



教育部高职高专规划教材



# 超细粉体技术



应德标 主编 张育才 张云洪 副主编



化学工业出版社  
教材出版中心

教育部高职高专规划教材

# 超 细 粉 体 技 术

应德标 主编

张育才 张云洪 副主编



化学工业出版社  
教材出版中心

· 北京 ·

本书以粉体工程学的基本知识为基础,深入浅出地介绍了粉体的几何性质、力学性质及粉体形态与工艺性能的测定;较详细地介绍在超细粉体机械粉碎中的机械力化学效应和相应的工艺流程、工作原理、分级分离理论及工程应用,为各行业新产品研发、形成新型现代产业提供新思维和新观念;并较详细地介绍超细粉碎技术在工程中的应用和新型超细粉体制备技术。

本书力求超细粉体技术理论的系统性和完整性,工程应用强调通俗性和实用性,且力求技术先进,内容新颖。因此,本书既可作为大专院校的专业教材,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

超细粉体技术/应德标主编. —北京:化学工业出版社, 2006. 6

教育部高职高专规划教材

ISBN 7-5025-8734-9

I. 超… II. 应… III. 超细粉(金属)-高等学校: 技术学院-教材 IV. TF123. 7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 071030 号

---

教育部高职高专规划教材

### 超细粉体技术

应德标 主编

张育才 张云洪 副主编

责任编辑:程树珍 王文峡

文字编辑:刘志茹

责任校对:陈静 宋夏

封面设计:潘峰

\*

化学工业出版社

出版发行

教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询:(010)64982530

(010)64918013

购书传真:(010)64982630

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

\*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 13 字数 329 千字

2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8734-9

定 价: 25.00 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

# 教育部高职高专材料工程技术专业教材编写委员会

名誉主任	周功亚				
主任委员	张战营				
副主任委员	张志华	李坚利	肖争鸣	王继达	晷和平
	周惠群	顾申良	刘晓勇		
委	王新锁	赵幼琨	陈 鸣	冯正良	
员	农 荣	隋良志	郭汉祥	黄为秀	
	辛 颖	彭宝利	芮君渭	葛新亚	
	蔡红军	毕 强			

# 序

全国建材职业教育教学指导委员会为建材行业的高职、高专教育发展做了一件大好事，他们组织行业内职业技术学院数百位骨干教师，在对有关企业的生产经营、技术水平、管理模式及人才结构等情况进行深入调研的基础上，经过几年的努力，规划开发了材料工程技术和建筑装饰技术两个专业的系列教材。这些教材的编写含有课程开发和教材改革的双重任务，在规划之初，该委员会就明确提出课程综合化和教材内容必须贴近岗位工作需要的目标要求，使这两个专业的课程结构和教材内容结构都具有较多的改进和新意。

在当前和今后的一段时期，我国高职教育的课程和教材建设要为我国走新型工业化道路、调整经济结构和转变增长方式服务，更好地适应于生产、管理、服务第一线高素质的技术、管理、操作人才的培养。然而我国高职教育的课程和教材建设当前面临着新的产业情况、就业情况和生源情况等多因素的挑战，从产业方面分析，要十分关注如下三大变革对高职课程和教材所提出的新要求：

1. 产业结构和产业链的变革。它涉及专业和课程结构的拓展和调整。

2. 产业技术升级和生产方式的变革。它涉及课程种类和课程内容的更新，涉及学生知识能力结构和学习方式的改变。

3. 劳动组织方式和职业活动方式的变革——“扁平化劳动组织方式的出现”；“学习型组织和终身学习体系逐步形成”；“多学科知识和能力的复合运用”；“操作人员对生产全过程和企业全局的责任观念”；“职业活动过程中合作方式的普遍开展”。它们同样涉及课程内容的更新与调整，还涉及非专业能力的培养途径、培养方法、学业的考核与认定等许多新领域的改革和创新。

建筑材料行业的变化层出不穷，传统的硅酸盐材料工业生产广泛采用了新工艺，普遍引入计算机集散控制技术，装备水平发生根本性变化；行业之间的相互渗透急剧增加，新技术创新过程中学科之间的融通加快，又催生出多种多样的新型材料，使材料功能获得不断扩展，被广泛应用于建筑业、汽车制造业、航天航空业、石油化工业和信息产业，尤其是建筑装饰业，是融合工学、美学、材料科学及环境科学于一体的新兴服务业，有着十分广阔的市场前景，它带动材料工业的加速发展，而每当一种新的装饰材料问世，又会带来装饰施工工艺的更新；随着材料市场化程度的提高，在产品的检测、物流等领域形成新的职业岗位，使材料行业的产业链相应延长，并对从业人员的知识能力结构提出了新的要求。

