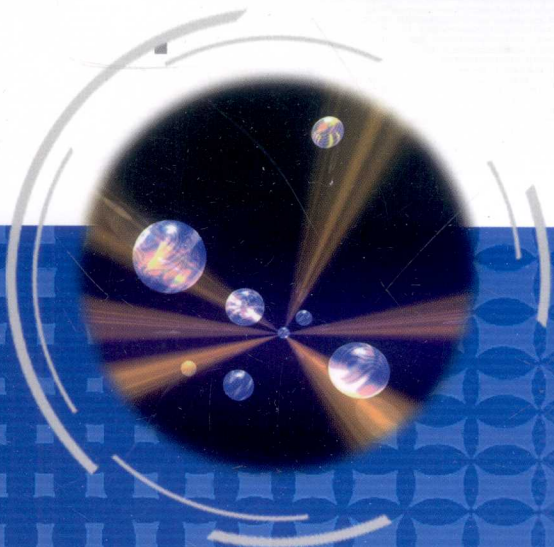


普通高等教育“十二五”规划教材

粉末冶金原理

» 中南大学 阮建明 黄培云 主编 ·····



赠电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

粉末冶金原理

主编 阮建明 黄培云
参编 曹顺华 冉丽萍
主审 曲选辉



机械工业出版社

粉末冶金原理是材料、冶金、化学化工、机械类学科专业知识,对于研究和发展新材料及相关新技术具有十分重要的参考价值。本书因将基本原理与工程应用相结合,使得知识系统性更加完善。全书共分九章,第1章简单介绍粉末冶金科学基本含义以及粉末冶金发展过程;第2章主要讨论粉末制备的基本原理和重要方法;第3章着重描述粉末粒径、粉末形状、粉末工艺性质及其相应的测定方法;第4章主要讨论粉末成形前的预处理;第5章着重讨论粉末成形的基本原理与技术;第6章分别介绍了等静压成形、无压成形、挤压成形、热压成形、注射成形等特殊成形方法与基本原理,第7章重点介绍了粉末高温热致密化基本原理和方法;第8章介绍粉末冶金材料的结构与特性;第9章介绍了粉末冶金材料与技术应用。为便于巩固所学习的知识,每章都附有适当的习题。

本书可作为材料、冶金、化学化工、机械等专业本科生和研究生的专业课程教材,也可供从事粉末冶金、新材料研发等工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

粉末冶金原理/阮建明,黄培云主编. —北京:机械工业出版社,2012.3
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-37402-2

I. ①粉… II. ①阮…②黄… 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(2012)第019540号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:丁昕祯 责任编辑:丁昕祯 程足芬

版式设计:霍永明 责任校对:张薇

封面设计:张静 责任印制:乔宇

三河市国英印务有限公司印刷

2012年5月第1版第1次印刷

184mm×260mm·25.25印张·630千字

标准书号:ISBN 978-7-111-37402-2

定价:54.80元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版



前 言

粉末冶金技术作为新材料研发的重要方法具有其他方法无法企及的特殊性质，因此获得了越来越多的重视。粉末冶金在冶金工业、机械工业、硬质合金工业、汽车工业、新材料产业、化学化工产业以及军事工程等领域获得了广泛应用，同时由于材料制备方法的特有属性和粉末冶金材料所具有的特殊结构，使得粉末冶金材料或产品有着广泛的用途。现有粉末冶金类教材过分偏向原理文字性论述，所选文献内容过于老旧，结合原理所必需的理论计算和工程应用偏少。因此，为适应粉末冶金材料和产业的发展，根据材料、冶金、化学化工、机械等专业的教学要求，并基于国内外研究和教学工作经历编著了本书。

本书在着重描述粉末冶金基本概念、基本原理的同时，突出了粉末冶金原理与方法的工程应用，力图建立材料成分—材料制备方法—材料微观结构—材料性能的相互关系，使读者将基本原理与工程应用相结合。书中深入系统地介绍了粉末冶金在粉末制备、粉末性能分析与表征、粉末成形、粉末致密化等过程中的基本原理和若干重要方法。本书基于物理化学基础十分详细地描述了粉末还原制粉的基本原理和基本方法，基于材料科学基础十分详细地描述了雾化制粉基本原理和基本方法，并较多地介绍了粉末在雾化过程中微观结构的变化，讨论了对这些微观结构变化有着重要作用的各种因素。本书重点讲述了粉末颗粒的基本概念，基于现代材料分析检测技术，深入讨论了粉末颗粒基本结构及其相应特点，讨论了现代测试技术测试粉末物理特性、粉末粒径、粒度组成等因素的基本原理和重要方法。本书相应增加了粉末成形前的各种必要的预处理，对粉末在运输与存放期间可能出现的团聚与组分偏析等问题进行了系统的归纳并提出了适当的解决方法。本书结合工程应用较深入地讨论了金属粉末在成形过程应力状态、压力作用下粉末体的绝对变形与相对变形、弹性变形与塑性变形，有针对性地介绍了巴尔申压制方程、川北公夫压制理论以及黄培云综合压制方程。在特殊成形章节中适当增加雾化喷射成形、温压成形和金属注射成形等粉末冶金成形新技术，对等静压成形技术也做了必要补充。本书对金属粉末于高温条件下的烧结现象和烧结过程进行了十分细致的描述，对于高温条件下原子扩散迁移的热力学、动力学基础以及由原子不同的扩散迁移导致烧结体收缩的各种机理给予了深入系统的描述，建立了与不同扩散方式所对应的数学模型，并就获得全致密粉末冶金材料进行了必要的延伸讨论。本书以与致密材料性能相对比的形式，用不同材料实例重点讨论了粉末冶金材料的基本特性和怎样充分发挥粉末冶金材料的特性，最后结合粉末冶金基本原理方法，在一定深度上介绍了粉末冶金的应用。为了便于理解粉末冶金的基本原理和基本方法，全书增加了大量的图解和工程问题计算方法。

