

# 粉体工程

教育部高等学校地矿学科教学指导委员会  
矿物加工工程专业规划教材

PLANNED TEXTBOOK FOR MINERAL PROCESSING ENGINEERING

丛书主编 胡岳华

主编 韩跃新



中南大学出版社  
[www.csupress.com.cn](http://www.csupress.com.cn)

POWDER  
ENGINEERING

教育部高等学校地矿学科教学指导委员会  
矿物加工工程专业规划教材

# 粉体工程

## Powder Engineering

主 编 韩跃新  
副主编 杨华明 马少健 孙春宝



中南大学出版社  
[www.csupress.com.cn](http://www.csupress.com.cn)

# 内 容 简 介.....

本书以粉体工程基本理论为基础,从粉体颗粒的粒度、形状、粉体颗粒群的聚集特性和粉体的力学特性出发,以粉体工程的单元操作为主线,详细介绍了物理法和化学法粉体材料的制备过程,重点论述物理法中的粉碎、分级以及化学法制备粉体材料的基本原理和工艺过程;同时系统地介绍了粉体材料的输送、分散、混合、造粒、表面改性、过滤、干燥等过程的基本原理、方法、设备和应用特点。

本书可作为从事矿物加工工程、无机材料等专业的本科生或研究生的教材,也可作为相关工程技术人员的参考用书。

---

## 图书在版编目(CIP)数据

粉体工程/韩跃新主编. —长沙:中南大学出版社,2011.5

ISBN 978 - 7 - 5487 - 0266 - 5

I. 粉... II. 韩... III. 粉末法 IV. TB44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 086753 号

---

## 粉体工程

韩跃新 主编

---

责任编辑 秦瑞卿

责任印制 周 颖

出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

印 装 长沙市华中印刷厂

---

开 本 787 × 1092 1/16 印张 18.75 字数 463 千字

版 次 2011 年 12 月第 1 版 2011 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5487 - 0266 - 5

定 价 39.5 元

---

图书出现印装问题,请与经销商调换

教育部高等学校地矿学科教学指导委员会  
矿物加工工程专业规划教材

## 编 审 委 员 会

主 任 王淀佐

丛书主编 胡岳华

委 员 (按姓氏笔画排序)

马少健 王化军 王毓华 文书明 冯其明

吕宪俊 刘炯天 刘新星 孙体昌 李世厚

邱廷省 张一敏 林 海 赵跃民 胡岳华

段希祥 顾帼华 陶秀祥 龚文琪 韩跃新

童 雄 雷绍民 魏德洲

粉体工程

## 编委会

主 编 韩跃新  
副 主 编 杨华明 马少健 孙春宝  
参 编 人 员 朱一民 林 海  
刘全军 白丽梅  
主 编 单 位 东北大学  
副 主 编 单 位 中南大学  
广西大学  
北京科技大学  
参 编 单 位 昆明理工大学  
河北联合大学

# 总序

---

.....

“人口、发展与环境”是 21 世纪人类社会发 展过程中的重要问题，矿物资源是人类社会发展和国民经济建设的重要物质基础。从石器时代到青铜器、铁器时代，到煤、石油、天然气，到电能和原子能的利用，人类社会生产的每一次巨大进步，都与矿物资源利用水平的飞跃发展密切相关。

人类利用矿物资源已有数千年历史，但直到 19 世纪末至 20 世纪 20 年代，世界工业生产快速发展，使生产过程机械化和自动化成为现实，对矿物原料的需求也同步增大，造成了“矿物加工”技术从古代的手工作业向工业技术的真正转变，在处理天然矿物原料方面获得大规模工业应用。

特别是 20 世纪 90 年代以来，我国正进入快速工业化阶段，矿产资源的人均消费量及消费总量高速增长，未来发展的资源压力随之加大。我国金属矿产资源总量不少，但禀赋差、品位低、颗粒细、多金属共生复杂难处理，矿产资源和二次资源综合利用率都比较低。