然而传统的材料类专业课程模式和教材内容，显然滞后于上述各种变化。以学科为本位的教学模式应用于高职教育教学过程时，明显地出现了如下两个“脱节”，一是以学科为本的知识结构与职业活动过程所应用的知识结构脱节；二是以学科为本的理论体系与职业活动的的能力体系脱节。为了改变这种脱节和滞后的被动局面，全国建材职业教育教学指导委员会组织开展了这一次的课和教材开发工作，编写出版了这一系列教材。其间，曾得到西门子分析仪器技术服务中心的技术指导，使这批教材更适应于职业教育与培训的需要，更具有现

代技术特色。

随着它们被相关院校日益广泛地使用，可望我国高职高专系统的材料工程技术和建筑装饰技术两个专业的教学工作将出现新的局面，其教学水平和教学质量将上一个新的台阶。

**中国职业技术教育学会副会长、学术委员会主任**

**高职高专教育教学指导委员会主任**

**杨金土**

**2006年1月**

# 前 言

粉体工程学是以颗粒和粉状物料为对象，研究其性质及加工、处理技术的一门新兴的跨行业的综合性学科。粉体工程学涉及众多行业和部门，如冶金、水泥、陶瓷、化工、石油、食品、医药、涂料、轻工、航空航天、生物工程等。随着我国科学与工业技术的进步，特别是进入 21 世纪以来，信息、生物和新材料技术的互动，粉体工程已与材料的科学发展产生了越来越紧密的关联，而作为粉体工程的重要组成部分——超细粉碎技术，已为新材料的研发开辟了广阔的前景。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、性能和应用，对从事材料工程的技术人员和材料专业的学生来说是十分重要的。

本书编写宗旨为：力求技术先进、内容新颖；力求理论的系统性和完整性；力求工程应用的实用性和普遍性。

本书以粉体工程学的基本理论为基础，以工程应用为目的，深入浅出地介绍粉体的基本概念、几何性质和力学性质；介绍了超细粉体的形态和工艺性能的测定；重点阐述超细粉碎中的机械力化学效应及应用、粉碎的设备与工艺、分级与分离理论和技术、实际工程的应用；并在新型超细制备技术中详细地介绍了非机械性的超细粉体技术。

本书由浙江工业大学应德标主编，并编写了第 1 章、第 2 章第 1 节、第 4 章、第 6 章和第 7 章；昆明冶金高等专科学校张育才编写第 5 章；天津城建学院张云洪编写第 3 章和第 8 章；浙江工业大学卢振平编写第 2 章第 2 节～第 5 节。济南大学陶珍东教授对全书进行了审阅。

在编写过程中，本书参阅了大量的文献资料，在此谨向这些文献资料的作者们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免有不当之处，殷切希望广大师生和读者批评指正。

编者

2006 年 1 月

# 目 录

<b>1 绪论</b> .....	1
1.1 粉体 .....	1
1.1.1 粉体的定义 .....	1
1.1.2 粉体的种类 .....	1
1.1.3 粉体研究的目的 .....	2
1.2 粉体工程学 .....	3
1.2.1 粉体工程学的形成与发展 .....	3
1.2.2 学科前景 .....	4
1.3 超细粉碎技术 .....	4
1.3.1 应用范围 .....	5
1.3.2 超细粉碎技术特征 .....	5
1.3.3 超细粉碎技术与现代产业 .....	6
1.3.4 超细粉碎的主要研究内容和发展趋势 .....	7
<b>2 粉体性能及测量</b> .....	9
2.1 粉体颗粒的几何形态性能 .....	9
2.1.1 颗粒粒径的表示方法 .....	9
2.1.2 颗粒形状因数 .....	11
2.1.3 粒径分布 .....	15
2.1.4 平均粒径 .....	20
2.1.5 粉体堆积特性 .....	21
2.2 粉体的力学性能和其他物理化学性能 .....	26
2.2.1 粉体的摩擦性质 .....	26
2.2.2 附着力 .....	30
2.3 粉体几何形态性能的测定 .....	32
2.3.1 粒度的测量 .....	32
2.3.2 表面形貌的观测 .....	36
2.4 粉体的比表面积测定 .....	39
2.5 粉体工艺性能测定 .....	40
2.5.1 粉体松装密度和振实密度的测定 .....	41
2.5.2 粉体流动性的测定 .....	43
<b>3 机械粉碎及粉碎机理</b> .....	44
3.1 粉碎概述 .....	44
3.1.1 粉碎的基本概念 .....	44
3.1.2 被粉碎材料的基本物性 .....	45
3.2 粉碎过程 .....	49
3.2.1 粉碎流程 .....	50



