

气固两相流动 与数值模拟

袁竹林 朱立平
耿 凡 彭正标◎编著

Gas Solid Two Phase Flow and Numerical Simulation



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

气固两相流动与 数值模拟

袁竹林 朱立平
耿凡 彭正标 编著

东南大学出版社
·南京·

内 容 提 要

本书对气固两相流动的基本知识、研究方法、描述气固两相流动的数学模型、数学模型的求解以及气固两相流动数值模拟的研究案例等方面做了介绍。学习本书内容需要具备工程流体力学的基础知识。

本书可作为能源与环境学科研究生气固两相流动与数值模拟课程的教材,也可作为相关科研人员或工程技术人员的参考书籍。

图书在版编目(CIP)数据

气固两相流动与数值模拟 / 袁竹林等编著. —南京:
东南大学出版社, 2013. 2

ISBN 978-7-5641-4098-4

I. ①气… II. ①袁… III. ①两相流动-数值模拟-
研究 IV. ①0359

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 027581 号

气固两相流动与数值模拟

出版发行 东南大学出版社
出 版 人 江建中
社 址 南京市四牌楼 2 号
邮 编 210096
经 销 全国各地新华书店
印 刷 南京京新印刷厂
开 本 787 mm×1092 mm 1/16
印 张 12.25
字 数 298 千字
版 次 2013 年 2 月第 1 版
印 次 2013 年 2 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5641-4098-4
印 数 1—1500 册
定 价 24.00 元

(凡因印装质量问题,请与我社读者服务部联系。电话:025-83791830)

前 言

气固两相流动广泛存在于自然界和工农业生产中。尤其是在能源与环境学科领域,气固两相流动更是广泛存在,譬如煤粉的气力输送、在炉膛内的流动与燃烧过程,流化床内颗粒物料的沸腾与流化,烟气中粉尘的脱除等等。随着科学技术的快速发展,人们对气固两相流动的认识与研究也在不断加深。作为流体力学的一个分支,气固两相流动成为目前快速发展的学科之一。探索气固两相流动的内在规律,除了通过理论与实验的途径研究以外,计算机数值模拟现已成为一种重要的研究方法,特别是随着计算机计算能力的快速提高,带动了数值模拟技术的快速发展,使得研究人员在建模过程中可以考虑得更加细致,模拟计算的规模不断扩大,所得到的数值模拟结果也更为接近实际。至今,已有大量直接应用计算机数值模拟技术指导相关涉及气固两相流动的大型工程的成功案例。

目前,有关气固两相流动与数值模拟方面的书籍还较少,而选修气固两相流动与数值模拟课程的研究生逐年增加。为便于大家学习和掌握相关知识,本书对气固两相流的基本知识和研究方法、描述气固两相流动的数学模型、数学模型的求解方法、气固两相流动数值模拟的研究案例等方面做了介绍。学习本书内容需要具备工程流体力学的基础知识。

本书有8个章节,可分为有关气固两相流动的基础知识和气固两相流动的数值模拟两个部分。第1章至第4章主要介绍多相流的定义、描述流体运动的基本方法、两相流的分类、研究气固两相系统的主要参数以及颗粒在气流中的受力与运动等基础知识相关内容,第5章至第8章主要介绍描述气固两相流动的基本方程和目前模拟气固两相流动的常用数学模型,以及不同模型的各自特点和适用场合、数学模型的求解与数据的后处理方法,还有一些相关应用案例。

