



原位自生双相纳米 复合永磁材料

崔春翔 孙继兵 韩瑞平◎著



科学出版社

原位自生双相纳米复合 永磁材料

崔春翔 孙继兵 韩瑞平 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要涉及原位自生双相纳米复合永磁材料中间合金及整体合金的成分设计、冶炼制备、原位析出处理和微观组织观察分析,主要阐述作者采用熔体快冷、离心甩带、机械粉碎、氢爆、氮化法和原位自生合成 $\text{Sm}(\text{Fe}_{1-x}\text{Ti}_x)_2\text{N}_y/\alpha\text{-Fe}$ 等系列原位自生双相薄带磁体与双相纳米粉体,再用黏结法和烧结法制备块体系列原位自生双相纳米复合永磁材料的详细工艺过程、微结构检测与相组成分析、材料微观组织与磁性能的关系及规律等内容。

本书可作为从事磁性材料生产的工程技术人员以及该领域的研究人员、高校教师和研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

原位自生双相纳米复合永磁材料/崔春翔,孙继兵,韩瑞平著. —北京:科学出版社,2015

ISBN 978-7-03-045872-8

I. ①原… II. ①崔… ②孙… ③韩… III. ①纳米材料-复合永磁材料
IV. ①TM273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 234475 号

责任编辑:鲁永芳 钱 俊 / 责任校对:张凤琴

责任印制:张 倩 / 封面设计:铭轩堂

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 10 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 10 月第一次印刷 印张:23 3/4 插页:1

字数:459 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本书是作者课题组承担的国家自然科学基金项目、教育部博士点基金项目、河北省及天津市应用基础重点项目在原位自生双相纳米复合永磁材料研究领域最新研究结果的总结,第1章绪论部分特别注意介绍了近几年国外该领域最新的研究成果。主要包括:永磁材料和双相纳米磁性材料的发展历史和研究现状概述、Sm-Fe合金、Sm-Fe-N合金、Sm-Fe-N-M(M=Ti, Nb)合金、Sm-Fe-M合金、Nb-Fe-B-M(M=Co, Cr, Zr, Al)合金等原位自生双相纳米复合永磁材料中间合金和整体合金的成分设计、冶炼制备方法、原位析出处理、微观组织观察与分析。主要阐述作者采用熔体快冷、离心甩带、机械粉碎、氢爆、氮化法和原位自生合成 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_y//\alpha\text{-Fe}$ 、 $\text{Sm}(\text{Fe}_{1-x}\text{Ti}_x)_29\text{N}_y//\alpha\text{-Fe}$ 、Nd-Fe-B// $\alpha\text{-Fe}$ 、Nd-Fe-B/Fe-Co、Nd-Fe-B-M(M=Co, Cr, Al, Zr)/Fe-Co 系列原位自生双相薄带磁体和双相纳米粉体,再用黏结法和烧结法制备块体 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_y//\alpha\text{-Fe}$ 、 $\text{Sm}(\text{Fe}_{1-x}\text{Ti}_x)_29\text{N}_y//\alpha\text{-Fe}$ 及 Nd-Fe-B/Fe-Co 等系列原位自生双相纳米复合永磁材料的详细工艺过程、微结构检测与相组成分析、材料微观组织与磁性能的关系和规律等内容。

本书由活跃在材料科学教学科研一线的教师和博士研究生编写。全书共20章,其中大部分章节的文字内容和实验数据来自于崔春翔教授指导的博士研究生孙继兵、韩瑞平的博士学位论文及硕士研究生张颖、梁志梅、吴瑞国和高建霞等的硕士学位论文。本书由河北工业大学崔春翔教授、孙继兵教授和韩瑞平博士联合撰写;全书由崔春翔教授统稿。本书参考了国内外磁性材料领域,尤其是双相纳米磁性材料研究领域的学术期刊、兄弟院校的相关教学参考书目及其他材料科学方面的专著,并得到河北工业大学优秀博士论文成果出版专著项目的宝贵资助和科学出版社的大力支持,河北工业大学材料科学与工程学院金属材料工程系的教师对本书的编写提出了许多宝贵意见,谨此一并致谢。

本书的系列研究工作得到了国家自然科学基金项目“ $\text{Sm}(\text{Fe}_{1-x}\text{Ti}_x)_29\text{N}_y//\alpha\text{-Fe}$ 双相纳米永磁复合材料界面微结构”(项目编号:50271024)、“ $\text{SmCo}_5/\text{Fe}_7\text{Co}_3$ 高温永磁复合材料的纳米相结构与磁性能”(项目编号:51271070),教育部博士点基金项目(项目编号:20060080005),河北省自然科学基金项目(项目编号:E2010000125),以及天津市应用基础重点项目(项目编号:05YFZJC02200)的资金支持,部分试验研究工作得到了河北工业大学河北省新型功能材料重点实验室的大型实验仪器运行经费的支持,在此表示感谢。在成书过程中曾得到河北工业大学材料科学与工程学院检测中心的戚玉敏博士、刘双进老师、王磊老师和王海云老