本书可作为材料、冶金、化学化工、汽车、机械等专业本科学生和研究生专业课程教材，也可供从事粉末冶金、新材料研发等工程技术人员阅读参考。书中各章附有习

题可供学生练习。为便于学生学习，书后附有名词解释和部分金属与合金材料常用物理性能。教师可根据不同学科专业要求，对学生进行选择性和重点性教学。

在本书编写过程中，杨海林、樊新等老师以及中南大学粉末冶金研究院 2005 级、2006 级部分博士研究生参与了本书的文献收集、资料翻译整理、图表制作以及文字校对等大量工作，在此表示诚挚的感谢。

北京科技大学材料学院曲选辉院长担任本书主审，对本书进行了细致审阅并提出了许多宝贵意见，在此表示衷心感谢。

作为新兴材料学科，粉末冶金原理一书参考教材甚少，本书难免存在缺点与不当之处，敬请同行专家学者和使用本书的师生指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 绪言····· 1

- 1.1 粉末冶金科学的基本定义····· 1
- 1.2 粉末冶金工艺····· 1
- 1.3 粉末冶金发展简史····· 2
- 1.4 粉末冶金科学与技术的特点与应用····· 3
- 1.5 粉末冶金的未来····· 5
- 问题与习题····· 6
- 参考文献····· 6

第 2 章 粉体制备的原理与技术····· 8

- 2.1 概述····· 8
- 2.2 机械粉碎法····· 10
 - 2.2.1 球磨的基本规律····· 10
 - 2.2.2 影响球磨的因素····· 13
 - 2.2.3 球磨能量与粉末粒径的基本关系····· 14
 - 2.2.4 强化研磨····· 15
- 2.3 氧化物还原法····· 17
 - 2.3.1 还原过程的基本原理····· 17
 - 2.3.2 碳还原法····· 28
 - 2.3.3 气体还原法····· 34
 - 2.3.4 金属热还原法····· 44
- 2.4 还原-化合法····· 46
 - 2.4.1 还原-化合法制取碳化钨粉····· 46
 - 2.4.2 还原-化合法制取硼化物····· 49
- 2.5 其他化学法····· 52
 - 2.5.1 热分解法····· 52
 - 2.5.2 液相沉淀法····· 52
 - 2.5.3 气相沉淀法····· 53
 - 2.5.4 固-固反应合成法····· 59
- 2.6 雾化制粉的基本原理与技术····· 59
 - 2.6.1 雾化原理····· 60
 - 2.6.2 喷嘴结构····· 65

