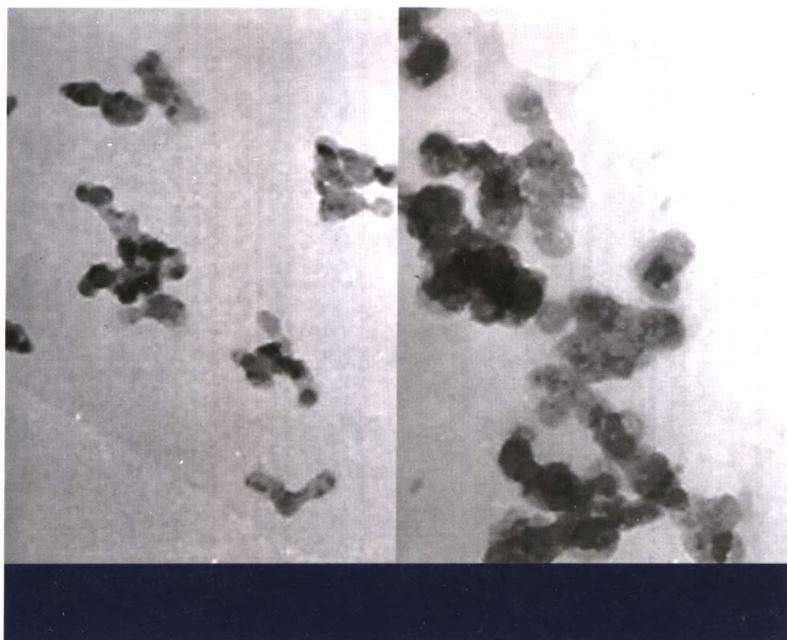


毋 伟 陈建峰 卢寿慈 编著

# 超细粉体 表面修饰



**Chemical Industry Press**



化学工业出版社  
材料科学与工程出版中心

# 超细粉体表面修饰

毋 伟 陈建峰 卢寿慈 编著



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**

超细粉体表面修饰/毋伟 陈建峰 卢寿慈编著. —北京: 化学工业出版社, 2004. 2

ISBN 7-5025-5143-3

I. 超… II. ①毋…②陈…③卢… III. 超细粉 (金属)-研究 IV. TF123. 7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 005416 号

---

**超细粉体表面修饰**

毋伟 陈建峰 卢寿慈 编著

责任编辑: 白艳云 任笑杰

责任校对: 吴桂萍

封面设计: 关 飞

\*

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

聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 720 毫米×1000 毫米 1/16 印张 19½ 字数 327 千字

2004 年 3 月第 1 版 2004 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5143-3/TQ·1912

定 价: 45.00 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

## 内 容 提 要

本书将超细粉体的表面修饰与超细粉体的制备、超细粉体的分散和超细粉体的应用紧密联系在一起,结合编著者的研究成果,介绍了超细粉体表面修饰作用、表面修饰工艺、表面修饰剂、表面修饰设备以及与超细粉体表面修饰有关的超细粉体的制备、超细粉体表面特性、超细粉体的表征、超细粉体的分散等内容,突出了在制备过程中进行原位修饰是最好修饰方法的基本观点。全书选材新颖,深入浅出,通俗易懂,理论联系实际。既可用于相关专业研究生、大学生的教学参考书又可供从事超细粉体制备及应用的研究人员和工程技术人员参考。

# 前言

超细粉体技术是随着近代科技的发展而发展起来的一门新兴科学技术，是材料科学的重要组成部分，在理论研究和工程应用上都具有十分重要的意义。超细粉体的表面修饰是超细粉体制备、加工和应用过程中具有决定意义的关键技术，它又是建立在表面与胶体化学、固体物理、高分子化学与物理、有机化学、颗粒学等多种学科的科学基础之上的综合技术。近年来引起了从事超细粉体制备和应用的技术人员和研究人员的极大关注，迫切需要有关这方面的专著出版。编著者在多年从事该领域研究及教学的基础上，结合自己的研究成果，编著了此书，目的是为了介绍超细粉体表面修饰的基本原理及工艺流程、发展概况以及趋势，通过和大家的共同交流及探讨，起到抛砖引玉的作用，以便更好地开展这方面工作，更好地为国民经济建设服务。