目前,随着计算硬件条件的不断改善,新的数学模型和模拟方法也在快速发展中,希望本书能作为读者进入该领域的入门和起点,读者能在此基础上掌握更多内容。

编著者

2012年12月于南京

目 录

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 多相流动	(1)
1.2 连续介质与离散颗粒	(2)
1.3 描述流动的两种基本方法	(2)
1.4 两相流研究的发展与现状	(4)
第 2 章 两相流的分类及多相系统的研究方法	(6)
2.1 两相流的流型及分类	(6)
2.2 研究多相系统的基本方法	(10)
第 3 章 研究气固悬浮系统的主要参数	(12)
3.1 系统的特征参数	(12)
3.1.1 单颗粒的基本性质	(12)
3.1.2 颗粒相的粒度分布、容积份额与空隙度	(16)
3.1.3 颗粒相、流体相及其混合物的表观密度	(21)
3.1.4 质量比与质量流率比	(21)
3.1.5 颗粒间的平均间隔	(22)
3.2 沉降速度与松弛时间	(22)
3.2.1 颗粒在流体中的沉降速度	(22)
3.2.2 颗粒与流体间作动量交换的松弛时间	(23)
3.3 多相悬浮体的扩散系数与粘度	(25)
3.3.1 颗粒群在气流中的扩散系数	(25)
3.3.2 多相悬浮体的粘度	(29)
3.3.3 颗粒与流体以及颗粒与颗粒的作用距离和稀相悬浮体的定义域	(30)
第 4 章 颗粒在气流中的受力与运动	(33)
4.1 颗粒在流体中运动的阻力或曳力	(33)
4.1.1 单个颗粒在流体中运动的阻力	(33)
4.1.2 颗粒群的运动阻力、沉降速度和松弛时间	(36)
4.2 气固悬浮体中颗粒受到的其他作用力及单颗粒的运动方程	(38)
4.2.1 马格努斯旋转提升力	(38)
4.2.2 萨夫曼剪切提升力	(39)
4.2.3 压力梯度力	(40)
4.2.4 热作用力	(40)
4.2.5 虚拟质量力	(41)

4.2.6	倍瑟特力	(42)
4.2.7	范德华斯力	(42)
4.2.8	场力	(42)
4.2.9	碰撞阻力	(44)
4.2.10	单颗粒在气流中的运动方程	(46)
第5章	描述流体相及气固两相流动的基本方程	(48)
5.1	流体与流动的基本特征	(48)
5.1.1	理想流体与粘性流体	(48)
5.1.2	牛顿型流体与牛顿粘性定律	(48)
5.1.3	非牛顿型流体	(48)
5.1.3.1	宾汉塑性流体(Bingham-plastic fluid)	(49)
5.1.3.2	假塑性流体(pseudo-plastic fluid)和胀塑性流体(dilatant fluid)	(49)
5.2	流体动力学控制方程	(50)
5.2.1	连续性方程	(50)
5.2.2	动量守恒方程	(52)
5.3	湍流流动	(57)
5.3.1	湍流流动的基本特征	(57)
5.3.2	湍流基本方程	(58)
5.3.3	湍流数值模拟方法	(59)
5.3.4	标准 $k-\epsilon$ 两方程模型	(60)
5.4	气固两相流数值模拟	(61)
5.4.1	气固两相流的模拟方法	(61)
5.4.2	气固两相流的基本方程以及相间的耦合	(61)
5.4.2.1	连续相流动控制方程	(61)
5.4.2.2	离散相控制方程	(62)
5.4.2.3	相间的耦合	(63)
第6章	多相流数值模拟常用数学模型	(64)
6.1	无滑移单流体模型	(64)
6.1.1	模型的应用背景及特点	(64)
6.1.2	主要数学模型	(64)
6.2	双流体模型	(65)
6.2.1	模型的应用背景及特点	(65)
6.2.2	主要数学模型	(65)
6.2.2.1	守恒方程	(65)
6.2.2.2	相间交换系数	(66)
6.2.2.3	固体压力	(70)
6.2.2.4	固体剪切应力	(70)

6.2.2.5	颗粒拟温度	(71)
6.2.2.6	湍流模型	(72)
6.3	VOF 模型	(76)
6.3.1	模型的应用背景及特点	(76)
6.3.2	主要数学模型	(76)
6.3.2.1	守恒方程	(77)
6.3.2.2	界面附近的插值	(78)
6.3.2.3	表面张力和壁面粘附	(79)
6.4	颗粒轨道模型	(81)
6.5	描述颗粒之间相互作用的模型	(82)
6.5.1	软球模型	(82)
6.5.1.1	模型的应用背景及特点	(82)
6.5.1.2	主要数学模型	(83)
6.5.1.3	模型参数的确定	(84)
6.5.2	硬球模型	(86)
6.5.2.1	模型的应用背景及特点	(86)
6.5.2.2	主要数学模型	(87)
6.5.3	直接模拟蒙特卡洛(DSMC)方法	(88)
6.5.3.1	模型的应用背景及特点	(88)
6.5.3.2	主要数学模型	(88)
第 7 章	数学模型的求解与数据的后处理方法	(93)
7.1	基于欧拉框架下的连续相求解	(93)
7.1.1	计算流体力学的求解过程	(93)
7.1.2	基于有限体积法的计算区域及控制方程的离散	(95)
7.1.3	基于 SIMPLE 算法的流场数值计算	(103)
7.1.4	商用 CFD 软件求解气相场的基本方法	(111)
7.1.4.1	常用的 CFD 软件	(111)
7.1.4.2	FLUENT 简介	(115)
7.1.4.3	FLUENT 实例操作步骤	(121)
7.2	基于拉格朗日框架下的固相求解	(136)
7.2.1	求解方法	(136)
7.2.2	实例分析	(137)
7.3	气固两相间的单向耦合与双向耦合	(138)
7.4	后处理方法	(139)
7.4.1	数据的存储与读取	(139)
7.4.1.1	顺序文件的打开与关闭	(140)
7.4.1.2	顺序文件的读写	(140)

