

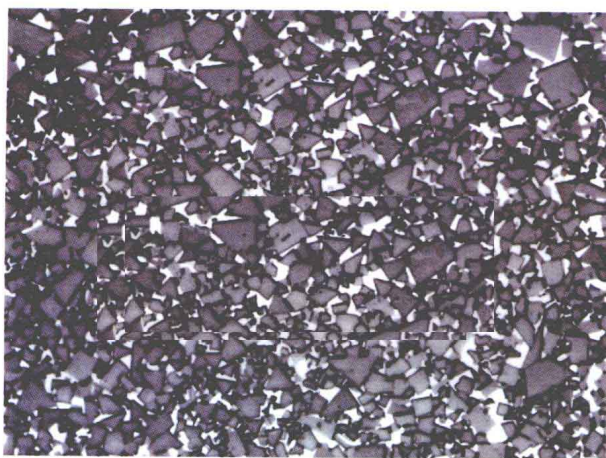


普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12·5" GUIHUA JIAOCAI

粉末冶金工艺及材料

陈文革 王发展 编著
丁秉钧 审核



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

内 容 提 要

本书从粉体性能、粉末制备、粉末成形、钢压模具设计、烧结、粉末冶金车间设计和各种粉末冶金材料七个方面详尽地介绍了从粉体到粉末冶金产品的粉末冶金工艺全过程。本书内容涵盖面广,在内容上既注重对成熟理论及生产技术的介绍,也注重对本领域新技术发展动向的介绍。为了提高作为教学用书的使用效果,本书在每章的后面设置了分析思考题,最后还提供了相应试卷。

本书既可作为大学本科金属材料、冶金、物理及应用科学等专业的教学用书,亦可供相关专业研究人员及高校教师阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

粉末冶金工艺及材料/陈文革,王发展编著. —北京:冶金工业出版社,2011.7

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5024-5462-3

I. ①粉… II. ①陈… ②王… III. ①粉末冶金—高等学校—教材 IV. ①TF12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 144631 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010) 64027926 电子信箱 yjcbbs@cnmip.com.cn

责任编辑 郭冬艳 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-5462-3

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2011 年 7 月第 1 版, 2011 年 7 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 16.75 印张; 322 千字; 253 页

33.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010) 64044283 传真:(010) 64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010) 65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

粉末冶金是材料科学与工程专业的研究方向之一，在粉末冶金应用日益广泛的今天，对于本课的学习，不仅为毕业生提供更多的就业渠道，也为日后提供了选择一个新材料制备的发展方向打下了良好基础。当前的教材由于专业性质过于浓厚，内容比较单一，很难适用于“重宽度轻深度”的办学理念，非常需要有一本概括性强、内容系统完整的教材来满足在有限时间内对粉末冶金这一科目体系的阐述的相关教材或书籍。

本书系统、全面地阐述了粉体材料的制备、检测、成形、烧结直至最终的处理模具设计、车间与设备、工艺步骤以及可能出现问题的原因及解决办法等，并就粉末冶金涉及的众多材料进行了系统阐述。

本书是根据编者在粉末冶金十多年教学经验且充分了解该行业对学生要求的基础上编写而成的。如通过对模具设计一章的教学，能让学生既单独从事该工作，也为未来的粉末冶金从业者掌握必要的内容打下基础。又如学习粉末冶金材料一章，使学生能够了解粉末冶金能制备什么样的材料、做什么用，也能够知道这些材料怎么制备等。

本书由西安理工大学的陈文革教授编写第1至第6章，西安建筑科技大学的王发展教授编写第7章，并对全书进行了校核，全书由西安交通大学的丁秉钧教授审核，并提出修改意见。在编写过程中还得到了谷臣清教授、赵敬忠教授、王俊勃教授以及研究生陶文俊、何超、邵菲、温亚辉、雷哲锋等的帮助，在此表示感谢。

