

# 粉体 工程

FENTI  
GONG  
CHENG

蒋 阳  
程继贵 主编



合肥工业大学出版社

# 粉体工程

蒋 阳 程继贵 主编

合肥工业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

粉体工程/蒋阳,程继贵主编. —合肥:合肥工业大学出版社,2005.12

ISBN 7-81093-333-7

I. 粉... II. ①蒋... ②程... III. 粉末技术 IV. TB44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 134006 号

## 粉 体 工 程

主 编 蒋 阳 程 继 贵

责任编辑 疏利民

---

出 版:合肥工业大学出版社  
地 址:合肥市屯溪路 193 号  
电 话:总编室 0551-2903038 发行部 0551-2903198  
版 次:2005 年 12 月第 1 版 2006 年 4 月第 1 次印刷  
开 本:787×960 1/16  
印 张:26 字 数 504 千字  
发 行:全国新华书店  
印 刷:安徽江淮印务有限责任公司  
照 排:合肥飞天图文艺术设计中心  
邮 编:230009  
网 址:www.hfutpress.com.cn E-mail:press@hfutpress.com.cn  
标准书号:ISBN 7-81093-333-7/TB·8  
定 价:35.00 元

---

如有影响阅读的印装质量问题,请与出版社发行部联系调换

## 本书编委会

主 编 蒋 阳 (合肥工业大学 博士 教授 博导)

程继贵 (合肥工业大学 博士 教授)

编 委 (按姓氏笔画)

刘 银 (安徽理工大学 副教授)

刘仲明 (安徽省分析测试中心 高级工程师)

吴玉程 (合肥工业大学 博士 教授 博导)

李 燕 (安徽建筑工业学院 副教授)

张云霞 (合肥工业大学 博士 副教授)

范广能 (合肥学院 副教授)

樊传刚 (安徽工业大学 博士 副教授)

# 前 言

本书是根据国家教育部 1998 年新调整的专业目录,按照教育部无机非金属材料专业教学指导委员会教材建设的规划,为适应教学改革,满足加强基础、拓宽专业面、突出特色的需要而编写的。

随着现代科学技术的发展,无机非金属材料工程领域所需要的人才已由单一的专业性向着全面、系统的掌握无机非金属材料科学与工程领域基本专业知识的综合性方向转变。为了适应这一转变,要求各有关院校调整人才培养模式,深化教学改革,加强课程建设。目前国内有许多高校开办了无机非金属材料工程专业,由于专业设置背景、办学基础和历史的不同,这些学校无机非金属材料工程专业的教学重点和特色各不相同。

粉体工程是无机非金属材料专业的一门重要的技术基础课程,它涉及机械、化学化工、冶金、材料、环境等领域的许多工程问题。编写一本适合本专业特点的教材,可以帮助学生对粉体工程基本原理和工艺有较为深入和全面的理解,并为后续课程的学习奠定良好的基础,同时也为从事粉体工程的技术人员提供参考。为此,合肥工业大学、安徽工业大学、安徽理工大学、安徽建筑工业学院、合肥学院等单位一些长期从事粉体工程教学、科研的教师和研究人员根据自己的工作积累,并结合相关院校的教学实际共同编写了本教材。本书的主要内容包括,粉末检测技术与理论,粉体制备技术,粉体工程中单元过程的基本理论和技术等三大部分共 11 章,力求反映当前先进的学科与技术水平。

本教材由合肥工业大学蒋阳教授和程继贵教授主编,并分别编写了第 1、第 2 章和第 3 章;合肥工业大学吴玉程教授撰写了绪论,张云霞副教授编写了第 4 章;安徽工业大学樊传刚副教授编写了第 5 章;安徽理工大学刘银副教授编写了第 9、第 11 章;合肥学院范广能副教授编写了第 7、第 8 章;安徽建筑工业学院李燕副教授编写了第 10 章;安徽省分析测试中心刘仲明高级工程师编写了第 6 章。全书由蒋阳教授和程继贵教授统稿。

