



**XITU YONGCI CAILIAO
ZHIBEI JISHU**

ISBN 978-7-5024-4102-9



9 787502 441029 >

定价 29.00 元

销售分类建议：材料科学

高职高专规划教材

稀土永磁材料制备技术

石 富 编著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2007



内 容 提 要

本书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生产工艺技术。在叙述上由浅入深, 先介绍了磁学、永磁化合物的基础理论, 然后重点阐述了稀土永磁材料的工艺理论、工艺参数与磁性能的关系以及工艺操作技术, 详细论述了钕铁硼永磁材料和钕钴系永磁材料的磁性能和工艺技术, 最后还介绍了新型稀土铁系永磁材料。本书内容全面充实, 理论联系实际, 实用性强。

本书为高等职业技术教育材料类专业教学用书, 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/石富编著. —北京: 冶金工业出版社, 2007. 1

高职高专规划教材

ISBN 978-7-5024-4102-9

I. 稀… II. 石… III. 稀土永磁材料-制备-高等学校: 技术学校-教材 IV. TM273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 135197 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 宋良 杨敏 美术编辑 李心

责任校对 王贺兰 李文彦 责任印制 丁小晶

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

2007 年 1 月第 1 版, 2007 年 1 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 14.75 印张; 391 千字; 223 页; 1—3000 册

29.00 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)

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“必需、够用”的原则，且注意吸收国内外有关的技术成果和生产经验，充实了必要的基础知识和基本操作技能方面的内容。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。本书可以作为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。

在本书编写和审稿过程中，得到了稀土产业界和兄弟院校许多专家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；包头稀土研究院刘国征教授审阅了全稿，提出了许多建设性的意见和建议，使本书的内容更加严谨。在此一并表示衷心的感谢。对所有为本书提供资料、建议和帮助的各方人士，借此也表示诚挚的谢意。

由于作者的水平所限，书中错误和疏漏之处，恳请读者批评指正。

编 者

2005年12月



目 录

1 绪论	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	4
1.4.1 电-机械转换	4
1.4.2 磁-机械力或转矩转换	5
1.4.3 微波器件	5
1.4.4 磁效应器件	5
1.5 稀土永磁材料的制备工艺	5
1.6 NdFeB 永磁材料	6
1.6.1 NdFeB 永磁材料与高新技术	6
1.6.2 NdFeB 永磁材料的进展	7
1.6.3 中国 NdFeB 永磁材料的发展	8
复习思考题	8
2 永磁材料磁学基础	10
2.1 物质的磁性	10
2.1.1 磁现象与磁学量	10
2.1.2 材料磁性的类型	12
2.1.3 原子磁矩	13
2.2 铁磁性物质的自发磁化	14
2.2.1 3d 金属的自发磁化	14
2.2.2 稀土金属的自发磁化与磁有序	15
2.2.3 稀土金属化合物的自发磁化	16
2.3 铁磁体的磁畴结构与技术磁化	17
2.3.1 影响磁畴结构的能量	17
2.3.2 磁畴壁与畴壁能	18
2.3.3 磁畴结构	18
2.3.4 铁磁体的技术磁化	20
2.4 磁化过程的临界场与矫顽力	21
2.4.1 畴壁移动的临界场	21
2.4.2 磁矩转动的临界场	22

2.4.3 反磁化核的形核场	23
2.5 永磁材料的技术磁参量	24
2.5.1 饱和磁化强度 M_s	24
2.5.2 剩磁 B_r	25
2.5.3 各向异性场 H_A	26
2.5.4 矫顽力	26
2.5.5 磁能积 $(BH)_{\max}$	28
2.5.6 永磁体的工作点与负载线	29
2.5.7 永磁材料的稳定性	31
复习思考题	32
3 稀土永磁材料的晶体结构、相图及组织	34
3.1 稀土永磁化合物的晶体结构	34
3.1.1 CaCu_5 型晶体结构	34
3.1.2 $\text{Th}_2\text{Ni}_{17}$ 型和 $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$ 型晶体结构	34
3.1.3 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 化合物的晶体结构	35
3.1.4 $\text{RE}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$ 和 $\text{REFe}_{12-x}\text{M}_x\text{N}_y$ 间隙化合物晶体结构	36
3.2 稀土永磁化合物的内禀磁特性	37
3.2.1 稀土永磁化合物的居里温度	37
3.2.2 稀土永磁化合物的分子磁矩与磁化强度	38
3.2.3 稀土永磁化合物的各向异性	39
3.3 稀土-钴永磁合金相图与显微组织	40
3.3.1 RE-Co 二元系合金相图	40
3.3.2 SmCo_5 永磁合金的显微组织	41
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	42
3.4 稀土-铁-硼系永磁合金相图与显微组织	42
3.4.1 Nd-Fe 二元系和 Fe-B 二元系相图	42
3.4.2 Nd-Fe-B 三元系相图	44
3.4.3 Nd-Fe-B 三元系的变温截面图	45
3.4.4 Nd-Fe-B 三元系非平衡状态图	46
3.4.5 Pr-Fe-B 三元系相图	47
3.4.6 烧结 NdFeB 系永磁合金的显微组织	49
复习思考题	52
4 稀土永磁合金的熔炼及铸锭工艺	53
4.1 真空感应熔炼原理	53
4.1.1 真空感应电炉设备	53
4.1.2 感应电炉的工作原理	55
4.1.3 感应电炉的熔化特点	55
4.1.4 真空熔炼过程的特点	57
4.1.5 冷坩埚悬浮熔炼技术	58

