



国家级实验教学示范中心工程创新实践课程系列教材

粉末冶金 制造工程

Fenmo Yejin Zhizao Gongcheng

» 申小平 主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国家级实验教学示范中心工程创新实践课程系列教材

粉末冶金 制造工程

Fenmo Yejin Zhizao Gongcheng

» 申小平 主编

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书较为全面地阐述了粉末冶金制造工程中的原料制备、粉末性能、成形制造、烧结、后处理等关键技术的基础知识,粉末冶金零件及模具的设计基础;简要介绍了粉末冶金产品质量控制与成本控制的相关内容。既有对成熟基础理论和实践经验的描述,也有对相关方面最新研究进展的介绍。

全书共分10章,内容包括:粉末冶金简介;粉末原料制备;粉末性能及其测定;成形制造;烧结技术;后处理技术;模具设计与制造;零件设计与案例;产品质量控制;产品成本控制等。

本书可作为大专院校材料、机械和冶金等学科或相关专业开设粉末冶金课程的教材,也可作为相关专业研究人员和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

粉末冶金制造工程/申小平主编. —北京:国防工业出版社,2015.6

国家级实验教学示范中心工程创新实践课程系列教材
ISBN 978-7-118-09826-6

I. ①粉… II. ①申… 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(2015)第104393号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本787×1092 1/16 印张19½ 字数440千字

2015年6月第1版第1次印刷 印数1—2000册 定价39.50元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

国家级实验教学示范中心 工程创新实践课程系列教材编写委员会

顾 问 傅水根

主 任 徐建成

副主任 居里锴

委 员 宗士增 黄晓华 姜 斌 王茂森 曾 山

鞠晨鸣 申小平 王景贵 张巨香 王建花

荆 琴 缪莹莹 周 成

序

“深化工程训练教学改革,提高工程实践教育质量”是我国当前高等工程教育改革的热点,也是难点问题。改革与发展工程训练已经成为工程人才培养质量提高的突破口。“面向工业界,面向世界,面向未来”培养造就一大批创新能力强、适应社会经济发展需要的卓越工程人才,对我国创新型国家建设具有重大意义。

我国高校工程训练起源于传统的工科机械类专业的金工实习和电子工艺实习,是随着我国高等工程教育改革发展起来的新型工程实践教育模式,符合教育发展规律,具有中国特色。在全国高校中,已评出36个国家级综合性工程训练示范中心。教育部关于示范中心评审的文件中明确提出,在高校建设工程训练示范中心的目的是:“根据国家社会经济发展,走新型工业化道路对现代工程人才的需求,引导学校加强学生实践能力和创新能力培养,营造突出综合性、实践性、设计性、研究性、创新性为特点的工程实践和创新环境;训练学生的动手能力,工程应用能力和工程管理能力等,使学生了解工程环境,建立工程意识,得到现代工业生产、工艺、技术、管理等方面的基本知识和基本训练,掌握操作和实验技能,激发创新精神,提高综合素质。”

工程训练的发展已经进入“转型期”。工程训练课程以“大工程观”为教育教学理念,贴近社会发展需求,贴近现代企业实际,贴近工程人才成长需要,侧重培养学生的工程实践及工程创新能力,具有多学科知识背景、良好的职业道德及社会责任感。南京理工大学工程训练中心从2007年起率先转变发展方式,教学改革取得了显著成果。2012年8月,教育部批准南京理工大学工程创新综合实验中心(工程训练中心)为“十二五”国家级实验教学示范中心;2014年2月,现代制造企业虚拟仿真实验教学中心获评为国家级虚拟仿真实验教学中心;2014年9月,“构建多学科交叉平台,实施项目教学,提升大学生工程创新能力”获得国家级教学成果奖,工程训练实现了发展方式的转变。

工程训练教材建设是工程训练课程发展的基础性工程。我们以大学生工程创新能力培养为核心,以“信息化与工业化深度融合”为方向,以多学科交叉融合为方法,构建工程训练系列教材内容体系,内容涉及现代制造工程基础、模具数字化设计制造技术、粉末冶金制造工程、3D打印技术及其应用、智能机器人技术和产品生命周期管理(PLM)等,形成从基础工程到工程综合创新课程群。教材编写突出工程实践性、系统性、创新性显著特征,让学生在真实的工程环境中学习工程技术,体验工程文化,锻炼工程实践创新能力。