3.2.2	粉碎方式	50
3.2.3	粉碎模型	55
3.2.4	混合粉碎和连续粉碎	56
3.3	粉碎机理	57
3.3.1	格里菲斯 (Griffith) 强度理论	57
3.3.2	粉碎功耗定律	58
3.3.3	粉碎热力学效率与能量利用率	62
3.3.4	粉碎过程动力学	63
3.3.5	粉碎动力学在生产中的应用	65
<b>4</b>	<b>粉碎机械力化学及粉体表面改性</b>	<b>67</b>
4.1	粉碎机械力化学概述	67
4.2	粉碎机械力化学作用及机理	68
4.2.1	粉碎 (磨) 平衡	68
4.2.2	粉碎过程的机械力化学效应	69
4.2.3	粉碎过程机械力化学反应的机理	77
4.3	粉碎机械力化学的应用	78
4.3.1	粉体材料的机械力化学改性	78
4.3.2	机械力化学法制备纳米金属、非晶态金属及合金	86
4.3.3	机械力化学法制备新型材料	88
4.3.4	机械力化学在水泥、混凝土生产中的应用	90
4.4	高能球磨工艺	93
4.4.1	高能球磨设备	93
4.4.2	影响高能球磨效率及机械力化学作用的因素	93
<b>5</b>	<b>超细粉体制备工艺与设备</b>	<b>95</b>
5.1	概述	95
5.1.1	超细粉碎设备	95
5.1.2	超细粉碎工艺	96
5.2	机械冲击式超细粉碎机	97
5.2.1	立式机械冲击式超细粉碎机	97
5.2.2	卧式机械冲击式超细粉碎机	99
5.2.3	机械冲击式超细粉碎工艺	101
5.3	气流磨	101
5.3.1	扁平式气流磨	102
5.3.2	循环管式气流磨	104
5.3.3	靶式气流磨	106
5.3.4	对喷式气流磨	107
5.3.5	气流磨超细粉体制备工艺	109
5.4	振动磨	111
5.4.1	结构及工作原理	112
5.4.2	性能及应用	112
5.4.3	操作与维护	113
5.4.4	振动磨超细粉体制备工艺	114

5.5	搅拌磨	114
5.5.1	主要类型、结构及工作原理	114
5.5.2	几种典型的搅拌磨	116
5.5.3	性能及应用	118
5.5.4	操作与维护	119
5.5.5	搅拌磨超细粉体制备工艺	120
5.6	其他类型的超细磨	121
5.6.1	球磨机	121
5.6.2	辊压机和立式磨	122
5.6.3	胶体磨	122
5.6.4	行星球磨机	123
5.7	超细粉碎设备的发展趋势	123
5.8	超细粉碎工艺设计	125
5.8.1	工艺设计与设备选型的原则	125
5.8.2	工艺设计与设备选型的程序	125
5.8.3	主要设备选型	126
<b>6</b>	<b>细粉及超细粉分级技术</b>	<b>131</b>
6.1	分级的作用与意义	131
6.2	超细粉分级分离原理	131
6.2.1	重力和离心分级分离原理	131
6.2.2	分级粒径	133
6.2.3	沉降分级极限	135
6.2.4	分级效率	136
6.3	筛分分级机理及设备	137
6.3.1	概述	137
6.3.2	筛分分离机理	138
6.3.3	筛分设备及分类	141
6.4	颗粒流体系统分级设备和技术指标	141
6.5	超细粉分级设备	144
6.5.1	气力分级装置应具备的基本条件	144
6.5.2	强制涡流干式超细分级机	145
6.5.3	湿法超细分级机	148
<b>7</b>	<b>超细粉体制备技术的工程应用</b>	<b>151</b>
7.1	超细改性填料工业生产	151
7.1.1	填料粉体的特点、要求及改性概述	151
7.1.2	超细填料粉体工业生产和改性	151
7.2	锆英石(砂)超细粉工业生产	162
7.2.1	物性及工艺特点	162
7.2.2	超细粉碎的技术指标要求	162
7.2.3	生产实例	163
7.3	超细水泥及其制品与磨细混合材料	163
7.3.1	工业背景和意义	163

7.3.2	生产流程及工艺特点 .....	165
7.4	磨料微粉工业生产 .....	165
7.5	石墨 .....	166
7.5.1	胶体石墨生产工艺 .....	167
7.5.2	显像石墨乳 .....	167
7.6	超细食品加工 .....	168
7.7	造纸涂布浆料工业生产 .....	169
7.8	药物超细粉碎 .....	169
7.9	橡胶的粉碎生产 .....	170
7.10	塑料粉碎工业生产 .....	171
<b>8</b>	<b>新型超细粉体制备技术 .....</b>	<b>173</b>
8.1	超细粉体气相合成技术 .....	173
8.1.1	气相合成技术原理 .....	173
8.1.2	物理气相合成 .....	177
8.1.3	化学气相反应合成 .....	179
8.1.4	气相反应合成中的加热方式 .....	181
8.2	超细粉体液相合成技术 .....	183
8.2.1	技术特征与分类 .....	183
8.2.2	沉淀法 .....	183
8.2.3	溶剂蒸发法 .....	185
8.2.4	醇盐水解法 .....	189
8.2.5	溶胶-凝胶法 .....	190
8.2.6	水热法 .....	191
8.2.7	非水溶液反应合成 .....	192
8.3	超细粉体制备的工程问题和研究方向 .....	193
8.3.1	超细粉体制备过程的特殊性 .....	193
8.3.2	超细粉体制备的工程问题 .....	194
8.3.3	超细粉体制备技术的研究方向 .....	194
<b>参考文献</b>	.....	<b>196</b>

