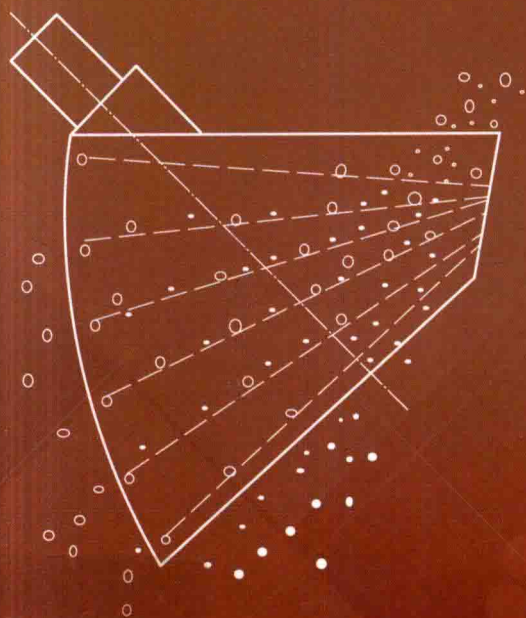


高等学校“十三五”规划教材

# 粉体科学与工程

Powder Science  
and Engineering

赵家林 主编  
王超会 王玉慧 副主编



化学工业出版社

高等学校“十三五”规划教材

# 粉体科学与工程

**Powder Science  
and Engineering**

赵家林 主编  
王超会 王玉慧 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

《粉体科学与工程》为高等学校“十三五”规划教材。书中综合了近年来最新理论和技术成果，分别从粉粒体、超细粉体和纳米粉体的特性、制备技术及其相关的应用角度进行了比较系统的阐述。全书共分为10章，包括概述、颗粒表征、粉碎、粉体分散、颗粒流体力学、分离、粉体贮存、混合、纳米粉体、粉体包装。

本书可作为高等院校材料科学与工程及材料类各专业的学生用书，亦可供科研、设计部门和生产工厂的相关工程技术人员参考使用。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

粉体科学与工程/赵家林主编. —北京: 化学工业出版社, 2017.9

高等学校“十三五”规划教材

ISBN 978-7-122-30133-8

I. ①粉… II. ①赵… III. ①粉末法-高等学校-教材 IV. ①TB44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 161849 号

---

责任编辑: 陶艳玲

文字编辑: 李 玥

责任校对: 王素芹

装帧设计: 史利平

---

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: 三河市延风印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 16¼ 字数 413 千字 2018 年 1 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: 39.00 元

版权所有 违者必究

# 前言

FOREWORD

粉体科学与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、化工工程、环境工程等的发展密切相关。掌握粉体工程的基本理论、粉体工程相关的单元操作（机械设备的构造、工作原理、特点和性能）及粉体工程的应用，对于材料专业的学生及从事粉体工程技术的相关人员至关重要。

本书是无机非金属材料工程专业本科学生的专业教材。编写中综合了近年来各种版本的粉体工程教材以及最新理论和技术成果，分别从粉粒体、超细粉体和纳米粉体的特性、制备技术及其相关的应用角度进行了系统的阐述，本书适合作为高等院校材料科学与工程及材料类各专业的学生学习用书，亦可供科研、设计部门和生产工厂的相关工程技术人员参考使用。

本书按照厚基础、宽专业的指导思想，本着力求理论的系统性和完整性，深入浅出并且适用的原则，以粉体科学理论为基础，指导粉体加工实践（技术），进而带动和发展其应用。采用以理论线索带动具体实际的单元操作，这样既保持学科内在联系，又照顾读者的认识规律，做到理论联系实际，以利于培养学生分析问题和解决问题的能力，使其具有从事一般科学研究的水平和进行技术革新的技能，以适应现代技术发展的需要。即按由理论到实践、由实践到应用的思路，以粉体工程单元操作为主线，粉体科学为基础，粉体加工技术为实践，兼顾粉体在各领域的应用。

本教材分别由齐齐哈尔大学赵家林编写第1、3、9章，王超会编写第5、6章，王玉慧编写第2、8章，张永编写第4、10章，齐齐哈尔工程学院郝丽娜编写第7章。

本教材中的粉体工程基础部分可作为教学的重点，以课堂授课为主；粉体加工技术部分可以作为选择性内容讲授，也可以指导学生自学，以培养学生的自学能力和创新精神，提高创新意识和能力；粉体应用部分以学生阅读为主。

