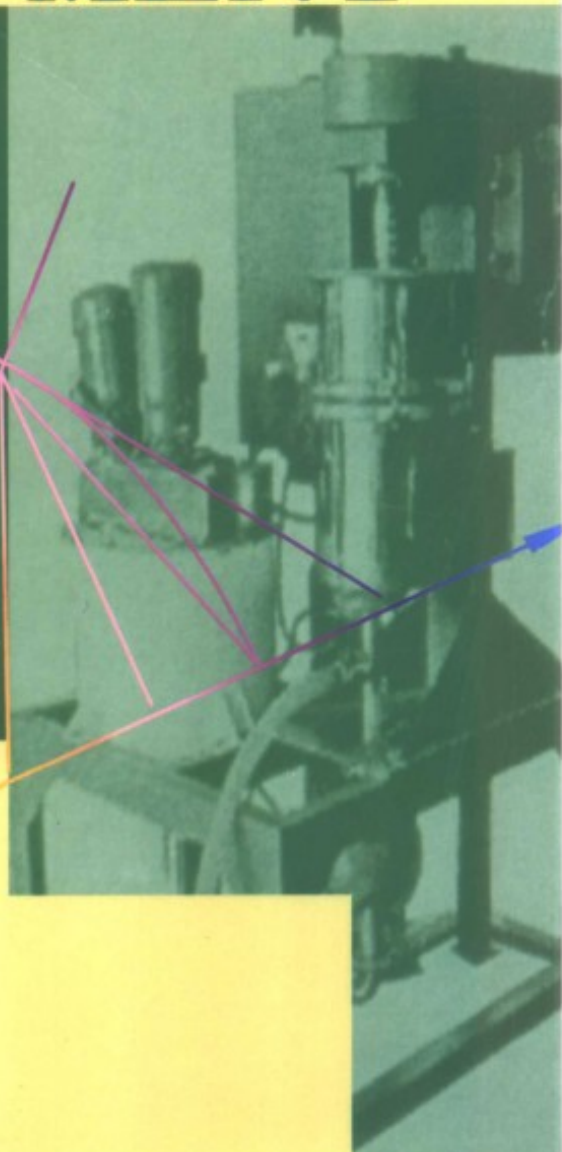


山东省高等教育教学内容和课程体系改革计划教材

● 陶珍东 郑少华 主编

粉体工程与设备

POWDER
TECHNOLOGY
AND
EQUIPMENT

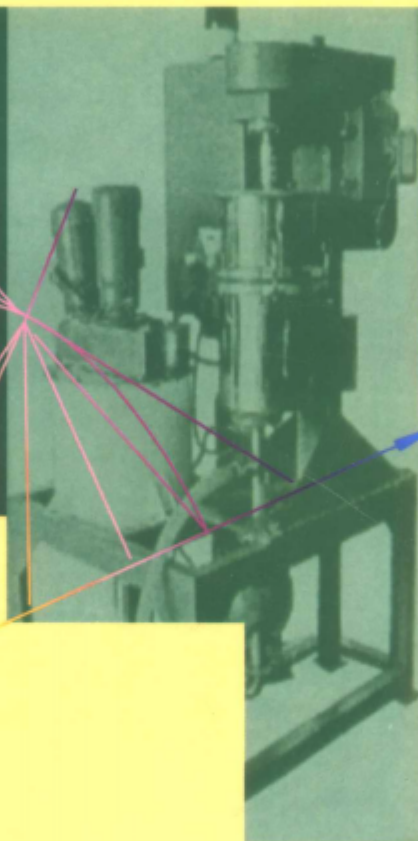


化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

粉体工程与设备

POWDER TECHNOLOGY AND EQUIPMENT



ISBN 7-5025-4626-X



9 787502 546267 >

ISBN 7-5025-4626-X/TQ · 1763 定价：50.00元

山东省高等教育教学内容和课程体系改革计划教材

粉体工程与设备

陶珍东 郑少华 主 编
张学旭 赵 义 副主编

化学工业出版社
材料科学与工程出版中心
·北 京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

粉体工程与设备/陶珍东, 郑少华主编. —北京: 化学工业出版社, 2003.7

ISBN 7-5025-4626-X

I. 粉… II. ①陶…②郑… III. ①粉末技术 ②粉体-设备 IV. TB44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 055049 号

山东省高等教育教学内容和课程体系改革计划教材

粉体工程与设备

陶珍东 郑少华 主 编

张学旭 赵 义 副主编

责任编辑: 朱 彤

文字编辑: 杨欣欣

责任校对: 郑 捷

封面设计: 于 兵

*

化学工业出版社 出版发行
材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010)64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市振南印刷厂印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787 毫米 × 1092 毫米 1/16 印张 23 $\frac{1}{4}$ 字数 584 千字

2003 年 8 月第 1 版 2003 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4626-X/TQ·1763

定 价: 50.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

粉体工程作为一门跨行业、跨学科的综合学科，与材料科学与工程的发展密切相关。掌握粉体工程的基本理论及粉体工程相关机械设备的构造、工作原理与性能，对于材料工程专业的学生及从事粉体工程技术的相关人员来说是非常重要的。

根据国家教委高等教育面向 21 世纪的改革精神，高等学校应培养专业面宽、知识面广、综合素质高的现代化建设人才。按照山东省教育厅下达的“山东省高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”课题，作者编写了这本教材。