矿物加工科学与技术的发展，需要解决以下问题。

(1) 复杂贫细矿物资源的综合回收：随着富矿和易选矿物资源不断开采利用而日趋减少，复杂、贫细、难处理矿产资源的开发利用成为当前的迫切需要。

(2) 废石及尾矿的加工利用：在选矿过程中，全部矿石经过碎磨，消耗了大量原材料和能源，通常只回收占总矿石质量 10%~30% 的有用矿物，大量的伴生非金属矿不仅未能有效利用，并且当作“废石”和“尾矿”堆存成为环境和灾害的隐患。

(3) 二次资源：矿山、冶炼厂、化工厂等排出的废水、废渣、废气中的稀有、稀散和贵金属，废旧汽车、电缆、机器及废旧金属制品等都是仍然可以利用的宝贵的二次资源。由于一次资源逐步减少，二次资源的再生利用技术的开发无疑成了矿物加工领域的重要课题。



(4) 海洋资源：海洋锰结核、钴结壳是赋存于深海底的巨大矿产资源，除富含锰外，铜、钴、镍等金属的储量也十分丰富，此外，海水中含有的金属在未来陆地资源贫乏、枯竭时，也将成为人类的宝贵资源。

(5) 非矿物资源：城市垃圾、废纸、废塑料、城市污泥、油污土壤、石油开采油污水、内陆湖泊中的金属盐、重金属污泥等，也都是数量可观的能源资源，需要研发新的加工利用技术加以回收利用。

面对上述问题，矿物加工科技领域及相关学科的科技工作者不断进行新的探索和研究，矿物加工工程学与相邻学科的相互交叉、渗透、融合，如物理学、化学与化学工程学、生物工程学、数学、计算机科学、采矿工程学、矿物学、材料科学与工程已大大促进了矿物加工学科的拓展，形成各种高效益、低能耗、无污染矿物资源加工新知识、新技术及新的研究领域。

矿物加工的主要学科方向有：

(1) 浮选化学：浮选电化学；浮选溶液化学；浮选表面及胶体化学。

(2) 复合物理场矿物分离加工：根据流变学、紊流力学、电磁学等研究重力场、电磁力场或复合物理场（重力+磁力+表面力）中，颗粒运动行为，确定细粒矿物的分级、分选条件等。

(3) 高效低毒药剂分子设计：根据量子化学、有机化学、表面化学研究药剂的结构与性能关系，针对特定的用途，设计新型高效矿物加工用药剂。

(4) 矿物资源的生化提取：用生物浸出、化学浸出、溶剂萃取、离子交换等处理复杂贫细矿物资源，如低品位铜矿、铀矿、金矿的提取，煤脱硫等。

(5) 直接还原与矿物原料造块：主要从事矿物原料造块与精加工方面的科学研究。

(6) 复杂贫细矿物资源综合利用：研究选-冶联合、选矿、多种选矿工艺（重、磁、浮）联合等处理一些大型复杂贫细多金属矿的工艺技术和基础理论，研究资源综合利用效益。

(7) 矿物精加工与矿物材料：通过提纯、超细粉碎、纳米材料制备、表面改性和材料复合制备等方法和技术，将矿物加工成可用的高科技材料。

现今的矿物加工工程科学技术与 20 世纪 90 年代以前相比，已有更新更广的大发展。为了适应矿业快速发展的形势，国家需要大批掌握现代相关前沿学科知识和广泛技术领域的矿物加工专业人才，因此，搞好教材建设，适度更新和拓宽教材内容对优秀专业人才的培养就显得至关重要。

矿物加工工程专业目前使用的教材，许多是在 20 世纪 90 年代前出版的教材基础上编写的，教材内容的进一步更新和提高已迫在眉睫。随着教育部专业教育规范及专业论证等有关文件的出台，编写系统的、符合矿物加工专业教育规范的全国统编教材，已成为各高校矿物加工专业教学改革的重要任务。2006 年 10 月