本书是大学材料类或冶金类粉末冶金专业的教学用书，也可以供相关专业研究人员、工程技术人员参考。

由于编者水平有限，在编著过程中难免存在很多纰漏和不足，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

绪论	1
习题与思考题	3
1 粉体的性能及其检测	4
1.1 粉末体与粉末性能	4
1.1.1 粉末体（或粉末）的概念	4
1.1.2 粉末的性能	5
1.2 粉末的化学成分	5
1.3 粉末的物理性能	7
1.3.1 颗粒的形状与结构	7
1.3.2 颗粒密度	7
1.3.3 显微硬度	8
1.3.4 粉末粒度和粒度组成	8
1.3.5 颗粒的比表面积	14
1.4 粉末的工艺性能	16
1.4.1 松装密度和振实密度	17
1.4.2 流动性	17
1.4.3 压制性	18
1.5 粉末的应用	19
1.5.1 食品添加剂	19
1.5.2 颜料、油墨和复印用粉末	19
1.5.3 燃料、烟火和炸药用粉末	20
1.5.4 磁性探伤用粉末	20
1.5.5 焊药、表面涂层用粉末	21
1.5.6 其他方面用粉末	21
习题与思考题	22
2 粉末的制备	24
2.1 粉末制取方法概述	24

2.2 还原法	26
2.2.1 还原过程的基本原理	26
2.2.2 固体碳还原法生产铁粉	29
2.2.3 氢气还原法生产钨粉	33
2.3 电解法	35
2.3.1 水溶液电解的基本原理	35
2.3.2 电解法生产铜粉	39
2.3.3 电解铜粉的防氧化处理——钝化处理	41
2.4 雾化法	42
2.4.1 雾化法的分类	42
2.4.2 雾化法的基本原理	42
2.4.3 喷嘴结构	44
2.4.4 影响雾化粉末性能的因素	46
2.5 机械粉碎法	49
2.5.1 机械粉碎法研磨规律	50
2.5.2 影响球磨的尺寸因素	50
2.5.3 强化球磨	52
2.6 纳米粉体的制备技术	53
2.6.1 化学制备法	53
2.6.2 化学物理合成法	58
2.6.3 物理方法	62
习题与思考题	68
3 粉末成形	70
3.1 概述	70
3.2 压制成形原理	70
3.2.1 粉末的压制过程	70
3.2.2 压制压力与压坯密度的关系	73
3.2.3 压坯强度	75
3.2.4 压制过程中压坯的受力分析	76
3.2.5 压坯密度及其分布	78
3.2.6 成形剂	80
3.3 成形工艺	80
3.3.1 压制前的准备	80
3.3.2 压制工艺	82

3.3.3 压制参数	84
3.4 成形废品分析	84
3.4.1 物理性能方面	84
3.4.2 几何精度方面	85
3.5 影响成形的因素	89
3.5.1 粉末性能对压制过程的影响	89
3.5.2 润滑剂和成形剂对压制过程的影响	90
3.5.3 压制方式对压制过程的影响	91
3.6 成形方式简介	91
3.6.1 压力机法	91
3.6.2 离心成形法	91
3.6.3 挤压成形	91
3.6.4 等静压成形	92
3.6.5 三向压制成形	92
3.6.6 热压法	93
3.6.7 粉末轧制法	93
3.6.8 粉浆浇注法	93
3.6.9 粉末热锻技术	94
3.6.10 高能成形法(爆炸成形法)	95
3.6.11 注射成形	95
3.6.12 粉末流延成形	96
3.6.13 楔形(循环)压制	96
习题与思考题	97
4 钢压模具设计	99
4.1 概述	99
4.1.1 模具及其在工业生产中的作用	99
4.1.2 压模的基本结构	99
4.1.3 粉末冶金模具的分类	101
4.1.4 粉末冶金模具设计的指导思想和原则	101
4.1.5 粉末冶金模具设计的内容及步骤	102
4.2 等高制品成形模设计	103
4.3 不等高制品成形模设计	104
4.4 模具零件的尺寸计算	105
4.4.1 压模尺寸的基本要求和参数选择	105

4.4.2 压模零件的尺寸计算	106
4.4.3 几种情况	107
4.5 成形模材料的选择与制备	108
4.5.1 模具材料选用的基本原则	108
4.5.2 模具主要零件的加工	109
4.6 成形模设计应用举例	109
4.6.1 结构设计	110
4.6.2 各压模零件尺寸的计算	110
4.7 钢模压形设备	112
4.7.1 压机概况	112
4.7.2 液压机的基本结构	112
4.7.3 液压机的工作原理	113
4.8 模架简介	113
习题与思考题	115
5 烧结	116
5.1 概述	116
5.1.1 烧结的定义	116
5.1.2 烧结的分类	116
5.1.3 烧结理论的发展过程	117
5.2 烧结过程的基本原理	118
5.2.1 烧结的基本过程	118
5.2.2 烧结的原动力或热力学	119
5.2.3 烧结机构	122
5.3 固相烧结	130
5.3.1 单元系固相烧结	130
5.3.2 多元系固相烧结	131
5.3.3 固相烧结的原理	131
5.4 液相烧结	132
5.4.1 液相烧结满足的条件	133
5.4.2 液相烧结基本过程及机构	134
5.4.3 熔浸	135
5.4.4 熔渗方法	136
5.4.5 熔渗系统	137
5.5 烧结工艺	138

