

CAMBRIDGE

Principles of Gas-Solid Flows (I) 气固两相流原理 (上)

[美] Liang-Shih Fan Chao Zhu 著

张学旭 译 周力行 等 校

张
学
旭
译



科学出版社



气固两相流原理 (上)

Principles of Gas-Solid Flows (I)

〔美〕 Liang-Shih Fan Chao Zhu 著

张学旭 译

周力行 等 校



科学出版社

北京

图字: 01-2018-2942 号

内 容 简 介

本书分上下两册。上册主要涉及的是基本关系和现象,包括颗粒的尺寸和性质、固体颗粒碰撞力学、颗粒的动量传递和电荷转移、颗粒的传热学与传质学基础、气固两相流的基本方程,以及气固两相流中的本征现象。下册主要是选择了一些应用气固两相流原理的工业过程,进行系统的讨论与分析,主要包括气固分离、料斗和竖管流、密相流化床、循环流化床、固体颗粒的气力输送、流化系统的传热传质现象。

作为气固两相流原理的综合信息源,本书可广泛适用于诸多工程或应用科学领域,包括化学工程、机械工程、农业科学、土建工程、环境工程、航天工程、材料工程以及大气与环境科学。

Principles of Gas-Solid Flows, first edition (978-0-521-02116-6) by Liang-Shih Fan and Chao Zhu first published by Cambridge University Press 1998
All rights reserved.

This simplified Chinese edition for the People's Republic of China is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Cambridge University Press and China Science Publishing & Media Ltd. (Science Press) 2018

This book is in copyright. No reproduction of any part may take place without the written permission of Cambridge University Press and China Science Publishing & Media Ltd. (Science Press).

This edition is for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong SAR, Macau SAR and Taiwan Province) only.

此版本仅限在中华人民共和国境内(不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区)销售。

图书在版编目(CIP)数据

气固两相流原理. 上/(美)范良士(Liang-Shih Fan), (美)朱超(Chao Zhu)著; 张学旭译. —北京: 科学出版社, 2018.9

书名原文: Principles of Gas-Solid Flows

ISBN 978-7-03-058272-0

I. ①气… II. ①范… ②朱… ③张… III. ①气体-固体流动 IV. ①O359

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 159763 号

责任编辑: 刘信力 / 责任校对: 张凤琴
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 9 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2018 年 9 月第一次印刷 印张: 20 1/2

字数: 393 000

定价: 148.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

中译本序

此书原著主要作者范良士教授是世界著名的多相流反应工程专家及学者，长期从事颗粒流体系统的基础研究和工艺技术研发，他的研究工作跨越最基本的单颗粒输运及反应机理，实验室反应器设计，多相流测量技术研发，再到以化学链循环为代表的整体工艺开拓，此书是范良士先生科研团队对于气-固多相流领域工作的长期积累和系统总结。在同类著作中，独具以下几方面特色：

前沿性的专著：作者将其科研团队在颗粒流体系统领域前沿取得的成就贯穿于此书的论述之中，使得读者可以在了解该领域基本知识的同时，也能掌握相关的前沿动态，有利于读者有更加全面深入的认识。

手册型的构架：作者充分考虑各方面读者可能的需求，将基础知识贯穿于各实用条目之中，既利于工程技术人员参考，又便于科研人员了解某一方面的系统知识。这一手册型特征，大大拓展了著作的读者适用面，亦便于读者在学习基础知识的同时，注重其实际应用。

百科性的内容：作者首先从颗粒流体系统最小的颗粒单元入手，介绍了颗粒的特性及其测量手段，继而描述了颗粒之间的相互作用，然后又论述了颗粒与流体之间的相间作用，循序渐进、深入浅出地为引入系统传递特性打下基础；基于上述知识点和守恒定律，作者介绍了颗粒流体系统的运动和输运方程及推导，以及特定条件下对应的基本现象；最后具体描述了各类气固两相系统的特征。由上册基本知识，到下册各类反应器中这些知识点的应用，内容十分完整，读过此书，受益匪浅，是一本难得的百科式论著。

教学、科研与工程应用兼顾的布局：作者在每章不仅列出了相关的主流和必读的参考文献，又提供了若干知识要点，这对初学或者有一定基础的读者均有提纲挈领的帮助。非常值得一提的是，作者对课后习题的设置也煞费苦心，即便仅是顺应习题的思路加以思考，就可以大大深化读者对各章节内容的理解，这一特征是尤为难能可贵的。