教材编写委员会

2014年8月

前 言

粉末冶金制造工程就是研究金属粉末的加工过程,包括粉末的制造、粉末的特征以及金属粉末转变成成为有用工程材料或工程部件的过程。它包含了工程材料、成形技术、加工工艺、制造自动化、产品质量、成本控制等诸多学科。

随着粉末冶金材料及其制品的应用领域不断扩大,粉末冶金新材料、新技术、新工艺、新装备的不断涌现,粉末冶金制造工程在社会经济发展中有着不可取代的地位。为了使学生学习和掌握粉末冶金基础知识、粉末冶金工程应用和未来发展的需要,南京理工大学组织从事这方面研究工作的教师和粉末冶金行业专家编写了本教材。

本书编写以粉末冶金共性的理论知识为基础,机械零件制造技术为重点,突出实际应用为原则。通过工程案例分析,将理论知识与工程应用融为一体,深入浅出、循序渐进、学以致用。满足不同专业的学生,综合知识学习和综合创新能力培养的需要。

本书共分 10 章,内容包括:粉末冶金简介;粉末原料制备;粉末性能及其测定;成形制造;烧结技术;后处理技术;模具设计与制造;零件设计与案例;产品质量控制;产品成本控制等。

本书由南京理工大学组织编写。参加本书编写工作的有:扬州信特科技有限公司叶桂斌(第 2 章);华东粉末冶金公司王士平(第 4 章 4.3~4.4 节、第 8 章 8.3.2~8.3.3 节);扬州保来得实业有限公司官劲松(第 6 章);南京理工大学申小平(第 1 章、第 4 章 4.1~4.2、第 5 章、第 7 章 7.1~7.3 节、第 8 章 8.1~8.2 节、第 9 章、第 10 章)、朱亚平(第 3 章)、黄韦(第 5 章 5.3.3 和 5.4)、赵雁(第 7 章 7.4~7.7 节、第 8 章 8.3.1 节和第 9 章 9.3.2 节)。全书由申小平审定。

在编写过程中得到了粉末冶金行业诸多专家的帮助企业的支持,在此表示感谢。

本书可作为大专院校材料、机械和冶金等学科或相关专业开设粉末冶金课程的教材,也可作为相关专业研究人员和工程技术人员的参考书。

由于编者水平有限,难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

编 者

2014 年 8 月

目 录

第1章 粉末冶金简介	1
1.1 粉末冶金基本概念	1
1.2 粉末冶金工艺的优越性	3
1.3 粉末冶金材料及制品的分类及应用	4
1.4 粉末冶金发展历程	7
思考题	10
参考文献	10
第2章 粉末原料制备	11
2.1 物理化学法	11
2.1.1 物理法	11
2.1.2 化学法	12
2.2 机械法	18
2.2.1 雾化法	18
2.2.2 机械粉碎法	22
2.3 粉末合批及混合	26
2.3.1 混合质量要求	26
2.3.2 粉末混合工艺及影响因素	26
2.4 粉末的直接应用	31
2.4.1 食品添加剂、食品防腐、保鲜及医药用粉末	31
2.4.2 颜料、油墨和复印用粉末	31
2.4.3 燃料、烟火和炸药用粉末	32
2.4.4 磁性探伤用粉末	32
2.4.5 焊药、表面涂层用粉末	32
2.4.6 其他方面用粉末	33
思考题	33
参考文献	34

第3章 粉末性能及其测定	35
3.1 粉末及粉末性能	35
3.1.1 粉末体和粉末颗粒	35
3.1.2 粉末性能	35
3.1.3 粉末颗粒的组织	36
3.2 金属粉末的取样和分样	36
3.3 粉末化学成分	37
3.3.1 氢损测定	37
3.3.2 酸不溶物测定	38
3.4 粉末物理性能	38
3.4.1 颗粒形状	38
3.4.2 颗粒密度	39
3.4.3 显微硬度	40
3.4.4 粉末粒度及测定	40
3.4.5 粉末的比表面	41
3.5 粉末工艺性能	41
3.5.1 金属粉末密度	42
3.5.2 流动性	43
3.5.3 压制性(压缩性和成形性)	43
思考题	47
参考文献	47
第4章 成形制造	48
4.1 模压成形原理	48
4.1.1 模压成形的基本概念	48
4.1.2 压制过程力的分析	49
4.1.3 粉末在压制过程中的变化规律	53
4.1.4 压坯密度分布	55
4.2 成形工艺	64
4.2.1 成形过程	64
4.2.2 成形模具及模架	69
4.2.3 成形压机	80
4.2.4 成形操作	85
4.3 压坯质量控制	86

