

21世纪高等院校教材

粉体工程导论

周仕学 张鸣林 编著



 科学出版社
www.sciencep.com

-55

21世纪高等院校教材

粉体工程导论

周仕学 张鸣林 编著

无
TB44
Z197

科学出版社
北京

内 容 简 介

本书综合近年来国内外粉体工程发展的最新理论和技术成果,结合作者在粉体制备、表征、应用等方面的研究,以粉体的“认知—加工—利用—安全”为主线,系统地阐述粉体工程的基本理论、工程技术、工艺设备。全书主要内容包括粉体的几何性质、力学性质、粉碎制备、分级与分离、储存与转运、混合与造粒、粉尘的危害与防治等。

本书可作为普通高等学校矿物加工、无机非金属材料、金属材料等专业的本科生教材或教学参考书,也可供煤炭、冶金、建材、化工、环保等领域从事粉体加工利用和粉尘控制方面工作的科研人员和工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

粉体工程导论/周仕学,张鸣林编著. —北京:科学出版社,2010.2

21世纪高等院校教材

ISBN 978-7-03-026506-7

I. ①粉… II. ①周… ②张… III. ①粉末技术-高等学校-教材
IV. ①TB44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 014472 号

责任编辑:陈雅娴 杨向萍 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年2月第一版 开本: B5(720×1000)

2010年2月第一次印刷 印张: 14 1/2

印数:1—3 000 字数: 292 000

定价: 30.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

人们对粉体的加工和利用有悠久的历史。在我国古代,北京周口店山顶洞人用赤铁矿粉饰石珠等;新石器时代,人们在烧制陶器的原料陶土中添加石英等粉体,改善成品陶器的耐热急变性能;仰韶文化时期,人们用赤铁矿、黑锰矿等粉体作颜料制作彩陶,把“料姜石”磨细为“白灰面”涂抹洞壁;商代,人们把长石、石英等粉体加入黏土,配成釉料用于制造釉陶,用朱砂和碳素制墨写成甲骨文;周代,人们以明矾作媒染剂,用茜素染出红布;秦代,人们用朱砂、蓝铜矿、雌黄等粉体作颜料,制出彩绘陶兵马俑;汉代,人们用高岭土成功烧制瓷器;唐代,人们用氧化铁、氧化铜、氧化钴等粉体作颜料釉,制成闻名于世的“唐三彩”釉陶;宋代,人们以石灰调制防染剂,用于制作蓝印花布。在国外,古埃及人在泥浆中掺入砂后砌成土砖,用于建造金字塔;古罗马人在石灰中掺入砂和磨细的火山灰,制得原始水泥“罗马砂浆”。

当代,粉体工程支撑着国民经济的各行各业。2008年,我国粉碎加工小麦 1.1 亿吨,玉米 1.7 亿吨,水泥 13.9 亿吨,煤炭 27.2 亿吨,铁矿石 8.2 亿吨,稀土矿石 8.2 亿吨,以及铝土矿石、铜矿石、金矿石等数亿吨。人们的衣、食、住、行无不与粉体密切相关,新材料、新能源、新工艺等领域的高新技术也无不渗透着粉体的贡献。但是,随之也带来了环境污染、生产及人身安全问题,如煤矿井下粉尘爆炸、粉体作业环境导致尘肺病、燃煤排放大量烟尘污染大气等。掌握粉体工程的理论和技术,对从事矿物加工、粉末冶金、无机非金属材料、环境保护等方面工作的研究者和工程技术人员是非常重要的。

对粉体的记载也由来已久。我国西汉的《神农本草经》记载了硝石粉能治 20 多种疾病,东汉的《周易参同契》提到了硫磺粉用于炼丹,明代的《本草纲目》记载了铜矿、水晶等多种粉体入药,明代的《天工开物》描述了原始粉末冶金工艺。在国外,从近代开始大量地论述粉体。1943 年美国学者达拉瓦勒(J. M. Dallavalle)出版了 *Micromeritics*,1960 年德国学者麦尔道(I. R. Meldau)编写了 *Handbuch der Staubtechnik*,1966 年美国学者奥尔(C. Orr)出版了 *Particulate Technology*。此后,国内外相继出现了多种版本的粉体工程方面的专著和教材。