由于编者的水平有限,书中难免有错误和疏漏之处,恳请使用本教材的读者多提宝贵意见,以便进一步修改和完善。

编者

2006 年 3 月 28 日

# 目 录

绪论 .....	( 1 )
0.1 粉体工程的定义与内涵 .....	( 1 )
0.2 粉体工程的研究对象 .....	( 2 )
0.3 粉体工程的发展趋势 .....	( 4 )
0.4 粉体工程的学习内容、目的和任务 .....	( 9 )
<b>第 1 章 粉末的性能与表征 .....</b>	<b>( 11 )</b>
1.1 粉末颗粒的粒径与形状 .....	( 11 )
1.2 粉末粒径的测量 .....	( 27 )
1.3 粉末体的性质 .....	( 47 )
<b>第 2 章 粉末颗粒的分散与表面改性 .....</b>	<b>( 58 )</b>
2.1 粉末颗粒的分散 .....	( 58 )
2.2 粉末颗粒的表面改性 .....	( 70 )
<b>第 3 章 金属粉末的制备 .....</b>	<b>( 90 )</b>
3.1 还原法制备金属粉末 .....	( 90 )
3.2 雾化法制备金属粉末 .....	( 117 )
3.3 电解法制取金属粉末 .....	( 132 )
<b>第 4 章 超微粉体的制备 .....</b>	<b>( 144 )</b>
4.1 气溶胶颗粒的制备 .....	( 144 )
4.2 气相反应合成超微粉末 .....	( 154 )
4.3 液相法制备超微粉末 .....	( 173 )
4.4 固相法制备超微粉末 .....	( 186 )
<b>第 5 章 粉碎 .....</b>	<b>( 190 )</b>
5.1 粉碎概论 .....	( 190 )
5.2 粉碎的基本理论 .....	( 193 )
5.3 粉碎技术 .....	( 203 )

5.4 助磨剂 .....	(235)
<b>第6章 分级 .....</b>	<b>(237)</b>
6.1 分级的概念与评价 .....	(237)
6.2 粉体的筛分分级技术 .....	(240)
6.3 粉体的流体分级技术 .....	(253)
6.4 超细分级原理及设备 .....	(261)
<b>第7章 非均相物系的分离 .....</b>	<b>(270)</b>
7.1 非均相物系与分离方法 .....	(270)
7.2 分离效率 .....	(271)
7.3 重力沉降分离 .....	(273)
7.4 离心沉降分离 .....	(280)
7.5 过滤 .....	(288)
<b>第8章 固体物料的干燥 .....</b>	<b>(307)</b>
8.1 干燥的概念 .....	(307)
8.2 干燥过程的基本理论 .....	(308)
8.3 干燥器 .....	(324)
<b>第9章 粉体的流体输送与贮存 .....</b>	<b>(342)</b>
9.1 颗粒—流体体系特点与输送方式 .....	(342)
9.2 颗粒流体力学 .....	(343)
9.3 颗粒的气力输送 .....	(351)
9.4 粉体的贮存 .....	(367)
<b>第10章 混合与造粒 .....</b>	<b>(380)</b>
10.1 混合 .....	(380)
10.2 造粒 .....	(387)
<b>第11章 粉尘的危害与防护 .....</b>	<b>(393)</b>
11.1 粉尘的定义 .....	(393)
11.2 粉尘的来源及分类 .....	(393)
11.3 粉尘的特性 .....	(395)
11.4 粉尘对人体健康的影响 .....	(396)
11.5 粉尘的爆炸性危害 .....	(398)
11.6 粉尘的爆炸的预防与防护 .....	(402)
<b>参考文献 .....</b>	<b>(406)</b>

# 绪 论

## 0.1 粉体工程的定义与内涵

自然界中所涉及的物质从宏观存在形式上可分为流体和固体,而固体物料多以粉体颗粒状存在或被处理、应用。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,而制备、加工和计量粉体的方法和设备所组成的各单元操作统称粉体技术,在粉体工业中运用粉体技术则称为粉体工程。因此,对粉体及其制备、加工和处理过程等的研究与实践,逐渐形成了一门新兴学科——粉体工程(Powder Engineering)或粉体技术(Powder Technology)。粉体工程是一门新兴的综合性技术学科,其主要任务是研究粉体的制备及其有效利用。

