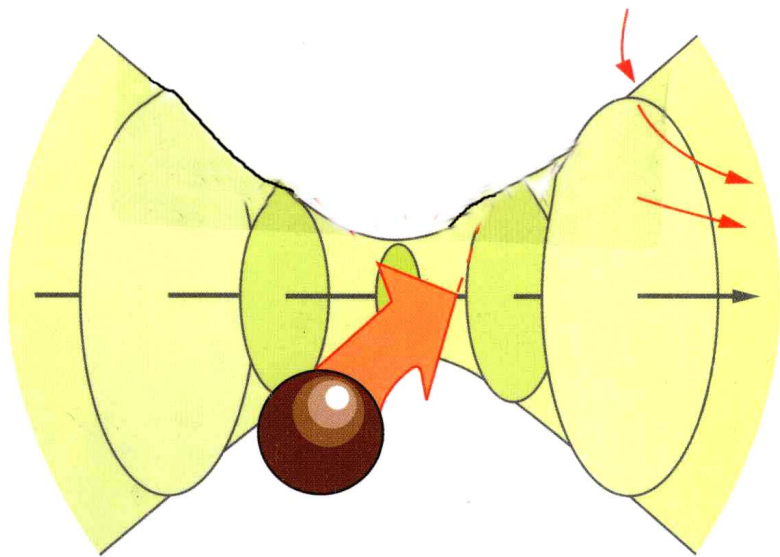




国家科学技术学术著作出版基金资助出

颗粒粒度 测量技术及应用

蔡小舒 苏明旭 沈建琪 等著



化学工业出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

颗粒粒度 测量技术及应用

蔡小舒 苏明旭 沈建琪 等著



化学工业出版社

·北京·

本书是作者所在团队多年来科研成果的总结，反映和代表了我国目前颗粒粒度测量技术的水平。内容包括颗粒系统的基本知识、光散射基本理论及基于光散射原理的颗粒测量方法和技术，超声散射的基本原理和基于超声的颗粒测量方法和技术，颗粒测量应用中的一些问题等。书中还收录了颗粒的折射率及物性参数、标准颗粒等颗粒测量中涉及到的参数和资料，对于从事颗粒制备和应用研究的科技人员进行颗粒粒度测量时具有很好的参考价值。

本书适合于从事颗粒材料测量、加工、制造行业的工程技术人员、研究人员、实验人员以及高校师生。

图书在版编目 (CIP) 数据

颗粒粒度测量技术及应用/蔡小舒，苏明旭，沈建琪等著. —北京：
化学工业出版社，2010.8

ISBN 978-7-122-08907-6

I. 颗… II. ①蔡…②苏…③沈… III. 光散射-颗粒-粒度-
测量 IV. O436

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 116726 号

责任编辑：李晓红 叶 露

装帧设计：关 飞

责任校对：郑 捷

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）

印 刷：北京永鑫印刷有限责任公司

装 订：三河市万龙印装有限公司

720mm×1000mm 1/16 印张 22¼ 字数 430 千字 2010 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：68.00 元

版权所有 违者必究

序

自然界中很多物质属颗粒，例如黏土、沙子和灰尘；人类的食物也往往是颗粒，例如谷粒、豆子、盐和蔗糖；很多加工物，例如煤炭、催化剂、水泥、化肥、颜料、药物和炸药也大多属粉体或颗粒。研究和制备颗粒是一门跨学科的新兴科学技术：颗粒学。它由多门基础科学和大量相关的应用技术组成，涉及化学、物理、数学、生物、医学、材料等若干基础科学，与工艺、工程应用技术密切相关。它对能源、化工、材料、石油、电力、轻工、冶金、电子、气象、食品、医药、环境和航空等领域的发展有着非常重要的作用。颗粒学的一个重要部分是颗粒的测试。

