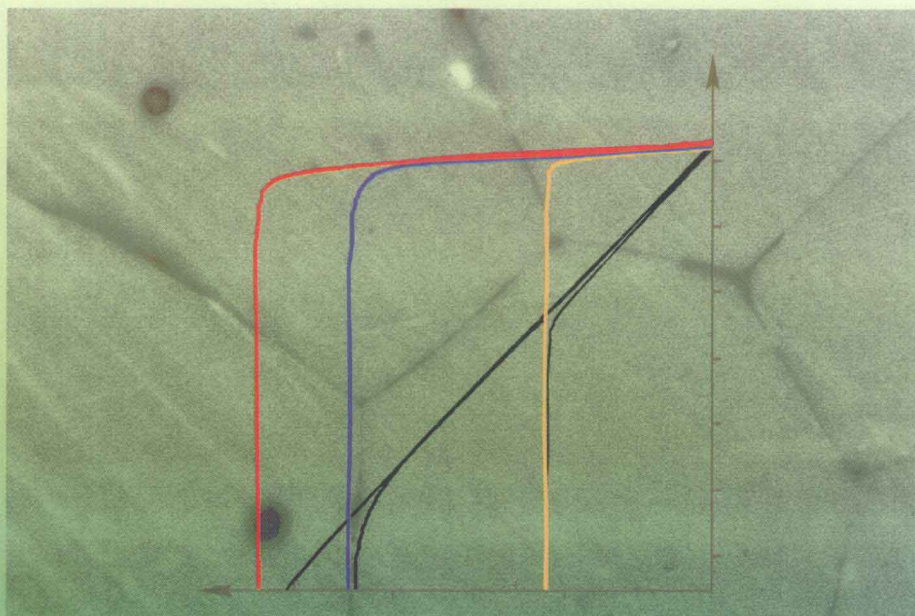


# 烧结钕铁硼

## 稀土永磁材料与技术

周寿增 董清飞 高学绪 编著



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press

# 烧结钕铁硼 稀土永磁材料与技术

周寿增 董清飞 高学绪 编著

北 京  
冶金工业出版社  
2011

## 内 容 简 介

本书主要介绍了烧结钕铁硼(S-NdFeB)永磁材料科学与制造技术。在简明扼要地阐述了永磁材料概念、永磁材料分类、永磁材料与高新技术的发展关系,以及S-NdFeB永磁材料的发展趋势的基础上,深入浅出地论述了永磁材料磁学基础、S-NdFeB永磁材料的内禀磁性能与成分、S-NdFeB永磁材料技术磁参量与材料显微结构和工艺的关系规律、S-NdFeB永磁材料的化学性能与力学性能、边界强化与控氧技术等共性问题;并按S-NdFeB永磁材料制造工艺过程,系统地论述了冶炼与铸锭、制粉、磁场取向与压型、烧结与回火、机加工、表面处理、质量监控与质量检测、充磁等原理和技术。

本书适合从事永磁材料科研、生产与应用以及仪表、电工、自动化、计算机和磁应用等相关技术领域的科技人员、管理人员和销售人员阅读,也可作为大专院校材料科学与工程专业师生的教学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

烧结钕铁硼稀土永磁材料与技术/周寿增,董清飞,高学绪编著.  
—北京:冶金工业出版社,2011.9

ISBN 978-7-5024-5679-5

I. ①烧… II. ①周… ②董… ③高… III. ①烧结—钕铁硼  
—稀土永磁材料 IV. ①TM273

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第185872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 yjcb@cnmip.com.cn

责任编辑 王雪涛 组稿编辑 张 卫 美术编辑 彭子赫

版式设计 孙跃红 责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5679-5

北京鑫正大印刷有限公司印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2011年9月第1版,2011年9月第1次印刷

169mm×239mm;22.25印张;433千字;331页

69.00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(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)

# 序 言

烧结 Nd-Fe-B (S-NdFeB) 永磁材料自 1985 年进入产业化阶段以来,到现在已经历了 26 年的历史。26 年来,中国的 S-NdFeB 永磁材料产业和相关产业群发生了翻天覆地的变化。

1985 年我国年生产 S-NdFeB 永磁材料 9 吨,到 2009 年我国 S-NdFeB 永磁材料年产量已增至 5.7 万吨,24 年增长了 6000 倍。1985 年我国 S-NdFeB 产量占世界总产量的 13%,而到 2009 年已占世界总产量的约 80%,我国已成为生产 S-NdFeB 永磁材料的世界大国。

