

# 超强永磁体

——稀土铁系永磁材料

(第2版)

周寿增 董清飞 著



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com>

# 超强永磁体

## ——稀土铁系永磁材料

(第2版)

周寿增 董清飞 著

北 京

冶金工业出版社

2004

**图书在版编目(CIP)数据**

超强永磁体:稀土铁系永磁材料/周寿增,董清飞著.

2版.—北京:冶金工业出版社,2004.2

ISBN 7-5024-3391-0

I. 超… II. ①周… ②董… III. 稀土永磁材料  
IV. TM273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 101097 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 张卫 (联系电话:010-64027930;E-mail:bull 2820@sina.com)

美术编辑 王耀忠 责任校对 王贺兰 责任印制 牛晓波

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1999 年 10 月第 1 版,2004 年 2 月第 2 版,2004 年 2 月第 2 次印刷

850mm×1168mm 1/32;21 印张;559 千字;638 页;3001~8000 册

56.00 元

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(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

## 第2版 前言

本书第1版于1999年10月出版后，很快销售一空。作者和冶金工业出版社均纷纷接到读者来电和来函要求该书重印或出第2版。考虑到本书第1版于1998年底脱稿至今，超强永磁体——稀土铁系永磁材料的产量和质量，新品种、新工艺、新技术与新应用以及相关理论已有很大发展，再加上本书第1版存在的遗漏和叙述上的不妥，显然重印已不合适。当今和今后相当长一段时间内，稀土铁系永磁材料仍然是磁性材料中应用范围最广的材料，是迅速发展的新材料。为了满足读者的要求，作者决定在修改第1版中存在的遗漏和不妥之处的基础上，增写3章内容，以新版与读者见面。增加的3章内容是第11章“烧结Nd-Fe-B系永磁材料的新发展”，第12章“稀土铁系粘结永磁材料的新发展”，第13章“永磁材料应用的若干问题”。新版着重从材料生产者、研究者和应用者实用的角度，把理论上的新发展和新材料、新工艺与新应用有机地结合起来，有针对性地阐述上述内容，期望便于读者阅读与应用。吴良宏高级工程师对本书的第1版做了系统的校阅，并提出了许多宝贵中肯的修改意见，同时还得到了许多朋友的关心与支持。在此一并致以衷心的感谢！

作 者

2004年1月于北京

## 前 言

永磁材料已成为现代科学技术,如计算机技术、信息技术、航空航天技术、通讯技术、交通运输(汽车)技术,办公自动化技术、家电技术与人体健康和保健技术等重要物质基础。近几年尽管金融危机冲击着许多国家的经济,但世界对 Nd-Fe-B 系永磁材料的需求量仍以每年 20%~30% 的速度增长。稀土铁系永磁材料将成为永磁材料的主体产品。该材料的制造技术与工艺还在不断发展,产品的质量也在不断地提高,产品的品种还在不断地扩展。撰写本书的目的是为了推动我国稀土铁系(列)永磁材料产业和相关高技术产业的发展,促进新型稀土永磁材料的研究与创新;为 21 世纪初中国稀土永磁材料产业技术与产品创世界一流水平,为在 21 世纪初中国成为世界稀土永磁材料开发与生产基地(或中心)贡献一份力量。

本书共 10 章。第 1 章重点介绍稀土永磁材料的发展及其与高新技术的关系;第 2 章是永磁材料磁学基础,除了扼要叙述铁磁学基本原理外,还论述了永磁材料的内禀与技术磁参量的物理本质与影响因素;第 3 章介绍了 R-Fe-B 系相图,第 4 章是稀土铁系化合物的晶体结构与内禀磁特性,这两章是了解与认识稀土铁系永磁材料的结构,显微结构变化、成分、性能与工艺之间关系的物理学与材料学的基础;第 5 章讨论了烧结 R-Fe-B 系永磁材料的制造原理与技术,重点讨论工艺理论;第 6 章用较大篇幅讨论了烧结 R-Fe-B 系永磁材料的材料学原理,包括材料的成分、显微结构、工艺与性能之间关系的规律和各种 R-Fe-B 系永磁材料的成分、工艺与磁性能;第 7、第 8 章分别论述粘结 R-Fe-B 系永磁材料和热变形 R-Fe-B 系永磁材料,粘结 R-Fe-B 系永磁材料将占越来越重要