在编写过程中，本书参考了部分书籍和文献资料，在此向这些书籍和文献的作者表示谢意。本书由齐齐哈尔大学教材建设基金资助出版，在此致谢！

由于编者水平有限，书中难免有不当之处，敬请读者批评指正。

编者

2017年3月



## 第1章

### 概述

1

<b>1.1</b>	<b>▶ 粉体概述</b>	1
1.1.1	粉体概念	1
1.1.2	粉体科学与工程的发展	3
<b>1.2</b>	<b>▶ 粉体分类</b>	4
<b>1.3</b>	<b>▶ 粉体基本性质</b>	4
1.3.1	粉体静特性	4
1.3.2	粉体动特性	4
1.3.3	粉体化学性质	5
<b>1.4</b>	<b>▶ 粉体化意义</b>	5
1.4.1	化学反应速率	5
1.4.2	光学性能	6
1.4.3	分散性和分散体的流变性	7
1.4.4	纳米粒度的影响	7
1.4.5	新材料的开发与研究	8

## 第2章

### 颗粒表征

9

<b>2.1</b>	<b>▶ 粒径</b>	9
2.1.1	单颗粒粒径的表征	10
2.1.2	颗粒群平均粒径的表征	14
2.1.3	计算颗粒群平均粒径方法的选择	16
<b>2.2</b>	<b>▶ 粒度分布</b>	17
2.2.1	表格法	17
2.2.2	图解法	17
2.2.3	函数法	19
<b>2.3</b>	<b>▶ 颗粒形状</b>	24
2.3.1	概述	24
2.3.2	形状系数	26

2.4	▶ 颗粒测量技术	28
2.4.1	颗粒粒度及粒度分布的测量	28
2.4.2	颗粒粒度测量方法的选择	41
2.4.3	颗粒形状的测量	41
2.4.4	粉体表面积的测定	42

## 第3章

## 粉碎

44

3.1	▶ 粉碎机理	44
3.1.1	基本概念	44
3.1.2	粉碎过程中的粒度分布	45
3.1.3	裂缝与应力集中	45
3.2	▶ 粉碎原理	48
3.2.1	粉碎方法	48
3.2.2	被粉碎材料的基本物性	48
3.2.3	物料的压碎	52
3.2.4	物料的击碎	53
3.2.5	粉碎模型	55
3.3	▶ 粉碎理论	56
3.3.1	粉碎功耗定律	56
3.3.2	粉碎速度论	62

## 第4章

## 粉体分散

67

4.1	▶ 颗粒聚集体形态	67
4.1.1	原级颗粒	67
4.1.2	聚集体颗粒	67
4.1.3	凝聚体颗粒	68
4.1.4	絮凝体颗粒	68
4.2	▶ 工业生产中的粉体分散	68
4.2.1	颗粒悬浮体分散的重要性	68
4.2.2	颗粒悬浮体的极限悬浮速度	70
4.3	▶ 固体颗粒在空气中的分散	70
4.3.1	空气中颗粒黏结的根本原因	70
4.3.2	空气中颗粒黏结的其他原因	71
4.3.3	颗粒在空气中的分散途径	73
4.4	▶ 固体颗粒在液体中的分散	74
4.4.1	固体颗粒的浸湿	74
4.4.2	固体颗粒在液体中的聚集状态	77
4.4.3	固体颗粒在液体中的分散调控	88

4.4.4	固体颗粒的聚集状态与颗粒粒度的关系	96
4.5	▶ 粉体分散研究的趋势	97

## 第5章 颗粒流体力学

98

5.1	▶ 沉降现象	98
5.1.1	颗粒在流体中的运动特性	98
5.1.2	干扰沉降	106
5.2	▶ 固体流态化过程	107
5.2.1	透过流动现象	108
5.2.2	固体流态化	111
5.2.3	颗粒的流体输送	114
5.3	▶ 粉体输送技术	120
5.3.1	输送机械设备	120
5.3.2	气力输送装置	125
5.3.3	空气输送斜槽	135

## 第6章 分离

139

6.1	▶ 概述	139
6.1.1	分级	139
6.1.2	分离	139
6.1.3	分选	139
6.2	▶ 分离结果的评价	140
6.2.1	总分离效率	140
6.2.2	部分分离效率	142
6.2.3	分离界限与分离精度	144
6.3	▶ 筛分	147
6.3.1	筛分机理	147
6.3.2	筛分效率	148
6.3.3	筛分原理	149
6.3.4	影响筛分过程的因素	153
6.3.5	筛分机械	155
6.4	▶ 固气分离	157
6.4.1	防尘的意义	158
6.4.2	粉尘的特性	158
6.4.3	粉尘的产生与扩散	159
6.4.4	防尘措施	161
6.4.5	收尘效率	162
6.5	▶ 固液分离	165

