

粉末冶金手册

(下 册)

主编 韩凤麟

副主编 张荆门 曹勇家 殷为宏

HANDBOOK OF POWDER METALLURGY



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

粉末冶金手册

(下 册)

主 编 韩凤麟

副主编 张荆门 曹勇家 殷为宏

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2012

内 容 提 要

本手册由冶金工业出版社邀请国内粉末冶金行业 80 余位知名专家学者和科技人员共同编写。本手册分为上、下两册,共 10 篇。上册内容包括概论,金属粉末的生产方法与特性,金属粉末与粉末冶金材料性能测试方法标准集要,成形与固结,铁、钢粉末冶金材料;下册内容包括非铁粉末冶金材料,粉末冶金功能材料,难熔金属材料及其制品,硬质合金工具与耐磨零件生产,粉末冶金零件应用。下册附录中列出了法定计量单位、元素物理性能及常用工程数据与资料,粉末冶金术语及超硬磨料制品标准。本手册可供从事粉末冶金材料生产与科研工作的工程技术人员、科研人员使用,也可供大专院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

粉末冶金手册. 下册/韩凤麟主编. —北京:冶金工业出版社,2012. 6
ISBN 978-7-5024-5929-1

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 093004 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 yjcs@cnmip.com.cn

策 划 曹胜利 责任编辑 李培禄 美术编辑 李 新 版式设计 葛新霞
责任校对 王贺兰 刘 倩 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5929-1

三河市双峰印刷装订有限公司印刷;冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销
2012 年 6 月第 1 版,2012 年 6 月第 1 次印刷

787 mm × 1092 mm 1/16;74.25 印张;1802 千字;1144 页

268.00 元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿信箱:tougao@cnmip.com.cn

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)

《粉末冶金手册》编写人员

(按姓氏笔画排列)

万明远	株洲硬质合金集团有限公司	高级工程师
万新梁	北京有色金属研究总院	教授级高级工程师
马邵宏	株洲硬质合金集团有限公司	教授级高级工程师
王世平	华东粉末冶金厂	高级工程师
王立明	株洲硬质合金集团有限公司	助理工程师
王尔德	哈尔滨工业大学	教授
元家钟	中国钢研科技集团公司	教授级高级工程师
毛样武	北京航空航天大学	博士后
孔卫宏	株洲硬质合金集团有限公司	工程师
卢广锋	中国钢研科技集团公司	高级工程师
申小平	南京理工大学	高级工程师
吕大铭	中国钢研科技集团公司	教授级高级工程师
向兴碧	江洲粉末冶金科技有限公司	教授级高级工程师
刘允中	华南理工大学	教授
刘建辉	株洲硬质合金集团有限公司	高级工程师
刘新宇	株洲硬质合金集团有限公司	工程师
许雄亮	株洲硬质合金集团有限公司	高级工程师
孙宗君	山东金珠粉末注射制造有限公司	高级工程师
李小明	中国钢研科技集团公司	高级工程师
李曲波	昆明贵金属研究所	教授级高级工程师
李丽娅	中南大学	教授
李 勇	株洲硬质合金集团有限公司	工程师
李树杰	北京航空航天大学	教授
李祖德	北京市粉末冶金研究所	编审
李振强	山东金珠粉末注射制造有限公司	高级工程师
肖玉麟	株洲硬质合金集团有限公司	教授级高级工程师
余怀民	株洲硬质合金集团有限公司	技师
宋月清	北京有色金属研究总院	教授级高级工程师
张义文	中国钢研科技集团公司	教授级高级工程师