粉体工程作为一个独立学科是20世纪40年代以后才形成的,也有人称之为颗粒技术(Particulate Technology)。随着科学技术的进步,技术人员对粉体的需求上升到一个新的高度,特别是新材料的发展,使分散在各学科领域中的有关粉体方面的知识独立出来,经过不断完善与发展,从而形成完整的、独立的学科体系。

自然界中不同的物质,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。如再扩展粉体的概念,从相对意义上看,宏观世界的地球、太阳和各星系的星球,对于浩瀚的宇宙来说,则可看成是运动的颗粒。对于科学技术研究或工程应用而言,粉末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,都是粉体工程研究的对象。

从粉体工程的内涵来分析,粉体科学研究的是各类粉体体系中一些带有共性的基础问题,如粉体特性、粉末颗粒尺寸增大或减小、粉末颗粒间作用、粉体与介质的作用、粉体系统内热和质量的转移等问题。而粉体工程是粉体在制备与应用的工程实践中,各项单元操作及其优化工艺组合,以及过程的自动化控制。

粉体工程涉及到化工、材料、医药、生物工程、农业、食品、机械、电子、物理、化学和流体力学、空气动力学、军事和航空航天等多个学科领域,表现出跨



学科、跨技术的交叉性和基础理论的概括性,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,是典型的多学科交叉的新领域。表 0-1 给出了粉体工程涉及的行业与产品。

表 0-1 粉体工程涉及的行业与产品

行业	典型产品
矿业	金属/非金属矿产品,资源综合利用物
材料	陶瓷粉体,塑料、橡胶填料,颜料,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
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	农副产品深加工原料,面粉,饲料及添加剂
食品	调味品,保健食品,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,固体氧化剂等

粉体工程具有广泛性、实用性和前沿性,是一个交叉与发展的学科。由上表可以看出,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、环境保护等方面显示出效果,具有实用性。随着科学技术的发展和工业的进步,超细粉体或纳米材料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产品的行业,又包含在生产纳米粉体等高新技术领域;既有传统的粉碎制备工艺,又有高级的测试表征手段;既在建材、医药、化妆品产业等常规产业中产生作用,又在航天、军事等尖端领域中发挥优势。

## 0.2 粉体工程的研究对象

粉体工程作为一门相当重要的新兴学科,是以颗粒物质为对象,研究其性

质、制备、加工和应用的综合性技术,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,粉体技术在人类生活、工业生产和科学研究的进程中起着十分重要的作用。

粉体工程主要内容包含几个方面:粉体的性能与表征,粉体制备的方法及操作单元,粉体的输送及贮存,粉体的处理,粉体的安全防护。总体来说,粉体工程是指制备与使用粉体及其相关技术。

粉体的尺度(包括粉体颗粒的形状、粒度及尺寸分布、表面积等)是粉体性能及应用的关键因素。因为粉末颗粒的大小、形状及其分布对粉体各种现象的影响至关重要,粉体粘附性与流动性的形状相关联,粉末颗粒的尺寸、形状及分布对材料的性能也十分重要影响,如粉末冶金、复合材料、电子陶瓷和磁性材料等。因此,粉末颗粒的尺寸、形状及其分布表征、测量是粉体工程科学的一个重要组成部分。另外,粉体的其他性质,诸如粉体的吸附性、流动性、填充性,以及光、电、磁和热等性质和表征会在相应的应用层面上进一步体现。

粉体材料按材料种类来分,同样也可以分为金属粉体、无机非金属及陶瓷粉体、聚合物粉体和复合粉体,一般都可以采用气相、固相和液相等方法制备,需要相应的条件和工艺装备,获得的粉体在纯度、组成、分散性和尺度等方面具有不同的特点,也存在不同的适用范围。因此,需要了解粉体的制备方法和工艺原理、路线的科学性,粉体性能及对环境等附加影响的可应用性,从粉体性能、相应条件和经济性等方面作出客观的分析与评价,以科学合理地应用粉体材料及技术。