中国 S-NdFeB 永磁材料的迅速发展,有力地推动了我国(和世界)经济的发展,推动了高新技术(包括计算机硬盘驱动,电动车,风力发电与节能电机,办公自动化,消费电子与人体医疗技术等)的发展;促进了传统产业结构转型和升级;促进了稀土资源的综合利用,促进了就业。

中国 S-NdFeB 产业技术也在日新月异地发生变化。成分优化、冶炼与铸锭、制粉技术、磁场取向与成型、烧结与回火、边界强化、机加工、表面防腐涂层、质量监控与质量检测等技术不断地创新与发展,充分体现了我国科技人员和技术工人的聪明才智和伟大的创新精神。

伴随着产业迅速发展的同时,我国 S-NdFeB 永磁材料产业又面临着许多新的挑战:如何适应稀土资源状况,重新设计、调整与优化成分,以确保产业持续的发展;如何产业化生产综合性能高、一致性和

重复性好的高档产品；如何提高生产过程的智能控制和过程自动化水平，提高效率和成品率；如何降低成本，包括原材料成本、人力成本和能耗成本；如何提高企业的创新能力和竞争能力等。

目前，我国 S-NdFeB 永磁材料产业又进入了一个技术创新的新时期。这个时期的特点是要依靠技术革命与技术创新来提高效率、提高成品率、提高质量和降低成本。技术创新不能仅仅依靠少数高管人员和设备，更要依靠广大科研人员、技术骨干和技术工人，提高技术团队的理论水平和技术素养已成为提高企业创新能力和竞争力的关键。

周寿增教授等人在总结二十多年来国内外 S-NdFeB 永磁材料产业技术发展的基础上，为适应当前我国 S-NdFeB 永磁材料产业的迫切需求，撰写了《烧结钕铁硼稀土永磁材料与技术》。该书针对烧结 S-NdFeB 永磁材料，系统地论述了材料的成分、显微结构、性能与工艺技术的相互关系规律，以及材料制备的原理和技术。该书有针对性、理论联系实际、文字深入浅出、通俗易懂、可读性强，是一本难得的好书。该书的出版必将推动我国 S-NdFeB 永磁材料产业的发展与进步。

谨表祝贺！

中国工程院 院士

王震西

· 2011年4月

# 前 言

作者 1999 年底编著出版了《超强永磁体——稀土铁系永磁材料》一书的第一版，并时隔 5 年于 2004 年在修改、补充和增加三章内容后又出版了该书的第二版。自第二版问世以来，时间过去了 7 年。在这 7 年中，我国烧结钕铁硼永磁材料产业和相关产业群都发生了翻天覆地的变化。

我国 S-NdFeB 永磁材料的产量由 2000 年的 0.56 万吨，占世界产量的 41%，到 2008 年已增加到 5.24 万吨，占世界产量的约 78.6%。我国已成为 S-NdFeB 永磁材料的世界生产大国。

我国 S-NdFeB 永磁材料的发展促进了国民经济的发展，促进了高新技术的发展，促进了传统产业结构转型与升级，促进了稀土资源的综合利用，还促进了就业。高新技术的发展反过来又促进了 S-NdFeB 永磁材料产业的发展，自 2000 年到 2008 年，我国 S-NdFeB 永磁材料平均年增速达 104%，平均年增长 0.58 万吨，按此速度增长，到 2020 年我国的 S-NdFeB 永磁材料产量将可望达到 12 万~15 万吨。

伴随着经济的迅猛发展，我国 S-NdFeB 永磁材料产业面临着许多挑战和严峻的竞争。我国 S-NdFeB 永磁材料产业已进入一个新的技术创新阶段，其主要特点是守旧者弱，创新者强，只有依靠创新才能提高效率、成品率、质量和竞争力。创新要依靠广大技术人员和技术工人，如何提高企业团队的理论水平和技术素养，已成为 S-NdFeB 永磁

材料产业发展的重中之重。

为适应 S-NdFeB 永磁材料产业发展目前面临的挑战和需求,作者撰写了本书。本书论述了永磁材料磁学基础;永磁材料与高技术的关系;S-NdFeB 永磁材料成分与内禀磁性能;S-NdFeB 永磁材料技术磁性能、化学性能、力学性能与显微结构的相互关系;边界强化、控氧技术等新技术。按生产工艺过程,论述了冶炼与铸锭、制粉、磁场取向与压型、烧结与回火、机加工、表面处理、质量监控与质量检测、充磁等原理和技术。