本书基于作者在粉体的制备、表征、应用等方面研究的理论和技术成果,并结合国内外粉体工程的最新发展,阐述粉体工程的基本理论、工程技术、工艺设备,主要内容包括粉体的几何性质、力学性质、粉碎制备、分级与分离、储存与转运、混合与造粒、粉尘的危害与防治等。对粉体工程的各个环节,先阐述经典理论、成熟技术、重要设备、应用实例,再探讨其中存在的问题和今后的发展方向。

本书介绍了作者在粉体实验研究和工程应用方面的最新成果:①超细粉体的观测,展示了所制储氢粉体材料、氧化锆镀层、沉积碳等在电子显微镜及原子力显微镜下拍摄的形貌照片;②粉体粒度的控制,列举了山东兖州矿业集团水煤浆气化炉优化煤粒度的工程实践,描述了螺旋藻吸附纳米蒙脱石、活性炭粒度对吸附性能影响等方面的研究结果;③粉碎理论和技术,根据矿物的微观结构,提出粒子聚集理论及选择粉碎方式的原则,特别是粉磨过程中防止金属粒子焊接的方法,为提高粉碎效率、减少粉碎功耗、制取超细粉体提供了重要依据;④新型粉体材料的制备,创立了高效氢气反应球磨一步法制备镁碳复合储氢材料,在镁粉中添加微晶碳,于球磨罐内与1~2 MPa氢气进行反应球磨2~4 h,即可制得放氢动力学性能优异的储氢纳米材料。

书中的经典内容参考了陆厚根、陶珍东、谢广元、曾凡、郑水林、李凤生等编写的粉体工程方面的教材,并参阅了国内外从事粉体研究的诸多专家、学者的研究成果和文献资料,谨向他们表示衷心的感谢。

作者对粉体的研究,得到国家自然科学基金、山东省自然科学基金、教育部留学回国人员科研基金等的资助,得到吕宪俊、邱俊、王力、于洪观、崔广文、刘振学等的支持,并得益于研究生杨敏建、张同环、马怀营、吕东琴、姜瑶瑶、胡秀颖、吴峻青、卢国俭、聂西文、林乐腾、雷桂芹、谭琦、张光伟、李桂江、牛海丽、陈海鹏、康凤楠等同学辛勤的课题研究和资料整理工作,在此一并表示深切的谢意。

由于作者水平所限,书中难免有不妥和错误之处,敬请同行和读者批评指正。

作 者

2009年11月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 粉体的发展史	1
1.1.1 古代对粉体的加工利用	1
1.1.2 现代的粉体工程	4
1.1.3 粉体工程学科的形成	5
1.2 粉体的定义	5
1.2.1 粉体与颗粒的关系	5
1.2.2 粉体的存在状态	6
1.3 粉体的分类	8
1.3.1 按成因分类	8
1.3.2 按制备方法分类	8
1.3.3 按颗粒分散状态分类	8
1.3.4 按颗粒大小分类	10
第 2 章 粉体的几何性质	12
2.1 粉体的粒度	12
2.1.1 颗粒的三维尺寸	12
2.1.2 用当量直径表示	13
2.1.3 用统计平均径表示	14
2.1.4 粉体的平均粒径	15
2.2 颗粒的形状	16
2.2.1 形状系数	17
2.2.2 形状指数	17
2.3 粒度分布	18
2.3.1 正态分布	19
2.3.2 对数正态分布	20
2.3.3 罗辛-拉姆勒分布	21
2.4 粒度的测定	21
2.4.1 粒度测定方法的分类	21
2.4.2 筛分法	22