7.4.2	计算结果的绘图	(141)
7.4.2.1	Visual Basic 绘图方法	(141)
7.4.2.2	AutoLISP 绘图方法	(148)
7.4.3	动画制作	(150)
第 8 章	气固两相流动数值模拟的应用	(154)
8.1	料仓中颗粒卸料过程的流动特性	(154)
8.2	球磨机内不同粒径颗粒的运动特性	(158)
8.3	循环流化床内气固两相流动特性	(160)
8.4	单喷口流化的数值模拟	(161)
8.5	洗涤冷却室内含渣气体穿越液池的气泡特性及气固分离过程	(163)
8.6	细长杆状颗粒流化特性研究	(165)
8.7	丝状柔性颗粒流化特性的数值模拟	(169)
8.8	大型袋式除尘器内流场的调节与优化	(176)
8.9	循环流化床脱硫塔内气流分布的调节	(181)
参考文献		(186)

第 1 章 绪 论

1.1 多相流动

在学习多相流动之前,我们所接触的流体流动多是单相流动,如气体流动和液体流动。

在学术界对“多相流”一词具有两种不同的理解,一种是从物质形态上进行相的区分,另一种则是从动力学意义上进行区分,目前尚不统一,但这并不影响对多相流动的研究。下面将对这两种不同划分方法进行介绍。

从物质形态上看,自然界中的物质通常有三种状态:气体、液体和固体。因此除单相流动以外,流动还存在气-液、气-固、液-固构成的两相流动和气-液-固构成的多相流动。

除此之外,还存在着动力学意义上的相。如两种互不相溶的液体构成的流动,由于两种液体物性的不同将不可避免地造成流动在动力学上的差异,因此不相溶的液-液混合物的流动也属两相流动。又如气流携带大量固体颗粒构成的流动,由于固体颗粒通常存在粒径上的差异,不同粒径的颗粒显然具有不同的动力学性质,为了能够精确地研究不同粒径颗粒的流动特性,可将颗粒按不同粒径范围进行分组,用不同的动力学方程加以描述,这样从固相颗粒中又分出了多个相,成为多相系统的流动。

我们通常所说的多相流动实际上包含着物质形态上的相和动力学意义上的相,如石油开采中涉及的油-水-沙混合物的流动被称为三相流动。值得一提的是对多相流动的划分往往还取决于研究过程中所采用的方法和所需要的精确程度,如上面所说的气流携带大量颗粒构成的流动,如果颗粒粒径的分散性不大,或为了减少问题的复杂性,在研究过程中不对颗粒粒径造成的流动差异进行考虑,将所有颗粒采用相同动力学方程加以描述,则构成气固两相流动。在习惯上人们往往根据物质形态来称呼所研究的流动,即我们通常所说的气固两相流动。两相流动是多相流动的一个简单特例。

随着科学技术的发展,多相系统的研究领域也不断地扩大。在多相流研究初期,人们对多相系统的兴趣还仅仅局限于接触最多的颗粒输送、气-液两相流动和泥沙运动等方面,而今天多相系统的研究已经扩展到了上至航天下至动植物生理活动的广泛领域。目前多相系统研究所涉及最多的领域包括:

(1) 能源:常规电站锅炉和蒸汽发生装置,压水型核反应堆,液态金属快中子增殖反应堆,石油开采,地热电站,磁流体发电机,循环水冷却塔以及内燃机和喷气式发动机等。

(2) 运输:油气混合物与水煤浆的管道输送,颗粒矿料、粮食、棉花的短距离气流输送,水翼船,水泵等。

(3) 化工:精馏装置,各种反应器,流化床,乳化装置,喷雾器,洗涤塔,吸收装置,搅拌装置,除湿干燥装置以及各种包含相变过程的热交换器,蒸发器等。

(4) 宇航:液体或固体燃料火箭、飞行器再入大气层,空间生命保障系统,人造卫星运行等。

(5) 水利:江河、湖泊中泥沙的沉积,水库淤积防治,河口、港湾的泥沙运动等。

(6) 环境:空气污染控制,防尘装置,垃圾处理厂,空调制冷装置等。

(7) 地理:土地的风蚀与沙土沉降,沙漠迁移,沙丘的形成,泥石流,滑坡与雪崩,雨的形成与雨滴运动,雪的形成,云的物理特性,江河泛滥,江河与海洋的浮冰等。

(8) 生物:血液流动,毛细管输送,汗腺控制体温等。

多相系统所涉及的领域非常广泛,其形式也多样。虽然多相系统比单相系统复杂得多,但它们在本质上都遵循着质量、动量和能量传递的基本物理规律,正是这些共性的存在,使对它们的运动规律的研究成为一个以流体力学分支的形式而存在的学科——多相流体动力学。