的地位;第9和第10章分别论述两类正在发展中的新型 R-Fe-B 系永磁材料,即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,后一种永磁材料有可能会大大地促进粘结永磁材料的发展。

本书是作者多年从事稀土永磁材料的科学研究,培养硕士与博士研究生,从事材料科学教学和从事稀土永磁材料生产与开发工作的积累与总结。撰写此书力求做到理论联系实际,把材料科学、物理学、热力学与晶体学等的理论融会贯通起来,有针对性地阐述稀土铁系永磁材料科研与生产中遇到的理论与实际问题。尽量深入浅出地阐述基本概念与原理,希望能给读者有较全面、较系统的知识。

我们在撰写本书的过程中,得到了中国工程院王震西院士、吉林大学张裕普教授、美国国际高技术集团公司及美国稀土公司总裁陶一飞博士和副总裁何进博士、天津经济技术开发区三环乐喜新材料有限公司总经理李景宏高级工程师、北京京磁技术总公司总经理陈平安先生、北京环星磁性材料制造有限公司总经理游峰先生、宁夏石嘴山环星磁体厂厂长泰大英先生、山西阳泉市京宇磁性材料总公司及该公司总经理贾建华先生、山西太原开源永磁设备公司经理董永安先生、北京新大科机电技术有限责任公司总经理谢怀宝先生、中国计量科学研究院瞿清昌研究员和林安利研究员以及赵文彤先生等的热情鼓励与支持;得到作者所在单位的同事与家人的理解与支持;在本书撰写的过程中,夏守余副教授帮助做了大量繁杂的文字方面的工作;此外还得到王佐诚博士、刘湘涟博士研究生、高学绪博士研究生、赵青博士研究生、何叶青博士研究生、乔玮工程师、张茂才高级工程师、史振华副教授等的多方面支持与帮助,在此一并表示衷心的感谢。

作者学识有限,且稀土铁系永磁材料还在发展中,书中难免有失误或欠妥之处,敬请广大读者赐教。

著者

1999年3月10日于北京

# 目 录

## 第 1 章 绪 论

|                        |      |
|------------------------|------|
| 1.1 永磁材料的功能特性与种类       | (1)  |
| 1.1.1 永磁材料             | (1)  |
| 1.1.2 永磁材料的功能特性        | (1)  |
| 1.1.3 永磁材料的种类          | (2)  |
| 1.2 永磁材料的发展和寿命评估       | (4)  |
| 1.3 Nd-Fe-B 系永磁材料与高新技术 | (9)  |
| 1.4 中国 Nd-Fe-B 永磁材料的发展 | (13) |
| 1.5 稀土铁系永磁材料的种类与制造方法   | (14) |
| 参考文献                   | (16) |

## 第 2 章 永磁材料磁学基础

|                     |      |
|---------------------|------|
| 2.1 磁学量的定义与单位制      | (18) |
| 2.2 原子磁性            | (21) |
| 2.3 自发磁化理论要点        | (25) |
| 2.3.1 3d 金属的自发磁化    | (25) |
| 2.3.2 稀土金属的自发磁化与磁有序 | (26) |
| 2.3.3 稀土金属间化合物的自发磁化 | (29) |
| 2.4 铁磁体中的磁自由能与磁畴结构  | (29) |
| 2.4.1 静磁能           | (31) |
| 2.4.2 磁晶各向异性能 $E_K$ | (31) |
| 2.4.3 退磁场与退磁场能      | (34) |
| 2.4.4 磁致伸缩与磁弹性能     | (36) |