2.4.3	光学显微镜	24
2.4.4	透射电镜和扫描电镜	25
2.4.5	原子力显微镜	28
2.4.6	光散射法和消光法	29
2.4.7	库尔特计数器	31
2.4.8	气体吸附法	32
2.4.9	水力分析法	33
2.4.10	粒度测定方法的选择	34
2.5	粉体的填充结构	36
2.5.1	描述粉体填充结构的参数	36
2.5.2	均一球形颗粒的规则填充	37
2.5.3	均一球形颗粒的实际填充	39
2.5.4	二组分球形颗粒的填充	40
2.5.5	多组分球形颗粒的规则填充	41
2.5.6	影响粉体填充结构的因素	43
2.6	控制粉体粒度的实例	46
2.6.1	水煤浆中煤粒度的控制	46
2.6.2	蒙脱石和二氧化钛粒度对吸附能力的影响	48
2.6.3	活性炭粒度对吸附能力的影响	49
第3章	粉体的力学性质	51
3.1	颗粒间的附着力	51
3.1.1	范德华力	51
3.1.2	静电吸引力	52
3.1.3	水分毛细管力	52
3.1.4	磁性力	52
3.1.5	机械咬合力	52
3.2	湿粉体内的液桥力	53
3.2.1	填充层内的静态液相	53
3.2.2	液桥作用力	53
3.2.3	颗粒间的持液量	55
3.2.4	粉体空隙的抽吸势	56
3.2.5	液体在粉体层毛细管中的上升高度	58
3.3	粉体的摩擦力	59
3.3.1	内摩擦角	60
3.3.2	安息角	63

3.3.3	壁摩擦角和滑动摩擦角	63
3.3.4	动内摩擦角	64
3.3.5	空隙率对粉体摩擦角的影响	64
3.4	粉体的压力	64
3.4.1	粉体的侧压力系数	64
3.4.2	粉体内的静压力分布	65
3.4.3	粉体的动态压力	66
3.5	流体中粉体的运动阻力	68
3.5.1	流体中粉体颗粒的受力分析	68
3.5.2	粉体颗粒的阻力系数和雷诺准数	69
3.6	粉体对流体的阻力	70
3.6.1	层流透过流动阻力	70
3.6.2	湍流透过流动阻力	71
3.6.3	粉体的流化阻力	72
第4章	粉体的粉碎制备	75
4.1	粉碎理论	75
4.1.1	粉碎的概念	75
4.1.2	被粉碎物料的性质	76
4.1.3	粉碎方式及粉碎模型	82
4.1.4	低温粉碎	84
4.1.5	混合粉碎	84
4.1.6	粉碎功耗学说	85
4.1.7	粒子聚集理论与粉碎方式选择	87
4.2	粉碎机械	90
4.2.1	粉碎机械的分类	90
4.2.2	行星球磨机	90
4.2.3	搅拌磨	93
4.2.4	气流粉碎机	95
4.2.5	高速机械冲击式粉碎机	99
4.3	助磨剂	100
4.3.1	助磨剂的作用机理	100
4.3.2	助磨剂的分类及应用	101
4.4	机械力化学原理	103
4.4.1	机械力化学的概念	103
4.4.2	机械力化学的作用机理	103

4.4.3	机械力化学引起的晶体结构变化	106
4.4.4	机械力化学引起的物理化学性质变化	107
4.4.5	机械力诱导的化学反应	108
4.4.6	影响机械力化学的因素	109
4.5	机械力化学的应用	110
4.5.1	粉体的机械力化学改性	110
4.5.2	机械力化学用于冶金工业	113
4.5.3	机械力化学用于制备新材料	115
4.5.4	机械力化学用于生产水泥和混凝土	121
4.5.5	机械力化学用于制备矿物肥料	124
4.5.6	机械力化学在应用中的特点	124
第5章	粉体的分级与分离	125
5.1	粉体分离效果的评价	125
5.1.1	分离效率	125
5.1.2	分级粒径与分级精度	128
5.2	粉体的筛分	129
5.2.1	筛面	129
5.2.2	筛分作业	130
5.2.3	筛分机械	131
5.3	超细粉体的分级	133
5.3.1	超细分级原理	133
5.3.2	干式分级和湿式分级	134
5.3.3	超细分级的问题	135
5.4	固气分离	137
5.4.1	固气分离的目的	137
5.4.2	固气分离效果的评价	139
5.4.3	固气分离设备的分类	140
5.4.4	旋风除尘器	141
5.4.5	袋式除尘器	142
5.4.6	电除尘器	143
5.5	固液分离	147
5.5.1	沉降浓缩	147
5.5.2	过滤	148
5.5.3	离心分离	150
5.5.4	喷雾干燥	151

