

液-固两相流基础

岳湘安 著

石油工业出版社



液—固两相流基础

岳湘安 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统地论述了国内外学者及作者本人在液—固两相流基础理论与实际应用方面的研究成果。全书共七章,其内容为:液—固两相流基本概念;两相流动力学理论;两相流连续介质理论;颗粒在液体中的受力分析;固相颗粒流的本构方程;固相边界条件;液—固两相垂直管流。

本书可供从事液—固两相流研究的科研人员、高等院校有关专业的教师和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

液—固两相流基础 / 岳湘安著 .
北京:石油工业出版社, 1996.4
ISBN 7-5021-1679-6

- I. 液…
- II. 岳…
- III. 液体—固体:两相流动—基础理论
- IV. 0359

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 01500 号

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里 2 区 1 号楼)
石油工业出版社印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

787×1092 毫米 16 开 12 $\frac{3}{4}$ 印张 320 千字 印 2001—3000

1996 年 5 月北京第 1 版 1999 年 5 月北京第 2 次印刷

ISBN 7-5021-1679-6/TE·1433

定价:20.00 元

序

液—固两相流的相关理论及其应用几乎遍及工程技术的各个领域,如煤、矿石等的水力输运,河流中泥沙的运移,石油钻井中钻井液的携屑,以及油层水力压裂支撑剂的运移等等。液—固两相混合物的流动不仅在各相的内部存在着一些复杂的力学特性,而且在各相之间还存在着相互作用。迄今为止,关于液—固两相流的许多关键性问题仍未得到圆满解决,争议颇大。例如液—固两相间的作用、固相颗粒间的相互作用和固相边界条件等,都是难度极大、亟待解决的问题。

随着煤炭水力输运技术的应用,液—固两相流的研究自本世纪初开始受到了高度重视,并已逐渐成为当今流体力学研究中最具挑战性的前沿领域之一。但是,由于该问题的复杂性,有关液—固两相流的计算与设计基本上还停留在经验估算的水平上。目前,人们已经充分意识到深入开展液—固两相流基础理论研究的重要性。但是,国内外有关液—固两相流方面的图书还很少,尤其是系统地论述液—固两相流基础理论方面的专著则更为少见。这本《液—固两相流基础》的出版,对于促进该领域的深入研究无疑是十分有益的。

作为一本专著,本书作者十分注重选材的先进性与论述的系统性。作者对于近年来国内外有关研究成果及各种学术观点作了全面调研、深入剖析和消化吸收。经过认真整理,作者系统地阐述了液—固两相流的基础理论、研究方法以及实际应用,反映了该领域的当代水平。作者还以相当的篇幅介绍了他本人在该领域内的最新研究成果,其中包括:建立了液—固两相流基本方程中的颗粒相互作用模型、颗粒—壁面作用模型以及相间作用模型;利用上述模型,成功地研究了液—固两相管流问题;揭示了某些不同流动现象间的物理本质与统一规律,例如:固体颗粒与壁面间相对滑移的滞后与超前现象;固相颗粒在管道中浓度分布的聚中与壁面回升现象等等。对于目前学术界还存在争议的一些观点,作者进行了深入的分析 and 客观的评价,并且提出了自己的观点。

相信本书的出版,对于液—固两相流这一领域的深入研究和广泛应用,能够有所推动。

陈家琅

一九九六年一月

目 录

第一章 概论	(1)
第一节 绪言	(1)
一、液—固两相流研究的意义	(1)
二、液—固两相混合物的分类	(2)
三、液—固两相流研究概况	(4)
四、双流体模型的封闭问题	(8)
第二节 液—固两相流基本概念	(10)
一、固相颗粒的基本特征	(10)
二、液—固两相流的基本参数	(15)
三、滞留效应	(17)
第三节 数学基础知识	(18)
一、矢量运算	(18)
二、并矢式和张量	(20)
第二章 两相流动力学理论	(24)
第一节 基本概念	(24)
一、位置函数	(24)
二、体积元和球表面元	(24)
三、速度及速度的函数	(25)
四、Boltzmann 方程	(25)
五、颗粒相的物理及动力学参数	(26)
第二节 基本方程	(28)
一、输运方程	(28)
二、守恒方程	(28)
三、碰撞项	(30)
第三节 低浓度液—固两相流动力学理论	(32)
一、基本方程	(32)
二、颗粒速度分布函数	(34)
三、理论计算与实验结果的比较	(36)
第三章 两相流连续介质理论	(40)
第一节 两相流基本方程	(40)
一、基本概念	(40)
二、相守恒方程	(41)
三、统计平均方程	(43)
第二节 两相紊流的两方程模型	(45)
一、紊流运动模型	(46)
二、紊流动能及其耗散率方程	(47)
三、动量方程的封闭	(50)