2.6.3 影响雾化粉末性能的因素····· 67

2.6.4 气体和水雾化的技术与工艺····· 71

2.6.5 离心雾化法····· 76

2.7 电解法制备粉末的原理与技术····· 79

2.7.1 水溶液电解法····· 80

2.7.2 影响粉末粒度和电流效率的因素····· 87

2.7.3 熔盐电解法····· 91

问题与习题····· 93

参考文献····· 94

第 3 章 粉末结构与性能分析····· 95

3.1 粉末及其性能····· 96

3.1.1 粉末体····· 96

3.1.2 粉末颗粒····· 96

3.2 粉末微观结构与性能····· 97

3.2.1 粉末形貌····· 97

3.2.2 粉末微观结构····· 97

3.3 粉末的性能····· 99

3.3.1 单颗粒的性质····· 100

3.3.2 粉末的化学成分····· 100

3.3.3 粉末的物理性能····· 101

3.3.4 粉末的工艺性能····· 105

3.4 粉末粒度与粒度分布····· 108

3.4.1 粉末粒度····· 108

3.4.2 粒度和粒度组成····· 110

3.4.3 粒径基准····· 110

3.4.4 粒度分布基准····· 111

3.4.5 粒度分布函数····· 114

3.4.6 平均粒度····· 115

3.4.7 粒度测定原理····· 116

3.5 粉末性能测定技术····· 116

3.5.1 粒度测定分类····· 116

3.5.2 粒度测量技术····· 117

3.5.3 粒度分析技术的比较····· 127

3.5.4 粒度分析中存在的问题	128	5.3.2 模压产品分类	164
3.6 颗粒形状表征	128	5.4 压制过程中力的分析	165
3.7 粉末比表面积分析	129	5.4.1 应力和应力分布	165
3.7.1 粉末比表面积	129	5.4.2 侧压力和模壁摩擦力	166
3.7.2 形状因子	129	5.4.3 脱模压力	170
3.7.3 空气透过法	131	5.4.4 弹性后效	171
3.7.4 气体吸附法	133	5.5 压制压力与压坯密度的关系	172
问题与习题	137	5.5.1 金属粉末压制时压坯密度的变化 规律	172
参考文献	138	5.5.2 压制压力与压坯密度关系的 解析	172
第4章 成形前粉末的预处理	139	5.6 压坯密度对压坯强度的影响	180
4.1 概述	139	5.7 压制压力对压坯强度的影响	181
4.2 粉末退火	139	5.8 压坯密度的分布分析	182
4.3 团聚粉末的分散	140	5.8.1 压坯中密度分布的不均匀性	182
4.4 粉末混合	141	5.8.2 影响压坯密度分布的因素	182
4.4.1 粉末混合的意义	141	5.8.3 影响压制过程的因素	184
4.4.2 粉末形状、粒度和纯度调整	142	5.9 模具与压坯设计	191
4.4.3 混合物的均匀性	142	5.9.1 模具设计	191
4.4.4 粉末混合方法	144	5.9.2 压制工艺设计	192
4.4.5 干燥粉末的混合	145	问题与习题	192
4.4.6 混合粉末的密度计算	147	参考文献	194
4.5 粉末的充填	147	第6章 特殊成形技术	195
4.5.1 粉末充填的意义	147	6.1 等静压成形	195
4.5.2 改善粉末充填的技术	148	6.1.1 等静压制的基本原理	195
4.6 成形剂与润滑剂	149	6.1.2 冷等静压制	197
4.6.1 成形剂	149	6.1.3 冷等静压成形工艺	199
4.6.2 润滑剂	150	6.1.4 热等静压成形	200
4.7 筛分	152	6.2 粉末无压成形	205
4.8 粉末制粒	152	6.2.1 粉浆浇注	205
4.9 粉末操作安全与健康因素	154	6.2.2 冻干铸造法	209
问题与习题	155	6.2.3 喷射成形	209
参考文献	156	6.3 粉末挤压成形	213
第5章 粉体压制成形原理与技术	157	6.3.1 粉末挤压成形的原理	213
5.1 概述	157	6.3.2 金属粉末的增塑挤压	214
5.2 粉体压制成形	157	6.3.3 增塑粉末挤压成形工艺	216
5.2.1 粉末压制现象	157	6.4 粉末热压成形	221
5.2.2 粉末压制时的位移与变形	158	6.4.1 热压致密原理	221
5.2.3 金属粉末的压坯强度	161	6.4.2 热压工艺的特点	222
5.3 普通压制成形过程	163		
5.3.1 刚性模压制	163		

6.5 粉末注射成形	223	7.4.2 烧结中的压制压力效应	271
6.5.1 粉末注射成形的基本原理	223	7.5 固相烧结	273
6.5.2 粉末-黏结剂混合物	226	7.5.1 单元系粉末烧结	273
6.5.3 注射成形工艺	227	7.5.2 多元系粉末烧结	279
6.5.4 粉末冶金注射成形技术的 特点	228	7.6 液相烧结	291
6.6 温压成形	229	7.6.1 液相烧结的基本条件、过程和 机构	291
6.6.1 温压工艺	229	7.6.2 晶粒粗化	300
6.6.2 温压技术的特点	230	7.6.3 液相烧结举例	301
6.6.3 温压工艺的核心技术与温压 技术的致密化机理	230	7.6.4 熔渗	304
6.7 粉末连续成形	231	7.7 活化烧结	307
6.7.1 粉末轧制成形	231	7.7.1 活化烧结的概念与条件	307
6.7.2 粉末轧制法的特点和分类	232	7.7.2 烧结活化能	308
6.7.3 粉末轧制原理	233	7.7.3 钨的活化烧结	308
6.7.4 金属粉末的轧制工艺	235	7.7.4 电火花烧结	309
6.8 粉末锻造成形	237	7.8 强化烧结	310
6.8.1 粉末锻造致密化机理	237	7.9 烧结气氛	313
6.8.2 粉末冷锻成形	239	7.9.1 气氛的作用与分类	313
6.9 其他成形技术	242	7.9.2 还原性气氛	314
问题与习题	242	7.9.3 真空烧结	314
参考文献	243	7.9.4 烧结气氛的选择	315
第7章 粉体材料烧结致密化原理与 技术	245	7.9.5 烧结设备	318
7.1 概述	245	7.10 烧结后处理	320
7.2 烧结过程的热力学基础	246	7.10.1 表面处理	320
7.2.1 烧结的基本过程	246	7.10.2 浸渍处理	320
7.2.2 烧结的热力学问题	247	7.10.3 阳极化处理	321
7.2.3 烧结驱动力的计算	248	7.10.4 喷砂与摩擦抛光处理	321
7.3 烧结理论与物质迁移	252	7.10.5 探伤检查	322
7.3.1 烧结的基本概念	252	问题与习题	323
7.3.2 物质迁移机理	254	参考文献	324
7.3.3 烧结初期	263	第8章 粉末冶金材料的结构与 特性	326
7.3.4 烧结中期	265	8.1 粉末冶金材料的孔隙特征	326
7.3.5 烧结末期	265	8.1.1 粉末冶金材料孔隙度、密度和 孔径的测定	326
7.3.6 数据分析	268	8.1.2 粉末冶金材料的透过性能	327
7.3.7 烧结图	269	8.2 孔隙与力学性能关系	329
7.4 烧结孔隙结构的变化	269	8.2.1 动态性能	329
7.4.1 烧结孔隙的结构	269	8.2.2 硬度与孔隙的关系	331