5.6	粉体的分选	152
5.6.1	重选	152
5.6.2	浮选	156
5.6.3	磁选	158
5.6.4	电选	158
5.6.5	物理分离	159
第6章	粉体的储存与转运	160
6.1	粉体的储存	160
6.1.1	粉体料仓的种类	160
6.1.2	料仓内粉体的流出	160
6.1.3	料仓内粉体的结拱及防范措施	162
6.1.4	粉体的偏析及防范方法	163
6.1.5	粉体仓容量的计算	165
6.1.6	粉体仓卸料口的设计	166
6.2	粉体的输送	170
6.2.1	胶带输送机	170
6.2.2	螺旋输送机	172
6.2.3	粉体的流体输送	173
6.3	粉体的喂料	174
6.3.1	带式喂料机	174
6.3.2	转动式喂料机	175
6.3.3	振动式喂料机	177
第7章	粉体的混合与造粒	179
7.1	粉体的混合	179
7.1.1	粉体混合的理论基础	179
7.1.2	影响粉体混合的因素	181
7.1.3	粉体混合机械	182
7.2	粉体的造粒	184
7.2.1	粉体的造粒方法	185
7.2.2	粉体的压缩流动	185
7.2.3	粉体的黏聚	188
7.2.4	粉体造粒机械	189
第8章	粉尘的危害与防治	191
8.1	粉尘的来源和危害	191
8.1.1	粉尘的种类	191

8.1.2	工业粉尘的产生	192
8.1.3	工业粉尘的危害	194
8.2	呼吸性粉尘的防治	197
8.2.1	爆破粉尘的控制	197
8.2.2	矿井下的降尘	198
8.2.3	其他降尘技术	199
8.3	粉尘爆炸的防治	201
8.3.1	粉尘爆炸的条件和过程	201
8.3.2	粉尘爆炸的特点	204
8.3.3	粉尘爆炸的特性参数	206
8.3.4	粉尘爆炸的预防途径	209
8.3.5	粉尘爆炸的防范措施	210
8.4	沙尘暴的危害及防治	213
8.4.1	沙尘暴的成因和危害	213
8.4.2	沙尘暴的防治对策	216
8.4.3	纳米蒙脱石用作治沙材料	218
参考文献		221

第 1 章 绪 论

1.1 粉体的发展史

1.1.1 古代对粉体的加工利用

人们的生产和生活自古就与粉体密切相关,对粉体的认识和应用已有上万年的历史。人们最初是用矿物粉体作粉饰颜料,见证于距今 3 万年的北京周口店山顶洞人遗址。在那里发现了以赤铁矿粉饰的赭红色小石珠、贝壳、兽牙、鱼骨等 140 多件装饰品。此后,人们将粉体用于陶瓷、建筑材料、墨、印染、医药等。

1. 粉体用于制造陶瓷

(1) 夹砂陶。新石器时代人们在制造陶器时,用陶土(一种黏土,含铁量一般在 3%以上)作原料,并掺入石英(SiO_2)、长石 $[(\text{K}_2\text{O}, \text{Na}_2\text{O}, \text{CaO}, \text{BaO}) \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2]$ 等砂质粉体,以增强陶土的成型性能,降低陶坯在火烧过程中的收缩率,改善所烧出陶器的耐热急变性能,提高成品率和陶器耐用性,这种陶器称为夹砂陶。例如,1962 年在山东省曲阜市西夏侯遗址出土的大汶口文化时期的夹砂陶“袋足陶鬲”。夹砂陶主要作炊器,也有饮器、食器。对于炊器,由于其中掺入了砂,在火中煮食时陶器不易爆裂,颇似今日的砂锅。

(2) 彩绘陶。将陶器烧成后再行彩绘的陶器称为彩绘陶。所用的绘彩颜料为矿物粉体,并添加胶质物,使颜料贴附到陶器表面。1978 年,在甘肃省天水市秦安县大地湾遗址出土的大地湾文化时期的白色彩绘陶,先用淘洗过的陶土烧制成细泥陶,再把含有较多方解石(CaCO_3)的“料姜石”烧熟后研磨成白色颜料粉,绘在陶器表面上。在陕西省西安市的秦始皇陵出土的彩绘陶兵马俑,用朱砂(HgS)、铅丹(Pb_3O_4)、赤铁矿(Fe_2O_3)、蓝铜矿 $\{\text{Cu}_3[\text{CO}_3]_2(\text{OH})_2\}$ 、孔雀石 $\{\text{Cu}_2[\text{CO}_3](\text{OH})_2\}$ 、雌黄(As_2S_3)、白铅(PbCO_3)等矿物粉体作颜料进行彩绘。其中,1975 年发掘的秦始皇陵兵马俑 1 号坑有陶俑、陶马 6000 余件,形同真人、真马,色彩以大红大绿为主,有朱红、枣红、玫瑰红、橘红、粉红、紫红、粉紫、深绿、粉绿、天蓝、深蓝、珠宝蓝、杏黄、土黄、深赭、赭黑、粉白等 10 多种颜色。