张外平	株洲硬质合金集团有限公司	工程师
张廷杰	西北有色金属研究院	教授级高级工程师
张荆门	株洲硬质合金集团有限公司	教授级高级工程师
张 颢	株洲硬质合金集团有限公司	工程师
陈宏霞	中国钢研科技集团公司	教授级高级工程师
陈响明	株洲硬质合金集团有限公司	高级工程师
陈振华	湖南大学	教授
陈 鼎	湖南大学	教授
林 涛	北京科技大学	教授
林晨光	北京有色金属研究总院	教授级高级工程师
果世驹	北京科技大学	教授
易建宏	中南大学	教授
罗 龙	株洲硬质合金集团有限公司	工程师
金华涛	山东金珠粉末注射制造有限公司	总经理
周书助	湖南工业大学	教授
周增林	北京有色金属研究总院	博士/高级工程师
屈广林	株洲硬质合金集团有限公司	高级工程师
孟小卫	株洲硬质合金集团有限公司	工程师
赵 璇	株洲硬质合金集团有限公司	助理工程师
郝 叔	中国钢研科技集团公司	高级工程师
胡茂中	株洲硬质合金集团有限公司	教授级高级工程师
胡治国	山东金珠粉末注射制造有限公司	高级工程师
胡湘辉	株洲硬质合金集团有限公司	工程师
柳学全	中国钢研科技集团公司	教授级高级工程师
钟奇志	株洲硬质合金集团有限公司	工程师
钟海林	中国钢研科技集团公司	高级工程师
侯开太	江洲粉末冶金科技有限公司	教授级高级工程师
侯经鸣	株洲硬质合金集团有限公司	技师
俞守耕	昆明贵金属研究所	教授级高级工程师
祝 捷	中国稀土学会	高级工程师
祝景汉	中国钢研科技集团公司	教授级高级工程师
姚萍屏	中南大学	教授
聂洪波	北京科技大学	博士
贾成厂	北京科技大学	教授
夏志华	北京有色金属研究总院	教授级高级工程师

徐 涛	株洲硬质合金集团有限公司	高级工程师
殷为宏	西北有色金属研究院	教授级高级工程师
卿 林	株洲硬质合金集团有限公司	工程师
曹勇家	中国钢研科技集团公司	教授级高级工程师
崔 舜	北京有色金属研究总院	教授级高级工程师
符泽卫	昆明贵金属研究所	教授级高级工程师
彭 文	株洲硬质合金集团有限公司	高级工程师
蒋飞岳	株洲硬质合金集团有限公司	高级工程师
蒋 龙	中国钢研科技集团公司	教授级高级工程师
韩凤麟	中国机械通用零部件协会粉末冶金分会顾问	教授级高级工程师
程秀兰	株洲硬质合金集团有限公司	高级工程师
曾凡同	山东金珠粉末注射制造有限公司	高级工程师
曾克里	北京矿冶研究总院	研究员
谢 明	昆明贵金属研究所	教授级高级工程师
廖际常	西北有色金属研究院	教授级高级工程师
廖寄乔	中南大学	教授
熊剑飞	株洲硬质合金集团有限公司	高级工程师
滕荣厚	中国钢研科技集团公司	教授级高级工程师
颜练武	株洲硬质合金集团有限公司	工程师

前言



粉末冶金虽然产业不大,但粉末冶金产品已进入人们日常生活的各个领域;没有粉末冶金制品,现代文明的许多成就与生活设施都将是难以想象的。

粉末冶金技术由于本质上具有“可持续性”,因此,被公认为是一门绿色技术。美国商务部将“可持续性制造”,也就是“绿色技术”定义为“用于制造产品的创新技术,无污染,节能与保护自然资源,经济稳定,对雇员、社区及消费者安全”。

在粉末冶金产业中,粉末冶金机械零件产业是一个快速发展的绿色产业。粉末冶金零件的主要市场是汽车制造业。据统计,2006 年全球粉末冶金汽车零件的潜在市场为 535248 ~ 816480 t。从 1977 年到 2007 年,北美平均每辆汽车的粉末冶金零件用量从 7.7 kg 增长到 19.5 kg。据美国 MPIF (金属粉末工业联合会)统计,截至 2010 年,全世界在常用汽车中使用的粉末冶金零件已达 325 种,1000 多件。粉末冶金零件之所以能在汽车产业中得到广泛应用,主要是由于粉末冶金具有直接成形为最终形状或接近最终形状的能力,材料利用率很高,从而使能源消耗最少,也就是人们常说的节材、省能。在机械零件生产中常用的一些金属成形工艺的材料利用率对比见图 1,能耗对比见图 2。