6.5.1	沉降浓缩 .....	165
6.5.2	过滤 .....	170

## 第7章 粉体贮存 173

7.1	▶ 料仓设计理论 .....	173
7.1.1	粉体摩擦特性 .....	174
7.1.2	粉体压力计算 .....	183
7.1.3	粉体的重力流动 .....	185
7.1.4	整体流料仓设计原理 .....	188
7.2	▶ 粉体贮存技术 .....	195
7.2.1	贮料设备 .....	195
7.2.2	料仓的计算及布置 .....	197
7.2.3	粉体拱的类型及防拱措施 .....	200
7.2.4	料位测定装置 .....	204

## 第8章 混合 206

8.1	▶ 混合过程 .....	206
8.1.1	混合目的 .....	206
8.1.2	混合作用 .....	207
8.2	▶ 混合均匀度 .....	208
8.2.1	样品合格率 .....	208
8.2.2	标准偏差 .....	208
8.2.3	离散度和均匀度 .....	210
8.2.4	混合指数 .....	210
8.2.5	混合速度 .....	211
8.3	▶ 粉体混合技术 .....	211
8.3.1	常用混合机及其分类 .....	211
8.3.2	机械搅拌粉料混合机 .....	212
8.3.3	气力搅拌混合设备 .....	215
8.3.4	料浆搅拌机 .....	218

## 第9章 纳米粉体 222

9.1	▶ 纳米颗粒特性 .....	222
9.1.1	小尺寸效应 .....	222
9.1.2	表面与界面效应 .....	228
9.1.3	量子尺寸效应 .....	229



9.1.4	宏观量子隧道效应	231
<b>9.2</b>	<b>▶ 纳米粉体制备技术</b>	231
9.2.1	概述	231
9.2.2	团簇的制备方法	233
9.2.3	气相法制备纳米微粒	233
9.2.4	液相法制备纳米微粒	236
<b>9.3</b>	<b>▶ 纳米微粒的应用</b>	241
9.3.1	纳米微粒在催化方面的应用	241
9.3.2	纳米磁性材料的应用	242
9.3.3	纳米微粒的光学特性及应用	242
9.3.4	纳米颗粒在陶瓷领域的应用	242
9.3.5	纳米颗粒在消防科技领域的应用	243
9.3.6	纳米颗粒在其他方面的应用	243
9.3.7	纳米颗粒应用中存在的问题	244

## 第10章 粉体包装

246

<b>10.1</b>	<b>▶ 概述</b>	246
10.1.1	粉体包装特点	246
10.1.2	粉体包装行业在国内的发展现状	246
<b>10.2</b>	<b>▶ 水泥包装</b>	247
10.2.1	水泥粉体产品的包装技术和包装材料	247
10.2.2	水泥包装机的分类与特点	248
10.2.3	回转式包装机的种类	249
10.2.4	各种自动插袋包装机的特点	251
<b>10.3</b>	<b>▶ 热缩包装</b>	252
<b>10.4</b>	<b>▶ 散装</b>	253
<b>10.5</b>	<b>▶ 包装机行业的绿色发展</b>	255
10.5.1	包装机械发展活跃,市场前景看好	255
10.5.2	我国包装机械制造业存在的问题及技术缺点	255
10.5.3	人工成本高涨,全自动包装机械行业潜力巨大	256
10.5.4	粉末包装机行业发展潜力巨大	256

## 参考文献

258

# 第1章

## 概 述

### 1.1 粉体概述

#### 1.1.1 粉体概念

在日常生活中,提及粉体,人们自然会想到滑石粉、面粉、淀粉、药粉、奶粉等等,那么粉体究竟是什么?可能每个人的想法不太相同,都有自己的想象和描述,这是由于每个人关心的对象和具体经历不同。粉或粉体是人类的伟大发明,它与火一样,成了创建人类文明的基本因素。粉原意是粉末、极细的颗粒,属于颗粒的范畴,它的本质价值,诸如表面积大、流动性好、溶解迅速等,可以说自古以来一点没有变,将来也不会变。从这个意义上说,粉体是由固体颗粒堆积而成的物质。故从本质上讲,粉、粉末、颗粒、粉体或称粉粒体具有相同的含义和意义。

须指出的是,粉体和粉粒体是没有特殊区别的两种说法:一般说来,粉粒体流动性好,凝聚性差;而粉体流动性不好,附着性和团聚性强。从表面来看,粉粒体细化至粉体,细到什么程度?有人提出粒径 $100\mu\text{m}$ 可作为两者的区别界限,或根据肉眼能否分清一个一个颗粒来进行区别。大于者为粉粒体,小于者为粉体。

