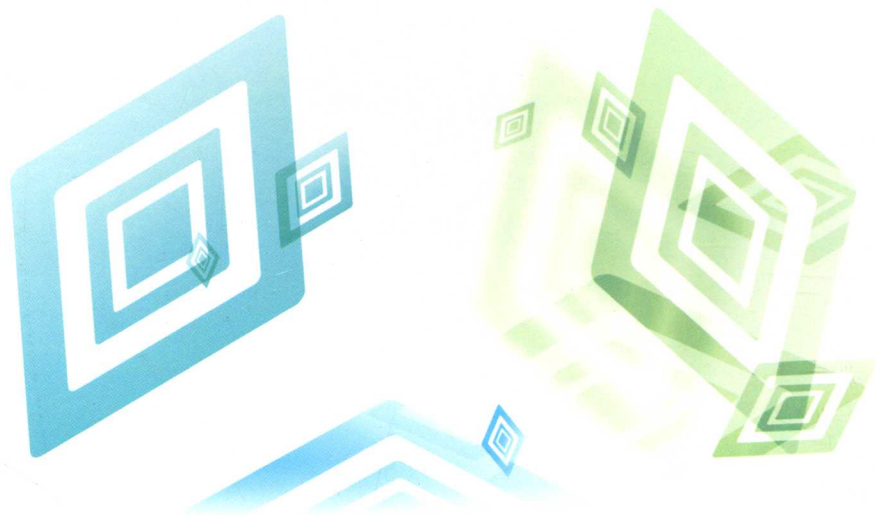




高职高专“十二五”规划教材

国家骨干高职院校建设“冶金技术”项目成果



稀土永磁材料制备技术

XITU YONGCI CAILIAO ZHIBEI JISHU

(第2版)

主编 石富 刘国征



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

要 容 内

高职高专“十二五”规划教材
国家骨干高职院校建设“冶金技术”项目成果

稀土永磁材料制备技术

(第2版)

主编 石富 刘国征



北京

冶金工业出版社

2013

内 容 提 要

本书为高等职业技术教育材料类专业教学用书。书中以钕铁硼永磁材料为主线,兼顾其他稀土永磁材料,系统介绍了稀土永磁材料的制备原理和技术。内容包括稀土永磁材料的发展以及与高新技术的关系;铁磁学的基本原理与技术磁参量;稀土永磁化合物的晶体结构、内禀磁特性、相图与显微结构;稀土永磁材料的熔炼与铸锭、制粉、磁场取向与成型、烧结与热处理、磁体加工与检验等基本生产过程的工艺理论、操作技术、工艺参数与磁体磁性能的关系;钕铁硼永磁材料和钐钴系永磁材料的品种、规格和磁性能,以及材料的成分、显微结构、工艺与磁性能之间的关系;此外还介绍了正在发展中的新型稀土铁系永磁材料。

本书在叙述上由浅入深,理论联系实际,内容充实,标准规范,实用性强,可以作为高等和中等职业技术学历教育的教学用书,也可作为职业资格和岗位技能培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

稀土永磁材料制备技术/石富,刘国征主编.—2版.—北京:
冶金工业出版社,2013.12

高职高专“十二五”规划教材·国家骨干高职院校建设
“冶金技术”项目成果

ISBN 978-7-5024-6560-5

I. ①稀… II. ①石… ②刘… III. ①稀土永磁材料—
材料制备—高等职业教育—教材 IV. ①TM273.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第030513号

出版人 谭学余

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 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 宋 良 美术编辑 杨 帆 版式设计 葛新霞

责任校对 石 静 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6560-5

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京印刷一厂印刷

2007年1月第1版,2013年12月第2版,2013年12月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16;17印张;406千字;253页

42.00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)

内蒙古机电职业技术学院
国家骨干高职院校建设“冶金技术”项目成果
教材编辑委员会

- 主任** 白培珠 内蒙古自治区经济和信息化委员会 副主任
内蒙古机电职业技术学院校企合作发展理事会 理事长
张美清 内蒙古机电职业技术学院 院长
内蒙古机电职业技术学院校企合作发展理事会 常务副理事长
- 副主任** 任玉祥 内蒙古自治区经济和信息化委员会原材料工业处 处长
校企合作发展理事会冶金分会 理事长
王文儒 内蒙古大唐国际再生资源开发有限公司 常务副总经理
孙振斌 内蒙古大唐国际再生资源开发有限公司 副总经理
侯永旺 鄂尔多斯电力冶金股份有限公司 党委书记 副总经理
贾振国 包头钢铁集团公司 纪委书记
修世敏 内蒙古霍林河煤业集团有限责任公司 副总经理
孙喜平 内蒙古机电职业技术学院 副院长
内蒙古机电职业技术学院校企合作发展理事会 秘书长
- 委员** 邓忠贵 戴英飞 周立平 内蒙古大唐国际再生资源开发有限公司
闫学良 吴彦宁 大唐内蒙古鄂尔多斯铝硅科技有限公司
夏长林 于 鹏 包头钢铁集团稀土高科股份有限公司
赵占峰 张俊龙 包头钢铁集团华美稀土高科有限公司
贾佼成 鲍永强 中铝集团包头铝业集团公司
马海疆 高 琪 鄂尔多斯集团化工集团公司
刘国征 武 斌 包钢稀土研究院
史晓光 张 敬 内蒙古方圆科技有限公司
曹新胜 张建军 内蒙古光泰铝业有限公司
陈 强 董拥军 包头亚新隆顺特钢有限公司
石 富 刘敏丽 张秀玲 内蒙古机电职业技术学院
- 秘书** 王 优 (010-64046165, wangy82@aliyun.com) 冶金工业出版社

