

多相流与 紊流相干结构

梁在潮 等

DUOXIANGLIU
YU WENLIU
XIANG GAN
JIE GOU



华中理工大学出版社

诗 序

梁在潮教授新著《多相流与相干紊流结构》

(一)

开卷阐明多相流
湍涡颗粒辩沉浮
在潮高处试身手
抑浪平澜有卓谋

(二)

沙泥滚跃与浮游
结构相干论紊流
速度纵横分布律
高斯立说树高筹

程良骏题

一九九四年十二月

内 容 简 介

本书是作者根据自己多年的教学实践和科研成果撰著而成的。重点阐述多相流的基本概念、基本理论以及处理多相流问题的基本方法,并介绍多相流理论在实际中的应用。本书特点是将多相流理论与紊流理论相结合,深入地探讨多相流中各相之间的相互作用和多相流的流动结构。

本书可作水利、化工、力学、环境科学和大气科学等有关专业研究生的教材,也可作有关专业本科生、科研人员、工程技术人员和教学人员的参考书。

前 言

多相流是自然界和工程技术中普遍存在的物质运动,它的流动特性在很大程度上受紊流相干结构所支配,因而本书将两者联系起来考虑,将书名称之为《多相流与紊流相干结构》。

本书分为三大部分,第一部分为多相流的基本概念、基本方程和紊流相干结构基本理论;第二部分为多相流的阻力、传质、传热过程和紊流相干结构对多相流流动特性的作用;第三部分为多相流理论在工程中的应用。

本书是作者根据自己多年的教学实践和科研成果撰著而成的,一些基本内容作为研究生的教材进行过三次修改和印刷,并在此基础上,将内容进行了扩充和修改写成本书。作者企图使本书具有以下三个特点:(1)力求清晰、严谨地阐明多相流理论的基本概念、基本物理现象、基本规律以及处理问题的基本方法。(2)力图以紊流最新理论为指导,较深入地探讨多相流中各相之间的相互作用和多相流的内部结构,使读者对多相流的机理有比较清晰的认识,以利于指导处理具体工程中的多相流问题。(3)尽可能将多相流理论用于工程实际,本书介绍的多相流紊流模式及其应用,多相流在挟沙水流、掺气水流和管道流动等方面的应用,都是为了使理论与实践相结合。

本书第九章、第十章和第十一章,分别由刘士和、张红武和胡敏良执笔。限于水平,书中可能存在不少缺点和错误,衷心希望读者批评指正。

华中理工大学程良骏教授对本书进行了深入、细致、严格的审查,提出了不少宝贵的意见,为提高本书的质量起了重要作用,作

者对程教授表示深深的谢意。

作 者

1993 年 6 月于武汉水利电力大学

目 录

第一章 多相流和紊流的基本概念	(1)
第一节 多相流的基本概念	(1)
第二节 多相流的特征指标	(5)
第三节 紊流的基本概念	(9)
第四节 多相流与紊流相干结构的关系	(18)
第二章 多相流的基本方程	(20)
第一节 多相流的连续性方程和扩散方程	(21)
第二节 多相流的运动方程	(24)
第三节 多相流的能量方程	(27)
第四节 粒子的运动方程(BBO 方程)	(30)
第五节 多相紊流的基本方程	(34)
第三章 紊流相干结构理论	(39)
第一节 壁区的流动结构	(39)
第二节 外区的流动结构	(47)
第三节 紊流相干结构的控制方程	(51)
第四章 异质粒子的输运方程	(56)
第一节 紊流场中粒子的运动方程	(56)
第二节 粒子的跟随性问题	(57)
第三节 刚性球体粒子的阻力系数	(60)
第四节 异质粒子的扩散	(62)
第五节 粒子紊动扩散系数	(67)
第六节 粒子的热传导和质量输运	(76)
第七节 变形球体粒子的阻力系数	(79)
第八节 变形粒子的热传导和质量输运	(80)
第五章 粒子群的输运过程	(89)
第一节 粒子群的判别	(89)
第二节 粒子群的阻力系数	(91)