|                                      |      |
|--------------------------------------|------|
| 2.4.5 磁畴壁与磁畴能                        | (38) |
| 2.4.6 磁畴的形成与磁畴结构                     | (41) |
| 2.5 技术磁化与反磁化过程                       | (43) |
| 2.5.1 技术磁化与反磁化过程                     | (43) |
| 2.5.2 畴壁位移的磁化过程                      | (45) |
| 2.5.3 磁矩转动的磁化过程                      | (47) |
| 2.6 永磁材料的技术磁参量                       | (48) |
| 2.6.1 饱和磁化强度 $M_s$                   | (48) |
| 2.6.2 居里温度 $T_c$                     | (50) |
| 2.6.3 各向异性场 $H_A$                    | (51) |
| 2.6.4 剩磁 $B_r$                       | (53) |
| 2.6.5 矫顽力与矫顽力理论                      | (55) |
| 2.6.6 磁能积 $(BH)_m$                   | (63) |
| 2.6.7 永磁体的工作点与负载线                    | (67) |
| 2.6.8 回复导磁率 $\mu_{rec}$              | (68) |
| 2.6.9 $J-H$ 退磁曲线上的弯曲点 $H_k$ 和方形度 $Q$ | (69) |
| 2.6.10 动态磁能积 $(BH)_m$ (或称回复磁能积)      | (69) |
| 2.6.11 永磁材料的稳定性                      | (70) |
| 参考文献                                 | (76) |

### 第 3 章 稀土铁系相图及其化合物

|                                                          |      |
|----------------------------------------------------------|------|
| 3.1 引言                                                   | (77) |
| 3.2 R-Fe 二元系相图和化合物                                       | (78) |
| 3.3 Nd-Fe-B 三元系相图及化合物                                    | (84) |
| 3.4 R(Dy, Tb)-Fe-B 三元系相图                                 | (91) |
| 3.5 Nd-Fe-C 三元系相图                                        | (92) |
| 3.6 Nd-Fe-Al 三元系相图                                       | (93) |
| 3.7 Nd-Fe-B 三元系非平衡状态图                                    | (94) |
| 3.7.1 熔体以 $5^\circ\text{C}/\text{s}$ 冷速得到的 Nd-Fe-B 三元系相图 | (95) |

|                                                                                                                 |       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 3.7.2 熔体过热导致的不平衡状态图 .....                                                                                       | (97)  |
| 3.8 Pr-Fe-B 三元系相图 .....                                                                                         | (97)  |
| 3.8.1 Pr-Fe-B 三元系室温截面图 .....                                                                                    | (98)  |
| 3.8.2 Pr-Fe-B 三元系垂直截面图 .....                                                                                    | (98)  |
| 3.8.3 亚稳定 Pr-Fe-B 三元系 .....                                                                                     | (100) |
| 3.9 R-Fe-B-x 四元系相图 .....                                                                                        | (101) |
| 3.9.1 Nd-Dy(或 Tb)-Fe-B 四元系中 $[\text{Nd}_{1-x}(\text{Dy}$<br>或 $\text{Tb})_x]_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 截面图 ..... | (102) |
| 3.9.2 Nd-Fe-B-O 四元系 .....                                                                                       | (103) |
| 参考文献 .....                                                                                                      | (105) |

## 第 4 章 稀土铁系化合物的晶体结构与内禀磁特性

|                                                                                                                                          |       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 4.1 概述 .....                                                                                                                             | (107) |
| 4.2 稀土金属的晶体结构 .....                                                                                                                      | (109) |
| 4.3 $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 、 $\text{R}_2\text{Co}_{14}\text{B}$ 和 $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$ 化合物的晶体结构与<br>结构参数 ..... | (111) |
| 4.4 $\text{R}_{1+\epsilon}\text{Fe}_4\text{B}_4$ 化合物的晶体结构 .....                                                                          | (120) |
| 4.5 $\text{R}_2\text{Fe}_{17}$ 化合物的晶体结构 .....                                                                                            | (123) |
| 4.5.1 $\text{Th}_2\text{Ni}_{17}$ 型晶体结构 .....                                                                                            | (123) |
| 4.5.2 $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$ 型晶体结构 .....                                                                                            | (126) |
| 4.6 $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 化合物的交换作用、居里温度与线膨胀、<br>弹性反常行为 .....                                                                | (128) |
| 4.6.1 双亚点阵分子场理论对 $T_c$ 的分析 .....                                                                                                         | (129) |
| 4.6.2 $(\text{Nd}_{2-x}\text{R}_x)(\text{Fe}_{1-y}\text{M}_y)_{14}\text{B}$ 化合物 $T_c$ 实验结<br>果与分析 .....                                  | (133) |
| 4.6.3 $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 化合物热膨胀的反常行为 .....                                                                               | (134) |
| 4.7 $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 化合物的磁矩和磁极化强度 .....                                                                                | (135) |
| 4.7.1 $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 化合物的原子磁矩 .....                                                                                  | (136) |
| 4.7.2 $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 中元素取代对磁矩的影响 .....                                                                               | (139) |
| 4.7.3 $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 化合物的磁极化强度与温度的关系 .....                                                                           | (141) |