序

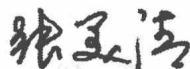
2010年11月30日我院被国家教育部、财政部确定为“国家示范性高等职业院校”骨干高职院校立项建设单位。在骨干院校建设工作中，学院以校企合作体制机制创新为突破口，建立与市场需求联动的专业优化调整机制，形成了适应自治区能源、冶金产业结构升级需要的专业结构体系，构建了以职业素质和职业能力培养为核心的课程体系，校企合作完成专业核心课程的开发和建设任务。

学院冶金技术专业是骨干院校建设项目之一，是中央财政支持的重点建设专业。学院与内蒙古大唐国际再生资源开发有限公司共建“高铝资源学院”，合作培养利用高铝粉煤灰的“铝冶金及加工”方向的高素质高级技能型专门人才；同时逐步形成了“校企共育，分向培养”的人才培养模式，带动了钢铁冶金、稀土冶金、材料成型等专业及其方向的建设。

冶金工业出版社集中出版的这套教材，是国家骨干高职院校建设“冶金技术”项目的成果之一。书目包括校企共同开发的“铝冶金及加工”方向的核心课程和改革课程，以及各专业方向的部分核心课程的工学结合教材。在教材编写过程中，面向职业岗位群任职要求，参照国家职业标准，引入相关企业生产案例，校企人员共同合作完成了课程开发和教材编写任务。我们希望这套教材的出版发行，对探索我国冶金职业教育改革的成功之路，对冶金行业高技能人才的培养，能够起到积极的推动作用。

这套教材的出版得到了国家骨干高职院校建设项目经费的资助，在此我们对教育部、财政部和内蒙古自治区教育厅、财政厅给予的资助和支持，对校企双方参与课程开发和教材编写的所有人员表示衷心的感谢！

内蒙古机电职业技术学院 院长



2013年10月

第2版前言

本书为高等职业技术教育冶金类专业“十二五”规划教材，是按照教育部高等职业技术教育高技术、高技能人才的培养目标和规格，依据内蒙古机电职业技术学院校企合作发展理事会冶金分会和冶金专业建设指导委员会审定的“稀土永磁材料制备技术”教学大纲，在总结近几年教学经验并结合骨干高职院校建设“冶金技术”项目成果，征求相关企业技术人员意见的基础上编写而成的。

本书第1版于2007年由冶金工业出版社出版，此次修订力求体现职业技术教育特色，注重以职业（岗位）需求为依据，贯彻“基于工作过程”的教学原则。第Ⅰ篇“稀土永磁材料基础”三个单元作为重要的基础知识，为学有余力和深入研究应用的学生提供必不可少的学材；第Ⅱ篇“稀土永磁材料制备过程”四个单元为校内教学的主体内容，建议采用项目化教学，使学生具备稀土永磁材料制备过程各个工作岗位的知识和技能；第Ⅲ篇“稀土永磁材料产品性能及发展”三个单元的内容，供学生就业后结合具体工作岗位提升能力参考。

本书叙述上由浅入深、理论联系实际，内容充实、标准规范、实用性强，可以作为职业教育的教学用书，也可作为职业资格和岗位技能培训教材。

内蒙古机电职业技术学院石富和包钢稀土研究院刘国征任本书主编，并编写第1~3章，内蒙古机电职业技术学院贾锐军编写第4、5章；包钢稀土研究院武斌编写第6、7章，刘国征编写第8~10章；全书由刘国征任主审。在编写和审稿过程中，得到了稀土产业界和兄弟院校许多同仁的大力支持和热情帮助，得到了内蒙古机电职业技术学院领导和同事们的积极支持，在此一并表示衷心的感谢。借此机会，对所有为本书提供资料、建议和帮助的各方人士，也表示诚挚的谢意。