# 1 绪 论

## 1.1 粉体

### 1.1.1 粉体的定义

粉体通常是指在常态下由大量粗细不一的颗粒及颗粒之间的空隙所构成的集合体。由此可见，粉体是由无数颗粒构成的，而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，大到用肉眼就可以清楚辨别。由此可得，颗粒是构成粉体的最小单元。

在固体物质中，所谓的致密体是一种晶粒集合体，内部没有宏观的孔隙，晶体间主要依靠原子间的键力连接，因此具有一定的体积和固定的形状。而粉体由于其内部存在许多由颗粒构成的小孔隙，颗粒间不能形成较强的键力，只能通过分子间的附着力进行连接。因此，粉体不像致密体那样具有固定形状，而表现出与液体相似的流动性，但由于相对移动时有摩擦，故粉体的流动性是有限的。

如果构成粉体的所有颗粒的大小和形状都是一样的，则称此粉体为单分散粉体（单分散体系）。单分散粉体在自然界中极为少见，目前只有用人工合成的方法可以做到。而由各种不同粒径且形状各异的颗粒所组成的粉体称为多分散粉体（多分散体系）。在常态下制备所得的粉体均为多分散粉体。

### 1.1.2 粉体的种类

#### 1.1.2.1 原级颗粒

物料在粉碎过程中最先形成并独立存在的最小颗粒称为原级颗粒（基本颗粒或一次颗粒）。物料所形成的粉体原级颗粒的形状因材料的种类不同而各异，有立方体状、球状、针状和不规则状等，如图 1-1 所示。可见，原级颗粒是构成粉体的最小单元。而原级颗粒的分散状态真正反映粉体物料的固有性能。

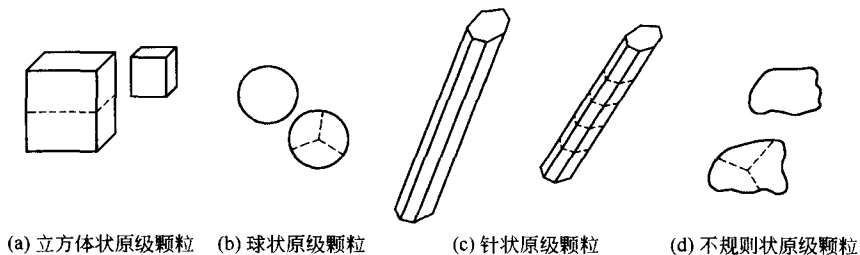


图 1-1 粉体原级颗粒的形状示意图（虚线表示微晶连接的晶格层）

#### 1.1.2.2 聚集体颗粒

聚集体颗粒（或称二次颗粒）是由许多原级颗粒依靠某种化学力与其表面相连而堆积起来的。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表面积总和小，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，如沉淀物质在高温脱水或晶型转变过程中就会发生原级颗粒的彼此粘连而形成聚集体颗粒。另外，晶体在生长、熔融等过程也会促使聚集体颗粒的形成。

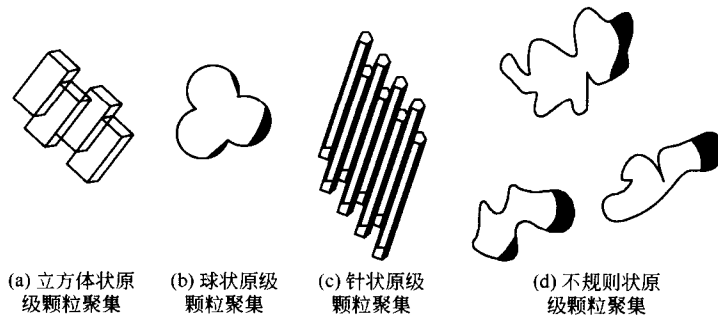


图 1-2 聚集体颗粒示意图

聚集体颗粒中各原级颗粒之间的结合力十分牢固，一般情况下很难将它们分散为原级颗粒，只有采用粉碎的手段才能达到分散的目的。

### 1.1.2.3 凝聚体颗粒

所谓凝聚体颗粒（或称三次颗粒）是指聚集体颗粒形成之后，由原级颗粒再与聚集体颗粒或聚集体颗粒之间通过比较弱的附着力结合起来的疏松的颗粒群。各组成颗粒之间是以棱或角结合的，如图 1-3 所示，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。原级颗粒或聚集体颗粒的粒径越小单位表面上的表面力（范德华力、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，通过机械力的剪切（如研磨等方式）就可进行分散。如何提高分散速度和分散效率是当今研究的重要课题。

