	(548)
8.7.4	VOF 方法中气-液两相流场中的物性表示方法	(549)
8.7.5	气-液相界面的构造方法	(549)
8.7.6	几种界面重构方法的比较	(561)
8.7.7	VOF 方法的优缺点	(562)
8.8	其它多相流数值模拟方法	(563)
8.8.1	多相流的大涡模拟	(563)
8.8.2	多相流的直接数值模拟	(564)
8.8.3	多相流的 Lattice-Boltzmann 方法模拟	(564)
8.9	多相流数值模拟中的困难及其发展方向	(567)
	参考文献	(569)
第9章	几个专题	(578)
9.1	微重力条件下的气液两相流与传热	(578)
9.1.1	微重力实现方式	(579)
9.1.2	微重力下的两相流动研究方法	(580)
9.1.3	流型	(584)
9.1.4	空泡份额	(589)
9.1.5	压力降	(590)
9.2	毛细管内的汽液两相流	(596)
9.2.1	毛细管内汽液流动过程	(596)
9.2.2	毛细管内汽液两相流的研究方法	(597)
9.2.3	毛细管内汽液两相流的研究进展	(598)
9.3	多相流的减阻	(604)
9.3.1	单相流的减阻	(604)
9.3.2	两相流的减阻	(606)
9.3.3	三相流的减阻	(608)
	参考文献	(614)

第 1 章 概论

1.1 多相流的定义及分类

1.1.1 多相流的定义

物理学中,所谓的“相”是指自然界中物质的态,例如气态、液态、固态等。一种物态即称为一相;热力学中,物体中每一个均匀部分称为一相。各部分均匀的固体、液体和气体可分别称为固相物体、液相物体和气相物体或统称为单相物体;但在流体动力学中,动力学性质相近的一群物体就可以称为一相。一种物态可能是单相的,也可能是多相的。例如,不同种类、不同尺寸、不同形状的固体颗粒在流体中运动时,可以视具体情况把固体分为许多相。因此,流体动力学中讨论的“相”会比物理学或热力学中的“相”具有更广泛的意义。

各部分均匀的气体或液体的流动可称为单相流体的流动或简称为单相流。

当物体各部分之间存在差别时,这一物体称为多相物体。例如,气体和液体的混合物、气体和固体的混合物以及液体和固体的混合物等。多相物体的流动就称为多相流动,简称多相流。值得指出的是,此处“多”意指两相及两相以上的流动,而不是习惯中“多”就代表三及大于三的意思。在英文中,多相流称为 Multiphase Flow。在日文中常称之为“混相流(こんそうりゅう)”。

固体不能与气体或液体混合均匀而成为单相流。因此,固体颗粒和气体或液体的混合流动一般为多相流。不同液体的混合流动可能是单相流,也可能是多相流。如水与酒精的混合物是单相流体,而水与水银的混合物则为两相流体。不同气体混合时总是成为一种新的单相流体。

1.1.2 多相流的分类

最常用的多相流的分类方法是根据参与流动的相的数目来分类,如两相流、三相流和四相流等,其中尤以两相流最为常见。两相流主要有三种:气体和液体一起流动的称为气液两相流;气体和固体颗粒一起流动的称为气固两相流;液体和固体颗粒一起流动的称为液固两相流;两种不能均匀混合的液体一起流动的称为液液

两相流。三相流主要有三种:气体、液体和固体颗粒一起流动的称为气液固三相流;两种不能均匀混合的液体和固体颗粒一起流动的称为液液固三相流;两种不能均匀混合的液体与气体一起流动的气液液三相流。也可以存在气体和多种不能均匀混合液体以及固体颗粒一起流动的工况,如气油水砂的共同流动,可以命名这种流动为四相流(林宗虎,1988)。需要指出的是,本书中气液两相流一词中的“气”泛指气体,而汽液两相流一词中的“汽”仅代表同种液体产生的蒸气。

通常情况下,多相流动体系总是由两种连续介质或一种连续介质和若干种不连续介质组成。连续介质称为连续相,不连续介质(如固体颗粒、水泡、液滴等)称为分散相(或非连续相)。根据流动介质的连续与否,可以把多相流动分为两类:连续相中含有分散相的均匀或不均匀的混合物的流动,普通多相流动多指这类流动;相交界面相互作用起着重要作用的流动,此时两相介质是均匀的,但必须考虑相界面的力学关系。