师在扫描电镜观察、X 射线检测中给予的支持和帮助,在本书相关实验过程中杨薇博士、刘双进博士、戚玉敏博士、赵立臣博士、王清周博士、步绍静博士、丁贺伟老师给予了无私的帮助和支持,在磁性材料合金熔炼过程中硕士研究生张颖、高建霞、梁志梅、吴瑞国和龚俊杰做了大量的材料制备与电镜测试等工作,在此一并表示感谢。

本书可作为高等学校和科研院所材料科学与工程专业、金属材料工程专业、冶金专业和功能材料专业教师与研究生的教学及科研参考书,对从事磁性材料发展与应用的科技人员和企业管理人员也有一定的参考价值。

崔春翔 孙继兵 韩瑞平

2015 年 6 月 28 日

彩 图

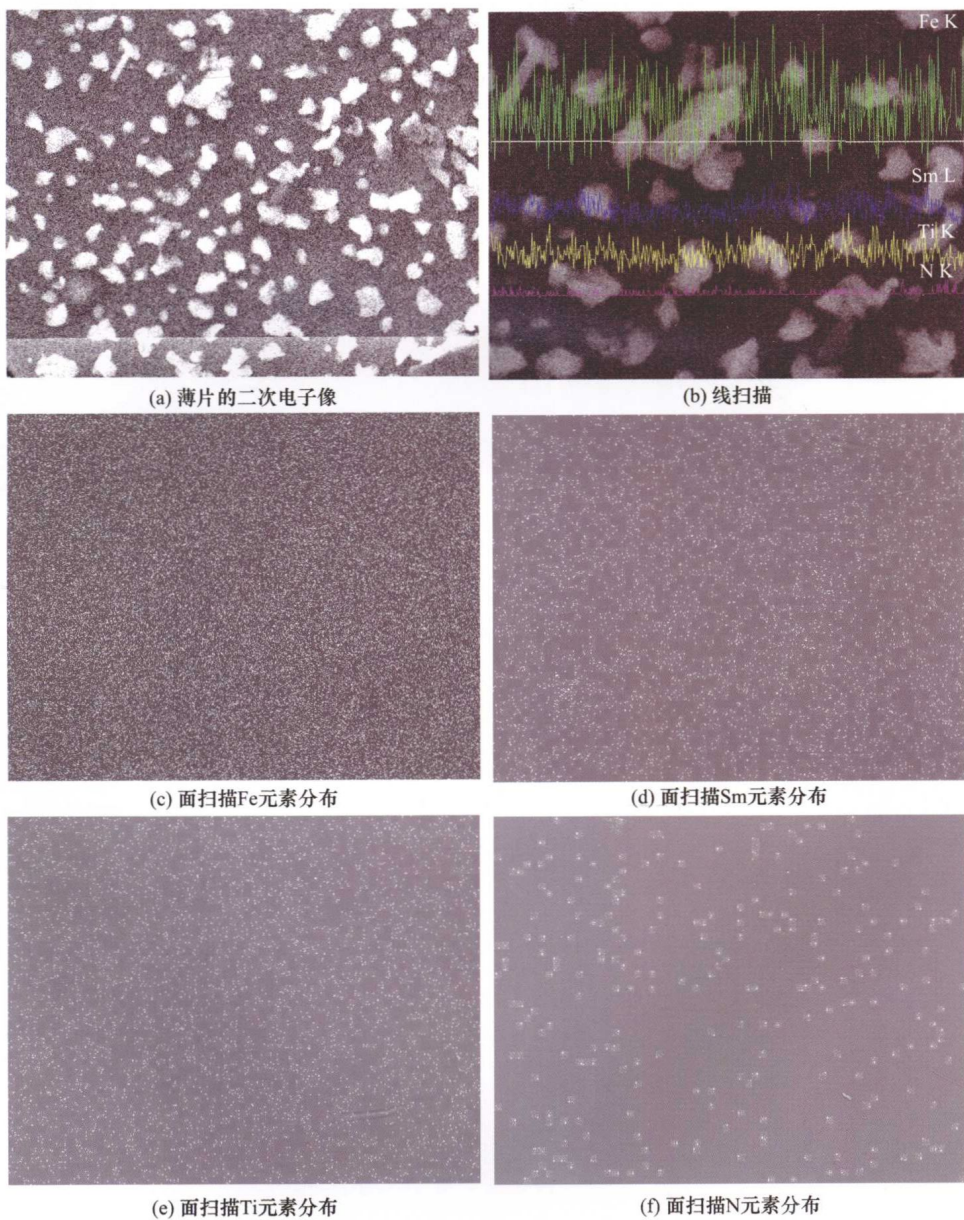
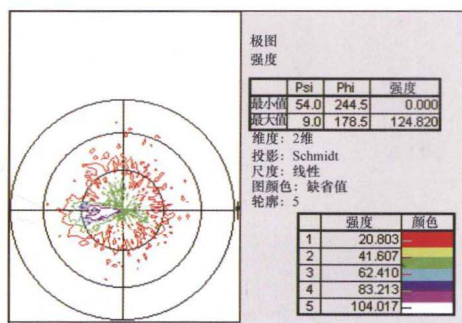
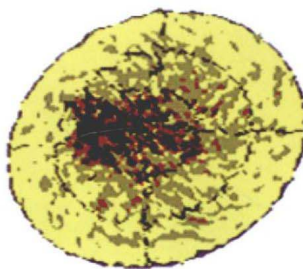


