

第三版

粉体工程

与设备

POWDER

陶珍东 郑少华 主编

TECHNOLOGY

AND

EQUIPMENT



化学工业出版社

粉体工程与设备

(第三版)

陶珍东 郑少华 主编



化学工业出版社

·北京·

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、粉体的堆积和填充及分级、分离、混合、造粒、输送、储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。

本书第三版在第二版基础上，进行了大量补充与调整，主要内容有：增加粉体工程发展、粉体的特性等；增加粉体颗粒粒径的表征；增加粉体堆积与填充的应用；增加粉体在液体介质中的分散与调控、粉体润湿的应用等内容；删除粉体的附着力内容。另外，本书还增加新的粉磨工艺与技术，补充、完善除尘设备的技术发展，进一步充实带式输送机、斗式提升机等内容。

本书既可以作为粉体工程相关行业工程技术人员和研究人员的参考书，也可以作为相关专业在校师生的教材或教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

粉体工程与设备/陶珍东，郑少华主编. —3版.
北京：化学工业出版社，2014.11
ISBN 978-7-122-21671-7

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 198416 号

责任编辑：朱 彤
责任校对：宋 夏

文字编辑：张绪瑞
装帧设计：刘丽华



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 装：大厂聚鑫印刷有限责任公司
787mm×1092mm 1/16 印张24½ 字数689千字 2015年1月北京第3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：59.00 元

版权所有 违者必究

第三版前言

近年来,粉体加工制备工艺技术不断发展,国家在环境保护和治理、节能减排等相关法规中也对工业企业粉尘和有害气体排放浓度及噪声控制等制定了更严格的技术标准。为了适应新形势,本书第三版在第二版的基础上,进行了有关内容的补充和结构的调整,主要内容有:第1章增加了粉体工程发展、粉体的特性等;第2章增加了粉体颗粒粒径的表征;第3章增加了粉体堆积与填充的应用;第4章增加了粉体在液体介质中的分散与调控、粉体润湿的应用等内容;第5章删除了粉体的附着力内容;第6章增加了新的粉磨工艺与技术;第7章精简了一些相关内容。另外,本书将第二版第9章的内容合并至第12章;将第二版第10章拆分为第9章“分级及设备”和第10章“分离及设备”,并补充、增加了除尘设备的技术发展等内容;第12章还进一步充实了带式输送机、斗式提升机等有关内容。

本书作为山东省教育厅“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”的规划教材,于2003年8月由化学工业出版社正式出版,2010年2月修订出版了本书第二版;本书还于2008年被评为山东省优秀教材。2010年,以本书作为主要教材的作者所在单位将《粉体工程与设备》课程评为省级精品课程。本书自出版以来,被许多高校用于主要参考教材;同时也作为相关工程技术人员的参考书,得到了广大读者的肯定。

本书由陶珍东、郑少华教授主编。其中,第1、12、13章由张学旭教授编写;第2、3、5章由郑少华教授编写;第4章由王介强教授编写;第6~10章由陶珍东教授编写;第11章由赵义副教授编写;第14章由盛晋生编写。陶珍东教授负责全书统审。

本书在编写过程中参考了大量的文献资料,在此,谨向这些文献的作者们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,此书难免有不当之处。殷切希望广大读者批评指正。

编者
2014年6月

第二版前言

粉体工程作为一门跨行业、跨学科的综合性学科，与材料科学与工程的发展密切相关；了解和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，对于材料科学与工程专业的学生以及从事粉体工程生产实践的技术人员来说是非常重要的。

本书第一版作为山东省教育厅“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”规划教材 2003 年 8 月曾由化学工业出版社正式出版。本书第一版出版以来，承蒙广大读者厚爱，多次重印。同时，不少读者也为本书提出了许多中肯意见和建议，作者在此深致谢意。

本书第二版以粉体基本性质为基础，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，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，粉体的流变学，粉体的粉碎、分级、分离、混合、造粒、输送、储存、给料及计量，粉尘的危害及防护等。根据读者的建议及粉体工程领域的技术发展，对部分章节内容进行了补充和删减，增加了近年来粉体工程学科的最新理论和技术成果，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。