对于气液两相流来说,还可以根据气液两相的组分而分为单组分气液两相流和双组分气液两相流。例如,水蒸气和水的组分是相同的,所以汽水混合物的流动属于单组分气液两相流;空气和水的组分是不同的,所以空气和水混合物的流动属于双组分气液两相流。单组分气液两相流在流动时根据压力变化的不同会发生相变,即部分液体能汽化为蒸汽或部分蒸汽凝结为液体;双组分气液两相流则一般在流动时不会发生相变。

就两相流而言,两相可以是在同一个方向上流动的“同向流动”,也可能是两相在相反方向上的流动,即“反向流动”。还有一种情况就是介乎两种流动之间的流动,如气液两相流中液相的平均速度为零,或者液相的平均速度与气相速度相垂直的流动。当气相以分散的气泡穿过液层时,这种流动称为浮泡过程。另外一种液相速度为零而气相向上的流动是在环状流动状况产生的所谓“液泛”的流动工况。

多相物体的流动现象广泛存在于自然界、日常生活及工程实际中。可以认为,绝大多数的流动都是多相流,纯粹的单相流(如极纯净的气体或水等)是极为少见的。自然界中诸如大气中云雾、含尘空气、雨雪、冰雹、含泥沙水流、雪崩、滑坡、生物体内血液的运动,日常生活中开瓶后啤酒中气泡的运动、水烧开时水壶中气泡的运动,工业中粉料或粒料的气力或液力管道输送、粉尘的分离与收集、喷雾干燥与喷雾冷却、选矿、气流纺纱、液雾或煤粉或金属粉的燃烧、流化床、固体火箭排气、炮膛中火药粒流动、材料喷涂、等离子体化工、各种粉末制备、蒸汽轮机内湿蒸汽流动、烟气透平内含尘流、锅炉及反应堆内汽水流动、炼钢或炼铁炉内气泡-液体流动等等都是多相流的例子(周力行,1991)。

1.2 多相流的特点、研究方法

1.2.1 多相流的特点

多相流与单相流相比具有许多特点,表现在:

(1) 多相流中含有多种不相溶混的相,它们各自具有一组流动变量。即使两相流,也可划分为气液、气固、液液、液固四种。因此,描述多相流的参数要比描述单相流的参数多。

(2) 多相流中各相的体积百分数以及分散相的颗粒大小可以在很宽的范围内变化,这些都会引起流动性质及流动结构的很大变化。例如,用管道输送的固体物料可分为稀相和密相输送,而这两种输送方式的分析方法有很大不同。多相流的流动结构通常也称为流型。

(3) 多相流中,各相间相对速度不同也会引起流动状况的很大改变,例如,气固流化床中气流速度对流动结构乃至生产的影响都是很大的。

(4) 各相的物理性质(密度、粘度等)及两相间界面的表面现象都是影响多相流动的重要因素。例如,石油及选矿使用表面活性剂可以提高生产效率。

(5) 各相的性质、含量及流动参数决定了流动型态,不同的流型可用不同的方法来处理。

(6) 两相之间常存在水力学不平衡和热力学不平衡。不平衡性表现在相之间的速度差异和温度差异,这种差异正是导致相间发生相互作用的原因。随着时间的推移,这种差异有逐渐减弱的趋势。这种现象称为松弛。

(7) 相间常存在传热和传质及化学反应。例如流体与管壁的温度不同(换热器中),或温度不同的冷气与热气,冷水与热水发生混合,都会发生热传递。有时流体或气体中还有化学反应发生,反应有放热或吸热效应,如在化工反应器中的化学反应,排放含有污染物的水以及燃烧器,燃烧室及炉内的流动等。如发生化学反应常涉及到化学反应动力学、非平衡态热力学及非线性等。

(8) 对于气液两相流,除由于相界面存在,通过界面可能发生热量、质量和动量的传递,界面的形状还会随时发生变化。不同程度的相的聚并可能发生,如,小气泡并成大气泡,或小液滴并成大液滴。

(9) 多相流多为湍流,层流很少见。在湍流两相流中,除各相内部的动量、热量与质量传递外,还有相与相之间(如流体与颗粒或流体与气泡之间)的质量、动量及能量相互作用,而且除流体内部反应外,颗粒与流体,气泡与流体间还可能异相反应。湍流两相流中有时还会有静电效应(极细粉尘在金属、塑料或有机玻璃管道中运动)