限于作者的水平，书中难免有错误和疏漏之处，诚请读者批评指正。

编者

2013年10月

第1版前言

本书为高等职业技术教育材料类专业教学用书，是按照教育部高职高专教育专业人才的培养目标，依据内蒙古机电职业技术学院材料与能源教学指导委员会审定的“稀土永磁材料制备技术”教学大纲，在总结近几年教学经验并征求相关企业技术人员意见的基础上编写而成的，并列入教育部《2004~2007年职业教育教材开发编写计划》和中国钢铁工业协会冶金高等职业教育教材规划。

为适应稀土材料工程技术这个新专业的教学需要，“稀土永磁材料制备技术”作为主干课程之一，其教学基本目的是：熟悉稀土永磁材料生产的基本过程；熟悉稀土永磁材料的成分、结构、工艺、磁性能及其相互之间的关系；熟悉生产流程中各个岗位的工艺原理和基本机械装备；具有在生产一线操作的基本知识和能力；具有开发新材料，采用新工艺、新设备、新技术的初步能力。

永磁材料是一种重要的功能材料，在当代高新技术迅速发展的过程中，永磁材料已成为计算机、网络信息、通讯、航空航天、交通、办公自动化、家电、人体健康与保健等技术领域的重要物质基础。以钕铁硼为代表的稀土永磁材料是磁性能最高、应用最广、发展速度最快的新一代永磁材料。本书以钕铁硼永磁材料为主线，兼顾其他稀土永磁材料，介绍其制备原理和技术。全书共为10章。第1章绪论介绍稀土永磁材料的发展、制备工艺以及与高新技术的关系；第2章是永磁材料磁学基础，扼要地叙述了铁磁学的基本原理以及技术磁参量与影响因素等内容；第3章介绍了稀土永磁化合物的晶体结构、内禀磁特性、相图与显微结构，是认识稀土永磁材料的成分、结构、工艺与性能之间关系的物理学与材料学基础；第4~7章分别论述了稀土永磁材料的熔炼与铸锭、制粉、磁场取向与成型、烧结与热处理、磁体加工与检验等基本生产过程的工艺原理和技术，重点讨论工艺理论、工艺参数与磁体磁性能的关系以及工艺操作技术；第8章和第9章分别论述钕铁硼永磁材料和钐钴系永磁材料的品种、规格和磁性能，以及材料的成分、显微结构、工艺与磁性能之间关系的规律；第10章介绍了正在发展中的新型稀土铁系永磁材料，即热变形各向异性稀土铁永磁材料、稀土铁系间隙化合物永磁材料和双相纳米晶复合交换耦合永磁材料。

本书力求体现职业技术教育特色，注重以职业（岗位）需求为依据，贯彻

目 录

第 I 篇 稀土永磁材料基础

| | |
|------------------------------|----|
| 1 永磁材料概述 | 1 |
| 1.1 磁性材料的概念 | 1 |
| 1.2 永磁材料的分类及牌号表示方法 | 2 |
| 1.3 永磁材料的发展 | 3 |
| 1.4 永磁材料的应用 | 5 |
| 1.5 稀土永磁材料的制备工艺 | 6 |
| 1.6 NdFeB 永磁材料 | 7 |
| 1.6.1 NdFeB 永磁材料与高新技术 | 7 |
| 1.6.2 NdFeB 永磁材料的进展 | 8 |
| 1.6.3 中国 NdFeB 永磁材料的发展 | 9 |
| 2 永磁材料磁学基础 | 11 |
| 2.1 物质的磁性 | 11 |
| 2.1.1 磁现象与磁学量 | 11 |
| 2.1.2 材料磁性的类型 | 13 |
| 2.1.3 原子磁矩 | 15 |
| 2.2 铁磁性物质的自发磁化 | 16 |
| 2.2.1 3d 金属的自发磁化 | 16 |
| 2.2.2 稀土金属的自发磁化与磁有序 | 17 |
| 2.2.3 稀土金属化合物的自发磁化 | 18 |
| 2.3 铁磁体的磁畴结构与技术磁化 | 18 |
| 2.3.1 影响磁畴结构的能量 | 19 |
| 2.3.2 磁畴壁与畴壁能 | 20 |
| 2.3.3 磁畴结构 | 20 |
| 2.3.4 铁磁体的技术磁化 | 22 |
| 2.4 磁化过程的临界场与矫顽力 | 23 |
| 2.4.1 畴壁移动的临界场 | 23 |
| 2.4.2 磁矩转动的临界场 | 25 |
| 2.4.3 反磁化核的形核场 | 26 |