本书是无机材料工程专业本科学生的专业教材。编写中综合了近年来粉体工程学科的最新理论和技术成果以及编者十几年的“粉体工程”教学经验和体会，力求理论的系统性和完整性，在工程应用方面力求通俗、实用。因此，本书也可作为相关工程技术人员的参考用书。

本书以粉体工程基本理论为基础，以粉体工程单元操作为主线，比较详细地介绍了相应机械设备的构造、工作原理、性能和应用特点等。包括的主要内容有：粉体的基本形态，粉体的表征与测量，粉体的堆积与填充，粉体流变学，粉体的粉碎、分级、分离、混合、造粒、输送、贮存等。

本书由陶珍东、郑少华主编。具体编写分工是：第 1~5 章，郑少华；第 6~9 章，陶珍东；第 10 章，赵义；第 11、12 章，张学旭。潘孝良教授对全书进行了详细的审阅和校对。

在编写过程中，潘孝良教授提出了很多建设性的意见；李景冠、温建平等在插图制作中做了大量的工作。在本书付印之际，谨向他们表示衷心的感谢。

在编写过程中，本书参考了大量的资料文献，在此也向这些文献的作者们表示谢意。

由于编者水平所限，此书难免有不当之处，殷切希望师生及读者批评指正。

编者

2003 年 3 月于济南大学

内 容 提 要

本书以颗粒学和粉体学的基本知识为基础，分别介绍了粉体的几何性质、粉体的堆积和填充、粉体的流变学性质及粉碎、分级、分离、混合、造粒、输送、贮存等相关的单元操作，并较详细地介绍了相应设备的构造、工作原理、性能和应用特点等。本书综合了近年来粉体工程学科的最新理论和技术成果，并力求理论的系统性和完整性，在工程应用方面强调通俗和实用。因此，本书既可作为本科专业教材，也可作为相关工程技术人员和研究人员的参考书。

目 录

| | | | |
|--------------------------|----|---------------------|----|
| 第 1 章 概论 | 1 | 3.2.4 不同尺寸颗粒的最紧密堆积 | 27 |
| 1.1 粉体工程研究的内容 | 1 | 第 4 章 粉体的湿润 | 30 |
| 1.2 粉体的基本定义 | 2 | 4.1 粉体层的液体 | 30 |
| 1.3 粉体颗粒的种类 | 2 | 4.2 粉体表面的湿润性 | 30 |
| 1.3.1 原级颗粒 | 3 | 4.3 液体架桥 | 31 |
| 1.3.2 聚集颗粒 | 3 | 4.4 液体在粉体层毛细管中的上升高度 | 32 |
| 1.3.3 凝聚体颗粒 | 3 | 第 5 章 粉体的流变学 | 34 |
| 1.3.4 絮凝体颗粒 | 4 | 5.1 粉体的摩擦角 | 34 |
| 1.4 与粉体有关的产业 | 4 | 5.1.1 粉体的内摩擦角 | 34 |
| 1.4.1 以粉体为主体的相关产业 | 4 | 5.1.2 安息角 | 37 |
| 1.4.2 在生产工艺的重要部分与粉体相关的产业 | 4 | 5.1.3 壁面摩擦角和滑动摩擦角 | 37 |
| 第 2 章 粉体粒度分析及测量 | 6 | 5.1.4 运动角 | 38 |
| 2.1 单个颗粒大小的表示方法 | 6 | 5.2 附着力 | 38 |
| 2.1.1 用单个颗粒的三维尺寸来表示 | 6 | 5.2.1 分子间的作用力 | 38 |
| 2.1.2 用统计平均径表示 | 6 | 5.2.2 颗粒间的静电作用力 | 39 |
| 2.1.3 用当量直径来表示 | 7 | 5.2.3 颗粒间毛细管引力 | 39 |
| 2.2 颗粒形状因数 | 7 | 5.3 粉体压力计算 | 39 |
| 2.2.1 颗粒的扁平度和伸长度 | 8 | 5.3.1 Janssen 公式 | 39 |
| 2.2.2 表面积形状因数和体积形状因数 | 8 | 5.3.2 料斗的压力分布 | 40 |
| 2.2.3 球形度 ϕ | 8 | 5.4 粉体的重力流动 | 41 |
| 2.3 粒度分布 | 9 | 5.4.1 粉体从孔口中流出 | 41 |
| 2.3.1 粒度的频率分布 | 9 | 5.4.2 粉体在料仓中的流动模式 | 42 |
| 2.3.2 累积分布 | 10 | 5.5 颗粒流动分析 | 44 |
| 2.3.3 频率分布和累积分布的关系 | 12 | 5.5.1 流动分析中使用的特性 | 44 |
| 2.3.4 平均粒径 | 12 | 5.5.2 流动与不流动的判据 | 48 |
| 2.3.5 表征粒度分布的特征参数 | 13 | 5.6 整体流料仓的设计 | 49 |
| 2.3.6 粒度分布函数表达式 | 13 | 5.7 颗粒贮存和流动时的偏析 | 50 |
| 2.4 颗粒粒度的测量 | 20 | 5.7.1 粉体偏析的机理 | 50 |
| 2.4.1 沉降法 | 21 | 5.7.2 防止偏析的方法 | 51 |
| 2.4.2 激光法 | 22 | 第 6 章 粉碎过程及设备 | 54 |
| 2.4.3 颗粒形状的测量 | 22 | 6.1 粉碎的基本概念 | 54 |
| 第 3 章 粉体填充与堆积特性 | 23 | 6.1.1 粉碎 | 54 |
| 3.1 粉体的填充指标 | 23 | 6.1.2 粉碎比 | 54 |
| 3.2 粉体颗粒的填充与堆积 | 23 | 6.1.3 粉碎级数 | 54 |
| 3.2.1 等径球体颗粒的规则填充 | 23 | 6.1.4 粉碎产品的粒度特性 | 55 |
| 3.2.2 不同尺寸球形颗粒的填充 | 25 | 6.1.5 粉碎流程 | 55 |
| 3.2.3 实际颗粒的堆积 | 26 | 6.2 被粉碎物料的基本物性 | 56 |
| | | 6.2.1 强度 | 56 |