就此而言,所谓粉体是大量固体颗粒( $<100\mu\text{m}$ )的集合体,各颗粒间有适当的作用力。适当的作用力是指人们稍许触动即能流动、变形这样大小的力。如相互作用力过大,则粉体将成为形成体或烧结体。而烟尘之类相互作用力可忽略不计,不称其为粉体。之所以称为粉体,并不是按金属、高分子、无机非金属材料等各种材料进行分类,而是对应于气体、液体、固体,称为粉体,是为了把粉体作为物质的一种状态特别加以强调。

因为粉体颗粒间有一定的相互作用力,所以可以从颗粒的黏性力测定中对颗粒和粉体进行人为的区别。从广义上说,粉粒体不能只限于固体颗粒,气体中分散的液滴颗粒(雾或云)、流体中的分散液滴(乳浊液等)、液体中分散的气泡等都可以看作粉粒体。难怪有人提出整个宇宙都可看成粉粒体,因为天空中的星球只不过是一个一个的“颗粒”。

科学技术发展至近代,几乎各工业部门均涉及粉粒体的处理过程,约翰·艾特肯士在他的论文中这样写道:“漂浮在大气中的尘埃引起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。无论是小到经过多倍显微镜放大后也看不

见的无机尘埃，还是漂浮在大气层内不可见的更大的有机粒子；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……”这主要指卫生、环保领域，而颜料、填料、染料、医药、农药、聚合物粉末、涂料、化工、冶金、建材、火箭发动机推进剂、半导体材料、磨料、化妆品、食品等行业中，几乎每一种产品都和粉体有着直接或间接的联系。但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，各行业只能独立地处理各自遇到的粉体技术问题，由于缺少交流，大家认识不到各行业之间在粉体技术研究方面的共性。因此，在某种程度上阻碍了科学技术的发展，这样导致了某种新技术的重复研究。随着知识的积累，在综合边缘学科迅猛发展的大趋势下，人们对粉粒体的认识也产生了升华。这就是将粉粒体看作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——粉体工程学就此诞生了。

粉体科学与工程是研究粉体状态下物质的特性、加工及其应用的学科。或者进行粉体基现象的研究，用来解释各种粉体现象产生的原因，所遵循的理论根据、计算和测定的方法及解决粉体加工、处理及应用过程中的问题。

粉体科学与工程包括粉体科学与粉体工程两大方面。

粉体科学系指粉体基现象的研究，粉体基现象的研究必须进行其特性的研究，谈及特性必然涉及有关产生特性的基础研究：例如粉碎特性，为什么有的物料易粉碎，有的物料难粉碎？其他诸如形状特性、粒度特性（图 1-1）等。

粉体工程是指用较大而复杂的设备来进行的各项单元操作，即粉体在工程应用中的各项单元操作，如粉碎、分级、混合、造粒、成型、贮存、输送、收尘等，图 1-2 所示为碳素粉磨分级单元。



图 1-1 粒度特性

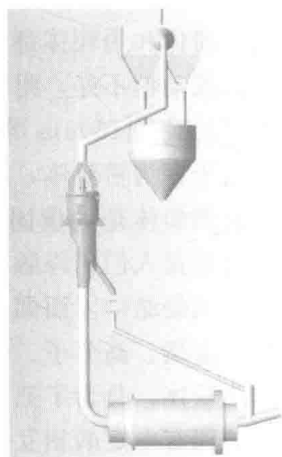


图 1-2 碳素粉磨分级单元

由此可知，粉体科学与工程的前者是后者的重要基础，用来解释各种粉体现象产生的原因，所遵循的理论依据、计算和测定的方法等。由于其跨学科、跨技术的交叉性和基础理论的概括性，因此，它既与若干基础学科相毗邻，例如数学、物理、化学、流体力学、材料力学，还涉及材料科学、电子学等等，又与工程应用相联系，是一门新兴的研究近代材料科学的综合性技术科学，已经形成一个独立的学科体系。

## 1.1.2 粉体科学与工程的发展

实际上,我国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,而它的生产除与火的发现具有必然的联系外,与粉体也是分不开的。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《天工开物》一书就对一些原始的粉粒体加工工艺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。20世纪60年代初期,粉体工程这个名词首先出现在战后的日本。