与《超强永磁体——稀土铁系永磁材料》一书相比,本书不涉及黏结永磁材料、间隙化合物稀土永磁材料、热变形稀土永磁材料。本书集中论述了 S-NdFeB 永磁材料学及其制造原理和技术,在修改补充了《超强永磁体——稀土铁系永磁材料》中的冶炼与铸锭、制粉、磁场取向与压型、烧结与回火内容外,增加了 S-NdFeB 永磁材料的化学性能、力学性能以及边界强化与控氧工艺,机加工,表面处理,质量监控与质量检测,充磁的原理与技术等。本书力求做到具有较强的针对性、适用性、全面性和系统性。

本书的 13.2.2 磨削切片加工一节是在参考了张官文的《关于钕铁硼永磁材料高精度加工的分析与研究》的内部资料的基础上完成的;13.3 磨加工原理与技术一节是在参考了林方钰高级工程师提供的《烧结钕铁硼永磁材料的磨削加工》的内部资料的基础上完成的;13.6 S-NdFeB 永磁体电镀原理与技术和 13.7 S-NdFeB 永磁体化学镀镍的原理与技术以及 13.8 S-NdFeB 永磁体表面磷化处理的原理与技术是由烧结钕铁硼永磁体表面处理专家刘伟先生撰写的。谢佳君硕士为本

书出版做了大量的细致工作。万永教授校验全稿。在此，作者对他们和其他对本书出版给予大力支持和帮助的所有朋友表示衷心的感谢！

作者学识有限，且 S - NdFeB 永磁材料技术还在不断地发展，书中难免有不妥之处，敬请广大读者赐教。

作 者

2011 年 4 月于北京



# 目 录

1 绪论 .....	1
1.1 永磁材料 .....	1
1.2 永磁材料的功能特性 .....	1
1.3 永磁材料的种类 .....	2
1.4 S-NdFeB 永磁材料与高新技术 .....	3
1.4.1 S-NdFeB 永磁材料的特点 .....	3
1.4.2 S-NdFeB 永磁材料的应用领域 .....	5
1.4.2.1 日本 S-NdFeB 永磁材料应用领域及变化 .....	5
1.4.2.2 中国 S-NdFeB 永磁材料应用领域及变化 .....	6
1.4.3 S-NdFeB 永磁材料推动高新技术的发展 .....	6
1.4.3.1 硬磁盘驱动器 (hard disk driver, HDD) .....	6
1.4.3.2 核磁共振成像仪 (MRI) .....	8
1.4.3.3 电动车 (EV) .....	8
1.4.3.4 风力发电 .....	9
1.4.3.5 工业永磁电机 .....	11
1.4.3.6 消费电子设备 .....	11
1.4.3.7 磁力机械、磁悬浮与磁传动技术 .....	11
1.4.3.8 磁分离、磁化器与磁医疗仪器 (医疗器械) .....	13
1.5 稀土资源状况 .....	13
1.5.1 稀土金属元素 .....	13
1.5.2 稀土资源状况 .....	14
1.6 S-NdFeB 永磁材料产业的发展 .....	15
1.6.1 S-NdFeB 永磁材料的发展 .....	15
1.6.1.1 S-NdFeB 永磁材料磁能积 $(BH)_m$ 的提高 .....	15
1.6.1.2 S-NdFeB 永磁材料矫顽力 $H_{cj}$ 的提高 .....	17
1.6.1.3 S-NdFeB 永磁材料的新品种和新牌号 .....	17
1.6.1.4 S-NdFeB 永磁材料形状、尺寸与精度范围的扩展和 提高 .....	18