第三节	粒子群的热传导和质量输运	(94)
第四节	粒子群的动量传递	(96)
第五节	稠密粒子的粘性和热传导系数	(99)
第六章	剪切弥散理论	(105)
第一节	切变紊流中的弥散及弥散系数	(105)
第二节	纵向非定常剪切弥散及弥散系数的确定	(115)
第三节	具有记忆的污染物弥散一般理论	(118)
第七章	多相流的紊流模式	(127)
第一节	掺长模型	(128)
第二节	能量方程模型	(132)
第三节	$K-\epsilon$ 两方程模型	(135)
第四节	紊动应力方程模型和标量通量方程模型	(139)
第五节	紊动应力和标量通量代数方程模型	(146)
第六节	深度平均计算模型	(149)
第八章	变密度紊流模型及计算模式的选取	(154)
第一节	变密度紊流基本方程	(154)
第二节	变密度紊流基本方程的综合	(159)
第三节	变密度紊流基本方程的模拟	(161)
第四节	变密度紊流简化方程组	(168)
第五节	多相流计算模式的选取	(172)
第九章	紊流相干结构对粒子运动的作用	(177)
第一节	紊流边界层壁区的粒子运动	(177)
第二节	紊流边界层外区悬浮粒子的运动	(184)
第三节	混合层中的粒子运动	(190)
第十章	多相流理论在液固两相流中的应用	(199)
第一节	悬浮粒子级配组成与紊动场的关系	(199)
第二节	悬浮粒子的浓度分布	(204)
第三节	液固两相流的流速分布	(206)
第四节	流体输送粒子的能力	(209)
第五节	动床糙度的随机模拟	(213)
第十一章	多相流理论在气液两相流中的应用	(219)

第一节	气泡在流场中的运动形态及其计算	(219)
第二节	掺气水流的气体输运过程	(223)
第三节	管道气液两相流的形态及计算	(232)

第一章 多相流和紊流的基本概念

第一节 多相流的基本概念

一、多相流的定义

多相流是指两相或两相以上不相溶(或具有相界面)物质的混合流。所谓“相”是指在某一系统中,具有相同成分及相同的物理、化学性质的均匀物质部分。例如空气是一个相;水和冰是两个相;两块晶形相同的硫磺是一个相;两块晶形不同的硫磺是两个相。而物理学中又将气体、液体和固体称之为物质的三相(或态)。因此,多相流中的“相”,既指不同的热力学集态(气、液、固等),也指同一集态下不同的物理性质或力学状态。一般讲多相流是由一种主要流体介质(或称为主要相)和其它相所组成,例如挟沙水流由水流和泥沙所组成,其流体相为水,粒子相为固体粒子(泥沙);而掺气水流的流体相仍为水,但其粒子相却为气泡;雾化流为气-液系统,其流体相为气体,而粒子相为水滴。所以多相流有时也简单地说是由流体相(或流体介质)和粒子相所组成。当流体相是气体时,粒子相可以是固体粒子、或液滴、或两者兼有;当流体相是液体时,粒子相可以是固体粒子、或气泡、或与流体相不相溶的其它液滴。一种尺寸的粒子组成的粒子相,称为单一粒子混合体;多种尺寸粒子组成的粒子相,称为多重粒子混合体。

粒子可分为散粒体和粒子群(或粒子云),所谓粒子群是指粒子之间有相互作用的比较稠密的粒子相。如果粒子运动时发生形状变化,称为可变形粒子,否则称为刚性粒子。固体粒子一般情况下可认为是刚性粒子,而微小液滴或微小气泡也常认为是不变形

的微小球体。刚性粒子和变形粒子将有不同的阻力特性和输运特性。

多相流中遇到的粒子，一般都不是球形的，只有在粒子直径很小或将不规则形状理想化时，才看成是球形。固体粒子看成球形的最大直径为 0.794mm 。微小液体粒子，由于表面张力作用可获得球形。一般讲由喷射方法产生的直径小于 1mm 的气体粒子，可看成是球形粒子。

多相流是自然界、人类日常生活和工程技术中常见的一种物质流动，挟沙水流、大气或水的污染、颗粒的水力输运、石油的开采和输运、发动机排气和工业炉中的燃烧等，都存在这种流动，因而加速多相流的研究，对改善自然环境、增强人类健康、降低能源消耗，提高产品质量、促进新技术的发展和新学科的形成等，都具有重要意义。