本书由陶珍东、郑少华教授主编。其中，第 1 章、12 章、13 章由张学旭编写；第 2~5 章由郑少华编写；第 6~10 章由陶珍东编写；第 11 章由赵义编写；第 14 章由盛晋生编写。陶珍东负责全书统稿和审稿。

由于编者水平有限，书中难免有不当之处，殷切希望广大读者批评指正。

编者

2010 年 1 月

第一版前言

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、储存等。

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

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 粉体工程的发展	1
1.2 粉体工程的基本概念	1
1.2.1 粉体的定义	1
1.2.2 粉体的尺度	2
1.2.3 粉体的形态	2
1.2.4 粉体的某些奇异特性	2
1.2.5 粉体工程与颗粒学	2
1.3 粉体工程的研究内容	2
1.4 粉体颗粒的种类	3
1.4.1 原级颗粒	3
1.4.2 聚集体颗粒	3
1.4.3 凝聚体颗粒	4
1.4.4 絮凝体颗粒	4
1.5 与粉体有关的产业	4
1.5.1 以粉体为主体的相关产业	4
1.5.2 生产工艺的重要部分与粉体相关的产业	5
第 2 章 粉体粒度分析及测量	6
2.1 单颗粒尺寸的表示方法	6
2.1.1 三轴径	6
2.1.2 定向径	6
2.1.3 当量直径	7
2.2 颗粒形状因数	8
2.2.1 颗粒的扁平度和伸长度	8
2.2.2 表面积形状因数和体积形状因数	8
2.2.3 球形度 ϕ_c (Carmann 形状因数)	9
2.3 粉体的粒度分布	9
2.3.1 频率分布	9
2.3.2 累积分布	10
2.3.3 频率分布和累积分布的关系	12
2.3.4 平均粒径	12
2.3.5 表征粒度分布的特征参数	13
2.3.6 粒度分布函数	14
2.4 粉体粒度测量技术	19
2.4.1 沉降法	20
2.4.2 激光法	21
2.4.3 颗粒形状的测定	21
第 3 章 粉体填充与堆积特性	23
3.1 粉体的填充指标	23
3.2 粉体颗粒的填充与堆积	23
3.2.1 等径球体颗粒的规则填充	23
3.2.2 不同尺寸球形颗粒的填充	25
3.2.3 实际颗粒的堆积	26
3.2.4 不同尺寸颗粒的最紧密堆积	27
3.3 粉体堆积与填充的应用	29
3.3.1 在水泥混凝土生产中的应用	29
3.3.2 在耐火材料生产中的应用	29
3.3.3 在多孔材料生产中的应用	30
第 4 章 粉体的湿润与表面改性	31
4.1 粉体表面的湿润性	31
4.2 粉体层中的液体	32
4.3 液体在粉体层毛细管中的上升高度	33
4.4 粉体在液体介质中的分散与调控	34
4.4.1 介质调控	34
4.4.2 分散剂调控	35
4.4.3 机械搅拌分散	36
4.4.4 超声分散	36
4.5 粉体润湿的应用	36

第 5 章 粉体的流变学 38

5.1 粉体的摩擦角..... 38	5.4.1 流动特性参数..... 46
5.1.1 内摩擦角..... 38	5.4.2 流动与不流动的判据..... 50
5.1.2 安息角..... 41	5.5 整体流料仓的设计..... 52
5.1.3 壁摩擦角和滑动摩擦角..... 41	5.6 粉体储存和流动时的偏析..... 52
5.2 粉体压力计算..... 42	5.6.1 粉体偏析的机理..... 52
5.2.1 筒仓内部的粉体压力分布..... 42	5.6.2 防止偏析的方法..... 54
5.2.2 料斗内部的粉体压力分布..... 43	5.7 粉体结拱及防拱措施..... 54
5.3 粉体的重力流动..... 44	5.7.1 结拱产生的原因..... 54
5.3.1 孔口流出..... 44	5.7.2 结拱类型..... 55
5.3.2 粉体在料仓中的流动模式..... 44	5.7.3 防拱及破拱措施..... 55
5.4 料仓内粉体的流动分析..... 46	参考文献..... 56