上海理工大学自1980年起在王乃宁教授领导下进行光散射颗粒测量方法和仪器的研究，于2000年撰写了《颗粒粒径的光学测量技术及应用》。蔡小舒教授是中国颗粒学会常务理事，兼任颗粒测试专业委员会副主任。他自20世纪80年代在上海理工大学进行光散射颗粒测量方法和仪器的研究，于1999年成立了颗粒及两相流测量技术研究所，拓宽了原来的研究到超声颗粒测量、在线颗粒测量及其他颗粒测量方法和应用研究，目前已成立了包含颗粒测量、两相流在线测量、燃烧监测诊断和环境与排放在线监测四个研究方向的研究基地，承担着国家自然科学基金、教育部、上海市等的研究项目，并与美、德、法、意大利、捷克等国建立了合作关系，又是上海颗粒学会的挂靠单位。

该书在上述的背景下撰写而成，包括十章：第1章介绍颗粒的基本知识；第2~6章分别介绍光散射、散射光、透射光以及纳米颗粒和超声颗粒的测量；其他四章介绍反演算法、应用实例、与其他方法的比较和颗粒测量中须注意的问题。该书不但阐述了当代的国际测量技术及其应用，且包括了作者和他团队创新的理论分析和测试技术。

本人向从事颗粒研究、加工、应用的科技人员推荐这本专著。

蔡小舒

中国科学院过程工程研究所研究员、名誉所长

中国科学院资深院士

中国颗粒学会名誉理事长

2010. 5. 25

前 言

颗粒（包括固体颗粒、液滴、气泡）与能源、动力、环境、机械、医药、化工、轻工、冶金、材料、食品、集成电路、气象等行业密切相关，也和人们的日常生活密切相关。据文献介绍，70%以上的工业产品与颗粒有关，近年来经常出现的沙尘暴、冬季大范围的浓雾等也都与空气中的颗粒物有关。颗粒粒径是颗粒的最重要参数，许多情况下，颗粒粒径大小不仅直接影响到产品的性能与质量，而且与能源的高效利用、环境保护、工艺过程优化等都密切相关。近年来，各种新型颗粒材料，特别是纳米颗粒的问世和应用，给颗粒粒径的测量提出了新的更高的要求。

从20世纪80年代以来，科学研究和生产实践飞速发展的需要极大促进了光散射法颗粒测量技术的飞速发展，在许多应用领域已逐步替代了原来应用其他工作原理（如筛分、显微镜、沉降、电感应等）的颗粒测量仪器，成为占主导地位颗粒测量方法。特别是近年来激光技术、光电技术、微电子技术、光纤技术和计算机技术等的发展和运用，光散射法易于实现在线测量的突出特点更进一步推动了光散射颗粒测量方法的发展，出现了一些新的基于光散射原理的颗粒测量方法，以及与微流体芯片技术相结合等多方法融合的颗粒测量仪器。光散射法颗粒测量技术的发展趋势将会是颗粒测量仪器的微型化和智能无线网络化。

尽管光散射法颗粒测量技术有众多的优点，但它的穿透性不强限制了它在高浓度颗粒实时在线测量中的应用。超声具有很强的穿透能力，正好弥补了光散射颗粒测量技术在这方面的弱点，使得超声颗粒测量技术可以用于高浓度颗粒的测量而无需对被测对象进行稀释，这个特点尤其适合在过程中的颗粒实时在线测量。近年来国际上对超声颗粒测量方法的研究发展迅速，成为一类新的颗粒测量方法。而图像法则随数码相机技术的飞速发展，近年来重新崛起，正以崭新的面貌出现，成为颗粒粒度及形态测量的一类新方法。

作者多年从事颗粒粒度测量方面的研究和教学工作，先后得到多个国家自然科学基金重点和面上项目、863项目、上海市纳米计划项目等的支持，开展了光散射理论、基于光散射原理的多种颗粒测量方法、基于超声的多种颗粒测量方法、纳米颗粒测量方法、图像法、颗粒在线测量等方面的研究，积累了丰

富的经验以及大量资料。10年前王乃宁教授及本书作者曾出版过一本有关颗粒测量的著作《颗粒粒径的光学测量技术及应用》。10年来颗粒测量技术有了很大发展,原书已不能满足当前颗粒工作者的需要。本书是在原书的基础上,调整了原书的结构,增加了近年来颗粒测量技术的新发展,如超声颗粒测量方法、消光起伏光脉动法和纳米颗粒测量技术等。旨在从理论和实践两个方面向国内广大的工程技术人员、研究人员、实验人员以及高校师生全面系统地介绍颗粒的光散射和超声测量理论、方法和技术,并简要介绍其他一些颗粒测量方法。

