

固液两相流基本理论 及其最新应用

倪晋仁 王光谦 张红武 著

科学出版社

1991

内 容 简 介

本书根据作者在固液两相流方面的研究成果撰著而成。书中首先叙述了两相流的一般概念及基本理论，然后逐章分别介绍了液相流速分布与阻力特性，两相流的流速分布，两相流中固相悬浮颗粒的浓度分布，颗粒流的运动理论等。本书内容新颖，概念清晰，论述简明扼要。

本书可供从事两相流研究、工业固体物料输送、水利及环境科学等工作的科技人员和高等院校有关专业的师生参考。

固液两相流基本理论及其最新应用

倪晋仁 王光谦 张红武 著

责任编辑：杨家福 张思敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16号

邮政编码：100707

河南第一新华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1991年3月第一版 开本：787×1092 1/32

1991年3月第一次印刷 印张：12 1/2

印数：0001—2000 字数：275000

统一书号：ISBN 7-03-001947-4/TV·2

定价：7.00元

序

由固体和液体组成的两相流是在水利建设、工业输送和环境科学中经常遇到的一种流体。两相流运动的理论和应用得到不同部门的广泛关注和重视。在两相流中，固体和液体是相互作用的，固体颗粒在水流的作用下发生运动，而固体颗粒的存在又反过来对水流的紊动结构产生影响。由于问题复杂，对其认识还存在不少分歧，完整论述这些问题的著作尚不多见。本书作者运用流体力学、分子运动论和能量耗散极值假说等基本理论，结合大量实测资料，对两相流动中的流速分布特性、阻力特性、固体颗粒浓度分布特性等问题，进行了分析和探讨，取得了不少有意义的成果，如对各家流速分布和浓度分布公式统一表达方式的研究，对浓度分布的两种类型在力学机理上的探讨等，都具有一定的特点，这些对于两相流理论的研究也有参考意义。本书的大部分内容已在国内外学术刊物和会议上发表过，得到了学术界的肯定和好评。这次经过整理和补充，又增强了的系统性和条理性，因此本书将更有助于供从事两相流研究的工作者参考和利用。本书的作者是三位年轻的科学工作者，他们思想活跃、勤奋努力，相互之间密切配合和协作，因此在不长的时间里，取得了成绩。新生力量的迅速成长，是十分令人高兴的。

张 仁

1989年9月于清华园

前 言

固液两相流问题是一个在众多学科中都会遇到的问题，因而两相流的理论和应用近年来得到了人们越来越多的关注。本书着重探索的是如何将理论与实际问题相结合，并最终找到解决问题的途径。这就决定了本书在写作方法上具有如下特点：(1)全书以一般概念和基本原理作为开头，以便为后面几章提供理论依据；其后对两相流理论及其应用的讨论则从单一液相流体开始，以固液两相流为主要线索；最后以一种特殊的两相流——颗粒流结束全书。(2)在每一章的第一节，我们都以引言的方式尽可能全面地指出该章致力于解决的问题之研究现状、主要困难及可能解决的途径，并且在其后的几节逐个运用两相流的基本原理解决这些问题。(3)内容选择力求创造性和新颖性，以启发读者运用同类原理解决实际问题，而不过多地纠缠问题的各个细节。这种写法是作者的一种尝试。如果这种形式能够对读者在这方面有所启发的话，本书的目的也就基本达到了。

本书的许多内容都曾先后得到我们的导师黄万里、夏震寰、钱宁、张仁、费祥俊教授及李保如、钱意颖等高级工程师的指导。清华大学惠遇甲教授和中国科学院力学所刘大有副研究员对本书提出了宝贵意见。张仁教授为本书作了序。此外，在本书的出版过程中还得到了梅和莹、刘杰等同志的大力帮助。在此，作者对他们表示衷心的感谢。

由于水平有限，书中欠妥和错误之处在所难免，真诚欢迎读者批评指正。

目 录

序	(i)
前言	(iii)
第一章 两相流研究中的一般概念及基本理论	(1)
1.1 液相流体的紊动特性	(1)
1.1.1 紊流的附加应力	(1)
1.1.2 液相流体能耗图形	(3)
1.2 两相流理论研究的发展概况	(6)
1.3 颗粒在流体中的受力分析	(17)
1.3.1 细小悬浮颗粒在均匀紊流中的运动	(18)
1.3.2 升力	(20)
1.3.3 颗粒受力的惯性影响	(23)
1.3.4 多颗粒存在时颗粒的受力	(25)
1.4 两相流的连续介质理论	(28)
1.4.1 两相流瞬时局部的基本方程	(28)
1.4.2 两相流的体积平均方程	(35)
1.4.3 两相紊流的本构方程	(46)
1.5 两相流的运动理论	(53)
1.5.1 Boltzmann 方程和输运方程	(53)
1.5.2 碰撞项	(62)
1.5.3 讨论	(65)
1.6 能耗率极值原理	(71)