| | | | |
|---------------------------------|-----|-------------------------------|-----|
| 6.2.2 硬度 | 57 | 的应用 | 171 |
| 6.2.3 易碎(磨)性 | 58 | 7.4 高能球磨工艺 | 174 |
| 6.2.4 脆性 | 59 | 7.4.1 高能球磨设备 | 174 |
| 6.2.5 材料的韧性 | 59 | 7.4.2 影响高能球磨效率及机械力化学作 用的因素 | 175 |
| 6.3 材料的粉碎机理 | 59 | 第8章 颗粒流体力学及设备 | 178 |
| 6.3.1 格里菲斯(Griffith)强度理论 | 59 | 8.1 两相流的基本性质 | 178 |
| 6.3.2 断裂 | 60 | 8.1.1 两相流的浓度 | 178 |
| 6.3.3 粉碎过程热力学 | 60 | 8.1.2 两相流的密度 | 179 |
| 6.3.4 粉碎过程动力学 | 65 | 8.1.3 两相流的黏度 | 179 |
| 6.4 粉碎工艺 | 70 | 8.1.4 两相流的比热容和热导率 | 180 |
| 6.4.1 粉碎方式 | 70 | 8.2 颗粒在流体中的运动 | 180 |
| 6.4.2 粉碎模型 | 74 | 8.2.1 颗粒的受力 | 180 |
| 6.4.3 混合粉碎和选择性粉碎 | 75 | 8.2.2 颗粒在流体中的运动方程 | 182 |
| 6.5 破碎机械 | 76 | 8.3 颗粒的重力沉降 | 183 |
| 6.5.1 颚式破碎机 | 76 | 8.3.1 沉降末速度 | 183 |
| 6.5.2 圆锥破碎机 | 86 | 8.3.2 沉降末速度的修正 | 185 |
| 6.5.3 辊式破碎机 | 92 | 8.4 离心沉降 | 186 |
| 6.5.4 锤式破碎机 | 95 | 8.5 流体通过颗粒层的透过流动 | 187 |
| 6.5.5 反击式破碎机 | 98 | 8.6 颗粒的悬浮运动及气力输送 | 189 |
| 6.6 粉磨机械 | 108 | 8.6.1 流态化技术的基本原理 | 189 |
| 6.6.1 球磨机 | 108 | 8.6.2 气力输送 | 191 |
| 6.6.2 笼式粉碎机 | 131 | 第9章 分级、分离及设备 | 203 |
| 6.6.3 轮碾机 | 133 | 9.1 分级和分离理论 | 203 |
| 6.6.4 莱歇磨 | 134 | 9.1.1 分离效率 | 203 |
| 6.6.5 MPS立式磨 | 135 | 9.1.2 分级粒径 | 204 |
| 6.6.6 雷蒙磨 | 136 | 9.1.3 分级精度 | 204 |
| 6.6.7 振动磨 | 138 | 9.1.4 分级效果的综合评价 | 205 |
| 6.6.8 高压辊式磨机 | 142 | 9.2 分级设备 | 205 |
| 6.7 超细粉碎机械 | 144 | 9.2.1 筛分设备 | 205 |
| 6.7.1 搅拌磨 | 144 | 9.2.2 粗分级机 | 216 |
| 6.7.2 胶体磨 | 147 | 9.2.3 离心式选粉机 | 216 |
| 6.7.3 高速机械冲击式磨机 | 148 | 9.2.4 旋风式选粉机 | 218 |
| 6.7.4 气流粉碎机 | 151 | 9.2.5 MDS型组合式选粉机 | 219 |
| 第7章 粉碎机械力化学 | 158 | 9.2.6 O-Sepa选粉机 | 220 |
| 7.1 粉碎机械力化学概述 | 158 | 9.2.7 Sepax选粉机 | 222 |
| 7.2 粉碎机械力化学作用及机理 | 158 | 9.3 超细分级原理及设备 | 222 |
| 7.2.1 粉碎平衡 | 158 | 9.3.1 超细分级原理 | 222 |
| 7.2.2 晶体结构的变化 | 160 | 9.3.2 干式分级和湿式分级 | 224 |
| 7.3 粉碎机械力化学的应用 | 166 | 9.3.3 超细分级设备 | 225 |
| 7.3.1 粉体材料的机械力化学改性 | 166 | 9.3.4 超细分级的有关问题 | 236 |
| 7.3.2 机械力化学法制备纳米金属、非 晶态金属及合金 | 168 | 9.4 分离设备 | 238 |
| 7.3.3 机械力化学法制备新型材料 | 169 | 9.4.1 气固分离设备 | 238 |
| 7.3.4 机械力化学在水泥、混凝土生产中 的应用 | 171 | 9.4.2 液固分离设备 | 261 |