粉末工业是一个重要的基础原料工业,粉末制备技术在化学工业及材料工业中占有相当重要的地位,从其发展的历史上看,人类对于粉末的认识和应用很久以前就已经开始了,粉末技术从古代由陶瓷制备逐渐发展起来,并刺激了工业革命和化学工业的产生。

作为专门体系的学科——粉体科学与工程(或粉体工学、颗粒学、粉体工程学),还只有短短几十年的历史。但因为颗粒同人类有着极其广泛的联系,并具有重要的作用,所以,国外从20世纪30年代便逐渐开始颗粒学的研究,自20世纪60年代以来,有关粉体科学与工程的研究日渐活跃,如最先从事这一研究的是美国学者J. M. Dallavalle(1943),他出版了世界上第一部颗粒学专著《粉体学·微粒子技术》(《Micromeritics》),首次把粉末制备和应用等归纳在一起。随后德国的Hans Rumpf等人对粉末制备技术进行了分类,并将物理化学和化学热力学引入粉末制备过程,奠定了粉末技术发展的基础。其后,德国学者I. R. Meldau编写了《颗粒体手册》(1960),J. M. Dallavalle的学生Orr又出版了《颗粒学》(1966),1979年日本学者久保、水渡、中川、早川合编了《粉体——理论与应用》等,这些论著对于粉体科学与工程学科的发展起到了很大作用,大大促进了其学术水平的提高。

前面提到粉体工程学首先由日本提出,日本的各工科大学及产业界的研究者在此项研究中投入了大量的人力物力,并且取得了很大的成绩。目前我国粉体方面的教科书,大都以日本的教科书为基础编译整理加工而成。为了促进该学科的发展,日本成立了该学科的交流机构——日本粉体工程学会。几乎与此同时,欧美等国家和地区也相继成立了类似的粉体学会和颗粒学会。自20世纪80年代以后,我国也开始重视该学科的发展,1986年在中国科学院郭慕孙的倡导下,我国正式成立了中国颗粒学会。1988年在北京举行了首届中、日、美颗粒学术报告会,它是我国加入国际粉粒体研究行列的标志。随着科学技术的发展,粉体科学与工程学科也必将得到飞速的发展。

20世纪80年代以来,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属性,而改变属性的方法之一就是使材料粒度细化至微细或超微细状态后再进行组合,因此,近年来,在颗粒学中超细颗粒成为最引人入胜的研究课题。显然,材料科学与工程领域高新技术的开发大大推动了颗粒学的发展,丰富了颗粒学的内容。有关颗粒学中许多课题的研究日益表明,它已成为新兴产业和高新技术发展的关键。

同时,粉体科学与工程科学的发展也推动了其他学科及行业的技术进步、创新和发展,如食品业、冶金工业、制药工业、日用化学、化学工业等。

## 1.2 粉体分类

粉体是由大量颗粒组成的，只不过颗粒很细，故而在本质上也可以把粉体叫作颗粒，但在实际中这两者在我们的习惯看法上是有区别的，例如我们一般叫小麦粉，而没有人称小麦颗粒的。但不论习惯上的看法有何不同，粉体是由颗粒组合而成确是真理，为了制备、加工、应用及研究的方便，需要对粉体进行分类。

粉体类别理所应当要根据颗粒的大小来划分。由于各个国家所使用的标准及对粉体研究的侧重点不同，对粉体的分类上有争议，以下粒径可作参考：

粒体 100 $\mu\text{m}$  以上

粉粒体 100 $\mu\text{m}$  左右

粉体 100 $\mu\text{m}$  以下

细粉 44 $\mu\text{m}$  以下

超细粉 5 $\mu\text{m}$  以下

微米粉 5~1 $\mu\text{m}$

亚微米粉 1.0 $\mu\text{m}$ ~100nm

纳米粉（超细粉末或超微颗粒） 100~1nm

对于粉体的分类，至今尚无定论，是一个值得探讨的问题。

## 1.3 粉体基本性质

对于物质三态的气体、液体及固体来说，粉体有其不同的特点和性质，可以把粉体看作 0 维材料，它的空间自由度很大，能以 3 维、2 维、1 维自由配置，所以有人将粉体列为第四态物质，把粉体与物质三态并列作为第四态物质的看法固然不正确，但其具有多变的性质和能力却毋庸置疑，俗称“魔物”。例如，粉体弥散于气体中，则形成气溶胶，呈现气体性质；而较大的粉体颗粒具有固体性质；较细的颗粒充以气体形成流态化时，可具有流体性质。这些特性是由其本身所具有的性质所决定的。一般说来粉体有三个方面的性质：粉体的静特性、粉体的动特性、粉体的化学性质。