| | |
|---|----|
| 2.5 永磁材料的技术磁参量 | 27 |
| 2.5.1 饱和磁化强度 M_s | 27 |
| 2.5.2 剩磁 B_r | 28 |
| 2.5.3 各向异性场 H_A | 29 |
| 2.5.4 矫顽力 | 30 |
| 2.5.5 磁能积 $(BH)_{\max}$ | 32 |
| 2.5.6 永磁体的工作点与负载线 | 33 |
| 2.5.7 永磁材料的稳定性 | 35 |
| 3 稀土永磁材料的晶体结构、相图及组织 | 39 |
| 3.1 稀土永磁化合物的晶体结构 | 39 |
| 3.1.1 CaCu_5 型晶体结构 | 39 |
| 3.1.2 $\text{Th}_2\text{Ni}_{17}$ 型和 $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$ 型晶体结构 | 39 |
| 3.1.3 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 化合物的晶体结构 | 40 |
| 3.1.4 $\text{RE}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$ 和 $\text{REFe}_{12-x}\text{MN}_y$ 间隙化合物晶体结构 | 41 |
| 3.2 稀土永磁化合物的内禀磁特性 | 42 |
| 3.2.1 稀土永磁化合物的居里温度 | 42 |
| 3.2.2 稀土永磁化合物的分子磁矩与磁化强度 | 43 |
| 3.2.3 稀土永磁化合物的各向异性 | 45 |
| 3.3 稀土-钴永磁合金相图与显微组织 | 46 |
| 3.3.1 $\text{RE}-\text{Co}$ 二元系合金相图 | 46 |
| 3.3.2 SmCo_5 永磁合金的显微组织 | 46 |
| 3.3.3 高矫顽力 $\text{Sm}(\text{Co}, \text{Cu}, \text{Fe}, \text{Zr})_{7.4}$ 合金的显微组织 | 48 |
| 3.4 稀土-铁-硼系永磁合金相图与显微组织 | 49 |
| 3.4.1 $\text{Nd}-\text{Fe}$ 二元系和 $\text{Fe}-\text{B}$ 二元系相图 | 49 |
| 3.4.2 $\text{Nd}-\text{Fe}-\text{B}$ 三元系相图 | 51 |
| 3.4.3 $\text{Nd}-\text{Fe}-\text{B}$ 三元系的变温截面图 | 52 |
| 3.4.4 $\text{Nd}-\text{Fe}-\text{B}$ 三元系非平衡状态图 | 53 |
| 3.4.5 $\text{Pr}-\text{Fe}-\text{B}$ 三元系相图 | 55 |
| 3.4.6 烧结 NdFeB 系永磁合金的显微组织 | 56 |
| 第 II 篇 稀土永磁材料制备过程 | |
| 4 稀土永磁合金的熔炼及铸锭 | 62 |
| 4.1 真空感应熔炼原理 | 62 |
| 4.1.1 真空感应电炉设备 | 63 |
| 4.1.2 感应电炉的工作原理 | 64 |

| | | |
|-------|-------------------------|-----|
| 4.1.3 | 感应电炉的熔化特点 | 65 |
| 4.1.4 | 真空熔炼过程的特点 | 66 |
| 4.1.5 | 冷坩埚悬浮熔炼技术 | 69 |
| 4.2 | 真空感应熔炼稀土永磁合金工艺 | 69 |
| 4.2.1 | 原材料选择 | 69 |
| 4.2.2 | 原材料处理及配料 | 72 |
| 4.2.3 | 坩埚的选择和准备 | 72 |
| 4.2.4 | 真空感应熔炼操作 | 73 |
| 4.3 | 稀土永磁合金铸锭组织的控制 | 74 |
| 4.3.1 | 稀土永磁合金结晶过程的机制 | 74 |
| 4.3.2 | 稀土永磁合金铸锭的晶体生长特征 | 75 |
| 4.3.3 | 稀土永磁合金铸锭的凝固方式及对铸锭组织的控制 | 77 |
| 4.4 | 熔体快淬法和速凝法制备稀土永磁合金 | 78 |
| 4.4.1 | 熔体快淬法制备 NdFeB 磁粉工艺 | 79 |
| 4.4.2 | 快淬磁各向同性 NdFeB 合金的结构与磁性能 | 79 |
| 4.4.3 | 速凝法制备 NdFeB 合金工艺 | 81 |
| 4.4.4 | 速凝磁各向异性 NdFeB 薄片铸锭的显微组织 | 82 |
| 4.5 | 真空热还原扩散法制备稀土永磁合金 | 84 |
| 4.5.1 | 还原扩散法的基本原理 | 84 |
| 4.5.2 | 原材料准备 | 85 |
| 4.5.3 | 混料 | 88 |
| 4.5.4 | 还原扩散处理 | 89 |
| 4.5.5 | 去除氧化钙和钙 | 90 |
| 5 | 稀土永磁合金制粉原理与技术 | 92 |
| 5.1 | 稀土永磁粉末的细度特征及要求 | 92 |
| 5.1.1 | 粉末体性能概述 | 92 |
| 5.1.2 | 粉体的粒度分布 | 94 |
| 5.1.3 | 颗粒粒度的测量 | 94 |
| 5.1.4 | 对稀土永磁合金磁性粉末的要求 | 96 |
| 5.2 | 机械球磨制粉 | 96 |
| 5.2.1 | 机械法制粉原理 | 96 |
| 5.2.2 | 机械法制粉过程 | 98 |
| 5.2.3 | 滚动球磨制粉技术 | 99 |
| 5.2.4 | 机械球磨制粉过程的防氧化保护 | 100 |
| 5.3 | 气流磨制粉 | 102 |
| 5.3.1 | 气流磨制粉原理 | 102 |
| 5.3.2 | 气流磨制粉过程 | 103 |
| 5.3.3 | 气流磨制粉的特点 | 104 |