四、紊流动能方程的封闭	(51)
五、紊流能量耗散率方程的封闭	(54)
六、实例	(55)
第三节 两相紊流的零方程模型	(57)
一、本构方程基本原理	(57)
二、客观量	(58)
三、应力本构方程	(60)
四、界面动量传递项	(61)
第四章 颗粒在液体中的受力分析	(64)
第一节 颗粒在液体中的阻力	(64)
一、概述	(64)
二、球形颗粒在牛顿液体中的阻力	(65)
三、球形颗粒在 Bingham 液体中的阻力	(75)
第二节 压力梯度力	(82)
第三节 虚质量力	(83)
第四节 Basset 力	(86)
第五节 Magnus 升力	(90)
一、颗粒的旋转摩擦力矩	(90)
二、颗粒旋转产生的升力(Magnus 效应)	(92)
第六节 Saffman 升力	(92)
第五章 固相颗粒流的本构方程	(97)
第一节 引言	(97)
第二节 颗粒流的动力学模型	(98)
一、颗粒碰撞分布函数	(98)
二、颗粒碰撞动力学	(101)
三、颗粒流动力论的基本方程	(103)
四、颗粒流动本构方程	(106)
第三节 颗粒剪切-碰撞(S-C)模型	(109)
一、颗粒碰撞及流动分析	(110)
二、固相本构方程	(112)
第四节 其它几种本构模型	(116)
一、Ogawa 等的本构模型	(116)
二、Shen 等的本构模型	(118)
三、Lun 等的本构模型	(118)
四、Jenkins 和 Savage 的本构模型	(120)
第五节 固相颗粒的简单剪切流动	(121)
一、S-C 模型	(121)
二、其它模型	(122)
三、比较与分析	(123)
第六节 粗糙球和混合流模型	(125)

一、粗糙球动力模型	(125)
二、双组分混合颗粒流的动力模型	(131)
第六章 固相边界条件	(140)
第一节 唯象模型	(140)
一、基本模型	(140)
二、边界条件	(141)
第二节 圆盘型颗粒平面流边界条件模型	(142)
一、边界几何模型及碰撞动力学	(142)
二、统计平均特性参数	(143)
三、颗粒流动方程及边界条件	(145)
四、边值问题	(147)
第三节 波形壁面边界模型	(150)
一、颗粒—壁面碰撞模型	(150)
二、边界条件方程	(151)
第四节 滑移—碰撞边界模型	(152)
一、固相边界模型	(152)
二、颗粒与壁面作用的本构方程	(154)
三、边值问题——颗粒介质的 Couette 流	(156)
第七章 液—固两相垂直管流	(168)
第一节 引言	(168)
第二节 液—固两相流基本方程及其封闭	(169)
一、基本方程	(169)
二、封闭方程	(169)
第三节 充分发展的垂直管流方程	(173)
第四节 问题的求解	(177)
一、求解混合物管流的配置法	(177)
二、算法及讨论	(179)
第五节 计算结果及分析	(184)
一、速度分布	(184)
二、浓度分布	(184)
三、压力梯度	(186)
四、极值流速	(186)
参考文献	(190)

第一章 概 论

第一节 绪 言

一、液—固两相流研究的意义

液—固两相混合物广泛地存在于自然界及能源、化工、石油、矿业、建筑、水利、轻工、冶金、环保等各个领域。尤其近年来,随着科学技术的迅猛发展,新材料、新技术、新工艺的出现,液—固两相流理论的应用范围不断扩大,它在现代工业和科学技术各个领域中的重要性也越来越明显。下面是几个典型的应用实例。

1. 固体颗粒的水力输运

粗颗粒介质水力输运技术的应用起始于本世纪初,其中最早的实例为1914年从泰晤士河(Thames)的码头将煤运送到不远的哈默斯密斯(Hammersmith)电厂。最初,管道输送技术的应用范围很有限,输送距离很短,输送介质仅限于粒径非常细小的煤粉、冶金废渣等。自50年代以来,水力输运技术有了很大发展,其应用范围越来越广泛,输送距离也由工厂或工地内部的短距离扩展到上千公里的长距离输送。当今,许多国家都建立了长距离、大输运量的管线,其中最长的管线为1640 km,其输运量高达2500万 t/a(埃特西输煤管线)。张书农^[1]、钱宁^[2]等曾对管道水力输运研究动态作过详细论述。

与其他机械输运方法相比,水力输运具有许多优点:(1)系统密闭,可减少物料损失,减少对环境的污染,改善劳动条件;(2)输运管道不受地形限制,在无法铺设管道或安置其他输送机械的地域内使用水力输运尤为适宜。另外还可减轻交通运输的压力;(3)设备紧凑,易于实现连续化、自动化操作,便于和连续的生产工艺相衔接。由于水力输运的这些优点,它的应用范围还将不断扩大,成为将来的主要运输方式之一,其研究工作的重要性与迫切性是不言而喻的。

2. 石油钻井中钻屑的运移

在石油钻井施工中,循环泥浆的主要作用是清除井底和钻头上的钻屑并将其输送到地面。合理地设计泥浆以及各流动参数,使之既能保证钻屑的正常运移又能有效地保护井壁和油层,是钻井工艺中的技术关键,同时也是一个非常复杂、难度极大的非牛顿液—固两相流体力学问题。近年来,钻井界的有识之士已充分意识到钻屑运移规律的研究现状与先进的钻井工艺技术之间的尖锐矛盾,并呼吁尽快开展有关方面的研究,建立既有严格的理论依据又与实际情况相符的模型与方法。

3. 油层水力压裂工艺中支撑剂的运移

在石油工业中,水力压裂液的性能、支撑剂随压裂液在裂缝中的运移及分布是影响压裂效果,甚至是关系到压裂成败的关键。目前生产中所使用的压裂液为:(1)各种高分子聚合物溶液;(2)泡沫压裂液;(3)油基压裂液。这些压裂液均具有较强的非牛顿流变性。作为支撑剂的固体颗粒一般为砂子、核桃壳等。显然,支撑剂在裂缝中运移、分布的研究属于非牛顿液—固两相流动范畴。