### 1.3.1 粉体静特性

粉体的物理性质是由颗粒性质和颗粒集合体性质复合而成的，是一种复杂的和。

粉体的静特性包括两种情况：一是与颗粒集合形态无关的基本特性；二是与颗粒集合形态有关的特性。前者包括颗粒的粒度、颗粒的密度、颗粒的形状、颗粒的硬度、颗粒的熔点、颗粒的化学组成、颗粒的表面化学性质（包括粉体的表面结构和表面能、吸附、润湿）等；后者包括颗粒的充填性和凝聚性，粉体压现象，颗粒间的摩擦性质，颗粒的粒级组成，粉体的团结强度，粉体的热、光、电特性等。

### 1.3.2 粉体动特性

粉体的动特性可分为四方面情况。

(1) 颗粒体系的流动 如重力流动、机械强制流动、振动流动和压缩流动。实际中我们常见到的贮仓内物料流动、螺旋式振动输送机、压缩成型等均属于这一类流动。

(2) 颗粒与流体的两相流动系统 如重力或离心力的沉降现象、气力输送、流态化、喷流、气体中的分散搅拌等。实际中见到的旋风分离器、沉降室、料仓的喷流、水泥生料的均化、流态化干燥等均属于这一类。

(3) 流体流动系 如透过流动、干燥、吸附等，我们在实际中见到的颗粒层收尘器、回转式干燥机、活性炭吸附等均属于这一类。

(4) 颗粒变形与破坏 如破碎与粉磨（粒度、表面颗粒间关系的变化）磨耗等。在实际中我们见到的石灰石、铁矿石的破碎（颚式、锤式、反击式破碎机等），水泥的粉磨及研磨剂等均属于这一类。

### 1.3.3 粉体化学性质

粉体反应特性（化学性质）现象中引起了物质变化，如有以下各种现象：化合（氧化、燃烧和粉尘爆炸等）、溶解、析晶、分解、升华等，催化现象自然也属于这一类，但粉体催化剂本身没有变化。

富有挑战性的 21 世纪将人类带进了又一个新的关键历史时期，纳米技术作为 21 世纪的主导科学技术，将会像 20 世纪 70 年代微米技术在世纪之交的信息革命中起的关键作用一样，给人类带来一场前所未有的新的工业革命。近年来，纳米技术与传统学科相结合形成的新的学科包括纳米电子学、纳米生物学和纳米医学、纳米材料学、纳米机械学、纳米物理学和纳米化学、纳米力学和纳米测量学等学科。这些新兴学科的发展趋势和潜力使我们完全有理由相信，21 世纪会是一个纳米技术的世纪。这个由纳米技术主导的世纪会在不久的将来带给人类：新的信息时代、新的生命科学时代、新的医学时代、新的材料科学时代、新的制造技术时代。

纳米颗粒是指尺度介于分子、原子与块状材料之间，通常泛指 1~100nm 范围内的微小固体颗粒。包括金属、非金属（有机、无机）和生物等多种颗粒材料。

随着物质的超细化，其表面电子结构和晶体结构发生变化，产生了块状材料所不具有的表面效应、小尺寸效应（体积效应）、量子尺寸效应和量子隧道效应，从而使超细粉末与常规颗粒材料相比具有一系列优异的物理、化学性质。

## 1.4 粉体化意义

粉体化的意义究其实质即是物料粒度由大变小所产生的一系列作用。粉体物料的粒度小到“超细”以后，与相对较粗的粉体物料的性质（性能）发生了变化：例如，比表面积、表面原子数以及表面能等急剧增大；化学反应速率明显提高；光学性能（散射系数、吸收系数、折射率和反射率）显著变化；烧成温度显著下降，烧结时间缩短；磁性及电性、堆积性、吸附性、均化性显著变化；在液相介质中的分散性以及所形成的胶体分散体的流变性发生显著变化；溶解性和熔化性发生显著变化；粉体混合的偏析现象有所改善；颗粒在介质中的沉降速度减小等等。

### 1.4.1 化学反应速率

粉体细度越高，固-固或固-液、固-气反应速率越快，系统原料的热效率越高。例如窑外

分解炉中生料粉的分解反应过程、煤粉燃烧反应过程等，其反应时间均以秒计算。

### 1.4.2 光学性能

所谓光学性能，就是指含有粉体的涂层在入射光（特别是可见光）照射下所产生的各种光学效应，如光的散射（漫反射）、吸收、折射、反射和透射等，它们可分别用散射系数、吸收系数、折射率、反射率和透射率等参数表示。