图 14.25 退火态 $\text{Sm}_{10}\text{Fe}_{84}\text{Ti}_6$ 薄带 750°C 晶化后, 500°C 氮化 6h 的显微组织观察结果



(a) 2维



(b) 2.5维



(c) 3维

图 14.27 压制 $\text{Sm}_{10}\text{Fe}_{84}\text{Ti}_6\text{N}_x$ 薄带的织构分析

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 磁学研究的发展	1
1.2 永磁材料的研究概况	2
1.2.1 永磁材料	2
1.2.2 双相纳米永磁材料	7
1.2.3 永磁材料的应用	8
1.2.4 永磁材料的发展趋势	9
1.3 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_y$ 型稀土永磁材料的研究进展	9
1.3.1 R_2Fe_{17} 化合物晶体结构	9
1.3.2 填隙元素和氮化气氛的影响	11
1.3.3 替代元素的影响	12
1.3.4 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_y$ 磁粉的制备方法	13
1.3.5 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_y/\alpha\text{-Fe}$ 双相纳米磁粉的制备方法	16
1.3.6 黏结磁体的制备	16
1.4 其他 Sm-Fe 基化合物	17
1.4.1 ThMn_{12} 型	17
1.4.2 $\text{R}_3(\text{Fe},\text{M})_{29}$ 型	18
1.4.3 SmFe_7 型	19
1.4.4 SmTiFe_{10} 型(1:11 型)	19
1.4.5 SmFe_5 型(1:5 型)	20
1.4.6 SmFe_2 与 SmFe_3	20
1.4.7 $\text{Sm}_{10}\text{Fe}_{90}$ 型	20
1.4.8 $\text{Sm}_6\text{Fe}_{23}$ 型	20
1.5 磁化理论模型与双相纳米晶界面弹性交换作用的提出	20
1.6 纳米复合稀土永磁材料	21
1.6.1 纳米复合稀土永磁材料的交换耦合作用	21
1.6.2 双相纳米晶交换耦合相互作用的理论模型	21
1.6.3 国内外纳米复合稀土永磁专利进展	24
1.7 目前 Sm-Fe 基氮化物及双相纳米磁性材料研究中存在的问题	27

1.8 本书的研究内容	30
第2章 试验方法	32
2.1 原材料的选用	32
2.2 试验过程	32
2.3 试验所用的主要制备设备	33
2.4 试验所用的检测与分析设备	34
第3章 钐铁母合金的熔炼	35
3.1 Sm-Fe 二元合金的相图与结晶	35
3.1.1 Sm-Fe 二元合金相图	35
3.1.2 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ 合金的平衡结晶	36
3.1.3 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ 合金的非平衡结晶	36
3.2 Sm-Fe 二元合金的热力学分析	37
3.2.1 热力学模型及计算	37
3.2.2 热力学分析	37
3.3 Sm-Fe 二元合金的感应电炉熔炼	37
3.3.1 感应电炉熔炼操作	38
3.3.2 真空度对感应电炉熔炼 Sm-Fe 母合金组织及物相的影响	38
3.3.3 感应电炉熔炼 Sm-Fe 母合金设备的匹配问题	41
3.3.4 加钐方式对感应电炉熔炼 Sm-Fe 母合金组织及物相的影响	41
3.3.5 加入保护气体压力的影响	42
3.4 Sm-Fe 二元合金的真空电弧炉熔炼	43
3.4.1 真空电弧炉的特点	43
3.4.2 真空电弧炉熔炼 Sm-Fe(M)合金	43
3.5 本章小结	45
第4章 Sm-Fe 基合金的 X 射线测试与分析方法	46
4.1 稀土 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ 型永磁材料 X 射线无标定量相分析	46
4.1.1 引言	46
4.1.2 试样的制备及试验方法	47
4.1.3 方法原理	47
4.1.4 计算步骤与程序	49
4.1.5 试验结果与分析	51
4.2 稀土 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ 型永磁材料晶格常数的精确测定	52
4.3 稀土 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ 型永磁材料晶粒尺寸的测定	52
4.4 本章小结	53