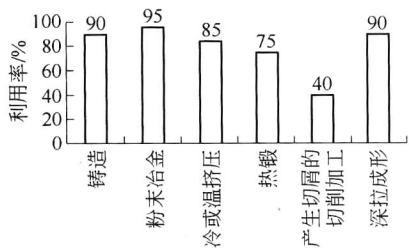


图 1 金属成形工艺的材料利用率对比

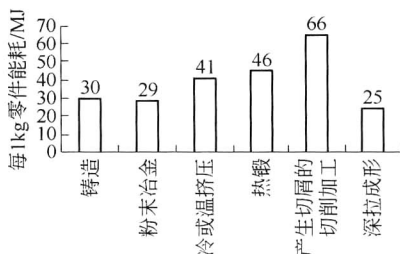


图 2 金属成形工艺的能耗对比

我国汽车产业进入 21 世纪以来,从 2000 年的汽车产量 208 万辆跃升到了 2009 年的 1379 万辆(见图 3),2010 年更高达 1826 万辆,中国已成为世界上最大的粉末冶金汽车零件市场。为促进我国粉末冶金零件产业,特别是粉末冶金汽车零件的发展,在这部手册的第 10 篇中专门评价了粉末冶金零件在汽车、摩托车,以及农机与园艺机械、家用电器、液压件、医疗器

械、兵器、核能技术及航空、航天等领域的应用。在第3篇中介绍了金属粉末与粉末冶金材料的ISO测试方法标准和美国MPIF的全部最新粉末冶金零件材料标准。

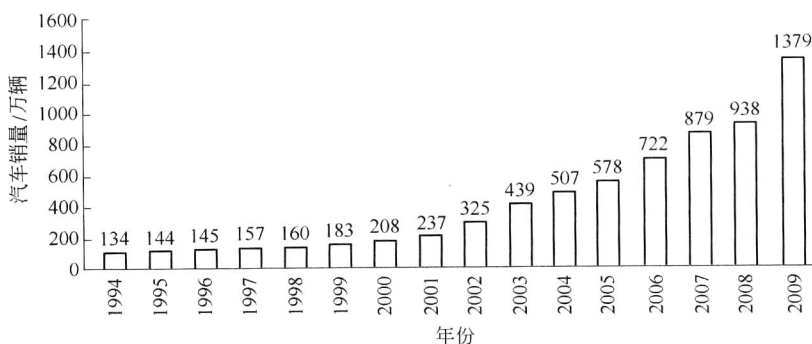


图3 1994~2009年间我国的汽车销量

(数据来源:汽车工业协会)

粉末冶金技术的可持续性优势还在于,粉末冶金零件材料的冶金化学组成几乎是变化无穷的,可为具体应用制造独特的合金,通过调整物理、化学及磁性性能,可使产品的使用性能最大化。

粉末冶金的另外两个重要传统产业是难熔金属材料与制品和硬质合金工具与耐磨零件。这两类产品基本上都只能用粉末冶金技术生产。这部手册第9篇专门评述了钨、钼、钽、铌、锆及其合金的生产、应用及发展。

特别值得指出的是,我国硬质合金产业界资深专家、国务院特殊津贴获得者张荆门教授级高级工程师和徐涛高级工程师,组织株洲硬质合金集团有限公司生产一线的教授级高级工程师、高级工程师、工程师、技师共28人,一起为本手册编写了第2篇第10章难熔金属及其碳化物粉末的生产和第9篇硬质合金工具与耐磨零件生产。这些资料全面反映了我国硬质合金工具产业的生产与应用的现状,极具参考价值。

这部手册是冶金工业出版社组织编写的。参加编写的有中国钢研科技集团公司、北京有色金属研究总院、北京矿冶研究总院、北京科技大学、北京航空航天大学、北京粉末冶金研究所、中南大学、哈尔滨工业大学、湖南大学、湖南工业大学、南京理工大学、西北有色金属研究院、昆明贵金属研究所、株洲硬质合金集团有限公司、江洲粉末冶金科技有限公司、山东金珠粉末注射制造有限公司、华东粉末冶金厂、中国机械通用零部件工业协会粉末冶金分会等18个单位的专家、教授、科技人员共83名。最后,全书由韩凤麟教授进行统稿。