原著合著作者朱超教授曾师从已故多相流大师苏绍礼先生，对多相流及颗粒技术也多有研究贡献。译者张学旭教授是粉料输运及加工领域资深的专家，此书又经著名多相流专家周力行先生校对译文，确保了中文版充分体现了英文版的原意。相信中文版的面世，对于全世界华人读者更直接且准确地了解原著的内容，以及气-固多相流原理在工程应用和学术上的发展会起到至关重要的作用。

范良士先生是华人化工及学术界的佼佼者，我本人的科研工作，也得到他多方

面的帮助，他要我给中文版写一序言，我实在不敢当，就权当我学习此书的一些体会，与读者共享吧。

中国科学院院士 李静海

2017年4月

译者前言

Principles of Gas-Solid Flows 是由美国俄亥俄州立大学 (The Ohio State University) Liang-Shih Fan (范良士) 院士和新泽西工学院 (New Jersey Institute of Technology) Chao Zhu(朱超) 教授合写的专著。该书的第一版于 1995 年由剑桥大学出版社 (Cambridge University Press) 出版, 欧美等部分大学都将其作为研究生的教材使用, 由于使用中得到好评, 在 2005 年发行第二版。

译者是 2012 年在美国新泽西工学院做访问学者时, 看到了该书。本人所在的专业领域是粉体工程, 气固两相流是粉体工程中的气体分级、气固分离、气力输送等化工单元操作过程的重要基础。在认真阅读了本书的部分章节后, 本人感觉到该书是粉体工程领域一本很有价值的参考书, 正如原著前言所述, 本书能适应多学科读者的需求。尤其是它将有助于从事热能工程、航空和航天工程、化学和冶金工程、机械工程以及农业技术、土木工程、环境科学与工程、制药工程、矿山工程、大气和气象科学的科技工作者参考使用。而且, 本书的内容既有理论深度, 又注重工程实践; 对涉及的各种理论、数学模型, 都追根溯源、详细分析, 试图为读者提供得到专门信息各种途径。书中内容逐章按照逻辑次序进行描述, 各章都列出了所涉及的交叉性参考文献, 并都维持其恰当的独立性。这样, 读者想要快速查找专门的课题, 可直接到相关的章节中查阅。每章后都有习题, 很适合作为大学的研究生教材或参考书。因此本人认为, 这是一本值得推广和传播的著作, 在与朱超教授沟通, 并征得范良士院士的同意后, 决定将该书以中文出版。本译著是 2005 年第二版的译稿。

本译著自 2013 年启动, 经过大家五年的努力, 今天终于可以出版。由于原著分为两部分, 且内容丰富, 考虑到阅读的方便, 分两册出版。上册为基础篇, 下册为应用篇。在编译过程中, 编译组的老师认真推敲、仔细琢磨, 使译著既忠于原著, 又符合汉语的表达习惯, 所以, 历时三年, 终于完稿。翻译的具体分工是: 张学旭教授负责第 1 章、第 5 章、第 6 章、第 9 章 ~ 第 12 章; 刘宗明教授负责第 2 章; 段广彬副教授负责第 3 章; 赵蔚琳教授负责第 4 章; 陶珍东教授负责第 7 章; 姜奉华博士负责第 8 章。张学旭教授负责全书的审定和统稿。在此, 感谢编译组的全体老师。

受原书作者范良士院士特约, 由国际知名的多相流学术界前辈清华大学周力行教授对本书翻译初稿 (第 5 章和第 6 章) 进行校对, 周教授认真地审阅、校对, 提出了很多修改意见, 尤其是对多相流体力学方面的专业术语, 周教授给予了认真的

校对和修改。周教授严谨的治学态度和执着的敬业精神，令人钦佩，在此，我们编译组对周教授表示最诚挚的谢意。另外要感谢周教授的同事、清华大学郭印诚副教授（对翻译初稿的第 1 章和第 2 章进行了校对）和张会强教授（对翻译初稿的第 3 章和第 4 章进行了校对）。周教授负责校对工作的最后审定。在译著付印之际，我们再次对周教授领导的校对组表示衷心的感谢。

