

第二版 ◀◀◀

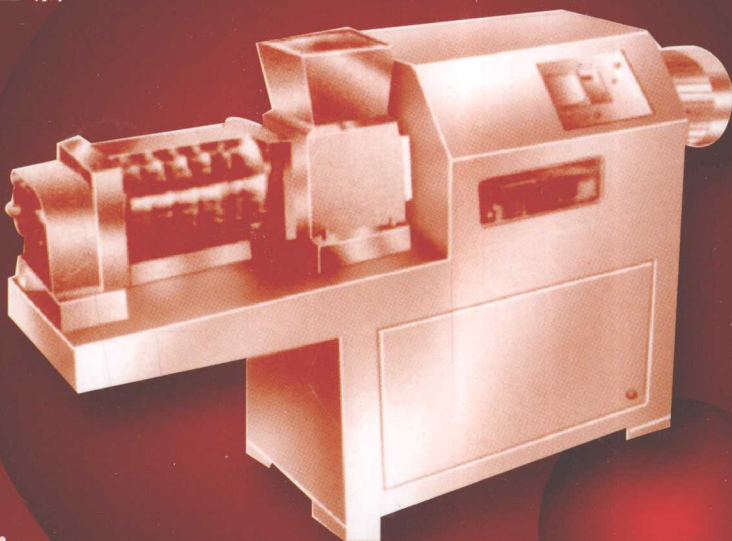
粉体工程

与设备

POWDER

TECHNOLOGY AND EQUIPMENT

陶珍东 郑少华 主编



化学工业出版社

TB44
T360.02

第二版



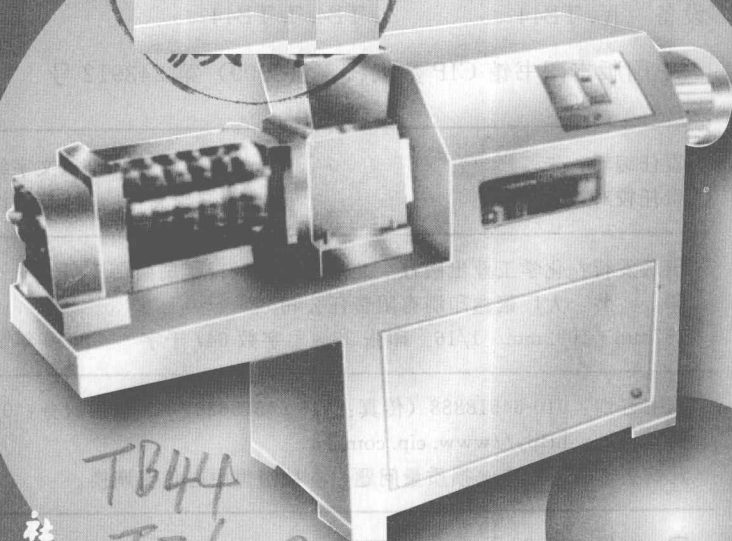
粉体工程

与设备

POWDER

TECHNOLOGY AND EQUIPMENT

陶珍东 郑少华 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

TB44
T360.02

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、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。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。

图书在版编目 (CIP) 数据

粉体工程与设备/陶珍东,郑少华主编. —2版. —北京:化学工业出版社,2010.2
ISBN 978-7-122-07500-0

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 (2009) 第 243912 号

责任编辑:朱 彤
责任校对:陈 静

文字编辑:王 琪
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23½ 字数647千字 2010年2月北京第2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:49.00 元
京化广临字 2010—2 号

版权所有 违者必究

第一版前言

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。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。

书 录

目 录

编 者

2003 年 3 月于济南大学

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

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 粉体工程的历史发展	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 某些奇异的特性	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	4
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	5
1.5.1 以粉体为主体的相关产业	5
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 统计平均径	6
2.1.3 当量直径	7
2.2 颗粒形状因数	7
2.2.1 颗粒的扁平度和伸长度	7
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)	8
2.3 粒度分布	9
2.3.1 粒度的频率分布	9
2.3.2 粒度的累积分布	11
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 粒度分布函数表达式	13
2.4 颗粒粒度的测量	19
2.4.1 沉降法	20
2.4.2 激光法	20
2.4.3 颗粒形状的测量	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 等径球形颗粒的规则填充	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
第 4 章 粉体的湿润	30
4.1 粉体层中的液体	30
4.2 粉体表面的湿润性	30
4.3 液体架桥	31
4.4 液体在粉体层毛细管中的上升高度	32
4.5 粉体润湿的应用	34
第 5 章 粉体的流变学	35
5.1 粉体的摩擦角	35
5.1.1 粉体的内摩擦角	35