| | | |
|-------|--------------------------------|-----|
| 5.4 | HD 和 HDDR 法制粉技术 | 105 |
| 5.4.1 | 氢与 RE-TM 化合物的相互作用 | 105 |
| 5.4.2 | HD 处理过程和 HD 磁粉 | 107 |
| 5.4.3 | NdFeB 各向同性黏结磁粉的 HDDR 处理 | 110 |
| 5.4.4 | NdFeB 各向异性黏结磁粉的 HDDR 处理 | 112 |
| 5.5 | 双合金法和机械合金化法制备 NdFeB 永磁材料 | 115 |
| 5.5.1 | 双合金法制备烧结 NdFeB 永磁材料 | 115 |
| 5.5.2 | 机械合金化法制备黏结永磁体磁粉 | 117 |
| 6 | 稀土永磁粉末磁场取向与成型 | 121 |
| 6.1 | 稀土永磁粉末磁场取向原理 | 121 |
| 6.1.1 | 稀土永磁粉末磁场取向与磁体磁性能的关系 | 121 |
| 6.1.2 | 粉末颗粒在磁场中的取向过程 | 122 |
| 6.1.3 | 粉末颗粒的错取向 | 123 |
| 6.1.4 | 影响粉末颗粒取向度的因素 | 124 |
| 6.2 | 粉末压制成型原理 | 126 |
| 6.2.1 | 粉末压制过程 | 126 |
| 6.2.2 | 压制时的压力分布 | 127 |
| 6.2.3 | 压坯的弹性后效 | 129 |
| 6.3 | 粉末压制成型方法与设备 | 130 |
| 6.3.1 | 模压 | 130 |
| 6.3.2 | 模压加等静压 | 131 |
| 6.3.3 | 橡胶模等静压 | 133 |
| 6.4 | 磁场取向与压制工艺 | 136 |
| 6.4.1 | 模压压模的计算和设计 | 136 |
| 6.4.2 | 模压工艺操作 | 137 |
| 6.4.3 | 等静压压制工艺操作 | 138 |
| 6.4.4 | 压制成型时粉末的防氧化保护 | 140 |
| 6.5 | 黏结稀土永磁体的制备技术 | 141 |
| 6.5.1 | 黏结永磁材料及其应用与发展 | 141 |
| 6.5.2 | 黏结稀土永磁体的制备方法 | 142 |
| 6.5.3 | 黏结永磁体的磁性能与影响因素 | 146 |
| 7 | 稀土永磁材料的真空烧结、热处理及磁体加工 | 149 |
| 7.1 | 烧结现象和基本规律 | 149 |
| 7.1.1 | 粉末体固相烧结过程 | 149 |
| 7.1.2 | 粉末体固相烧结的致密化机理 | 151 |
| 7.1.3 | 烧结过程中的再结晶及晶粒长大 | 153 |
| 7.2 | 稀土永磁体的液相烧结 | 154 |

| | | |
|-------|-----------------|-----|
| 7.2.1 | 稀土永磁体的液相烧结现象 | 154 |
| 7.2.2 | 液相烧结的基本过程 | 155 |
| 7.2.3 | 影响液相烧结的因素 | 157 |
| 7.2.4 | 烧结过程中对磁体晶粒尺寸的控制 | 160 |
| 7.3 | 稀土永磁材料的烧结与热处理工艺 | 162 |
| 7.3.1 | 烧结与热处理工艺制度 | 162 |
| 7.3.2 | 真空烧结与热处理设备 | 166 |
| 7.3.3 | 烧结工艺操作 | 167 |
| 7.4 | 烧结稀土永磁体的加工与检验 | 168 |
| 7.4.1 | 机械加工 | 168 |
| 7.4.2 | 表面处理 | 171 |
| 7.4.3 | 产品的检测 | 174 |
| 7.4.4 | 产品的充磁与退磁 | 175 |