第 5 章 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ 型合金及其氮化物的研究	54
5.1 引言	54
5.2 添加不同钐含量的 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ 型合金的铸态和退火态组织与物相 研究	54
5.2.1 铸态组织观察与物相分析	54
5.2.2 铸态组织退火时间的研究	56
5.2.3 退火态合金组织	57
5.2.4 退火前后 XRD 分析	58
5.3 退火后合金的破碎	60
5.4 Sm-Fe 合金粉末在封闭气氛中氮化的研究	61
5.4.1 引言	61
5.4.2 氮化热力学	61
5.4.3 粉末粒度对氮化后氮含量的影响	62
5.4.4 不同氮化时间对物相的影响	65
5.4.5 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ 型合金的热分析	71
5.4.6 氮化后粉末的自然时效处理	73
5.4.7 氮化粉末的形貌	73
5.4.8 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ 型合金的氮化机制	74
5.4.9 不同钐含量合金的磁性能	78
5.5 黏结磁体的制备及磁性能	82
5.5.1 黏结剂的选择	82
5.5.2 黏结磁体的形貌	83
5.5.3 磁粉取向压结后的物相结构	84
5.5.4 黏结磁体的强度	85
5.5.5 在封闭气氛中氮化后的黏结磁体的磁性能	85
5.6 Sm-Fe 合金粉末在流动氮气气氛中的氮化	87
5.6.1 试验条件	87
5.6.2 氮化后粉末的 XRD 分析	87
5.6.3 流动氮气中氮化机制	91
5.6.4 流动氮气中氮化后的磁性能	91
5.6.5 使用流通氮气氮化存在的问题	92
5.7 关于 SmFe_7 相、XRD 谱及磁性能测试的问题	92
5.7.1 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ 相与 SmFe_7 相	92
5.7.2 关于 X 射线衍射仪测试中的问题	93
5.7.3 磁性能测试中的问题	94

5.8 本章小结	96
第6章 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17-x}\text{Ti}_x$ 合金及其氮化物的研究	98
6.1 引言	98
6.2 Sm-Fe-Ti 合金铸态与退火态组织形貌和物相分析	99
6.2.1 Sm-Fe-Ti 三元相图	99
6.2.2 铸态与退火态的 BSE 像	100
6.2.3 退火前后物相变化	103
6.2.4 退火合金物相组成对比	108
6.3 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17-x}\text{Ti}_x$ 合金在封闭氮气氛中氮化的研究	110
6.3.1 引言	110
6.3.2 不同粒度粉末氮含量的对比	111
6.3.3 不同氮化时间对物相的影响	115
6.3.4 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17-x}\text{Ti}_x\text{N}_y$ 合金的热分析	122
6.3.5 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17-x}\text{Ti}_x\text{N}_y$ 氮化合金粉末的形貌	124
6.3.6 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17-x}\text{Ti}_x$ 合金氮化机制	125
6.3.7 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17-x}\text{Ti}_x\text{N}_y$ 氮化合金的磁性能	125
6.3.8 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17-x}\text{Ti}_x\text{N}_y$ 黏结磁体的磁性能	128
6.4 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17-x}\text{Ti}_x$ 合金在流动氮气氛中的氮化	131
6.4.1 试验条件	131
6.4.2 退火后合金的 BSE 像	131
6.4.3 退火后合金 XRD	131
6.4.4 氮化后粉末的物相分析	133
6.4.5 流动氮气氛中氮化机制	138
6.4.6 氮化后的磁性能	138
6.5 本章小结	139
第7章 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17-x}\text{Nb}_x$ 合金及其氮化物的研究	142
7.1 引言	142
7.2 Sm-Fe-Nb 合金铸态与退火态组织形貌和物相结构分析	142
7.2.1 铸态与退火态合金组织形貌和物相	142
7.2.2 铸态与退火态物相变化	145
7.2.3 退火态合金的物相构成	147
7.3 Sm-Fe-Nb 合金在封闭氮气氛中的氮化	149
7.3.1 试验条件	149
7.3.2 不同粒度粉末氮含量的对比	149
7.3.3 氮化后物相分析	152