1.6.2 S-NdFeB 永磁材料产业技术的发展 .....	18
1.6.2.1 磁体成分的优化 .....	19
1.6.2.2 冶炼与铸锭技术的改进 .....	19
1.6.2.3 破碎与制粉技术的进步 .....	20
1.6.2.4 磁场取向与压型技术的进步 .....	20
1.6.2.5 废料回收再利用 .....	20
1.6.2.6 S-NdFeB 产业技术在其他技术领域的进步与问题 .....	20
1.7 S-NdFeB 永磁材料产量的迅速增长 .....	20
参考文献 .....	21
<b>2 永磁材料磁学基础</b> .....	<b>24</b>
2.1 磁学基本概念 .....	24
2.1.1 磁铁的特性 .....	24
2.1.1.1 磁铁的极性 .....	25
2.1.1.2 磁铁的指向性 .....	25
2.1.1.3 磁铁的同极相斥、异极相吸性 .....	25
2.1.1.4 磁铁两磁极的不可分割性 .....	25
2.1.1.5 磁铁产生磁场 .....	25
2.1.2 磁场 .....	25
2.1.3 磁的库仑定律和磁铁产生的磁场 .....	26
2.1.3.1 磁的库仑定律 .....	26
2.1.3.2 磁铁在其周围空间产生的磁场 .....	26
2.1.4 电流产生的磁场 .....	29
2.1.4.1 无限长载流直导线产生的磁场 .....	30
2.1.4.2 载流单匝线圈在线圈中心轴线上的磁场 .....	30
2.1.4.3 载流螺旋管轴线中央产生的磁场 .....	30
2.1.5 磁矩的概念 .....	31
2.1.5.1 载流圆线圈的磁矩 .....	31
2.1.5.2 磁铁的磁矩 .....	31
2.2 原子磁矩 $\mu_J$ .....	32
2.2.1 磁性的普遍性 .....	32
2.2.2 孤立原子的电子结构或电子壳层 .....	33
2.2.3 电子轨道磁矩 $\mu_l$ .....	34
2.2.4 电子的自旋磁矩 $\mu_s$ .....	35
2.2.5 孤立原子的原子磁矩 $\mu_J$ .....	36

2.2.6	晶体中的原子磁矩	36
2.2.6.1	3d 过渡族金属晶体的原子磁矩	36
2.2.6.2	稀土金属晶体中的原子磁矩	37
2.3	宏观物质的磁性	38
2.3.1	磁化强度 $M$	38
2.3.2	磁化强度的磁化曲线 ( $M \sim H$ 磁化曲线)	38
2.3.3	磁化率 $\chi$	38
2.4	抗磁性与抗磁性物质	39
2.4.1	抗磁性的特征	39
2.4.2	抗磁性物质	39
2.5	顺磁性与顺磁性物质	39
2.5.1	顺磁性的特征	39
2.5.2	顺磁性物质	40
2.6	铁磁性和铁磁性物质	40
2.6.1	铁磁性的特征与直接交换作用	40
2.6.2	铁磁性物质	42
2.7	反铁磁性和反铁磁性物质	42
2.7.1	反铁磁性的特征	42
2.7.2	反铁磁性物质	43
2.8	亚铁磁性与间接交换耦合作用	43
2.8.1	亚铁磁性的特征	43
2.8.2	间接交换作用	44
2.8.3	RKKY 交换作用	45
2.8.4	稀土金属与过渡族金属间化合物的磁性	45
	参考文献	46
3	强磁性物质的基本磁参量	47
3.1	概述	47
3.2	永磁体在磁场中的能量——静磁能	47
3.3	强磁性物质的技术磁化过程	48
3.3.1	磁畴与磁畴壁	48
3.3.2	技术磁化过程与饱和磁化强度 $M_s$	48
3.3.3	去掉外磁场后原子磁矩方向的变化和剩余磁化强度 $M_r$	50
3.4	反磁化过程、内禀矫顽力 $H_{cj}$ 和磁滞回线	50
3.5	磁极化强度 $J$ 与磁感应强度 $B$	51