4.3.1	影响压坯质量的因素	86
4.3.2	常见压坯缺陷	90
4.3.3	压坯质量的检查	92
4.4	其它成形方法简介	93
4.4.1	等静压成形	93
4.4.2	三向压制成形	94
4.4.3	粉末轧制成形	95
4.4.4	粉浆浇注成形	95
4.4.5	凝胶注模成形	96
4.4.6	粉末热锻成形	96
4.4.7	挤压成形	97
4.4.8	高能成形(爆炸成形)	97
4.4.9	注射成形	98
4.4.10	粉末流延成形	98
4.4.11	楔形(循环)压制成形	99
4.4.12	粉末温压成形	99
4.4.13	温模成形	102
	思考题	103
	参考文献	104
第5章	烧结技术	105
5.1	烧结的基本原理	105
5.1.1	概述	105
5.1.2	压坯烧结中的变化及其本质	106
5.1.3	固相烧结	111
5.1.4	液相烧结	113
5.1.5	活化烧结	118
5.2	烧结工艺	119
5.2.1	铁基材料的烧结过程及组织转变	120
5.2.2	烧结炉	124
5.2.3	烧结气氛	130
5.2.4	烧结操作	132
5.3	烧结质量控制	134
5.3.1	烧结条件对烧结体质量的影响	134
5.3.2	孔隙度对烧结体质量的影响	140

5.3.3 烧结质量分析	141
5.4 特种烧结	149
5.4.1 松装烧结	150
5.4.2 放电等离子体烧结	150
5.4.3 微波烧结	151
5.4.4 电火花烧结	151
思考题	152
参考文献	153
第6章 后处理技术	154
6.1 精整、精压、复压	154
6.1.1 精整	154
6.1.2 精压	156
6.1.3 复压	156
6.1.4 精整、精压的应用	157
6.2 切削加工	157
6.2.1 车削与镗削	158
6.2.2 刨削、铣削、磨削	158
6.2.3 钻孔、铰孔与攻丝	159
6.2.4 挤光、珩磨与精研	159
6.3 接合	160
6.3.1 机械接合	160
6.3.2 焊接	160
6.3.3 嵌镶和粘接	161
6.4 去毛刺	162
6.4.1 滚磨光饰	162
6.4.2 振动光饰	162
6.4.3 磨料喷射光饰	162
6.4.4 离心或高能法光饰	162
6.5 表面处理	163
6.5.1 封孔处理	163
6.5.2 电镀	164
6.5.3 达克罗	165
6.5.4 电泳	166
6.5.5 水蒸气处理	168

6.6 其它处理	170
6.6.1 清洗	170
6.6.2 含油处理	170
6.6.3 硫化处理	171
6.7 热处理	171
6.7.1 热处理概念	171
6.7.2 热处理过程中的组织变化	172
6.7.3 粉末冶金零件热处理工艺特点	173
6.7.4 铁基结构零件常用热处理工艺类型	174
思考题	182
参考文献	182
第7章 模具设计与制造	183
7.1 模具设计原则及步骤	183
7.1.1 模具设计原则	183
7.1.2 模具设计内容和步骤	183
7.2 模具主要零件结构设计	184
7.2.1 成形模具主要零件结构设计	184
7.2.2 精整模具主要零件结构设计	188
7.3 模具主要零件尺寸设计	189
7.3.1 模具尺寸计算步骤	189
7.3.2 模具参数选择	190
7.3.3 模具尺寸计算方法	194
7.4 模具设计案例	202
7.4.1 产品分析	202
7.4.2 工艺流程设计	202
7.4.3 工艺计算	203
7.4.4 模具设计	204
7.5 模具制造	208
7.5.1 模具制造的一般要求	208
7.5.2 模具主要零件的材料选择及热处理	209
7.5.3 模具主要零件制造工艺	212
7.5.4 模具零件检测方法	223
7.6 模具的安装与调试	226
7.6.1 模具的安装	226