第 III 篇 稀土永磁材料产品的性能及发展

| | | |
|-------|--|-----|
| 8 | 烧结 NdFeB 永磁材料 | 178 |
| 8.1 | 烧结 NdFeB 永磁合金的成分设计 | 178 |
| 8.1.1 | 烧结 NdFeB 永磁材料的牌号与性能 | 178 |
| 8.1.2 | 三元烧结 NdFeB 永磁材料的成分与性能 | 180 |
| 8.1.3 | 氧在烧结 NdFeB 永磁体中的作用 | 182 |
| 8.2 | 三元以上的烧结 NdFeB 永磁材料 | 184 |
| 8.2.1 | 三元以上的 (Nd, RE)(Fe, M ₁ , M ₂)B 烧结永磁材料 | 184 |
| 8.2.2 | 低成本的 RE-Fe-B (RE=La, Ce, MM, Pr) 烧结永磁材料 | 186 |
| 8.2.3 | 具有低温度系数的烧结 RE-Fe-B 永磁材料 | 188 |
| 8.3 | 烧结 NdFeB 永磁材料的磁能积 | 189 |
| 8.3.1 | 烧结 NdFeB 永磁体的 B_r 和 $(BH)_m$ 的极限值 | 190 |
| 8.3.2 | 烧结 NdFeB 永磁体主相体积分数和取向度与磁性能的关系 | 190 |
| 8.3.3 | 高磁能积烧结 NdFeB 永磁材料的成分考虑 | 192 |
| 8.3.4 | 高磁能积烧结 NdFeB 永磁材料的理想显微结构 | 193 |
| 8.3.5 | 实验室研制的高磁能积 NdFeB 永磁材料 | 195 |
| 8.4 | 烧结 NdFeB 永磁材料的矫顽力 | 197 |
| 8.4.1 | 烧结 NdFeB 永磁材料的形核场 H_N 与矫顽力 | 197 |
| 8.4.2 | 烧结 NdFeB 永磁体的形核场 H_N 与各向异性 (K_1 和 H_A) 的关系 | 198 |
| 8.4.3 | 烧结 NdFeB 永磁材料的形核场 H_N | 200 |
| 8.4.4 | 添加元素的晶界显微结构 | 202 |
| 8.4.5 | 高矫顽力烧结 NdFeB 永磁材料的成分及结构设计 | 204 |

| | |
|--|-----|
| 9 稀土钴永磁材料 | 208 |
| 9.1 稀土钴永磁材料的品种规格及性能 | 208 |
| 9.2 RECo ₅ 型稀土钴永磁材料 | 210 |
| 9.2.1 SmCo ₅ 永磁材料的成分与磁性能的关系 | 210 |
| 9.2.2 SmCo ₅ 永磁合金的 750℃ 回火效应 | 211 |
| 9.2.3 SmCo ₅ 合金烧结和热处理工艺与磁性能的关系 | 213 |
| 9.2.4 PrCo ₅ 和 (Sm, Pr)Co ₅ 永磁材料 | 216 |
| 9.2.5 MMCo ₅ 和 Ce(Co, Cu, Fe) ₅ 永磁材料 | 218 |
| 9.3 2:17 型 Sm(Co, Cu, Fe, Zr) ₂ 稀土钴永磁材料 | 218 |
| 9.3.1 2:17 型 Sm(Co, Cu, Fe, Zr) ₂ 永磁材料的成分 | 219 |
| 9.3.2 高矫顽力 Sm(Co, Cu, Fe, Zr) _{7.4} 合金的显微组织 | 221 |
| 9.3.3 高矫顽力 Sm(Co, Cu, Fe, Zr) _{7.4} 合金的矫顽力 | 222 |
| 9.3.4 高矫顽力 Sm(Co, Cu, Fe, Zr) _{7.4} 永磁材料的稳定性 | 223 |
| 10 其他稀土-铁系永磁材料 | 225 |
| 10.1 热变形各向异性 REFeB 永磁材料 | 225 |
| 10.1.1 REFeB 合金的铸造-热变形制备技术 | 225 |
| 10.1.2 REFeB 合金的粉末-致密化-热变形制备技术 | 231 |
| 10.2 稀土-铁系间隙化合物永磁材料 | 234 |
| 10.2.1 稀土-铁系间隙化合物永磁材料的基本原理 | 234 |
| 10.2.2 Sm ₂ Fe ₁₇ N _x 间隙化合物永磁材料 | 235 |
| 10.2.3 其他稀土-铁系间隙化合物永磁材料 | 240 |
| 10.3 双相纳米晶复合永磁材料 | 242 |
| 10.3.1 双相纳米晶复合永磁材料的特征 | 242 |
| 10.3.2 双相纳米晶复合永磁材料的磁学分析 | 243 |
| 10.3.3 双相纳米晶复合 RE ₂ Fe ₁₄ B/α-Fe 系永磁材料 | 245 |
| 10.3.4 双相纳米晶复合 Fe ₃ B/α-Fe + Nd ₂ Fe ₁₄ B 系永磁材料 | 248 |
| 10.3.5 双相纳米晶复合永磁材料的新进展 | 249 |
| 参考文献 | 253 |