第 6 章 粉碎(磨)过程及设备..... 57

6.1 粉碎(磨)的基本概念..... 57	6.4.5 联合粉磨工艺..... 72
6.1.1 粉碎..... 57	6.4.6 中卸循环粉磨工艺..... 74
6.1.2 粉碎比..... 57	6.5 破碎机械..... 75
6.1.3 粉碎级数..... 57	6.5.1 颚式破碎机..... 75
6.1.4 粉碎产品的粒度特性..... 58	6.5.2 圆锥式破碎机..... 84
6.2 与粉碎相关的物料物性..... 58	6.5.3 辊式破碎机..... 89
6.2.1 强度..... 58	6.5.4 锤式破碎机..... 93
6.2.2 硬度..... 59	6.5.5 反击式破碎机..... 96
6.2.3 易碎(磨)性..... 60	6.5.6 细破碎机..... 105
6.3 材料的粉碎机理..... 61	6.5.7 笼式粉碎机..... 107
6.3.1 Griffith 强度理论..... 61	6.6 粉磨机械..... 109
6.3.2 断裂..... 61	6.6.1 球磨机..... 109
6.3.3 粉碎方式及粉碎模型..... 62	6.6.2 立式磨..... 131
6.3.4 混合粉碎和选择性粉碎..... 65	6.6.3 振动磨..... 136
6.3.5 粉碎功耗..... 66	6.6.4 高压辊式磨机..... 140
6.3.6 粉碎速度论简介..... 68	6.7 超细粉碎机械..... 142
6.4 粉碎(磨)工艺..... 69	6.7.1 搅拌磨..... 142
6.4.1 开路粉磨工艺..... 70	6.7.2 胶体磨..... 145
6.4.2 闭路粉磨工艺..... 70	6.7.3 高速机械冲击式磨机..... 146
6.4.3 分别粉磨工艺..... 71	6.7.4 气流粉碎机..... 148
6.4.4 串联粉磨工艺..... 72	参考文献..... 153

第 7 章 粉碎机械力化学..... 155

7.1 粉碎机械力化学概述..... 155	7.3.3 机械力化学法制备新型材料..... 164
7.2 粉碎机械力化学作用及机理..... 155	7.3.4 机械力化学在水泥、混凝土生产中的应用..... 165
7.2.1 粉碎平衡..... 156	7.4 高能球磨工艺..... 167
7.2.2 晶体结构的变化..... 157	7.4.1 高能球磨设备..... 167
7.3 粉碎机械力化学的应用..... 162	7.4.2 影响高能球磨效率及机械力化学作用的因素..... 168
7.3.1 粉体材料的机械力化学改性..... 162	参考文献..... 169
7.3.2 机械力化学法制备纳米金属、非晶态金属及合金..... 163	

第 8 章 颗粒流体力学	171		
8.1 两相流的基本性质	171	8.3.1 沉降末速度 (终端沉降速度)	175
8.1.1 两相流的浓度	171	8.3.2 沉降末速度的修正	177
8.1.2 两相流的密度	172	8.4 离心沉降	179
8.1.3 两相流的黏度	172	8.5 流体通过颗粒层的透过流动	180
8.1.4 两相流的比热容和热导率	173	8.5.1 透过流动的流量与阻力的关系	180
8.2 颗粒在流体中的运动	173	8.5.2 透过流动的应用	181
8.2.1 颗粒的受力	173	8.6 颗粒的悬浮运动	182
8.2.2 颗粒在流体中的运动方程	175	参考文献	183
8.3 颗粒的重力沉降	175		
第 9 章 分级及设备	185		
9.1 分级和分离理论	185	9.2.5 MDS 型组合式选粉机	201
9.1.1 分离效率	185	9.2.6 O-Sepa 选粉机	202
9.1.2 分级粒径 (切割粒径)	186	9.2.7 Sepax 选粉机	204
9.1.3 分级精度	186	9.3 超细分级原理及设备	205
9.1.4 分级效果的综合评价	187	9.3.1 超细分级原理	205
9.2 分级设备	187	9.3.2 干式分级和湿式分级	206
9.2.1 筛分设备	187	9.3.3 超细分级设备	208
9.2.2 粗分级机	197	9.3.4 超细分级的有关问题	215
9.2.3 离心式选粉机	198	参考文献	216
9.2.4 旋风式选粉机	200		
第 10 章 分离及设备	219		
10.1 气固分离设备	219	10.2 液固分离设备	242
10.1.1 收尘效率及收尘器的种类	219	10.2.1 水力旋流器	242
10.1.2 旋风收尘器	220	10.2.2 压滤机	246
10.1.3 袋式收尘器	226	10.2.3 喷雾干燥器	251
10.1.4 颗粒层收尘器	234	参考文献	259
10.1.5 电收尘器	234		
第 11 章 混合与造粒	261		
11.1 粉体的混合	261	11.2.1 粉体的凝聚机理	270
11.1.1 概述	261	11.2.2 压缩造粒	271
11.1.2 混合机理和混合效果评价	261	11.2.3 挤出造粒	271
11.1.3 混合过程与混合速度	262	11.2.4 滚动造粒	272
11.1.4 影响粉体混合的因素	263	11.2.5 喷浆造粒	274
11.1.5 混合设备	265	11.2.6 流化造粒	275
11.2 粉体的造粒	270	参考文献	277
第 12 章 粉体输送设备	278		
12.1 胶带输送机	278	12.1.3 胶带输送机的选型计算	291
12.1.1 胶带输送机的构造	278	12.1.4 管形胶带输送机	299
12.1.2 胶带输送机的应用	288	12.1.5 气垫式胶带输送机	303