7.3.4 合金的热分析	157
7.3.5 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17-x}\text{Nb}_x\text{N}_y$ 粉末的形貌	159
7.3.6 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17-x}\text{Nb}_x\text{N}_y$ 粉末的磁性能	159
7.3.7 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17-x}\text{Nb}_x\text{N}_y$ 树脂黏结磁体的磁性能	162
7.4 本章小结	163
第 8 章 经 HDDR 处理的 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ 型合金及其氮化物的研究	165
8.1 引言	165
8.1.1 前言	165
8.1.2 试验方法	166
8.2 Sm-H 与 Fe-H 相图	166
8.3 $\text{Sm}_{12.8}\text{Fe}_{87.2}$ 合金 HD 与 HDDR 工艺研究	167
8.3.1 不同温度氢气处理后 XRD 分析	167
8.3.2 抽真空、粉末粒度及循环次数对 HDDR 效果的影响	170
8.3.3 不同 HDDR 处理工艺对磁性能的影响	173
8.4 经 HDDR 处理的不同钐补偿含量 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ 型合金及其氮化物的研究	174
8.4.1 引言	174
8.4.2 HDDR 循环次数的影响	174
8.4.3 HDDR 处理后的颗粒形貌	177
8.4.4 氮化后的物相变化	178
8.4.5 粉末粒度对氮化后氮含量的影响	180
8.4.6 氮化后粉末形貌	182
8.4.7 热分析	183
8.4.8 氮化机制	184
8.4.9 粉末的磁性能	184
8.4.10 各向异性环氧树脂黏结磁体的磁性能	187
8.5 本章小结	189
第 9 章 经 HDDR 处理的 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17-x}\text{Ti}_x$ 合金及其氮化物的研究	191
9.1 HDDR 循环次数的影响	191
9.1.1 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{16.5}\text{Ti}_{0.5}$ 合金 HDDR	191
9.1.2 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{16}\text{Ti}_1$ 合金 HDDR	191
9.1.3 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{15}\text{Ti}_2$ 合金 HDDR	193
9.1.4 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{14}\text{Ti}_3$ 合金 HDDR	194
9.2 HDDR 处理后合金粉末的形貌	195
9.3 氮化后物相变化	197

9.3.1	$\text{Sm}_2\text{Fe}_{16.5}\text{Ti}_{0.5}$ 的氮化 XRD	197
9.3.2	$\text{Sm}_2\text{Fe}_{16}\text{Ti}_1$ 的氮化 XRD	198
9.3.3	$\text{Sm}_2\text{Fe}_{15}\text{Ti}_2$ 的氮化 XRD	199
9.3.4	$\text{Sm}_2\text{Fe}_{14}\text{Ti}_3$ 合金与 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{13}\text{Ti}_4$ 合金的氮化 XRD	200
9.4	粉末粒度对氮化后氮含量的影响	202
9.5	氮化后粉末的形貌	203
9.6	氮化后粉末的热分析	204
9.7	氮化机制	205
9.8	氮化粉末的磁性能	205
9.9	$\text{Sm}_2\text{Fe}_{17-x}\text{Ti}_x\text{N}_y$ 各向异性黏结磁体的磁性能	208
9.10	本章小结	209
第 10 章	经 HDDR 处理的 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17-x}\text{Nb}_x$ 合金及其氮化物的研究	211
10.1	HDDR 循环次数的影响	211
10.1.1	$\text{Sm}_2\text{Fe}_{16.5}\text{Nb}_{0.5}$ 合金 HDDR	211
10.1.2	$\text{Sm}_2\text{Fe}_{16}\text{Nb}_1$ 合金 HDDR	211
10.1.3	$\text{Sm}_2\text{Fe}_{15}\text{Nb}_2$ 合金 HDDR	213
10.1.4	$\text{Sm}_2\text{Fe}_{14}\text{Nb}_3$ 合金 HDDR	213
10.1.5	HDDR 过程中的中间产物分析	215
10.2	HDDR 处理后合金粉末的形貌	216
10.3	氮化后物相变化	217
10.3.1	$\text{Sm}_2\text{Fe}_{16.5}\text{Nb}_{0.5}$ 的氮化 XRD	217
10.3.2	$\text{Sm}_2\text{Fe}_{16}\text{Nb}_1$ 的氮化 XRD	218
10.3.3	$\text{Sm}_2\text{Fe}_{15}\text{Nb}_2$ 的氮化 XRD	219
10.3.4	$\text{Sm}_2\text{Fe}_{14}\text{Nb}_3$ 合金与 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{13}\text{Nb}_4$ 合金的氮化 XRD	220
10.4	粉末粒度对氮化后氮含量的影响	222
10.5	氮化后粉末的形貌	223
10.6	氮化后粉末的热分析	224
10.7	氮化机制	225
10.8	氮化粉末的磁性能	225
10.9	各向异性黏结磁体的磁性能	227
10.10	本章小结	228
第 11 章	球磨、盘磨及机械研磨对比研究	230
11.1	$\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ 型化合物高能球磨效果的研究	230
11.1.1	引言	230
11.1.2	试验条件	230

