

“十二五”国家重点图书

严 彪 吴菊清 李祖德 葛昌纯 主编

Modern Powder
Metallurgy Handbook

现代粉末冶金手册

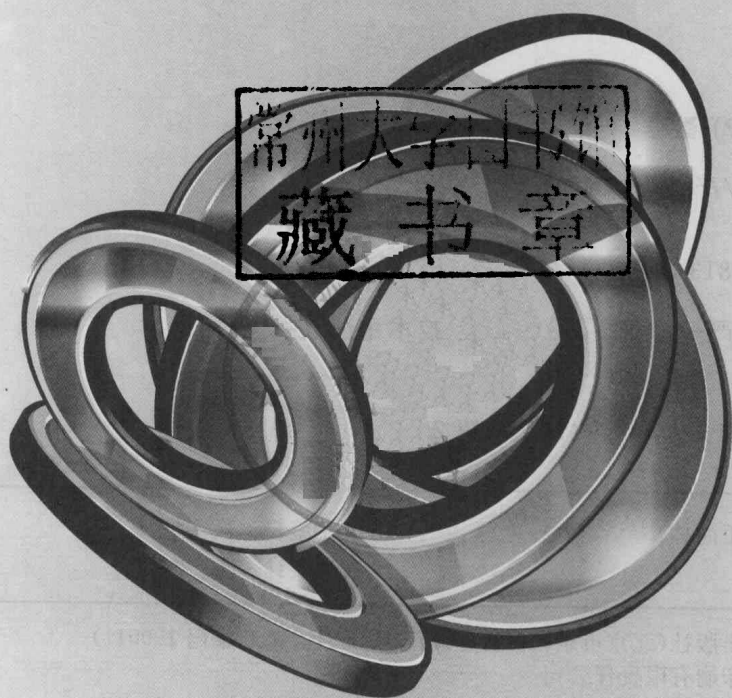


化学工业出版社

严 彪 吴菊清 李祖德 葛昌林 主编

Modern Powder Metallurgy Handbook

现代粉末冶金手册



常州大学图书馆
藏书章



化学工业出版社

· 北京 ·

内 容 提 要

本手册由国内众多权威的粉末冶金专家共同编写, 详尽介绍了铁粉和铁合金粉的生产、有色金属粉末的生产、压制成型的方法与技术、烧结工艺、粉末冶金材料和制品的生产、产品检测和质量评定等。

本手册结合了许多企业的生产经验和设备的设计图, 以金属粉末的制造方法和特性为基础, 以粉末冶金材料和制品为重点, 收集了国内外最新的研制的新产品、新材料、新工艺与新装备。内容体系完整, 技术新颖, 是从事粉末冶金技术与管理人员的实用工具书。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代粉末冶金手册/严彪等主编. —北京: 化学工业出版社, 2013. 1

ISBN 978-7-122-15813-0

I. ①粉… II. ①严… III. ①粉末冶金-技术手册
IV. ①TF12-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 263434 号

责任编辑: 陈 曦 丁尚林
责任校对: 宋 玮

文字编辑: 徐雪华
装帧设计: 张 辉

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 34 字数 929 千字 2013 年 6 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888(传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 128.00 元

版权所有 违者必究

《现代粉末冶金手册》编委会

名誉主任 吴菊清 李祖德 葛昌纯

主 任 严 彪

副 主 任 宗华辉 王兴庆

委 员 (按姓氏汉语拼音排序)

柴 静	陈 哲	杜春风	范君伟	葛昌纯	何晨冲
黄 平	匡乐林	李成奎	雷 皓	李 杰	李锴锴
李祖德	刘中梅	陆 伟	祁红璋	水露雨	陶永琪
王 冰	王华钰	王嘉靖	吴菊清	王兴庆	王宇鑫
严 彪	杨银辉	杨 颖	詹 凤	宗华辉	郑 鑫
张 瑜	张玉红	詹载雷			

秘 书 处 陶永琪 朱啸峰 柴 静

前言

粉末冶金是指制取金属粉末或用金属粉末作为原料，经成形或烧结，得到具有所需形状和性能的材料与制品的工艺技术。它的特点是以粉末作为原材料，经过压制，成形为一定尺寸的压坯，然后在物料主要组元熔点以下的温度进行烧结。它既能生产新型功能材料，也能制造价廉质优的近终形的机械零件。

粉末冶金既是一门材料制造技术，又是一门材料加工技术。粉末冶金既能制取用普通熔铸法无法生产的具有特殊性能的材料，例如，粉末冶金多孔材料、含油轴承、难熔金属材料及制品等；也能对金属与金属液态不互溶的体系，制取金属与金属假合金型材料，例如，钨铜假合金型电触头材料等；还能利用金属与非金属的组合效果制取组合型材料，例如，制作粉末冶金摩擦制品的摩擦材料、粉末冶金金属石墨电刷等；也能制取各种金属陶瓷材料和复合材料，例如，金属陶瓷、粉末冶金弥散强化材料、粉末冶金纤维强化材料等。

粉末冶金方面出版的书籍已经有许多，但随着粉末冶金工业和粉末冶金技术的飞速发展，不断涌现出粉末冶金行业的新产品、新材料、新工艺、新装备，对材料的性能要求也在不断提高。

为了加强粉末冶金行业科技工作者和管理人员的学习和技术的提高，促进我国粉末冶金事业更大的发展，由粉末冶金前辈吴菊清、李祖德、葛昌纯院士等几位老先生构思、研讨、编写大纲，上海市粉末冶金学、协联合会（筹）共同组织高校（如同济大学、上海大学等）以及上海汽车工业（集团）总公司粉末冶金有限公司和南京东部等企业共同编写了本书。