| | | | |
|-------------------------------|-----|-------------------------------|-----|
| 第 10 章 混合与造粒 | 281 | 11.3.4 斗式提升机的选型计算..... | 338 |
| 10.1 混合..... | 281 | 11.4 链板输送机..... | 338 |
| 10.1.1 混合程度的评价..... | 281 | 11.4.1 板式输送机..... | 338 |
| 10.1.2 混合机理..... | 282 | 11.4.2 刮板输送机..... | 340 |
| 10.1.3 混合过程..... | 282 | 11.4.3 埋刮板输送机..... | 341 |
| 10.1.4 影响混合的因素..... | 282 | 11.4.4 FU 链式输送机..... | 342 |
| 10.1.5 混合机的类型..... | 286 | 第 12 章 粉体喂料及计量设备 | 345 |
| 10.1.6 混合机械及设备..... | 288 | 12.1 有挠性牵引构件的喂料设备..... | 345 |
| 10.2 造粒..... | 296 | 12.1.1 带式喂料机..... | 345 |
| 10.2.1 颗粒群的凝聚..... | 296 | 12.1.2 板式喂料机..... | 345 |
| 10.2.2 造粒方法..... | 298 | 12.2 转动式喂料机..... | 346 |
| 10.2.3 造粒设备..... | 298 | 12.2.1 螺旋喂料机..... | 346 |
| 第 11 章 粉体输送设备 | 300 | 12.2.2 滚筒喂料机..... | 347 |
| 11.1 胶带输送机..... | 300 | 12.2.3 叶轮喂料机..... | 347 |
| 11.1.1 胶带输送机的构造..... | 300 | 12.2.4 圆盘喂料机..... | 347 |
| 11.1.2 胶带输送机的应用..... | 311 | 12.3 振动式喂料机..... | 348 |
| 11.1.3 胶带输送机的选型计算..... | 313 | 12.3.1 惯性式振动喂料机..... | 348 |
| 11.2 螺旋输送机..... | 323 | 12.3.2 振动式喂料机..... | 349 |
| 11.2.1 螺旋输送机构造..... | 323 | 12.4 计量设备..... | 354 |
| 11.2.2 螺旋输送机的应用..... | 325 | 12.4.1 恒速式定量秤..... | 354 |
| 11.2.3 螺旋输送机选型计算..... | 326 | 12.4.2 调速式定量秤..... | 356 |
| 11.2.4 螺旋输送机选型计算举例..... | 329 | 12.4.3 其他计量设备..... | 358 |
| 11.3 斗式提升机..... | 330 | 附录 | 363 |
| 11.3.1 斗式提升机构造..... | 330 | 1. 单位换算表..... | 363 |
| 11.3.2 斗式提升机的应用..... | 333 | 2. 重要数值和换算式..... | 364 |
| 11.3.3 斗式提升机的装载和卸载 方式..... | 336 | 3. 水和空气的黏度系数..... | 364 |
| | | 4. 标准筛比较表..... | 365 |

第 1 章 概 论

1.1 粉体工程研究的内容

20 世纪 50 年代初期，粉体工程这个名词首先出现在战后的日本。实际上，对于粉体的研究早在新石器时代就开始了。粉体从古至今一直与人类的生产和生活有着十分密切的关系，众所周知，陶器——第一种人造材料早在新石器时代就问世了，而它的生产，除与火有着必然的联系外，与粉末也是分不开的。随着生产的发展，人们对细粉末状态的物质有了逐步的认识。明代宋应星所著的《天工开物》一书就对一些原始的粉体工艺加工过程进行了详细的总结和描述，只是由于各种限制，没能提出粉体的概念。

科学技术发展至近代，几乎所有的工业部门均涉及到粉粒体处理过程。约翰·艾特肯博士在他的论文中这样写到：“漂浮在大气中的尘埃引起了人们越来越多的关注。随着对这些看不见的粉尘认识的加深，我们的兴趣也浓厚了。当我们认识到这些尘埃对我们的生命至关重要时，我们几乎可以说，人们对它的担忧是不无道理的。无论是小到经过许多倍显微镜放大后也看不见的那些无机尘埃，还是漂浮在大气层内不可见的更大一点的有机粒子；尽管这些粒子看不见，但它们可是传播人类疾病和死亡的瘟神——这些瘟神远比诗人或画家曾表现出来的要真实得多……”。上面的一段话指的是环境污染控制领域。现在，粉体工程学已经发展成为一门跨学科、跨行业的综合性极强的技术科学，它的应用遍及材料、冶金、化学工程、矿业、机械、建筑、食品、医药、能源、电子及环境工程等诸多领域。

在粉体工程这一名词出现以前，工业部门的划分一般是以产品的类别为基础的，各行业只能独立处理各自遇到的粉粒体技术问题。由于缺少交流，大家认识不到各行业之间在粉体技术方面的共性，因此在某种程度上阻碍了科学技术的发展。随着知识的积累，在综合学科、边缘学科迅猛发展的大趋势下，人们对粉体的认识也产生了升华。这就是将粉体看成为物质的一种特殊存在形式，把各行业在粉体研究中的共性聚合在一起作为一门单独的学科来进行研究，以指导各行业的产品开发和技术进步，一门新的学科——粉体工程学就由此诞生了。