这部手册主要供从事粉末冶金零件、硬质合金工具与耐磨零件、难熔金属

材料生产与应用的企业的有关人员,以及从事粉末冶金、金属材料、机械制造、汽车制造、摩托车制造、家用电器、农机、医疗器械、军工、核技术、航空航天、3C产业等领域的技术与管理使用,也可供相关科研人员、理工院校的师生参考。

在这部手册即将出版之际,对组织编写这部手册的冶金工业出版社,对四年多以来一直关心、支持及为编写这部手册付出了辛勤汗水的各位专家、教授、科技人员及编辑致以衷心的感谢。由于编者水平有限,文中不当之处敬请读者指正,并提出宝贵意见。

韩凤麟

2012年1月

总 目 录



上 册

第 1 篇 概论	1
第 1 章 粉末冶金发展史	1
第 2 章 全球粉末冶金产业市场进展	12
第 3 章 难熔金属及其合金	35
第 4 章 粉末注射成形与液相烧结科学基础的建立	42
第 5 章 M. Ю. 巴利新的粉末冶金理论	51
第 6 章 铜基粉末冶金的过去、现状及前景	68
第 7 章 放电等离子体烧结	82
第 8 章 贵金属(金、铂、钯、银)粉末的发展、制取及应用	112
第 9 章 粉末冶金材料在 3C 产业热管中的应用	130
第 2 篇 金属粉末的生产方法与特性	147
第 1 章 生产方法和铁、钢粉末生产	153
第 2 章 羰基金属粉末	272
第 3 章 机械合金化	293
第 4 章 铜粉与铜合金粉生产	317
第 5 章 锡粉生产	342
第 6 章 钛粉与钛合金粉生产	345
第 7 章 超细粉末与纳米粉末	356
第 8 章 贵金属粉末生产	359
第 9 章 复合粉末生产	363
第 10 章 难熔金属及其碳化物粉末的生产	373
第 11 章 金属粉末的爆炸性、自燃性及毒性	423
第 12 章 金属粉末的合批、预混合及黏结剂处理	443

第3篇 金属粉末与粉末冶金材料性能测试方法标准集要	459
第1章 金属粉末的测试方法	459
第2章 金属粉末测试方法国际标准概要	464
第3章 ISO 粉末冶金材料性能测试方法标准要点	493
第4章 ISO 5755:2001(E)《烧结金属材料规范》(GB/T 19076—2003)	521
第5章 美国 MPIF 标准 35《粉末冶金结构零件材料标准》(2009 年版)概要	533
第6章 美国 MPIF 标准 35《粉末冶金自润滑轴承材料标准》(2010 年版)概要	563
第7章 美国 MPIF 标准 35《金属注射成形零件材料标准》(2007 年版)概要	578
第8章 MPIF 标准 35《P/F 钢零件材料标准》(2000 年版)概要	585
第4篇 成形与固结	595
第1章 粉末成形工艺	595
第2章 粉末注射成形	662
第3章 喷射成形	690
第4章 快速制造原型零件的粉末冶金方法	705
第5章 烧结工艺与技术	719
第6章 熔渗与组合烧结	827
第7章 铁基粉末冶金零件的高温烧结	862
第8章 热固结	871
第9章 金属粉末的冷热等静压	954
第5篇 铁、钢粉末冶金材料	987
第1章 铁基粉末冶金材料	987
第2章 粉末冶金铜熔渗钢	1005
第3章 粉末冶金不锈钢	1020
第4章 粉末冶金高速工具钢	1045