本书的特点主要有以下几点：1. 内容新颖：本书主要采集近年来相关高校和企业的研究和开发成果，收集了国内外相关的粉末冶金的新产品、新材料、新工艺及新装备，以“金属粉末的制造方法和特性为基础，粉末冶金材料和制品为重点”写成，故内容较新。2. 内容体系完整：本书由几位前辈编写大纲，知识体系完整，并本着“循序渐进、深入浅出”的原则，适用于具有一定粉末冶金基础知识的科技工作者。3. 本书结合了许多企业的生产经验和设备的设计及原理图，这一点可为许多企业提高产品质量和相关设备的设计、制造以及应用少走许多弯路。

本书共有7篇，第1篇金属粉末，介绍了其特性、制造方法和粉末冶金生产中的安全知识；第2篇铁粉和铁合金粉的生产，主要以介绍固体碳还原和雾化法为目的；第3篇有色金属粉末的生产，介绍铜粉、铜合金粉和硬质合金用粉末的生产；第4篇压制成形，介绍金属粉末的成形方法、压制过程、压制方式和压制设备；第5篇烧结，主要介绍烧结原理、烧结氛围、几种常见的烧结炉、烧结工艺制度，以及铁基材料的烧结等典型例子；第6篇粉末冶金材料和制品，主要介绍粉末冶金材料分类、铁基减摩材料和零件、铁基结构材料和零件、铜基材料和零件、摩擦材料、多孔材料、磁性材料、难熔金属及其合金、硬质合金、粉末高速工具钢等知

识内容；第7篇金属粉末和粉末冶金材料的性能检测和质量评定，主要介绍金属粉末化学成分、粉末冶金材料的质量评定和管理、性能检测和粉末冶金材料化学和物理性能检测等内容。本书绪论、第1篇和第6篇由同济大学严彪教授组织编写，第2篇和第6篇的第21章由上海汽车工业（集团）总公司粉末冶金有限公司的宗华辉总工程师组织编写，第3篇和第5篇由上海大学的王兴庆教授组织编写，第4篇由南京东部等企业组织编写，第7篇由企业的技术人员和高校的教师组织编写。

希望广大读者对本书提出批评和建议，以便进一步提高本书质量，使本书在培养粉末冶金科技工作者中发挥更好的作用。

编委会
二〇一二年十月

《现代粉末冶金手册》

编写人员名单

绪论 杨银辉

第1篇 金属粉末

第1章 金属粉末的特性 李 杰
第2章 金属粉末的制造方法 郑 鑫
第3章 金属粉末生产中的安全知识 王宇鑫

第2篇 铁粉和铁合金粉的生产

第4章 固体碳还原法 王兴庆
第5章 雾化法 王兴庆

第3篇 有色金属粉末的生产

第6章 铜粉和铜合金粉的生产 王兴庆
第7章 硬质合金用粉末的生产 王兴庆

第4篇 压制成形

第8章 金属粉末的成形方法 何晨冲
第9章 压制方式 何晨冲
第10章 成形新技术 王冰

第5篇 烧结

第11章 烧结基本原理 王兴庆
第12章 烧结气氛 王兴庆
第13章 烧结炉 王兴庆
第14章 烧结工艺制度 王兴庆
第15章 铁基材料的烧结 王兴庆
第16章 硬质合金的烧结 王兴庆
第17章 全致密工艺 雷 皓

第6篇 粉末冶金材料和制品

第18章 粉末冶金材料分类 詹 凤
第19章 金属粉末 詹 凤
第20章 铁基减摩材料和零件 张 瑜

第 21 章	铁基结构材料和零件	宗 华 辉
第 22 章	铜基材料和零件	张 瑜
第 23 章	带钢背的复合减摩材料和零件	祁宏璋
第 24 章	摩擦材料	祁宏璋
第 25 章	粉末冶金多孔材料	陈 哲
第 26 章	粉末冶金电接触材料和元件	王宇鑫
第 27 章	磁性材料	李成魁
第 28 章	难熔金属及其合金	杨 颖
第 29 章	硬质合金	李锴锴
第 30 章	粉末高速工具钢	杨 颖
第 31 章	金刚石-金属工具及金属陶瓷材料	祁宏璋
第 32 章	粉末冶金轻金属及其合金	王华钰
第 33 章	粉末冶金高温合金	范君伟
第 34 章	粉末冶金功能材料	杜春风
第 35 章	粉末冶金新材料	杜春风

第 7 篇 金属粉末和粉末冶金材料的性能检测和质量评定

第 36 章	金属粉末化学成分和性能检测	宗 华 辉	柴 静
第 37 章	粉末冶金材料化学和物理性能检测	宗 华 辉	柴 静
第 38 章	粉末冶金材料生产中产品质量评定和管理	宗 华 辉	柴 静