1.2 连续介质与离散颗粒

在学习工程流体力学时,首先必须建立连续介质的概念,即认为所研究的单相流体(气体或液体)是连续的。流体的连续介质概念包括:流体由连续的流体质点组成,即流场空间任何位置都被流体质点所占据,在流体质点之间不存在间隙,而流体质点是保持流体宏观特性的最小体积单元。

众所周知分子之间存在间隙,当所研究的物体所涉及尺寸小于流体质点尺寸时,流体连续介质概念不再有效,这类问题已不属于普通流体力学的研究范畴,其流动机理需要根据分子动力学理论进行研究。

以上连续介质概念是在对气体和液体研究时建立的,对于气固两相流动而言,在对气相建立方程时,若扣除控制体内固体所占有的体积份额后,连续介质概念仍然适用。对气体中携带的大量颗粒,颗粒间的间距要比分子间距大得多,在研究固相时,是否将其仍看成连续介质,需要根据颗粒的粒径、所研究流场的范围空间相对尺寸、颗粒浓度与颗粒浓度分布的均匀性以及研究需要的精确程度等因素确定。举一个极端的例子,当我们研究含有灰尘的空气所构成的气固两相流动时,由于灰尘的粒径很小且在空气中分布均匀,我们完全可以将灰尘作为连续介质,用与其相关的方法进行处理而不会引起大的偏差。又如当我们研究燃煤沸腾流化床时,由于煤颗粒尺寸相对较大,颗粒在床内分布很不均匀,并且颗粒间存在着激烈的碰撞与摩擦,为了提高研究结果的准确性,近年来有不少学者将固相直接作为离散颗粒来建立相关方程进行描述。

另外,对固相的处理方法有时还需要根据颗粒的粒径与所研究流场范围空间的相对尺寸来确定,如对于沙尘的迁移,即使是较大的颗粒,相对所研究的流场空间而言,仍然可以采用连续介质的方法处理而不会引起较大的误差。

1.3 描述流动的两种基本方法

由工程流体力学可知,描述流体运动有两种基本方法:拉格朗日方法和欧拉方法。对气固两相流动流场的描述仍然如此,并且有时根据气固两相流动的特征和描述准确性的需要,可同时运用欧拉方法和拉格朗日方法分别对气相和离散颗粒相进行描述。

准确理解欧拉方法和拉格朗日方法对气固两相流的研究相比单相流体研究而言显得更为重要。

1) 描述流体运动的欧拉方法

欧拉方法着眼于空间,以流场中每一空间位置作为描述对象,描述在这些位置上流体的物理参数随时间的变化。

由于欧拉方法是以空间位置作为描述对象,因此为了识别空间位置,需要对所研究的流场建立空间坐标系,通常通过划分网格,给出各个网格位置的流体物理量。

在直角坐标系中,流场中任一点 (x, y, z) 处,某一物理参数 B 随时间 t 的变化关系可以表示为

$$B = B(x, y, z, t) \quad (1-1)$$

例如,流场中的每一空间位置,每一时刻都被确定的流体质点所占据,位置 (x, y, z) 处的密度 ρ 、压力 P 、速度 v 可以分别表述为 $\rho = \rho(x, y, z, t)$, $P = P(x, y, z, t)$ 和 $v = v(x, y, z, t)$ 。

采用欧拉方法时,当给定流场中任意一空间位置,欧拉方法就能告知我们这一空间位置处流体的运动状态和流体的物理参数。

2) 描述流体运动的拉格朗日方法

拉格朗日方法着眼于流场中的每一个流体质点,而不着眼于空间位置,它以流场中每一流体质点作为描述对象,描述每一流体质点的位置、速度及其物理量随时间的变化。

若以 (a, b, c) 表示质点在某一时刻 t 所处的位置 (x, y, z) ,则不论该质点在其他时刻已运动到了什么位置以及物理参数经历了什么变化,该质点的任一物理参数 B 对于时间的变化可以表示为

$$B = B(a, b, c, t) \quad (1-2)$$

流场是由大量流体质点组成的,由于拉格朗日方法着眼于流体质点,因此流场中的每个流体质点必须有“名字”加以区分,譬如“1”,“2”,“3”……这样,质点“1”在 t 时刻的速度就可以表示为 $v_1 = v_1(a_1, b_1, c_1, t)$ 。式中 a_1, b_1, c_1 表示 t 时刻质点“1”所处的位置 (x_1, y_1, z_1) 。