全书共分十章和附录部分。第1章介绍了颗粒的基础知识以及颗粒和颗粒系粒径分布的表征方法。第2章全面系统地讨论了有关光散射颗粒粒径测量方面的基础知识,重点对夫琅和费衍射(Fraunhofer Diffraction)和米氏散射(Mie Scattering)理论作了详细的讨论。第3章和第4章分别介绍了基于散射光能测量和透射光能测量的多种颗粒测量方法,包括激光粒度仪、消光法、光脉动法和消光起伏法等颗粒测量方法。第5章是动态光散射理论及研究现状。第6章则是近年来发展的超声颗粒测量理论、方法和技术,包括超声散射的基础理论、超声衰减谱法、超声速度谱法等。纳米颗粒的测量已成为当前颗粒测量的一个重要方面,近年来有许多发展,第7章则详细介绍了纳米颗粒粒度的测量方法,包括动态光散射法、可视法纳米颗粒测量方法、超声纳米颗粒测量方法等。反演算法是光散射和超声散射颗粒测量方法中都涉及到的很重要的理论问题,本书第8章专门讨论了这个问题。在线颗粒测量在生产过程中有极重要的作用,第9章专门介绍了作者近年来开展在线颗粒测量应用研究的一些例子,供广大读者参考。第10章则介绍了其他一些传统测量方法,以及基于图像处理颗粒测量方法。

颗粒测量中涉及到颗粒的折射率、标准颗粒、颗粒的物性参数等,而这些资料很难获得。为方便读者,作者将多年来收集的这些资料作为附录放在本书的最后,并收集了国内外主要颗粒测量仪器和标准颗粒生产厂商的信息也作为书的附录,供读者参考。

本书各章节的撰写者分别是:第1章1.1~1.4—蔡小舒,1.5—黄春燕;第2章2.1,2.2—沈建琪,2.3,2.4—徐峰;第3章—沈建琪;第4章4.1—蔡小舒,4.2,4.3—沈建琪;第5章—沈嘉琪;第6章—苏明旭;第7章7.1,7.4—苏明旭,7.2—沈嘉琪,7.3—蔡小舒;第8章8.1—苏明旭和徐峰,8.2—沈建琪;第9章—蔡小舒,其中9.1.2—沈建琪;第10章10.1,10.2,10.4—王乃宁,10.3—苏明旭。全书由蔡小舒汇总定稿。

研究所许多老师、博士生和硕士生的工作对本书的撰写起了很大作用和贡献,在本书最后的统稿和资料整理以及书中图表和附录资料的整理等得到了研究所包括王文华老师,马力、吴健、董学金、于彬、王华睿、张晶晶、成林虎、

景伟、龚智方、刘海龙等许多研究生的帮助，一些资料的获得得到了有关单位的大力支持。在此一并表示感谢。

由于颗粒粒度测量技术涉及面广，限于作者的水平，以及不同作者的写作风格不同等，书中会定存在不少错误和疏漏之处，敬请读者批评指正。

蔡小舒

于上海理工大学动力馆

2010.5.1

目 录

| | |
|-------------------------------|----|
| 第 1 章 颗粒基本知识 | 1 |
| 1.1 概述 | 1 |
| 1.2 颗粒的几何特性 | 2 |
| 1.2.1 颗粒的形状 | 2 |
| 1.2.2 颗粒的比表面积 | 3 |
| 1.2.3 颗粒的密度 | 3 |
| 1.3 颗粒粒度及粒度分布 | 4 |
| 1.3.1 单个颗粒的粒度 | 4 |
| 1.3.2 颗粒群的粒径分布 | 6 |
| 1.3.3 颗粒群的平均粒度 | 11 |
| 1.4 标准颗粒 | 13 |
| 1.5 颗粒测量中的颗粒分散问题 | 16 |
| 1.5.1 颗粒分散方法概述 | 17 |
| 1.5.2 常见问题讨论 | 18 |
| 参考文献 | 19 |
| 第 2 章 光散射基本理论 | 21 |
| 2.1 衍射散射基本理论 | 21 |
| 2.1.1 惠更斯-菲涅耳原理 | 21 |
| 2.1.2 巴卑涅原理 | 23 |
| 2.1.3 衍射的分类 | 24 |
| 2.1.4 夫琅和费单缝衍射 | 25 |
| 2.1.5 夫琅和费圆孔衍射 | 26 |
| 2.2 光散射基本理论 | 28 |
| 2.2.1 光散射概述 | 28 |
| 2.2.2 光散射基本知识 | 29 |
| 2.2.3 经典 Mie 光散射理论 | 32 |
| 2.3 几何光学对散射的描述 | 49 |