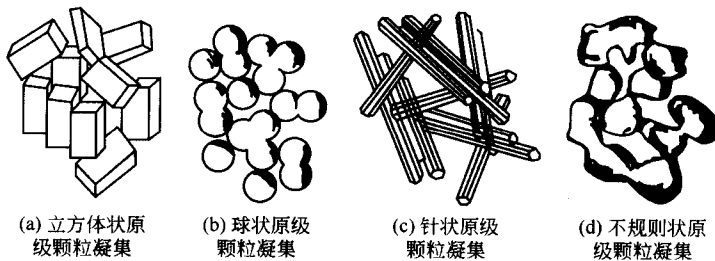


图 1-3 凝聚体颗粒示意图

### 1.1.2.4 絮凝体颗粒

所谓絮凝体颗粒是指在液-固或气-固构成的分散体系中，由于颗粒之间通过各种物理力的作用而使颗粒松散地结合在一起的粒子群。这种絮凝体颗粒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。如长期储存的粉体形成的料块，可以看成在粉体与大气水分构成的体系中形成的絮团。

### 1.1.3 粉体研究的目的

#### (1) 提高工业产品的质量及过程控制

粉体颗粒的大小及粒度分布对产品质量影响非常大。在传统建筑材料中，如水泥颗粒的粗细、形状对水泥性能有着极大的影响，当水泥颗粒为  $3\sim 30\mu\text{m}$  时，水化速度和强度的发挥都比较正常，但当颗粒大于  $60\sim 90\mu\text{m}$  时，水化速度慢，早期强度发挥不合理，甚至有的颗粒待到浆体硬化还没有水化；又如颜料颗粒的大小和比例对被涂物体表面的遮盖力有极大

的影响，当颗粒为可见光波长（ $0.4\sim 0.7\mu\text{m}$ ）的 $0.4\sim 0.5$ 倍时，颗粒对入射光的散射能力最大，具有较高的遮盖力，但当颗粒直径小于 $0.4$ 倍可见光波长时，因发生光的衍射而明显降低遮盖力。在粉体制备过程中这种例子不胜枚举。

### （2）节能增效的需要

制备粉体需要克服物质的分子或原子之间的引力及分子之间的附着力等，所以需要消耗大量的能量。而目前所采用的机械、化学和高温处理等方法，能量的利用率均不高，如球磨机的有效能量利用率仅为 $2\%\sim 4\%$ ， $96\%$ 以上的能量在粉磨物料时被消耗掉。这就要求对颗粒粉碎机理进行研究，以达到改进粉磨工艺或设计新型粉磨机械的目的，从而提高粉磨效率，节省能源。

### （3）新材料的研发

为了适应社会的发展和新技术、新工艺的应用，要求采用的材料具有超强、超硬、超导、超纯、超塑和智能等功能，为此，往往要改变材料原有的属性（如颗粒细度和粒度分布）方可达到材料的极端状态，如常态金属铜（Cu）是一种良好的导体，而将其研磨至超微粉体（纳米级）时就成为不良导体；二氧化硅（ $\text{SiO}_2$ ）常态具有良好的绝缘性，可是将其加工到 $20\text{nm}$ 时，就开始导电了。

## 1.2 粉体工程学

粉体工程学是一门新兴的跨行业的学科。它是以颗粒和粉状物料为对象，研究其性质及加工、处理技术的一门学科。许多工业部门如冶金、水泥、陶瓷、化工、石油、食品、医药、涂料、轻工、航空航天、生物工程等的生产过程都直接或间接地运用这一学科知识。其中粉碎技术是粉体工程学的重要组成部分。

当人类向大自然攫取赖以生存的资源时，如谷物的研磨、炆器（陶瓷）的加工和金属器具的制造，形成了粉碎技术雏形。直到今天，粉碎技术仍然起着越来越重要的作用。因为大量的工业产品或中间产品都为粉体。如航空航天火箭燃料；塑料、橡胶的填料；涂料的染料和颜料；建材行业的中间产品和产品；化工行业和医药行业等。

因此，粉体工程学的新理论的发展和新技术的应用都将使很多工业发生根本性的变化。

### 1.2.1 粉体工程学的形成与发展

粉体工程学是在现代科技综合化趋势下由相关学科交叉形成的，它在不同层次上对各专业学科所涉及粉体及其过程的共性问题进行研究，因此具有横断性，因为其所研究的对象（粉体）所涉及的学科和行业非常广泛。粉体工程学的独特属性，就是体现在它以粉体作为物质存在的特殊形式为认识的基点，以探索粉体及有关过程的规律和解决应用问题为目标。