由于组成多相流的相和相数不同，可将多相流分成气-液两相流，液-固两相流和气-液-固三相流等。图 1-1 简要地描述了自然环境中多相流的例子。

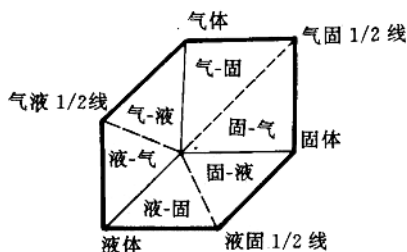


图 1-1

气-固：空气中的尘埃、烟囱冒烟、煤燃烧、下雨等；
 固-气：空气过滤、下雪、颗粒气体输运；
 固-液：泥浆、牙膏、多孔介质、软化剂等；

液-固:挟沙水流、纸浆、血液、茶等;

液-气:波浪卷气、高速水流掺气、薄膜沸腾、冷凝、空化等;

气-液:云、雾、油燃烧、冷却塔等。

二、多相流与单相流的主要区别

1. 各相之间有相互作用

流体相中含有粒子以后,两相之间要产生相互作用,无论是质量传递、动量传递和能量传递等基本力学特征,多相流与单相流都有显著的不同。粒子在流体相中运动时,既有反映平均滑移的“轨道”效应,又有轨道两侧的扩散现象,而且在空间同一点处,当不同尺寸的粒子通过时,其速度不同,粒子速度与流体相的速度也不同,粒子与流体质点的速度之间存在跟随性问题。因此,多相流的基本方程,既要包括“相”间的平均速度差,又要反映出紊动扩散。人们认为粒子相与流体相之间的平均速度差主要是由两者的初始动量不同造成的,而粒子相的紊动扩散则主要是由于紊动时粒子相的脉动和流体相脉动两者相互作用的结果,因此,粒子的输运率既取决于紊动扩散,又取决于多相流中粒子的浓度梯度。

2. 界面扰动

多相流中相与相之间存在相界面,如果相界面上存在浓度梯度、温度梯度、电荷或化学反应,则会引起表面张力的变化,从而产生自发收缩、局部扰动、分裂、振荡等现象,这种现象称为界面扰动。界面扰动形成后将引起各种界面波,其波形、波长和波幅一般均有较大变化,并引起相间的强烈作用,对相间的质量、动量、热量和能量的传递产生重要影响。例如可使质量传递系数明显增大,甚至可增大一个数量级。

3. 流型的多样化

在多相流中,除像单相流一样,将流动分成层流和紊流外,还要根据各相间的相对位置、相对体积分、相对速度和相对温度等分为多种流型。例如气-液两相流,在垂直管中可分为气泡流、弹

状流、翻腾流(Churn Flow)、模糊环状流(Wispy-Annular Flow)和环状流等流型。

三、多相流的主要研究任务

多相流的研究对象是探讨多相流流场中各相的速度、压力、温度、组分浓度、体积分数、相和相之间的相互作用以及各相与壁面间相互作用等。因此,多相流的主要研究任务,是在分析上面所述流场中各要素的基础上,建立多相流模型和基本方程组,预测其动量传递、传热、传质、化学反应,及其电磁效应。

四、多相流的研究方法

当前多相流的研究方法,主要有半经验物理模型和统观实验法,数学模型及数值算法,局部场的实验量测法等。

1. 半经验物理模型和统观实验法

半经验物理模型是指以实验观测为基础,对多相流的流动形态作出半经验性的简化假设,从而进行简化分析计算。例如某些情况下的多相管流可假定为一维柱塞流(Plug Flow)。

统观实验法,是指只研究多相流的外部参量变化,而不研究其各相内部参量的分布。例如研究多相流在管道中的阻力或平均传热量与流速间的关系、平均的体积分数等,不研究其内部各种变量的场分布。

2. 数学模型和数值算法

研究多相流动,当前有两种基本观点,一种是欧拉观点,此观点是将流体相和粒子相都作为连续介质处理,从宏观的连续介质理论出发处理问题。另一种是拉格朗日观点,这种观点是将流体相作为连续介质,而粒子相则认为是分散体,通过研究粒子的运动轨迹得出多相流的流场及各种参数。两种观点都有各自的数学模型。