粉体制备的主要途径之一的粉碎法,据统计占粉体量的80%以上。为了提高粉碎的效率,降低能耗,使其工艺过程优化,对粉碎的基本理论与粉碎过程(原料的物质结构与变形、裂纹形成、断裂粉碎机理、机械化学作用与粉碎能量等)、粉碎技术(粉碎流程、机内物料与方式等)与设备(设备材质与部件等)的研究,成为粉体工程中重要的环节。

获得粉碎后的粉体,经过分级、分离过滤、干燥、输送、混合与造粒、选分与贮藏等单元操作,是粉体几何尺度与物理性能的保障。每一个单元涉及到物理、化学与机械过程,需要具体可行的操作方式与条件方能起到作用,不仅需要先进的设备,也要具有优化的实施路线与方法,使得粉体制备的单元操作简练、有效。

对于每一个单元,都存在许多值得注意和深入探讨研究的问题。在粉碎单元中,粉碎产物的颗粒形状与结构控制、粒度分布控制非常关键,将粉碎过程与表面改性结合起来,实现颗粒复合化与功能化;发展工业化规模的湿法超

细精密分级与根据物料特性的分离技术,利用高效、高速的筛分技术,如超声波技术等,获得超细粉体、功能性粉体;采用多用途复合功能改造方法,实现改造过程中产物微颗粒结构的控制,提出针对环境、生态问题的策略;提出面对不同行业的功能化造粒工艺,实现环保、废物再生利用与造粒,粉体合成、处理与造粒一体化,开发表面控制与功能修饰技术、多功能复合设备;实现粉体材料输送的环保、洁净与节能,包装标准化;新材料研发,颗粒加工过程中的复合化、功能化和规则化,达到纳米颗粒加工的实用化。

粉体工程包含着丰富的物理、化学和材料学等学科知识,又体现出很强的机械、控制等工程学科特色,在粉体技术实践与应用中,还要系统、综合地掌握材料体系、工艺路线和装备特点、应用目标,获得优化的工艺技术。

### 0.3 粉体工程的发展趋势

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,如纳米靶向药物、高效催化剂等。粉体技术的发展促进了这些领域的发展,反之,这些领域的发展又为粉体技术的不断发展指出了方向。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、节能,也是粉体工程的发展趋势之一。主要表现在以下几个方面:

#### 0.3.1 粉体的微细化与功能化

目前粉体工程的发展动向主要是微细化与功能化,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而控制颗粒的形态学特性,获得诸多颗粒自身或附加的功能性质,也促进颗粒的复合化与功能化。

工业上一般把细微粒子的集合体称为粉体,粉体的粒度范围为微米级至纳米级。细微粒子大致可分为五个等级:①硬粒或粗粒,粒径在 $200\mu\text{m}$ 左右,一般用于各种填料等。②细粉,粒径为 $20\mu\text{m} \sim 200\mu\text{m}$ ,可用于粉末冶金,精细陶瓷、导热材料等。③微粉,粒径为 $3\mu\text{m} \sim 20\mu\text{m}$ ,可用于磁性材料、涂料和介电材料等。④超微粉,粒径为 $0.2\mu\text{m} \sim 3\mu\text{m}$ ,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,可用于喷涂材料、高密度记录材料和磁流体等。不同的应用领域对粉体粒度存在不同层次的要求,如表0-2所示。

表 0-2 应用领域对粉体粒度的要求

矿物原料	应用领域	粒度 ( $\mu\text{m}$ )
高岭土	造纸、涂料	<2 (80% ~ 90%)
精制高岭土	塑料填料	0.5 ~ 3.0
煅烧高岭土	塑料填料	0.9 ~ 3.0
改性高岭土	塑料填料	0.4 ~ 0.55
硅灰石	陶瓷	<15
硅灰石	涂料	<7
石墨	显像管涂料	<1
锆英砂	精细陶瓷	0.4 ~ 1.0
滑石粉	塑料填料	2.0 ~ 5.0