本书内容包括：绪论；超细粉体制备技术概述；超细粉体表面特性；超细粉体物理法表面修饰；超细粉体固相、液相、气相包覆修饰及微胶囊化包覆；超细粉体表面化学法修饰；超细粉体化学修饰应用举例；超细粉体机械力化学修饰；超细粉体在液相中的分散；超细粉体表面修饰设备及超细粉体的表征等内容。

在本书的编著过程中，何涛波硕士为第10章提供了部分素材并参加了部分章节的校对工作，张雪琴硕士、沈淑玲硕士和刘凡硕士参加了部分章节的校对工作，北京化工大学教育部超重力工程研究中心的同事们为这本书的写作提供了许多帮助和方便，在此表示衷心感谢！

超细粉体表面修饰技术是一门多学科交叉的新技术，涉及面很广，由于时间仓促，加之编著者水平有限，对本书中的不足之处恳请读者及同行斧正，以便及时修订。

编著者

2003年11月于北京

# 目 录

<b>第1章 绪 论</b> .....	1
1.1 纳米粉体与纳米材料 .....	2
1.2 纳米粉体的特性 .....	3
1.2.1 纳米粉体的微观特性 .....	4
1.2.2 纳米粉体的宏观特性 .....	5
1.3 超细粉体表面修饰概述 .....	5
1.4 超细粉体及其表面修饰粉体的主要应用 .....	8
1.4.1 在材料领域中的应用 .....	8
1.4.2 在化工领域中的应用 .....	10
1.4.3 在日用化工领域中的应用 .....	13
1.4.4 在医药和生物领域中的应用 .....	13
1.5 本书编写简介 .....	15
参考文献 .....	17
<b>第2章 超细粉体制备技术概述</b> .....	19
2.1 固相法制备超细粉体 .....	20
2.1.1 热分解法制备超细粉体 .....	20
2.1.2 高温固相反应法制备超细粉体 .....	21
2.1.3 还原反应法制备超细粉体 .....	22
2.1.4 金属燃烧法制备超细粉体 .....	23
2.1.5 粉碎法制备超细粉体 .....	23
2.1.6 高能球磨法制备超细粉体材料 .....	35
2.2 液相法制备超细粉体 .....	36
2.2.1 基本原理 .....	36
2.2.2 液相物理法制备超细粉体 .....	38
2.2.3 液相化学法制备超细粉体 .....	40
2.3 气相法制备超细粉体 .....	46
2.3.1 基本原理 .....	47
2.3.2 蒸发冷凝法制备超细粉体 .....	48

2.3.3	气相反应法 (CVD 法) 制备超细粉体	48
2.4	其他方法制备超细粉体	49
2.4.1	爆炸法制备超细粉体	49
2.4.2	燃烧合成法制备超细粉体	49
2.4.3	辐射化学合成法制备超细粉体	50
2.5	工业性制备超细粉体技术要点	50
2.5.1	工业性制备超细粉体过程的特殊性	50
2.5.2	超细粉体制备的工程分析	51
	参考文献	52
<b>第3章</b>	<b>超细粉体表面特性</b>	<b>55</b>
3.1	超细粉体表面的定义	56
3.2	超细粉体的晶体及晶体表面	56
3.3	超细粉体表面能	57
3.4	超细粉体与水的相互作用	58
3.4.1	超细粉体表面离子的水合作用	59
3.4.2	超细粉体表面的羟基化	59
3.4.3	超细粉体表面的润湿性	60
3.4.4	超细粉体表面的电性	61
3.4.5	超细粉体表面的吸附特性	65
3.5	超细粉体的表面官能团	65
	参考文献	66
<b>第4章</b>	<b>超细粉体物理法表面修饰</b>	<b>69</b>
4.1	超声处理	70
4.2	辐照处理	71
4.2.1	辐照在矿物表面修饰中的应用	71
4.2.2	辐照在超细粉体表面聚合物接枝修饰方面的应用	72
4.3	矿物表面电化学修饰	73
4.4	超细粉体等离子体表面修饰	74
	参考文献	77
<b>第5章</b>	<b>超细粉体固相法包覆表面修饰</b>	<b>79</b>
5.1	以有机物为修饰剂的超细粉体固相包覆修饰	80
5.1.1	机械力化学法超细粉体表面聚合物接枝包覆修饰基本原理	80