11.1.3 先球磨再氮化的粉末形貌	230
11.1.4 先氮化再球磨的粉末形貌	231
11.1.5 先球磨再氮化粉末的物相结构	232
11.1.6 先氮化再球磨的组织结构	235
11.1.7 磁性能	237
11.2 手研磨效果的研究	238
11.3 盘磨的研究	238
11.4 HDDR 处理的 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{16}\text{Ti}_1\text{N}_y$ 化合物高能球磨及研磨效果的研究	239
11.4.1 引言	239
11.4.2 试验	239
11.4.3 高能球磨后的粉末形貌	240
11.4.4 氮化物球磨后的物相结构	241
11.4.5 磁性能	241
11.5 本章小结	242
第 12 章 透射电镜观察与微结构分析	243
12.1 黏结试样的形貌	243
12.2 未经 HDDR 处理 Sm-Fe-N 粉末的观察	244
12.3 经 HDDR 处理 Sm-Fe(M)-N(M=Ti,Nb)黏结磁体的观察	245
12.3.1 Sm-Fe-N 磁体	245
12.3.2 Sm-Fe-Nb-N 磁体	245
12.3.3 Sm-Fe-Ti-N 磁体	247
12.4 本章小结	250
第 13 章 $\text{Sm}_3(\text{Fe,Ti})_{29}/\alpha\text{-Fe}$ 母合金 Sm-Fe-Ti 铸锭的熔炼与处理	251
13.1 引言	251
13.2 试验材料、设备及工艺	254
13.2.1 试验材料及设备	254
13.2.2 试验工艺	254
13.3 Sm-Fe-Ti 合金的熔炼	258
13.3.1 Sm-Fe-Ti 合金的熔炼工艺	258
13.3.2 Sm-Fe-Ti 合金的反应	258
13.3.3 Sm-Fe-Ti 铸态合金组织及物相	259
13.4 Sm-Fe-Ti 合金铸锭的均匀化退火	260
13.5 本章小结	262

第 14 章 $\text{Sm}_3(\text{Fe}, \text{Ti})_{29}/\alpha\text{-Fe}$ 双相纳米磁性材料制备、组织与性能	264
14.1 引言	264
14.2 Sm-Fe-Ti 合金的快淬处理	265
14.2.1 熔体快淬后组织及物相分析	265
14.2.2 熔体快淬薄带的晶化处理	266
14.3 快淬薄带的氮化处理、氮化组织与物相分析	272
14.4 不同状态下 Sm-Fe-Ti 快淬薄带的磁性能测试与分析	280
14.4.1 影响材料磁性能的主要因素	280
14.4.2 晶化温度对磁性能的影响	281
14.4.3 氮化温度对磁性能的影响	284
14.4.4 测试温度对磁性能的影响	284
14.5 $\text{Sm}_3(\text{Fe}, \text{Ti})_{29}/\alpha\text{-Fe}$ 的透射电镜观察与微结构分析	285
14.5.1 材料的透射电镜样品的制备特点	285
14.5.2 粉末样品的透射电镜观察与分析	286
14.5.3 薄带样品的透射电镜观察与分析	287
14.6 本章小结	290
第 15 章 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\text{FeCo}$ 原位双相纳米磁性材料制备工艺	292
15.1 试验原料	292
15.2 试验工艺及过程	292
15.2.1 成分设计原则与配料	292
15.2.2 母合金的熔炼	293
15.2.3 熔体快淬	293
15.2.4 均匀化退火	294
15.2.5 球磨制粉	294
15.3 试验所用主要设备	295
15.3.1 制备设备	295
15.3.2 分析设备	295
第 16 章 $\text{Nd}_{10}\text{Fe}_{84-x}\text{B}_6\text{Co}_x$ ($x=0, 3, 5$) 合金微结构及磁性能的研究	296
16.1 引言	296
16.2 试样制备及试验方法	297
16.3 $\text{Nd}_{10}\text{Fe}_{84-x}\text{B}_6\text{Co}_x$ ($x=0, 3, 5$) 合金铸态组织及物相分析	297
16.3.1 $\text{Nd}_{10}\text{Fe}_{84-x}\text{B}_6\text{Co}_x$ ($x=0, 3, 0, 5, 0$) 铸态组织的 XRD 分析	297
16.3.2 $\text{Nd}_{10}\text{Fe}_{84-x}\text{B}_6\text{Co}_x$ ($x=0, 3, 0, 5, 0$) 铸态组织的形貌分析	298
16.4 $\text{Nd}_{10}\text{Fe}_{84-x}\text{B}_6\text{Co}_x$ ($x=0, 3, 5$) 合金快淬薄带组织及物相分析	300
16.4.1 $\text{Nd}_{10}\text{Fe}_{84-x}\text{B}_6\text{Co}_x$ ($x=0, 3, 5$) 快淬组织的 XRD 分析	300