随着粉体工业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,研究与生产纳米材料粉体的手段及着重点也不相同。纳米材料及其技术正是物理、化学、材料、机械以及生物、医药等领域的科技工作者颇感兴趣的热点方向,对其潜在的应用价值,科学家与企业界也不断为之奋斗。

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。例如纳米钴微粒粒径为 5nm 时,表面占 40%;粒径为 2nm 时,表面的体积百分数已增至 80%。庞大的比表面导致键态严重失配,表面出现非化学平衡、非整数配位的化学键,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,可获得火箭燃料纳米助燃剂、高性能纳米导电浆料等的应用。根据纳米粒子的量子尺寸效应成功地实现了对纳米材料光吸收带波段的调制,在此基础上设计了光过滤器和光截止器等。以粒径小于 100nm 的镍和 Cu-Zn 合金的纳米颗粒为主要成分制成的催化剂可使有机物氢化的效率达到传统镍催化剂的 10 倍;AlN 纳米粉作甲醇脱氧反应和 F-T 合成的催化剂时,其产率可提高 2~3 个数量级;在 WC 中加入 0.1%~0.5% Ni 纳米粉,其烧结温度从 3 000℃ 降到 1 800℃。开发成功的磷酸钙骨水泥 (CPC),就是采用纳米颗粒进行复合,使得 CPC 与有机体亲和性好,降低植入人体后引起的排斥反应,轻度的炎症反应很快消失,同时材料具有可降解性,能被新生骨逐步取代;纳米 TiO<sub>2</sub> 的光学效应随粒径而变,尤其是金红石型 TiO<sub>2</sub> 具有随角度而变色的效应,可以作为汽车面漆中的效应颜料;在氧化物材料中,锐钛矿型 TiO<sub>2</sub> 是一种良好的半导体,由于其禁带宽度较窄,在紫外光的照射下即可使吸附在颗粒表面的有机物降解,从而达到消除污染的作用,添加了纳米锐钛矿型 TiO<sub>2</sub> 的涂料可以作为光催化净化大气的环保涂料。

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,如表 0-3 所示。

表 0-3 纳米粉体的特性与应用

应用对象	粉体特性
颜料	高分散性
催化剂,吸收剂	高比表面积
填充剂	分裂结构
陶瓷粉体,含能材料	高表面能
涂料	光催化,抗菌
磁性液体	高比表面积

可见,通过粉体的微细化是获得粉体功能化的必然趋势和一个途径,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性等,是新材料设计与制备、开发或增强材料的功能的基础。但是,随着颗粒尺寸的减小,其表面能升高,颗粒处于非稳定状态,存在有强烈相互吸引而达到稳定的趋向,粉体在制备生产、运输和贮存过程中聚集。由于粒子难以分散且易于团聚,限制或影响超细颗粒的功能发挥,所以运用超细颗粒的表面修饰、包敷处理等技术,在粉体表面引进特殊官能性基团,使颗粒或粉体产生新的物理、化学、机械功能或其他功能;或者通过颗粒复合,则造成颗粒的复合化与功能化,这乃是超细粉体功能化的另一途径,如图 0-1 所示。

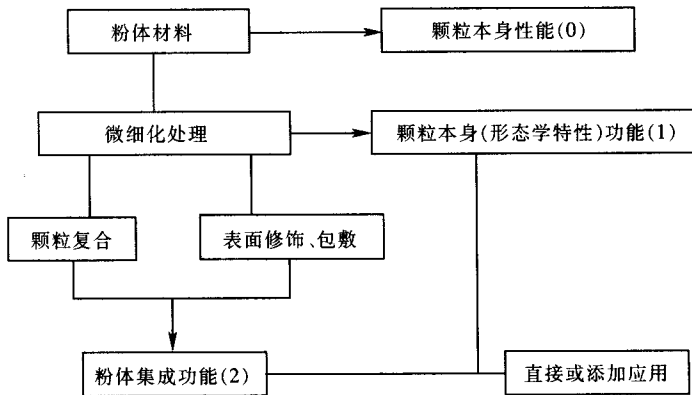


图 0-1 超细粉体功能化示意图

通过粉体颗粒的复合化,复合的颗粒粉体产生许多新的集成功能,颗粒的形态学、物性等发生变化,功能粉体的应用领域大大拓展,如表 0-4 所示。超细颗粒粉体的功能特性拓展后,有利于进一步提高粉体材料的附加值。早在 20 世