5.1.2 安息角	38	5.5 颗粒流动分析	45
5.1.3 壁面摩擦角和滑动摩擦角	38	5.5.1 流动分析中使用的特性	45
5.1.4 运动角	38	5.5.2 流动与不流动的判据	48
5.2 附着力	39	5.6 整体流料仓的设计	50
5.2.1 分子间的作用力	39	5.7 颗粒储存和流动时的偏析	50
5.2.2 颗粒间的静电作用力	40	5.7.1 粉体偏析的机理	51
5.2.3 颗粒间毛细管引力	40	5.7.2 防止偏析的方法	52
5.3 粉体压力计算	40	5.8 粉体结拱及防拱措施	53
5.3.1 Janssen 公式	40	5.8.1 结拱产生的原因	53
5.3.2 料斗的压力分布	41	5.8.2 结拱类型	53
5.4 粉体的重力流动	42	5.8.3 防拱及破拱措施	53
5.4.1 粉体从孔口中流出	42	参考文献	55
5.4.2 粉体在料仓中的流动模式	43		

第 6 章 粉碎过程及设备 56

6.1 粉碎的基本概念	56	6.4.3 辊式破碎机	89
6.1.1 粉碎	56	6.4.4 锤式破碎机	93
6.1.2 粉碎比	56	6.4.5 反击式破碎机	96
6.1.3 粉碎级数	57	6.4.6 细破碎机	105
6.1.4 粉碎产品的粒度特性	57	6.5 粉磨机械	107
6.1.5 粉碎流程	57	6.5.1 球磨机	107
6.2 被粉碎物料的基本物性	58	6.5.2 笼式粉碎机	129
6.2.1 强度	58	6.5.3 轮碾机	130
6.2.2 硬度	59	6.5.4 莱歇磨	132
6.2.3 易碎(磨)性	60	6.5.5 MPS 立式磨	132
6.3 材料的粉碎机理	61	6.5.6 雷蒙磨	133
6.3.1 格里菲斯 (Griffith) 强度理论	61	6.5.7 振动磨	135
6.3.2 断裂	61	6.5.8 高压辊磨机	139
6.3.3 粉碎方式及粉碎模型	62	6.6 超细粉碎机械	141
6.3.4 混合粉碎和选择性粉碎	66	6.6.1 搅拌磨	141
6.3.5 粉碎过程热力学	67	6.6.2 胶体磨	144
6.3.6 粉碎过程动力学	71	6.6.3 高速机械冲击式磨机	145
6.4 破碎机械	75	6.6.4 气流粉碎机	147
6.4.1 颚式破碎机	75	参考文献	152
6.4.2 圆锥式破碎机	84		

第 7 章 粉碎机械力化学 153

7.1 粉碎机械力化学概述	153	7.3.3 机械力化学法制备新型材料	162
7.2 粉碎机械力化学作用及机理	153	7.3.4 机械力化学在水泥、混凝土生产中的应用	164
7.2.1 粉碎平衡	154	7.4 高能球磨工艺	166
7.2.2 晶体结构的变化	155	7.4.1 高能球磨设备	166
7.3 粉碎机械力化学的应用	160	7.4.2 影响高能球磨效率及机械力化学作用的因素	167
7.3.1 粉体材料的机械力化学改性	160	参考文献	168
7.3.2 机械力化学法制备纳米金属、非晶态金属及合金	161		