粉体研究的目如下。

(1) 提高工业产品的质量与控制水平 粉体颗粒的大小及粒度分布对产品质量影响是非常大的。如传统材料中的水泥，粗细颗粒的比例、颗粒的形状对产品性能有着极大的影响；医药工业中的某些药剂，可以通过细化来改变药剂的用量和吸收性；颜料颗粒的大小对被涂物体表面的遮盖力影响极大，当颗粒细到约等于可见光波长（ $0.4\sim 0.7\ \mu\text{m}$ ）的 $0.4\sim 0.5$ 倍时，颗粒对入射光的散射能力最大；这时，颜料便具有较高的遮盖力，当颗粒直径小于可见光波长的 $1/2$ 时（即小于上述数值），因发生光的衍射，遮盖力明显下降，颜料具有透明性；复印机所用墨粉的粒度一般在 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ ， $6\sim 20\ \mu\text{m}$ 的颗粒应占到 75% 以上，小于这一数值，复印时变黑；大于这一数值，字体复印不上去。再者就是粉体的表面改性，如白云母经过氧化钛、氧化铬、氧化铁、氧化锆等金属氧化物进行表面改性后，用于化妆品、塑料、

浅色橡胶、涂料、特种涂料等，可以赋予这些制品珠光效应，大大提高了这些产品的价值。类似的例子举不胜举。

(2) 节能降耗，促进粉体加工技术的发展 粉体颗粒的制备离不开粉体加工机械、化学加工过程及高温处理过程等。当把粉体加工到很微细的颗粒时，所需要的能量是相当大的。例如建材、化工、冶金等行业中主要使用的微细粉体加工设备之一是球磨机，而目前球磨机的有效能量利用率仅为2%~4%左右，大约有96%以上的能量在粉磨物料时被消耗掉。通过对粉碎机理的研究，可改进或设计新型的粉磨机械，使之针对细粉磨过程中粉体的聚散情况，最大限度地提高粉磨效率。在化学法加工超细粉体时（目前纳米级粉体一般都是用化学方法来进行加工的），加工成本高昂，如何找到更好、更有效的方法也是其中的工作之一。粉体加工技术涉及的内容很多，在此不一一叙述。

(3) 新材料的研究与开发 随着世界范围内新技术、高新技术的突飞猛进，新型材料层出不穷。例如，现在人们创造的超硬、超强、超导、超纯、超塑等新型材料，使科学发展到了利用极端参数的阶段。要使材料达到极端状态，则往往要改变材料原有的属性，而改变属性的方法之一就是使材料颗粒粒度细化至纳米级再进行组合，以生产出一些与原材料属性完全不同的新型材料。超导材料就是在原先不导电的陶瓷材料的基础上，采取一些高新技术进行处理后，得到的一种电阻几乎为零的人工合成新型材料。

1.2 粉体的基本定义

粉体物料是由无数颗粒构成的。从宏观角度看，颗粒是粉体物料的最小单元。颗粒的大小、分布、结构形态和表面形态等因素，是粉体其他性能的基础。

工程上常把在常态下以较细的粉粒状态存在的物料，称为粉体物料，简称粉体。构成粉体颗粒的大小，小至只能用电子显微镜才可以看得清的几个纳米，大到用肉眼可以辨别清楚的数百微米，乃至几十毫米。如果构成粉体的所有颗粒，其大小和形状都是一样的，则称这种粉体为单分散粉体。在自然界中，单分散粉体尤其是超微单分散粉体极为罕见，目前只有用化学人工合成的方法可以制造出近似的单分散粉体。迄今为止，还没有利用机械的方法制造出单分散粉体的报道。大多数粉体都是由参差不齐的各种不同大小的颗粒所组成，而且形状也各异，这样的粉体称为多分散粉体。粉体颗粒的大小和在粉体颗粒群中所占的比例，分别称为粉体物料的粒度和粒度分布。

粉体颗粒的大小，一般用“目”或微米来表示。所谓“目”，乃是每英寸^①长的标准试验筛网上的筛孔数量。较粗的粉体，多用目来表示其颗粒粒度。例如，“+325目0.5%”，表示有0.5%（占样品的质量分数）的粗大颗粒通不过325目筛，这部分颗粒称为筛余量。“-270~+325目30%”，表示有30%的物料颗粒能通过270目而通不过325目筛子，即270~325目的颗粒在样品中所占质量为30%。

值得注意的是，各国的试验用筛所对应的筛孔尺寸是不一样的。近年来，在国际标准化组织（ISO）的协调下，它们正在趋于统一。

1.3 粉体颗粒的种类

世界上存在着成千上万种粉体物料。它们有的是人工合成的，有的是天然形成的。各种

^① 1 in (英寸) = 0.0254 m, 下文同。

粉体的颗粒又是千差万别的。但是，如果从颗粒的构成来看，这些形态各异的颗粒，往往可以分成四大类型：原级颗粒型、聚集体颗粒型、凝聚体颗粒型和絮凝体颗粒型。最重要的是前三种。

1.3.1 原级颗粒

最先形成粉体物料的颗粒，称为原级颗粒。因为它是第一次以固态存在的颗粒，故又称一次颗粒或基本颗粒。从宏观角度看，它是构成粉体的最小单元。根据粉体材料种类的不同，这些原级颗粒的形状，有立方体状的，有针状的，有球状的，还有不规则晶体状的，如图 1-1 所示。图中各晶体内的虚线，表示微晶连接的晶格层。