12.2 螺旋输送机	305	12.4.2 刮板输送机	324
12.2.1 螺旋输送机的构造	306	12.4.3 埋刮板输送机	325
12.2.2 螺旋输送机的应用	308	12.4.4 FU型链式输送机	329
12.2.3 螺旋输送机的选型计算	309	12.5 气力输送设备	330
12.2.4 螺旋输送机选型计算举例	311	12.5.1 概述	330
12.3 斗式提升机	312	12.5.2 气力输送系统的分类	331
12.3.1 斗式提升机构造	312	12.5.3 空气输送斜槽	332
12.3.2 斗式提升机的装载和卸载方式	320	12.5.4 螺旋式气力输送泵	335
12.3.3 斗式提升机的应用	321	12.5.5 仓式气力输送泵	337
12.3.4 斗式提升机的选型及使用注意 事项	321	12.5.6 气力提升泵	340
12.4 链板输送机	322	12.5.7 气力输送系统的主要参数	341
12.4.1 板式输送机	322	参考文献	343

第 13 章 粉体喂料及计量设备 345

13.1 有挠性牵引构件的喂料设备	345	13.3.2 电磁振动喂料机	350
13.1.1 带式喂料机	345	13.4 计量设备	355
13.1.2 板式喂料机	346	13.4.1 恒速式定量秤	355
13.2 转动式喂料机	346	13.4.2 调速式定量秤	356
13.2.1 螺旋喂料机	346	13.4.3 螺旋计量秤	359
13.2.2 滚筒喂料机	347	13.4.4 简易型螺旋计量秤	359
13.2.3 叶轮喂料机	347	13.4.5 冲击式流量计	359
13.2.4 圆盘喂料机	348	13.4.6 溜槽式流量秤	360
13.3 振动式喂料机	348	13.4.7 核子秤	360
13.3.1 惯性振动喂料机	349	参考文献	363

第 14 章 粉尘的危害与防护 364

14.1 概述	364	14.3 粉尘爆炸及防护	371
14.1.1 粉尘的来源	364	14.3.1 粉尘爆炸的基本概念	371
14.1.2 粉尘的分类	364	14.3.2 粉尘爆炸的特点	372
14.1.3 粉尘的性质及其危害	365	14.3.3 粉尘爆炸机理及发生爆炸的 条件	373
14.2 粉尘对呼吸系统的影响	365	14.3.4 粉尘爆炸的影响因素	374
14.2.1 颗粒在呼吸系统的穿透、沉积	365	14.3.5 粉尘爆炸的防护	377
14.2.2 摄入颗粒的临界值	368	参考文献	379
14.2.3 粉尘致病的机理	369		
14.2.4 粉尘防护	370		