|            |                                           |       |
|------------|-------------------------------------------|-------|
| 4.8        | $R_2Fe_{14}B$ 化合物的磁晶各向异性 .....            | (143) |
| 4.8.1      | $R_2Fe_{14}B$ 系化合物的各向异性 .....             | (144) |
| 4.8.2      | $R_2Fe_{14}B$ 系化合物的自旋再取向和一级磁<br>化过程 ..... | (145) |
| 4.8.3      | $R_2Fe_{14}B$ 系化合物各向异性的起因 .....           | (147) |
| 4.8.4      | 元素取代对 $R_2Fe_{14}B$ 化合物各向异性的影<br>响 .....  | (149) |
| 参考文献 ..... |                                           | (152) |

## 第 5 章 烧结 Nd-Fe-B 系永磁材料的制造原理与技术

|       |                                    |       |
|-------|------------------------------------|-------|
| 5.1   | 概述 .....                           | (155) |
| 5.2   | 原材料的选择与熔炼 .....                    | (156) |
| 5.2.1 | 原材料选择 .....                        | (156) |
| 5.2.2 | 熔炼 .....                           | (158) |
| 5.3   | 铸锭的晶体生长与铸锭组织的控制 .....              | (159) |
| 5.3.1 | Nd-Fe-B 系合金的结晶过程 .....             | (159) |
| 5.3.2 | 铸锭非平衡结晶过程晶体生长特征 .....              | (161) |
| 5.3.3 | Nd-Fe-B 系合金铸锭组织的控制 .....           | (163) |
| 5.4   | 制粉原理与技术 .....                      | (165) |
| 5.4.1 | 粉末体的性质 .....                       | (165) |
| 5.4.2 | 制造烧结 Nd-Fe-B 永磁体对磁性粉末<br>的要求 ..... | (166) |
| 5.4.3 | 机械球磨制粉技术 .....                     | (167) |
| 5.4.4 | 气流磨制粉原理与技术 .....                   | (169) |
| 5.5   | 粉末磁场取向与压型原理和技术 .....               | (172) |
| 5.5.1 | 粉末磁场取向的重要性 .....                   | (172) |
| 5.5.2 | 粉末颗粒在磁场中的取向过程 .....                | (173) |
| 5.5.3 | 粉末磁场取向程度的评价尺度 .....                | (177) |
| 5.5.4 | 粉末压型 .....                         | (180) |
| 5.6   | 烧结原理与技术 .....                      | (187) |

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| 5.6.1 引言 .....              | (187) |
| 5.6.2 液相烧结 .....            | (188) |
| 5.6.3 液相烧结的基本过程 .....       | (188) |
| 5.6.4 液相烧结的致密化与晶粒长大控制 ..... | (191) |
| 参考文献 .....                  | (192) |