5.1.2	机械力化学法超细粉体表面聚合物接枝包覆修饰的基本工艺和研究现状 .....	86
5.1.3	机械力化学法超细粉体表面聚合物接枝包覆修饰剂 .....	89
5.1.4	机械力化学法超细粉体表面聚合物接枝包覆修饰产品的应用 .....	89
5.1.5	机械力化学法超细粉体表面聚合物接枝包覆修饰举例 .....	91
5.2	以无机物为修饰剂的超细粉体固相包覆修饰 .....	110
	参考文献 .....	111
<b>第6章</b>	<b>超细粉体液相法包覆表面修饰 .....</b>	<b>115</b>
6.1	溶胶-凝胶法 .....	116
6.2	沉淀法 .....	117
6.3	非均相凝聚法 .....	118
6.4	微乳液法 .....	118
6.5	非均匀成核法 .....	119
6.6	化学镀 .....	119
6.7	超临界流体快速膨胀法 .....	120
6.8	超细粉体液相机械力化学法接枝包覆修饰 .....	121
6.9	超细粉体液相化学法聚合物接枝包覆修饰 .....	122
6.9.1	接枝聚合法 .....	122
6.9.2	乳液聚合法 .....	126
6.9.3	超细粉体液相化学法聚合物接枝包覆修饰产品的应用 .....	136
	参考文献 .....	137
<b>第7章</b>	<b>超细粉体气相法包覆表面修饰及微胶囊化包覆 .....</b>	<b>141</b>
7.1	超细粉体气相法包覆表面修饰 .....	142
7.1.1	超细粉体流态化 CVD 包覆表面修饰 .....	142
7.1.2	超细粉体等离子体 CVD 包覆表面修饰 .....	144
7.1.3	超细粉体 CVD 包覆表面修饰 .....	145
7.2	超细粉体表面微胶囊化包覆 .....	146
7.2.1	微胶囊技术简介 .....	146
7.2.2	超细粉体微胶囊化表面包覆 .....	147
	参考文献 .....	153
<b>第8章</b>	<b>超细粉体表面化学法修饰 .....</b>	<b>155</b>
8.1	修饰剂 .....	156

8.1.1	浮选药剂	156
8.1.2	助剂	157
8.1.3	超细粉体表面修饰剂	158
8.2	超细粉体表面化学修饰机理	166
8.2.1	超细粉体与各种表面修饰剂作用机理	166
8.2.2	超细粉体表面化学修饰的共同规律	169
8.2.3	修饰超细粉体与有机基体之间的作用机理	171
8.3	修饰剂与超细粉体之间的相互关系	173
8.3.1	矿物表面状况与浮选药剂之间的关系	173
8.3.2	表面修饰剂与超细粉体表面成分间的相互关系	174
8.4	超细粉体化学法原位表面修饰	174
8.4.1	沉淀法超细粉体原位表面化学修饰	175
8.4.2	溶胶-凝胶法超细粉体原位表面修饰	185
8.4.3	微乳液法超细粉体原位表面修饰	190
8.4.4	水热法超细粉体原位表面修饰	191
8.4.5	其他方法超细粉体原位表面修饰	191
8.5	用于阴极电泳漆改性的超细二氧化硅表面化学修饰	192
8.6	用于吸收紫外线用的纳米氧化锌表面化学修饰	198
	参考文献	200
<b>第9章</b>	<b>机械力化学法超细粉体表面修饰</b>	<b>203</b>
9.1	概述	204
9.2	超细粉体的机械力化学修饰	204
9.2.1	粉体晶体结构的变化	204
9.2.2	粉体物化性质的变化	204
9.2.3	机械力化学修饰可使粉体发生某些化学反应	205
9.3	机械力化学表面修饰	206
9.3.1	机械力化学湿法表面修饰工艺及应用	206
9.3.2	机械力化学干法表面修饰工艺及应用	208
9.4	机械力化学修饰中修饰剂的助磨作用	209
9.4.1	钛白粉表面机械力化学法聚合物接枝修饰过程中修饰剂的助磨作用	209
9.4.2	机械力化学法重质碳酸钙表面聚合物接枝修饰过程中修饰剂的助磨作用	213