在中南大学召开的2006—2010年地矿学科教学指导委员会(以下简称地矿学科教指委)成立大会指出教材建设是教学指导委员会的重要任务之一。会上,矿物加工工程专业与会代表酝酿了矿物加工工程专业系列教材的编写拟题,之后,中南大学出版社主动承担该系列教材的出版工作,并积极协助地矿学科教指委于2007年6月在中南大学召开了“全国矿物加工工程专业学科发展与教材建设研讨会”,来自全国17所院校的矿物加工工程专业的领导及骨干教师代表参加了会议,拟定了矿物加工专业系列教材的选题和主编单位。此后分别在昆明和长沙又召开了两次矿物加工专业系列教材编写大纲的审定工作会议。系列教材参编高校开始了认真的编写工作,在大部分教材初稿完成的基础上,2009年10月在贵州大学召开了教材审稿会议,并最终定稿,交由中南大学出版社陆续出版。

本次矿物加工专业系列教材是在总结以往教学和教材编撰经验的基础上,以推动新世纪矿物加工工程专业教学改革和教材建设为宗旨,提出了矿物加工工程专业系列教材的编写原则和要求:①教材的体系、知识层次和结构要合理;②教材内容要体现科学性、系统性、新颖性和实用性;③重视矿物加工工程专业的基础知识,强调实践性和针对性;④体现时代特性和创新精神,反映矿物加工工程学科的新原理、新技术、新方法等。矿物加工科学技术在不断发展,矿物加工工程专业的教材需要不断完善和更新。本系列教材的出版对我国矿物加工工程专业高级人才的培养和矿物加工工程专业教育事业的发展将起到十分积极的推进作用。

形成一整套符合上述要求的教材,是一项有重要价值的艰巨的学术工程,决非一人一单位之力可以成就的,也并非一日之功即可造就的。许多科技教育发达的国家,将撰写出版了水平很高的、广泛应用的并产生了重要影响的教材,视为与高水平科学论文、高水平技术研发成果同等重要,具有同等学术价值的工作成果,并对获得此成果的人员给予的高度的评价,一些国家还把这类成果,作为评定科技人员水平和业绩和判据之一。我们认为这一做法在我国也应当接纳及给予足够的重视。

感谢所有参加矿物加工专业系列教材编写的老师,感谢中南大学出版社热情周到的出版服务。

王汉佐

2010年10月



## 前 言.....

粉体工程是指以粉体颗粒为研究对象,采用现代加工技术和传统方法进行粉碎、合成、加工、处理等一系列工程技术,涵盖的内容不仅包括粉碎、粉磨、超细、纳米化的机械加工技术,还包括采用化学方法、化学和物理方法结合的粉体制备技术,以及粉体制备设备、分散技术、材料表征、复合材料形成机理等,目的在于使材料尺寸变化并改善原料性质,以更好地应用在化工、建材、纺织、冶金、陶瓷、食品、矿业、医药、电子、航空航天、燃料、造纸等许多领域。

本书以粉体工程基本理论为基础,从粉体颗粒粒度和形状的特征、粉体颗粒群的聚集特性、粉体的力学特性等方面出发,以粉体工程的单元操作为主线,详细介绍了物理法和化学法粉体材料的制备过程,重点论述物理法中的粉碎、分级以及化学法制备粉体材料的基本原理和工艺过程;同时系统地介绍了粉体材料的输送、分散、混合、造粒、表面改性、过滤、干燥等过程的基本原理、方法、设备和应用特点。本书的核心内容是粉体制备的基本原理及方法,创新点为突出超细粉体材料,特别是纳米粉体材料的制备,实现了普通粉体材料与高新技术的结合。

本书由东北大学韩跃新教授主编,副主编有中南大学的杨华明教授、广西大学的马少健教授、北京科技大学的孙春宝教授。具体编写分工为:第1章、第7章、第11章由东北大学韩跃新、朱一民编写;第2章由河北联合大学白丽梅编写;第3章由昆明理工大学刘全军编写;第4章、第5章由广西大学马少健编写;第6章、第8章由中南大学杨华明、欧阳静编写;第9章、第10章由北京科技大学孙春宝、林海编写。韩跃新教授对全书进行了详细的审阅。在编写过程中,参考了大量的资料文献,在此向这些文献的作者们表示谢意。