诺贝尔奖获得者 H. A. 西蒙说过：交叉学科不应该是人为形成的，而应该是对一个真正科学机会的反应。只有当两个或更多的不同领域的知识在解决某些特定问题上变得相互联系起来时，富有成效的交叉学科研究才能得以发展。

粉体工程学的形成基础如下。

i. 众多学科的粉体知识积累到一定程度后，除了各学科的工艺性差异外，对粉体研究的界限日益模糊，所使用的语言和概念框架日益接近。

ii. 在粉体研究中蕴含着不同学科学者共同感兴趣的一系列相互联系的具体问题，如超细粉碎和分级技术等问题就引起了材料、化工、电子、冶金、医药等学科学者的共同关注。

iii. 一些共同性的问题借助于不同学科所提供的观念、工具、技术手段和研究技巧而得到了解决，如激光粒度测定和颗粒图像分析等。

iv. 通过近十几年来的国际学术交流, 形成了独有的体系和科技手段。

但粉体工程学作为新生交叉学科还需完善:

i. 在词汇和知识结构方面, 由于学科的交叉性, 各类专业术语被纷纷引入, 知识结构划分不明确都给交流和教学带来不便, 如同样的固体颗粒细化过程就有粉磨、磨矿、制粉、粉碎、打粉、研磨等不同的说法。语言的差异只能在交流和知识的积累中同化, 但作为一个学科仍需要将其术语规范化及知识系统化。

ii. 应设立粉体工程专业研究机构, 强化研究队伍专业学科的多元性和与非同行合作意识, 以适应粉体研究的交叉横断性特点。

iii. 目前对学科和研究对象的命名很不统一, 它反映了从不同角度或出发点对同一事物和现象认识上的差异。国际上的 fine particle、powder 和 bulk solids 分别找到了与之对应的汉语同义词颗粒、粉体与散体。颗粒是指几何尺寸相对于所研究约束空间尺度来说比较小的单个块状固体。颗粒总是以粉体这种集合体的形式出现, 集合产生了个体所不具有的特殊性, 粉体工程学的研究必然包括了对颗粒的研究。考虑问题出发点的不同, 形成了国内外对该学科命名上的分歧, 从个体颗粒出发, 则将该学科称之为颗粒学; 从集合体粉体和工程的观点出发, 则将其称为粉体工程学。命名的差异有助于从不同的角度加深对粉体及其过程的认识, 是有利的一面, 但也给传播和交流带来了不便。

粉体工程学的形成是渐变过程, 它是不同学科人员共同努力的结果, 同时也是新生学科。国外对粉体工程的研究起始于 20 世纪 50~60 年代, 而国内则开始于 20 世纪 80 年代后期。随着经济体制改革和国民经济的发展, 全国各地涌现出了各类粉体工程研究所、粉体技术开发公司、专业粉体产品和设备生产厂家已有近百家之多, 全国性的相关学术和信息机构也逐步成立。

### 1.2.2 学科前景

对一门学科来说, 其理论与生产应用之间的密切程度基本决定了该学科的发展前景。粉体工程学具有以下特点:

i. 粉体工程学涉及专业多、科研成果有较强的实用性和普遍性。粉体工程学面对着来自众多行业的相似技术问题, 如同样的粉体混合问题涉及了医药、食品、精细化工、饲料、冶金、非金属材料等行业, 混合均匀度的高低直接影响各相关产品的质量, 如何实现高均匀度混合成了一致的问题。解决来自不同行业的同类课题, 既综合了多学科的知识和方法, 又丰富了粉体工程学的内容, 有利于同类技术向其他行业的移植。

ii. 粉体工程学的发展不受行业兴衰的影响, 反而会促使行业的发展。固体物料进行深度加工的粉碎技术成果的应用需要在具体工艺的协作下才能推出新产品。如超细粉体制取技术在不同行业的实施促进了一批新材料、药品、食品和精细化工产品的产生和质量提高, 缩短了粉粒体研究成果的物化周期。

iii. 交叉的特点使粉体工程学串联了各相关学科的成果, 形成针对粉体及处理过程的新技术成果, 综合扩展了原成果的应用范围。所以, 粉体工程学的前景非常广阔, 但目前自身还很不完善, 需要在更高层次上和从更大范围内与相关学科进行不断的综合。

## 1.3 超细粉碎技术

根据物质被粉碎的深度和粉体物化性能的改变, 一般将细粉体划分为: 细粉 ( $10\sim 1000\mu\text{m}$ )、超细粉 ( $0.1\sim 10\mu\text{m}$ ) 及超微细粉 ( $0.001\sim 0.1\mu\text{m}$ ) 三种。对于细粉 ( $10\sim 1000\mu\text{m}$ ) 加工一般采用传统的粉碎工艺就可完成, 这种加工技术称为磨粉; 小于  $0.1\mu\text{m}$  的