8.2.3 弹性模量与孔隙的关系	332	材料	351
8.2.4 强度与孔隙的关系	334	9.2.4 磁性材料	352
8.2.5 韧性与孔隙的关系	334	9.2.5 热应用	353
8.3 物理性能与孔隙的关系	335	9.2.6 粉末冶金高温材料	354
8.3.1 传导性	335	9.2.7 摩擦材料	354
8.3.2 磁性能	337	9.2.8 高密度及低密度合金材料的制备 与应用	355
8.3.3 热膨胀性	338	9.2.9 高硬度材料	357
8.3.4 导电性	338	9.2.10 耐蚀结构材料及应用	358
8.3.5 表面性能	339	9.2.11 耐磨材料的应用	360
8.4 工艺性能与孔隙的关系	342	9.2.12 复合材料的应用	360
8.4.1 加工性能与孔隙的关系	342	9.3 粉末冶金材料强韧化技术及应用 ...	363
8.4.2 粉末冶金产品热处理	343	9.3.1 粉末冶金弥散强化高温合金 ...	363
问题与习题	346	9.3.2 颗粒强化	369
参考文献	346	9.3.3 纤维强化	378
第9章 粉末冶金材料与技术应用	348	问题与习题	384
9.1 概述	348	参考文献	384
9.2 粉末冶金科学与技术应用	348	附录	386
9.2.1 材料结构与成分设计	348	附录 A 粉末冶金科学基础名词注释	386
9.2.2 粉末冶金多孔材料的应用	351	附录 B 材料常数与性质	393
9.2.3 粉末冶金电子及难熔金属			

第1章 绪 言

1.1 粉末冶金科学的基本定义

粉末冶金是由粉末制备、粉末成形、高温烧结以及加工热处理等重要过程组成的材料制备和生产的工程技术。粉末冶金科学主要研究材料制备与生产过程相关的科学现象和科学问题，如粉末微观结构与粉末制备方法之间的关系，粉末体在应力作用下密度变化的趋势，粉末材料在高温烧结时物质迁移的方式及致密化规律等。粉末具有如下特性：颗粒直径细小因而具有高比表面积；在重力作用下，由于粉末颗粒表现出的流动性，使其具有介于固体和液体之间的特性；在应力作用下，金属粉末会像致密固体金属一样，产生弹性变形和塑性变形；由于粉末压坯中存在大量孔隙，经高温烧结和热处理时，粉末颗粒之间发生冶金结合，烧结后可获得预期的性能。粉末冶金科学与技术是研究材料的工艺过程—微观结构—材料性能之间相互关系的科学，尤其注重研究粉末的特性以及这种特性与材料性能之间的关系和规律。

1.2 粉末冶金工艺

粉末冶金工艺主要包括粉末的制备、粉末的加工成形、粉末的烧结以及烧结后处理四个工序。工艺在不同的阶段涉及力学、化学、物理化学、材料科学基础等多门学科基本知识，以及应力作用下的弹塑性变形、高温条件下原子迁移扩散机理等基本规律的应用。

粉末冶金的生产工艺流程图如图 1-1 所示。首先是粉末制备和粉末特性表征，说明粉末

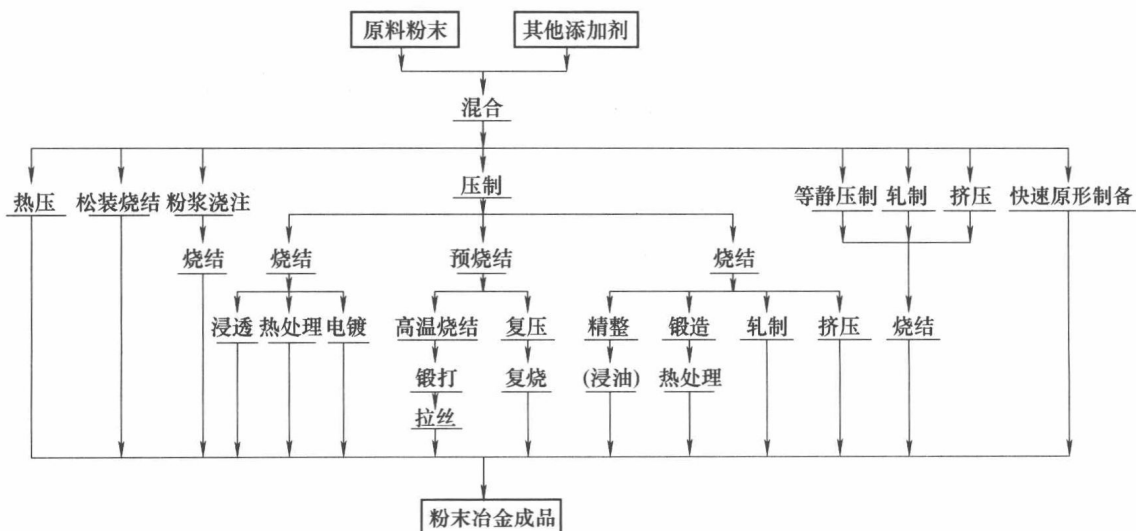


图 1-1 粉末冶金生产流程图

尺寸和形状等特性对材料产品性能具有至关重要的影响, 这个部分主要包括粉末的特性、制造以及分类。第二部分包括压制成形和高温烧结, 成形使粉体具有产品的形状, 高温烧结实现致密化, 使产品具有设计的性能。第三部分主要包括产品的最终性能以及微观结构。粉末的制造方法和粉末所具有的性能影响其后的烧结过程, 粉末的形状和尺寸则显著影响粉末的压制性能。粉末的特性、化学构成、加工过程与最终粉末冶金产品性能之间的关系如图 1-2 所示。