稀土永磁材料基础



1 永磁材料概述

教学目标

了解磁性材料的概念，认知永磁材料的分类、牌号、发展与应用；知晓稀土永磁材料的制备工艺过程；明确具有当代磁王之称的钕铁硼永磁材料与高新技术互为支撑的发展态势。

永磁材料是不需要消耗能量而能保持其磁场的磁功能材料。稀土永磁材料是永磁材料的主体产品，广泛应用于现代工业与科学技术中。

1.1 磁性材料的概念

磁性是物质的最基本属性之一。磁性材料是自古就受到人们高度重视的功能材料。早在公元前3~4世纪，我国已有“磁石取针”及“磁石召铁”的记载；在战国（公元前2500年）时期，已利用天然磁铁矿来制造司南；到宋代用钢针磁化制出了罗盘，为航海的发展提供了关键技术。而现代磁学的建立及磁性材料的发展则是近100年来的事了，有力地促进了近代工业技术的发展。

人们对于弱磁性的认识始自18~19世纪，因为弱磁性的测量需借助于仪器。1845年，法拉第（M. Faraday）建立了对抗磁性与顺磁性的认识；19世纪末，居里（P. Curie）进一步发现了抗磁磁化率不随温度变化及一些顺磁物质磁化率与温度成反比的居里定律；20世纪初，郎之万（P. Langevie）用经典统计理论证明了居里定律，外斯（P. Weiss）提出分子场自发磁化的假说与磁畴的概念，用以解释铁磁性，并建立了居里-外斯定律。

量子力学的出现使人们开始把对物质磁性的认识建立在原子及电子的基础上，海森伯（W. K. Heisenberg）用静电性的交换作用对铁磁体中分子场的性质给出了正确的解释，揭开了现代磁学的篇章。1932年，J. H. Van Vleck的著作已对物质磁性作出相当全面的量子理论阐述。与此同时，磁畴及磁化过程的实验研究和宏观理论逐渐发展，它们与固体结构特别是微结构密切相关。20世纪40年代末及50年代初，以铁氧体为代表的亚铁磁体的发现、研究及其应用形成一个热潮。50年代后的两个重大突破为稀土化合物及其合金和

非晶态磁性材料的研究及应用, 强磁材料所含元素从 3d 发展到 4f 族。

近年来, 一个新的应用领域正在迅猛发展, 即各种磁记录材料和磁光记录材料。同时, 薄膜、超薄膜、多层膜、超微粒材料和纳米结构的研究和应用成为又一热点。此外, 巨磁电阻、有机铁磁体、化合物铁磁体和室温下铁磁半导体的发现, 预示了磁学与磁性材料引人入胜的发展前景。目前, 磁学和磁性材料的研究领域十分广泛, 遍及各种元素及其合金和化合物, 包括金属、半导体和绝缘体, 有机和无机材料。多数材料为弱磁性, 但材料磁性的研究重点集中在与应用有关的强磁性方面。

在现代科学和工业技术中, 可用于制造磁功能器件的技术磁性材料(强磁性材料)称为磁功能材料。它包括硬磁材料、软磁材料、半硬磁材料、磁致伸缩材料、磁性薄膜、磁性微粉、磁性液体、磁致冷材料以及磁蓄冷材料等。其中用量最大和用途最广的是硬磁材料和软磁材料。在某些硬磁材料中, 矫顽力可高达 4000kA/m。这类材料能抵抗去磁化作用(一旦磁化以后), 因此又称为永磁材料。通常将永磁材料制成具有一定形状和体积的永磁体, 进而制成多种多样的永磁功能器件, 用于提供磁场源和磁能转换的场合。软磁材料的矫顽力低于 1kA/m, 最低可达 0.08A/m, 因而技术磁化到饱和后很容易退磁。软磁材料的应用是基于在外磁场有相对弱的变化时这类材料内的磁通量发生大的变化这一特性, 如用于制造变压器、电感线圈、电动机和发电机的铁芯, 在磁记录中用作磁场传感器, 或用于应力-应变变量器。

永磁材料制备原理和技术以材料科学和磁性物理学为学科基础。材料科学的基本原理植根于凝聚态物理学、合成化学与物理化学, 这些学科对物质结构和物性的深入研究推动了对材料本质的了解; 同时, 冶金学、金属学、陶瓷学等学科的发展也使对材料的制备、结构与性能, 以及它们之间的相互关系的研究愈来愈深入。沿用材料科学与工程学的定义, 永磁材料学科的内容可以表述为: 主要是研究永磁材料的组成、结构、制备工艺、材料磁性能与使用效能以及它们之间的关系。