5.5.1 烧结前的准备	138
5.5.2 烧结工艺及其对性能的影响	139
5.5.3 粉末冶金制品的烧结后处理	141
5.6 烧结设备	145
5.6.1 炉膛部分	146
5.6.2 水套冷却部分	146
5.6.3 炉体部分	146
5.6.4 电加热元件	147
5.7 烧结气氛	149
5.7.1 烧结气氛的作用与分类	149
5.7.2 还原性气氛	149
5.7.3 吸热型气氛与放热型气氛	153
5.7.4 真空烧结	154
5.7.5 发生炉煤气	155
5.8 烧结废品分析	157
5.8.1 烧结废品简介	157
5.8.2 主要废品分析	159
5.8.3 废品的处理	160
5.9 特种烧结	160
5.9.1 松装烧结	161
5.9.2 放电等离子体烧结	161
5.9.3 微波烧结	162
5.9.4 爆炸烧结	162
5.9.5 电火花烧结	163
5.9.6 各种烧结方法的对比	164
5.10 烧结体的性能及其检测	165
5.10.1 物理性能及其检测	165
5.10.2 力学性能及其检测	166
5.10.3 金相组织及其检测	168
5.10.4 孔隙度对烧结体性能的影响	169
习题与思考题	172
6 粉末冶金车间设计	174
6.1 概述	174
6.1.1 设计类型及程序	174

6.1.2 初步设计阶段	174
6.1.3 技术设计阶段	175
6.1.4 施工图设计阶段	176
6.2 粉末冶金车间设计	176
6.2.1 设计资料的收集与整理	176
6.2.2 车间生产纲领	177
6.2.3 工艺分析	178
6.2.4 车间的工作制度	179
6.2.5 车间的工作时间总数	179
6.2.6 车间设备的选择和确定	181
6.2.7 车间的组织与人员	183
6.2.8 车间厂房建筑	185
6.2.9 车间厂房位置与朝向	186
6.2.10 车间的面积及划分	186
6.2.11 车间的平面布置	187
6.2.12 车间的采暖、通风、采光	188
习题与思考题	189
7 粉末冶金材料	190
7.1 概述	190
7.2 结构材料	190
7.2.1 烧结铁基材料	191
7.2.2 烧结铜基材料	193
7.2.3 烧结铝基材料	195
7.3 摩擦材料	195
7.3.1 概述	195
7.3.2 制备	196
7.4 电工材料	197
7.4.1 概述	197
7.4.2 触头材料	197
7.4.3 金属-石墨电刷材料	208
7.4.4 阴极材料	210
7.5 磁性材料	218
7.5.1 磁性材料概述	218
7.5.2 粉末冶金磁性材料的优点、分类及应用	219

7.5.3 磁性材料的制备	220
7.6 多孔材料	223
7.6.1 多孔材料概述	223
7.6.2 多孔含油轴承的制备	227
7.7 工具材料	234
7.7.1 硬质合金	234
7.7.2 粉末冶金高速钢	236
7.7.3 聚晶金刚石	237
7.8 武器材料	239
7.9 其他材料	240
7.9.1 航空航天工业用粉末冶金材料	240
7.9.2 核工业用粉末冶金材料	240
7.9.3 医学用粉末冶金材料	241
习题与思考题	243
附录	244
参考文献	252

绪 论

1. 粉末冶金概念

粉末冶金是一门研究制造各种金属粉末并以该粉末为原料，通过压制成形、烧结和必要的后续处理来制取金属材料和制品的科学技术。

2. 粉末冶金的历史

粉末冶金技术可追溯到远古。早在纪元前，人们就在原始的炉子里用碳还原铁矿，得到海绵铁块，再进行捶打，制成各种器件。19 世纪初叶，用粉末冶金法制得海绵铂粉，经冷压，再在铂熔点温度的三分之二左右进行加热处理，然后进一步锻打成各种铂制品，后来，随着冶金炉技术的发展，经典的粉末冶金工艺逐渐被熔铸法取代。直到 1909 年库力奇的电灯钨丝问世后，粉末冶金技术才得到迅速发展。