纪 70 年代,一些发达国家及大公司就着力开发功能粉体,我国粉体的功能化率相比还比较低。据统计,美国非金属矿行业 60% 以上的利润来自粉体功能化后的附加值。

表 0-4 功能粉体的应用

粉体材料	功 能	应用领域
SiC	增强填充	高温结构陶瓷
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	介电性	电子陶瓷
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	磁性	药物磁性载体
SiO <sub>2</sub>	光导性	光导纤维
ZrO <sub>2</sub>	耐磨性	耐磨材料
BeO	传导性	高导热陶瓷材料
TiO <sub>2</sub>	透光性	光学材料

### 0.3.2 粉体的深加工与装备

随着超细粉体的微细化与功能化,要求对于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,迄今为止,大体上经历了 3 个阶段:从 20 世纪 80 年代初至 80 年代中期,以引进国外技术和设备为主,期间国内的超细粉碎技术、设备制造和工艺刚刚起步;80 年代中期至 90 年代中期,引进国外技术、设备与国内仿制、开发同步进行,国内的主要超细粉碎和分级设备研发机构和制造厂商基本上是在这一阶段形成和发展的;90 年代中期以后,进入了自主开发和制造为主、引进为辅的阶段,期间建立的超细粉体加工企业多采用国产技术和设备。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、射流粉碎机等。其中,气流磨、高速机械冲击磨为干式超细粉碎设备;球磨机、介质搅拌磨和射流粉碎机,既可用于干式超细粉碎,也是常用的湿法超细粉碎设备。

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,分级粒度细、精度高、处理能力大、效率高的精细分级设备

不断被开发;发展粉碎极限粒度小、粉碎比和处理能力大、单位产品能耗和磨损小、粉碎效率高、应用范围宽或可用于具有低熔点、低韧性强、高硬度等特殊性质的物料加工的方法与设备。

### 0.3.3 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。粉体应用于工业生产,可提高工业产品的质量。

### 0.3.4 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(附聚物、多孔颗粒等)所进行的物理化学过程作定量表达等,对粉体工程科学技术的发展具有决定性的意义。另外,将两个或两个以上现有的工艺过程进行复合,产生新的经济有效工艺过程(如粉碎与干燥、粉碎与分级过程等),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,采用新的工艺技术实施,也会增强粉体的特性功能和拓宽应用领域。

### 0.3.5 我国粉体工业的特点与差距

我国的粉体工业伴随着粉体技术的发展而形成规模。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。我国粉体工业的发展势头良好,同时又存在需要解决的问题。

(1)我国具有丰富的粉体工业原料和市场,原料的精细化使国内对超细粉体产品的需求增加,橡塑与化学建材填料、涂料、染料、医药与日用化妆品等行业对粉体产品的需求增加很快。随着粉体应用产品市场增大,国内粉体技术装备市场广阔,每年需要数量相当可观的粉体生产系统。随着对外贸易总量的提升,迫切需要粉体的深加工等技术,对于提高粉体产品的附加值、扩大出口创汇具有重要意义。我国非金属矿产资源丰富,要综合利用资源、保护环境,提高社会效益,粉体工业的技术进步尤为重要。

(2)表现出的差距:粉体材料产品的种类单一,品质较低,影响市场竞争力和粉体工业的良性发展。大型设备不足,企业规模偏小。虽然我国生产设备厂商不少,各种超细粉碎设备基本上都能生产,但与欧美各国及日本等国家相比,我国大型设备明显不足。例如国外大型气流粉碎机的单机生产能力可