附录 380

1. 单位换算表	380	3. 水和空气的黏度系数	381
2. 重要数值和换算式	381	4. 标准筛比较表	382

第 1 章



概述

1.1 粉体工程的发展

1948年美国 J. M. Dallaville 的专著《Micromeritics》的出版,标志着粉体工程的问世。1957年,日本成立了日本粉体工学会,并于1971年成立了日本粉体工业技术协会。1962年,英国 Bradford 大学设立了粉体技术学院,至20世纪70年代,美国先后成立了粉体研究所(PSRI)和国际细颗粒研究所(IFPRI)。1986年在德国纽伦堡召开了第一届粉体技术世界会议。我国于1986年成立了中国颗粒学会。

粉体一词最早出现于20世纪50年代初期。但对于粉体的应用早在新石器时代就开始了。史前,人类已经懂得将植物的种子制成粉末以供食用。古代仕女用的化妆品也不乏脂粉一类的粉制品。所以,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,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。

后来,各行业不断总结粉体加工和处理的经验,形成了各自的技术体系。就加工处理操作性质而言,各行业所处理的粉料都可归并于粉体范畴,具有共同之处。因此,可以以粉体为纲,将这些相对独立的技术体系系统集成为一综合的技术体系,即粉体技术体系,从而诞生了一门新的科学与工程学,即粉体科学与工程。

1.2 粉体工程的基本概念

1.2.1 粉体的定义

什么是粉体?生活中的食品:面粉、豆浆、奶粉、咖啡、大米、小麦、大豆、食盐;自然界的河沙、土壤、尘埃、沙尘暴;工业产品:火药、水泥、颜料、药品、化肥等。按照本学科的分类,上述物质都是粉体,其共同特征是:具有许多不连续的面,比表面积较大,由许多小颗粒状物质所组成。换言之,它们是许许多多小颗粒状物质的集合体。

粉体是由无数相对较小的颗粒状物质构成的集合体,有时具有固体的性质,在某些情况下又具有液体或气体的性质,有时还表现出一些奇异的特性。如果构成粉体的所有颗粒的大小和形状均相同,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

只有用化学合成方法可以制备出近似的单分散粉体，尚无利用机械方法制备单分散粉体的报道。大多数粉体都是由大小不同、形状各异的颗粒所组成，这种粉体称为多分散粉体。

1.2.2 粉体的尺度

关于粉体的尺度，有人认为：小于 $1000\mu\text{m}$ 的颗粒物为粉体，也有人以 $100\mu\text{m}$ 为界，但迄今为止并未达成共识。按照 Allen 和 Heywood 等人的观点：粉体没有确切的上限尺寸，但其尺寸相对于周围的空间而言应足够小。粉体是一个由多尺寸颗粒组成的集合体，只要这个集合体具备了粉体所具有的性质，其尺寸界限并不那么重要。所以，尽管没有确切的上限尺寸，但并不影响人们对其性质的研究。

1.2.3 粉体的形态

就粉体的形态而言，一般可以说它既具有固体的性质，也具有液体的性质；有时也具有气体的性质。说它是固体颗粒，这最容易理解，因为无论颗粒多么小，毕竟具有一定的体积和形状。说它具有液体的性质，需要具备一定的条件，即粉体和某种流体形成一个两相体系，此时的两相流具有液体的性质，也即此两相流虽具有一定的体积，但其形状却取决于容器或管道的形状。譬如自然界中的泥石流。如果两相流中的流体是气体，且其中的粉体体积分数相对较小、颗粒尺寸也比较小，即粉体弥散于气体介质中，此时粉体就具有气体的性质：既无确定的体积，也无确定的形状。沙尘暴就是非常典型的一例。因此，有人认为，粉体是有别于气、液、固物质形态的第四种物质形态。

1.2.4 粉体的某些奇异特性

由于粉体形态的特殊性，使之表现出一些与常规认识不同的奇异特性。如粮仓效应、巴西豆效应、加压膨胀特性、崩塌现象、振动产生规则斑图现象、小尺寸效应等。

1.2.5 粉体工程与颗粒学

细心的读者可能会看到：本章开始所介绍的专著《Micromeritics》实际上是微粒学或颗粒学。那么，粉体工程与颗粒学究竟是什么关系？前者是从集合体或整体的角度去研究对象，而后者是从个体的角度去研究对象，而这个对象是同一个物质。两者的不同在于：粉体工程所研究的颗粒物质一般是固体颗粒，而颗粒学所研究的颗粒既有固体颗粒，也有液体颗粒和气体颗粒，如汽车发动机汽缸内的液滴大小和分布、混凝土中气孔的大小和分布等。