光学性能是颜料粉体和涂层（特别是装饰性涂层）的重要性能，主要包括彩色颜料的着色力、白色颜料的消色力、颜色色光及明度、透明度和光泽度等。

着色力和消色力的强弱与多种因素有关，例如与颜料的折射率、粒度、粒度分布、颗粒形状、在涂料基料中的分散均匀程度、颜料与基料的配合形式、涂料的颜料体积浓度、颜料自身的杂质含量等因素有关。许多学者的研究结果表明，在这些众多的影响因素中，颜料粒度占据第二位，而占首位的是颜料的折射率。例如，在一定的粒度范围内，普通合成氧化铁红颜色的着色力，随其原级粒径变小而增大；当原级粒径处于 $0.09\sim 0.22\mu\text{m}$ 时，其着色力是相当高的，被称为高着色力氧化铁红；当原级粒径处于 $0.3\sim 0.7\mu\text{m}$ 时，其着色力相对变弱，被称为低着色力氧化铁红。

颜料粒度对遮盖力的影响很大。对白色颜料而言，一般地说，当颜料颗粒尺寸处于可见光波长（ $380\sim 760\text{nm}$ ）的 $0.4\sim 0.5$ 倍大小时，颗粒对于入射光的散射能力最大，这时颜料便能使涂层具有较高的遮盖力。例如，当二氧化钛颜料的原级粒径处于 $0.15\sim 0.50\mu\text{m}$ 时，其遮盖力较高。在这一粒径范围内，粒径小者遮盖力相对较低，而粒径大者遮盖力相对较高。

含有颜料的涂层的透明度与颜料的原级粒径关系极大。能使涂层透明的颜料，称为透明颜料。显然，这种颜料是没有遮盖力的。

当颜料的原级粒径远远小于可见光波长的 $0.4\sim 0.5$ 倍时，因入射光发生衍射和透射，遮盖力大大下降，涂层的透明度增大。从理论上讲，当具有遮盖力的颜料粒径小于 $100\text{nm}$ ，即处于纳米范围（ $1\sim 100\text{nm}$ ）时，颜料便不存在遮盖力。但实际上，由于颜料颗粒不可能 $100\%$ 地分散成单个存在的原级颗粒，总有一部分颗粒发生聚集，所以透明颜料的最佳粒径都远小于 $100\text{nm}$ ，一般只有 $10\sim 50\text{nm}$ ，属于纳米粉体。

涂料用粉体的粒度对粉体本身和涂层的颜色色光和明度等都有很大影响。

彩色颜料如氧化铁颜料，在一定的粒径范围内，粒径越细，其颜色越浅；反之，则颜色越深。合成氧化铁红彩色颜料的原级粒径由 $0.70\mu\text{m}$ 逐渐变化到 $0.09\mu\text{m}$ ，其颜色渐次由深向浅变化。

白色颜料和填料的明度即白度是一项很重要的技术质量指标，现代许多高档次的浅色涂料，要求非金属矿物填料必须具有很高（ $90\%$ 以上）的透明度，这就要求它们必须具有微细化的粒径，一般要求粒径约为 $2\mu\text{m}$ 的颗粒数在 $90\%$ 以上，其平均粒径为亚微米。

涂层的光泽度与涂层表面的平整度即光洁度有关。而这种平整度又与涂层中分散的颜料和填料等粉体的粒度有关。对于高光泽度涂层，即使表面含有极个别的粗大颗粒，也会影响对入射光的定向反射，从而影响光泽度。高光泽面漆，要求颜（填）料等粉体粒径必须在 $0.3\mu\text{m}$ 以下。

影响涂层表面光泽度的其他因素也很多，如涂料的颜料体积浓度、分散程度、流变性（流平性）以及涂装技术等。



### 1.4.3 分散性和分散体的流变性

粉体研磨分散性的影响因素很多。例如：粉体的质地及密度，颗粒的大小及其分布，颗粒的表面活性和表面亲液性，液相介质的极性，颗粒在介质中形成双电层的能力，颗粒吸附层界面与扩散层界面之间的电位（即动电位，简称 $\zeta$ 电位），能控制 $\zeta$ 电位的分散剂的种类和效能，以及研磨分散设备所能产生的剪切力的大小等。