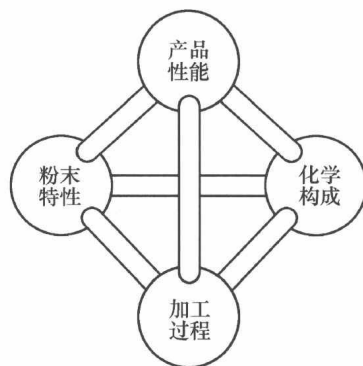


图 1-2 粉末的特性、化学构成、加工过程与最终粉末冶金产品性能之间的关系

1.3 粉末冶金发展简史

历史上世界各地都有使用金属粉末的记载, 如墨西哥印加人用金粉涂在宝石上使其颜色夺目, 埃及人使用铁粉的时间则可追溯到公元前 3000 年, 印度在公元前 300 年用 6.5t 还原铁粉制造了“德里柱”, 但使用具有系统工程技术制造的粉末冶金产品则始于 18 世纪。这个时期, 许多国家和地区通过压制和烧结技术大量制造铜、银币。近代粉末冶金的历史可追溯到 Coolidge 为爱迪生提供钨粉, 制造持久耐用的灯丝。随后, 硬质合金、多孔铜轴承和铜-石墨电触头材料制品在 19 世纪 30 年代相继产生, 到 19 世纪 40 年代, 粉末冶金可以制造出新的钨合金、铁基合金以及难熔合金。

1879 年爱迪生在他的照明系统中, 采用廉价且耐用的灯丝材料以适应热振效应。最初他在铂灯丝的基础上选择了碳化纤维。到 1905 年, 惠特尼 (Whitney) 通过优化金属碳化物灯丝后, 转向选用难熔金属灯丝钽和钨, 最初的钨丝是使用钨粉与有机粘结剂混合制造的, 粘结剂有利于挤压成形, 相当于现在的成形剂。烧结过程中粘结剂被燃烧掉, 粉末经烧结后加工成为直径细小的灯丝, 输出功率为 8lm/W, 亮度达到了碳灯丝的 2 倍。1909 年 Coolidge 使用钨粉和变形工艺制造了具有延展性的钨灯丝。1937 年发明了可卷曲的细小钨灯丝。相比较于其他材料, 钨灯丝具有更高的燃烧温度且能产生更多的光。随着加工技术的进步, 目前 1000g 钨粉可制造 15000 个 40W 灯泡的灯丝, 每只灯丝的寿命大约 1000h, 输出亮度为 13lm/W。

由于材料的应用领域不断扩大, 粉末冶金也从早期难熔金属钨灯丝的制造和应用扩大到利用新的低成本技术制造普通的铁基、铜基零部件。19 世纪 40 年代, 利用粉末冶金方法制造了一部分难熔金属及稀贵金属材料, 包括难熔金属和它们的合金 (Nb、W、Mo、Zr、Ti 和 Re), 以及铁基、铜基轴承等结构性金属材料。虽然至今粉末冶金方法生产的大部分结构部件是铁基零件, 但是, 粉末冶金技术也制造了大量用于核工业、航空、电学和磁学应用的功能性材料。

最初选择粉末冶金生产零部件主要考虑它们的低成本性质, 现在则已经与质量、性能、成本和生产率等全面联系起来。比如, 高温镍基超合金、高性能航空铝合金等。通过粉末冶金方法不仅创造了更好的材料经济, 而且可以控制微观结构及精确制造改性新材料。

由于粉末冶金具有三个突出优点: 低成本、形状独特性和高产品性能, 促使粉末冶金技

术和与之相关的科学得到了快速发展。

1.4 粉末冶金科学与技术的特点与应用

在金属材料的各种制造加工技术中，粉末冶金是重要的制造方法之一。粉末冶金之所以吸引人，就是因为它不仅能用来制造高质量、高精度的复杂部件，而且节省原材料、节约劳动成本，后者在当今的经济社会中尤为重要。粉末冶金是将具有某种特定粒度、形状和松装密度的粉末材料转变为具有高强度、高精度和高性能的材料的技术，其关键步骤包括粉末的制备、成形以及随后的烧结和热处理过程。粉末冶金技术具有能耗低、材料利用率高以及低成本等优点。粉末冶金在材料制备与加工过程中能在较大的范围内调节工艺，并逐渐取代传统的金属成形技术，生产具有不同微观结构和不同性能的新材料。与普通熔炼方法相比，粉末冶金具有如下特点：