第 8 章 颗粒流体力学	170		
8.1 两相流的基本性质	170	8.3.1 沉降末速度 (终端沉降速度)	174
8.1.1 两相流的浓度	170	8.3.2 沉降末速度的修正	176
8.1.2 两相流的密度	171	8.4 离心沉降	178
8.1.3 两相流的黏度	171	8.5 流体通过颗粒层的透过流动	178
8.1.4 两相流的比热容和热导率	172	8.5.1 透过流动的流量与阻力的关系	178
8.2 颗粒在流体中的运动	172	8.5.2 透过流动的应用	179
8.2.1 颗粒的受力	172	8.6 颗粒的悬浮运动	180
8.2.2 颗粒在流体中的运动方程	173	参考文献	182
8.3 颗粒的重力沉降	174		
第 9 章 粉体的气力输送及设备	183		
9.1 气力输送方式及输送系统	183	9.2.1 空气输送斜槽	185
9.1.1 稀相气力输送	183	9.2.2 螺旋式气力输送泵	186
9.1.2 浓相气力输送	183	9.2.3 仓式气力输送泵	188
9.1.3 气力输送系统与装置类型	183	9.2.4 气力提升泵	190
9.1.4 气力输送的特点	184	9.2.5 气力输送系统的主要参数	191
9.2 气力输送设备	185	参考文献	193
第 10 章 分级、分离及设备	195		
10.1 分级和分离理论	195	10.2.6 O-Sepa 选粉机	211
10.1.1 分离效率	195	10.2.7 Sepax 选粉机	213
10.1.2 分级粒径 (切割粒径)	196	10.3 超细分级原理及设备	214
10.1.3 分级精度	197	10.3.1 超细分级原理	214
10.1.4 分级效果的综合评价	197	10.3.2 干式分级和湿式分级	216
10.2 分级设备	197	10.3.3 超细分级设备	217
10.2.1 筛分设备	197	10.3.4 超细分级的有关问题	225
10.2.2 粗分级机	207	10.4 分离设备	226
10.2.3 离心式选粉机	208	10.4.1 气固分离设备	226
10.2.4 旋风式选粉机	209	10.4.2 液固分离设备	249
10.2.5 MDS 型组合式选粉机	211	参考文献	265
第 11 章 混合与造粒	266		
11.1 混合	266	11.2.1 颗粒群的凝聚	275
11.1.1 概述	266	11.2.2 压缩造粒	276
11.1.2 混合机理和混合效果评价	266	11.2.3 挤出造粒	276
11.1.3 混合过程与混合速度	268	11.2.4 滚动造粒	278
11.1.4 影响混合的因素	268	11.2.5 喷浆造粒	279
11.1.5 混合设备	270	11.2.6 流化造粒	280
11.2 造粒	275	参考文献	282
第 12 章 粉体输送设备	283		
12.1 胶带输送机	283	12.1.2 胶带输送机的应用	293
12.1.1 胶带输送机的构造	283	12.1.3 胶带输送机的选型计算	295

12.1.4	管形胶带输送机	303	12.3.2	斗式提升机的应用	320
12.1.5	气垫式胶带输送机	308	12.3.3	斗式提升机的装载和卸载方式	323
12.2	螺旋输送机	310	12.3.4	斗式提升机的选型计算	324
12.2.1	螺旋输送机的构造	310	12.4	链板输送机	324
12.2.2	螺旋输送机的应用	313	12.4.1	板式输送机	325
12.2.3	螺旋输送机的选型计算	314	12.4.2	刮板输送机	327
12.3	斗式提升机	317	12.4.3	埋刮板输送机	327
12.3.1	斗式提升机的构造	317	12.4.4	FU型链式输送机	328

第 13 章 粉体喂料及计量设备 331

13.1	有挠性牵引构件的喂料设备	331	13.3.2	电磁振动式喂料机	335
13.1.1	带式喂料机	331	13.4	计量设备	340
13.1.2	板式喂料机	331	13.4.1	恒速式定量秤	340
13.2	转动式喂料机	332	13.4.2	调速式定量秤	341
13.2.1	螺旋喂料机	332	13.4.3	螺旋计量秤	343
13.2.2	滚筒喂料机	333	13.4.4	简易型螺旋计量秤	343
13.2.3	叶轮喂料机	333	13.4.5	冲击式流量计	343
13.2.4	圆盘喂料机	333	13.4.6	溜槽式流量计	344
13.3	振动式喂料机	334	13.4.7	核子秤	345
13.3.1	惯性振动式喂料机	334	参考文献		347

第 14 章 粉尘的危害与防护 348

14.1	概述	348	14.3	粉尘爆炸及防护	356
14.1.1	粉尘的来源	348	14.3.1	粉尘爆炸的基本概念	356
14.1.2	粉尘的分类	348	14.3.2	粉尘爆炸的特点	357
14.1.3	粉尘的性质及其危害	349	14.3.3	粉尘爆炸的机理及发生爆炸的条件	358
14.2	粉尘对呼吸系统的影响	349	14.3.4	粉尘爆炸的影响因素	359
14.2.1	颗粒在呼吸系统的穿透、沉积	349	14.3.5	粉尘爆炸的防护	362
14.2.2	摄入颗粒的临界值	352	参考文献		364
14.2.3	粉尘致病的机理	353			
14.2.4	粉尘防护	355			