参考文献	(73)
第二章 液相流体流速分布与阻力特性	(83)
2.1 引言	(83)
2.1.1 二维均匀紊流的半经验理论	(83)
2.1.2 混合掺长与流速分布	(88)
2.1.3 流速分布与尾流函数	(91)
2.1.4 液相流体的阻力特性	(93)
2.2 能耗率极值原理与二维流速分布	(95)
2.2.1 $\epsilon(y)$ 和 $u(y)$ 相互独立的情形	(96)
2.2.2 $\epsilon(y)$ 和 $u(y)$ 不独立的情形	(97)
2.3 矩形明槽中断面紊流的流速分布	(106)
2.3.1 边壁对水流结构影响的定性认识	(106)
2.3.2 最大流速在中垂线上的位置与宽深比 的关系	(109)
2.3.3 剪力沿床面、壁面的分布	(111)
2.3.4 光滑边壁时矩形断面的流速分布	(115)
2.4 阻力与边壁影响	(120)
2.5 松散边界床面糙率的模拟	(127)
2.5.1 糙率随机性的机理及问题的简化	(127)
2.5.2 床面颗粒随机变化的两种模拟	(128)
2.5.3 两类糙率模式的建立	(136)
参考文献	(140)
第三章 两相流的流速分布	(144)
3.1 引言	(145)
3.1.1 实测两相流流速分布与尾流函数	(146)
3.1.2 两相流的两种实用模式及其关系	(149)
3.2 两相流流速分布与悬浮颗粒浓度分布	

的关系·····	(155)
3.2.1 关于两相流流速分布的影响因素·····	(155)
3.2.2 两相流流速分布的结构形式推导·····	(157)
3.2.3 尾项表达式的确定·····	(160)
3.2.4 分段法在研究流速分布时的应用·····	(166)
3.3 能耗率极值原理与含粗颗粒的两相流 流速分布·····	(173)
3.3.1 悬浮颗粒对流速分布影响的单向性分析···	(173)
3.3.2 运用能耗率极值原理对含粗颗粒的两 相流运动分析·····	(176)
3.4 两相流中固相颗粒的速度分布·····	(187)
3.4.1 颗粒的速度分布函数·····	(188)
3.4.2 颗粒速度分布·····	(189)
参考文献·····	(193)
第四章 两相流中固相悬浮颗粒的浓度分布 ·····	(195)
4.1 引言·····	(195)
4.1.1 扩散理论·····	(197)
4.1.2 混合理论·····	(203)
4.1.3 能量理论·····	(206)
4.1.4 相似理论·····	(208)
4.1.5 随机理论·····	(209)
4.2 悬浮颗粒浓度垂线分布的类型及力学 机理·····	(214)
4.2.1 普朗特假设和垂向脉动强度·····	(215)
4.2.2 对于两种悬浮颗粒浓度分布类型的 分析·····	(220)
4.2.3 稀相固体颗粒浓度分布的运动理论·····	(227)

4.3	悬浮颗粒浓度Ⅰ型分布的统一公式	(238)
4.3.1	浓度垂线分布的统一公式	(239)
4.3.2	理论公式与实测资料之比较	(245)
4.3.3	关于统一公式之显函数形式的讨论	(251)
4.3.4	高浓度时悬浮颗粒的垂线分布	(254)
4.4	冲泻质与床沙质的概念及其划分界限的分析	(256)
4.4.1	问题的提出	(257)
4.4.2	床沙质与冲泻质的划分界限分析	(262)
4.5	悬浮颗粒级配组成与紊速场的关系	(269)
4.5.1	物理模式	(269)
4.5.2	悬浮颗粒级配曲线的理论计算	(277)
4.6	悬浮颗粒输移率	(278)
4.6.1	物理模式	(279)
4.6.2	讨论	(283)
	参考文献	(289)
第五章	颗粒流的运动理论	(294)
5.1	引言	(294)
5.2	颗粒流动特性和基本方程	(302)
5.2.1	颗粒分布函数	(302)
5.2.2	颗粒的碰撞传递特性	(307)
5.2.3	简单颗粒流运动理论的基本方程和本构关系	(312)
5.3	颗粒运动理论在 Couette 流动条件下的应用和比较	(322)
5.3.1	与分子运动论直接类比的分析方法	(323)
5.3.2	其它几家理论简介	(331)