16.4.2	$\text{Nd}_{10}\text{Fe}_{84-x}\text{B}_6\text{Co}_x$ ($x=0,3,5$) 快淬组织的扫描电镜分析	301
16.5	$\text{Nd}_{10}\text{Fe}_{84-x}\text{B}_6\text{Co}_x$ ($x=0,3,5$) 合金晶化退火组织及磁性能分析	302
16.5.1	$\text{Nd}_{10}\text{Fe}_{84-x}\text{B}_6\text{Co}_x$ ($x=0,3,5$) 合金晶化退火组织相组成分析	302
16.5.2	$\text{Nd}_{10}\text{Fe}_{84-x}\text{B}_6\text{Co}_x$ ($x=0,3,5$) 合金晶化退火态的磁性能	303
16.6	$\text{Nd}_{10}\text{Fe}_{84-x}\text{B}_6\text{Co}_x$ ($x=0,3,5$) 合金球磨组织及磁性能分析	304
16.6.1	$\text{Nd}_{10}\text{Fe}_{84-x}\text{B}_6\text{Co}_x$ ($x=0,3,5$) 合金球磨组织相组成分析	304
16.6.2	$\text{Nd}_{10}\text{Fe}_{84-x}\text{B}_6\text{Co}_x$ ($x=0,3,5$) 合金球磨组织的磁性能分析	305
16.7	本章小结	307
第 17 章	$\text{Nd}_{11.3}\text{Fe}_{80-x}\text{B}_{5.2}\text{Co}_{3.5}\text{Cr}_x$ 合金微结构及磁性能的研究	308
17.1	引言	308
17.2	$\text{Nd}_{11.3}\text{Fe}_{80-x}\text{B}_{5.2}\text{Co}_{3.5}\text{Cr}_x$ 合金铸态组织分析	308
17.2.1	$\text{Nd}_{11.3}\text{Fe}_{80-x}\text{B}_{5.2}\text{Co}_{3.5}\text{Cr}_x$ 合金铸态 XRD 分析	308
17.2.2	$\text{Nd}_{11.3}\text{Fe}_{80-x}\text{B}_{5.2}\text{Co}_{3.5}\text{Cr}_x$ 合金铸态 SEM 分析	309
17.3	$\text{Nd}_{11.3}\text{Fe}_{80-x}\text{B}_{5.2}\text{Co}_{3.5}\text{Cr}_x$ 合金快淬组织及磁性能分析	311
17.3.1	$\text{Nd}_{11.3}\text{Fe}_{80-x}\text{B}_{5.2}\text{Co}_{3.5}\text{Cr}_x$ 合金快淬组织 XRD 分析	311
17.3.2	$\text{Nd}_{11.3}\text{Fe}_{80-x}\text{B}_{5.2}\text{Co}_{3.5}\text{Cr}_x$ 合金快淬薄带磁性能分析	312
17.4	$\text{Nd}_{11.3}\text{Fe}_{80-x}\text{B}_{5.2}\text{Co}_{3.5}\text{Cr}_x$ 合金退火组织及磁性能分析	314
17.4.1	$\text{Nd}_{11.3}\text{Fe}_{80-x}\text{B}_{5.2}\text{Co}_{3.5}\text{Cr}_x$ 合金退火组织 XRD 分析	314
17.4.2	$\text{Nd}_{11.3}\text{Fe}_{80-x}\text{B}_{5.2}\text{Co}_{3.5}\text{Cr}_x$ 合金退火组织 SEM 分析	314
17.4.3	$\text{Nd}_{11.3}\text{Fe}_{80-x}\text{B}_{5.2}\text{Co}_{3.5}\text{Cr}_x$ 合金退火磁性能分析	315
17.5	$\text{Nd}_{11.3}\text{Fe}_{80-x}\text{B}_{5.2}\text{Co}_{3.5}\text{Cr}_x$ 合金球磨组织及磁性能分析	316
17.5.1	$\text{Nd}_{11.3}\text{Fe}_{80-x}\text{B}_{5.2}\text{Co}_{3.5}\text{Cr}_x$ 合金球磨粉末组织形貌	316
17.5.2	$\text{Nd}_{11.3}\text{Fe}_{80-x}\text{B}_{5.2}\text{Co}_{3.5}\text{Cr}_x$ 合金球磨粉末磁性能	317
17.6	本章小结	318
第 18 章	$\text{Nd}_{11.3}\text{Fe}_{80-x}\text{B}_{5.2}\text{Co}_{3.5}\text{Al}_x$ 合金的微结构与磁性能的研究	320
18.1	引言	320
18.2	$\text{Nd}_{11.3}\text{Fe}_{80-x}\text{B}_{5.2}\text{Co}_{3.5}\text{Al}_x$ 合金快淬组织的 XRD 分析	321
18.3	$\text{Nd}_{11.3}\text{Fe}_{80-x}\text{B}_{5.2}\text{Co}_{3.5}\text{Al}_x$ 合金退火组织及磁性能分析	322
18.3.1	$\text{Nd}_{11.3}\text{Fe}_{80-x}\text{B}_{5.2}\text{Co}_{3.5}\text{Al}_x$ 合金退火组织 XRD 分析	322
18.3.2	$\text{Nd}_{11.3}\text{Fe}_{80-x}\text{B}_{5.2}\text{Co}_{3.5}\text{Al}_x$ 合金退火组织的 SEM 分析	323
18.3.3	$\text{Nd}_{11.3}\text{Fe}_{80-x}\text{B}_{5.2}\text{Co}_{3.5}\text{Al}_x$ 合金退火磁性能分析	323
18.4	$\text{Nd}_{11.3}\text{Fe}_{80-x}\text{B}_{5.2}\text{Co}_{3.5}\text{Al}_x$ 合金球磨组织及磁性能分析	325
18.4.1	$\text{Nd}_{11.3}\text{Fe}_{80-x}\text{B}_{5.2}\text{Co}_{3.5}\text{Al}_x$ 合金球磨粉末 XRD 分析	325
18.4.2	$\text{Nd}_{11.3}\text{Fe}_{80-x}\text{B}_{5.2}\text{Co}_{3.5}\text{Al}_x$ 合金球磨粉末磁性能	326