现代粉末技术的发展有三个重要标志。

第一个标志是 20 世纪初，由于电气技术的迅速发展，迫切地寻找各种新的电光源材料。1880 年爱迪生发明电灯采用的碳四光源有严重缺陷，直至用粉末冶金工艺才解决了钨丝的制造技术，使电灯真正给人类带来了光明，从而使粉末冶金的传统工艺重新获得了新生。随后，许多难熔金属材料如钨、钼、钽、铌的生产，粉末冶金工艺成为唯一的方法。20 世纪 20 年代，又用这一工艺技术成功地制造了硬质合金，而硬质合金刀具比工具钢制作的切削刀具，无论其切削速度，还是刀具寿命，都提高了几倍至几十倍，并使一些难加工的材料有可能进行加工。因此，现代粉末冶金工艺正是由于难熔金属和硬质金属的生产，奠定了它在材料领域中的地位。

第二个标志是 21 世纪 30 年代，采用粉末冶金工艺制造多孔含油轴承获得成功，接着采用廉价的铁粉制成铁基含油轴承，并迅速在汽车工业、纺织工业等方面得到广泛应用。而且随着生产方法的改进，铁粉质量和产量大幅度提高，使得铁基制品又进一步向高密度、高强度和形状复杂的结构零件方向发展，充分发挥了粉末冶金具有的高效益的无切削、少切削的特点。

第三个标志是粉末冶金新工艺，新材料在近二三十年来不断向高水平新领域方面拓展，热等静压、粉末锻压等新工艺出现，金属陶瓷、弥散强化材料、粉末高速钢等

新型材料相继问世。所有这些，都更加展示出粉末冶金广阔美好前景。

3. 粉末冶金工艺的基本工序

粉末冶金工艺的基本工序可以被概括为以下三步：第一步为原料粉末的制取和准备，粉末可以是纯金属或合金、非金属、金属与非金属的化合物以及其他各种化合物。第二步是将第一步制得的粉末根据实际条件的需要，使用特定的成形方法制成所需形状的坯块。成形方式有简单的压制、等静压制、轧制、挤压、爆炸成形等。最后一步是坯块的烧结。烧结在物料主组元熔点以下的温度进行，以使材料和制品具有最终的物理、化学和力学性能。以上即为粉末冶金的基本工艺工序。

4. 粉末冶金工艺的特点

针对粉末冶金工艺，可以将其特点归结如下：

首先，粉末冶金具有针对性，即绝大多数难溶金属及其化合物、假合金、多孔材料只能用粉末冶金方法来制造。其次，材料的利用率高、生产效率高。因为压坯往往压制成零件的最终尺寸，而不需要或很少需要随后的机械加工。通常用粉末冶金的方法生产制品时，金属的损耗只有1%~5%，而用一般熔铸方法时，损耗可能达到80%。第三，有可能制取高纯度的材料。因为粉末冶金工艺与熔铸法不同，在材料生产过程中，不会带给材料任何污垢。同时，粉末冶金工艺本身较简单，易操作。

当然粉末冶金工艺也拥有一些自身的局限性：例如，粉末冶金制品的大小和形状受到一定限制，烧结零件的韧性较差。因为粉末成形时的模具加工比较困难，而且也受到压制力的限制。某些产品小批量生产时，成本较高，因为粉末成本高，但为了得到某些独特性能的产品而采用小批量生产也是合算的。

5. 粉末冶金材料和制品的分类

粉末冶金材料和制品可按其不同用途分为机械零件和结构材料，多孔材料，电工材料，工具材料，粉末磁性材料，耐热材料，原子能工程材料。

(1) 机械零件和结构材料：

- 1) 减摩材料：多孔含油轴承、金属塑料等。
- 2) 摩擦材料：以铁铜为基。用作制动器或离合器元件。
- 3) 机械零件：代替熔铸和机械加工的各种承力零件。

(2) 多孔材料：

- 1) 过滤器：由青铜、镍、不锈钢、钛及合金等粉末制成。
- 2) 热交换材料：也称发散或发汗材料。
- 3) 泡沫金属：用于吸音、减震、密封和隔音。

(3) 电工材料:

- 1) 电触头材料: 难熔金属与铜、银、石墨等制成的假合金。
- 2) 电热材料: 金属和难熔金属化合物电热材料。
- 3) 集电材料: 烧结的金属石墨电刷。

(4) 工具材料:

- 1) 硬质合金: 以难熔金属碳化物为基加钴、镍等金属烧结。
- 2) 超硬材料: 立方氮化硼和金刚石工具材料。
- 3) 陶瓷工具材料: 以氧化锆、氧化铝和黏结相构成的工具材料。
- 4) 粉末高速钢: 以预合金化高速钢粉末为原料。

(5) 粉末磁性材料:

- 1) 烧结软磁体: 纯铁、铁合金、坡莫合金。
- 2) 烧结硬磁体: 烧结磁钢、稀土-钴烧结磁体。
- 3) 铁氧体材料: 包括铁氧体硬磁、软磁、矩磁及旋磁。
- 4) 高温磁性材料: 有沉淀硬化型、弥散纤维强化型。

(6) 耐热材料:

- 1) 难熔金属及其合金: 钨、钼、钽、铌、锆及其合金。
- 2) 粉末高温(或超)合金: 以镍铁钴为基添加 W、Mo、Ti、Cr、V。
- 3) 弥散强化材料: 以氧化物、碳化物、硼化物、氮化物弥散。
- 4) 难熔化合物基金属陶瓷: 以氧化物、碳化物、硼化物、硅化物为基。
- 5) 纤维强化材料: 金属或化合物纤维增强复合材料。

(7) 原子能工程材料:

- 1) 核燃料元件: 铀、钍、钚的复合材料。
- 2) 其他原子能工程材料: 反应堆、反射、控制、屏蔽材料等。

6. 我国的粉末冶金现状

我国的粉末冶金技术从无到有,至今只有六十来年的历史,但发展很快。有些方面居世界领先地位,如硬质合金的生产和应用。而大部分领域才刚刚起步,比如,稀土-钴磁性材料、部分原子能工程材料、真空电接触材料、一些机械零件和工具材料等。

习题与思考题

1. 粉末冶金的定义是什么?
2. 粉末冶金的工程含义是什么?
3. 粉末冶金一度称为金属陶瓷(metal ceramics),是什么工序类似于陶瓷产品制备?粉末冶金与陶瓷的主要差别是什么?这些差别是如何影响过程的?

1 粉体的性能及其检测

1.1 粉末体与粉末性能

1.1.1 粉末体（或粉末）的概念

粉末冶金的原材料是粉末。粉末、粉末制品及材料同属固态物质，而且化学成分和基本的物理性质（熔点、密度和显微硬度）基本保持不变。但是，就其分散性和内部颗粒的联结性质而言，却是不一样的。通常把固态物质按分散程度不同分为致密体、粉末体和胶体三类，1mm 以上的称为致密体，0.1 μm 以下的称为胶体颗粒，介于两者之间的称粉末体。

1.1.1.1 什么是粉末体

粉末体简称粉末，是由大量的颗粒及颗粒之间的间隙所构成的集合体，其中的颗粒可以彼此分离，而且连接面很小，面上的分子间不能形成强的键力。因此，粉末不像致密体那样具有固定的形状，而表现为与液体相似的流动性。然而由于颗粒间相对移动时存在摩擦，所以粉末的流动性是有限的。

1.1.1.2 粉末颗粒

对于粉末颗粒的研究主要是从其聚集状态、结晶构造、表面状态三个方面进行的。颗粒的聚集状态有单颗粒、二次颗粒。粉末中能分开并独立存在的最小实体称为单颗粒（一次颗粒），多数场合下，单颗粒与相邻近的颗粒黏附，单颗粒如果以某种方式聚集，就构成了所谓的二次颗粒（团粒），粉末颗粒的聚集状态如图 1-1 所示。