1) 粉末冶金能生产用普通熔炼无法生产的具有特殊性能的材料。

① 能控制制品的孔隙度。例如，可生产各种多孔材料、多孔含油轴承等。

② 能利用金属和金属、金属和非金属的组合效果，生产具有各种特殊性能的材料。例如，钨-铜合金型的电触头材料、金属和非金属组成的摩擦材料等。

③ 能生产各种复合材料。例如，由难熔化合物和金属组成的硬质合金和金属陶瓷、弥散强化复合材料、纤维强化复合材料等。各类形状复杂的硬质合金工具如图 1-3 所示。

2) 粉末冶金方法生产的材料，与普通熔炼法相比，性能优越。

① 高合金元素含量粉末冶金材料的性能比熔炼法生产的合金材料要好。例如：粉末高速钢、粉末超合金可避免成分偏析，保证合金具有均匀的组织 and 稳定的性能，同时，这种合金具有细小的晶粒组织，使加工性能大为改善。

② 粉末冶金法还可用来生产难熔金属材料或制品。例如：钨、钼等一系列难熔金属，虽然可以用熔炼法制造，但所制产品比粉末冶金制品的晶粒要粗、性能要低。

③ 在制造机械零件方面，粉末冶金法是一种少切屑或无切屑的新工艺，可以大大减少机加工量，节约金属材料，提高劳动生产率。

粉末冶金工艺的发展赋予了材料许多特殊的性能，如根据材料性能的要求，可以设计和调整材料的元素组成和微观结构，并且适当控制各种组元在材料中的分布和材料的微观结构（包括强化相和孔隙度）。特别是许多合金材料可在熔点以下的温度进行制造，这解决了与铸造相关的成分偏析和其他缺陷的问题。

由于粉末冶金技术可以实现复杂零件的低成本制造，使得其在工业中的应用日益广泛。因此，越来越多的汽车零部件采用粉末冶金方法制造，汽车用粉末冶金齿轮如图 1-4 所示。粉末冶金产品的高精度和低制造成本符合汽车零部件的高效率生产、高产品精度和生产自动

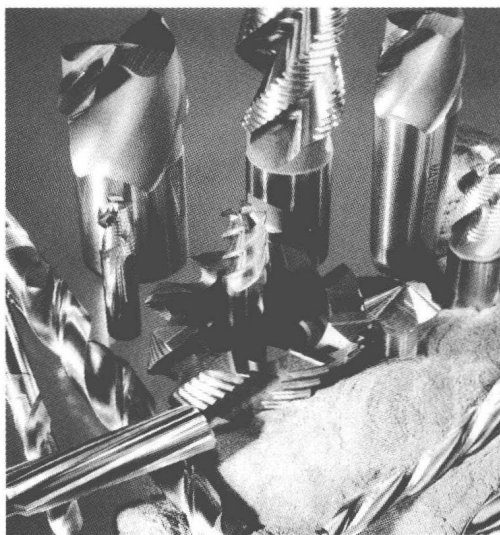


图 1-3 各类形状复杂的硬质合金工具

化的要求。如果采用铸造方法进行生产，则存在组织或成分偏析缺陷和加工周期长等不足，这样一方面提高了加工成本，另一方面也很难保证产品最终的尺寸精度。

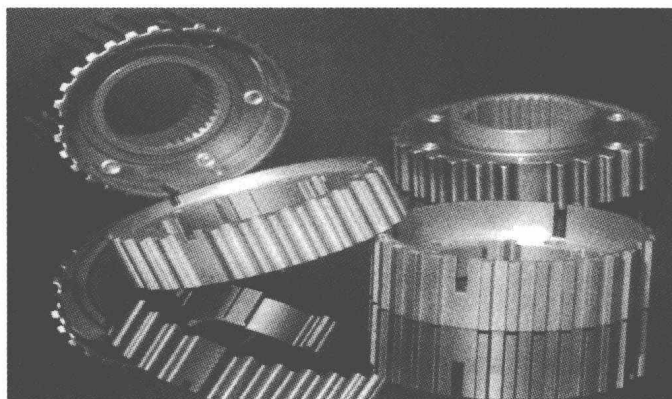
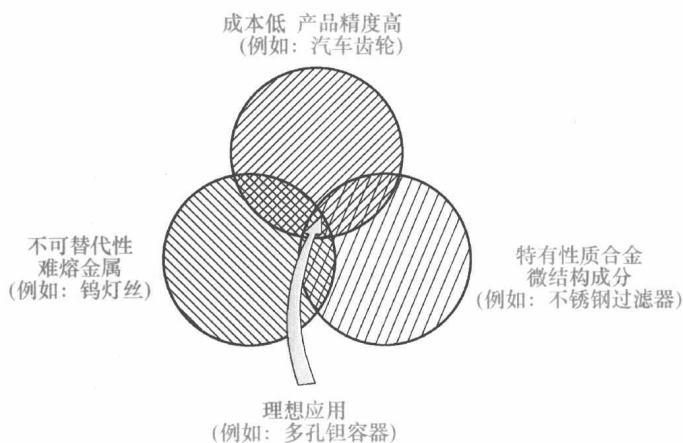