| | | |
|------------|----------------------------------|-----------|
| 2.3.1 | 概述 | 49 |
| 2.3.2 | 计算方法 | 49 |
| 2.4 | 非平面波的散射理论 | 54 |
| 2.4.1 | 广义 Mie 理论 | 54 |
| 2.4.2 | 基本理论 | 54 |
| 2.4.3 | 波束因子的区域近似计算 | 59 |
| 2.4.4 | 高斯波束入射 | 60 |
| 2.4.5 | 数值结果 | 61 |
| | 参考文献 | 62 |
| 第3章 | 散射光能颗粒测量技术 | 65 |
| 3.1 | 概述 | 65 |
| 3.2 | 基于衍射理论的激光粒度仪 | 67 |
| 3.2.1 | 衍射散射式激光粒度仪的基本原理 | 67 |
| 3.2.2 | 多元光电探测器各环的光能分布 | 69 |
| 3.2.3 | 衍射散射法的数据处理方法 | 72 |
| 3.3 | 基于 Mie 散射理论的激光粒度仪 | 76 |
| 3.4 | 影响激光粒度仪测量精度的几个因素 | 79 |
| 3.4.1 | 接收透镜焦距的合理选择 | 79 |
| 3.4.2 | 被测试样的浓度 | 80 |
| 3.4.3 | 被测试样轴向位置的影响 | 82 |
| 3.4.4 | 被测试样折射率的影响 | 84 |
| 3.4.5 | 光电探测器对中不良的影响 | 85 |
| 3.4.6 | 仪器的检验 | 86 |
| 3.5 | 激光粒度仪测量下限的延伸 | 86 |
| 3.5.1 | 倒置傅里叶变换光学系统 | 88 |
| 3.5.2 | 双镜头技术 | 89 |
| 3.5.3 | 双光源技术 | 90 |
| 3.5.4 | 偏振光散射强度差 (PIDS) 技术 | 90 |
| 3.5.5 | 全方位多角度技术 | 91 |
| 3.5.6 | 国产激光粒度仪的新发展 | 93 |
| 3.6 | 角散射颗粒测量技术 | 96 |
| 3.6.1 | 角散射式颗粒计数器的工作原理 | 97 |
| 3.6.2 | 角散射式颗粒计数器的散射光能与粒径曲线 | 98 |
| 3.6.3 | 角散射式颗粒计数器 <i>F-D</i> 曲线的讨论 | 101 |
| 3.6.4 | 角散射式颗粒计数器的测量区及其定义 | 104 |
| 3.6.5 | 角散射式颗粒计数器的计数效率 | 108 |