采用拉格朗日方法,当给定任意流体质点,拉格朗日方法就能告知我们这个流体质点在 t 时刻所处的空间位置和它的运动状态等物理参数。

由于拉格朗日方法采用的是通过跟踪每一流体质点来描述流场的方法,所以采用拉格朗日方法可以得到流场中所有流体质点的运动轨迹。

3) 两种方法的关系及特点

欧拉方法与拉格朗日方法是描述同一流场的两种不同方法,其目的和作用是一致的。正因为这两种方法存在着必然联系,所以两种方法的表达关系式是可以相互转换的。

对气固两相流动而言,由于气相充满整个流场,显然采用欧拉方法比较方便。对颗粒相的描述应视气固两相系统的特性确定,对于细颗粒、固相浓度稀疏且分布比较均匀的流动,采用欧拉方法描述比较方便,譬如以后将要学到的双流体模型就是采用欧拉方法所建立;对于颗粒粒径相对较大、粒度分布范围较宽且在流场中分布不均匀的离散颗粒,采用拉格朗日方法能够比较精确地研究不同粒径颗粒在流场中运行轨迹的差异。

一般而言,在进行数值模拟时,拉格朗日方法比欧拉方法的计算量大得多。过去由于计算条件的限制,较少使用拉格朗日方法,但近些年来,计算机的内存容量和计算速度都在快速增大和提高,拉格朗日方法的应用也逐渐增多。特别是对于一些由大颗粒所构成的稠密、复杂气固两相流动的数值模拟,为了获得更为接近实际的模拟结果,常同时采用欧拉方法和拉格朗日方法分别描述气相和离散颗粒相,在每一时间步长内或若干时间步长内对气相场和固相场的相互作用进行耦合,充分发挥两种方法的优点,取得了非常令人满意的数值模拟结果。

另外,随着计算机计算能力的提高,数值模拟技术也在快速发展中。近些年来,对于一些微尺度(微米级)流动的数值模拟,如过滤式除尘器细微通道内的气固两相流动研究,2.5微米以下细微颗粒的脱除机理研究,芯片内冷却槽道内流体的流动研究等,已经有人直接从分子运动层次对流动进行数值模拟研究,通过跟踪流体分子运动,而后经过统计获得宏观流动特性,显然,这种方法所采用的是拉格朗日方法。

1.4 两相流研究的发展与现状

随着科学技术的快速发展,新的学科不断产生,多相流学科正是近几十年来形成并快速发展的新学科之一。

其实多相流现象不论在自然界还是在人类生产实践中早已广泛存在,例如河流中泥沙的输运和沉降,沙尘暴的形成,颗粒矿料、粮食的输送,常规电站锅炉和蒸汽发生装置中的多相流动等。中国古代的都江堰水利工程就巧妙地利用弯曲的河道将江水中的沙石分离出去,将清水引去灌溉农田。

虽然两相流学科是近年来才形成的,可是同两相流有关的问题很早以前人们就在生产中遇到并提出各种解决方案,积累了许多经验。早在1877年,Boussinesq就已较系统地研究过明渠水流中泥沙的沉降和输运;1910年,Mallock研究过声波在泡沫液体中传播的过程中强度的衰减;1924年,Gasterstadt就首次发表过一篇关于谷物气流输送的研究论文,为两相流研究打开了序幕。但是许多有关两相流的研究经验和研究成果分散在各个生产部门,相互交流不多。