(3) 彩陶。将陶坯先彩绘再行焙烧的陶器称为彩陶。陶坯制成后在上面彩绘,一般以赤铁矿作红色颜料,以软锰矿(MnO_2)作黑色颜料。将颜料矿物砸碎,研磨成粉,加水调和成颜料浆,使用类似毛笔的工具,在陶坯表面绘制各种图案。坯体绘彩后,有的用卵石等工具反复滚压、打磨,使陶坯表面质地致密、光洁细腻,

并且颜料嵌入坯表,牢固地附着在坯体上,使之成为坯表的有机组成部分而不致脱落。然后装入窑,用氧化性火焰经 900~1100 °C 焙烧,便在橙红的底色上呈现出红、褐、黑等颜色的图案,并且颜料由于发生化学变化而与陶坯融为一体。例如,1955 年在陕西省西安市半坡遗址出土的仰韶文化时期的“人面鱼纹盆”彩陶,绘有清晰的黑色线条的人面和鱼纹图案。

(4) 釉陶。施以低温釉的陶器称为釉陶。将长石、石英、大理石、石灰等粉体掺入黏土并加水调配成釉料,涂敷于坯体表面,经一定温度焙烧而熔融,冷却后就形成一薄层玻璃态的釉。按颜色区分,有绿釉、褐釉、黄釉、黑釉等。釉提高了陶器的机械强度和热稳定性,并可防止液体渗透和气体侵蚀,釉还具有使陶器更为美观、便于洗拭、不被尘土黏染等作用。我国商代出现原始釉陶。春秋战国时期出现铅釉陶器,以铅黄(PbO)作为基本助熔剂,用 Cu 和 Fe 的化合物作为呈色剂,在氧化性气氛中焙烧,呈现出翠绿、黄褐和棕红色,釉层清澈透明,釉面光泽平滑。唐代烧制的以黄、褐、绿三色为主的绚丽多彩的彩色釉陶“唐三彩”闻名于世,先用白色黏土(经挑选、舂捣、淘洗、沉淀、晾干等处理)作坯料,经 1000~1100 °C 素烧,再用含有 Fe_2O_3 、CuO、CoO、 MnO_2 等的矿物作着色剂、用铅黄作助熔剂配成釉料,涂敷后,经 900 °C 釉烧而制成。在窑内釉烧时,各种金属氧化物熔融、扩散、任意流动,形成斑驳灿烂的多彩釉,有黄、绿、褐、蓝、紫、黑、白等颜色,造型有动物、器皿、人物。

(5) 瓷器。我国早在东汉时期就已成功烧制瓷器,是用高岭土作胎料,施釉后经 1300 °C 高温焙烧而成,此技术比欧洲领先约 1700 年。所用的高岭土因最早出产于江西景德镇东乡高岭村而得名,又称瓷土、瓷石,其主要矿物为高岭石 $\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$,含铁量一般在 3% 以下,粉体粒径小于 2 μm ,是长石类岩石经长期风化和地质作用而形成的。瓷器的釉料品种很多,其中以颜色釉为主,是在釉料中加入金属氧化物粉体颜料而成。唐代盛行蓝釉;宋代有影青、粉青、定红、紫钧、黑釉等;明代宣德年间尤以青花瓷闻名,是以氧化钴粉作呈色剂,在坯胎上进行纹饰绘制后,再施以透明釉,入窑一次烧制成高温釉下彩瓷器;清代乾隆年间,景德镇已有各种颜色釉 60 多种。