超微细粉目前还难以完全用机械粉碎的方法进行加工，需要采用其他物理、化学方法进行加工；一般将加工  $0.1\sim 10\mu\text{m}$  的超细粉的粉碎过程称为超细粉碎，而组织加工和控制超细粉碎的技术称为超细粉碎技术。

### 1.3.1 应用范围

超细粉碎技术作为粉体工程学的组成部分，在粉体的制备与处理过程中起着重要的作用，同时，粉体的微细化又对相关行业新产品的开发和产品质量的提高起到了促进作用。超细粉碎技术在各行业的应用如表 1-1 所示。

表 1-1 超细粉碎技术在各行业的应用

行 业	用 途
农业	粮食加工、化肥、粉剂农药、土壤改良剂、饲料、添加剂等
矿业	金属矿石的粉碎研磨、非金属矿深加工、低品位矿物利用等
冶金	粉末冶金、机械合金化、冶金原料处理、冶金废渣利用等
橡胶	固体填料、补强材料、废旧橡胶制品的再生利用、功能性材料等
塑料	塑料原料制备、增强填料、粉末塑料制品、塑料喷涂等
造纸	纸浆制备、造纸填料、涂布造纸用超细浆料、纤维状增强填料等
印刷	油墨生产、铜金粉、喷墨打印墨汁、激光打印和复印炭粉等
药物	粉剂、片剂、注射剂、中药精细化、定向药物载体、喷雾施药等
化工	涂料、催化剂、原料处理等
食品	粮食加工、调味剂、保健食品、食品添加剂等
颜料	偶氮颜料、酞菁系列颜料、氧化铁系列颜料、氧化铬系列颜料等
能源	煤粉燃烧、固体火箭推进剂、水煤浆等
电子	电子浆料、电子塑料封料、集成电路基片、荧光粉、电子涂料等
建材	水泥、建筑陶瓷生产、复合材料、木粉等
精陶	原料细化处理、金属与陶瓷复合材料、颗粒表面改性等
环保	脱硫用超细碳酸钙、固体废弃物的再生利用、各类粉状污水处理剂等
机械	粒度砂、微粉磨料、超硬材料、固体润滑剂、铸造型砂等

### 1.3.2 超细粉碎技术特征

(1) 粉体的粉碎与团聚的动态平衡是影响超细粉碎的关键

由于物料超细粉碎至微米及亚微米级，产品的比表面积和比表面能显著增大，当微细颗粒质量与表面力（范德华力、静电引力等）相当时，微细颗粒相互团聚（形成二次颗粒或三次颗粒）的趋势逐步增强；在一定的粉碎条件和粉碎环境下，经过一定的粉碎时间后，超细粉碎作业处于粉碎 $\rightleftharpoons$ 团聚的动态平衡过程；在这种情况下，微细物料的粉碎速度趋于缓慢，即使延长粉碎时间（继续施加机械应力），物料的粒度也不再减小，甚至出现“变粗”的趋势。在超细粉碎过程中，这种粉碎 $\rightleftharpoons$ 团聚平衡时的物料粒度称为物料的“粉碎极限”。当然，物料的粉碎极限是相对的，它与机械力的施加方式（或粉碎机械的种类）和效率、粉碎方式、粉碎工艺、粉碎环境等因素有关。在相同的粉碎工艺条件下，不同种类物料的粉碎极限一般来说也是不相同的。

(2) 被粉碎物料粒度减小的同时，还伴随着晶体结构和物理化学性质发生不同程度的变化

对于较粗的粉碎过程而言，这种变化是微不足道的，但对于超细粉碎过程来说，由于粉碎时间较长、粉碎强度较大以及物料粒度被粉碎至微米级或亚微米级，这些变化在某些粉碎工艺和条件下显著出现。这种因机械超细粉碎作用导致的被粉碎物料晶体结构和物理化学性质的变化称为机械力化学效应。这种机械力化学效应对被粉碎物料的应用性能产生一定程度的影响，正在被有目的地应用于对粉体物料进行表面活化处理。