7.6.2 模具的调试	227
7.7 常见的模具损坏类型及分析	228
7.7.1 影响模具寿命的因素	228
7.7.2 模具损坏类型	228
7.7.3 模具损坏分析及改进措施	229
思考题	231
参考文献	231
第8章 零件设计与案例	232
8.1 粉末冶金零件设计考虑因素	233
8.1.1 尺寸	233
8.1.2 形状复杂程度	234
8.1.3 材料系统	239
8.1.4 粉末压坯密度	239
8.1.5 尺寸精度及位置精度	241
8.2 粉末冶金零件设计流程	245
8.3 粉末冶金零件设计案例	246
8.3.1 含油轴承	246
8.3.2 粉末冶金齿轮	250
8.3.3 粉末冶金复杂结构件开发	256
思考题	259
参考文献	259
第9章 产品质量控制	260
9.1 产品质量	260
9.1.1 产品质量概念	260
9.1.2 产品质量内涵	260
9.2 质量管理	261
9.2.1 质量管理概念	261
9.2.2 全面质量管理	262
9.2.3 质量管理体系	262
9.3 产品质量控制	263
9.3.1 计算机辅助工艺过程设计(CAPP)	263
9.3.2 工艺装备设计	267
9.4 典型零件质量分析与控制	272

9.4.1 零件工况分析及技术要求	272
9.4.2 原材料选择	274
9.4.3 生产工艺	276
9.4.4 质量分析与控制	280
9.4.5 检测结果	282
思考题	284
参考文献	284
第 10 章 产品成本控制	285
10.1 概述	285
10.2 影响成本因素	286
10.2.1 粉末冶金工艺	286
10.2.2 粉末及混料成本	288
10.2.3 模具成本	288
10.2.4 设备折旧	290
10.2.5 制造费用	290
10.2.6 劳务费用	291
10.3 降低成本的途径	291
10.3.1 改变设计	291
10.3.2 延长模具使用寿命	292
10.3.3 提高设备效率	292
10.3.4 新型金属或合金粉末的应用	292
10.3.5 生产订单大小	292
10.4 成本计算	294
10.4.1 三种估算方法	294
10.4.2 零件价格计算	295
10.4.3 零件报价案例	295
思考题	296
参考文献	297

1.1 粉末冶金基本概念

粉末冶金 (Powder Metallurgy, PM) 是一门制造金属粉末,并以金属粉末为主要原料用成形—烧结法制造材料与制品的技术学科。

粉末冶金制造工程就是研究金属粉末的加工过程,包括粉末的制造、粉末的特征以及金属粉末转变成为有用工程材料或工程部件的过程。它包含了工程材料、成形技术、加工工艺、制造自动化、产品质量、成本控制等诸多学科。

粉末冶金工程设计过程包括了材料、零件几何形状、制造工艺等方面的决策,这些决策需要考虑技术和经济性方面的因素,如图 1-1 所示。在零件设计阶段,如果 PM 被作为期望的工艺方法嵌入到设计阶段,成本将会大大降低。

粉末冶金的典型工艺过程是:

- (1) 原料粉末的制取和准备;
- (2) 将金属粉末制成所需形状的坯块;
- (3) 将坯块在物料主要组元熔点以下的温度进行烧结,使粉末颗粒间冶金连接;
- (4) 通过后处理得到一些特殊的性能。