下 册

第6篇 非铁粉末冶金材料	1
第1章 粉末冶金铜基合金材料	1

第2章 弥散强化铜基复合材料	29
第3章 弥散强化材料	44
第4章 粉末冶金高温合金的现状与发展趋势	48
第5章 粉末铝合金及其复合材料	66
第6章 粉末冶金钛合金与复合材料	83
 第7篇 粉末冶金功能材料	107
第1章 贮氢合金	107
第2章 粉末冶金磁性材料	122
第3章 铁基软磁材料的发展与应用	163
第4章 稀土永磁材料与应用	170
第5章 粉末冶金电触头材料	212
第6章 粉末冶金多孔性金属材料	233
 第8篇 难熔金属材料及其制品	323
第1章 钨及钨合金	323
第2章 钼及钼合金	367
第3章 钽及钽合金	396
第4章 铌及铌合金	427
第5章 铪及铪合金	469
 第9篇 硬质合金工具与耐磨零件生产	479
第1章 概述	479
第2章 混合料制备	487
第3章 普通模压成形	522
第4章 其他成形方法	545
第5章 烧结理论基础	563
第6章 硬质合金烧结工艺	581
第7章 烧结后处理	610
第8章 硬质合金的物理-力学性能	619
第9章 硬质合金的成分、显微组织及用途	631
第10章 金属陶瓷	638
第11章 钢结硬质合金	654
第12章 硬质合金涂层	676

第 13 章 硬质合金成分分析	702
第 14 章 硬质合金的性能与金相检验	728
第 15 章 金刚石工具	746
 第 10 篇 粉末冶金零件应用	 765
第 1 章 粉末冶金结构零件在汽车产业中的应用	765
第 2 章 粉末锻造连杆	794
第 3 章 金属注射成形(MIM)零件在汽车中的应用	807
第 4 章 粉末冶金零件在摩托车产业中的应用	816
第 5 章 烧结金属含油轴承	827
第 6 章 粉末冶金齿轮	853
第 7 章 粉末冶金摩擦材料	891
第 8 章 粉末冶金零件在农业、草地与园艺机械中的应用	911
第 9 章 粉末冶金零件在液压系统中的应用	932
第 10 章 粉末冶金在航空、航天中的应用	966
第 11 章 粉末冶金在核能技术中的应用	978
第 12 章 粉末冶金零件在兵器中的应用	984
第 13 章 金属注射成形技术(MIM)在军工行业的应用	1003
第 14 章 硬质合金的性能与金相检验	1011
第 15 章 日用电器与机具中的粉末冶金零件	1029
 附录	 1061
附录 1 法定计量单位、元素物理性能及常用工程数据与资料	1061
附录 2 粉末冶金术语及超硬磨料制品标准	1089

目 录

第 6 篇 非铁粉末冶金材料

第 1 章 粉末冶金铜基合金材料	1
1.1 铜粉	3
1.1.1 电解	3
1.1.2 雾化	3
1.1.3 铜氧化物还原	4
1.1.4 湿法冶金	4
1.2 铜合金粉	5
1.2.1 预混合法	5
1.2.2 预合金化法	5
1.3 粉末压制	6
1.4 烧结	7
1.4.1 活化烧结	9
1.4.2 液相烧结	9
1.4.3 均匀化(相互扩散)	10
1.4.4 致密化	10
1.5 铜基合金的性能与应用	12
1.5.1 纯铜	12
1.5.2 青铜	13
1.5.3 黄铜和锌白铜	16
1.5.4 铜镍合金	17
1.5.5 铜铅合金	17
1.5.6 铜基摩擦材料	17
1.5.7 铜基触头材料	18
1.5.8 铜基电刷材料	20
1.5.9 铜熔渗零件	21
1.6 氧化物弥散强化铜材料	21
1.6.1 氧化物弥散强化铜材料的制造	22
1.6.2 氧化物弥散强化铜材料的性能	22
1.6.3 应用	26

参考文献	27
第2章 弥散强化铜基复合材料	29
2.1 弥散强化理论	29
2.1.1 屈服强度	29
2.1.2 加工硬化	30
2.1.3 蠕变强度	30
2.2 性能特点	31
2.3 Al_2O_3 弥散强化铜基复合材料	31
2.3.1 制备工艺	31
2.3.2 Cu-Al 合金内氧化分析	34
2.3.3 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料产品性能	37
2.3.4 影响 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料性能的因素	39
2.3.5 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料的应用	43
第3章 弥散强化材料	44
3.1 弥散强化的概念与方法	44
3.2 弥散强化铝合金	44
3.2.1 铝-锂合金	44
3.2.2 高强度耐蚀铝合金	44
3.2.3 烧结铝粉	45
3.2.4 机械合金化铝合金	45
3.2.5 金属间化合物弥散强化铝合金	45
3.3 粉末冶金高温合金	45
3.3.1 速凝高温合金	45
3.3.2 氧化物弥散强化高温合金	45
3.3.3 机械合金化高温合金	46
3.4 粉末冶金工具钢	46
第4章 粉末冶金高温合金的现状与发展趋势	48
4.1 粉末冶金高温合金优点	48
4.2 粉末冶金高温合金的生产工艺	49
4.2.1 粉末制备工艺	49
4.2.2 成形工艺	51
4.3 粉末冶金高温合金的发展	51
4.3.1 第一代粉末冶金高温合金	55
4.3.2 第二代粉末冶金高温合金	56
4.3.3 第三代粉末冶金高温合金	56
4.3.4 第四代粉末高温合金	62