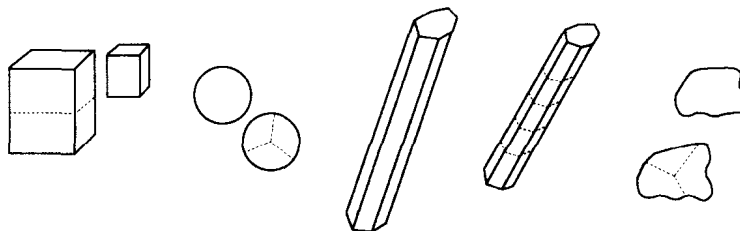


图 1-1 原级颗粒示意图

粉体物料的许多性能都是与它的分散状态，即与它的单独存在的颗粒大小和形状有关。真正能反映出粉体物料的固有性能的，就是它的原级颗粒。

1.3.2 聚集体颗粒

聚集体颗粒是由许多原级颗粒靠着某种化学力与其表面相连而堆积起来。因为它相对于原级颗粒来说，是第二次形成的颗粒，所以又称二次颗粒。由于构成聚集体颗粒的各原级颗粒之间，均以表面相互重叠，因此，聚集体颗粒的表面积比构成它的各原级颗粒的总和为小，如图 1-2 所示。聚集体颗粒主要是在粉体物料的加工和制造过程中形成的。例如，化学沉淀物料在高温脱水或晶型转化过程中，便要发生原级颗粒的彼此粘连，形成聚集颗粒。此外，晶体生长、熔融等过程，也会促进聚集体颗粒的形成。

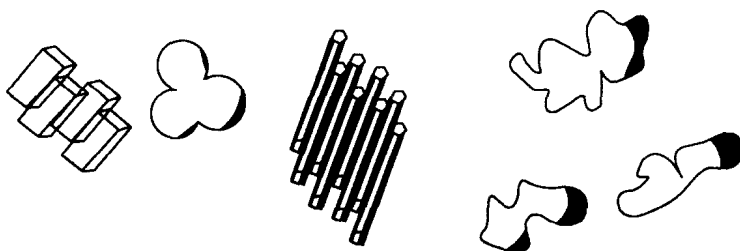


图 1-2 聚集体颗粒示意图

聚集体颗粒中各原级颗粒之间有很强烈的结合力，彼此结合得十分牢固，并且聚集体颗粒本身就很很小，很难将它们分散成为原级颗粒，必须再用粉碎的方法才能使其解体。

1.3.3 凝聚体颗粒

凝聚体颗粒是在聚集体颗粒之后形成的，故又称三次颗粒。它是由原级颗粒或聚集体颗粒或两者的混合物，通过比较弱的附着力结合在一起的疏松的颗粒群，而其中各组成颗粒之间，是以棱或角结合的，如图 1-3 所示。正因为是棱或角接触的，所以凝聚体颗粒的表面，

与各个组成颗粒的表面之和大体相等，凝聚体颗粒比聚集体颗粒要大得多。

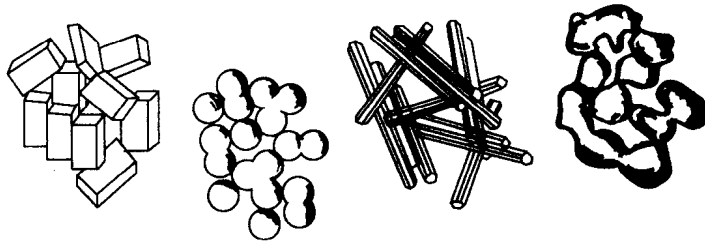


图 1-3 凝聚体颗粒示意图

凝聚体颗粒也是在物料的制作与加工处理过程中产生的。例如，湿法沉淀的粉体，在干燥过程中便形成大量的凝聚体颗粒。

原级颗粒或聚集体颗粒的粒径越小，单位表面上的表面力（如 van der Waals 力、静电力等）越大，越易于凝聚，而且形成的凝聚体颗粒越牢固。由于凝聚体颗粒结构比较松散，它能够被某种机械力，如研磨分散力或高速搅拌的剪切力所解体。如何使粉体的凝聚体颗粒在具体应用场合下快速而均匀地分散开，是现代粉体工程学中的一个重要研究课题。

1.3.4 絮凝体颗粒

粉体在许多实际应用中，都要与液相介质构成一定的分散体系。在这种液固分散体系中，由于颗粒之间的各种物理力，迫使颗粒松散地结合在一起，所形成的粒子群，称为絮凝体颗粒。它很容易被微弱的剪切力所解絮，也容易在表面活性剂（分散剂）的作用下自行分散开来。长期贮存的粉体，可以看成是与大气水分构成的体系，故也有絮凝体产生，形成结构松散的絮团——料块。

1.4 与粉体有关的产业

1.4.1 以粉体为主体的相关产业

(1) 无机非金属材料工业 水泥、陶瓷、玻璃和窑业原料的粉碎、烧成和烧结、水硬性、研磨性，玻璃和陶瓷的特性、电极、反应容器等碳素制品的特性。

(2) 冶金和金属工艺学 粉末冶金、硬质合金、金属陶瓷、淬火和调质合金，选矿（包括浮选）的各种问题，团矿的各种问题，流动焙烧，自熔冶炼，高炉焦炭的强度和反应性，铸造的型砂、金属的塑性加工和组织结构，金属的表面处理，金属的腐蚀等问题。

(3) 颜料和感光剂工业 这是相应于光、放射线、电场、磁场压力等，而表面出现独特性质的材料工业。颜料的色调和涂附层的特性，照相乳剂，电子照相感光层、感压纸材料，感热材料，粉末系荧光体和涂层的特性、磁性录音、录像带等。

(4) 电化学和部分无机化学工业 电池类的活性物质，碳素电极，拜耳法氧化铝的结晶特性，煅烧问题，固体肥料的固结问题等。

1.4.2 在生产工艺的重要部分与粉体相关的产业

(1) 原子能和能源工业 原子炉的陶瓷燃烧，石墨，氧化铍等高密度烧结材料，反射材料，由泥浆燃料的热引起周期性变形，固体燃料的着火性，粉尘的爆炸，固体炸药的特性，烧结、涡轮叶片等。