编者

2011年9月

## 目 录

第1章 概论 .....	(1)
1.1 粉体、粉体工程 .....	(1)
1.2 粉体工程的主要研究内容 .....	(2)
1.3 粉体工程的应用领域 .....	(4)
1.4 粉体工程的发展趋势 .....	(4)
第2章 粉体颗粒的表征与分析 .....	(7)
2.1 粉体颗粒的粒径 .....	(7)
2.2 颗粒的形状 .....	(12)
2.3 粉体颗粒的分析 .....	(14)
第3章 粉体颗粒群的聚集特性 .....	(24)
3.1 球体紧密堆积原理 .....	(24)
3.2 粉体颗粒的堆积 .....	(27)
3.3 粉体颗粒间的附着力 .....	(35)
3.4 粉体的润湿 .....	(37)
第4章 粉体力学 .....	(46)
4.1 粉体内部应力分析 .....	(46)
4.2 粉体的摩擦特性 .....	(50)
4.3 粉体压力计算 .....	(55)
4.4 粉体的重力流动 .....	(58)
4.5 质量流料仓的设计 .....	(61)
4.6 压缩流动 .....	(66)
4.7 粉体颗粒的沉降 .....	(68)
4.8 粉体颗粒的透过流动 .....	(70)
4.9 粉体颗粒的悬浮 .....	(74)
第5章 粉碎理论与设备 .....	(77)
5.1 粉碎理论 .....	(77)
5.2 粉碎机械力化学 .....	(89)

5.3	破碎设备 .....	(94)
5.4	粉磨设备 .....	(106)
<b>第6章</b>	<b>粉体的分级与分级设备 .....</b>	<b>(127)</b>
6.1	粉体的分级 .....	(128)
6.2	分级设备 .....	(135)
<b>第7章</b>	<b>粉体的化学法制备 .....</b>	<b>(149)</b>
7.1	粉体的气相化学制备法 .....	(149)
7.2	粉体的液相化学制备法 .....	(150)
7.3	粉体的固相化学制备法 .....	(155)
<b>第8章</b>	<b>粉体的分散、混合与造粒 .....</b>	<b>(161)</b>
8.1	粉体的分散 .....	(161)
8.2	粉体的混合 .....	(183)
8.3	粉体的造粒 .....	(189)
<b>第9章</b>	<b>粉体的表面改性 .....</b>	<b>(201)</b>
9.1	表面改性 .....	(201)
9.2	表面改性方法 .....	(201)
9.3	表面改性效果的评价 .....	(204)
9.4	表面改性设备 .....	(207)
<b>第10章</b>	<b>粉体的输送 .....</b>	<b>(217)</b>
10.1	粉体的输送方法 .....	(217)
10.2	常用的输送设备 .....	(219)
<b>第11章</b>	<b>粉体的过滤与干燥 .....</b>	<b>(244)</b>
11.1	过滤 .....	(244)
11.2	干燥 .....	(266)
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>(286)</b>

# 第1章 概论

## 本章内容提要

本章介绍了粉体与粉体工程的定义、粉体工程的研究内容、应用领域以及粉体工程的发展趋势。

## 1.1 粉体、粉体工程

### 1.1.1 粉体的定义

粉体(powder)是由无数颗粒构成的。从宏观角度看,颗粒是粉体物料的最小单元。颗粒的组成、大小、分布、结构形态和表面形态等是影响粉体性能的基础。

通常构成粉体颗粒的大小范围为 $10^{-9} \sim 10^{-3} \text{m}$ 。大颗粒可用肉眼辨别,如图1-1所示的毫米级颗粒;而小颗粒要用电子显微镜才能看清,如图1-2所示的纳米级颗粒。

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,目前只有通过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,而且形状也各异,这样的粉体称为多分散粉体。