所谓建立数学模型,是对多相流基本方程组中各个紊流输运

项、相间相互作用项和源项的物理规律,以实验或公设为基础提出相应的表达式,使方程组封闭,但由于该方程组是非线性偏微分方程组,一般只能用数值计算方法求解。

第二节 多相流的特征指标

多相流是一种复杂的流动,它涉及到气体、液体和固体的性质,因此,如何来区别和判断其流动特征,就比单相流要复杂得多,下面介绍几种用于多相流动的重要特征指标。

一、雷诺数(Reynolds number)

雷诺数是流体力学中表征流体惯性力和粘性力相对大小的一个无量纲参数,记为 Re 。它表示惯性力和粘性力量级之比,即

$$Re = \frac{\rho U L}{\mu} = \frac{U L}{\nu}$$

式中 ρ 为流体密度; U 为特征速度; L 为物体的特征长度; μ 为流体的动力粘性系数; ν 为运动粘性系数。雷诺数越小意味着粘性力影响越大,反之,雷诺数越大,则意味着惯性力影响越显著。

二、弗劳德数(Froude number)

弗劳德数是流体力学中表征流体惯性力和重力相对大小的一个无量纲参数。在重力场中,也是表征流体的动能和势能相对大小的无量纲参数。记为 Fr 。它表示惯性力和重力量级的比,即

$$Fr = \frac{U^2}{g L}$$

或

$$Fr = U / \sqrt{g L}$$

式中 U 为物体运动速度; g 为重力加速度; L 为物体的特征长度。

弗劳德数还可表征流体流动的缓急程度,当 $Fr < 1$ 时,流体流动为缓流; $Fr > 1$ 时,流动为急流; $Fr = 1$ 时为临界流。

三、韦伯数(Weber number)

韦伯数是流体力学中表征流体惯性力和表面张力相对大小的一个无量纲参数,记为 We 。它表示惯性力和表面张力量级之比,即

$$We = \frac{\rho U^2 L}{\sigma}$$

式中 σ 为表面张力(0~30℃范围内水和空气交界的自由面上的 σ 值从0.076N/m 到0.071N/m); ρ 为流体密度; U 为特征速度; L 为特征长度。

四、理查孙数(Richardson number)和内弗劳德数(Inner Froude number)

理查孙数表征流体浮力与惯性力量级之比,记为 Ri 。它的表达式为

$$Ri = \frac{g L^2 |d\rho_0/dz|}{\rho_0 U^2}$$

式中 g 为重力加速度; ρ_0 为流体在平衡状态下的密度; $|d\rho_0/dz|$ 为铅直方向上密度梯度的绝对值; U 和 L 分别为特征速度和特征长度。

理查孙数表征分层流体的浮力效应。有时也用内弗劳德数(或称密度弗劳德数)表示,即

$$Fr_i = \frac{U}{\sqrt{\frac{g}{\rho_0} |d\rho_0/dz|} L} = \frac{1}{\sqrt{Ri}}$$

五、马赫数(Mach number)

马赫数是流体力学中表征流体可压缩程度的一个重要的无量纲参数,记为 Ma ,定义为流场中某点的速度 v 与该点的当地声速

c 之比, 即 $Ma = v/c$. 马赫数是讨论可压缩气体运动的一个重要的无量纲相似准则数. 在流体密度不变的不可压缩流中, 声速 $c = \infty$, $Ma = 0$. 大约从 $Ma = 0.3$ 起, 就不能忽略流体的压缩性影响. 在可压缩流中, 流速的相对变化与密度相对变化之间的关系是 $d\rho/\rho = -Ma^2 dv/v$, 即在流动过程中, Ma 愈大, 气体表现出的可压缩性就愈大.

六、克努曾数(Knudsen number)

克努曾数在流体力学中是表征气体稀薄程度的一个无量纲参数, 记为 Kn . 它等于气体分子平均自由程 l 与流场的特征长度 L 的比值, $Kn = l/L$. 在标准状况下, 空气中分子的平均自由程约为 $0.065\mu\text{m}$, 因此, 在一般情况下 Kn 数极小, 这就使得有可能用连续介质模型成功地描述由单个分子构成的气体的流动特征.