| | |
|------------------------------------|------------|
| 3.6.6 角散射式颗粒计数器的主要技术性能指标 | 109 |
| 参考文献 | 112 |
| 第4章 透射光能颗粒测量技术 | 115 |
| 4.1 消光法 | 115 |
| 4.1.1 概述 | 115 |
| 4.1.2 消光法测量原理 | 115 |
| 4.1.3 消光系数 | 117 |
| 4.1.4 消光法的数据处理方法 | 119 |
| 4.1.5 颗粒浓度测量 | 126 |
| 4.1.6 消光法的粒径测量范围及影响测量精度的因素 | 126 |
| 4.1.7 消光法颗粒测量装置和仪器 | 128 |
| 4.2 光脉动法颗粒测量技术 | 130 |
| 4.2.1 光脉动法的基本原理 | 131 |
| 4.2.2 光脉动法的发展现状 | 133 |
| 4.3 消光起伏频谱法 | 136 |
| 4.3.1 数学模型 | 136 |
| 4.3.2 测量方法和测量原理 | 138 |
| 4.3.3 消光起伏频谱法的发展现状 | 147 |
| 参考文献 | 149 |
| 第5章 动态光散射测粒技术的原理和发展概况 | 153 |
| 5.1 引言 | 153 |
| 5.2 动态光散射测粒技术的原理 | 155 |
| 5.2.1 基本概念和基本关系 | 155 |
| 5.2.2 粒度测量的一般原理和基本分析 | 157 |
| 5.2.3 典型装置和数据分析方法 | 160 |
| 5.3 动态光散射测粒技术的发展概况 | 164 |
| 5.3.1 动态光散射技术的起源和初步定型 | 164 |
| 5.3.2 动态光散射测粒技术的早期发展 | 166 |
| 5.3.3 动态光散射测粒技术研究开发的现状和发展趋势 | 166 |
| 参考文献 | 167 |
| 第6章 超声法颗粒测量技术 | 171 |
| 6.1 声和超声 | 171 |
| 6.1.1 声和超声的产生 | 171 |
| 6.1.2 超声波特征量 | 172 |

| | | |
|------------------------------|---------------------------|------------|
| 6.2 | 超声法颗粒测量基本概念 | 176 |
| 6.2.1 | 声衰减和声速测量 | 178 |
| 6.2.2 | 能量损失机理 | 180 |
| 6.3 | 超声法颗粒测量理论 | 182 |
| 6.3.1 | ECAH 理论模型 | 183 |
| 6.3.2 | ECAH 理论模型的拓展和简化 | 193 |
| 6.3.3 | 耦合相模型 | 202 |
| 6.3.4 | 颗粒测量 | 208 |
| 6.3.5 | 基于电声学理论的 ZETA 电势测量 | 214 |
| 6.4 | 小结 | 215 |
| | 参考文献 | 215 |
| 第 7 章 纳米颗粒的测量 | | 219 |
| 7.1 | 纳米颗粒测量的背景和特点 | 219 |
| 7.2 | 动态光散射纳米颗粒测量 | 220 |
| 7.3 | 可视法纳米颗粒测量 | 223 |
| 7.4 | 超声法纳米颗粒测量 | 225 |
| 7.4.1 | 超声法的特点和装置 | 226 |
| 7.4.2 | 纳米颗粒检测的实例 | 227 |
| 7.4.3 | 超声纳米颗粒检测中注意事项 | 230 |
| | 参考文献 | 231 |
| 第 8 章 反演算法 | | 233 |
| 8.1 | 约束算法 | 233 |
| 8.1.1 | 颗粒粒径求解的一般讨论 | 233 |
| 8.1.2 | 约束算法在光散射颗粒测量中应用 | 234 |
| 8.2 | 非约束算法 | 244 |
| 8.2.1 | 非约束算法的一般讨论 | 244 |
| 8.2.2 | Chahine 算法及其改进 | 247 |
| 8.2.3 | 投影算法 | 249 |
| 8.2.4 | 松弛算法 | 251 |
| 8.2.5 | Chahine 算法和松弛算法计算实例 | 253 |
| | 参考文献 | 255 |
| 第 9 章 工业应用及在线测量 | | 257 |
| 9.1 | 雾化液滴测量 | 257 |

| | | |
|-------|----------------------|-----|
| 9.1.1 | 激光散射法测量 | 258 |
| 9.1.2 | 特大雾化液滴粒度测量 | 260 |
| 9.2 | 乳浊液中液体颗粒大小的测量 | 261 |
| 9.3 | 汽轮机中湿蒸汽测量 | 262 |
| 9.4 | 烟气轮机入口颗粒浓度及粒径的在线测量 | 264 |
| 9.5 | 烟雾连续在线测量 | 266 |
| 9.6 | 图像法测量快速流动颗粒 | 267 |
| 9.7 | 电厂气力输送煤粉粒径、浓度和速度在线测量 | 269 |
| 9.8 | 超细颗粒折射率测量 | 271 |
| 9.9 | 超声测量高浓度水煤浆 | 273 |
| | 参考文献 | 274 |