3.6	$J \sim H$ 、 $B \sim H$ 磁化曲线及磁滞回线和各种磁参数	52
3.6.1	磁化曲线及磁滞回线	52
3.6.2	磁参数	52
3.6.2.1	饱和磁感应强度 $B_s$ 、饱和磁极化强度 $J_s$ 与饱和磁化强度 $M_s$	52
3.6.2.2	磁导率	53
3.6.2.3	剩余磁极化强度 $J_r$ 与剩余磁感应强度 $B_r$	53
3.7	磁感矫顽力 $H_{cb}$ 与内禀矫顽力 $H_{cj}$ 的关系	53
3.8	永磁体的形状各向异性和退磁场与退磁因子	54
3.8.1	永磁体的形状各向异性	54
3.8.2	退磁场 $H_d$	54
3.8.3	退磁因子 $N$	56
3.8.4	退磁场能	56
3.9	永磁体的最大磁能积 $(BH)_m$	57
3.10	磁感应强度 $B$ 随温度的变化及居里温度 $T_c$	58
	参考文献	60
4	S-NdFeB 永磁材料相组成、成分与内禀磁性能	61
4.1	概述	61
4.2	S-NdFeB 永磁材料的相图与相组成	61
4.3	三元 Nd-Fe-B 合金中相的结构和磁性能	62
4.3.1	$RE_2Fe_{14}B$ 相 (化合物) 的晶体结构	62
4.3.2	$Nd_2Fe_{14}B$ 化合物的晶体各向异性场 $H_A$ 和磁晶各向异性常数 $K_1$	63
4.3.3	$RE_2Fe_{14}B$ 化合物的内禀磁性能	64
4.3.4	富 RE 相的晶体结构与作用	65
4.3.5	富 B 相的成分与作用	66
4.4	S-REFeB 永磁材料的成分	66
4.4.1	概述	66
4.4.2	S-NdFeB 永磁材料成分设计的原则与出发点	66
4.4.3	S-NdFeB 永磁材料成分设计的思路	67
4.4.4	稀土资源矿中稀土金属元素的含量	68
4.4.5	重稀土金属 Dy 取代 Nd 的作用	68
4.4.6	重稀土金属 Tb 取代 Nd 的作用	72
4.4.7	金属 Gd 和 Ho 取代 Nd 的作用	72

4.4.8 轻稀土金属取代 Nd 的作用 .....	72
4.4.8.1 La 取代 Nd 的作用 .....	73
4.4.8.2 Ce 取代 Nd 的作用 .....	74
4.4.8.3 Pr 部分取代 Nd 的作用 .....	75
4.4.8.4 混合稀土金属 (MM) 部分取代 Nd 的作用 .....	76
4.4.9 其他金属取代 Fe 的作用 .....	79
4.4.9.1 概述 .....	79
4.4.9.2 Co 部分取代 Fe 对 S-NdFeB 的作用 .....	80
4.4.9.3 Al 部分取代 Fe 的作用 .....	81
4.4.9.4 Cu 部分取代 Fe 的作用 .....	83
4.4.9.5 Nb 部分取代 Fe 的作用 .....	83
4.4.9.6 Ga 部分取代 Fe 的作用 .....	85
4.4.9.7 其他金属元素部分取代 Fe 的作用 .....	87
参考文献 .....	88
<b>5 S-NdFeB 永磁合金显微组织结构与技术磁参数 .....</b>	<b>91</b>
5.1 概述 .....	91
5.2 S-NdFeB 磁体显微组织结构特点 .....	91
5.3 S-NdFeB 永磁体的剩余磁感应强度和剩余磁极化强度 $J_r B_r$ .....	93
5.3.1 S-NdFeB 永磁体剩余磁感应强度 $B_r (=J_r)$ 的表达式 .....	93
5.3.2 提高 S-NdFeB 永磁体 $B_r$ 的途径 .....	94
5.4 S-NdFeB 永磁体的矫顽力 $H_{cj}$ .....	95
5.4.1 概述 .....	95
5.4.2 S-NdFeB 永磁体矫顽力的物理意义 .....	95
5.4.3 形核型 $H_{cj}$ 的物理意义 .....	96
5.4.3.1 $H_{cj}$ 为形核型磁体的起始磁化曲线 ( $J \sim H$ 曲线) 的特征 .....	96
5.4.3.2 S-NdFeB 永磁体小磁滞回线的矫顽力与磁化场的依赖关系 .....	96
5.5 S-NdFeB 永磁体的反磁化畴形核场与 $K_1$ 和 $H_A$ 的关系 .....	98
5.5.1 实际获得的矫顽力 $H_{cj}^{exp}$ 与形核场理论值 $H_N$ 的比值 .....	98
5.5.2 S-NdFeB 永磁体矫顽力 $H_{cj}$ 与形核场 $H_N$ 的关系 .....	98
5.6 S-NdFeB 永磁材料的边界显微结构 .....	100
5.6.1 概述 .....	100
5.6.2 S-NdFeB 永磁材料边界结构特征与 $H_{cj}$ 的关系 .....	103
5.6.2.1 第 I 类边界结构 .....	103