粉末冶金结构零件的混合、压制、烧结及后处理过程如图 1-2 所示。其中混料是将基本原

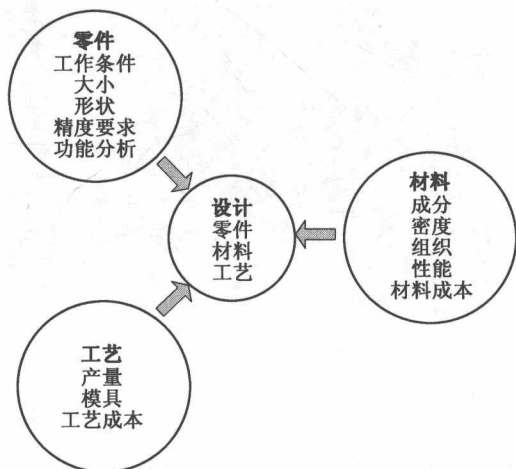
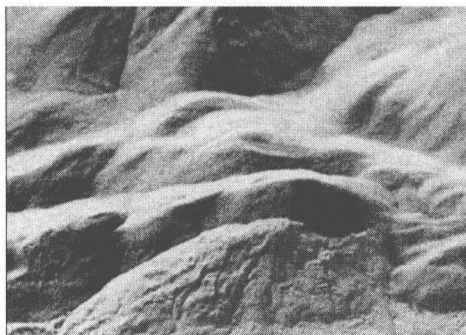
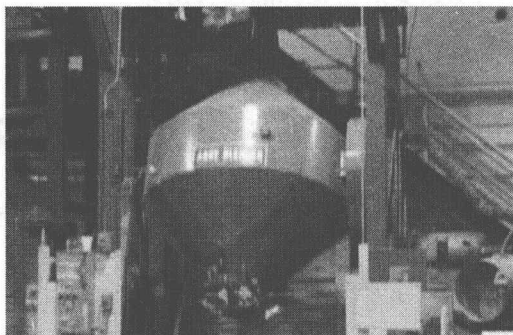