9.4.3	修饰剂的助磨作用分析 .....	217
9.5	机械力化学表面修饰中修饰剂的助磨作用 .....	219
	参考文献 .....	220
<b>第10章</b>	<b>超细粉体表面修饰及应用举例 .....</b>	<b>221</b>
10.1	超细二氧化钛的表面修饰 .....	222
10.1.1	二氧化钛的表面物理化学性质 .....	222
10.1.2	二氧化钛表面无机包覆修饰 .....	223
10.1.3	二氧化钛表面有机包覆修饰 .....	225
10.1.4	表面修饰二氧化钛在涂料中的应用 .....	229
10.2	超细碳酸钙的表面修饰 .....	230
10.2.1	超细碳酸钙表面无机物包覆修饰 .....	231
10.2.2	超细碳酸钙表面有机物修饰 .....	232
10.2.3	表面修饰纳米碳酸钙的应用 .....	234
10.3	超细二氧化硅的表面修饰 .....	237
10.3.1	超细二氧化硅的表面化学 .....	237
10.3.2	超细二氧化硅表面修饰 .....	240
10.3.3	超细二氧化硅及其表面修饰产品的应用 .....	243
10.4	以非金属矿为核复合颜料的制备 .....	244
10.5	其他几种超细粉体的表面修饰及其应用 .....	246
10.5.1	高岭土 .....	246
10.5.2	粉石英 .....	247
	参考文献 .....	248
<b>第11章</b>	<b>超细粉体的分散 .....</b>	<b>251</b>
11.1	基本理论 .....	252
11.1.1	超细粉体的分散过程 .....	252
11.1.2	超细粉体在液相中的稳定理论 .....	253
11.1.3	有关哈马克常数的讨论 .....	257
11.1.4	提高超细粉体在液相分散稳定性的途径 .....	257
11.1.5	分散剂 .....	258
11.2	超细粉体在液相中分散举例 .....	260
11.2.1	纳米碳酸钙在水介质中的分散 .....	260
11.2.2	超细二氧化硅水悬浮液的制备 .....	270
	参考文献 .....	277

<b>第 12 章 超细粉体表面修饰设备及超细粉体的表征</b> .....	<b>279</b>
<b>12.1 超细粉体表面修饰设备</b> .....	<b>280</b>
12.1.1 超细粉体原位修饰设备 .....	280
12.1.2 超细粉体干法修饰设备 .....	280
12.1.3 超细粉体湿法修饰设备 .....	281
12.1.4 超细粉体表面修饰成套设备 .....	281
12.1.5 超细粉体表面修饰设备国外发展状况 .....	282
<b>12.2 超细粉体的表征</b> .....	<b>284</b>
12.2.1 超细粉体颗粒的表征 .....	284
12.2.2 超细粉体比表面积测量 .....	289
12.2.3 超细粉体颗粒表面分析 .....	290
12.2.4 超细粉体颗粒表面电性的测量方法 .....	293
12.2.5 颗粒表面能的测量方法 .....	294
12.2.6 超细粉体晶体结构分析 .....	295
<b>12.3 超细粉体修饰效果直接表征</b> .....	<b>297</b>
12.3.1 活化指数法 .....	297
12.3.2 分散率法 .....	298
12.3.3 红外光谱法 .....	298
12.3.4 浸润热测定法 .....	299
12.3.5 热重分析法 .....	299
<b>12.4 超细粉体分散性的表征</b> .....	<b>299</b>
12.4.1 显微镜法 .....	299
12.4.2 黏度测量法 .....	299
12.4.3 沉降法 .....	300
12.4.4 粒度分布测量法 .....	300
12.4.5 分光光度法 .....	301
参考文献 .....	301

# 第1章

## 绪论

---

## 2 超细粉体表面修饰

超细粉体科学与技术是近几十年发展起来的一门新的科学技术，是材料科学的一个重要组成部分，它的研究与应用对国民经济各个领域和人们的日常生活都具有十分重要的意义。对超细粉体至今还无严格的统一定义，有人将粒径小于  $3\ \mu\text{m}$  的粉体称之为超细粉体，有人将粒径小于  $30\ \mu\text{m}$  或  $10\ \mu\text{m}$  的粉体称为超细粉体，还有人将粒径小于  $300\ \mu\text{m}$  或  $100\ \mu\text{m}$  的粉体称为超细粉体，为了统一，本书接受粒径百分之百小于  $100\ \mu\text{m}$  的粉体称为超细粉体的说法<sup>[1]</sup>。超细粉体的范围很广，既可以是无机粉体也可以是有有机粉体，鉴于无机超细粉体在国民经济的各个领域特别是高科技领域具有越来越重要和独特的作用，本章所讨论的对象，如无特殊说明，均指无机超细粉体（简称超细粉体）。