4. 泥沙在河流中的运移

据统计,世界大河流中年输沙总量超过1亿t的就有13条。其中我国的黄河其总沙量与平均含沙量均居首位。由于河流上游来沙过多,并大量淤积在河床上,河床日益增高,行洪能力剧减,至使洪水泛滥成灾。另外,河水中的泥沙还将引起流域内的水库、水利灌溉系统及港湾的淤积,由此所造成的危害是非常严重的。长期以来,泥沙工作者们为多沙河流的综合治理,为其水利资源的开发利用作了大量研究工作,并取得了可喜的成果。但是,由于泥沙运动的复杂性,不论是实验研究还是理论研究都是十分困难的。该领域内的一些关键性问题至今尚未得到圆满解决,其研究仍停留在经验推算与定性认识阶段。可见,泥沙运移规律的研究也同样亟待进一步深入。

除上述问题外,液—固混合物流动的实际例子还很多。例如:化学工业中的搅拌、过滤等单元操作;建筑物壳体的浇灌成型;能源工业中固体和液体燃料在锅炉内的流动和燃烧过程;湖泊、河流和海洋的污染等等,不胜枚举。

作为一个新兴的力学分支,液—固两相、气—固两相及气—液两相流动一起被统称为两相流体力学。近年来,许多先进工业国家已把多相流的研究放在与单相紊流研究同等重要的地位,先后成立了许多专门的研究机构,出版了多种关于多相流研究的专著及教科书,并创办了国际多相流杂志(Int. Multi. Flow)。除此之外,还有一些专门的水力输运、气力输运研究机构。有关专题的国际会议非常频繁,例如,自1970年开始至1988年的18年间,共召开了11次国际水力输运学术会议(International Conference On The Hydraulic Transport of Solids in Pipes)。我国也非常重视多相流的研究,许多高等院校及研究单位都有多相流研究室或实验室。

由以上讨论可见,目前国内外对于液—固两相流的研究极为重视,它已成为当今流体力学研究中最具挑战性的前沿领域之一。

二、液—固两相混合物的分类

由于液—固两相混合物的组成、内部结构及状态的复杂性,至今尚无统一的分类标准。目前研究者们根据各自的观点所提出的分类方法主要有如下四种:

1. 按混合物的组成分类

(1) 牛顿型均匀混合物

该混合物中的颗粒尺寸很小,其体积浓度很低且均匀地分布在液相中,形成一种具有牛顿流变性的稀悬浮体。早在本世纪初,Einstein^[3]就开拓性地研究了这类细颗粒稀悬浮体的有关问题,他应用统计物理理论与平衡系的统计性质,从理论上导出了颗粒布朗扩散系数的计算公式。随后^{[4][5]}又研究了少量细颗粒的存在对混合物有效粘度的影响,导出了有效粘度 η_e 的表达式

$$\eta_e = \eta(1 + 2.5C + O(C^2)) \quad (1.1)$$

式中 η ——液相实际粘度;

C ——固相颗粒体积浓度。

式(1.1)说明,对于 $C \ll 1$ 的极稀微粒混合物,相当于其粘度增大 $(1 + 2.5C)$ 倍的单相液体。这些成果,为后来的细颗粒低浓度悬浮体研究奠定了理论基础。

(2) 非牛顿悬浮体

这类悬浮体的特点是其固相颗粒尺寸很小、浓度较高、颗粒与液相一般不发生相对运动,

如泥浆、染料、纸浆等等均属此类。从力学研究的角度,这类混合物完全可以视为一种单相连续介质——非牛顿液体。一般地,非牛顿液体的应力张量可表示如下:

$$\mathbf{T} = \eta_a(\mathbb{II})\mathbf{A}_1 \quad (1.2)$$

式中 \mathbf{A}_1 —— 一阶 Rivlin-Ericksen 张量;

η_a —— 视粘度,为 \mathbb{II} 的函数;

\mathbb{II} —— \mathbf{A}_1 的第二不变量, $\mathbb{II} = \left[\frac{1}{2} \text{tr} \mathbf{A}_1^2 \right]^{1/2}$ 。

(3) 牛顿液—固两相混合物

这类混合物中的固相颗粒尺寸较大,其浓度呈非均匀分布且存在相间滑移。颗粒间的相互碰撞、颗粒与壁面之间的作用、绕流阻力及外力等等都对混合物的流动规律具有很大影响,不容忽略。显然,对这类混合物的流动问题进行研究所遇到的困难将远远超过上述非牛顿液体流动。

(4) 非牛顿液—固两相混合物

近年来,人们发现在水中加入一定数量的细颗粒后形成的非牛顿浆体,可以在较低的流速下正常地输运浓度较高的粗颗粒物料而不会发生淤积。另外还发现,在水中加入某些高分子聚合物,可以有效地减少管道中混合物流动阻力。这便是目前人们非常关注、努力探索的减阻问题。所有这些,给我们提出了一个很有价值,然而又是极为复杂的研究课题——非牛顿液—固混合物的流动。