粉体粒度对研磨分散性的影响很大，一般地说，原级粒度合适、粒径分布狭窄、粉体的附聚体或絮凝体质地松软的粉体，是比较容易分散的，所形成的分散体也是比较稳定的。

以质地比较坚硬的天然氧化铁颜料为例，若采用传统的设备粉碎，即使粒径 $44\mu\text{m}$ （325目）的颗粒能够达到99.9%，也存在许多不易分散的极端大颗粒。例如，一个典型的分析结果为：小于 $10\mu\text{m}$ 者占73.7%， $10\sim 34\mu\text{m}$ 者占20.0%，大于 $34\mu\text{m}$ 者占5.7%，在5.7%的这一粗颗粒级别中，个别颗粒可达到 $40\mu\text{m}$ ，甚至还有 $60\mu\text{m}$ 者，分散极为困难，这样的天然氧化铁颜料只可能用于非装饰性的厚涂层中，而且只能用湿法球磨这样的高能耗研磨分散设备。

粉体含量相对较高的液相分散体最重要的性能之一，便是它的流变学性能，简称流变性。所谓流变性，就是分散体在外力作用下发生流动和变形的性能。

流变性包括许多参数，其中分散体的黏度极为重要，它是分散体黏滞性大小的量度，对分散体的流动性影响颇大。

分散体的黏度与它所含有粉体粒径有关。例如，一种氧化锌颜料在油中形成的非牛顿型分散体的塑性黏度和屈服值就与氧化锌的平均粒径有关。此外，高固相的分散体，其表现流动性能随粉体粒径变小而下降。液相分散体的贮存稳定性大受粉体粒径的影响。涂料的临界颜料体积浓度以及颜料和填料的吸油量（或吸水量）等指标，也受粉体粒径大小的影响。

### 1.4.4 纳米粒度的影响

当粉体粒径处于接近微观粒径的纳米范围（ $1\sim 100\text{nm}$ ）时，它的许多性能会发生质的改变。粒径越细，其改变程度越大。

这是因为，由于颗粒极其微细，每个颗粒的表面积与其体积的比值非常大，晶体结构极易发生变化，颗粒表面乃至本体的活性因而大增，故纳米粉体具有一般微米级甚至亚微米级粉体所不具备的许多特异性质，如本体效应、表面效应、量子尺寸效应、宏观量子隧道效应、介电域效应等，从而使纳米粉体等纳米材料具有微波吸收性能、高表面活性、强氧化性、超顺磁性以及吸收光谱表现为明显的向紫外线或红外方向扩展等性能。此外，纳米粉体还具有特殊的光学性质、导电性质、催化性质、光催化性质、光电化学性质、化学反应活性、化学反应动力学性质和机械力学性质等。

纳米粉体由于具有这些特殊的光、电、磁、热、声、力、化学和生物学等性能，已经或正在被应用于各种工业领域中，其中包括涂料工业。例如，上面所述及的纳米二氧化钛（ $7\sim 15\text{nm}$ ）、透明氧化铁（ $7\sim 15\text{nm}$ ）、纳米氧化锌（ $50\sim 60\text{nm}$ ）以及炭黑（ $30\text{nm}$ 左右）、各种纳米级的透明度高且色彩鲜艳的有机颜料等，已作为纳米颜料应用于各种涂料中，产生各种特异的效果。纳米级合成填料如硅铝酸钠（ $15\sim 25\text{nm}$ ）和透明补强剂级的沉淀碳酸钙（ $10\sim 100\text{nm}$ ）等，在涂料中可作为优质填料替代部分二氧化钛并能改善涂层的光学性能。而水合二氧化硅（白炭黑）因具有纳米尺寸的粒度（沉淀法产品粒径 $20\sim 40\text{nm}$ ；气相法产



品粒径 10~25nm, 著名的 Aerosil 牌平均粒径 7~12nm) 和表面分子状态的三维网状结构以及极强的紫外线吸收能力, 已在涂料工业中作为功能性添加剂广泛应用, 如用以改进涂料的触变性和分散稳定性, 提高涂层的抗老化性能, 以及用作高级平光涂层的消光剂等。

#### 1.4.5 新材料的开发与研究

随着科学技术的发展, 越来越需要具有超硬、超纯、超强、超塑和超导等特性的新材料。这些材料均需极端参数, 要使用极端参数达到极端状态, 即要改变原材料原有属性, 改变属性的方法之一, 是材料粒度细化至微细或超微细状态后再进行组合。

随着粉体粒度的不断减小, 由化学方法制备的超细粉, 现在已达到纳米级。粉体一旦达到这样的细度, 那么它的很多特性都发生了质的变化, 由此可以开发出许多新型的材料如超导体陶瓷材料、陶瓷发动机、陶瓷刀具、电子陶瓷、表面改性材料、磁性记忆材料、超大规模集成电路等。随着对超细粉体研究的不断深入, 工业产品及技术正经历着巨大的革命。