1.3 粉体工程的研究内容

粉体工程的研究内容主要包括粉体科学（powder science）和粉体技术（powder technology）两大部分。其主要研究内容见表 1-1。

表 1-1 粉体工程研究内容

项目	主要内容	
粉体科学	粉体几何形态	粒径、粒度、粒度分布、颗粒形状、颗粒的堆积特性
	粉体力学	内部应力、破坏强度、压力分布、内摩擦特性、流动特性、流化特性
	粉体化学	吸附、凝聚、溶解、析晶、沉淀、升华、表面化学性质
	气溶胶	发生、物化性质、动力学、测定
	粉体的润湿	粉体层中液体的种类、润湿的判断、液体架桥、抽吸势
	粉体测定	取样法、分散、测量
	其他特性	电特性、磁特性、振动特性、热特性

续表

项目	主要内容	
粉体技术	粉体分离	收尘、分级、过滤
	粉体均化	混合、捏合、搅拌
	粉体制造	粉碎、造粒、粉末冶金
	粉体储存	料仓设计、喂料
	粉体输送	机械输送、流体输送

目前,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。

1.4 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。各种粉体的颗粒又是千差万别的。但是,从颗粒的构成来看,这些形态各异的颗粒可以分成四大类型:原级颗粒型、聚集体颗粒型、凝聚体颗粒型和絮凝体颗粒型。

1.4.1 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,有针形状的,有球形状的,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。

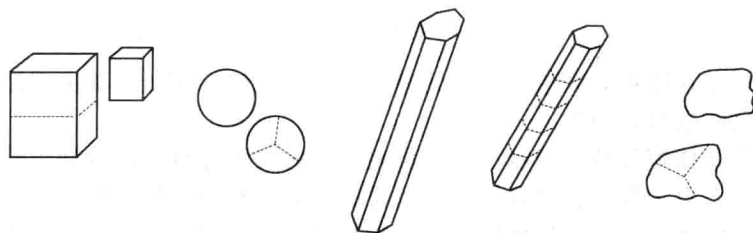


图 1-1 原级颗粒示意图

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。

1.4.2 聚集体颗粒

聚集体颗粒是由许多原级颗粒靠某种化学力以其表面相连而堆积起来。相对于原级颗粒而言,它是第二次形成的颗粒,故又称为“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小于构成它的各原级颗粒的表面积总和,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,形成聚集体颗粒。此外,晶体生长、熔融等过程,也会促进聚集体颗粒的形成。

由于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之解体。

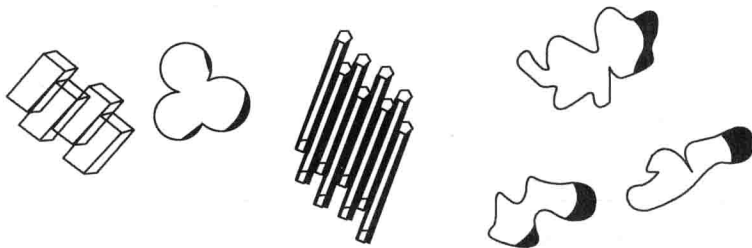


图 1-2 聚集体颗粒示意图

1.4.3 凝聚体颗粒

凝聚体颗粒是在聚集体颗粒之后形成的，故又称为“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。

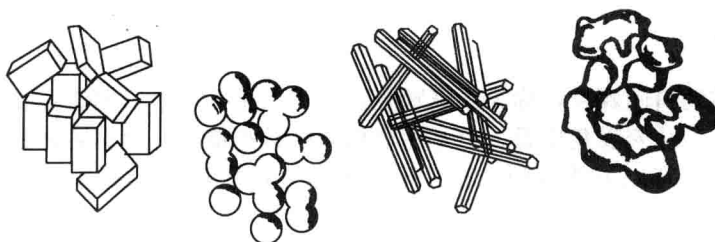


图 1-3 凝聚体颗粒示意图

凝聚体颗粒也是在物料的制造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。

1.4.4 絮凝体颗粒

在粉体的许多实际应用中，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的作用，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。长期储存的粉体，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。