目 录

绪论	1	0.3 粉末冶金对国民经济和科学技术的 贡献	8
0.1 粉末冶金的定义、基本工艺及特点	1	0.4 粉末冶金简史	9
0.1.1 粉末冶金工艺	1	参考文献	10
0.1.2 粉末冶金工艺的特点	5		
0.2 粉末冶金材料和制品的应用领域	6		
第1篇 金属粉末	11		
第1章 金属粉末的特性	11		
1.1 粉末与粉末体	11	2.3.3 气体雾化	42
1.2 粉末的物理性能	12	2.3.4 水雾化	43
1.2.1 粒度	12	2.3.5 油雾化	44
1.2.2 粒径基准	12	2.3.6 离心雾化	44
1.2.3 粒度分布	13	2.3.7 其他雾化法	45
1.2.4 平均粒度	15	2.3.8 几种雾化工艺的比较	46
1.2.5 粒度测试方法	15	2.4 金属氧化物还原法	47
1.2.6 颗粒形状	20	2.4.1 碳还原法	48
1.2.7 粉末比表面	22	2.4.2 气体还原法	50
1.3 粉末的化学成分	22	2.5 羰基化合物热离解法	53
1.3.1 氧含量的测定	22	2.5.1 羰基物热离解的基本原理	53
1.3.2 酸不溶物测定	26	2.5.2 羰基物热离解法制取羰基镍粉 工艺	55
1.4 粉末的工艺性能	27	2.6 电解法	55
1.4.1 粉末的松装密度与流动性	27	2.6.1 水溶液电解法	56
1.4.2 粉末的振实密度	31	2.6.2 熔盐电解法	64
1.4.3 压缩性和成形性	31	2.7 其他方法	65
参考文献	34	参考文献	67
第2章 金属粉末的制造方法	35	第3章 金属粉末生产中的安全知识	68
2.1 制造方法分类	35	3.1 金属粉末和金属化合物粉末的毒性及 其防护	68
2.2 球磨法和涡流粉碎法	36	3.2 粉末冶金中的爆炸性和自燃性及其 防护	69
2.2.1 机械球磨法	36	3.3 噪声的影响	71
2.2.2 涡旋粉碎法	38	参考文献	71
2.3 熔融金属或合金雾化法	39		
2.3.1 雾化原理	39		
2.3.2 影响雾化粉末性能的因素	42		
第2篇 铁粉和铁合金粉的生产	72		
第4章 固体碳还原法	72		
4.1 固体碳还原法制取铁粉工艺流程	72	4.4.1 装罐	75
4.2 基本工艺及原理	73	4.4.2 还原	77
4.3 原辅材料(轧钢铁鳞、磁铁矿精矿粉、 还原剂)	74	4.4.3 海绵铁的出罐和清刷	77
4.4 海绵铁的制取	75	4.4.4 海绵铁破碎工艺	78
		4.5 海绵铁的精还原	79
		4.6 影响铁粉质量的因素和铁粉的质量	

控制	83	化法)	90
第5章 雾化法	88	5.3 喷嘴结构	90
5.1 基本工艺及原理	88	5.4 影响粉末特性的工艺因素	93
5.2 雾化介质(水雾化、气雾化、油雾			
第3篇 有色金属粉末的生产	94		
第6章 铜粉和铜合金粉的生产	94	第7章 硬质合金用粉末的生产	101
6.1 电解法生产铜粉	94	7.1 钴粉和镍粉的生产	101
6.1.1 电解法生产铜粉的基本原理	94	7.1.1 钴粉的生产	101
6.1.2 电解法生产铜粉的工艺	96	7.1.2 镍粉的生产	102
6.2 雾化法生产铜合金粉	98	7.2 碳化物粉末的生产	102
6.2.1 雾化过程和原理	98	7.2.1 碳化钨粉末的生产	102
6.2.2 雾化铜粉的工艺	99	7.2.2 TiC-WC 复式碳化物的生产	104
6.2.3 影响雾化铜粉的因素	99		
第4篇 压制成形	105		
第8章 金属粉末的成形方法	105	8.7.2 楔形压制的工作原理	130
8.1 模压	106	8.7.3 楔形压模的设计	130
8.1.1 模压压坯的密度分布	106	8.8 碾压	131
8.1.2 模压成形的基本过程	107	8.8.1 概述	131
8.1.3 模压成形的常用方式	107	8.8.2 摆动碾压的工作原理	132
8.2 粉浆浇注	108	8.8.3 摆动碾压的特点	132
8.2.1 粉浆浇注的工艺流程	109	8.8.4 烧结坯的高径比对碾压成形性能	132
8.2.2 影响粉浆浇注成形的因素	109	8.8.5 烧结坯的初始密度对碾压成形性能	133
8.3 等静压成形	111	参考文献	133
8.3.1 等静压压制原理	112	第9章 压制方式	135
8.3.2 等静压成形结构及类型	112	9.1 单向压制	135
8.4 注射成形	115	9.2 双向压制	135
8.4.1 概述	115	9.3 浮动压制	136
8.4.2 注射成形工艺	116	9.4 摩擦压制	137
8.4.3 注射工艺参数	118	参考文献	138
8.4.4 注射成形的特点	118	第10章 成形新技术	139
8.5 软模压制成形	119	10.1 金属注射成形	139
8.5.1 软模压制原理	119	10.1.1 金属注射成形的发展概况	139
8.5.2 软模成形压坯密度与压制压力	119	10.1.2 金属注射成形的工艺及原理	140
8.5.3 软模成形压制压力和压坯强度	120	10.1.3 金属注射成形的关键技术	140
8.5.4 软模成形的特殊工装设计	120	10.1.4 金属注射成形的应用与前景	142
8.6 粉末轧制成形	121	10.2 温压成形	143
8.6.1 粉末轧制发展简述	121	10.2.1 温压成形发展概况	143
8.6.2 粉末轧制法的特点	121	10.2.2 温压成形工艺及原理	144
8.6.3 粉末轧制原理	122	10.2.3 温压成形工艺的应用	146
8.6.4 影响轧制过程的主要参数	124	10.3 流动温压成形	148
8.6.5 金属粉末轧制工艺	128	10.3.1 流动温压成形的概述	148
8.7 楔形压制	129	10.3.2 流动温压工艺及其机理	149
8.7.1 概述	129	10.3.3 流动温压的应用	150