下册由两相流专家南京工业大学叶旭初教授负责校对。叶教授对下册的翻译初稿进行了认真的审阅，提出了很多非常宝贵的意见，为翻译稿更忠于原著，更符合汉语的阅读习惯，更加专业奠定了良好的基础。在此，对叶教授辛勤劳动和付出表示衷心的感谢。

本书的翻译出版工作得到原书作者范良士院士和朱超教授的鼎力支持、关心和帮助，在此，对他们的帮助表示感谢。

还要感谢范良士院士和周力行教授对本书出版的部分资助。同时，要感谢济南大学教务处、学科处对我们翻译和出版工作的支持和资助。

最后要感谢科学出版社刘信力编辑为本书出版所做的努力。

我们的翻译工作尽管做了最大的努力，包括多次的修改与校对，但由于本书内容有较强的理论深度，且涉及的专业面较宽，书中可能还会存在专业词汇、语言表达翻译不准确的地方，如有这方面的不妥，恳请相关专家和读者不吝赐教，提出批评建议。我们将利用适当的时机予以更正，同时对您表示衷心的感谢。

在此对关心本书的各位专家表示最诚挚的谢意，我们的目的是促进气固两相流及多相流的科学和技术在我国的更大发展，希望我们的译著能够起到应有的作用。

张学旭

2018 年 7 月

前 言

气固两相流动现象在许多工业过程中都能见到, 在一些自然现象中也时有发生。例如, 在固体燃料的燃烧中, 煤粉的燃烧、固体废物的焚烧、火箭推进剂的燃烧等, 都涉及气固两相流动。在制药、食品、燃煤和矿石粉体加工处理过程中的气力输送更是典型的气固两相流。粉体物料的流态化也是一种常见的、有许多重要应用的气固两相流动过程, 譬如在生成中间性碳氢化物的催化裂化、费托 (Fischer-Tropsch) 合成化学物质以及液体燃料的生产中都有粉体流态化的应用。在气固分离过程中, 旋风分离器、静电除尘器、重力沉降和过滤分离都是气固两相流动常用的实例。细粉体与气体形成的两相流动常与材料加工过程密切相关, 如陶瓷及硅酸盐产品的化学蒸气沉积、等离子喷涂和静电复印技术。在换热应用中, 核反应堆的冷却、太阳能传输采用的石墨悬浮流, 也涉及气固两相流动。固体颗粒离散型流动常见于颜料喷雾剂、粉尘爆炸和沉积以及喷嘴流。自然现象中伴随气固两相流动的典型例子有沙尘暴、沙丘移动、空气动力磨蚀和宇宙尘埃。对前所述各工业过程中气固两相流动的优化设计、一些自然现象的精确描述控制, 都需要有控制这些流动原理的全面知识为基础。

本书的目的是介绍气固两相流动的基本原理和基本现象, 选定部分在工程应用的气固两相流系统, 介绍其原理及应用特性。本书涉及的气固两相流动中, 其固体颗粒的尺寸范围是 $1\mu\text{m}\sim 10\text{cm}$, 本书也认为亚微米颗粒流动特性有巨大的工业价值。本书对所涉及颗粒动力学的一些重要理论或模型, 以及其发展起源的流体力学都作了系统的论述, 并着重论述了这些理论或模型的物理解释和应用条件。对气固两相流系统中存在的各种本征现象也做了说明。本书是为从事气固两相流研究的高年级本科生和研究生而编写的教科书。同时, 也是为从事一般多相流领域的研究者和应用工作者提供的一本很好的参考书。本书可适应多学科读者的某些需求, 尤其是它将有助于从事化学工程、机械工程以及其他工程学科, 包括从事农业技术、土木工程、环境科学与工程、制药工程、航空工程、矿山工程、大气和气象科学的科技工作者参考使用。

本书包括两部分, 每个部分由六章组成。第一部分是气固两相流基本关系和基本现象; 第二部分是选择了某些工程上应用的气固两相流系统, 并详细介绍这些系统的特性。具体来说, 第 1 章介绍颗粒的材料性质及几何特性 (尺寸和尺寸分布)。颗粒当量直径的各种定义、相关的颗粒尺寸测量技术也包括在这一章中。第 2 章主要介绍基于弹性形变理论的固体颗粒碰撞力学, 用弹性碰撞理论讨论了颗粒触