超细粉体通常又分为微米粉体、亚微米粉体及纳米粉体。粒径大于  $1\ \mu\text{m}$  的粉体称为微米粉体，粒径处于  $0.1\sim 1\ \mu\text{m}$  之间的粉体称为亚微米粉体，粒径处于  $0.001\sim 0.1\ \mu\text{m}$  之间的粉体称为纳米粉体。它们的性质既有相似的方面也有不同的方面，如都具有超细效应和表面效应等，不同的是粒径不同，各种效应的表现程度不同，侧重面不同。表 1-1 即为超细粉体的尺寸与其特性的关系。

表 1-1 超细粉体的尺寸与其特性的关系

分类	直径	原子数目	特征
微米	$>1\ \mu\text{m}$	$>10^{11}$	体效应
亚微米	$1\ \mu\text{m}\sim 100\ \text{nm}$	$10^8$	体效应
纳米	$100\sim 10\ \text{nm}$	$10^5$	尺寸与表面效应
	$10\sim 1\ \text{nm}$	$10^3$	量子效应
团簇分子	$<1\ \text{nm}$	$<10^2$	团簇分子

由于纳米粉体具有超细粉体的多种优越性能，近年来引起人们的广泛关注和研究，这里对与纳米粉体有关的一些知识进行简要介绍。

### 1.1 纳米粉体与纳米材料

纳米材料是纳米科技领域最富有活力、研究内涵最丰富的分支学科，在发展初期，纳米材料是指纳米粉体及其由它们构成的纳米薄膜和固体。其中纳米粉体指的是粒子尺寸为  $1\sim 100\ \text{nm}$  的超微颗粒，是介于原子、分子与块状材料之间的尚未被人们充分认识的新领域，是纳米材料的重要组

成部分及原材料，其本身的结构和特性决定了纳米固体材料的许多新特性。现在，广义地，纳米材料是指在三维空间内至少有一维处于纳米尺度范围或由它们作为基本单元构成的材料。纳米材料有多种分类方法，按维数，纳米材料可以分为三类：① 零维，指空间三维尺度均在纳米尺度，如纳米颗粒、原子团簇等；② 一维，指在空间有两维处在纳米尺度，如纳米丝、纳米棒、纳米管等；③ 二维，指在三维空间内有一维处在纳米尺度，如超薄膜、多层膜、超晶格等<sup>[2]</sup>。按属性可分为<sup>[3]</sup>：① 纳米金属材料，如 Au、Ag、Cu、Mo、Ta、W 等；② 氧化物纳米材料，这是一类纳米材料的大家族，根据氧化物组成的不同又可细分为金属氧化物纳米材料，如 TiO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、CaO、CuO、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等；非金属氧化物纳米材料，如 SiO<sub>2</sub> 等；两性氧化物纳米材料，如 ZnO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等；稀土金属氧化物纳米材料；③ 硫化物纳米材料，如 CdS、ZnS、MnS 等；④ 碳硅化合物纳米材料，如 SiC、MoSi<sub>2</sub> 等；⑤ 氮（磷）等化合物纳米材料，如 TiN、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、GaP、AgBr 等；⑥ 含氧酸盐纳米材料，如磷酸盐类、硫酸盐类、铁酸盐类、碳酸盐类等含氧酸盐；⑦ 复合纳米材料，这是一类新型的复合材料，其性质取决于组成复合纳米材料各元素的存在状态。按功能进行分类，可分为半导体型纳米材料，如硅的氧化物、过渡金属硫化物、过渡金属氧化物和过渡金属化合物微粒等；光敏型纳米材料，如 TiO<sub>2</sub>、ZnO 等；增强型纳米材料，如 SiO<sub>2</sub>、CaCO<sub>3</sub>、SiC、MgO 等；磁性纳米材料。按来源可分为合成纳米材料和天然纳米材料。可见，所有的零维纳米材料都属纳米粉体。

## 1.2 纳米粉体的特性

人们对客观世界的认识是从宏观和微观两个层次上展开的。长期以来，人们已对宏观物体的晶体对称性、空间点群、缺陷、位错、晶界等微结构与物理性质的关系进行了深入而系统的研究。宏观物体通常不需要考虑表面效应、量子尺寸效应等，其特性主要为体效应。然而当采用物理、化学乃至生物方法制备出纳米粉体时，其特性不仅取决于颗粒本身，而且还与表面原子状态有关，此称为表面效应；其次，由于颗粒尺寸变小，当其尺寸与光波波长、电子波长、磁畴尺寸、超导态相干长度等特征物理尺度相当或更小时，周期性的边界条件被破坏，声、光、电、磁、热力学等特性均会呈现新的小尺寸效应。此外，尺寸的变小亦会引起电子能量状