5.3.3	各家理论的比较和验证	(339)
5.3.4	颗粒的弥散应力和总应力	(349)
5.4	颗粒流动理论的新发展：粗糙球和混合 流模型	(358)
5.4.1	粗糙球的运动模型	(359)
5.4.2	两组分混合颗粒流的运动模型	(370)
	参考文献	(386)

Contents

Chapter I Basic Concepts and Theories for Two-Phase	
Flows	(1)
1.1 Turbulent Characteristics of the Liquid	
Fluids.....	(1)
1.1.1 Additional Stresses due to	
Turbulence	(1)
1.1.2 A Brief Outline of Energy	
Dissipation	(3)
1.2 General Reviews on the Two-Phase	
Flow Studies	(6)
1.3 Force Analyses on Particles	(17)
1.3.1 Motions of the Fine Particles	
in Homogeneous Turbulent Flows	
.....	(18)
1.3.2 Lift Force	(20)
1.3.3 Effects of the Inertia	(23)
1.3.4 Force Analyses for Multiple-	
Particle Conditions.....	(25)
1.4 The Continuum Theory.....	(28)
1.4.1 Local Temporal Equations	(28)
1.4.2 Volumetric Mean Equations	(35)
1.4.3 Constitutive Equations for	
Two-Phase Turbulent Flows	(46)
1.5 The Kinetic Theory	(53)

1.5.1 Boltzmann Equation and Transportation Equation	(53)
1.5.2 The Collision Term.....	(62)
1.5.3 Discussions	(65)
1.6 Extremal Hypothesis of the Energy Dissipation Rate	(71)
References	(73)
Chapter 2 Vertical Velocity Distributions and Drag	
Characteristics for Liquid Fluids.....	(83)
2.1 Introduction	(83)
2.1.1 Semi-Empirical Theories for Two-Dimensional Uniform Flows	(83)
2.1.2 Mixing Length and Velocity Distributions	(88)
2.1.3 Velocity Distributions and Wake Functions.....	(91)
2.1.4 Drag Characteristics	(93)
2.2 Applications of the Extremal Hypothesis of Energy Dissipation Rate	(95)
2.2.1 The First Case	(96)
2.2.2 The Second Case	(97)
2.3 Velocity Profiles in Smooth Rectangular Open Channels	(106)
2.3.1 Effects of Boundaries on Flow Structures	(106)
2.3.2 Variations of the Maximum Velocity Location.....	(109)

2.3.3	Boundary Shear Stress	
	Distributions	(111)
2.3.4	Section Velocity Profiles.....	(115)
2.4	Drag and Boundary Effects.....	(120)
2.5	Roughness Analogy for Loose	
	Boundaries	(127)
	2.5.1 Mechanism and Simplifications	
	(127)
	2.5.2 Analogy of the Particle	
	Stochastic Variations at Bottom	
	(128)
	2.5.3 Development of Roughness	
	Model	(136)
	References	(140)
Chapter 3	Velocity Profiles in Two-Phase Flows	(144)
3.1	Introduction.....	(145)
	3.1.1 Measured Velocity Profiles and	
	Wake Functions.....	(146)
	3.1.2 Two Practical Models and Their	
	Relations	(149)
3.2	The Relation between Velocity	
	Distribution and the Suspended	
	Particle Concentration Distribution.....	(155)
	3.2.1 Basic Influencing Factors.....	(155)
	3.2.2 Formulation of the Velocity	
	Distribution	(157)
	3.2.3 The Wake Term Determination	
	(160)
	3.2.4 An Application of the Two-	

	Layer Model	(166)
3.3	Applications of the Extremal Hypothesis of Energy Dissipation	
	Rate on Flows with Coarse Particles ...	(173)
	3.3.1 Particle-Effect Analyses	(173)
	3.3.2 Analyses with the Extremal Hypothesis	(176)
3.4	Particle Velocity Profiles	(187)
	3.4.1 Particle Velocity Distribution Function.....	(188)
	3.4.2 Particle Velocity Profiles.....	(189)
	References	(193)
Chapter 4	Suspended Particle Concentration	
	Distributions in Two-Phase Flows	(195)
4.1	Introduction	(195)
	4.1.1 Diffusion Theory	(197)
	4.1.2 Mixture Theory	(203)
	4.1.3 Energy Theory	(206)
	4.1.4 Similarity Theory.....	(208)
	4.1.5 Stochastic Theory.....	(209)
4.2	Two Concentration-Distribution Patterns and Their Formation Cause	(214)
	4.2.1 Prandtl Hypothesis and Vertical Fluctuating Intensity	(215)
	4.2.2 Qualitative Analyses	(220)
	4.2.3 Quantitative Analyses.....	(227)
4.3	Generalized Formula on the Pattern-II Distributions	(238)
	4.3.1 Formulation.....	(239)