## 第 6 章 烧结 Nd-Fe-B 系永磁材料

|                                                                  |       |
|------------------------------------------------------------------|-------|
| 6.1 概述 .....                                                     | (194) |
| 6.2 三元 Nd-Fe-B 系烧结永磁材料的成分与性能 .....                               | (198) |
| 6.3 Nd-Fe-B 系永磁材料的烧结、热处理原理与技术 .....                              | (202) |
| 6.3.1 Nd-Fe-B 系永磁体的烧结 .....                                      | (203) |
| 6.3.2 Nd-Fe-B 系永磁体的回火热处理 .....                                   | (206) |
| 6.4 烧结 Nd-Fe-B 系永磁材料的显微组织 .....                                  | (210) |
| 6.4.1 烧结 Nd-Fe-B 系永磁材料的显微组织特征 .....                              | (210) |
| 6.4.2 晶界显微结构与晶界相 .....                                           | (215) |
| 6.4.3 添加元素的晶界显微结构 .....                                          | (219) |
| 6.5 烧结 Nd-Fe-B 系永磁体的畴结构与反磁化 .....                                | (223) |
| 6.5.1 畴结构与畴宽 .....                                               | (223) |
| 6.5.2 稀土化合物永磁的畴结构参数 .....                                        | (226) |
| 6.5.3 烧结 Nd-Fe-B 系永磁体的反磁化过程与畴<br>结构变化 .....                      | (228) |
| 6.6 烧结 Nd-Fe-B 系永磁材料的矫顽力 .....                                   | (230) |
| 6.6.1 烧结 Nd-Fe-B 系永磁体的形核场 $H_N$ 与矫<br>顽力 .....                   | (230) |
| 6.6.2 烧结 Nd-Fe-B 永磁体的 $H_N$ 与各向异性<br>( $K_1$ 和 $H_A$ ) 的关系 ..... | (232) |
| 6.6.3 烧结 Nd-Fe-B 系永磁材料的形核场 .....                                 | (235) |
| 6.7 氧在烧结 Nd-Fe-B 系永磁材料中的行为与作用 .....                              | (241) |
| 6.7.1 稀土氧化物的标准生成自由能 .....                                        | (242) |
| 6.7.2 氧进入 Nd-Fe-B 系磁体的过程与途径 .....                                | (243) |

|        |                                                                                                                     |       |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 6.7.3  | 氧对烧结 Nd-Fe-B 永磁材料组织与性能的影响 .....                                                                                     | (246) |
| 6.8    | 高磁能积烧结 Nd-Fe-B 系永磁材料的成分设计与制造 .....                                                                                  | (249) |
| 6.8.1  | Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B 单晶(单相)体磁能积的理论值和实际的极限值 .....                                                      | (250) |
| 6.8.2  | 烧结 Nd-Fe-B 系永磁材料的 $B_r$ 和 $(BH)_m$ 极限值 .....                                                                        | (251) |
| 6.8.3  | 烧结 Nd-Fe-B 系永磁体主相体积分数和取向度与性能的关系 .....                                                                               | (252) |
| 6.8.4  | 烧结 Nd-Fe-B 系永磁体各个相的体积分数的计算 .....                                                                                    | (254) |
| 6.8.5  | 高磁能积烧结 Nd-Fe-B 系永磁材料的成分设计与制造 .....                                                                                  | (257) |
| 6.9    | 高矫顽力烧结 Nd-Fe-B 系永磁材料的设计与制造 .....                                                                                    | (261) |
| 6.9.1  | 决定烧结 Nd-Fe-B 系永磁材料矫顽力因素 .....                                                                                       | (261) |
| 6.9.2  | 高矫顽力烧结 Nd-Fe-B 系永磁材料的成分考虑 .....                                                                                     | (262) |
| 6.9.3  | 高矫顽力烧结 Nd-Fe-B 系永磁材料的结构设计 .....                                                                                     | (264) |
| 6.10   | 三元以上的(Nd-R)(Fe-M <sub>1</sub> -M <sub>2</sub> )-B 系烧结永磁材料 .....                                                     | (266) |
| 6.10.1 | 添加 Co 的 Nd-Fe-Co-B 系永磁材料 .....                                                                                      | (266) |
| 6.10.2 | 添加 Al 的 Nd-Fe-Al-B 系和 Nd-Fe-Co-Al-B 系永磁材料 .....                                                                     | (267) |
| 6.10.3 | 添加 Dy 或 Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (或 Tb <sub>4</sub> O <sub>7</sub> )的 Nd-Dy-Fe-B 系和 Nd-Dy-Fe-Co-B 系永磁材料 ..... | (270) |
| 6.10.4 | 添加 Cu 的(Nd,Dy)-Fe-B 和(Nd,Dy)-(Fe,Co)-B 系烧结永磁材料 .....                                                                | (275) |
| 6.10.5 | 添加 Nb(或 V)的 Nd-Fe-Nb-B 系和                                                                                           |       |