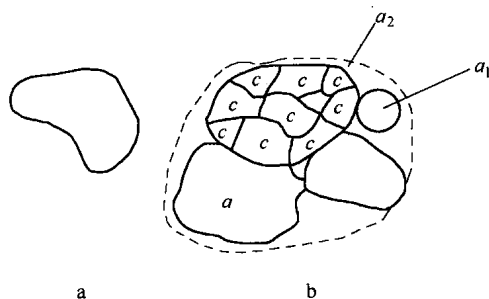


图 1-1 粉末颗粒聚集状态示意图

a—单颗粒；b—二次颗粒

c—晶粒； a_1 ——一次颗粒； a_2 ——二次颗粒

一般来说，颗粒具有多晶结构，而颗粒大小取决于制粉工艺特点和条件。将粉末制成金相样品进行观察，发现颗粒的晶粒内可能存在亚晶结构，即镶嵌块组织。另外，粉末颗粒还表现为严重的晶体不完整性，即存在许多晶体缺陷，如空

位、畸变、夹杂等。从微观角度看,粉末晶体由于严重的点阵畸变,有较高的空位浓度和位错密度,因此,粉末总是储存了较高的晶格畸变能,具有较高的活性。

1.1.1.3 表面状态

粉末颗粒细,有发达的外表面,同时,粉末颗粒的缺陷多;内表面也相当大。颗粒的外表面是可以看到的明显表面,包括颗粒表面所有宏观的凸起和凹进的部分以及宽度大于深度的裂隙。颗粒内表面包括深度超过宽度的裂隙、微缝以及颗粒外表面连通的孔隙、空腔等的壁面,但不包括封闭在颗粒内的潜孔。

粉末发达的表面积贮藏着很高的表面能,对于气体、液体或微粒表现出极强的吸附能力,而且超细粉末容易自发聚集成二次颗粒,在空气中极易氧化或自燃。

1.1.2 粉末的性能

粉末是颗粒与颗粒之间的空隙所构成的分散体系,因此研究粉末体时,应分别研究属于单颗粒、粉末体以及粉末体的孔隙等的一切性质。

(1) 单颗粒的性质。由粉末材料所决定的性质,如点阵构造、理论密度、熔点、塑性、弹性、电磁性质、化学成分。

由粉末生产方法所决定的性质,如粒度、颗粒形状、密度、表面状态、晶粒结构、点阵缺陷、颗粒内气体含量、表面吸附的气体与氧化物、活性等。

(2) 粉末体的性质。除单颗粒的性质外,还有平均粒度、粒度组成、比表面积、松装密度、振实密度、流动性、颗粒间的摩擦状态。

(3) 粉末的孔隙性质。总孔隙体积、颗粒间的孔隙体积、颗粒内的孔隙体积、颗粒间的孔隙数量、平均孔隙大小、孔隙大小的分布、孔隙形状。

实际中,不可能对上述性能逐一进行测定,通常按粉末的化学成分、物理性质和工艺性能进行划分和测定。

1.2 粉末的化学成分

粉末的化学成分是指主要组分的含量和杂质的含量。

粉末中杂质的来源主要有以下三种渠道:第一种是与主要金属结合,形成固溶体或化合物的金属或非金属成分。第二种是从原料和从粉末生产过程中带入的机械夹杂。第三种是粉末表面吸附的氧、水汽和其他气体。

粉末中主要组分含量的化学分析与常规金属的分析方法相同,根据其反应类型、操作方法的不同,可分为:

(1) 滴定分析法。根据滴定所消耗标准溶液的浓度和体积以及被测物质与标准溶液所进行的化学反应计量关系,求出被测物质的含量,这种方法被称为滴定

分析法。

(2) 重量分析法。根据物质的化学性质,选择合适的化学反应,将被测组分转化为一种组成固定的沉淀或气体形式,通过钝化、干燥、灼烧或吸收剂的吸收等一系列的处理后,精确称量,求出被测组分的含量,这种方法称为重量分析法。

根据分析的原理和使用仪器的不同,可分为化学分析和仪器分析。化学分析法通常用于待测组分含量在 1% 以上的样品,分析准确度较高,所用设备简单,在生产实践及科学研究工作中起着一定的作用。

粉末中的杂质含量,主要是指氧含量和酸中不溶物。其测定除常规的库仑法全氧分析外,常用氢损法和酸不溶物法。

氢损法是将金属粉末试样在纯氢气流中煅烧足够长时间,粉末中的氧被还原生成水蒸气,某些元素(C、S)与氢生成挥发性化合物,与挥发性金属(Zn、Cd、Pb)一同排出,测得试样粉末重量的损失,称为氢损。氢损法测定可被氢还原的金属氧化物的那部分氧含量,适用于 Fe、Cu、W、Mo、Co 等粉末。