10.4 模壁润滑压制	152	10.6.3 动力磁性压制的应用与前景	165
10.4.1 模壁润滑压制的发展概况	152	10.7 爆炸压制	165
10.4.2 模壁润滑压制的原理及工艺	152	10.7.1 爆炸压制的发展概况	165
10.4.3 模壁润滑压制的应用前景	156	10.7.2 爆炸压制工艺及原理	167
10.5 高速压制	158	10.7.3 爆炸压制的应用	168
10.5.1 高速压制的发展概况	158	10.8 冲击成形	169
10.5.2 高速压制工艺及原理	158	10.8.1 冲击成形的发展概况	169
10.5.3 高速压制的应用	161	10.8.2 冲击成形的成形机理	169
10.6 动力磁性压制	163	10.8.3 冲击成形的应用	171
10.6.1 动力磁性压制发展概况	163	参考文献	172
10.6.2 动力磁性压制的工艺及原理	164		

第5篇 烧结

第11章 烧结基本原理	174	第13章 烧结炉	201
11.1 烧结的目的和要求	174	13.1 对烧结炉的要求及种类	201
11.1.1 烧结的目的	174	13.2 网带式烧结炉	201
11.1.2 烧结的要求	174	13.3 推杆式烧结炉	203
11.1.3 烧结分类	175	13.4 真空烧结炉	204
11.2 烧结过程中的物理化学现象	175	13.5 烧结炉的使用与维护	205
11.2.1 烧结过程	175	13.5.1 烧结炉的使用	205
11.2.2 烧结过程中的物理化学现象	176	13.5.2 烧结炉的维护	206
11.2.3 烧结热力学	176	第14章 烧结工艺制度	208
11.2.4 烧结动力学	177	14.1 烧结工艺制定	208
11.3 固相烧结及其机理	180	14.2 烧结气氛的控制	209
11.3.1 单元系固相烧结	180	14.3 烧结操作规程	209
11.3.2 多元系固相烧结	183	第15章 铁基材料的烧结	211
11.4 液相烧结及其机理	187	15.1 铁基材料压坏在烧结过程中的变化	211
11.4.1 液相烧结的条件	187	15.2 铁基材料烧结的工艺参数	213
11.4.2 液相烧结过程和机制	188	15.3 铁基材料复压复烧技术	214
11.4.3 液相烧结合金的组织	188	第16章 硬质合金的烧结	216
11.4.4 铁铜合金的液相烧结	189	16.1 WC-Co 硬质合金在烧结过程中的变化	216
11.5 活化烧结	190	16.2 影响 WC-Co 烧结致密化和合金组织的因素	216
11.5.1 基本原理	190	16.3 硬质合金的烧结工艺参数	217
11.5.2 活化烧结的方法	190	第17章 全致密工艺	218
第12章 烧结气氛	194	17.1 热压	218
12.1 烧结气氛的作用	194	17.2 热等静压	219
12.2 还原性气氛的反应和控制	194	17.3 热挤	220
12.2.1 氧化和还原	194	17.4 热锻	221
12.2.2 渗碳和脱碳	195	17.5 喷雾沉积	222
12.3 烧结气氛的制备	197	17.6 大气压固结	222
12.3.1 碳氢化合物转化气体的制备	197		
12.3.2 氢氮混合气体的制备	198		
12.3.3 氮基气氛及其制备	200		

第6篇 粉末冶金材料和制品

第18章 粉末冶金材料分类	224	18.2 粉末冶金材料的主要类别	224
18.1 概述	224	18.2.1 粉末冶金减摩材料	224

18.2.2	粉末冶金多孔材料	224	21.3.2	提高密度的几种途径	276
18.2.3	粉末冶金结构材料	224	21.4	铁基结构材料的合金化及烧结钢	278
18.2.4	粉末冶金摩擦材料	225	21.4.1	合金元素及其对铁基材料性能的影响	278
18.2.5	粉末冶金工模具材料	225	21.4.2	合金化作用	279
18.2.6	粉末冶金电磁材料	226	21.4.3	常用烧结钢材料系	280
18.2.7	粉末冶金高温材料	226	21.5	铁基零件的组合烧结	282
第19章	金属粉末	227	21.6	烧结硬化	283
19.1	食物添加剂(食物增铁用铁粉)	227	21.7	粉末冶金零件的后续处理	283
19.2	焊接和切割	227	21.7.1	整形和精整	283
19.2.1	金属粉末在电弧焊中的应用	227	21.7.2	切削加工	284
19.2.2	金属粉末在钎焊中的应用	231	21.7.3	粉末冶金零件的热处理	285
19.2.3	金属粉末在火焰切割中的应用	231	21.7.4	粉末冶金零件去毛刺(光整)	294
19.3	涂层	232	21.7.5	粉末冶金零件的电镀	295
19.3.1	粉末涂层技术	233	第22章	铜基材料和零件	296
19.3.2	金属粉末在涂层技术中的应用	235	22.1	粉末冶金铜基合金材料	296
19.4	燃料和推进剂	236	22.2	铜基含油轴承的特点、性能、应用及生产工艺要点	298
19.5	其他用途	239	22.2.1	概况	298
19.5.1	复印机用粉末	240	22.2.2	性能	298
19.5.2	片状金属粉末颜料	241	22.2.3	应用举例	305
19.5.3	填充物	243	22.2.4	生产流程	309
19.5.4	改善环境	244	22.2.5	提高质量的工艺措施	310
19.5.5	电磁应用	244	22.3	铜基结构零件的特点、性能、应用及生产工艺要点	311
参考文献		245	22.3.1	特点、性能及应用	311
第20章	铁基减摩材料和零件	246	22.3.2	铜基结构件用合金的性能	312
20.1	含油轴承自润滑原理	246	22.3.3	铜基结构零件的影响因素	314
20.2	铁基含油轴承的特点及应用范围	247	22.3.4	6-6-3 青铜结构件的生产工艺	319
20.2.1	铁基含油轴承的特点	247	22.3.5	Cu-25Zn 合金结构件的生产工艺	320
20.2.2	铁基含油轴承的应用范围	247	参考文献		321
20.2.3	铁基含油轴承的应用举例	248	第23章	带钢背的复合减摩材料和零件	323
20.3	铁基含油轴承的性能	249	23.1	金属石墨材料	323
20.4	影响铁基含油轴承性能的因数	250	23.2	双金属材料	325
20.5	润滑油对铁基含油轴承使用性能的影响	252	23.3	烧结青铜-塑料-钢背三层复合材料(DU、DX)	327
20.6	铁基含油轴承生产工艺要点	254	23.3.1	发展概况	327
20.7	其他铁基减摩零件举例	255	23.3.2	材料性能与结构	327
第21章	铁基结构材料和零件	257	参考文献		329
21.1	铁基结构零件设计原则	257	第24章	摩擦材料	330
21.1.1	粉末冶金结构零件设计的总体思路	257	24.1	粉末冶金摩擦材料的特点	330
21.1.2	粉末冶金结构零件设计流程	258	24.2	成分组元及其功能	332
21.2	铁基结构零件生产工艺要点	259	24.3	铁基摩擦材料及其应用	334
21.2.1	原辅材料和配料、混合	259	24.3.1	基体组元及其作用	334
21.2.2	压制	265	24.3.2	铁基材料的应用	335
21.2.3	烧结	268	24.4	铜基摩擦材料及其应用	336
21.3	铁基结构材料性能及其与密度的关系	275			
21.3.1	密度对机械性能的影响	275			