|                                                            |       |
|------------------------------------------------------------|-------|
| Nd-Dy-Fe-Co-Nb-B 系永磁材料 .....                               | (276) |
| 6.10.6 添加 Ga 的 Nd-Fe-Ga-B 或 Nd-Dy-Fe-Ga-B<br>系烧结永磁材料 ..... | (278) |
| 6.11 低成本的 R-Fe-B 系(R=La,Ce,MM,Pr)烧结永<br>磁材料 .....          | (282) |
| 6.11.1 (Pr,Nd)-Fe-B 系烧结永磁材料 .....                          | (282) |
| 6.11.2 (Ce,Nd)-Fe-B 系烧结永磁材料 .....                          | (286) |
| 6.11.3 (La,Nd)-Fe-B 系烧结永磁材料 .....                          | (287) |
| 6.11.4 MM-Fe-B 系烧结永磁材料 .....                               | (290) |
| 6.12 具有低温度系数的烧结 R-Fe-B 系永磁材料 .....                         | (293) |
| 6.13 烧结 Nd-Fe-B 系永磁材料的腐蚀与保护 .....                          | (300) |
| 6.13.1 烧结 Nd-Fe-B 系永磁材料腐蚀行为与腐<br>蚀试验 .....                 | (301) |
| 6.13.2 Nd-Fe-B 系磁粉的氧化行为 .....                              | (301) |
| 6.13.3 大块烧结 Nd-Fe-B 系永磁材料的氧化与<br>腐蚀 .....                  | (303) |
| 6.13.4 烧结 Nd-Fe-B 系永磁材料的表面防腐 .....                         | (307) |
| 6.14 用双合金法制造烧结 Nd-Fe-B 永磁材料 .....                          | (308) |
| 参考文献 .....                                                 | (312) |

## 第 7 章 稀土铁系粘结永磁材料及其永磁粉末的 制造原理与技术

|                                               |       |
|-----------------------------------------------|-------|
| 7.1 粘结永磁材料及其应用与发展 .....                       | (318) |
| 7.2 粘结 Nd-Fe-B 系永磁材料的制造 .....                 | (320) |
| 7.3 粘结永磁体的磁性能与影响因素 .....                      | (323) |
| 7.4 快淬法制造 Nd-Fe-B 永磁粉末的原理与技术 .....            | (326) |
| 7.5 HD 和 HDDR 法制造 Nd-Fe-B 系磁粉的原理与<br>技术 ..... | (333) |
| 7.5.1 氢与 R-TM 化合物的相互作用 .....                  | (333) |
| 7.5.2 HD 处理和 HD 磁粉 .....                      | (336) |

|                                               |       |
|-----------------------------------------------|-------|
| 7.5.3 Nd-Fe-B系各向同性 HDDR 磁粉的制造原理<br>与技术 .....  | (337) |
| 7.5.4 Nd-Fe-B系各向异性 HDDR 磁粉的制造原理<br>与技术 .....  | (344) |
| 7.6 机械合金化法制造 Nd-Fe-B 系永磁粉的原理与<br>技术 .....     | (352) |
| 7.6.1 机械合金化法的过程与原理 .....                      | (352) |
| 7.6.2 机械合金化和固态反应法制造 Nd-Fe-B 系<br>永磁材料粉末 ..... | (354) |
| 参考文献 .....                                    | (356) |

## 第 8 章 稀土铁系热变形各向异性永磁材料

|                                                                          |       |
|--------------------------------------------------------------------------|-------|
| 8.1 概述 .....                                                             | (359) |
| 8.2 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 化合物为基体的永磁材料的力学性能与<br>热变形行为 ..... | (359) |
| 8.2.1 Nd-Fe-B 系永磁体的力学性能 .....                                            | (359) |
| 8.2.2 Nd-Fe-B 系永磁材料的热形变行为 .....                                          | (361) |
| 8.3 R-Fe-B 系永磁体热形变过程中磁性能与显微结构<br>的变化 .....                               | (364) |
| 8.3.1 Pr-Fe-B 系永磁材料热压过程中磁性能与显<br>微结构的变化 .....                            | (364) |
| 8.3.2 Pr-Fe-Cu-B 系永磁合金热轧形变过程中磁性<br>能的变化 .....                            | (369) |
| 8.3.3 合金成分对铸造热形变 R-Fe-B 系永磁材料<br>磁性能的影响 .....                            | (372) |
| 8.3.4 热变形 MQⅢ 磁体的成分、组织与性能 .....                                          | (374) |
| 8.4 热形变过程中 R-Fe-B 系永磁体各向异性的形成<br>机理 .....                                | (378) |
| 8.4.1 铸造-热变形过程中 R-Fe-B 系永磁材料的各<br>向异性形成机理 .....                          | (380) |