附录 365

1.	单位换算表	365	3.	水和空气的黏度系数	366
2.	重要数值和换算式	366	4.	标准筛比较表	367

第 1 章



概述

1.1 粉体工程的历史发展

1948年,美国 J. M. Dallaville 的专著《Micromeritics》标志着粉体工程的问世。日本于 1957 年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。20 世纪 70 年代,美国也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,而它的生产除与火的发现有着必然的联系外,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,各行各业都有一套制备粉体和处理粉体的经验,形成各自的技术体系。既然从性质上说各行各业所处理的粉末都可归并到粉体这一范畴内,各行各业的粉体技术自然必有共同之处。所以,可以以粉体为纲,将这些相对独立的技术体系集合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,这就是粉体科学与工程。

1.2 粉体工程的基本概念

1.2.1 粉体的定义

什么是粉体?首先看一些人们所熟悉的物质,例如生活中的食品: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。按照学科的分类,以上的物质都是粉体。既然能够归为同一类,那么它们必定具有共同的特征,可以看到,这些物质的共同特征是:有许多不连续的面,比表面积比较大,由许多小颗粒状物质所组成。更进一步分析发现,其实这三个特征可以归纳为一个,就是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一个集合体。有时具有固体的性质,在某些情

况下又具有液体的性质或气体的性质,有时又表现出一些奇异的特性。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的,而且形状也各异,这样的粉体称为多分散粉体。

1.2.2 粉体的尺度

如上所述的物质既有像面粉那样的粉末,也有像大豆那样的颗粒物。那么,粉体的尺寸有没有一个尺寸界限呢?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,但到目前为止并没有形成共识。按照 Allen 和 Heywood 等的观点,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,其尺寸的界限也就显得不那么重要,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,因为不管颗粒多么小,它终究是具有一定体积及一定形状的固体物质。说它具有液体的性质,这就需要一定的条件,即粉体和某种流体形成一个两相体系,此时的两相流就具有了液体的性质,也即这个两相流虽具有一定的体积,但其形状却取决于容器的形状。例如自然界中的泥石流。如果这个两相流中流体是气体,而且这个两相流中的粉体体积相对较小、粉体颗粒尺寸也比较小,或者说粉体弥散于气体介质当中,此时的粉体就具有了气体的性质。也即这个两相流既没有一定的体积,也没有一定的形状,而粉体是随风飘荡,沙尘暴就是非常典型的一例。所以,有人把粉体说成是有别于气、液、固之外的第四态,也是有一定道理的。

1.2.4 某些奇异的特性

由于粉体在形态上的特殊性,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

粉体和颗粒究竟是什么关系?在人们通常的认识中,粉末应该比较细的,细的用肉眼分辨不出是粒状,而颗粒物质应用肉眼粒粒可辨。这是否意味着粉末应该就是粉体,而颗粒物质就是颗粒呢?回答当然是否定的。正如人们给粉体所下的定义:粉体是由无数相对较小的颗粒状物质构成的一个集合体。这是因为,不管多么细小的粉体从微观甚至细观角度看都是粒状物质。所以,粉体工程和颗粒学的关系就是:前者是从集合体或者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,而这个对象是同一物质。另外,两者的不同之处还在于,粉体工程所研究的颗粒物质一定是固体颗粒,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。其大致研究内容见表 1-1。

表 1-1 粉体工程的研究内容

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、测定
	其他特性	电特性、磁特性、振动特性、热特性
粉体技术	粉体分离	收尘、分级、过滤
	粉体均化	混合、捏合、搅拌、流量
	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，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。

1.4.1 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。

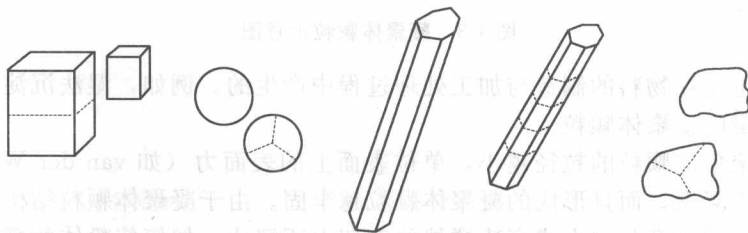


图 1-1 原级颗粒示意图

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着某种化学力以其表面相连而堆积起来的。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小于构成它的各原级颗粒表面积的总和，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。