(3) 传统的粒度分析方法已不能完全满足要求

用筛网的“目数”来表示产品细度已不能准确反映超细粉体的特征。这是因为通常测定粉体物料目数（即筛分分析）用的标准筛（如泰勒筛）最细只到 400 目（筛孔尺寸相当于  $38\mu\text{m}$ ），不可能用来测定超细粉体的粒度大小和粒度分布。目前主要用电子显微镜、激光颗粒分析仪、库尔特计数器、图像分析仪、重力及离心沉降仪以及比表面积测定仪等科学仪器来测定超细粉体粒度。测定结果用“ $\mu\text{m}$ ”（粒度）或“ $\text{m}^2/\text{kg}$ ”（比表面积）表示。其细度一般用某一累计百分含量所对应的粒度（ $\mu\text{m}$ ） $d_\phi = \xi\mu\text{m}$  表示（式中  $\xi$  表示粒度大小，下角  $\phi$  表示被测超细粉体物料中小于  $\xi\mu\text{m}$  的物料的百分含量），如  $d_{50} = 2\mu\text{m}$ （50% 小于  $2\mu\text{m}$ ，即中位粒径）， $d_{90} = 2\mu\text{m}$ （90% 小于  $2\mu\text{m}$ ）， $d_{97} = 10\mu\text{m}$ （97% 小于  $10\mu\text{m}$ ）等。有时为方便应用，同时给出被测粉料的比表面积。对于超细粉体的粒度分布也可用列表法、直方图、累积粒度分布图等来表示。

### 1.3.3 超细粉碎技术与现代产业

超细粉碎技术是伴随现代高新技术和新材料产业，如微电子和信息技术、高技术陶瓷和耐火材料、高聚物基复合材料、生物化工、航空航天、新能源等以及传统产业技术进步和资源综合利用及深加工等发展起来的一项新的粉碎工程技术，现已成为最重要的工业矿物及其他原材料深加工技术之一，对现代高新技术产业的发展具有重要意义。

超细粉体由于粒度细、分布窄、质量均匀、缺陷少，因而具有比表面积大、表面活性高、化学反应速率快、溶解度大、烧结温度低且烧结体强度高、填充补强性能好等特性以及独特的电性、磁性、光学性能等，广泛应用于高技术陶瓷、陶瓷釉料、微电子及信息材料、塑料、橡胶及复合材料、润滑剂及高温润滑材料、精细磨料及研磨抛光剂、造纸填料及涂料、高级耐火材料及保温隔热材料等高新技术和新材料产业。

近 20 年来迅速发展起来的高技术陶瓷，因其具有特殊功能（电、磁、声、光、热、化学、力学、生物等）而被称之为继金属材料和高分子材料后的第三大材料。在制备高性能陶瓷材料时，原料越纯，粒度越细，材料的烧成温度越低，强度和韧性越高。一般要求原料的粒度小于  $1\mu\text{m}$ （甚至小于  $0.1\mu\text{m}$ ）。如果原料的细度达到纳米级，则制备的陶瓷称之为纳米陶瓷，性能更加优异，是当今陶瓷材料发展的最高境界。粒度细而均匀的釉料使制品面光滑平坦、光泽度高、针孔少。一般高级陶瓷釉料要求不含或尽量少含大于  $15\mu\text{m}$  的颗粒。用作釉料的锆石英粉要求平均粒径为  $1\sim 2\mu\text{m}$ 。因此，超细粉碎技术与高技术陶瓷材料及高级陶瓷制品密切相关。

显像管是现代微电子和信息产业的重要器件。显像管用的氧化铝微粉平均粒径一般要求为  $1.5\sim 5.5\mu\text{m}$ ；黑底石墨乳粒径要小于  $1\mu\text{m}$ ，管颈石墨乳小于  $4\mu\text{m}$ ，销钉及锥体石墨乳小于  $10\mu\text{m}$ ；现代重要信息材料的复印粉及打印墨粉要求粒径达到微米级；现代高档纸张用的高岭土和碳酸钙涂料要求小于  $2\mu\text{m}$  的颗粒含量超过 90%，其中纸张的填料细度要求  $2\mu\text{m}$  含量达到 40% 以上。显然，现代微电子和信息产业的发展离不开超细粉碎和精细分级技术。

高聚物基复合材料的重要填料组分有碳酸钙、高岭土、滑石、云母、硅灰石、石英、氧化铝、氧化镁、透闪石、伊利石、硅藻土等。这些工业矿物填料的重要质量指标之一是其粒度大小及粒度分布。在一定范围内，填料的粒度越细，级配越好，其填充和补强性能越好。高性能的高聚物基复合材料一般要求无机工业矿物填料的粒度小于  $10\mu\text{m}$ 。例如，低密度聚乙烯薄膜要求碳酸钙填料的平均粒径为  $0.25\sim 0.75\mu\text{m}$ ，最大粒径小于  $10\mu\text{m}$ ；聚烯烃和聚氯乙烯热塑性复合材料要求平均粒径为  $1\sim 4\mu\text{m}$  的改性重质碳酸钙填料；平均粒径为  $1\sim 3\mu\text{m}$  的重质碳酸钙在聚丙烯、均聚物和共聚物中的填充量为 20%~40%，而且制品的弹性模量较单纯的聚合物还要高；平均粒径为  $0.5\sim 3\mu\text{m}$  的重质碳酸钙不仅可以降低刚性和柔性