第 10 章 其他颗粒测量方法 275

| | | |
|--------|---------------------|-----|
| 10.1 | 电感应法 | 275 |
| 10.1.1 | 电感应法的基本原理 | 275 |
| 10.1.2 | 仪器的配置与使用 | 277 |
| 10.1.3 | 测量误差 | 279 |
| 10.1.4 | 小结 | 283 |
| 10.2 | 显微镜法 | 283 |
| 10.2.1 | 颗粒粒径的定义 | 284 |
| 10.2.2 | 粒径测量 | 285 |
| 10.2.3 | 光学显微镜与电子显微镜 | 288 |
| 10.2.4 | 小结 | 290 |
| 10.3 | 图像分析法 | 291 |
| 10.3.1 | 颗粒图像分析的基本概念和方法 | 291 |
| 10.3.2 | 颗粒图像分析过程和结果表示 | 294 |
| 10.3.3 | 小结 | 297 |
| 10.4 | 沉降法 | 299 |
| 10.4.1 | 颗粒在液体中沉降的 Stokes 公式 | 300 |
| 10.4.2 | 颗粒达到最终沉降速度所需的时间 | 301 |
| 10.4.3 | 临界直径及测量上限 | 302 |
| 10.4.4 | 布朗运动及测量下限 | 303 |
| 10.4.5 | Stokes 公式的其他影响因素 | 304 |
| 10.4.6 | 测量方法及仪器类型 | 306 |
| 10.4.7 | 沉降天平 | 309 |
| 10.4.8 | 光透沉降法 | 312 |
| 10.4.9 | 离心沉降 | 314 |

| | |
|-------------------------|------------|
| 10.4.10 小结 | 315 |
| 参考文献 | 316 |
| 附录 | 318 |
| 附录一 国内外主要颗粒仪器生产厂商 | 318 |
| 附录二 国内外颗粒测量标准 | 319 |
| 附录三 国内外标准颗粒主要生产厂商 | 325 |
| 附录四 液体的黏度和折射率 | 326 |
| 附录五 固体化合物的折射率 | 329 |

第 1 章

颗粒基本知识

1.1 概述

颗粒 (Particle) 是处于分割状态下的微小固体、液体或气体, 也可以是具有生命力的微生物、细菌、病毒等。多数情况下, 颗粒一词泛指固体颗粒, 而液体颗粒和气体颗粒则相应地称为液滴 (Droplet) 和气泡 (Bubble)。由许多个颗粒组成的颗粒群称为颗粒系。粉末则是固体颗粒在疏松状态下的堆积。

随着科学技术的日益进步和发展, 在国民经济的许多部门中出现了越来越多与细微颗粒密切相关的技术问题有待解决。颗粒粒径的测量就是其中最基本也是最重要的一个方面。除此之外, 许多情况下, 对颗粒浓度 (单位体积中的颗粒数或颗粒重量) 的测量也是重要的。

颗粒的粒度范围非常广, 跨度可达 7 个数量级, 图 1-1 给出了各种颗粒物质的粒度范围。在工业应用中大多数颗粒的粒径在数百微米 (μm , $1\mu\text{m}=10^{-3}\text{mm}$) 以下, 一些情况下, 也有超过一千微米, 甚至达数千微米。它们对产品性能和质量、能源消耗、环境污染、人类健康、全球气候变化以及生物成长等都有重大影响。

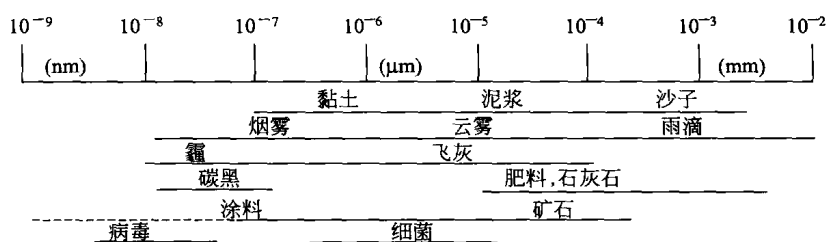


图 1-1 颗粒的粒度范围^[1]