碰的接触时间、接触面积、碰撞力,这对于和固体颗粒碰撞有关的动量传递、热量传递和电荷转移过程的描述都至关重要。第3章论述气固两相流的动量和电荷转移,介绍了气固两相流中气体与颗粒之间、颗粒与颗粒之间的相互作用及外场的各种力。根据力的平衡分析,导出了单颗粒的运动方程。本章也介绍了气固两相流中电荷产生的基本机理,详细讨论颗粒碰撞引起的电荷转移机制。第4章介绍气固两相流中传热和传质的基本概念和理论,重点包括颗粒相弹性碰撞中的热辐射和热传导。第5章介绍气固两相流四种基本的建模方法,即连续介质模型或多流体模型、轨道模型、碰撞支配的稠密悬浮系统动力论模型和通过颗粒填充床流动的欧根(Ergun)方程模型。本章中首先讨论了单相流的流体动力学方程,这里用气体分子运动论和湍流模型的基本概念讨论其基本的建模方法。和单相流动的 $k-\varepsilon$ 湍流模型不同,对考虑气固湍流相互作用的气固两相流,介绍了连续介质方法的 $k-\varepsilon-k_p$ 模型。第6章讨论气固两相流中的本征现象,如磨蚀和磨损、声波和激波通过气固悬浮流的传播、气固混合物的热力学性质、不稳定流动和气固湍流的相互作用。

第7章介绍的是气固分离。本章中介绍的基本分离方法包括旋风分离、过滤、静电分离、重力沉降和湿法收尘。第8章介绍的是料斗和竖管流动,这是在散粒状固体粉料的操作处理及输送过程中常用的单元操作。为了分析料斗和竖管流的基本特性,也介绍了粉体力学的一些基本概念。第9章介绍气体流化的一般概念,重点介绍密相流化床,这也是工业应用中最为普遍的气固两相流操作。本章讨论了各种运行工况,包括散式流化、鼓泡/节涌流化、湍流流化和喷腾现象;介绍了气泡、气体介质中弥散的颗粒、气泡尾流的基本性质和固有气泡聚集和破裂,以及颗粒的夹带现象。第10章介绍高速条件下的快速流态化。快速流态化形成于循环流化床系统的上升管中,其中固体颗粒形成一个循环回路。本章通过考察单独的循环回路部分给出气固流动中的相互作用关系,及其对整体的气固流动特性的影响。第11章主要涉及稀相输送或气固悬浮系统的管流。本章讨论了一些相关的现象,譬如减阻;介绍了充分发展的管流和在弯管的气固流动特征。第12章描述的是流化系统的传热和传质现象,介绍了各种传递模型和经验公式,这些关系式可应用于确定各种流态化系统的热量传递和质量传递特性的定量关系。

本书附录中给出了正文中出现的标量、矢量和张量符号的解释。在全书正文中,除非特别注明以外,相关公式中所用的单位都采用国际(SI)单位制。有多章中使用的常用符号,譬如表观气体速度、颗粒雷诺数等都是统一的。每章后都有部分习题,对每章习题解答感兴趣的读者可以直接和出版商联系。

本书试图为读者提供其期望得到专门信息的各种途径。书中内容逐章按照逻辑次序进行描述,各章都列出了所涉及的交叉性参考文献,但各章都维持其恰当的独立性。这样,读者想要快速查找专门的课题,可直接到相关的章节中查阅。需要特别注意的是,气固两相流是一个发展很快的研究领域,气固两相流的物理现象又

极其复杂,要想全面了解这些现象,本书所涉及的内容还远远不够。本书旨在为读者提供足够多的基本概念,使之能与时俱进,随时掌握该领域的最新发展。

在本书付印之际,我们对以下诸位同事表示最诚挚的谢意,他们认真地阅读了书稿,并提出了很多富有建设性的建议,他们是: R. S. Brodkey 教授, R. Clift 教授, J. F. Davidson 教授, R. Davis 博士, N. Epstein 教授, J. R. Grace 教授, K. Im 博士, B. G. Jones 教授, D. D. Joseph 教授, C.-H. Lin 博士, P. Nelson 博士, S. L. Passman 博士, R. Pfeffer 教授, M. C. Roco 教授, S. L. Soo 教授, B. L. Tarmy 博士, U. TüüzÜn 教授, L.-X. Zhou 教授。我们非常感谢下列诸位同事为本书资料准备中做了一些技术上的帮助,他们是: E. Abou-Zeida 博士, P. Cai 博士, S. Chauk 先生, T. Hong 博士, P.-J. Jiang 博士, J. Kadambi 教授, T. M. Knowlton 博士, S. Kumar 博士, R. J. Lee 博士和 J. Zhang 博士。