24.4.1 基本组元及其作用	336	第 28 章 难熔金属及其合金	394
24.4.2 铜基材料的应用	336	28.1 难熔金属的特性	394
24.5 粉末冶金摩擦材料生产工艺	337	28.2 难熔金属及其合金的应用	395
24.5.1 粉末的制取	337	28.3 钨基重合金	399
24.5.2 粉末筛分和混合	337	28.3.1 W-Ni-Cu 系重合金	400
24.5.3 粉末压制	338	28.3.2 W-Ni-Fe 系重合金	401
24.5.4 压坯烧结	339	28.3.3 其他系列重合金	403
参考文献	341	28.4 难熔金属及其合金生产工艺要点	404
第 25 章 粉末冶金多孔材料	342	28.4.1 粉末生产	404
25.1 多孔材料的特点及分类	342	28.4.2 粉末固结	406
25.1.1 多孔材料的特点	342	参考文献	411
25.1.2 多孔材料的分类	343	第 29 章 硬质合金	412
25.2 多孔材料的性能	346	29.1 硬质合金的分类及应用	412
25.3 多孔材料的应用	348	29.1.1 概述	412
25.4 多孔材料生产工艺要点	353	29.1.2 碳化钨基硬质合金	414
25.4.1 粉末烧结多孔材料的制备	353	29.1.3 碳化钛基硬质合金	421
25.4.2 金属纤维多孔性材料的制备	356	29.1.4 钢结硬质合金	423
参考文献	366	29.1.5 涂层硬质合金	425
第 26 章 粉末冶金电接触材料和元件	369	29.2 硬质合金的性能	426
26.1 触头材料的特性、分类及应用	369	29.2.1 硬质合金的密度	426
26.1.1 触头材料的特性	369	29.2.2 硬质合金的抗弯强度	427
26.1.2 触头材料的分类及应用	369	29.2.3 硬质合金的硬度	428
26.2 触头材料生产工艺要点	371	29.2.4 硬质合金的冲击强度	430
26.3 其他电接触材料和元件（电机电刷、 焊接电极等）	372	29.2.5 磁性	430
26.4 含银触头材料的节银途径和触头材料 研发方向	373	29.2.6 退火	431
参考文献	374	29.2.7 硬质合金的其他性能	431
第 27 章 磁性材料	375	29.3 硬质合金生产工艺要点	437
27.1 概述	375	29.3.1 原材料的生产	437
27.2 软磁材料及其应用	375	29.3.2 硬质合金的生产	438
27.2.1 烧结铁基软磁材料	376	参考文献	438
27.2.2 铁氧体软磁材料	377	第 30 章 粉末高速工具钢	440
27.2.3 压粉磁芯（软磁复合材料）	377	30.1 粉末高速钢的特点及应用	440
27.3 永磁材料及其应用	379	30.2 粉末高速钢生产工艺要点	442
27.3.1 粉末金属磁体	379	30.2.1 粉末高速钢产品牌号	442
27.3.2 金属塑料磁体	380	30.2.2 粉末高速钢制备工艺的现状	442
27.3.3 金属氧化物磁体	380	30.2.3 粉末高速钢的典型生产工艺	444
27.3.4 超微粉末磁体	381	30.3 粉末高速钢烧结原理及力学性能	446
27.4 稀土永磁材料及其应用	381	30.3.1 粉末高速钢的烧结原理	446
27.4.1 Sm-Co 系永磁体	381	30.3.2 粉末高速钢的力学性能	448
27.4.2 R-Fe-B 系磁体	384	30.4 粉末高速钢的新发展	449
27.4.3 稀土永磁材料的应用	386	30.4.1 粉末高速钢的产品换代	450
27.5 磁性材料生产工艺要点	390	30.4.2 粉末高速钢生产技术的进步	451
27.5.1 软磁材料的生产工艺要点	390	30.4.3 粉末高速钢非金属夹杂物 的减少	452
27.5.2 永磁材料的生产工艺要点	390	30.4.4 粉末高速钢力学性能的提升	452
参考文献	391	参考文献	453
		第 31 章 金刚石-金属工具及金属陶瓷	