2. 粉体用作建筑材料

我国仰韶文化时期的先民把“料姜石”磨细制成“白灰面”,用来涂抹山洞、地穴的地面和壁面,使其变得光滑、坚硬。“白灰面”因呈白色粉末状而得名,是迄今所发现的我国古代最早的建筑胶凝材料。

石灰始现于公元前 7 世纪的周代,用大蛤的外壳烧制,因其具有良好的吸湿、防潮性能和胶凝性能,用于修筑陵墓等。秦汉时期用石灰石烧制石灰,加水调制成石灰浆体,用于砌筑条石和砖墙、粉刷墙面,如万里长城的许多地段在砌

筑时使用了石灰。南北朝时期出现了建筑材料三合土,顾名思义,是由三种材料配制、夯实而成的一种建筑材料,其组成为石灰、黏土、细砂,将其用作地面、屋面、房基、筑坝原料等。明代出现了以石灰、陶土、碎石组成的三合土。清代则有石灰、炉渣、砂子组成的三合土。在三合土中,石灰是不可或缺的。宋代民间出现了一种以三合土为主浇筑墓穴的方法,墓穴被一层又一层的石灰糯米浆、三合土等紧密包裹,增强墓葬的密封和防盗性能。这种方法在普通官僚士大夫阶层尤其流行,最典型的例子是1964年在江苏省苏州市发掘的“娘娘墓”。该墓是元代末割据苏州自立为“吴王”的张士诚的母亲墓,修于1365年。墓穴从里到外用石灰浆、三合土、石块等浇筑了十多层,盗墓者费了九牛二虎之力,凿到第七层,再也无力坚持下去,只好悻悻而去;考古工作者对这座墓进行发掘时,打秃了许多钢钎,还是无法打开墓穴,最后动用钻井机械,大卸八块,才发掘成功。墓内古尸肌肤呈白色,保存尚好,大量银器及一些绸缎、金钗、白玉片、红脂粉等陪葬品都保存完好。

国外将粉体用于建筑也有悠久的历史。古埃及人建造金字塔时,除了用岩石外,还用了尼罗河泥浆砌筑成的土砖,为增加砖的强度、减少其收缩,在泥浆中掺入砂。公元前146年后,古罗马人在石灰石煅烧生成的石灰中不仅掺砂,还将火山灰磨细掺入其中,制成“石灰-火山灰-砂”三组分砂浆,又称为“罗马砂浆”。这种砂浆在强度和耐水性方面比“石灰-砂”二组分砂浆有很大改善,用其砌筑的普通建筑和水中建筑都比较耐久。

3. 粉体用于制墨和印染布

在制墨方面,出土于河南省安阳市殷墟(商代晚期都城遗址)的距今3300年的15万片甲骨上,有黑色和红色的字迹4500个,经化验,黑色是碳素单质,红色是朱砂。出土于湖北省云梦县睡虎地秦墓(战国末期至秦代的墓葬群)的墨丸,为最早出土的一块墨丸,是用碳素单质(煤、烟炱)与动物胶调和而成。出土于河北省保定市望都汉墓的松塔形墨丸,黑腻如漆,烟细胶清,手感轻而致密,埋藏1800年仍不龟裂。

在布料印染方面,我国古代最初用赤铁矿粉染红色,后来用朱砂,用石黄(As_2S_3)和铅黄(PbO)染黄色,用铜矿石染青色,用白云母 $\{\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH},\text{F})_2\}$ 和白铅(PbCO_3)染白色,用炭黑染黑色。周代以明矾 $\{\text{KAl}[\text{SO}_4]_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}\}$ 作为媒染剂(对染色起媒介作用的物质),用茜草根所含的茜素染出红布。宋代著名的蓝印花布,是以石灰和黄豆等调和而成的浆体作为防染剂(印花色浆中起防止染色作用的物质)。

4. 粉体入药

在元代“御药院方”中,将珍珠碾为极细的粉体入药;在西汉《神农本草经》(我国现存最早的中药学专著)中,硝石粉(KNO_3)被列为上品中的第六位,认为它能治 20 多种病;明代李时珍的《本草纲目》中记载了水晶粉($\alpha\text{-SiO}_2$)、铜矿粉、鳗鲡骨粉、牡蛎壳粉、蟹壳粉等入药。