## 4 超细粉体表面修饰

态的变化,会产生宏观物体所不具有的量子效应,从而使得纳米粉体与常规块状材料相比具有一系列优异的物理、化学及表面与界面性质,在使用时可取得超常的效果。

### 1.2.1 纳米粉体的微观特性

#### 1.2.1.1 纳米粉体的表面效应

纳米粉体颗粒尺寸小,表面积大,位于表面的原子占有相当大的比例。例如,对于某种粉体,粒径与比表面积之间的关系如下:当粒径为10 nm时,其比表面积为 $90 \text{ m}^2/\text{g}$ ;当粒径为5 nm时,其比表面积为 $180 \text{ m}^2/\text{g}$ ;当粒径为2 nm时,其比表面积为 $450 \text{ m}^2/\text{g}$ 。如此高的比表面积,使处于表面的原子数大大增加,增强了粉体的表面活性,其原因是它缺少临近配位的表面原子,极不稳定,很容易与其他原子结合。表面效应,一方面增加了纳米粉体与应用体系的结合力,大大增强了纳米粉体的使用效果;另一方面使纳米粉体之间的团聚作用大大增强,使分散问题成为纳米粉体制备和应用过程中的一大难题。

#### 1.2.1.2 纳米粉体的尺寸效应

当纳米颗粒的尺寸与光波波长、德布罗意波长以及超导态的相干长度或透射深度等物理特征尺寸相当或更小时,晶体周期性的边界条件被破坏,非晶态纳米微粒的表面层附近原子密度减小,导致声、光、电、磁、热力学等特性出现新的变化,呈现新的效应,即称为纳米粉体的尺寸效应。具体表现为:光吸收显著增强并产生吸收峰;离子共振频移;磁有序态向磁无序态转变,超导相向正常相转变,声子谱发生改变等。

#### 1.2.1.3 纳米粉体的量子尺寸效应

当颗粒的尺寸小到某一值时,金属费米能级附近的电子能级由准连续变为离散能级的现象和纳米半导体微粒存在不连续的最高被占据分子轨道和最低未被占据的分子轨道能级,能隙变宽的现象均称为量子尺寸效应。

对于纳米颗粒来说,低温下电子能级是离散的。

$$\delta = \frac{4}{3} \frac{E_f}{N} \propto V^{-1}$$

式中, $\delta$ 为能级间距; $E_f$ 为费米能级; $N$ 为总电子数; $V$ 为颗粒的体积。可见,颗粒的体积越小,电子能级间隔越大,量子效应越明显。