还要特别感谢 R. Agnihotri 先生, D.-R. Bai 博士, H.-T. Bi 博士, A. Ghosh-Dastidar 博士, E.-S. Lee 先生, S.-C. Liang 博士, J. Lin 先生, T. Lucht 先生, X.-K. Luo 先生, S. Mahuli 博士, J. Reese 先生, S.-H. Wei 先生, J. Zhang 博士, T.-J. Zhang 先生, J.-P. Zhang 先生,他们阅读了本书的部分内容,并提供了有价值的评阅意见。感谢 T. Hong 博士和 K. M. Russ 博士对本书的编辑提供的帮助,也感谢 E. Abou-Zeida 博士和 Maysaa Barakat 女士为本书绘制了漂亮的插图。我们曾在俄亥俄州立大学化学工程系开设了 801 号课程“气固两相流”和 815.15 号课程“流态化工程”,这两门课程都曾以本书的书稿作为参考教材,选修该课的学生们对本书提供了重要的反馈意见,这些意见对本书有非常大的参考价值。俄亥俄州立大学/流态化技术和颗粒反应工程行业协会的成员,包括壳牌 (Shell) 发展有限公司、杜邦 (E. I. duPont) 有限公司、烃研究公司、埃克森 (Exxon) 美孚研究工程有限公司、德士古 (Texaco) 公司、三菱 (Mitsubishi) 化学公司,他们为本书的出版提供了资助,在此,对他们的帮助表示深深的谢意。

目 录

中译本序

译者前言

前言

第 1 章 颗粒的尺寸和性质	1
1.1 引言	1
1.2 颗粒尺寸及测量方法	1
1.2.1 非球形颗粒的当量直径	3
1.2.2 粒度测量方法	7
1.3 粒度分布和平均粒径	14
1.3.1 密度函数	14
1.3.2 常用分布函数	15
1.3.3 颗粒系统的平均粒径	20
1.4 固体材料的性质	21
1.4.1 物理吸附	21
1.4.2 形变和断裂	24
1.4.3 热学性质	28
1.4.4 电特性	31
1.4.5 磁学特性	34
1.4.6 材料密度	36
1.4.7 光学特性	36
符号表	37
参考文献	39
习题	40
第 2 章 固体颗粒碰撞力学	42
2.1 引言	42
2.2 刚体间的相互作用	43
2.2.1 球体的共线碰撞	43
2.2.2 球体的共面碰撞	44
2.3 固体材料弹性接触理论	46
2.3.1 平衡态固体介质的应力关系	46

2.3.2	无限大固体颗粒介质中某点的合力	48
2.3.3	固体颗粒介质在半无限大边界上的力	50
2.3.4	无摩擦球体触碰的赫兹理论	55
2.3.5	摩擦球触碰理论	60
2.4	弹性球体碰撞	68
2.4.1	弹性球体的正面碰撞	68
2.4.2	摩擦弹性球体的碰撞	71
2.5	非弹性球的碰撞	75
2.5.1	塑性形变的发生	75
2.5.2	碰撞恢复系数	77
	符号表	80
	参考文献	81
	习题	82
第 3 章	动量传递和电荷转移	84
3.1	引言	84
3.2	颗粒-流体间的相互作用	84
3.2.1	曳力	84
3.2.2	巴塞特力	85
3.2.3	萨夫曼力及其他与梯度有关的力	92
3.2.4	球体旋转引起的马格纳斯效应和马格纳斯力	94
3.3	颗粒间的相互作用力和场力	98
3.3.1	范德瓦耳斯力	98
3.3.2	静电力	101
3.3.3	碰撞力	101
3.3.4	场力	102
3.4	单个颗粒的运动	104
3.4.1	BBO 方程	104
3.4.2	通用运动方程	105
3.5	电荷的产生和转移	108
3.5.1	固体颗粒的静态带电	109
3.5.2	颗粒碰撞导致的电荷转移	116
	符号表	121
	参考文献	123