材料	455	的强化作用	475
31.1 金刚石-金属工具特点、分类及应用	455	33.5 金属间化合物	477
31.1.1 金刚石	455	33.5.1 金属间化合物的晶体结构	478
31.1.2 金刚石制品	455	33.5.2 金属间化合物的性能特点	480
31.1.3 金刚石制品的分类	455	33.5.3 常用金属间化合物材料及其 应用	481
31.1.4 金刚石-金属工具的应用	456	33.5.4 金属间化合物研究方向	487
31.2 金刚石-金属工具生产工艺要点	456	参考文献	487
31.2.1 热压法的工艺特点	456	第34章 粉末冶金功能材料	491
31.2.2 烧结	460	34.1 形状记忆合金	491
31.3 金刚石-金属工具的新发展	460	34.1.1 粉末冶金多孔 NiTi 形状记忆 合金	491
31.4 金属陶瓷材料	461	34.1.2 粉末冶金铁基形状记忆合金	494
参考文献	462	34.2 贮氢合金	495
第32章 粉末冶金轻金属及其合金	463	34.2.1 AB ₅ 型贮氢合金（稀土类及钙系 合金）	495
32.1 粉末冶金铍	463	34.2.2 AB ₂ 型贮氢合金（Ti、Zr 系拉夫 斯相合金）	497
32.1.1 粉末制取工艺	463	34.3 超导材料	498
32.1.2 成形和致密化工艺	464	参考文献	499
32.1.3 铍粉末冶金技术的新发展	466	第35章 粉末冶金新材料	500
32.2 粉末冶金钛合金及钛基复合材料	466	35.1 纳米金属粉末材料	500
32.2.1 粉末冶金钛合金	466	35.2 非晶态金属粉末材料	501
32.2.2 钛合金体系	466	35.3 梯度功能材料	501
第33章 粉末冶金高温合金	468	35.3.1 梯度功能材料的合成	501
33.1 三代典型高温合金	468	35.3.2 梯度功能材料的应用	502
33.2 粉末超合金	470	参考文献	503
33.3 沉淀强化型合金	471		
33.4 弥散强化型合金	472		
33.4.1 制粉	473		
33.4.2 成形及致密化	474		
33.4.3 ODS 析出相的形成及对铁基合金			
第7篇 金属粉末和粉末冶金材料的性能检测和质量评定	504		
第36章 金属粉末化学成分和性能检测	504	38.1.1 铁粉性能	516
36.1 粉末取样	504	38.1.2 压制方式	516
36.2 化学成分测定	507	38.1.3 润滑剂的应用	517
36.3 物理力学性能测定	508	38.1.4 其他影响因素	517
第37章 粉末冶金材料化学和物理性能 检测	509	38.1.5 质量控制	517
37.1 烧结金属材料——抽样	509	38.2 烧结件质量的分析与控制	518
37.2 化学成分	510	38.2.1 制品性能	518
37.3 物理性能	511	38.2.2 工艺控制	518
37.4 力学性能	511	38.2.3 气氛	518
37.5 铁基粉末冶金烧结制品金相组织	513	38.2.4 设备条件	518
第38章 粉末冶金材料生产中产品质量评定 和管理	516	38.2.5 质量控制	518
38.1 粉末和压坯质量的评定与控制	516	38.3 后加工件质量的检验与控制	519
		38.4 粉末冶金质量管理控制常用方法	520
		38.5 质量管理体系基础	525

绪 论

0.1 粉末冶金定义、基本工艺及特点

粉末冶金 (powder metallurgy, PM) 是制取金属或用金属粉末 (或金属粉末与非金属粉末的混合物) 作为原料, 经过成形和烧结, 制造金属材料、复合以及各种类型制品的工艺技术, 它能实现工件的少切削、无切削加工, 是一种高效、优质、精密、少污染、低耗节能制造零件的先进制造技术, 在材料和零件制造业中具有不可替代的地位和作用。目前常用粉末冶金高性能材料有硬质合金、减摩材料、结构材料、摩擦材料、难熔金属材料、过滤材料、金属陶瓷等。这些先进材料的性能大大超越了传统技术生产的材料, 为社会的发展提供了必需的先进材料物质基础。

0.1.1 粉末冶金工艺

粉末冶金工艺最基本的工序包括粉末制取、粉末成形和粉末烧结。烧结的成品, 不用进一步加工就能使用, 也可根据需要进行各种烧结制品的后处理。粉末冶金工艺的第一步是制取金属粉末、合金粉末、金属化合物粉末以及包覆粉末, 第二步是将原料粉末通过成形、烧结以及烧结后的处理制得成品。粉末冶金工艺的基本工序是:

(1) 原料粉末的制备 现有的制粉方法大体可分为两类: 机械法和物理化学法。而机械法可分为: 机械粉碎及雾化法; 物理化学法又分为: 电化腐蚀法、还原法、化合法、还原-化合法、气相沉积法、液相沉积法以及电解法。其中应用最为广泛的是还原法、雾化法和电解法。

(2) 粉末成形为所需形状的坯块 成形的目的是制得一定形状和尺寸的压坯, 并使其具有一定的密度和强度。成形的方法基本上分为加压成形和无压成形。加压成形中应用最多的是模压成形。