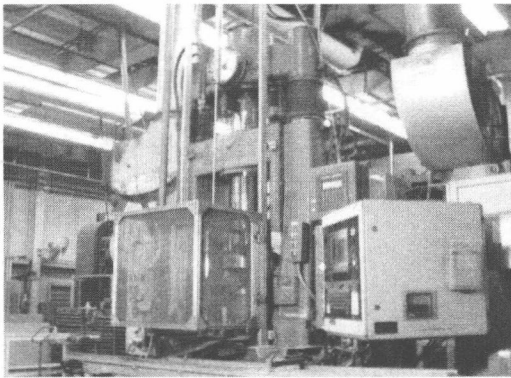
图 1-1 粉末冶金产品设计中需要考虑的因素



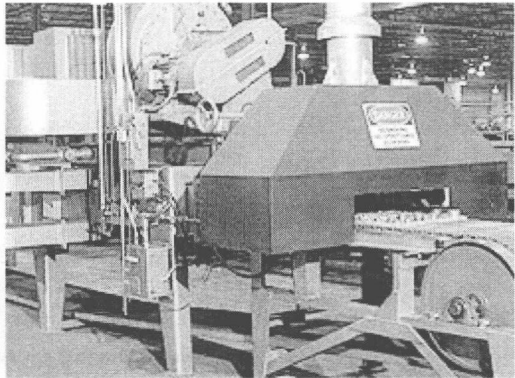
(a) 粉末原料



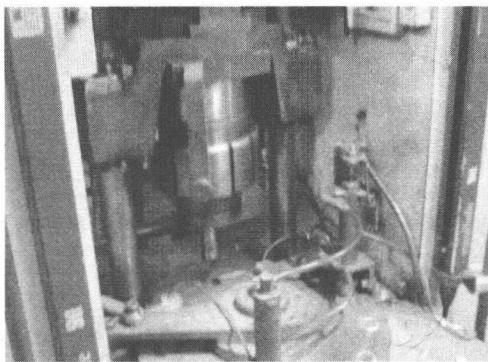
(b) 混料



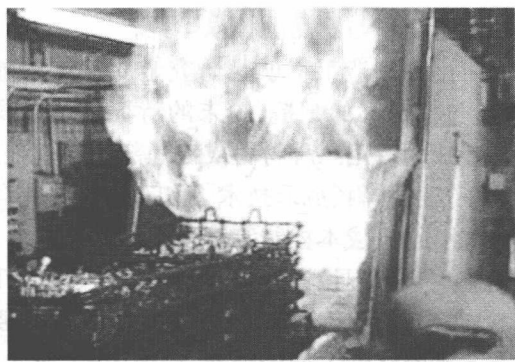
(c) 压制成形



(d) 烧结



(e) 精整

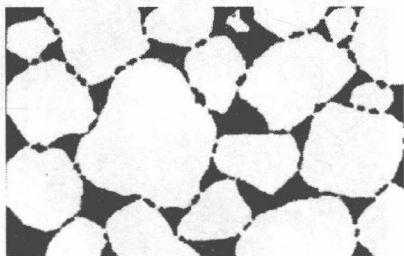


(f) 可控气氛热处理

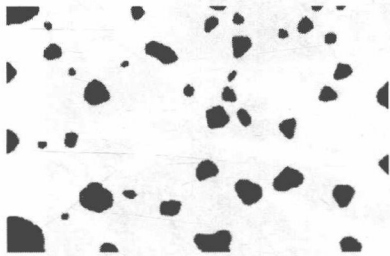
图 1-2 典型的粉末冶金零件生产过程

料粉与添加的合金化粉、润滑剂混合均匀,压制成形是用液压式或机械式压机压制成形,烧结是在低于主要组分金属熔点的温度下,于保护气氛或真空状态下,在烧结炉中进行烧结,精整是将烧结零件进行精整或复压,以改变尺寸精度,提高密度与强度,可控气氛热处理是对零件进行无氧化脱碳加热,或进行渗碳等化学热处理,提高性能。

经过上述工序过程改变了粉末的形状、性能以及它的组织结构而成为最终的产品。图 1-3 为粉末冶金零件的微观组织。



(a) 坯块



(b) 烧结后

图 1-3 微观组织

1.2 粉末冶金工艺的优越性

粉末冶金是一项柔性化程度高的制造技术。在材料、形状、应用和生产方式的选择方面具有很多特殊的能力。其工艺的优越性体现在以下三个方面(图1-4):

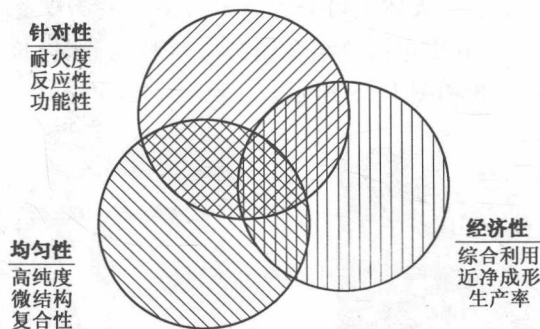


图1-4 粉末冶金的三大显著特点

(1) 针对性。绝大多数难熔金属及其合金、假合金(如W-Cu)、多孔材料(孔隙度可控)、复合材料(金属陶瓷和硬质合金、弥散强化、纤维强化等)、特种陶瓷只能用粉末冶金方法来制造。

(2) 均匀性。可以最大限度地减少合金成分偏聚,消除粗大、不均匀的铸造组织。可制取高纯度材料、多种类型的复合材料和高性能非平衡材料。因而与熔铸法相比自由度高、性能更优越。

(3) 经济性。可以充分利用尾矿、炼钢污泥、轧钢铁鳞、回收废旧金属作原料,有效进行材料再生和综合利用。可以实现净近成形和自动化批量生产,从而,可有效降低生产的资源和能源消耗。

因而粉末冶金是特殊高性能新材料制备的核心技术,也是一门节材、节能、短流程复杂零件的绿色制造技术。图1-5为美国金属粉末工业联合会(MPIF)专门为粉末冶金产品设计的绿色标志。



图1-5 公认的绿色技术

利用粉末冶金制造的机械零件具有比机加工、铸锻工艺制造零件更节能、更节材、批量生产效率更高、成本更经济等特点,图1-6和图1-7为各种零件制造方法的材料利用率和能耗的对比情况。