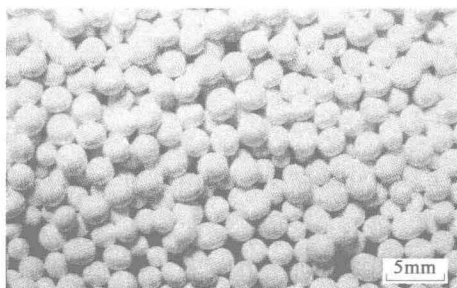


图1-1 几毫米大小的氧化锆粉体颗粒

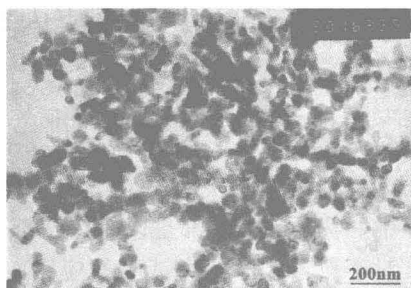


图1-2 几十纳米的氧化锌颗粒的透射电镜照片

粉体颗粒的大小,国际单位制用毫米、微米或纳米表示;但是在工业上,甚至科研单位还经常用“目”来表示粉体颗粒的大小。

在泰勒标准筛中,目(也称为网目)是指 $2.54 \text{cm}$ (1英寸)长度中的筛孔数目。例如,200

目的筛子,是指这种筛子每 2.54 cm 长度的筛网有 200 个筛孔,其筛孔尺寸为 0.074 mm。网目越少,筛孔尺寸越大。

粉体颗粒的大小和在粉体颗粒群中所占的比例,分别称为粒度和粒度分布。为了表示粉体物料粒度的组成情况,常以若干个级别,或称粒级,所占的百分数来表示。例如某种粉体物料中,1~3 mm 粒级占 10%,即这一级别范围的粉体物料最大粒度为 3 mm,最小为 1 mm。这一粒级粉体物料的含量占整个物料的 10%。细度为 -200 目占 70%,即表示小于 0.074 mm 的粒级含量占 70%。

工业上把粉体的粒度范围大致划分为五个等级:

(1)粗粒,粒径在 10 mm~200  $\mu\text{m}$ ,如各种填料、粉料等。

(2)细粉,粒径为 20~200  $\mu\text{m}$ ,如粉末冶金、精细陶瓷、导热材料等。

(3)微粉,粒径为 3~20  $\mu\text{m}$ ,如磁性材料、涂料和介电材料等。

(4)超微粉,粒径为 3~0.2  $\mu\text{m}$ ,可用于玻璃保护膜、导体或半导体等。

(5)超细粒子,粒径在 0.2  $\mu\text{m}$  以下至纳米级,达到此粒度范围是比较困难的,如喷涂材料、高密度记录材料和磁流体等。

### 1.1.2 粉体工程的定义

随着粉体科学及技术的发展,从事制备、加工处理和计量粉体的产业,都属于粉体工业领域;而对粉体及其制备、加工和处理过程等问题的研究,逐渐形成了一门新兴综合性技术学科。我们把这种粉体的制备、加工和计量方法以及设备所组成的各单元操作统称粉体工程(powder engineering)。

粉体工程作为一门独立学科是 20 世纪 40 年代以后才形成的。随着科学技术的进步,特别是新材料领域的相关技术与产业发展,研究人员把分散在各学科领域中的有关粉体方面的知识集中在一起,经过不断完善与发展,形成了完整的、独立的、交叉性的知识理论体系,它既与基础学科相关,又与工程应用存在着广泛的联系,综合性强、涉及面广。

## 1.2 粉体工程的主要研究内容

### 1.2.1 粉体工程研究对象

粉体工程以颗粒状物质为研究对象,研究其性质、制备、加工、应用及其综合性技术。自然界中的物质,很多都是以粉体状态存在的,如土壤、砂石、尘埃、粮食、糖、化妆品、药、雾等。对于科学技术研究或工程应用而言,颗粒的粒度范围小到几个微米,甚至小于微米级的超细粉,或烟雾、气溶胶和泥浆等;大至数米以上的块状物料,都是粉体工程的研究对象。