有意识地归纳和总结所遇到的各种现象,用两相流的统一观点系统地加以分析和研究,则是在20世纪40年代才开始。两相流的名词在1949年已见诸于文献,但是两相流体力学作为一门新兴学科还主要是在50年代以后才发展起来的。1950年以前,人们对两相流动的机理还未掌握,而且科学技术的发展也还没有把两相流摆在迫切需要发展理论研究的位置。当时两相流的研究还主要集中在管流、流化床和固定床内气体流动经验公式的求取。只有个别学者对颗粒运动的基本理论作过一些探索性的研究。50年代后,两相流的相关研究显著增加,内容包括两相流边界层,激波在两相流混合介质中的传播,空化理论,流态化技术以及喷管流动等。1956年,Ingebo研究了颗粒群阻力系数与单颗粒阻力系数的差别,总结出描述颗粒群阻力系数的经验公式。60年代以后,越来越多的学者开始探索描述两相流的运动规律的基本方程。早期的工作有Marble(1963)、Murray(1965)、Panton(1968)等。有关两相流的介绍开始出现在相关流体力学书籍中,有关两相流动的专著开始陆续出版,如Yih(1965)、Soo(1967)、Wallis(1969)、Ishii(1975)、Pai(1977)等。Rudinger于1976年以“气体-颗粒流基础”为题在比利时的von Karman流体力学实验室做了专题讲座,并于1980年整理成书出

版。《国际多相流杂志(International Journal of Multiphase Flow)》于1974年创刊,1982年出版了多相流手册。我国也于1979年由力学学会主持召开了第一届“多相流体力学、非牛顿流体力学、物理-化学流体力学”学术讨论会。因此,两相流作为一门独立的学科得以形成并开始迅速发展,但总的来说还不成熟,尚处于发展初期,很多方面都依赖于经验数据,而且数据的分散性也很大。

早期的两相流理论研究着眼于单一尺寸颗粒系统的研究,主要是运动方程的推导。根据连续介质力学理论系统地推导由单一尺寸颗粒构成的气固悬浮体中流体和固体颗粒的基本方程,包括:连续性方程、动量方程和能量方程。之后,该领域的研究者逐渐意识到研究固体颗粒尺寸分布的重要性,并从颗粒群的连续介质力学这一观点出发,将其根据不同尺寸颗粒所具有的不同动力特性划分成不同的“相”,在此基础上推导和建立了多相悬浮系统的基本方程组。尽管不同研究者在某些具体问题的处理上存在着不同的看法,各自所推导的基本方程组在具体的项目内容上有所差别,但从整体来看没有根本区别。

经过半个多世纪的发展,目前气固两相流的稀相流动已经可以通过建立数学模型、借助计算机求解计算获得比较满意的结果。但对浓相气固悬浮系统来说,则因颗粒间相互作用与耦合关系的复杂性,以及离散颗粒直接数值模拟所涉及的巨大计算量,目前还不能对大规模浓相流场进行数值模拟计算。涉及浓相气固两相流动的工程设计,主要还是通过实验所获得的经验公式进行计算。

综上所述,两相流作为一门新兴学科,总的来说至今发展还很不成熟,尚处于发展初期阶段。这主要是由气固两相流动的内在复杂性所造成,主要表现在很多方面还需依赖于经验公式和经验数据,而且不同研究者所得到的数据和经验表达式还存在较大差距,缺少适用性强的统一计算公式等。

值得一提的是,计算机计算能力的快速提高为气固两相流动的数值模拟研究起到了重要的促进作用。近些年来,气固两相流动数值模拟发展很快,借助于当前计算机的强大计算能力,在模拟中尽可能少地采用人为假设,使得模拟结果更加符合实际。目前,气固两相流动的数值模拟研究已成为探索气固两相流动机理的重要手段之一。

目前,一些先进国家如美国、日本等对多相流的研究已经进入到各个领域和部门,并在深度上达到微观、瞬态的全面深入的发展阶段。就美国而言,进行多相流理论和实验研究的部门就遍及高等院校、国家实验室以及其他政府机构和工厂企业的研究机构。其中著名的有:麻省理工学院、伊利诺伊大学、华盛顿州立大学、西北大学、休斯敦大学、马里兰大学、纽约州立大学、阿贡国家实验室、原子能协调委员会、美国环境保护局、美国钢铁研究所、电力研究所等。日本于1960年在机械工程协会中专门成立了两相流研究小组,1978年改组为两相流研究分会,1981年分会对109所大学进行调查,仅仅从事气-液两相流研究的就有33所。目前日本全国从事气固两相流动研究的单位有近30所。

我国从上世纪50年代开始在一些高等院校中开展了气-液两相流动和流化床的研究工作,以后又陆续开展了气力输送的研究。1979年中国力学学会主持召开了第一届“多相流体力学、非牛顿流体力学、物理-化学流体力学”学术讨论会,首次发表了有关多相流体力学的评述文章。现在我国许多著名高等院校、研究院所等都在开展与多相流动相关的研究工作。