七、普朗特数(Prandtl number)

普朗特数在流体力学中是表征流体流动中动量交换与热交换相对重要性的一个无量纲参数, 记为 Pr . 其表达式为

$$Pr = \mu c_p / \lambda$$

式中 μ 为流体的动力粘性系数; λ 为热导率; c_p 为表征热力学性质的参量定压比热. 大多数气体的 Pr 数均小于 1, 但接近于 1. 常温下水的 Pr 数可达 100 以上.

八、罗斯比数(Rossby number)和埃克曼数(Ekman number)

旋转流体和非旋转流体在动力学上的主要区别在于前者有科里奥利力, 后者无科里奥利力. 科里奥利力效应构成了旋转流体流动的基本特征. 罗斯比数 Ro 和埃克曼数 Ek 表征科里奥利力效应, 其物理意义分别为惯性力与科里奥利力量级之比以及粘性力与科里奥利力量级之比. 即

$$Ro = \frac{U}{\Omega L}, \quad Ek = \frac{\nu}{\Omega L^2}$$

式中 U 为流体运动的特征速度; Ω 为旋转系统的角速度; L 为特征长度; ν 为流体的运动粘性系数。

九、空化数(Cavitation number)

空化数是描述空化状态的无量纲参数, 记为 C_{av} . 其表达式为

$$C_{av} = \frac{p_{\infty} - p_v}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2}$$

式中 p_{∞} 和 U_{∞} 分别为流体的来流压力和流速; ρ 为流体密度; p_v 为流体在环境温度下的饱和蒸气压。

十、佩克立数(Peclet number)

在管式、塔式和颗粒填充床等装置内, 由于流体的涡流, 从而导致不同程度的轴向返混。佩克立数就是表征返混程度的一个参数, 记为 Pe . 其表达式为

$$Pe = uL/D_B$$

式中 u 为流体速度; L 为管(或床层)的总长度; D_B 为分散系数. 对全混流, $D_{\infty} = \infty, Pe = 0$; 对平推流, $D_B = 0, Pe = \infty$.

十一、斯特劳哈尔数(Strouhal number)

斯特劳哈尔数是表征流体流动的就地导数和位变导数之比的无量纲参量, 记为 St . 其表达式为

$$St = \frac{L}{UT}$$

或

$$St = fL/U$$

式中 U 、 L 和 T 分别为特征速度、特征长度和特征时间; f 表示振动流中的频率, $f = \frac{1}{T}$.

十二、施密特数(Schmidt number)

施密特数是表征流体粘性系数和分子扩散系数之比的无量纲参量,记为 Sc ,其表达式为

$$Sc = \nu / D_m$$

D_m 为分子扩散系数; ν 为流体的运动粘性系数。

第三节 紊流的基本概念

紊流(又称湍流)是自然界普遍存在的一种流体流动,多数多相流是紊流,或称之为多相紊流。多相紊流具有紊流的基本特性,因而在本节中介绍紊流的一些基本概念。

一、紊流的内部结构和定义

一般流体力学中已经介绍过,当流体流动的雷诺数大于下临界雷诺数 Re_c 时,流体为紊流运动。如管流,雷诺数 $Re = \frac{Vd}{\nu} > Re_c \approx 2320$,明渠流 $Re = \frac{VR}{\nu} > Re_c = 500$ 时,水流为紊流运动。在层流中流体质点层次分明地向前移动,其轨迹是一些平滑的随时间变化较慢的曲线。在紊流中,流体质点的轨迹杂乱无章,互相交错,而且迅速地变化。流体微团(或称涡体)在顺流向运动的同时,还作横向或垂向运动,或与它周围的流体发生混掺。对紊流内部结构的模型,曾经有许多不同的假定,比较公认而且传统的说法是:紊流是一种完全不规则的脉动运动,而这种脉动运动,是由随机地分布在流场中的大小涡体(EDDY)所产生的。图1-2为管流紊流的瞬时流动图案;图1-3为紊流边界层中大涡体分布图。从图中可看出:大小不等的涡体布满水流中,有的大涡体套小涡体,整个紊流形成一个从大尺度涡体直至最小一级涡体同时并存而又互相叠加的涡体运动。最大涡体的尺度与容器的特征长度,或产生紊动的机械装置尺