达 10t/h,国内最大只有 1t/h 左右。生产企业数量多,规模偏小;工艺控制技术落后。产品质量不稳定,缺乏高效控制和检测手段。磨耗和单位产品能耗偏高。这些与粉碎设备的处理能力低、粉碎能量利用率低、工艺复杂有关。

## 0.4 粉体工程的学习内容、目的和任务

粉体工程横跨众多学科与行业,但作为一门独立的学科还在不断发展与完善之中。我们要认识到这是一门集多个学科的基础知识于一体,可以借助其他学科所提出的概念、工具和技术手段、研究技巧来解决某些共性问题的学科,但其自身的特点和解决问题的框架和思路日臻清晰。我们需要在以下几个方面去不断丰富与完善其观念与内涵:

(1) 深入研究制备超细粉体的基本理论与技术,借鉴其他学科的方法,指导生产超细粉体的工艺技术和设备研制。探寻化学合成法、物理法等非机械力超细粉碎技术,以适应不同特性物料对设备性能的要求。探索超细颗粒的表面功能特性与表面改性,进行表面结构与功能的设计,进一步研究超细粉体的团聚机理,提出消除硬团聚的有效途径。

(2) 在现有粉体设备的基础上,开发与超细粉碎设备配套的精细分级设备及粉体产品输送设备等其他辅助工艺设备,提高系统综合性能;开发多功能一体化超细粉碎、精细分级、精细提纯及表面改性的设备,并进行设备的系列化生产,从而可制备出具有特殊性能的粉体,减小超细粉体由于物化性质变化对产品深加工带来的影响。要完善设备结构与生产工艺,增强自动控制能力,降低能耗、噪音和污染等不利因素。

(3) 开发研究与粉体制备技术相关的粒度在线检测与控制技术,实现超细粉体制备的工业化连续性及粉体性能、质量一致可靠性。超细粉体颗粒的粒度、比表面和表面电荷等特性测试本身就是一个复杂过程,其结果受测试仪器和测试条件的影响很大,能实现粉体生产过程中产品的粒度和级配自动控制的在线测试仪器与技术将是主要的发展问题。

教材《粉体工程》覆盖了以上内容,共计 11 章。绪论部分介绍粉体工程的概况;第 1 章——粉末的性能与表征,指出粉体颗粒的粒径与形状的表征手段与方法;第 2 章——粉末颗粒的分散与表面改性,说明粉末颗粒的分散与改性原理与方法;第 3 章——金属粉末的制备,介绍了几种制备金属粉末的方法;第 4 章——超微粉体的制备,介绍超细颗粒的制备方法与工艺流程;第 5 章——粉碎,讨论粉碎的基本概念和原理、技术;第 6 章——分级,指出分级的概念与评价、分级技术与设备;第 7 章——非均相物系的分离,介绍非均相物系与分离方法;第 8 章——固体物料的干燥,说明干燥过程的基本理论;第 9



章——粉体的流体输送与贮存,讨论颗粒-流体体系特点与输送方式;第10章——混合与造粒,介绍混合与造粒基本过程;第11章——粉尘的危害与防护,指出粉尘的危害与预防、防护。

本教材内容不仅涉及粉体的性质与表征、粉体的制备及各操作单元原理与方法、技术,还指出粉体工业中粉尘存在的危害,以及在工作中如何预防和防护。对于材料科学与工程类专业,尤其是无机非金属材料工程专业的学生,“粉体工程”是一门专业主干课程,要求学生认识到粉体颗粒作为一种形式的材料,其特殊的结构与性质是进行众多应用的基础,需要掌握其制备方法的基本原理和概念,了解单元操作的过程及方法,为设计新型粉体结构与功能、扩大粉体材料的应用领域创造条件,以及运用所学知识和实践了解生产工艺与设备存在的问题及改进的途径。学生能够在今后的工作中,结合行业特点与粉体材料生产的状况,进行技术开发与技术管理。