2. 按颗粒尺寸大小分类

Kazanskij^[6]按颗粒直径 d_p 的大小将液—固混合物分成如下几种:

(1) $d_p < 40 \mu\text{m}$, 当浓度较小时属于牛顿液体;

(2) $d_p < 40 \mu\text{m}$, 当浓度较高时属于非牛顿液体;

(3) $40 \mu\text{m} < d_p < 150 \mu\text{m}$, 为拟均匀或不均匀混合物,只能在紊流中输运。颗粒运动受液相粘滞作用影响;

(4) $150 \mu\text{m} < d_p < 1.5 \text{mm}$, 为不均匀混合物。只有紊流输运。颗粒的运动形式主要为跳跃、悬浮、沙垅及散射;

(5) $d_p > 1.5 \text{mm}$, 为不均匀混合物,颗粒的运动形式主要为滑动与滚动。

3. 按颗粒雷诺数 Re_p 分类

定义颗粒雷诺数为

$$Re_p = d_p u_p / \nu \quad (1.3)$$

式中 u_p —— 颗粒的沉速;

ν —— 液相运动粘度。

按 Re_p 的大小可将液—固混合物分成:

(1) $Re_p < 0.02$, 为非牛顿流体的含颗粒浆体;

(2) $0.02 < Re_p < 2.0$, 为牛顿流体的含颗粒浆体;

(3) $2.0 < Re_p < 525$, 为有沉淀的颗粒悬浮体,颗粒无跳跃运动;

(4) $Re_p > 525$, 为有沉淀的颗粒悬浮体,颗粒具有跳跃运动。

4. 按固相体积浓度分类

(1) 固相体积浓度很小时 ($C \ll 1$), 液—固两相流动为水力学中的沉积问题;

(2)中等浓度时为液—固相混合物悬浮流；

(3)固相体积浓度很大时为流经多孔介质的渗流问题。

在以上四种分类方法中,作者倾向于第一种方法,本书将以此为线索展开讨论。

对于第一种液—固混合物——牛顿型均匀悬浮体的研究目前已比较深入,本书不再对其进行论述。有关内容可在 Batchelor^[7]及 Happel 和 Brenner^[8]等的著作中查到。温景嵩^[9]曾将其作为一门与流体力学及胶体科学交叉的新兴学科——悬浮体力学作过较详细的综述。

非牛顿悬浮体虽然在细观结构上为一种两相混合物,但由于颗粒在液相中具有很好的均匀悬浮性质,因此,从力学研究的角度完全可将其视为一种单相连续介质——非牛顿液体。江体乾^[10]、范椿和陈文芳^[11]、韩式方^[12]等曾对非牛顿流体力学研究概况作过详细论述,这里不再赘述。

对于牛顿液—固及非牛顿液—固混合物的研究远比上述两种悬浮体的研究复杂得多,因为它除了要克服求解两相流控制方程所遇到的数学困难外,还要解决一些基本理论上的难题。例如,理论模型的建立、方程的封闭等等。下面我们将针对这些问题来论述液—固两相流的研究概况,并对某些有争议的观点提出作者的看法。

三、液—固两相流研究概况

1. 理论研究

液—固两相流与气—固两相流在细观结构、相间作用及颗粒相运动机理等方面有许多共同之处,没有必要也不可能将反映这些共性的基本理论模型区分开来。在此,我们姑且将其统称为两相流理论模型。

两相混合物的流动不仅存在各相内部的一些复杂力学特性,而且还存在各相间作用。时至今日,两相流的许多关键性问题仍不甚清楚,争议颇大,例如固相颗粒间的相互作用机理、固相边界条件等。正是由于这些悬而未决的难点,严重地阻碍了液—固两相流研究的进展。

两相流理论模型研究的早期尝试性工作大致是从 40 年代末开始的。几十年来,人们根据不同的观点及假设建立了不同的两相流模型。关于两相流模型分类方法目前还很不统一。笔者倾向于将其分成两大类共五种理论模型,各模型及特点如表 1.1 所示。

表 1.1 两相流基本模型

类别	颗粒相模型	特 点	大致年代
离散模型	单颗粒动力学模型	不考虑颗粒对流体流动的影响。	40 年代末
	颗粒轨迹模型	考虑颗粒对流动的影响,考虑了相间耦合,粗略地考虑了紊流扩散。	70 年代中
连续介质模型	扩散模型	不考虑颗粒对流体流动的影响,相间相对运动等价于流体的扩散漂移。	60 年代初
	单流体模型	部分地考虑了颗粒对流体流动的影响,不考虑相间相对运动。	70 年代
	双(多)流体模型	全面考虑颗粒对流体流动的影响、相间相对运动及相间作用。	70 年代

(1) 单颗粒动力学模型

该模型认为固相颗粒的存在对液(气)相流动无影响,且固相只是作为彼此独立的单个颗粒在已知流场中作稳定、规则的运动。因而可根据单颗粒在流场中的受力分析建立固相运动方程。

最早的单颗粒动力学模型只考虑了重力及液(气)相对颗粒的阻力作用,而且假设颗粒阻力服从 Stokes 定律。Tchen^[13]改进了单颗粒动力学模型。在模型中除了考虑重力与阻力外还考虑了虚质量力、压力梯度及 Basset 力。继 Tchen 之后,随着对单颗粒在流场中动力学行为研究的不断深入,单颗粒动力学模型得以逐步改进,除了上述诸因素外在方程中还考虑 Magnus 力、Saffman 力、热泳、电泳、光泳等作用力的影响。