4.3.2	Test of the Formula	(245)
4.3.3	Discussions	(251)
4.3.4	Extensions to Hyperconcentrated Flows	(254)
4.4	Wash Load and Bed Material Load	(256)
4.4.1	Basic Concepts	(257)
4.4.2	Demarcation-Criterion Analyses	(262)
4.5	Particle-Size Distributions in Turbulent Flow Fields	(269)
4.5.1	Physical Model	(269)
4.5.2	Discussions	(277)
4.6	Particle Transport Rate.....	(278)
4.6.1	Basic Model.....	(279)
4.6.2	Existing Problems	(283)
	References	(289)
Chapter 5 The Kinetic Theory of Granular		
	Flow	(294)
5.1	Introduction	(294)
5.2	Flow Characteristics and Basic Equations.....	(302)
5.2.1	Particle Velocity Distribution Function	(302)
5.2.2	Collision and Transmission Characteristics	(307)
5.2.3	Basic Equations and Constitutive Relations	(312)
5.3	Applications of the Kinetic Theory on the Couette Granular Flow Conditions...	(322)

5.3.1	An Analogy to the Kinetic Theory of Molecules	(323)
5.3.2	Other Relevant Theories	(331)
5.3.3	Comparisons of Different Theories.....	(339)
5.3.4	Particle Dispersive Stress and Total Stress	(349)
5.4	The Recent Progresses in the Kinetic Theory of Granular Flow	(358)
5.4.1	The Kinetic Model for Rough Sphere.....	(359)
5.4.2	The Kinetic Model for Mixing Granular Flow	(370)
	References	(386)

第一章 两相流研究中的一般概念 及基本理论

1.1 液相流体的紊动特性

1.1.1 紊流的附加应力

液相流体的流态常分为层流和紊流，其判别参数用雷诺数 $Re \left(= \frac{uR}{\nu} \right)$ 表示， u 和 R 分别为流体的流速和水力半径， ν 则为运动粘滞系数。

无论是层流还是紊流，其不可压缩流的瞬时运动都可用 Navier-Stokes 方程（以下简称为 N-S 方程）

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = \rho \vec{g} - \nabla P + \nabla \cdot \vec{\tau} \quad (1.1)$$

和连续方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1.2)$$

描述。对于层流，各运动参量的瞬时与时均值是一致的，因此理论上连续方程和 N-S 方程已构成一个封闭的方程组，在数学上是可以求解的。对于紊流，其运动参量的时均值与瞬时值并不一样，后者是前者与其脉动量的代数和。按照时均准则，描述紊流时各运动量的统计平均情况，应将各量的瞬时值代入 N-S 方程后对方程再取平均，其结果就是雷诺方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}) + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) = \rho \bar{g} - \nabla P + \nabla \cdot (\tau + \sigma) \quad (1.3)$$

比较雷诺方程和N-S方程可以看出，雷诺方程比N-S方程增加了六个因素动而产生的附加雷诺应力，用应力张量表示，即

$$\sigma = -\rho \overrightarrow{v' u'}$$

由于取时均后，紊流的连续方程与层流时的形式一样，所以原来的封闭方程组就变得不封闭了。对新增的六个未知的雷诺应力项的表达就成了至今仍未解决的难题。

由雷诺方程和N-S方程相减得到的就是脉动运动方程。

在一些简单的情况下，雷诺方程可以得到简化，如对二维恒定均匀流，方程可以简化为

$$X + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial}{\partial y} (\overline{u' v'}) = 0 \quad (1.4)$$

在这种情况下，未知的雷诺应力 $\overline{u' v'}$ 的表达就成为以上问题的关键了，通常把总剪应力分为粘性剪应力和因素动产生的剪应力，即

$$\tau_{yx} = \tau_v + \tau_t = \mu \frac{du}{dy} - \rho \overline{u' v'} \quad (1.5)$$

忽略 τ_v 和 τ_t 中的任一项，就能分别得到紊流和层流所对应的剪力表达式。一般地，对常见的管流和二维明流来说， τ_{yx} 沿垂向或径向服从线性分布。以二维明流为例， τ_{yx} 可表达为

$$\tau_{yx} = \tau_0 \left(1 - \frac{y}{H} \right) \quad (1.6)$$

τ_0 为边壁剪切力， H 为水深。紊流剪切力沿水深各点所占总剪力的比例可由图 1.1 反映出来。因而，二维恒定均匀明流