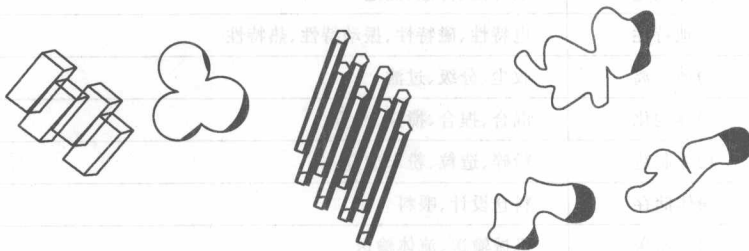


图 1-2 聚集体颗粒示意图

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。

1.4.3 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。

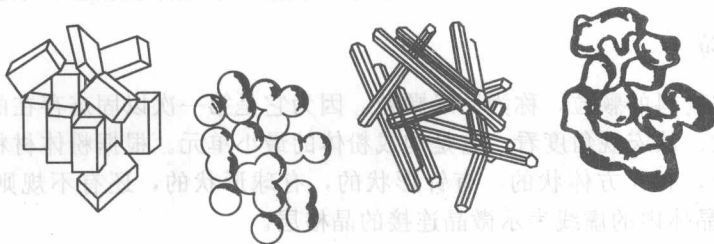


图 1-3 凝聚体颗粒示意图

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（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。

1.4.4 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,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——料块。

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 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。颜料的色调和涂覆层的特性,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、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来表示，长方体需要用长、宽、高来表示。

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。

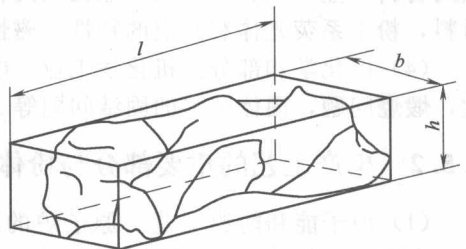


图 2-1 颗粒的外接长方体

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 统计平均径

统计平均径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，将颗粒的投影面积分成面积大致相等的两部分。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 。马丁直径和弗雷特直径如图 2-2 所示。

显然，在显微镜下，一个不规则颗粒的粒径 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。

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，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。

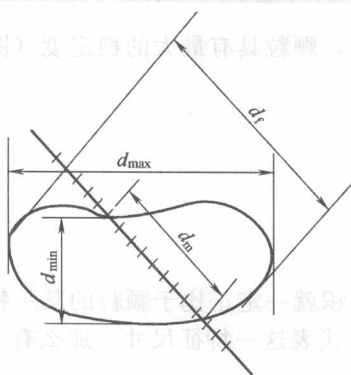


图 2-2 马丁直径和弗雷特直径

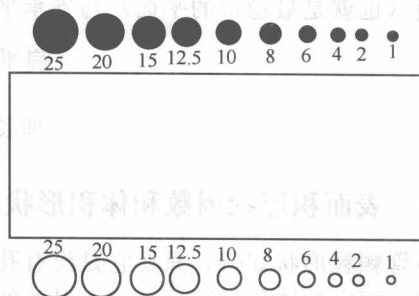


图 2-3 帕特森量板示意图

2.1.3 当量直径

“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，并使之与线性量纲有关。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 就是该颗粒的等体积球当量直径。类似的还有等表面积球当量直径。对于薄片状的二维颗粒，常用与圆形颗粒相类比的方法，所得到的粒径称为圆当量直径，常用的有等投影面积圆当量直径和等周长圆当量直径。表 2-2 中列出一些“当量直径”的定义。

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，则应测定其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、颗粒与流体相互作用以及涂料的覆盖能力等性能。所以严格来说，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

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	投影面积直径	与置于稳定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	

投影面(也就是最稳定的平面)与支承平面相黏合。此时,颗粒具有最大的稳定度(图 2-1)。

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

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

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

$$S = \pi d_s^2 = \varphi_s d^2 \quad (2-3)$$

$$V = \frac{\pi}{6} d_v^3 = \varphi_v d^3 \quad (2-4)$$

故

$$\varphi_s = \frac{S}{d^2} = \frac{\pi d_s^2}{d^2} \quad (2-5)$$

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

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, $\varphi_s = \pi$, $\varphi_v = \pi/6$ 。各种不规则形状的颗粒,其 φ_s 和 φ_v 值见表 2-3。

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(水冲蚀的沙子、熔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、石灰石和沙子等粉体物料)	2.5~3.2	0.20~0.28
薄片状颗粒(滑石、石膏等)	2.0~2.8	0.10~0.12
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_c (Carmann 形状因数)

球形度 ϕ_c 是一个应用较广泛的形状因数,其定义是:一个与待测的颗粒体积相等的球形颗粒的表面积与该颗粒的表面积之比。若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

$$\phi_c = \frac{\pi d_v^2}{\pi d_s^2} = \left(\frac{d_v}{d_s} \right)^2 \quad (2-7)$$