西汉时期的方士开始炼制矿物药“仙丹”。东汉末年,魏伯阳的《周易参同契》(世界上最古老的炼丹著作)专讲炼丹,提到硫磺等矿物粉体的使用。在炼丹的基础上,炼丹家把硫磺、硝石、木炭三种粉体按一定比例混合(三者的物质的量之比为 1 : 2 : 3,质量比约为 10 : 75 : 15),发明了火药,时间在唐宪宗元和三年(公元 808 年)之前。由于炼丹家喜欢保守秘密,现尚无法知道火药发明的具体年代。

5. 古代制备粉体的工具

大地湾遗址出土大量彩陶的同时,出土了沾有颜料的石斧,由此推测先民们用石斧粉碎颜料矿物;还出土了上百件研磨石、研磨盘,可能是用于研磨彩陶颜料的成套工具。研磨石有圆形、圆锥形、椭圆柱形,均有一个光滑的研磨面;研磨盘形状多样,但都有一个凹陷的磨坑。

古代逐步发展起来用于粉碎固体的石斧、石杵、石臼、石磨、石碾等石器,原材料易得、材质污染小、制造简单、使用方便,而得以广泛应用,以至于像石臼、石磨、石碾等沿用至今,但石器不能用于粉碎硬度大的物料。古代铜器和铁器的出现,有助于粉碎硬度较大的物料,但生产效率仍较低,粉体粒度的可控性还较差。

1.1.2 现代的粉体工程

如今人们的衣、食、住、行,国民经济的各个行业,无不与粉体密切相关,新材料、新能源、新工艺等领域的高新技术无不渗透着粉体的贡献。涉及粉体工程的主要工业领域可归纳为如下几个方面:

(1) 冶金工业。各种金属矿石的磨矿、选矿、团矿、烧结,粉末冶金、硬质合金、金属陶瓷、金属淬火、合金调制,铸造型砂、金属塑性加工、金属腐蚀、金属表面处理,高炉炼铁用焦的原料煤粒度和煤种配比,铁合金生产用焦的粒度控制等。

(2) 无机非金属材料工业。水泥、玻璃、石灰、陶瓷、耐火材料、保温材料、碳素材料等工业原料的粉碎、热处理,感压材料、感热材料、荧光粉体、照相感光材料、录音录像磁性材料的制备等。

(3) 煤炭工业。煤粉碎、选煤、配煤、水煤浆制备、粉煤气流输送、流化床煤燃烧、烟气集尘、粉煤灰利用、煤泥水处理、煤尘爆炸防治等。

(4) 石油及化工行业。钻井泥浆配制、固体催化剂制备、催化剂床层流化、塑

料球晶化、化肥造粒、农药造粒、洗衣粉造粒、悬浮剂分散,橡胶填料、塑料配合剂、钛白粉、颜料、纳米涂料、化妆粉、固体炸药、照相乳剂的生产等。

(5) 食品及制药行业。面粉超细分级、果实超细粉碎、调料微细化,医药造粒、中药微细化、药物缓释剂等。

现在用来生产粉体的粉碎机大小、式样各异,实现了粉碎工艺参数的自动控制,可以准确地控制粉体粒度,而且能制备粒度非常小的粉体,粉碎效率高,生产能力强。

1.1.3 粉体工程学科的形成

明代宋应星的著作《天工开物》(公元1637年)对一些原始的粉末冶金工艺进行了描述和总结。到了近代,随着粉体相关工业的不断发展,各行各业认识到粉体的共性,将粉体作为物质的一种存在形式,从而粉体科学技术发展成为一门综合而又相对独立的学科,称为“颗粒学”或“粉体工程学”。1943年,美国学者达拉瓦勒出版了世界上第一部关于粉体的专著 *Micromeritics*;1960年,德国麦尔道编写了 *Handbuch der Staubtechnik*;1966年,美国的奥尔出版了 *Particulate Technology*,此后国内外相继出现了多种版本的粉体工程学方面的专著和教材。