第 2 章 两相流的分类及多相系统的研究方法

2.1 两相流的流型及分类

与单相流动相比,两相流动要复杂得多,随着两相流结构的不同以及各种物质状态或运动状态间组合的不同,其内在规律也发生显著变化。正是由于两相流动的复杂性,对不同状态的两相流动必须用不同的数学关系式加以描述,因此对两相流动进行合理地分类是研究两相流动的一个必要环节。

从理论上说,只要同时存在两种以上不同的物质状态或运动状态,多相系统就存在。虽然在工程实际和自然界中我们有时也确能看到气、液、固三相或几种不同运动状态同时存在的情况,但是我们所遇到的更多的还是只存在两种物质状态或两种运动状态的两相混合物及其运动。考虑到研究两相流动相对简单并且其研究结果和研究方法在很多情况下可以进一步推广到多相系统,几乎所有研究者都从两相流着手开展其研究工作。

两相流有两种分类方法:

1) 根据两相之间界面结构的不同来分类

根据两相之间界面结构的不同,两相流可以分为三类,即:分离流动(separated flows),过渡或混合流动(transitional or mixed flows)和散式流动(dispersed flows)。每一类流动又可按其几何特征的不同,进一步分成若干种。

根据流动几何特征的不同,分离流动可以分为平面流动和拟轴对称流动两种,这两种流动分别又可再分成两种:平面流动包括膜状流动和分层流动,拟轴对称流动包括环状流动和射流。

同样,散式流动可以分成三种:泡状流动、滴状流动和固体散粒流动。

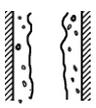
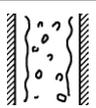
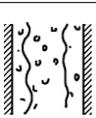
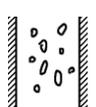
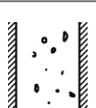
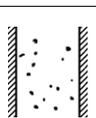
由于界面结构的变化是渐近的,在分离流动与散式流动之间还存在一种同时存在分离流与散式流的过渡区域,即混合式过渡流动。这一类流动可进一步区分为四种:柱塞状流动,带气泡的环状液流动,具有带液滴核心气流的环状液流动以及具有带液滴核心气流和带气泡环状液流动。

上述分类情况列于表 2-1。表中除列出名称外还列出了相应的几何特征、构成和典型事例。

表 2-1 按两相之间界面结构进行分类的两相流

类别	名称	几何特征	构成	典型事例
分离流动	膜状流动		—— 液膜与气流 —— 气膜与液流	—— 膜状冷却 —— 膜状沸腾
	环状流动		—— 液流核心与气膜 —— 气流核心与液膜	—— 膜状沸腾 —— 冷凝器

续表 2-1

类别	名称	几何特征	构成	典型事例
分离流动	射流		— 液体射流进入气体 — 气体射流进入液体	— 喷雾器 — 射流冷凝
过渡或混合流动	柱塞状流动		— 液体内有大气泡	— 处于强迫对流状态下的金属钠沸腾(液态金属快中子增殖反应堆)
	带气泡的环状流动		— 在液膜内有气泡并有气流核心	— 核反应堆蒸发器
	具有带液滴核心气流的环状液流动		— 液膜与具有液滴的气流核心	— 蒸汽锅炉
	具有带液滴核心气流和带气泡环状液流的流动		— 气流核心以及液滴液膜具有气泡	— 核反应堆沸腾
散式流动	泡状流动		— 液流内带气泡	— 化学反应器
	滴状流动		— 气流内带液滴	— 喷雾冷却
	固体散粒流动		— 气流或液流内带有固体颗粒	— 气流输送

2) 根据混合物两个组成部分的物质状态和运动状态的差异来分类

这种分类方法从某种程度上说比前者显得更为简单和直观。因为人们经常见到的物质状态只有三种(有些学者把等离子体列为物质的第四种状态),相应的两相组合方案就只有三种,再加上因运动状态差异而构成的混合物,两相混合物的类型也只有四类,即:

(1) 气-固混合物

① 充满粒子的流动:连续气体流动中有离散的固体粒子。

② 气动输运:流动模式依赖诸如固体载荷、雷诺数和粒子属性等因素。最典型的模式有沙子的流动、泥浆流、填充床以及各向同性流。

③ 流化床:由一个盛有粒子的竖直圆筒构成,气体从一个分散器导入筒内,从床底不断充入的气体使得颗粒得以悬浮。改变气体的流量,床内就会有气泡不断地出现并穿过整个容

器,从而使得颗粒在床内得到充分混合。

(2) 气-液混合物

① 气泡流动:连续流体中的气泡或者液泡。

② 液滴流动:连续气体中的离散流体液滴。

③ 活塞流动:在连续流体中的大的气泡。

(3) 液-固混合物

① 泥浆流:流体中的颗粒运输。在泥浆流中,液-固两相流的基本特征不同于液体中固体颗粒的流动。泥浆流中斯托克斯(Stokes)数通常小于1。当斯托克斯数大于1时,流动成为流化(fluidization)了的液-固流动。