习题	126
第 4 章 传热与传质基础	128
4.1 引言	128
4.2 导热	128
4.2.1 静止流体中单个球形颗粒的传热	129
4.2.2 弹性球体颗粒碰撞中的导热	131
4.3 对流换热	136
4.3.1 在单相流中强迫对流的量纲分析	136
4.3.2 在均匀流动中单个球体的传热	137
4.3.3 拟单相流中的对流换热	139
4.4 热辐射	141
4.4.1 单颗粒散射	141
4.4.2 对颗粒的辐射加热	146
4.4.3 气体介质中弥散颗粒辐射的一般考虑	148
4.4.4 通过等温、漫散射介质的辐射	152
4.5 传质	153
4.5.1 扩散和对流	153
4.5.2 传质和传热的类比	155
符号表	157
参考文献	158
习题	160
第 5 章 基本方程	162
5.1 引言	162
5.1.1 欧拉连续介质方法	162
5.1.2 拉格朗日轨道法	163
5.1.3 颗粒间碰撞的动力论模型	164
5.1.4 欧根方程	164
5.1.5 小结	164
5.2 单相流动模型	165
5.2.1 通用输运定理和通用守恒律	165
5.2.2 控制方程	166
5.2.3 动力论和输运系数	168
5.2.4 湍流流动的模拟	172
5.2.5 边界条件	177

5.3	多相流的连续介质模型	180
5.3.1	平均值和平均定理	180
5.3.2	体积平均方程	188
5.3.3	体积-时间平均方程	191
5.3.4	输送系数和湍流模型	194
5.3.5	颗粒相的边界条件	203
5.4	多相流轨道模型	203
5.4.1	定轨道模型	204
5.4.2	随机轨道模型	206
5.5	碰撞支配的稠密悬浮体的动力论模型	208
5.5.1	密相输运定理	209
5.5.2	流体力学方程	212
5.5.3	成对碰撞的分布函数	213
5.5.4	本构关系	216
5.6	通过填充床的流动方程	221
5.6.1	达西定律	221
5.6.2	直管毛细管模型	222
5.6.3	欧根方程	223
5.7	量纲分析及相似性	229
5.7.1	稀疏悬浮体气力输送系统的放大关系	229
5.7.2	流化床的放大关系	230
	符号表	234
	参考文献	237
	习题	240
第 6 章	气固两相流中的本征现象	242
6.1	概述	242
6.2	磨蚀和磨损	242
6.2.1	塑性磨蚀和脆性磨蚀	243
6.2.2	磨蚀磨损的部位	245
6.2.3	磨损机理	250
6.3	气固混合物的热力学特性	251
6.3.1	密度、压力及状态方程	252
6.3.2	内能和比热	254
6.3.3	状态的等熵变化	255
6.4	通过气固悬浮系统的压力波	257

6.4.1 声波	257
6.4.2 正激波	263
6.5 不稳态性	267
6.5.1 分层管流中的波运动	268
6.5.2 连续波和动力波	278
6.6 颗粒和湍流间的相互作用	283
符号表	286
参考文献	289
习题	291
附录 标量、向量和张量的符号意义	293
名词索引	296

第1章 颗粒的尺寸和性质

1.1 引言

气固两相流中固体颗粒的流动特性与颗粒物料的性质和几何形状密切相关。颗粒的几何特性包括颗粒尺寸、颗粒形状和粒度分布。在实际行业中，气固两相流中的固体颗粒通常是非球形的或者是不规则的，并且是由大小不同的颗粒所组成。颗粒的几何形状通过曳力影响着气固两相流中颗粒的流动状态、颗粒表面的边界层分布、颗粒尾流漩涡的产生和消散。颗粒物料的性质包括诸如：物理吸附、弹性变形、塑形变形、塑性和脆性断裂、电学特性、磁学特性、热传导、热辐射以及光学特性等。物料特性也影响着气固两相流中颗粒间的长程及短程相互作用力、颗粒的磨损和磨蚀性。颗粒物料的几何形状和物性是影响两相流流型的基础参量，譬如在流化床中。

在本章中，将介绍不规则单颗粒当量直径的基本定义以及相应的颗粒尺寸测量技术。同时，对多尺寸颗粒系统的粒度分布及典型的密度函数也做详细的介绍，并给出了一些颗粒尺寸平均方法及计算公式，还将介绍各种物料的基本特征。