纳米颗粒一般指小于 100nm 的颗粒, 由于纳米颗粒的特殊性质, 得到越来越广的应用。纳米颗粒的粒度最小可小于 1nm。

颗粒有在自然条件下形成的, 更多的则是在各种不同的工农业生产过程中产

生的。它们的形态很不相同，尺寸也在很大的范围内变化。分割状态下的液滴和气泡，在表面张力的作用下，绝大多数保持为球形（粒径较小时）或椭球形（粒径较大时），对它们的表征比较简单。与此相反，固体颗粒除极少数情况外，大都为非球形，具有复杂的形状，且各颗粒之间的形状也不相同，见图 1-2。因此，固体颗粒以及颗粒系的表征比较复杂。表 1-1 描述了颗粒和颗粒系的一些参数^[2]。

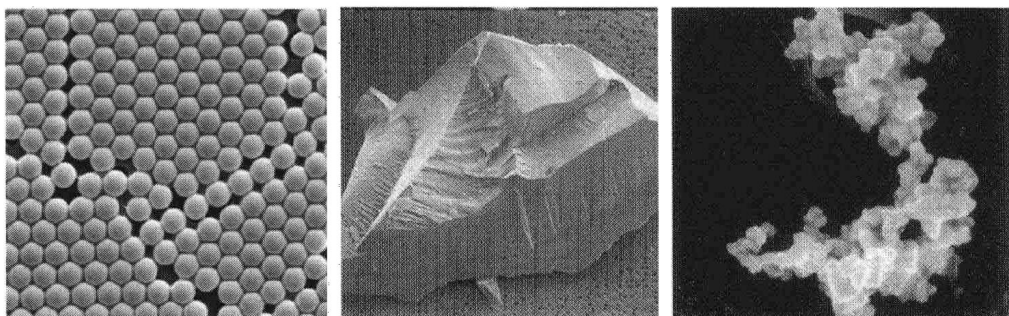


图 1-2 各种固体颗粒形状

表 1-1 颗粒和颗粒系的参数

| 单颗粒的参数 | 颗粒系的参数 | 单颗粒的参数 | 颗粒系的参数 |
|-------------|--------|--------|--------|
| 粒度 | 粒度分布 | 光折射和吸收 | 孔隙度 |
| 形状(宏观和微观) | 表面积 | | 孔径分布 |
| 表面积(内、外表面积) | 堆密度 | | 湿含量 |
| 密度 | 振实密度 | | 导电率 |
| 折射率 | 黏着性 | | 绝缘强度 |
| 硬度 | 黏着力 | | 抗张强度 |
| 熔点 | 表面能 | | 剪切强度 |
| 湿度 | 表面电荷 | | 阻光度 |

1.2 颗粒的几何特性

1.2.1 颗粒的形状

颗粒的形状 (Shape) 与颗粒材料的结构和产生颗粒时的过程有关，如破碎、燃烧、凝结和蒸发等过程所形成颗粒的形状就各不相同，颗粒形状还与其用途有关。颗粒形状的变化虽然非常多，但大致可分成表 1-2 中的几类^[3]。表中动力形状因子的定义是颗粒在层流介质中运动时受到的阻力与相同体积的球在相同状态介质中以同样速度运动时的阻力之比。复杂的颗粒形状对粒度测量会产生很大影响。

表 1-2 颗粒形状分类

| 形状 | 典型颗粒 | 动力形状因子 | 形状 | 典型颗粒 | 动力形状因子 |
|-----|-----------|---------|------|---------|-------------------------|
| 球形 | 烟, 飞灰, 花粉 | 1.00 | 絮状 | 浓烟, 氧化物 | 1.07~2.14(2) 1.18(3) |
| 立方形 | 煤渣 | 1.07 | 盘状 | 云母 | |
| 薄片形 | 某些矿物 | | 链状 | 炭黑 | |
| 纤维状 | 头发, 棉绒 | 1.31(1) | 不规则状 | 矿物 | |