测定时称取试样 5g,装入经称量的瓷舟中(精确至 0.0001g),将试样铺平,厚度不大于 3mm,一般采用管式还原炉,还原温度和还原时间,视不同金属粉末而定(见表 1-1)。当还原管加热到规定的还原温度时,先通入氮气 1min 以上。然后把盛有试样的舟皿推至还原管加热区的中心,推舟时应缓慢,以防止高速气体把粉末吹走。继续通氮 1min,断氮气,开始通入氢气,氢气流量(若还原管直径为 25mm 时)约 50L/h,在到达规定还原时间时,一直保持这个流量。还原结束时,切断氢,通入氮气,2~3min 后,把舟皿拉到炉管冷却区,在通氮气氛中冷却到 35℃ 以下,将舟皿从管内取出,置于干燥器内冷却到室温后称量,精确至 0.0001g。

氢损值 = [挥发物的重量(即试样重量 - 残留物重量)/试样重量] × 100%

可见,氢损值越大,粉末中的氧含量越高。

表 1-1 还原温度和时间

金属粉末	还原温度 /℃	还原时间 /min	金属粉末	还原温度 /℃	还原时间 /min
青 铜	775 ± 15	30	铅	550 ± 10	30
钴	1050 ± 20	60	钼	1100 ± 20	60
铜	875 ± 15	30	镍	1050 ± 20	60
铅铜、铅青铜	600 ± 10	10	锡	550 ± 10	30
铁	1150 ± 20	60	钨	1150 ± 20	60
合金钢	1150 ± 20	60			

杂质含量的测定常采用酸不溶物法。即粉末试样用某种无机酸(铜用硝酸、铁用盐酸)溶解,将不溶物沉淀和过滤出来,在 980℃ 下煅烧 1h 后称重,再按

下式计算酸不溶物含量。

$$\text{铁粉盐酸不溶物} = (\text{盐酸不溶物的克数} / \text{粉末试样克数}) \times 100\%$$

1.3 粉末的物理性能

粉末的物理性能主要通过颗粒的形状与结构、显微硬度、颗粒的大小和粒度组成、比表面积、颗粒的密度以及熔点、蒸气压、比热容、电学、磁学、光学等几个方面来体现。后者一般与粉末冶金关系不大，故只讨论前面几个性质。

1.3.1 颗粒的形状与结构

颗粒的形状（图1-2）与结构主要由粉末生产方法决定，同时也与物质的分子或原子排列的结晶几何学因素有关。常见的形状为球形、近球形、片状、多角形、树枝状、多孔海绵状、碟状、不规则形。

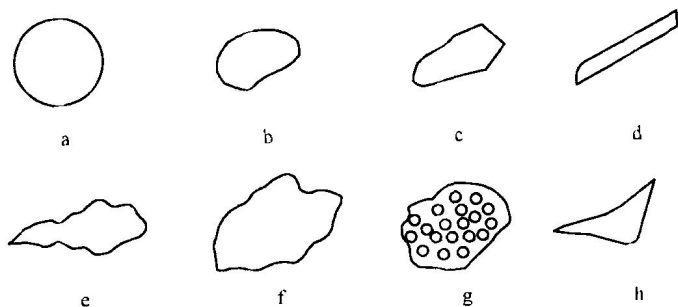


图1-2 粉末颗粒形状示意图

颗粒的形状和结构会影响粉末的流动性、松装密度、气体透过性、压制性和烧结体强度等方面。对于粉末颗粒形状和结构的研究方法目前主要是使用光学显微镜、透射电镜和扫描电镜。

1.3.2 颗粒密度

粉末材料的理论密度，通常不能代表粉末颗粒的实际密度，因为颗粒几乎总是有孔隙的。与颗粒外表面相通的孔叫开孔，不与颗粒外表面相通的潜孔叫闭孔。所以，一般对颗粒密度的描述有三种，即真密度、似密度与表观密度。

真密度（理论密度）是指颗粒质量除以去掉开孔和闭孔后的体积所得的商值。似密度是指颗粒质量与包括闭孔在内的颗粒体积之商。表观密度（有效密度）是指颗粒质量用包括开孔和闭孔在内的颗粒体积去除所得商。颗粒密度的测定常用比重瓶法，如图1-3所示，它是一个带细颈的磨口玻璃小瓶，瓶塞中心