|                                       |       |
|---------------------------------------|-------|
| 8.4.2 MQⅢ磁体在热压形变过程中各向异性<br>形成机理 ..... | (386) |
| 参考文献 .....                            | (388) |

## 第9章 稀土铁系间隙化合物永磁材料

|                                                                                                                                  |       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 9.1 概 述 .....                                                                                                                    | (390) |
| 9.2 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$ 间隙化合物稀土永磁材料 .....                                                                      | (393) |
| 9.2.1 $\text{R}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$ 间隙化合物的形成 .....                                                                        | (393) |
| 9.2.2 $\text{R}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$ 间隙化合物的结构 .....                                                                        | (398) |
| 9.2.3 $\text{R}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$ 间隙化合物的内禀磁特性 .....                                                                     | (400) |
| 9.2.4 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$ 化合物粉末与永磁材料的制造<br>方法 .....                                                            | (406) |
| 9.2.5 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ 粉末的氮化与氮原子的扩散 .....                                                                             | (409) |
| 9.2.6 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$ 各向同性粉末的成分、工艺与磁<br>性能 .....                                                           | (413) |
| 9.2.7 各向异性 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$ 磁粉的成分、工艺与<br>磁性能 .....                                                          | (417) |
| 9.2.8 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{C}_x$ 间隙化合物永磁材料 .....                                                                      | (420) |
| 9.3 1:12型间隙化合物稀土铁系永磁材料 .....                                                                                                     | (424) |
| 9.3.1 1:12型稀土铁系化合物的成分与晶体结构<br>.....                                                                                              | (424) |
| 9.3.2 1:12型稀土铁系化合物与其氮化物的内禀<br>磁特性 .....                                                                                          | (427) |
| 9.4 3:29型间隙化合物稀土铁系永磁材料 .....                                                                                                     | (431) |
| 9.4.1 3:29型稀土铁系化合物的发现与<br>晶体结构 .....                                                                                             | (431) |
| 9.4.2 3:29型稀土铁系化合物的形成及其成分 .....                                                                                                  | (433) |
| 9.4.3 $\text{R}_3(\text{Fe}_{1-x}\text{M}_x)_{29}$ 内禀磁特性和 $\text{Sm}_3(\text{Fe}, \text{M})_{29}\text{N}_x$<br>间隙化合物稀土永磁材料 ..... | (433) |
| 参考文献 .....                                                                                                                       | (435) |