单颗粒动力学模型是一个极为粗糙的简化模型。一方面,由于模型的简单而被广泛应用。直到近期在管道输运^{[14][15]}、燃烧射流^{[16][17]}等领域,该模型仍是常用模型之一。另一方面,由于该模型过于粗糙,使其与许多实际两相流动问题不符。例如:Tchen^[13]在早期的研究中从对单颗粒在周期性振荡的流场中运动分析出发,应用 G. Taylor 关于均匀各向同性湍流扩散的统计分析方法,推导出颗粒湍流扩散系数 D_p 与流体湍流扩散系数 D 之间的关系。后来 Soo^[18]又从遭遇概率的概念出发,对上述关系进行了修正。按照他们所得出的结果应有: $D_p/D < 1$,即颗粒的脉动恒小于流体的脉动,而且颗粒越大其脉动越小。然而,在许多实验中却发现与之相反的结果。这完全是由于单颗粒动力学模型本身的缺陷所致。首先,颗粒对流场无影响的假设实质上是要求颗粒细小且浓度极低($C \ll 1$);另外,由于模型中的阻力、压力梯度力及 Saffman 力等均是在低颗粒雷诺数条件下得到的,所有这些假设都对该模型的应用附加了苛刻的限制条件。因此,在使用单颗粒模型时必须小心谨慎,否则很有可能导致错误的结果。

(2) 颗粒轨迹模型

该模型将流体相视为连续介质,而将颗粒群视为按一定分布存在于液(气)相中的离散介质。在 Euler 坐标系中考察流体的运动,而在 Lagrange 坐标系中考察颗粒群的运动。颗粒受流体及其他因素的作用沿其自身的轨迹运动,而颗粒对流体的各种复杂作用则作为一个附加的源项耦合进流体的基本方程中。将流体运动的 Euler 方程与颗粒运动的 Lagrange 方程进行耦合求解,得到流体的速度场与颗粒的运动轨迹以及轨迹上任意点的速度。然后采用适当的平均方法求得颗粒相的浓度场与速度场。

颗粒轨迹模型是 Crowe 等^{[19][20]}以气体—液滴两相流动为背景提出来的。与单相流体动力学基本方程相比只是在方程中多了一个附加的源项——流体与颗粒相互作用项。该模型较完整地考虑了颗粒与流体之间的耦合作用,较之单颗粒动力学模型更为完善,更加接近两相流动的实际情况。该模型较多地被用于燃烧射流、管流等气—固两相流动问题,例如樊建人、岑可法^[21];Tsuji 等^[22];Durst 等^[23]在这方面做了许多工作。

颗粒轨迹模型在研究颗粒群的运动时,实际上是以各颗粒沿自身轨迹运动而互不干扰假设为前提的,这说明该模型只适用于颗粒浓度很小的情况;该模型的另一个实质性假设条件是:沿各轨迹的颗粒数流量为常数。这意味着该模型忽略了湍流扩散效应,与实际情况是不相符的。为弥补这一不足,Jurewicz^[24]首先建议引入漂移速度及漂移力对颗粒轨迹模型加以修正。随后,Smith^[25]阐述了颗粒紊流漂移速度与漂移力的概念及估算方法,并建立了相应的修正模型。另外,Boysan 等^[26]将颗粒的速度及轨迹都视为随机变量,应用统计平均的方法来处理颗粒的紊流扩散。岑可法和樊建人^[17]提出了一种新的脉动频谱随机轨迹模型。该模型充分考虑了紊流脉动频谱和强度对颗粒群运动的影响;考虑了不同颗粒尺度的组分对紊流扩散

的影响。

(3) 扩散模型

假设离散颗粒在统计意义下为一种连续介质——拟流体,并用连续介质理论来研究颗粒介质的运动。承认颗粒相与流体之间的相对运动,但认为这种相对运动完全是由于颗粒相对于流体的紊流扩散所致。这一观点的本质是将多组分单相流的概念直接推广应用于多相混合物。

混合物扩散理论的基本假设是:颗粒之间无相互作用,任一颗粒在流体中作与其他颗粒无关的布朗热运动。显而易见,扩散理论也只能适用于浓度极低、颗粒尺寸很小的情况。

扩散模型是 60 年代逐渐发展起来的。60 年代初 Hianze^[27], Marble^[28], Murray^[29] 等根据各自的假设推出了颗粒悬浮体的基本方程,形成了扩散模型的初步概念。随后 Soo^[30] 明确地提出了拟流体假设,建立了较为完善的两相流扩散模型。后来, Drew^[31] 对该模型作了更加细致的论述。