科学研究和许多工业生产过程中的重大问题都与粉体技术有关,例如矿山、能源、原材料等的合理利用与回收,新的结构材料、功能材料的生产,磨损的防止,环境粉尘治理等,都与粉体技术的发展有着极为密切的关系。因此,粉体工程在人类生活、工业生产和科学研究中起着十分重要的作用。

### 1.2.2 粉体工程的研究内容

粉体工程研究内容主要包含粉体颗粒粒度和形状的特征、粉体颗粒群的聚集特性、粉体的力学特性、粉碎、粉体的分级、粉体的分散与混合、粉体的表面改性、粉体的输送、粉体的过滤与干燥等。

粉体性能的特征(包括粉体颗粒粒度、形状、聚集状态及力学特性等)是粉体性能及应用的 关键因素。粉体颗粒的大小、形状及其分布对粉体各种现象的影响至关重要,例如粉体粘附性和流动性与粉体的形状有关;此外,粉体颗粒的尺寸、形状及分布对粉体材料的性能也有十分重要的影响。

从粉体工程的内涵来分析,粉体工程研究内容是各类粉体的体系中一些带有共性的基础问题,如粉体工程特性、粉体颗粒尺寸增大或减小、粉体颗粒间作用、粉体与介质的作用、粉体系统内热和质量的转移等问题;此外粉体工程研究内容还包括:粉体在制备与应用工程实践中各项单元操作、优化工艺组合及过程的自动化控制。

### 1.2.3 粉体工程研究的目的

#### 1. 提高工业产品的质量与控制水平

粉体颗粒的大小及粒度分布对产品质量影响是非常大的。如传统材料中的水泥,粗细颗粒的比例、颗粒的形状对产品性能有着极大的影响。医药工业中的某些药剂,可以通过细化来改变药剂的用量和吸收性。颜料颗粒的大小对被涂物体表面的遮盖力影响极大,当颗粒细到约等于可见光波长( $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ )的  $1/2$  时,颗粒对入射光的散射能力最大,这时,颜料具有较高的遮盖力;当颗粒直径小于可见光波长的  $1/2$  时,因发生光的衍射,遮盖力明显下降,颜料具有透明性(复印机所用墨粉的粒度  $6 \sim 10 \mu\text{m}$  的颗粒应占到 75% 以上,小于这一数值,复印时变黑,大于这一数值,字体复印不上去)。粉体的表面改性,如白云母经过氧化钛、氧化铬、氧化铁、氧化锆等金属氧化物进行表面改性后,用于化妆品、塑料、浅色橡胶、涂料等,可以赋予这些制品珠光效应,大大提高了这些产品的价值。

#### 2. 节能降耗,促进粉体加工技术的发展

粉体颗粒的制备,离不开粉体加工机械、化学加工过程及高温处理过程等。当把粉体加工到很微细的颗粒时,所需要的能量是相当大的。例如建材、化工、冶金等行业中主要使用的微细粉体加工设备之一是球磨机,而目前球磨机的有效能量利用率仅为 2% ~ 4%,有 96% 以上的能量在粉磨物料时被浪费掉。通过对粉碎机理的研究,可针对细粒粉磨过程中粉体的聚散情况改进或设计新型的粉磨机械,最大限度地提高粉磨效率。采用化学法加工超细粉体存在的问题是加工成本较高,因此找到成本低、效率高,且节能降耗的方法也是粉体工程研究的主要目的。

#### 3. 新材料的研究与开发

随着世界范围内新技术、高技术的突飞猛进,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、超塑等新型材料,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,往往要改变材料原有的属性,而改变属性的方法之一就是使材料颗粒粒度细化至纳米级再进行组合,以生产出一些与原材料属性完全不同的新型材料。超导材料就是在原先不导电的陶瓷材料的基础上,采取一些高新技术进行处理后,得到的一种电阻几乎为