<b>8 S - NdFeB 熔炼与铸锭的原理与技术</b> .....	147
8.1 概述 .....	147
8.2 炉料的熔化过程 .....	147
8.3 熔炼 S - NdFeB 永磁合金的要求 .....	149
8.4 铸锭的晶体生长与铸锭组织的控制 .....	149
8.4.1 三元系 Nd - Fe - B 合金的结晶过程 .....	150
8.4.1.1 平衡结晶过程 .....	150
8.4.1.2 合金液过热后的亚稳结晶 .....	151
8.4.1.3 非平衡结晶过程 .....	151
8.4.2 铸锭非平衡结晶过程晶体生长特征 .....	152
8.4.3 三元系 Nd - Fe - B 合金铸锭组织的控制 .....	153
8.4.4 铸锭技术的改进 .....	154
8.4.5 速凝铸片 (SC 片) 技术 .....	155
8.4.5.1 制备速凝铸片 (SC 片) 的方式 .....	155
8.4.5.2 速凝铸片的热力学和动力学模拟 .....	157
8.4.5.3 中间包喷射式制备 SC 片厚度的控制 .....	160
8.4.5.4 制造高性能 S - NdFeB 永磁体对 SC 片显微组织的要求 .....	161
8.4.5.5 速凝片 (SC 片) 的显微组织 .....	163
参考文献 .....	175
<b>9 S - NdFeB 永磁体材料的制粉原理与技术</b> .....	177
9.1 制粉方法与工艺过程 .....	177
9.2 制造 S - NdFeB 永磁体对磁粉的要求 .....	178
9.3 机械球磨制粉 (湿法制粉) .....	178
9.4 氢破碎制粉 (HD) .....	179
9.4.1 Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B 相、富 Nd 相与氢气 (H <sub>2</sub> ) 的相互作用 .....	179
9.4.1.1 室温 ~ 600℃ 时的作用 .....	180
9.4.1.2 在 600 ~ 800℃ 时的作用 .....	180
9.4.1.3 600℃ 以下抽真空时 Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> BH <sub>x</sub> 和 NdH <sub>y</sub> 的脱氢过程 .....	181
9.4.2 HD 处理和 HD 破碎 .....	181
9.4.3 HD 处理时吸氢时间与吸氢量的关系 .....	182
9.4.4 HD 处理时脱氢温度、压力和时间的关系 .....	183
9.4.4.1 HD 磁粉的氢含量 .....	183
9.4.4.2 HD 磁粉脱氢与不脱氢的利弊 .....	183

9.4.4.3	HD 磁粉脱氢工艺及对磁性能的影响 .....	184
9.5	气流磨 (JM) 制粉原理与技术 .....	186
9.5.1	概述 .....	186
9.5.2	粉末颗粒尺寸为微米 ( $\mu\text{m}$ ) 量级粉末体的特性 .....	187
9.5.3	气流磨制粉原理与技术 .....	188
9.5.3.1	气流磨制粉原理 .....	188
9.5.3.2	气流磨制粉过程 .....	189
9.5.4	气流磨制粉的特点 .....	190
9.5.5	气流磨制粉的粉末颗粒尺寸分布 .....	191
9.5.5.1	粉末颗粒的当量直径 .....	191
9.5.5.2	粉末粒度的频率分布 (正态分布) .....	191
9.5.5.3	粉末颗粒累积分布曲线 .....	193
9.5.6	制造高性能 S-NdFeB 永磁体对磁性粉末颗粒尺寸分布的要求 .....	195
9.5.7	新一代气流磨设备的特点 .....	195
9.6	粉末改性添加剂 .....	196
9.7	混料 .....	196
9.8	SC + HD + JM 三种工艺的合理匹配 .....	197
	参考文献 .....	199
<b>10</b>	<b>磁场取向与压型原理和技术 .....</b>	<b>201</b>
10.1	粉末磁场取向的重要性 .....	201
10.2	粉末颗粒在磁场中取向的过程 .....	203
10.3	粉末磁场取向程度的评价尺度 .....	205
10.3.1	用平行与垂直取向方向的剩磁比度量取向程度 .....	205
10.3.2	用 $I_{(006)}/I_{(105)}$ 比值度量取向程度 .....	206
10.4	粉末压型 .....	208
10.4.1	压型的目的和方法 .....	208
10.4.2	模压 .....	208
10.4.3	模压 + 冷等静压 .....	209
10.4.4	橡皮模等静压 .....	210
10.4.5	三种压型方式对磁性能的影响 .....	210
10.4.6	超强磁场 (3T) 取向双向压力机 .....	212
10.4.7	磁体坯料密度随工艺过程的变化与收缩率 .....	213
	参考文献 .....	214