(3) 坯块的烧结 烧结是粉末冶金工艺中的关键性工序。成形后的压坯通过烧结使其得到所要求的最终物理力学性能。烧结又分为单元系烧结和多元系烧结。对于单元系和多元系的固相烧结, 烧结温度比所用的金属及合金的熔点低; 对于多元系的液相烧结, 烧结温度一般比其中难熔成分的熔点低, 而高于易熔成分的熔点。除普通烧结外, 还有松装烧结、熔浸法、热压法等特殊的烧结工艺。

(4) 产品的后序处理 烧结后的处理, 可以根据产品要求的不同, 采取多种方式。如精整、浸油、机加工、热处理及电镀。此外, 近年来一些新工艺如轧制、锻造也应用于粉末冶金材料烧结后的加工, 取得较理想的效果。

随着粉末冶金技术的快速发展, 现在粉末冶金技术的新工艺得到迅速发展, 以下是超微粉末的制备及现代粉末冶金技术的新工艺:

(1) 粉末冶金材料的性能取决于粉末的特性, 包括物理性能、化学性质、粒度和表面特征等。研究者将粒径在 $0.1\mu\text{m}$ (100nm) 以下的粉末颗粒称为超微粒子。超微粒子具有显著的体积效应、表面效应、量子尺寸效应和宏观量子隧道效应。按照超微粉末制备过程中原料所处的状态不同, 可将制备方法分为液相法和气相法两大类。

(2) 采用快速凝固-粉末冶金法制取非晶、准晶和微晶粉末, 如旋转盘雾化法、旋转水雾化法、超声雾化法、双辊淬冷法、三辊淬冷法、电动力雾化法、等离子雾化法、溶液提取法、激光快速凝固法、多级快淬法等。除此之外, 快速凝固粉末合金, 如快冷粉末高温合金、铝合金、钛合金、铜合金、粉末工具钢和粉末不锈钢的研制及在工业上的

应用取得了巨大的成功。

(3) 喷射沉积或喷射成形工艺是 20 世纪 60 年代末发展起来的一种新型的快速凝固和成形工艺。该工艺的诞生对铸造、粉末冶金等技术产生了深远影响,成为当今材料制备最引人注目的方法之一。1974 年 Brooks 等人成功地将 Singer 提出的喷射成形原理应用于锻造毛坯的生产,发展成了著名的 Osprey 工艺,开发了适合喷射成形的一系列合金。Osprey 工艺发展主要集中在生产半成品形状的预成型坯,诸如管、辊、环、条、盘和块,材料包括不锈钢、高速钢、工具钢、磁性材料、高温合金以及高强度铝合金、镁合金和铜合金等高合金化材料。

(4) 粉末冶金成形技术一直处于不断地发展演化之中,从传统的单向压制到双相压制,再到等静压成形,并从冷等静压成行到热等静压成形,还出现了准等静压成行(包括陶粒压制、STAMP 工艺、快速全向压制等)、温压成形、流动温压成形、高压温压成行、喷射成形、挤压成形、粉浆浇注成形、粉末轧制成形、粉末锻造成形、金属粉末注射成形、粉末电磁成形特种成形技术,具体粉末冶金成形技术如下:

① 等静压成形(isostatic pressing, IP)是借助于高压泵的作用把流体介质(气体或液体)压入耐高压的钢制密封容器内,高压流体的静压力直接作用在模套内的粉末上,粉末体在同一时间内在各个方向上均衡地受压而获得密度分布均匀和强度较高的压坯。冷等静压制可作为热等静压制的预致密化步骤,烧结后还可以锻造、挤压、轧制、冲压及热等静压等。美国 Battelle 研究所于 1955 年开发热等静压技术(hot isostatic pressing, HIP),首先用于原子能反应过程中燃料原件的扩散黏结,当时被称为“气压黏结”。HIP 技术基本原理是:以惰性气体为压力介质,把粉末压坯或粉末包套(把装入特制容器内的粉末体)置入热等静压机高压容器中,使其在加热过程中经受各向均衡的压力,借助高温和高压的共同作用使材料致密化。HIP 技术最显著的特点是,粉末体(粉末压坯或粉末包套)在等静压高压容器内同一时间经受高温和高压的联合作用,强化了压制和烧结过程,降低了制品的烧结温度,降低幅度达到 10%~15%以上,并使处理后的材料仍保持细晶粒的晶体结构,从而显示出 HIP 技术在粉末冶金与陶瓷烧结方面的优势。温度、压力、时间三个工艺参数在热等静压过程中均可调制,可有效消除制品内部残存的微量空隙和提高制品相对密度。HIP 技术目前已应用在以下材料的制备:粉末冶金高速钢(PM high speed steel)、近净成形零件(near net shaped components)、陶瓷粉末固结、金刚石工具的烧结、金属陶瓷复合材料、硬质合金、高温合金等。准等静压制(quasi-isostatic pressing)是一种近似或简化的等静压法,它用固体弹性材料做模压介质,采用立体三轴模压形式保障压制品的密度均与一致性。准等静压法和等静压法相比较,前者传递均衡等静压力的介质为具有一定流动性的粉体或弹性构件(石墨、石英砂、橡胶、合成橡胶等),压力位近似等静压状态;后者为流动性的粉体或弹性构件,压力为等静压状态。

② 陶粒压制(ceracon)工艺是在准等静压条件下将多孔性金属预成形坯固结到理论密度。陶粒压制过程就是利用陶瓷颗粒作为传力介质,通过该介质将压力传递到多孔预成形坯件上去,使工件被压制成近净形产品,并且达到完全致密。根据预成形坯的材料和形状来选取预成形坯的制备方法可以优化后续成形过程。