## 第 10 章 双相纳米晶复合永磁材料

|        |                                                                                                                                |       |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 10.1   | 双相纳米晶复合永磁材料的发展背景·····                                                                                                          | (439) |
| 10.2   | 双相纳米晶复合永磁材料的特征和制造方法·····                                                                                                       | (442) |
| 10.3   | 双相纳米晶复合永磁材料的交换耦合模型·····                                                                                                        | (443) |
| 10.3.1 | 双相纳米晶复合永磁材料的一维交换耦合模型·····                                                                                                      | (443) |
| 10.3.2 | 各向同性双相纳米晶复合永磁材料的二维与三维磁交换耦合模型·····                                                                                              | (446) |
| 10.3.3 | 各向异性双相纳米晶复合永磁材料交换耦合的三维模型·····                                                                                                  | (449) |
| 10.4   | 发展中的双相纳米晶复合永磁材料·····                                                                                                           | (454) |
| 10.5   | $\text{Pr}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$ 系纳米晶复合永磁材料 ·····                                                          | (454) |
| 10.5.1 | 快淬工艺参数、显微组织与磁性能的关系 ···                                                                                                         | (455) |
| 10.5.2 | 完全过快淬(非晶态)与部分过快淬(部分非晶态) $\text{Pr}_8\text{Fe}_{86}\text{B}_6$ 合金带晶化退火后显微结构与磁性能的关系·····                                         | (459) |
| 10.5.3 | 纳米晶复合永磁材料 $\text{Pr}_x\text{Fe}_{94-x}\text{B}_6$ 的组织结构与磁性的关系及剩磁增强效应·····                                                      | (463) |
| 10.5.4 | 元素(Nd, Dy, Zr, Nb 等)取代对 $(\text{Pr}, \text{Dy})_2\text{-(Fe, M)}_{14}\text{B}$ $\alpha\text{-Fe(M)}$ 纳米晶复合永磁材料组织结构与磁性能的影响····· | (466) |
| 10.5.5 | $\text{Pr}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ $\alpha\text{-Fe}$ 纳米晶复合粘结永磁材料 ···                                                         | (471) |
| 10.6   | $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$ 系( $\text{R}=\text{Pr}$ 或 $\text{Nd}$ )纳米晶复合永磁材料的磁硬化·····                  | (473) |
| 10.6.1 | 硬磁性相与软磁性相两相交换作用·····                                                                                                           | (473) |
| 10.6.2 | 双相纳米晶 $\text{Pr}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ $\alpha\text{-Fe}$ 永磁合金带起始磁化过程·····                                                  | (473) |
| 10.6.3 | $\text{Pr}_8\text{Fe}_{86}\text{B}_6$ 合金最佳快淬态的微观结构 ·····                                                                       | (474) |
| 10.6.4 | $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ $\alpha\text{-Fe}$ 纳米晶复合永磁材料反磁化                                                             |       |

|                                                                                                   |       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 形核场与交换耦合钉扎场·····                                                                                  | (477) |
| 10.7 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$ 系纳米晶复合永磁材料 ·····                        | (480) |
| 10.8 纳米晶复合 $\text{Fe}_3\text{B}/\alpha\text{-Fe} + \text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 系永磁材料 ····· | (481) |
| 参考文献·····                                                                                         | (485) |

## 第 11 章 烧结 Nd-Fe-B 系永磁材料新进展

|                                                         |       |
|---------------------------------------------------------|-------|
| 11.1 概述·····                                            | (487) |
| 11.2 新牌号 Nd-Fe-B 系永磁材料 ·····                            | (491) |
| 11.2.1 实验室研制的高磁能积永磁体·····                               | (492) |
| 11.2.2 商品高性能烧结 Nd-Fe-B 磁体 ·····                         | (495) |
| 11.3 近快速凝固鳞片铸锭技术(SC) ·····                              | (498) |
| 11.3.1 制造鳞片铸锭技术与工艺简介·····                               | (498) |
| 11.3.2 制造高性能烧结 Nd-Fe-B 永磁体对厚带<br>(或称鳞片)显微组织的要求·····     | (499) |
| 11.3.3 近快速凝固鳞片的显微组织·····                                | (499) |
| 11.3.4 鳞片铸锭的显微结构与成分的关系·····                             | (502) |
| 11.3.5 熔炼与鳞片铸锭(SC)的新设备 ·····                            | (503) |
| 11.4 氢破碎(HD)和气流磨(JM)制粉 ·····                            | (505) |
| 11.4.1 采用 SC+HD+JM 工艺制粉可获得优异<br>磁性能的烧结 Nd-Fe-B 磁体 ····· | (505) |
| 11.4.2 HD 过程 ·····                                      | (508) |
| 11.4.3 HD 设备和技术工艺 ·····                                 | (510) |
| 11.4.4 制造烧结 Nd-Fe-B 永磁材料的添加剂 ·····                      | (512) |
| 11.5 粉末磁场取向与成形新技术·····                                  | (512) |
| 11.5.1 粉末取向的新技术·····                                    | (512) |
| 11.5.2 橡胶模压(RIP)新技术 ·····                               | (515) |
| 11.5.3 新开发的压形技术与装置·····                                 | (518) |
| 11.6 低温烧结与磁体晶粒尺寸的控制·····                                | (520) |
| 11.6.1 影响烧结过程 Nd-Fe-B 晶粒长大的因素 ···                       | (520) |
| 11.6.2 烧结时晶粒长大动力学·····                                  | (522) |