扩散模型是最早的两相流连续介质模型,它标志着对于两相流模型进行系统深入研究的开始。该模型最大特点是将流体与固体间的相对运动与扩散漂移联系起来,大大地简化了两相流动问题,因此可以得到一些简单流动问题的近似解析解。例如: Marble^[28] 在考虑 Stokes 阻力、忽略颗粒体积的情况下,用摄动法研究了均匀颗粒悬浮体沿平板的层流边界层流动。其结果为:①颗粒的速度普遍大于流体的速度,即颗粒运动一般都超前于流体。他认为,这一现象是由于颗粒的惯性所致;②在靠边界层外缘处的颗粒浓度较来流有所增加,而在靠近壁面处明显减小。Soo^[32] 在颗粒运动方程中引入了布朗运动的扩散项;假设流体相的流场为已知且不受颗粒的影响;在处理边界条件时考虑了颗粒与壁面间的滑移。其结论为:在板的前缘,颗粒速度一般大于流体速度;在远离前缘处,颗粒速度小于流体速度;在壁面附近颗粒浓度分布出现极大值。Lee^[33]、Einav 和 Lee^[34] 的实测结果表明:除了在平板前缘的壁面附近处颗粒运动超前于流体外,在其它区域内的颗粒速度均小于流体速度;离壁面越远颗粒浓度单调增大。Lee 认为,这是由于升力的作用而使颗粒向远离壁面方向运移。

(4) 单流体模型

该模型认为,固相为不同尺寸的颗粒所组成的拟流体。各相的紊流扩散系数相等;所有颗粒组分的时均速度与流体速度相等。由于假设颗粒与流体间无相对运动,颗粒相不存在独立的动量方程及能量方程,只需给出各颗粒组分的连续性方程。

单流体模型是最简单的两相流连续介质模型,它是由 Spalding^[35] 于 70 年代初提出的。该模型多用于燃烧多相流问题的数值模拟。由于它过分简化,与实际情况相差较大,其适用范围受到了很大限制。

(5) 双流体模型

该模型假设颗粒相为拟连续介质。在数学处理上,颗粒相的所有动力学、热力学参数均与流体相一样,为空间的连续分布函数。因此,连续介质理论及数学处理方法同样适用于颗粒相。在动力学规律上,双流体模型不仅承认各相的紊流扩散而且更详细地考虑了颗粒相之间以及颗粒与流体之间存在的时均相对运动;各相内部具有各自的动力学性质,如液相中的粘度、涡粘度;固相中的粒间碰撞、摩擦等;同时各相之间还具有耦合作用,例如阻力、升力等等。作为不同的连续介质,各相具有自己的守恒方程;而作为一个多相混合物体系,各相的守恒方程通过相间作用项来耦合。

根据不同的方法,可以得到各种形式不同的双流体模型及其基本方程。目前常见的有如下两种:

①混合理论基本方程

混合理论假设液(气)一固两相是重叠地存在于同一空间中。即,在空间的所有点上可以同时为流体与固体质点所占据;而且这些质点在空间是连续的,这样就可以应用推导单相流体基本方程的方法直接写出两相流基本方程,而不必考虑各相在空间实际存在的离散性与随机性。

混合理论的基本思想首先是由 Bowen^[36]提出的,而其理论的进一步完善并被广泛地引入两相流研究中大概是在 80 年代初。Passman 等^[37]及 Nunziato^[38]在他们的文章中均对混合理论及其应用作过系统的论述。

②时一空平均方程

上述混合物方程只强调了固相拟流体假设,却忽略了实际上流体与固相介质在空间分布上的离散性与在时间分布上的随机性。如果考虑到这一点,拟流体假设只能在某种统计平均概念下才有意义。这就是时间—空间平均方程的基本思想。

时空平均的概念是 Saffman 等^[39]针对多孔介质流动问题所提出的。Drew^[40]曾详细地评述了有关方面的研究工作,并推导了流—固两相混合物的时一空平均方程。Joseph 等^[41]进一步对混合物方程与时一空平均方程进行了比较与评价。

双流体模型较为全面地考虑了液(气)一固混合物的相间相对运动及相间作用等两相流的基本特点。它从物理基本守恒定律出发,通过较严格的数学推导,建立了两相流基本方程,这组基本方程可以用统一的方法处理流体及颗粒相,便于进行数值模拟。

近年来,在两相流的数值模拟中,双流体模型显示出了它的突出优势,其应用越来越广泛。例如:气体—颗粒的两相射流^[42]、气体—尘埃两相绕流^[43]、气体—固体颗粒在管道中的流动^[44]、液—固稀悬浮体管流^[45]、煤粉—空气两相流^[46]等等。值得特别注意的是,在目前所收集到的有关资料中,几乎所有数值模拟都是针对极稀的细颗粒气—固或液—固混合物而进行的。之所以如此,除了这种极稀细颗粒悬浮体本身的实际意义外,另一个重要原因就在于双流体模型在实际应用中所存在的困难:①方程封闭的困难;②对强非线性耦合方程组求解的困难。尽管如此,双流体模型仍不失为一个全面考虑两相流基本特点、具有重要应用价值及发展前景的模型。

2. 应用问题研究

如前所述,液—固两相流所涉及的应用领域非常广泛,其研究内容之多绝非本文所能概括得了的。在此,我们仅就目前有关液—固两相管流研究的共同特点作一简述。

(1)经验性

目前,在实际液—固流动问题的研究中,经验研究方法仍占主导地位。在管道水力输运工艺中,液—固两相混合物流动的水头损失是对输运系统进行合理设计与正确操作的关键参数。为解决水头损失的预测问题,人们以大量的实验研究为基础,提出了许多不同的经验相关式。一方面,这些相关式为工程设计人员提供了选择的余地,解决了工程实际中某些具体设计与计算问题。另一方面,由于经验相关式过多,以至于造成目前的繁杂与混乱局面。对此,可以从如下几方面略见一斑:

①仅对水头损失数据的处理方法就有七种—— $\Delta P/\Delta P_F$; $\Delta P_f/\Delta P_{ff}$; $\Delta P_f/\Delta P_{ff}$; $\Delta P - \Delta P_F$; $(\Delta P - \Delta P_F)/\Delta P_F$; ΔP_f ; ΔP_f 。这里

ΔP —— 混合物流动的总压降;

ΔP_f —— 摩阻压降(其中包括固相滞留效应所产生的压降);

ΔP_f —— ΔP_f 中消除滞留效应影响的摩阻压降;

$\Delta P_F, \Delta P_{FF}$ ——单相液体流动时的总压降与摩阻压降。

②关于混合物密度的定义有两种:质量平均密度 $\rho_M = 1/\sum(C_{wi}/\rho_i)$ 和体积平均密度 $\rho_V = \sum C_i \rho_i$, 其中 C_{wi}, C_i 分别为各相的重量与体积浓度。

③对于各摩阻系数的关联形式更是千差万别,完全相同的问题就有若干种表达形式不同、计算结果各异的相关式。

另外,关于临界流速、极值流速的计算也很不统一。面对如此众多的经验相关式,工程技术人员往往感到难于选择。因此,人们不得不花费很大的代价对现有经验相关式的适用性、准确性进行评价。在以往各届国际水力输运学术会议上都有相当数量的评价或综述性文章^[47~50]。

另外,为了获得液—固两相管流的速度与浓度分布等信息,探讨两相流动的机理。一些研究者针对具体实际问题,提出了不同的半经验半理论模型。这些模型可以用简单的数学方法进行求解,而其中的某些参数则由实验来确定。虽然这些半经验模型可以获得液—固两相流的某些细观信息,并可以用解析法推导出压力降计算公式,但由于模型过分简化,所得结果一般与实际情况相差甚远。

(2) 近似性

大量简化、高度近似是目前研究液—固两相流的另一大特征。在现今所能够查到的有限的理论研究文献中,研究者们无一例外地都对液—固两相流基本方程作了大量简化,其中最为关键的简化条件为:

①假设颗粒的浓度分布满足扩散方程;

②忽略颗粒间的相互作用;

③假设固相压力与液相压力相等;

④人为地规定固相边界条件。假设固相颗粒与壁面无滑移,或者令固相与壁面的滑移速度为某一常数。

显而易见,假设条件①、②实质上对模型适用范围作了严格的限制——在该假设条件下的模型只能适用于低浓度、细颗粒的液—固混合物;而假设条件③、④则明显与实际情况不符。

综上所述,目前液—固两相流的研究还很不成熟,其研究方法大多是经验性的。虽然经验研究方法是目前解决某些工程设计与计算问题重要的实用方法,但却存在许多明显不足。例如:由于缺少必要的理论分析,其研究在某种程度上还带有较大的盲目性;为寻求相关规律所作的实验工作之巨是十分惊人的;经验相关式种类繁多,容易引起混乱;在不同实验条件下所得到的各相关式其通用性、可靠性及计算的准确性均较差;无法求得混合物流动的速度分布、浓度分布等场信息。所有这些,充分说明深入开展液—固两相流基本理论研究的重要性与迫切性。

四、双流体模型的封闭问题

如上所述的双流体模型一般只给出了其基本方程的结构,方程的封闭还有待于对各模型的进一步研究,这是两相流研究中最关键,也是最为困难的问题之一。

双流体模型中有待研究的模型有:①相间作用模型(包括粘滞阻力、升力);②液相与固相压力;③液相偏应力张量;④固相偏应力张量。

1. 阻力

在上述各模型中,对于流体与颗粒间阻力的研究历史最长,相对而言比较成熟。19世纪

中叶, Stokes(1851)在缓慢流动的假设条件下,研究了颗粒绕流问题,建立了著名的 Stokes 定律。自此之后 100 多年间,该问题一直是流体力学领域的一个重要研究课题。

目前,关于单颗粒在牛顿流体中阻力的研究成果很多,但是对于颗粒在非牛顿流体中的阻力研究却很少。

2. Magnus 力

所谓 Magnus 力是由于颗粒旋转而造成的垂直于颗粒与流体相对速度(u_r)方向的升力。用闪频摄影法测量煤粒、铝片、石英球等在射流中旋转速度的结果^[17]表明,颗粒在射流中的旋转速度为 1000 r/s 左右。因此,在高速射流问题中 Magnus 效应是很重要的。但激光全息方法测量有固定边界的两相流的结果表明,在流场中大部分区域内颗粒受流体粘性制约并不旋转^[46]。可以预测,液相粘性越大颗粒越不易旋转。因此,对于液相粘度较高的液-固混合物而言,有理由忽略 Magnus 力。

3. Saffman 力

当固体颗粒在速度梯度较大的流场中运动时,将会产生一个垂直于颗粒与流体相对速度方向的升力。Saffman^[51]在低颗粒雷诺数条件下研究了平面剪切流场中球形颗粒的绕球流动,用奇异摄动法求得了不同于 Magnus 效应的升力。它不是由于颗粒的旋转所产生的,而是由于流场中存在速度梯度造成颗粒两侧压力不等所产生的,其大小与 $|u_r|$ 成正比。