零的新型材料。

### 1.3 粉体工程的应用领域

粉体工程属于典型的交叉学科。粉体工程涉及的领域有化工、材料、医药、生物工程、农业、食品、机械、电子、物理、化学、流体力学、空气动力学、军事以及航空航天等，如表1-1所示。

表 1-1 粉体工程涉及到的领域

领域	典型产品
矿业	金属/非金属矿产品
材料	陶瓷粉体、塑料、橡胶填料、印刷/复印、感光材料等
化工	催化剂、农药化肥、染料等
建材	涂料、水泥、精细陶瓷、日用陶瓷等
冶金	粉末冶金材料、耐火材料等
能源	煤的深加工原料、固体推进剂等
机械	磨料、固体润滑剂等
电子材料	电子浆料、集成电路基片、铁氧体、电子陶瓷敏感器件等
农业	农产品深加工原料、面粉、饲料及添加剂等
食品	调味品、保健品、速溶咖啡、奶粉等
医药	粉剂、片剂、注射剂、精细化中草药等
化妆品	珠光粉体着色粉料、功能性无机粉体等
造纸	填充剂、上光剂等
军事	炸药、固体氰化剂等

粉体工程涉及的面很广，占据产业的产值份额比较大，表现出广泛性。粉体技术在能源利用、环境保护等方面，具有实用性。随着科学技术的发展和工业的进步，超细粉体或纳米粉体已成为粉体材料的重要组成部分，纳米材料的奇异特性将促进粉体材料的功能化发展，使粉体技术进入到科学技术发展的前沿。

所以，粉体工程既存在于传统行业，又包含在生产纳米粉体等高新技术领域；既有传统的粉体制备工艺，又有高级的测试表征手段；既在建材、医药、化妆品等产业中产生作用，又在航天、军事等尖端领域中发挥优势。

### 1.4 粉体工程的发展趋势

粉体工程的发展趋势有以下特点。

#### 1. 粉体的微细化与功能化

目前粉体工程的发展趋势可以用微细化、精细化、纯粹化、复合化和功能化来概括；其中最根本的是通过粉体的微细化来控制颗粒的形态特性，获得颗粒自身的或附加的功能性



质；通过颗粒的复合化，扩展颗粒的功能化。

随着粉体工程发展进入纳米级范围，由于纳米材料与微米材料在性质上差异很大，研究与生产纳米粉体的手段及着重点也不相同。纳米材料潜在的应用价值，使得其成为物理、化学、材料、机械以及生物、医药等领域的热点研究方向。

纳米材料随着粒径的减小，表面原子数迅速增加，比表面积因而也急剧变大。粉体的比表面增大，使得表面活性键增多，产生许多活性中心，从而导致纳米微粒的化学活性大大增加。纳米粉体材料正因为存在量子尺寸效应、小尺寸效应、表面与界面效应等，产生了许多不同于常规材料的奇异特性，表现出良好的应用前景。粉体的微细化是获得粉体功能化的必然趋势和重要途径，这仅是依靠超细粉体自身所得到的功能，如比表面增大、活性增加和产生新的物理化学性质等；粉体微细化还是新材料设计、制备、开发以及增强材料功能的基础。可是随着颗粒尺寸的减小，颗粒表面能升高，使得颗粒处于不稳定状态，颗粒之间存在强烈相互吸引作用，有达到稳定态的趋势，致使粉体在制备生产、运输和贮存过程中存在聚集现象。由于粒子难以分散且易于团聚，限制或影响了超细颗粒的功能发挥；所以运用超细颗粒的表面修饰、包覆处理、颗粒复合等技术，使粉体产生新的物理、化学、机械功能及其他功能；这也是超细粉体功能化的主要方法。