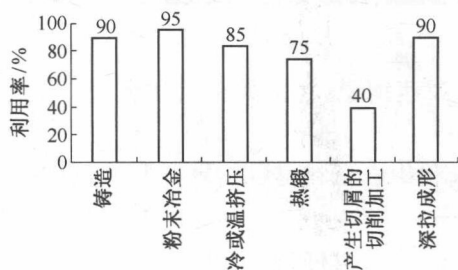


图1-6 机械零件制造方法的材料利用率对比

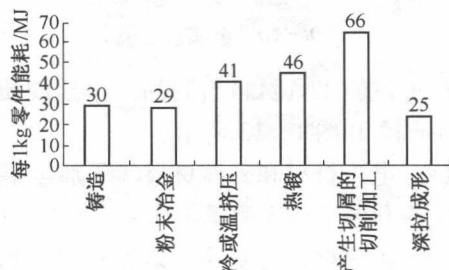


图1-7 机械零件制造方法的能耗对比

当然,粉末冶金工艺的不足之处是粉末成本较高,制品的大小和形状受到一定的限制,烧结件的韧性较差等。

1.3 粉末冶金材料及制品的分类及应用

粉末冶金制造的材料与制品,大体上可分为以下六类:

(1) 粉末冶金机械零件。其中包括烧结金属减磨材料与制品、烧结金属结构零件、烧结金属摩擦材料及制品。如图 1-8 和图 1-9 所示。

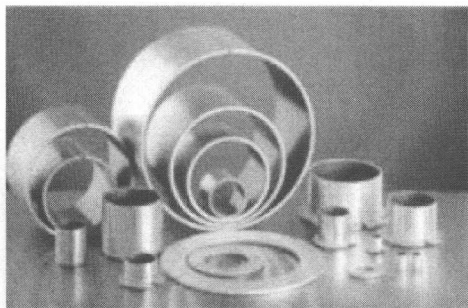


图 1-8 减磨零件

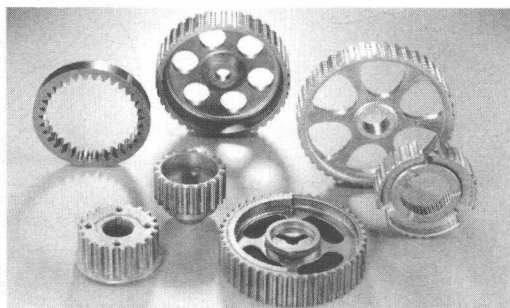


图 1-9 结构零件

(2) 多孔材料与制品。如金属过滤器、热交换(冷却)材料、泡沫金属。见图 1-10 和图 1-11 所示。

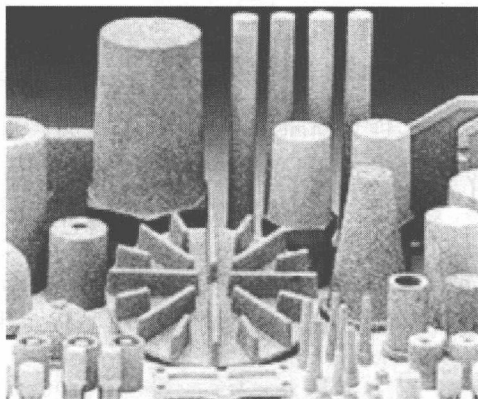


图 1-10 金属过滤器

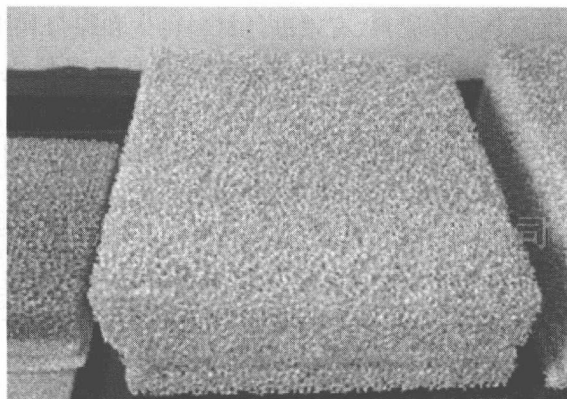


图 1-11 泡沫材料

(3) 硬质工具材料与制品。包括硬质合金、粉末高速钢、复合工具材料和金刚石工具等。见图 1-12 和图 1-13 所示。

(4) 电工材料和磁性材料。分别包括电触头合金和集电材料,软磁、硬磁和铁氧体等。见图 1-14 和图 1-15 所示。

(5) 耐热材料与制品。诸如钨、钼、钽、铌、陶瓷、各类强化材料。见图 1-16 和图 1-17 所示。