当纳米颗粒的能级间距大于热能、磁能、静电能、静磁能、光子能量或超导态的凝聚能时,应考虑纳米颗粒的量子效应。纳米粉体的量子尺寸

效应的宏观表现为：颗粒的比热、磁化率等性质与所含的电子奇偶数有关。

### 1.2.2 纳米粉体的宏观特性

纳米粉体的特性宏观上主要表现在以下几个方面<sup>[4]</sup>。① 光学性质，主要有光谱迁移性、光学吸收性、光学发光性和光学催化性。② 磁性质，纳米微粒的磁性特征是奇异的超顺磁性和较高的矫顽力，如纳米铁氧体的磁性研究表明，20 nm 的纯铁微粒的矫顽力是大块铁的 1000 倍，当铁的微粒小到 6 nm 时，其矫顽力反而降到零，表现出超顺磁特性。这些特性在应用领域具有十分重要的意义，如强磁性的颗粒，当颗粒尺寸达到单磁畴临界尺寸时，具有很高的矫顽力，可制成磁性信用卡、磁性钥匙、磁性车票等；超顺磁性的纳米微粒还可以制成磁性流体，广泛地应用于电声器件、阻尼器件、旋转密封、润滑、选矿等领域。③ 催化性质，催化是利用自身的特殊结构和性质促使其他物质快速进行化学变化的一个过程或者是催化剂本身的一种性质。纳米粉体具有多种催化性，如热催化、光催化等。最具有光催化性能的纳米粉体是纳米  $\text{TiO}_2$ 、纳米  $\text{ZnO}$  等。④ 增强增韧性，刚性无机粒子填充聚合物材料可以提高聚合物材料的刚性、硬度和耐磨性等性能，但普通的无机粉体填充聚合物材料在增强这些性能的同时大都会降低聚合物材料的强度和韧性。纳米无机粉体由于粒径小、比表面积大，在聚合物复合材料中，与基体间有很强的结合力，不仅能提高材料的刚性和硬度，还可以起到增韧的效果。例如，在聚氯乙烯中加入适量的纳米碳酸钙，可以使其强度和韧性都得到提高。⑤ 储氢性质，纳米晶金属氢化物和碳纳米管、纳米纤维都是新型的储氢材料。⑥ 润滑性质，纳米粉体具有耐磨损、减摩擦性质。纳米无机单质粉体、纳米无机盐粉体、纳米氧化物和氢氧化物粉体、纳米陶瓷粉体、纳米金属硫化物粉体以及纳米有机高分子微球等都可以作为抗磨减摩的润滑材料使用，而且润滑效果都很好。

在本书的以后各章节中，除特别指明不再区分微米粉体、亚微米粉体及纳米粉体，统称超细粉体。

## 1.3 超细粉体表面修饰概述

超细粉体的表面修饰是指采用一定的方法对超细粉体的表面进行处理、修饰及加工，有目的地改变超细粉体表面的物理、化学性质，以满足超细粉体加工及应用需要的一门科学技术。表面修饰，又称表面改性、表

## 6 超细粉体表面修饰

面改质、表面处理等，常常互用，本书为了统一，一律称为表面修饰，表面改性剂也一律称为表面修饰剂。超细粉体的表面修饰对超细粉体制备及应用具有十分重要的意义。

超细粉体表面修饰的作用主要体现在以下几个方面<sup>[5~7]</sup>。

(1) 在超细粉体制备中有重要作用 纳米粉体粒径小，比表面积大，表面活性高，稳定性差，一般都要在制备过程中同时进行表面修饰，以增加其稳定性，改变其表面活性，否则颗粒之间相互团聚，降低或失去其纳米效应；在超细粉体的制备过程中，研磨、过滤及分级都是很重要的单元操作，对其表面修饰可起到助磨、助滤及提高分级精度和效率的作用。可以说超细粉体表面修饰是超细粉体制备过程中的重要单元操作。

(2) 在超细粉体分散中有重要作用 超细粉体的表面修饰是提高超细粉体在介质中分散性能的一个重要方法，通过超细粉体的表面修饰，改变超细粉体的表面电性、磁性、表面张力及空间位阻等，提高其在介质中的分散性。

(3) 在超细粉体应用中有重要作用 提高超细粉体在有机基体中的分散性。用作无机、有机复合材料的颜填料是超细粉体的一个重要应用领域。对于纳米粉体，由于其内聚力很强，若不进行表面修饰，在应用过程中很难均匀分散在有机基体中发挥其纳米效应，有时甚至无法使用。表面修饰是纳米粉体应用过程中必不可少的一个重要环节。对于微米粉体和亚微米粉体，在应用时进行表面修饰也是很有必要的。大多数超细粉体的表面性质与有机聚合物的表面性质相差较远，相容性差，难以在有机材料基体中均匀分散，若直接使用，将会影响有机材料的某些性能。对超细粉体进行表面修饰，可改善超细粉体与基体的相容性和润湿性，提高它在基体中的分散性，增强与基体的界面结合力，从而提高复合材料的机械强度和综合性能，有些还可使复合材料具有特殊的性能，扩大其应用范围和应用领域。表面修饰是超细粉体获得有效应用和功能化的前提。例如经过表面修饰等深加工的非金属矿超细粉体在工业部门中已得到广泛应用，越来越多的行业开始大量使用表面修饰过的非金属矿超细粉体。目前表面修饰过的非金属矿超细粉体最大的用户是塑料工业，占总用量的70%，其次是橡胶工业占15%，其余占15%，表面修饰过的非金属矿超细粉体在塑料工业中的用量每年以15%的速度增长，比普通填料高6%。表面修饰是作为工业制品填料的非金属矿超细粉体从一般性填料转变为功能性填料的重要途径。

改善或提高超细粉体的应用性能和价值。例如，珠光颜料是用金属氧