## 2. 粉体的深加工与装备

随着超细粉体的微细化与功能化，要求对粉体材料进行深加工，必须发展相应的装备。超细粉体的制备方法基本上可以分为两类：一类是合成法，通过化学反应或相变，经历晶核形成和生长两个过程形成固体颗粒来制备粉体；另一类是机械粉碎法，通过机械力的作用使颗粒由大变小，进而微细化来制备粉体。随着新型超细粉碎设备的研制和开发，用机械法制备超细颗粒粉体成为可能。中国超细粉碎与精细分级技术的发展及设备的制造始于20世纪80年代初期，迄今为止，大体上经历了引进国外技术设备、消化吸收、同步开发等过程。

目前国内的机械粉碎设备主要有气流磨、高速机械冲击磨、球磨机(包括振动球磨机、转动球磨机、行星球磨机等)、介质搅拌磨等。其中气流磨、高速机械冲击磨为干式超细粉碎设备；球磨机、介质搅拌磨为常用的湿法超细粉碎设备，也可用于干式超细粉碎。

随着粉体技术的发展，生产装备大型化越来越明显，同时，CAD/CAM技术的应用促进了机械结构设计和加工制造技术的发展，为粉体粉碎与造粒等装置提供了技术保障，进一步提高了生产效率。在现有超细粉碎设备基础上，工艺配套逐步完善，不断开发出分级粒度细、精度高、处理能力大、效率高的各种精细分级设备；研制粉碎极限粒度小、粉碎比和处理能力大、单位产品能耗和磨耗小、粉碎效率高、应用范围宽的设备以及开发可用于具有低熔点、韧性强、高硬度等特殊性质的物料加工的方法是粉体工程与技术未来的发展趋势。

## 3. 过程控制自动化

粉体技术的发展依赖于过程控制，过程控制又与高效可靠的在线测量技术有关。对粉体机械粉碎过程进行实时参数测量与控制，能有效地提高产品质量、降低能耗。通过过程控制的自动化，开发粒度大小和粒度分布的自动监控技术，减少生产过程对环境的污染，简化工艺流程。

## 4. 新技术、新工艺的运用

对现有工艺和设备进行改造，用更经济和更科学的方式制造出高附加值产品，就要不断地运用新技术、新工艺，这是粉体工程发展的一个重要方向。例如开展粉体颗粒及聚集特性

的测量与定量描述研究,探讨粉体颗粒在流体中的行为,对粉体工艺过程中许多复杂现象如形成附聚物、多孔颗粒的物理化学过程作定量表征,这些研究对粉体工程科学技术的发展具有重要意义。另外,对两个或两个以上现有的工艺过程(如粉碎与干燥、粉碎与分级过程等)进行复合,产生的新工艺将有利于简化工艺流程、提高效率。根据粉体特性或功能要求,设计粉体的结构与功能,采用新的工艺技术,也会增强粉体的特性功能和拓宽应用领域。我国的粉体工业伴随着粉体技术的发展已形成规模。固体物料的加工处理涉及到许多工业领域,表现出综合性的工业技术特色,为粉体工业带来了活力,跨行业的技术扩散使得粉体市场蓬勃发展。我国粉体工业发展势头良好,同时也存在许多需要解决的问题。

总而言之,随着科学技术的发展,粉体工程也得到迅速发展。当今一些优先发展的科学技术领域,如生命科学、环境保护、信息工程和材料科学等,都与粉体工程密切相关,如纳米级药物、高效催化剂等。粉体工程的发展促进了这些领域的进步,反之,这些领域的发展又为粉体工程的不断发展指明了方向。在世界粉体工业向精细化发展的同时,工业原料深加工技术在科学研究和工业生产中的重要作用越来越充分地体现出来。美国、欧洲国家及日本先从粉碎设备入手,逐渐扩展到超细分级、高均匀度混合、表面处理、纳米粉体制备等多个方面。粉体加工设备的大型化、多样化和自动化,也是粉体工程的发展趋势之一。

### 思考题

1. 简要说明粉体及粉体工程的定义。
2. 简要说明粉体的粒度及粒度分布。
3. 简述粉体工程研究对象、研究内容及研究目的。
4. 简述粉体工程的应用领域。
5. 简述粉体工程发展趋势。