近年来,Saffman 升力的研究作为一个相对独立的理论课题已经开展起来^[52],但是作为液-固两相流的封闭模型却仍有许多问题没有解决。目前,在液-固两相流研究中所使用的 Saffman 升力模型只适用于颗粒雷诺数较小的情形,而对颗粒雷诺数较大的情况还没有适当的计算公式,尤其是对于颗粒群在液相中所受升力的研究,至今尚无突破性进展。

4. Brownian 力

颗粒在流体中作随机运动,由于其浓度梯度的存在而产生一种 Brownian 扩散效应。一般将这种作用于颗粒上使之发生扩散的力称为 Brownian 力(或漂移力)^{[31][53]}。Brownian 力与固相浓度梯度成正比,其方向沿浓度梯度负方向。

5. 固相压力

自 40 年代起 Lamb^[54]就曾对该问题进行过研究。时至今日,虽已有半个多世纪的历史。但目前对于固相压力的基本概念仍有争议,其模型也很不统一。为简化起见,在研究实际液-固两相流动问题时,一般都假设固相压力 p_s 与液相压力 p_f 相等。这一假设显然是十分粗糙的。事实上,固相压力与液相压力一般是不相等的,而造成这种相间压力差($p_f - p_s$)的机理非常复杂。目前,大多数研究者认为,相间的相对运动是造成相间压力差的主要原因。但是也有些研究者将颗粒间的相互作用解释成固相压力的一部分^{[55][56]}。笔者认为这种解释是不恰当的。因为,所谓固相压力应该与液相压力相对应。只有在这种情况下,我们所说的相间压力差才有确切的物理意义。众所周知,液相压力是指液体应力张量中的各向同性部分。相应地,固相压力也应该只是固相应力张量中的各向同性部分,而颗粒间的作用则属于其中的偏应力部分。如果将其笼统地作为“固相压力”,容易造成概念上的混乱。

有两种截然不同的相间应力差模型: Prosperetti 等^[57]根据无粘流体绕球流动推出

$$p_s - p_f = -\frac{1}{4}\rho_f(u_f - u_s)^2 \quad (1.4)$$

在此, $p_s \leq p_f$ 。其他研究者^[40,58,59]则给出了与之不同的模型

$$p_s - p_f = \alpha_0 (u_f - u_s)^2 \quad (1.5)$$

其中, α_0 为一非负的常数。虽然不同研究者所得到的常数 α_0 值不同, 但却有一个共同的结论: $p_s \geq p_f$ 。实验观测及进一步理论分析结果^[59]表明, 式(1.5)所反映的定性规律是合理的。

6. 固相偏应力张量

在液一固混合物, 尤其是固相浓度较高的混合物中, 固相颗粒之间的相互作用对混合物的流动具有非常重要的影响。早在 50 年代, Bagnold^[60] 就已通过实验证实了这一点, 并明确提出“固相应力”的概念。但是, 在此之后的几十年间固相应力的研究迟迟未能取得较大进展。迄今为止, 在液一固两相流研究中对固相应力的传统处理方法为: ①忽略固相应力; ②定义一固相粘度 μ_s 并假设它为常数, 然后根据 Einstein 的有效粘度导出 μ_s 与液相粘度的简单代数关系^[58]; ③建立固相应力的经验模型^[45]。以上处理方法均具有很大局限性, 所以液一固两相流的研究一直被局限于低浓度、细颗粒混合物范围内。

直至 80 年代, 固相应力的研究才开始受到人们的充分重视。Ogawa 等^[61]、Shen^[62]、Savage 与其合作者^[63~65] 建立了各自不同的固相应力模型。然而, 所有这些模型均未被用于解决实际液一固两相流问题。其原因除了各模型的合理性还有待于进一步检验外, 另一个重要原因就是这些模型过于复杂, 不便应用。

7. 固相边界条件

确定固相颗粒的速度、浓度边界条件是液一固两相流研究的一个亟待解决而又十分困难的问题。目前还很少有人对此进行研究。为回避这一难点, 通常的作法是人为地规定在管壁处的固相滑移速度为零^[58]或某一常数。显然, 这些处理方法是极不合理的。

第二节 液一固两相流基本概念

一、固相颗粒的基本特征

1. 主要物理特征

(1) 材料密度

颗粒的材料密度是颗粒在密实状态下, 单位体积所具有的质量, 在此以 ρ_s 表示。

(2) 颗粒的弹性

在颗粒的碰撞过程中其弹性以恢复系数

$$e = \left| \frac{u_2}{u_1} \right| \quad (1.6)$$

来度量。式中的 u_1 和 u_2 分别表示两颗粒碰撞前和碰撞后的相对速度。在理想情况下, $e = 1$, 表示颗粒碰撞后完全恢复变形, 机械能没有损失, 这种情况称为弹性碰撞。 $e = 0$ 的极限情况称为塑性碰撞(或完全非弹性碰撞), 即两颗粒碰撞后不再分开, 碰撞引起的变形完全保留下来。对于实际颗粒的碰撞, $0 < e < 1$, 称之为非完全弹性碰撞。在此碰撞过程中必然伴随着机械能的损耗, 它对于颗粒运移规律的影响是不容忽略的。

2. 几何特性

(1) 当量粒径

在实际液一固两相流中, 颗粒的形状一般很不规则, 对其大小进行直接测量是非常困难