<b>11 S-NdFeB 永磁体烧结与热处理的原理和技术</b> .....	216
11.1 概述 .....	216
11.2 液相烧结的一般原理 .....	216
11.2.1 液相烧结的基本过程 .....	217
11.2.1.1 液相的产生与流动 .....	217
11.2.1.2 溶解与析出 .....	218
11.2.1.3 固相烧结 .....	218
11.2.2 液相烧结的致密化与晶粒长大控制 .....	219
11.3 S-NdFeB 永磁体的烧结工艺过程 .....	220
11.4 S-NdFeB 永磁体烧结过程坯料的放气过程与台阶式升温或缓慢 升温速度的确定 .....	221
11.5 S-NdFeB 合金相变温度与烧结温度、回火温度的确定 .....	221
11.6 S-NdFeB 永磁体烧结过程的收缩与相对密度及磁性能的变化 .....	222
11.7 低温烧结与磁体晶粒尺寸的控制 .....	224
11.7.1 烧结过程影响 S-NdFeB 永磁体晶粒长大的因素 .....	224
11.7.2 烧结时晶粒长大动力学 .....	225
11.7.3 S-NdFeB 永磁体晶粒反常长大 (abnormal grain growth, AGG) 与临界烧结温度 .....	228
11.8 S-NdFeB 永磁体的回火热处理 .....	229
11.8.1 S-NdFeB 永磁体的回火热处理过程 .....	229
11.8.2 S-NdFeB 永磁体回火过程磁性能的变化 .....	230
11.8.3 S-NdFeB 永磁体回火过程显微结构的变化 .....	232
11.8.4 S-NdFeB 永磁体回火温度的确定 .....	235
参考文献 .....	236
<b>12 边界强化 (双合金法)、控氧技术与其他新技术</b> .....	237
12.1 概述 .....	237
12.2 双合金法制造 S-NdFeB 永磁材料的工艺流程 .....	237
12.3 双合金法合金成分设计原则 .....	238
12.4 边界合金化方式添加 Ga 对 S-NdFeB 永磁体磁性能和边界显微 组织结构的影响 .....	239
12.5 双合金法制造高矫顽力高磁能积 S-NdFeB 永磁体的磁性能和显微 组织结构 .....	242
12.5.1 合金成分与制造工艺 .....	242



12.5.2	双合金法烧结磁体的室温磁性能	242
12.5.3	双合金法 S-NdFeB 磁体的热处理、磁性能与显微 组织结构	245
12.5.4	双合金法 S-NdFeB 永磁体的热稳定性	248
12.5.5	双合金法 S-NdFeB 永磁体的力学性能、耐腐蚀性能	250
12.5.5.1	双合金法 S-NdFeB 永磁体的力学性能	250
12.5.5.2	双合金法 S-NdFeB 永磁体的耐腐蚀性能	250
12.6	复合添加晶界相的 S-NdFeB 永磁体的磁性能与显微组织结构	252
12.7	制造 S-NdFeB 永磁材料的控氧技术	256
12.7.1	概述	256
12.7.2	稀土金属氧化物的标准生成能(自由能)	257
12.7.3	氧进入 S-NdFeB 永磁体的过程与途径	257
12.7.4	氧对 S-NdFeB 永磁体的组织和性能的影响	259
12.7.5	制造 S-NdFeB 永磁体控氧的重要性	262
12.7.6	控氧技术	262
12.7.6.1	车间环境控氧	263
12.7.6.2	设备控氧	263
12.7.6.3	粉末颗粒隔离控氧	263
12.7.7	控氧量稳定程度对磁体磁性能一致性与重复性的影响	263
12.8	其他新技术	264
12.8.1	细化晶粒尺寸技术	264
12.8.2	辐射取向与多极取向磁环技术与设备	264
12.8.3	无压力成型技术(或称凝胶注模成型(gelcasting)技术)	267
	参考文献	267
<b>13</b>	<b>S-NdFeB 永磁体机械加工和表面镀(涂)层处理原理与技术</b>	<b>269</b>
13.1	概述	269
13.2	机械加工原理与技术	269
13.2.1	机械加工的种类与方式	269
13.2.2	磨削切片加工	270
13.2.2.1	磨削切片加工的原理	270
13.2.2.2	切片尺寸误差来源	271
13.2.2.3	新型内圆切割片机	271
13.2.3	电火花切割加工	273
13.2.3.1	概述	273