1.2 永磁材料的分类及牌号表示方法

国际电工委员会对永磁材料的分类见表 1-1。根据 IEC 出版物 404-1 中所用的分类系统, 代号中的字母表示永磁材料的类别, 第一位数字表示各个类别中材料的种类; 第二位数字的“0”表示材料是各向同性的, “1”表示材料是各向异性的, “2”表示具有有机黏结剂的各向同性材料, “3”表示具有有机黏结剂的各向异性材料; 第三位数字表示不同的等级。例如, 烧结钕-铁-硼各向异性永磁材料的细分类可表示为 R7-1-X, 黏结钕-铁-硼各向同性永磁材料的细分类可表示为 R7-2-X 等等。这里 X=1, 2, …, 为材料的等级。

永磁材料的牌号表示方法以化学符号表示材料的主要组分, 牌号中斜线前面的数字表示最大的磁能积 $(BH)_{\max}$ (单位 kJ/m^3), 斜线后面的数字表示矫顽力 H_{cj} (单位 kA/m) 的十分之一, 数值采用四舍五入取整。具有黏结剂的永磁材料, 在牌号末尾加“P”字表示。例如, NdFeB380/80 表示 $(BH)_{\max}$ 为 366~398 kJ/m^3 , H_{cj} 为 800 kA/m 的烧结钕铁硼永磁材料。

永磁材料的主要磁性能和辅助磁性能见表 1-2。

表 1-1 永磁材料分类

| 类别 | 主要成分 | 代号的第一部分 |
|----------|--|---------|
| 硬磁材料 (R) | 铝-镍-钴-铁-钛合金 | R1 |
| | 铂-钴合金 | R2 |
| | 铁-钴-钒-铬合金 | R3 |
| | 稀土-钴合金 | R5 |
| | 铬-铁-钴合金 | R6 |
| | 钨-铁-硼合金 | R7 |
| 硬磁陶瓷 (S) | 硬磁陶瓷 ($MO_n \cdot Fe_2O_3$; $M = Ba, Sr$ 和/或 $Pb, n = 4.5 \sim 6.5$) | — |

表 1-2 永磁材料的磁性能

| GB/T 9637 和 IEC50 (121) 的术语号 | | 磁性能 | 符号 | 单位 |
|---------------------------------|-----------|--------------------------------------|------------------|----------|
| 4.9 | — | BH 积的最大值 (也简短地称为“最大 BH 积”) | $(BH)_{max}$ | kJ/m^3 |
| 2.26 | 121-02-43 | 剩磁 | B_r | T |
| 2.23 | — | 磁通密度矫顽力 | H_{cb} | kA/m |
| 2.23 | — | 磁极化强度矫顽力 (内禀矫顽力) | H_{cj} | kA/m |
| 4.31 | — | 回复磁导率 | μ_{rec} | — |
| 3.1 | 121-02-18 | 剩磁的温度系数 (相当于磁饱和的温度系数 $\alpha(J_s)$) | $\alpha(B_r)$ | %/K |
| — | — | 磁极化强度矫顽力的温度系数 | $\alpha(H_{cj})$ | %/K |
| 1.21 | 121-02-32 | 居里温度或居里点 | T_c | K |

1.3 永磁材料的发展

现代工业与科学技术广泛应用的永磁材料有铸造永磁材料、硬磁陶瓷 (铁氧体) 永磁材料、稀土永磁材料和其他永磁材料四大类。代表性的永磁材料和磁性能列于表 1-3。

表 1-3 永磁材料的磁性能

| 名称 | 牌号 | 代号 | B_r/T | H_{cj} $/kA \cdot m^{-1}$ | $(BH)_{max}$ $/kJ \cdot m^{-3}$ | $T_c/^\circ C$ | ρ $/g \cdot cm^{-3}$ |
|-------------|-------------------|---------|---------|--------------------------------|------------------------------------|----------------|------------------------------|
| 永磁钢 | 2J64 | | 1.00 | 4.93 | 4.93 | | |
| 铸造铝镍钴合金 | AlNiCo60/11 | R1-1-6 | 0.90 | 112 | 60.0 | 890 | 7.3 |
| 烧结铝镍钴合金 | AlNiCo33/15 | R1-1-23 | 0.65 | 150 | 33 | 757 | 7.0 |
| 硬磁陶瓷 (铁氧体) | Hard ferrite32/25 | S1-1-10 | 0.41 | 250 | 32.0 | 500 | 4.9 |
| 1:5 钐钴合金 | XGS165/80 | R5-1-3 | 0.9 | 800 | 165 | 727 | 8.1 |
| 2:17 钐钴合金 | XGS205/70 | R5-1-14 | 1.05 | 700 | 205 | 827 | 8.2 |
| 黏结钐钴永磁 | XGN65/60 | R5-3-1 | 0.5 | 600 | 65 | | 7.4 |
| 烧结 NdFeB 永磁 | NdFeB260/80 | R7-1-8 | 1.18 | 800 | 260 | 310 | 7.4 |