(2) 石油化学、高分子化学、有机精密化学工业 各种固体催化剂的活性，流动催化层，乳剂，悬浮剂的分散聚合，橡胶或塑料的填充材料和配合剂，塑料的球晶化、纤维化，

医药、农药的粉末性和造粒。

(3) 电子学 集成电路的制造和分子加工, 缺陷控制技术、磁芯、铁素体、烧结电阻体、钛磁器、碳精电极、电视机显像管的微粒子光电面等。

(4) 宇宙科学 超轻量耐热材料, 高强度材料, 火箭用固体燃料的成型性和燃烧性等。

第 2 章 粉体粒度分析及测量

2.1 单个颗粒大小的表示方法

球形颗粒的大小可用直径表示。正立方体颗粒可用一边之长来表示，对于其他形状规则的颗粒可用相应的适当尺寸来表示。有些形状规则的颗粒可能需要一个以上的尺寸来表示其大小，如锥体需要用直径和高度，长方体需用长、宽、高来表示。

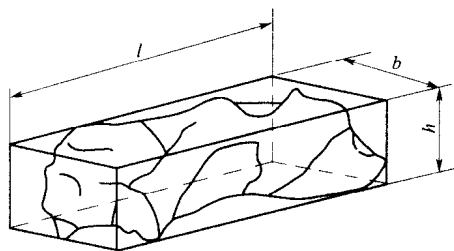


图 2-1 颗粒的外接长方体

但是，真正由规则球形颗粒构成的粉体颗粒并不多。对于不规则的非球形颗粒，是利用测定某些与颗粒大小有关的性质推导而来，并使它们与线性量纲有关。常用如下方式来定义它们的大小和粒径。

2.1.1 用单个颗粒的三维尺寸来表示

设一个颗粒以最大稳定度（重心最低）置于一个水平面上，此时颗粒的投影如图 2-1 所示。以颗粒的长度 l 、宽度 b 、高度 h 定义的粒度平均值称为三轴径，计算式及物理意义见表 2-1。

表 2-1 三轴径的平均值计算公式

| 序号 | 计算式 | 名称 | 意义 |
|----|---|---------|------------------|
| 1 | $\frac{l+b}{2}$ | 二轴平均径 | 显微镜下出现的颗粒基本大小的投影 |
| 2 | $\frac{l+b+h}{3}$ | 三轴平均径 | 算术平均 |
| 3 | $\frac{3}{\frac{1}{l} + \frac{1}{b} + \frac{1}{h}}$ | 三轴调和平均径 | 与颗粒的比表面积相关联 |
| 4 | \sqrt{lb} | 二轴几何平均径 | 接近于颗粒投影面积的度量 |
| 5 | $\sqrt[3]{lbh}$ | 三轴几何平均径 | 假想的等体积的正方体的边长 |
| 6 | $\sqrt{\frac{2(lb+lh+bh)}{6}}$ | | 假想的等表面积的正方体的边长 |

2.1.2 用统计平均径表示

统计平均径如图 2-2 所示，是显微镜测定的一个术语。显微镜的线性目镜测微标尺如游丝测微标尺，把颗粒的投影面积分成面积大约相等的两部分。这个分界线在颗粒投影轮廓上截取的长度，称为“马丁直径” d_m 。沿一定方向测量颗粒投影轮廓的两端相切的切线间的垂直距离，在一个固定方向上的投影长度，称为“弗雷特直径” d_f 。

显然，一个不规则的颗粒，在显微镜下的直径 d_m 和 d_f 的大小，均与颗粒取向有关。当测量的颗粒数目很多时，因取向所引起的偏差大部分可以互相抵消，故所得到的统计平均粒径的平均值，还是比较准确地反映出了颗粒的真实大小。

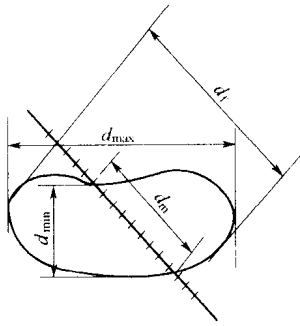


图 2-2 马丁直径和弗雷特直径

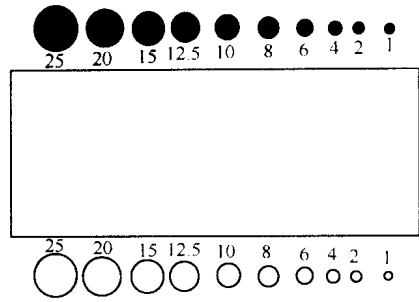


图 2-3 帕特森量板示意图

还有一种表示颗粒统计平均粒径的方式，是用一个与颗粒投影面积大致相等的圆的直径来表示的，一般称为投影直径 d_p 。为了测定颗粒直径，在显微镜目镜下的聚焦平面上，放置一块用玻璃板制成的量板，以取代线性目镜测微标尺。这种量板称为“帕特森量板”，如图 2-3 所示。量板上刻有直径由小到大排列的 10 个暗的和 10 个明的圆圈，其上的数字表示各圆圈的相对直径。利用显微镜物镜测微标尺，可以确定最小的那个圆圈所代表的直径大小，从而可以计算出其余各圆圈所代表的颗粒尺寸。量板上的长方形，廓出了一部分待测的颗粒。