18.5	本章小结.....	327
第 19 章	$\text{Nd}_2(\text{Fe}, \text{Co})_{14}\text{B}/\text{Fe}_7\text{Co}_3$ 原位自生双相纳米磁性材料的微结构及磁性能的研究	329
19.1	引言.....	329
19.2	$\text{Nd}_{11.3}\text{Fe}_{80-x}\text{B}_{5.2}\text{Co}_{3.5}\text{Zr}_x$ 合金快淬薄带磁性能分析	329
19.3	$\text{Nd}_{11.3}\text{Fe}_{80-x}\text{B}_{5.2}\text{Co}_{3.5}\text{Zr}_x$ 合金退火组织及磁性能分析	331
19.3.1	$\text{Nd}_{11.3}\text{Fe}_{80-x}\text{B}_{5.2}\text{Co}_{3.5}\text{Zr}_x$ 合金薄带退火组织 XRD 分析	331
19.3.2	$\text{Nd}_{11.3}\text{Fe}_{80-x}\text{B}_{5.2}\text{Co}_{3.5}\text{Zr}_x$ 合金薄带退火组织 SEM 分析	331
19.3.3	$\text{Nd}_{11.3}\text{Fe}_{80-x}\text{B}_{5.2}\text{Co}_{3.5}\text{Zr}_x$ 合金薄带退火磁性能分析	332
19.4	退火时间对 $\text{Nd}_{11.3}\text{Fe}_{80-x}\text{B}_{5.2}\text{Co}_{3.5}\text{Zr}_x$ 合金薄带磁性能的影响	334
19.5	本章小结.....	337
第 20 章	快淬速度对 $\text{Nd}_{10}\text{Fe}_{81}\text{Co}_3\text{B}_6$ 薄带微结构及磁性能的影响	338
20.1	引言.....	338
20.2	不同快淬速度对 $\text{Nd}_{10}\text{Fe}_{81}\text{Co}_3\text{B}_6$ 薄带微观组织的影响	339
20.3	不同淬速 $\text{Nd}_{10}\text{Fe}_{81}\text{Co}_3\text{B}_6$ 淬态薄带的热分析	340
20.4	不同淬速 $\text{Nd}_{10}\text{Fe}_{81}\text{Co}_3\text{B}_6$ 薄带磁性能分析	341
20.5	不同淬速 $\text{Nd}_{10}\text{Fe}_{81}\text{Co}_3\text{B}_6$ 快淬薄带晶化后的结构特征	342
20.6	不同淬速对 $\text{Nd}_{10}\text{Fe}_{81}\text{Co}_3\text{B}_6$ 快淬薄带磁性能的影响	344
20.7	本章小结.....	345
	参考文献.....	347
	彩图	