1.2 颗粒尺寸及测量方法

颗粒尺寸影响着气固两相流的动力学特征 [Dallavalle, 1948]。图 1.1 给出了多相流中固体颗粒的相对数量级大小 [Soo, 1990]。由图 1.1 中可看到，可以形成气固两相流的固体颗粒尺寸大约为 $1\mu\text{m}\sim 10\text{cm}$ 。颗粒的形状影响到粉体的流动性、粉体的堆积特性，而对作为颜料的粉体，其形状将对其覆盖性能有所影响。对颗粒形状的定义见表 1.1。颗粒的形状一般可用形状因子和形状系数表示 [Allen, 1990]。

由于在工程上气固两相流中的固体颗粒通常是非球形、多尺寸的颗粒，所以，其大小都用所谓的当量直径来表示，这个当量既可以是几何参数（譬如体积），也可以是动力学参数。因此，对非球形颗粒的当量尺寸就不止一个，图 1.2 给出了常用的三种不同当量直径。在实际应用中可根据不同的过程选择不同的当量直径。

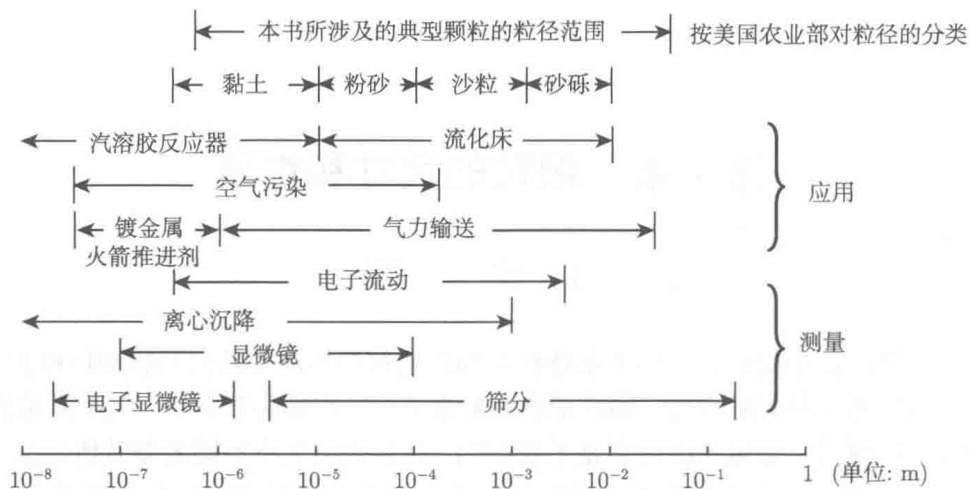


图 1.1 气固两相流系统中颗粒的分级

表 1.1 颗粒形状定义

定义	描述
针状	形状像针一样的颗粒
角状	具有锋利的角或者具有多面体形状的颗粒
水晶状	几何形状像在流体介质中自由生长的颗粒
树枝状	具有多个分支的水晶状颗粒
纤维状	规则或不规则的像线一样的颗粒
片状	像平板一样的颗粒
粒状	在多个方向上近似相等, 但不规则的颗粒
不规则状	多方向上不存在任一对称性的颗粒
模状	圆形但不规则的颗粒
球状	完全像球一样的颗粒

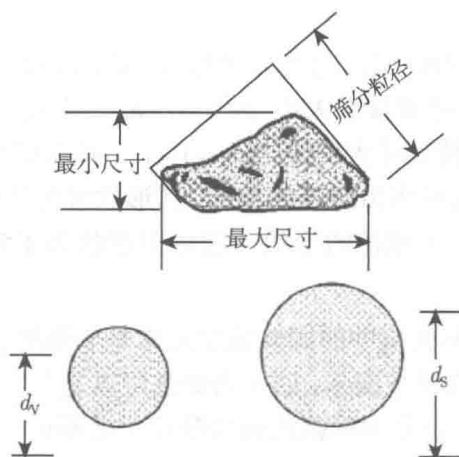
资料来源: T. Allen's *Particle Size Measurements*, Chapman & Hall, 1990.

图 1.2 颗粒的等体积直径、等表面积直径和筛分粒径示意图