图 1-4 汽车用粉末冶金齿轮

图 1-5 给出了使用粉末冶金技术的三个主要因素，其中三个互相重叠的圆圈形象地描述了应用粉末冶金技术的基本原因。粉末冶金方法能生产出其他方法不能制造的具有独特性能和微观结构的产品，如多孔金属、氧化物弥散强化合金、陶瓷（陶瓷-金属复合物）和硬质合金。粉末冶金技术应用的一个典型例子是难熔金属的加工制造。难熔金属的熔点极高，至今仍然无法通过传统的熔炼方法将其熔化，再进行加工制造。然而粉末冶金却实现了难熔金属的制备与加工。不仅如此，粉末冶金技术还可以制造由非晶、准晶、微晶构成的具有许多奇特性能的新一类材料，这是因为粉末冶金能有效避免随着温度的升高而产生微观结构的破坏或晶粒粗化现象。



(圆圈的相互交叉处代表了未来粉末冶金的理想领域)

图 1-5 使用粉末冶金技术的三个主要因素

粉末冶金的应用非常广泛。就材料成分而言，有铁基粉末冶金、有色金属粉末冶金、稀有金属粉末冶金等。就材料性能而言，既有多孔材料，又有致密材料；既有硬质材料，又有软质材料（如孔隙度在 60% 以上的铁的硬度相当于铅）；既有高密度合金，也有泡沫材料

等。就材料组成而言,既有金属材料,又有复合材料。

粉末冶金材料及制品的应用见表 1-1。

表 1-1 粉末冶金材料及制品的应用

应用领域	粉末冶金材料及制品应用举例
采矿	硬质合金, 金刚石-金属组合材料
机械加工	硬质合金, 陶瓷刀具, 粉末高速钢
汽车制造	机械零件, 摩擦材料, 多孔含油轴承, 过滤器
拖拉机制造	机械零件, 多孔含油轴承
机床制造	机械零件, 多孔含油轴承
纺织机械	多孔含油轴承, 机械零件
机车制造	多孔含油轴承, 铜-钨合金
船舶制造	摩擦材料, 油漆用铝粉, 减摩材料
冶金矿山机械	多孔含油轴承, 机械零件
电机制造	多孔含油轴承, 铜-石墨电刷
精密仪器	仪表零件, 软磁材料, 硬磁材料
电气和电子工业	电触头材料, 真空电极材料, 电子封装材料
无线电和电视	磁性材料, 辉光材料
计算机工业	记忆元件, 磁性材料
五金和办公用品	锁零件, 缝纫机零件, 打字机零件
医疗器械	各种医疗器械植入材料
化学工业	过滤器, 防腐零件, 催化剂
石油工业	过滤器, 反应催化材料
军工	穿甲弹头, 炮弹箍, 军械零件
航空	摩擦片, 过滤器, 防冻用多孔材料, 粉末超合金
航天和火箭	发汗材料, 难熔金属及合金, 纤维强化材料
原子能工程	核燃料元件, 反应堆结构材料, 控制材料

1.5 粉末冶金的未来

分析应用于几种材料系统的粉末后可以发现,粉末冶金过去的成功在于它的经济性和特殊性。图 1-6 是常用金属粉末产品数量的相对比较图。这个图表明,低成本材料是常规工程机械中使用最多的材料。近年来,特种材料和难加工材料在提升制造技术的同时扩大了粉末冶金的用途,有望在粉末冶金新应用中保持同样的特性。粉末冶金保持继续增长的必要条件为:①能生产铁基结构合金的高精度、高质量、大体积产品;②高性能材料的致密化,主要是理想的致密度和力学性能;③难加工材料的制造,具有均一微观结构的高性能合金;④特殊合金组织均匀化,主要为包含有多相的合金材料;⑤非平衡材料的合成,例如非晶、微晶和亚稳合金;⑥具有独特形状的产品。

2000 年以来,全世界每年消耗金属粉末约 2×10^6 t,主要为铁粉和合金钢粉。如图 1-6 所示,铁粉大约是铝粉的 10 倍,铝粉大约是铜粉的 1.2 倍,铜粉大约是镍粉的 2 倍等。

随着粉末冶金知识的积累和技术的扩展,粉末冶金将应用于更多的领域,粉末冶金的低成本特点如果与其他因素,如强度、质量、密度控制以及独特的成形能力结合起来,将会带来更多的机遇与挑战。新型金属粉末研究和制造技术的发明也为未来更广泛的应用提供了希望,例如,快速致密磁性合金、新航空合金、改性的金属基材料,以及包含微观结构的高强度结构材料等。为了

满足经济发展对粉末冶金产品日益增长的需要,必须进一步扩大粉末冶金材料和制品的生产,改进生产工艺,提高产品质量。同时还必须进行深入的研究,发明新技术,解决各种特殊的结构材料、功能材料和复合材料的关键科学与技术问题,创造新的材料。随着科学技术的发展,对超高温、超高压、超高真空、超高磁场等极端条件下所需材料的要求越来越多。例如,航空、航天技术对高温材料提出了新要求。弥散强化超合金、新的纤维强化复合材料都是新时代要求的材料。随着新工艺、新技术、新材料的发展和基础理论研究的深入,粉末冶金研究与应用已呈现出一个崭新的局面。

粉末冶金领域在蓬勃发展,粉末冶金产品的应用量也连续增长,增长速度比其他金属制造领域更快。本书结合粉末冶金工艺技术,着重介绍粉末冶金科学原理和粉末冶金材料产品的基本研究和制造方法,以及粉末性能与材料制备技术参数之间的关系,粉末冶金材料制备工艺与材料性能之间的关系。