② 水力运输:在连续流体中密布着固体颗粒。

③ 沉降运动:在有一定高度的盛有液体的容器内,初始时刻均匀散布着颗粒物质。随后,流体将会分层,在容器底部因为颗粒的不断沉降并堆积形成了淤积层;在顶部出现了澄清层,里面没有颗粒物质;在中间则是沉降层,那里的粒子仍然在沉降。在澄清层和沉降层中间是一个清晰可辨的交界面。

(4) 两种互不相溶液体的混合物

分层自由面流动:由明显的分界面隔开的非混合流体流动。如油与水所构成的混合物,两者之间互不相溶。由于两者物性的差异,通常存在不同的流动状态。

以上分类方法是极其粗略的,每一种类型又可存在多种流动状态。在实际应用中,为了更细致地表达两相流动的具体情况以充分掌握其运动规律,人们还常常对上述四种类型的流动作进一步的流型分类,如表 2-2 所示。

表 2-2 按物质状态和运动状态进行分类的两相流

类别	名称	几何特征	构成	典型事例
气-固混合物	稀相流		颗粒在气流中呈分散型运动,颗粒间相互作用对其运动无明显影响	——煤粉、谷物、矿粉的气流输送 ——各种除尘装置
	浓相流		颗粒在气流中呈分散型运动,颗粒间相互作用对其运动有明显影响	——流化床床层 ——脉冲式气流输送
	射流		带粉气流射入气体空间或气流射入气粉混合物空间	——煤粉喷入炉膛 ——烟囱排烟 ——流化床稀相区
气-液混合物	分层和波状流动		液流与气流平行流动并有明显分界面	——大气流与海洋的相互作用 ——膜状冷却
	间断(弹状和柱塞)流动		气流被液流隔断形成大气泡	——汽水混合物在水平管内低速流动

续表 2-2

类别	名称	几何特征	构成	典型事例
气-液混合物	环状流动		气流速度高,液流成环状沿管壁流动	—— 管内冷凝 —— 管内沸腾
	泡状和沫状流动		气体量很少,呈气泡状随气流前进;或气流流速很高,液量少,液体呈沫状分散于气流中	—— 化学反应器 —— 喷雾冷却
液-固混合物	散式流动		颗粒在液流中呈分散型随液流运动	—— 水煤浆 —— 水力除尘 —— 液固化化床
	沉积流动		液流速度低,颗粒随液流前进时逐渐沉积于壁面	—— 河流泥沙沉积 —— 沉淀地
	流经多孔介质的流动		固体颗粒不动,液流在颗粒间隙中流动	—— 储油层内石油流动 —— 地下水流动
液-液混合物	散式流动		量少的液体呈沫状分散于另一种液流中前进	—— 乳化剂运动
	分层和波状流动		两种液体的速度都比较低;两种液体平行流动并有明显分界面	—— 油水混合物低速流动

以上给出的各种流动模式所对应的例子如下:

- 气泡流:抽吸、通风、空气泵、气穴、蒸发、浮选、刷洗。
- 液滴流:抽吸、喷雾、燃烧室、低温泵、干燥机、蒸发、气冷、刷洗。
- 活塞流动:管道或容器内有大尺度气泡的流动。
- 分层自由面流动:分离器中的晃动、核反应装置中的沸腾和冷凝。
- 粒子负载流动:旋风分离器、空气分类器、洗尘器、环境尘埃流动。
- 风力运输:水泥、谷粒和金属粉末的运输。
- 流化床:流化床反应器、循环流化床。
- 泥浆流:泥浆运输、矿物处理。
- 水力运输:矿物处理、生物医学及物理化学中的流体系统。
- 沉降运动:矿物处理。

对两相流动之所以进行如此多样的分类,主要是由于两相流动的复杂性。因为不同的流型存在着完全不同的规律表达式,正如单相流中有关湍流的阻力、换热系数等计算表达式与层流的相关计算表达式完全不同一样。此外,我们还应注意到,尽管以上流型繁多,但其分类依然是粗略的。流型的分类在很大程度上还是定性地描述,至今尚无统一的定量方法,甚至