粉体工程学以粉体为研究对象,研究其性质及加工利用技术,基本内容包括:①粉体的几何性质,包括粉体粒度、颗粒形状、粒度分布、粒度测定方法、粉体填充结构;②粉体的力学性质,包括颗粒间作用力、湿粉体内液桥力、粉体摩擦力、流动阻力;③粉体加工利用的理论、方法、技术、设备,包括粉碎、机械力化学、分级、分离、储存、输送、喂料、混合、造粒等工艺及过程参数的控制;此外还涉及呼吸性粉尘、粉尘爆炸、沙尘暴的防治。

近年来,粉体技术成为实施可持续发展战略的主导技术得以迅速发展,新理论、新方法、新技术层出不穷,并与理、工、农、医等多个学科领域及若干现代工程技术不断交融,覆盖范围更广泛,科学内涵更丰富,应用技术更现实。从而使粉体工程学发展成为一门极为重要的新兴综合性学科,引领科技发展趋势,为矿业发展、能源供应、环境保护等提供技术支撑,受到国内外科技界的高度重视。

1.2 粉体的定义

1.2.1 粉体与颗粒的关系

颗粒(*particle*)是小尺寸物质的通称,其几何尺寸相对于所观测的空间尺度而言比较小,从厘米级到纳米级大小不等,又称为粒子(狭义的粒子是指微小的颗粒)。粉体(*powder*)是大量颗粒的集合体,即颗粒群,又称为粉末(狭义的粉末是

指粒度较小的部分)。颗粒是粉体的组成单元,是粉体中的个体,是研究粉体的出发点。颗粒又总是以粉体这种集合体的形式出现,集合体产生了个体所不具有的性质。粉体由诸多颗粒组成,是大量颗粒的宏观表现,其性质取决于各颗粒,并受颗粒堆积情况、颗粒之间介质、外界作用力等的影响。

“颗粒”和“粉体”这两个术语,都是从几何尺寸上对物质所下的定义,其本身不涉及化学组成、物质结构、物理性质、化学性质、工艺性能和用途等。根据不同的研究目的、研究角度和研究方法对同一领域事物进行认知时,因考虑问题的出发点、角度和目的不同,对研究对象及学科的命名也不同。侧重于研究个体颗粒时,将学科称为“颗粒学”;侧重于研究集合体粉体及其工程问题时,则将学科称为“粉体工程学”。命名的差异有助于从不同的角度加深对同一对象的认识,殊途同归,在信息传播和交流中应注意这一差异。

1.2.2 粉体的存在状态

粉体颗粒除了以固态存在以外,气体中的液滴、液体中的气泡也都属于颗粒的范畴,所以,颗粒有固、液、气三种相态,但通常是指以固态存在的,即粉体颗粒是小尺寸的固体。同样是固态粉体颗粒,不同运动状态时也显现出不同的性质,静止时是固体,悬浮在气体中时具有气体的某些性质,流动时又酷似流体。

粉体颗粒有的以分散状态存在,有的以聚集状态存在。固态物质可以看作分散或聚集的粉体。大部分固态物质是分散的粉体,如矿砂、精矿粉、煤粉、泥沙、水泥、涂料、颜料、土壤、谷物、面粉、种子、食盐、砂糖、药丸、煤灰、尘埃等。大块固体是粉体颗粒的聚集体,即大块固体在微观结构上也是由粉体颗粒构成的。例如,大块矿石由一个个矿物颗粒聚集而成,如图 1-1 所示。又如,材料表面的金属氧化物镀层由一个个金属氧化物颗粒组成,材料表面沉积的碳层由一个个碳颗粒组成,如图 1-2 所示的氧化锆镀层和乙炔热解沉积碳层。

以分散状态存在的粉体与以聚集体存在的大块固体具有不同甚至是迥异的性质。粉体是固体材料的一种存在状态,可将其称为“粉体材料”。粉体颗粒越小,其化学势越高,溶解度越大,熔点越低。超细粉体的光、电、磁、热等性质会发生奇异的变化。例如,当颜料粒径小到可见光波长(0.4~0.7 μm)的 $2/3\sim 1/2$ 时,颗粒对人射光的散射能力最大,颜料具有较高的遮盖力,而当粒径进一步减小,小到可见光波长的 $1/2$ 以下时,因发生光的衍射,颜料遮盖力显著下降,对光具有透明性。因此,把粉体作为物质的一种特定存在状态,对其进行深入研究,充分认识和利用其特性,对于矿物材料及粉体技术的创新具有重要意义。