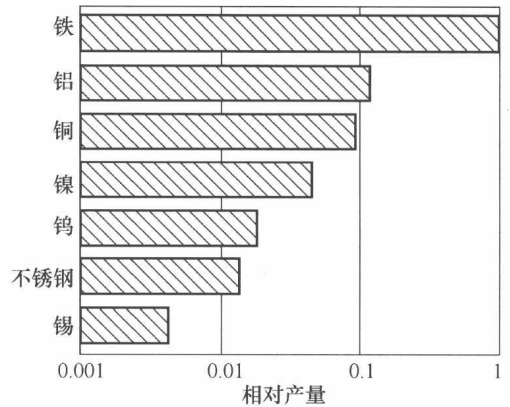


图 1-6 常用金属粉末产品数量的相对比较图

问题与习题

1. 粉末冶金产品在汽车工业中有许多用途,请列举三种汽车用粉末冶金产品。
2. 有什么方法可以取代粉末冶金技术制备钨灯丝,为什么电熔断器中不采用钨灯丝材料?
3. 粉末冶金一度被称为金属陶瓷 (Metal ceramics),试说明哪些工序类似于陶瓷产品制备。
4. 粉末冶金与陶瓷的主要差别是什么?这些差别是如何影响其生产过程的?
5. 粉末冶金的定义是什么?
6. 粉末冶金的工程含义是什么?
7. 减少加工成本是粉末冶金产品生产过程的重要方面,哪些步骤有利于减少产品加工成本?
8. 金属基复合材料,如 SiC 纤维强化铝合金的制备是粉末冶金的应用领域,你能说明复合材料制备方法吗?

参考文献

- [1] 黄培云. 粉末冶金原理 [M]. 北京:冶金工业出版社,1989.
- [2] 王盘鑫. 粉末冶金学 [M]. 北京:冶金工业出版社,1997.
- [3] 王零森. 特种陶瓷 [M]. 长沙:中南大学出版社,1994.
- [4] Lenel F V. Powder Metallurgy Principle and Applications [M]. New Jersey: Princeton, 1980.

-
- [5] Wang C Y, Zhu M. Nanostructured WC/Co Composite Powder Prepared by High Energy Ball Milling [J]. Scripta Materialia, 2003 (49): 1123.
- [6] van den Berg H. Trends and developments in hardmetal applications [J]. Metal Powder Report, 2007, 50 (1): 7.
- [7] Abe K, et al. Fabrication and Characterization of Electromagnetic Wave Adsorber [J]. Metal Powder Report, 2007, 54 (2): 86.
- [8] Shen B, et al. Fracture Origin and Intrinsic Strength of Ultrafine Titanium Carbonitride Based Cermets [J]. Int. J. Refract. Metals/Hard Mater, 2007, 25 (3): 256.
- [9] Fujikawa T. Recent Trends In the Technology of Hot Isostatic Pressing [J]. Metal Powder Report, 2006, 53 (11): 867.
- [10] German R M, Miura H. Status of Injection Moulding and Related Technologies in USA [J]. Metal Powder Report, 2006, 53 (9): 709.

第 2 章 粉体制备的原理与技术

2.1 概述

粉体制备是粉末冶金的第一重要步骤。随着粉末冶金材料和制品不断增多，质量不断提高，要求提供的粉末种类也越来越多。例如，从材质范围来看，不仅使用金属粉末，也使用合金粉末、金属化合物粉末；从粉末外形来看，要求使用各种形状的粉末，如生产过滤器时，就要求使用球形粉末；从粉末粒度来看，要求使用各种粒度的粉末，从粒度为 500 ~ 1000 μm 的粗粉末到粒度小于 0.1 μm 的纳米级粉末。

为了满足对粉末的各种要求，需要有各种各样生产粉末的方法，这些方法可以使金属、合金或者金属化合物从固态、液态或气态转变成粉末态。粉末制备的基本方法见表 2-1。

表 2-1 粉末制备的基本方法

生产方法		原 材 料	粉末产品举例				
			金属粉末	合金粉末	金属化合物粉末	包覆粉末	
物理 化学 法	还原	碳还原	金属氧化物	Fe, W			
		气体还原	金属氧化物及盐类	W, Mo, Fe, Ni, Co, Cu	Fe-Mo, W-Re	—	—
		金属热还原	金属氧化物	Ta, Nb, Ti, Zr, Th, U	Cr-Ni		
	还原 化合	碳化或碳与金属氧化物作用	金属粉末或金属氧化物			碳化物	
		氮化或氮气与金属氧化物作用	金属粉末或金属氧化物	—	—	氮化物	—
	气相 还原	气相氢还原	气态金属卤化物	W, Mo	Co-W, W-Mo 或 Co-W 涂层石墨	—	W/UO ₂
		气相金属热还原	气态金属卤化物	Ta, Nb, Ti, Zr			
	化学 气相 沉积	—	气态金属卤化物	—	—	碳化物或碳化物涂层 氮化物或氮化物涂层	—
	气相 冷凝 或 离 解	金属蒸气冷凝	气态金属	Zn, Cd	—	—	—
碳基热离解		气态金属碳基物	Fe, Ni, Co	Fe-Ni	—	Ni/Al, Ni/SiC	