③ STAMP 工艺可用于制造坯料和半精制品,再将它们热加工成最终型材。制造工艺包括在卧式装置中制备气雾化粉末、随后预热和高压下快速凝结。用这种方法可制造基本无缺陷的坯料,因此材料的成品率高,适用于高合金耐热钢、不锈钢及高速工具钢制造的制品。

④ 快速全向压制(rapid omnidirectional compaction, ROC)是一种近年发展起来的粉末材料致密化新技术。它是一种将高性能预合金粉末固结成全密实零件的廉价工艺。ROC 与热等静压相比(HIP)相比,除具有高压低温的优点外,还能精确地控制制品的尺寸,性能至少能达到等静压的水平,生产成本为 HIP 的 50%,固结速度比 HIP 快。

⑤ 粉浆浇注 (slip casting) 是一种在陶瓷工业中采用了二百多年的成形技术。20 世纪中期, 采用粉浆浇注成形制备了金属粉末、碳化物、氮化物、硼化物、硬质合金、不锈钢等。粉浆浇注工艺的基本过程为: 将粉末与水 (或其他液体, 如甘油、酒精等) 制成一定浓度的悬浮粉浆, 注入具有所需形状的石膏模中; 多孔的石膏模吸收粉浆中的水分 (或液体) 从而使粉浆物料在模内得以密实并形成于模具型面相应的成形铸件, 待石膏模将粉浆中液体吸干后, 拆开模具便可取出铸件。

⑥ 金属粉末轧制 (powder rolling or roll compacting) 是将金属粉末通过一系列轧制过程生产处连续的板材和带材的工艺过程。根据轧制位置不同, 大致可分为垂直式、水平式及带有一定倾角的轧制。金属粉末轧制机理与传统的致密金属轧制机理不同, 它适用粉末轧制前后粉末质量不变的情况。

⑦ 粉末挤压成形 (powder extrusion) 是指粉末体或者粉末压坯在压力的作用下, 通过规定的压模嘴挤成坯块或者制品的一种成形方法。按照挤压条件的不同, 可分成增塑粉末挤压和热挤压成形。增塑粉末挤压有很多优点: 能形成复杂的截面; 所用的黏结剂量少; 能成形硬质粉末; 均匀的成形密度; 细长的构件的制造; 经济且省力。热粉末挤压 (hot power extrusion) 是指金属粉末压坯或粉末装入包套内加热, 在较高温度下挤压。热粉末挤压提供了一条其他方法难以成形的独特方法, 已应用于开口管材、线材及复杂截面的铸件。

⑧ 金属塑性成形工艺粉末锻造 (powder forging) 是常规的粉末冶金工艺和精密锻造有机结合而发展起来的一项具有市场竞争力的少或无切屑金属加工方法。以金属粉末为原料, 经过预成形压制, 在保护气氛中进行加热烧结作为锻造毛坯, 然后在压力机上一次锻造成形和实现无飞边精密模锻, 获得了与普通模锻件相同密度、形状复杂的精密锻件。粉末锻造技术既保持了粉末冶金成形性能好的优点, 又发挥锻造工艺有效地改变金属材料组织和性能作用的特点。

⑨ 温压成形工艺 (warm compaction) 是在一定温度下及特殊润滑剂条件下压制成形和烧结, 制备高密度、高性能、低成本粉末冶金材料与零件的新技术, 被认为是进入 20 世纪 90 年代以来, 粉末冶金零件生产技术方面最为重要的一项技术进步, 于 1995 年获得美国粉末冶金工艺新技术新发展功勋奖。

⑩ 电磁成形技术 (electronmagnetic forming) 是一种利用金属板材在强脉冲磁场中受力而产生塑性变形的高能率的成形方法。两种电磁成形方法: 螺线管法 (solenoidal coil method) 与直接电极接触法 (direct electrode contact method), 后者电流直接通过工件。由于金属是在脉冲磁场中受力变形的, 故也称为磁脉冲成形 (或称动磁压制技术, dynamic magnetic compaction)。

⑪ 高速压制技术 (high velocity compaction, HVC) 技术和常规粉末冶金单向压制极为相似, 在压制压力位 $600 \sim 1000 \text{ MPa}$, 压制速度为 $2 \sim 30 \text{ m/s}$ 的条件下对粉体进行高能锤击。HVC 与传统压制相比, 在生产工艺上有很多相似性, 例如粉末充填和零件脱模。但是 HVC 的压制速度比传统压制快 $500 \sim 1000$ 倍, 压机锤头速度高达 $2 \sim 30 \text{ m/s}$, 液压驱动的锤头重达 $2 \sim 1200 \text{ kg}$, 粉末在 0.02 s 之内通过高能量冲击进行压制, 压制时产生强烈的冲击波。

(5) 烧结作为粉末冶金生产中的重要工序一直是研究的重点。烧结阶段发生的主要变化是微粒或晶粒尺寸与形状的变化和气孔尺寸与形状的变化; 在烧结完成致密体的最后阶段, 气孔将从固体粉体中基本消除, 形成一定的显微结构, 从而赋予其一定的性能。传统烧结包括气相烧结、固相烧结、液相烧结、反应 (瞬间) 液相烧结等。随着材料科学技术的飞速发展, 新型特种材料的不断出现, 普通烧结方法和常压低温烧结、液相烧结和添加剂辅助烧结等已难以适应需要, 因而特种烧结技术应运而生。依据烧结机理及特点、烧结手