1.2.2 颗粒的比表面积

颗粒的比表面积 (Surface area) 在化学反应等过程中是很重要的, 它直接影响到化学反应和吸附的速度和效率。比表面积定义为单位体积物体的表面积

$$S_v = S/V \quad (1-1)$$

式中, S_v 为比表面积, S 为颗粒的总表面积, V 为颗粒的体积。

对于表面致密的球形颗粒, 比表面积 S_v 越大, 意味着颗粒的粒度越小。但对于多孔表面颗粒, 则情况并不一定如此, 在粒径较大时, 它也可以有较大的比表面积。比表面积可以用气体或溶液吸附法、压汞法或气体通过法等测量^[4]。

1.2.3 颗粒的密度

颗粒的密度 (Density) 分成表观密度 (Apparent density) 和堆积密度或容积密度 (Volume density)。表观密度是对于单个颗粒而言的。它与颗粒的材料和结构有关, 其中颗粒的结构对其影响极大。如某些飞灰颗粒是中空的球体, 它的表观密度就大大小于它的母体材料的密度 (又称真密度)。又如由几个颗粒凝聚成一个较大的颗粒, 它的表观密度也将小于单个颗粒时的密度。表 1-3 给出了一些凝聚颗粒表观密度与母体材料密度的比较。

表 1-3 凝聚颗粒表观密度

| 材 料 | 颗粒密度 /(g/cm ³) | 母体材料密度 /(g/cm ³) | 材 料 | 颗粒密度 /(g/cm ³) | 母体材料密度 /(g/cm ³) |
|------|-------------------------------|---------------------------------|-----|-------------------------------|---------------------------------|
| 氧化铝 | 0.18 | 3.7 | 氧化钙 | 0.51 | 6.5 |
| 二氧化锡 | 0.25 | 6.7 | 氧化铅 | 0.62 | 9.4 |
| 二氧化锰 | 0.35 | 3.6 | 银 | 0.94 | 10.5 |

堆积密度或容积密度是对颗粒群而言。它的定义是单位填充体积中颗粒的质量

$$\rho_B = \frac{V_B(1-\epsilon)\rho_P}{V_B} = (1-\epsilon)\rho_P \quad (1-2)$$

式中, V_B 是颗粒堆积的密度, ρ_P 是颗粒的真密度, ϵ 称为空隙率, 是颗粒

群中空隙体积占总填充体积的比率。

堆积密度与颗粒的形状、粒度、堆积方式等许多因素有关。在不同的场合，往往需要不同的堆积密度。如在物料管道运输时，就希望颗粒能处于较疏松的填充状态，即较小的堆积密度，而在造粒过程中则希望致密的填充状态，即有较大的堆积密度。

1.3 颗粒粒度及粒度分布

1.3.1 单个颗粒的粒度

颗粒的粒度定义为颗粒所占据空间大小的尺度。它的范围变化很大，可以从零点几个纳米到几千微米，表 1-4 中给出了各种粉尘和烟雾颗粒大小的大致情况。表面光滑的球形颗粒的粒度即是它的直径。但非球体或不光滑表面颗粒的粒度表征就复杂得多，表 1-5 是几种表征不规则颗粒粒度的方法^[5]。

表 1-4 各种粉尘和烟雾的粒径

| 类别 | 种类 | 粒径/ μm |
|----------------------------|---------------------------|-------------------|
| 粉 尘 | 型砂 | 200~2000 |
| | 肥料用石灰 | 30~800 |
| | 浮选尾矿 | 20~400 |
| | 煤粉 | 10~400 |
| | 浮选用粉碎硫化矿 | 4~200 |
| | 铸造厂悬浮粉尘 | 1~200 |
| | 水泥粉 | 1~150 |
| | 烟灰 | 3~80 |
| | 面粉厂尘埃 | 15~20 |
| | 谷物提升机内尘埃 | 15 |
| | 滑石粉 | 10 |
| | 石墨矿粉尘 | 10 |
| | 水泥工厂窑炉排气粉尘 | 10 |
| | 颜料粉 | 1~8 |
| 静止大气中尘埃 | 0.01~1.0 | |
| 凝 结 固 体 烟 雾 | 金属精炼烟雾 | 0.1~100 |
| | NH_4Cl 烟雾 | 0.1~2 |
| | 碱烟雾 | 0.1~2 |
| | 氧化锌烟雾 | 0.03~0.3 |