1.5 与粉体有关的产业

1.5.1 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 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。

1.5.2 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，流动催化剂层，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 单颗粒尺寸表示方法

球形颗粒的大小可用直径表示。正立方体颗粒可用其边长来表示，对于其他形状规则的颗粒可用适当的尺寸来表示。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。

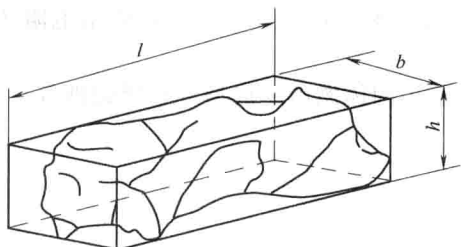


图 2-1 颗粒的外接长方体

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，并使之与线性量纲有关。常用如下方式来定义它们的大小和粒径。

2.1.1 三轴径

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，计算式及物理意义列于表 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 定向径

在显微镜下用测量标尺（如游丝测微标尺）测得的二维颗粒的尺寸称为颗粒的定向径。

显微镜的测量标尺将颗粒的投影面积二等分时，此分界线在颗粒投影轮廓上截取的长度称为“马丁径” 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“弗雷特径” d_f ,如图2-2所示。

显然,在显微镜下,一个不规则的颗粒的粒径 d_m 和 d_f 的大小均与颗粒取向有关。然而,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,还是能够比较准确地反映出颗粒的真实大小。

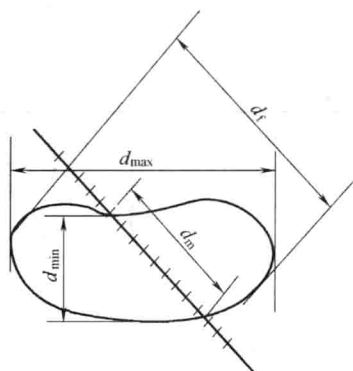


图 2-2 马丁径和弗雷特径

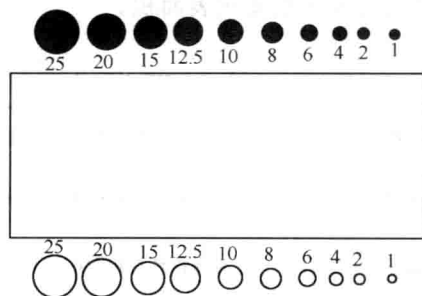


图 2-3 帕特森量板示意图

另一种颗粒统计平均粒径的表示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。量板上的长方形括出了一部分待测的颗粒,将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 当量直径

“当量直径”是通过测定某些与颗粒大小有关的性质推导而得,并使之与线性量纲有关。

(1) 球当量径 与球的某一几何性质相同的颗粒粒径。

① 等体积球当量径 d_v :与颗粒体积相等的球的直径称为颗粒的等体积球当量径。

设颗粒的体积为 V ,则有

$$d_v = \sqrt[3]{6V/\pi} \quad (2-1)$$

例如,棱长为1的立方体,其体积等于直径为1.24的圆球体积,因此,1.24就是该颗粒的等体积球当量径。

② 等表面积球当量径 d_s :与颗粒表面积相等的球的直径称为颗粒的等表面积球当量径。

设颗粒的表面积为 S ,则有

$$d_s = \sqrt{S/\pi} \quad (2-2)$$

(2) 圆当量径 与圆的某一几何性质相同的颗粒粒径。对于薄片状的二维颗粒,常用与圆形颗粒相类比获得的圆当量径来表示颗粒的大小。

① 投影圆当量径 d_H :与颗粒投影面积相等的圆的直径称为投影圆当量径。

令颗粒的投影面积为 A ,则有

$$d_H = \sqrt{4A/\pi} \quad (2-3)$$

② 等周长圆当量径 d_L :与颗粒投影轮廓周长相等的圆的直径称为等周长圆当量径。

令颗粒的投影周长为 L ,则有