把各个颗粒的投影面积与相应的圆圈相比较，就得出各个颗粒的投影直径 d_p 。这种方式简单、快速，但准确性较差。

2.1.3 用当量直径来表示

“当量直径”是利用测定某些与颗粒大小有关的性质推导而来，并使它们与线性量纲有关。用得最多的是“当量球径”。某边长为 1 的正立方体，其体积等于直径为 1.24 的圆球体积，因此 1.24 就是推导来的体积直径。表 2-2 中列出一些“当量直径”的定义。

表 2-2 颗粒当量直径的定义

| 序号 | 名称 | 定义 | 公式 |
|----------|-----------|------------------------------------|--------------------------------|
| d_V | 体积直径 | 与颗粒具有相同体积的圆球直径 | $V = \frac{\pi}{6} d_V^3$ |
| d_S | 面积直径 | 与颗粒具有相同表面积的圆球直径 | $S = \pi d_S^2$ |
| d_{SV} | 面积体积直径 | 与颗粒具有相同的外表面和体积比的圆球直径 | $d_{SV} = \frac{d_V^3}{d_S^2}$ |
| d_{st} | Stokes 直径 | 与颗粒具有相同密度且在同样介质中具有相同自由沉降速度(层流区)的直径 | |
| d_a | 投影面直径 | 与置于稳定的颗粒的投影面积相同的圆的直径 | $A = \frac{\pi}{4} d_a^2$ |
| d_L | 周长直径 | 与颗粒的投影外形周长相等的圆的直径 | $L = \pi d_L$ |
| d_A | 筛分直径 | 颗粒可以通过的最小方筛孔的宽度 | |

对于不规则颗粒，被测定的颗粒大小通常取决于测定的方法，因此选用的方法应尽可能反映出所希望控制的工艺过程。例如对于颜料测定颗粒的投影面积很重要，对化学药剂应测定它的总表面积或比表面积。

2.2 颗粒形状因数

绝大多数粉体颗粒都不是球形对称的，颗粒的形状影响粉体的流动性、包装性能、颗粒

与流体相互作用，以及涂料的覆盖能力等性能。所以严格地说，所测得的粒径，只是一种定性的表示。如果除了粒径大小外，还能给出颗粒形状的某一指标，那么就能较全面地反映出颗粒的真实形象。常用各种形状因数来表示颗粒的形状特征。

2.2.1 颗粒的扁平度和伸长度

一个不规则的颗粒放在一平面上（例如放在显微镜的载片上），一般的情形是颗粒的最大投影面（也就是最稳定的平面），与支承平面相黏合。这时颗粒具有最大的稳定度。如图 2-1 所示。

$$\text{扁平度 } m = \text{短径} / \text{厚度} = b / h \quad (2-1a)$$

$$\text{伸长度 } n = \text{长径} / \text{短径} = l / b \quad (2-1b)$$

2.2.2 表面积形状因数和体积形状因数

不管颗粒形状如何，只要它是没有孔隙的，它的表面积就一定正比于颗粒的某一特征尺寸的平方，而它的体积就正比于这一尺寸的立方。如果用 d 代表这一特征尺寸，那么有

$$S = \pi d_s^2 = \varphi_s d^2 \quad (2-2a)$$

$$V = \frac{\pi}{6} d_v^3 = \varphi_v d^3 \quad (2-2b)$$

故

$$\varphi_s = \frac{S}{d^2} = \frac{\pi d_s^2}{d^2} \quad (2-3a)$$

$$\varphi_v = \frac{V}{d^3} = \frac{\pi d_v^3}{6d^3} \quad (2-3b)$$

φ_s 和 φ_v 分别称为颗粒的表面积形状因数和体积形状因数。显然，对于球形对称颗粒

$\varphi_s = \pi$ 、 $\varphi_v = \frac{\pi}{6}$ 。各种不规则形状的颗粒，其 φ_s 和 φ_v 值如表 2-3 所示。

表 2-3 各种形状颗粒的 φ_s 和 φ_v 值

| 各种形状的颗粒 | φ_s | φ_v |
|-------------------------------|-------------|-------------|
| 球形颗粒 | π | $\pi/6$ |
| 圆形颗粒(水冲蚀的砂子、溶凝的烟道灰和雾化的金属粉末颗粒) | 2.7~3.4 | 0.32~0.41 |
| 带棱的颗粒(粉碎的煤粉、石灰石和砂子等粉体物料) | 2.5~3.2 | 0.20~0.28 |
| 薄片状颗粒(滑石、石膏等) | 2.0~2.8 | 0.12~0.10 |
| 极薄的片状颗粒(如云母、石墨等) | 1.6~1.7 | 0.01~0.03 |

2.2.3 球形度 ϕ

球形度 ϕ (Carman 形状因数) 是一个应用较广泛的形状因数，它的定义是：一个与待测的颗粒体积相等的球形体的表面积与该颗粒的表面积之比。已知颗粒的当量表面积直径为 d_s ，当量体积直径为 d_v ，则其表达式为

$$\phi = \frac{\pi d_v^2}{\pi d_s^2} = \left(\frac{d_v}{d_s} \right)^2 \quad (2-4a)$$

若用 φ_s 和 φ_v 表示之，则有

$$\phi = \frac{\pi(6\varphi_v/\pi)^{2/3}d^2}{\varphi_s d^2} = 4.836 \frac{\varphi_v^{2/3}}{\varphi_s} \quad (2-4b)$$

表 2-4 为理论计算的一部分形状规则的颗粒的球形度值和少数几种物料的实测球形度值。