4.4 我国粉末高温合金的现状·····	62
4.5 粉末高温合金的缺陷·····	63
4.5.1 热诱导孔洞·····	63
4.5.2 原始颗粒边界·····	63
4.5.3 夹杂物·····	64
4.6 粉末高温合金盘件的检验·····	64
4.7 粉末冶金高温合金的发展趋势·····	64
第5章 粉末铝合金及其复合材料 ·····	66
5.1 粉末铝合金及其复合材料的发展概况·····	66
5.2 普通粉末铝合金·····	67
5.3 快速凝固铝合金·····	69
5.3.1 粉末高比强铝合金·····	69
5.3.2 粉末耐热铝合金·····	71
5.3.3 粉末高强度铝合金·····	73
5.3.4 快速凝固铝硅耐磨合金·····	75
5.4 喷射沉积铝基复合材料·····	77
参考文献·····	81
第6章 粉末冶金钛合金与复合材料 ·····	83
6.1 粉末冶金钛合金坯料的制造工艺·····	83
6.1.1 钛合金粉的制造工艺·····	83
6.1.2 粉末固结方法·····	84
6.2 钛合金的特点与分类·····	84
6.3 粉末冶金钛合金制品的力学性能·····	86
6.3.1 元素粉混合法(BE)坯件的力学性能·····	86
6.3.2 预合金化坯件的力学性能·····	92
6.3.3 改善材料性能的后压制处理·····	97
6.4 钛基复合材料与金属间化合物·····	97
6.4.1 复合材料·····	97
6.4.2 钛铝化合物·····	100
6.5 粉末冶金钛合金的发展趋势·····	100
6.6 粉末冶金钛合金的应用·····	101
参考文献·····	105

第7篇 粉末冶金功能材料

第1章 贮氢合金 ·····	107
1.1 贮氢合金的理论基础·····	107

1.1.1	化学和热力学原理	107
1.1.2	吸氢反应机理	108
1.1.3	电化学原理	109
1.1.4	氢原子的位置	109
1.1.5	晶体结构	110
1.2	贮氢合金的评价	111
1.2.1	基本性质	111
1.2.2	应具备的条件	112
1.3	AB ₅ 型稀土镍系贮氢电极合金	113
1.3.1	LaNi ₅ 合金	113
1.3.2	成分优化	113
1.3.3	非化学计量比	115
1.3.4	制备方法	117
1.3.5	制粉技术	119
1.3.6	表面改性处理	120
1.4	贮氢合金的应用	121
第2章	粉末冶金磁性材料	122
2.1	概述	122
2.1.1	物质的磁性	122
2.1.2	铁磁物质的特性	122
2.1.3	磁性材料的分类	123
2.2	粉末冶金软磁材料	125
2.2.1	粉末冶金软磁材料的基础	125
2.2.2	粉末冶金烧结软磁材料	126
2.2.3	磁粉芯	130
2.3	粉末冶金永磁材料	133
2.3.1	粉末冶金永磁材料的基础	133
2.3.2	烧结铝镍钴永磁材料	135
2.3.3	烧结稀土永磁材料	136
2.4	黏结永磁材料	147
2.4.1	黏结永磁的分类及特点	148
2.4.2	黏结永磁体的制备工艺	148
2.4.3	黏结永磁体的性能及应用	151
2.5	铁氧体磁性材料	152
2.5.1	铁氧体的晶体结构和内禀磁特性	153
2.5.2	永磁铁氧体	154
2.5.3	软磁铁氧体	157
	参考文献	161