4.2 真空感应熔炼稀土永磁合金工艺	59
4.2.1 原材料选择	59
4.2.2 原材料处理及配料	61
4.2.3 坩埚的选择和准备	61
4.2.4 真空感应熔炼工艺	62
4.3 稀土永磁合金铸锭组织的控制	62
4.3.1 稀土永磁合金结晶过程的机制	63
4.3.2 稀土永磁合金铸锭的晶体生长特征	64
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	65
4.4 熔体快淬法和速凝法制备稀土永磁合金	67
4.4.1 熔体快淬法制备 NdFeB 磁粉工艺	67
4.4.2 快淬磁各向同性 NdFeB 合金的结构与磁性能	68
4.4.3 速凝法制备 NdFeB 合金工艺	69
4.4.4 速凝磁各向异性 NdFeB 薄片铸锭的显微组织	70
4.5 真空热还原扩散法制备稀土永磁合金	72
4.5.1 还原扩散法的基本原理	72
4.5.2 原材料准备	74
4.5.3 混料	76
4.5.4 还原扩散处理	77
4.5.5 去除氧化钙和钙	78
复习思考题	78
5 稀土永磁合金制粉原理与技术	80
5.1 稀土永磁粉末的细度特征及要求	80
5.1.1 粉末体性能概述	80
5.1.2 粉体的粒度分布	81
5.1.3 颗粒粒度的测量	82
5.1.4 对稀土永磁合金磁性粉末的要求	83
5.2 机械球磨制粉	84
5.2.1 机械法制粉原理	84
5.2.2 机械法制粉过程	85
5.2.3 滚动球磨制粉技术	86
5.2.4 机械球磨制粉过程的防氧化保护	87
5.3 气流磨制粉	89
5.3.1 气流磨制粉原理	89
5.3.2 气流磨制粉过程	90
5.3.3 气流磨制粉的特点	91
5.4 HD 和 HDDR 法制粉技术	92
5.4.1 氢与 RE-TM 化合物的相互作用	92
5.4.2 HD 处理过程和 HD 磁粉	93
5.4.3 NdFeB 各向同性粘结磁粉的 HDDR 处理	96

5.4.4 NdFeB 各向异性粘结磁粉的 HDDR 处理	98
5.5 双合金法和机械合金化法制备 NdFeB 永磁材料	101
5.5.1 双合金法制备烧结 NdFeB 永磁材料	101
5.5.2 机械合金化法制备粘结永磁体磁粉	102
复习思考题	104
6 稀土永磁粉末磁场取向与成型	106
6.1 稀土永磁粉末磁场取向原理	106
6.1.1 稀土永磁粉末磁场取向与磁体磁性能的关系	106
6.1.2 粉末颗粒在磁场中的取向过程	107
6.1.3 粉末颗粒的错取向	108
6.1.4 影响粉末颗粒取向度的因素	109
6.2 粉末压制成型原理	111
6.2.1 粉末压制过程	111
6.2.2 压制时的压力分布	112
6.2.3 压坯的弹性后效	113
6.3 粉末压制成型方法与设备	114
6.3.1 模压	114
6.3.2 模压加等静压	116
6.3.3 橡胶模等静压	117
6.4 磁场取向与压制工艺	120
6.4.1 模压压模的计算和设计	120
6.4.2 模压工艺操作	121
6.4.3 等静压压制工艺操作	122
6.4.4 压制成型时粉末的防氧化保护	123
6.5 粘结稀土永磁体的制备技术	125
6.5.1 粘结永磁材料及其应用与发展	125
6.5.2 粘结稀土永磁体的制备方法	126
6.5.3 粘结永磁体的磁性能与影响因素	129
复习思考题	130
7 稀土永磁材料的真空烧结、热处理及磁体加工	131
7.1 烧结现象和基本规律	131
7.1.1 粉末体固相烧结过程	131
7.1.2 粉末体固相烧结的致密化机理	133
7.1.3 烧结过程中的再结晶及晶粒长大	134
7.2 稀土永磁体的液相烧结	135
7.2.1 稀土永磁体的液相烧结现象	135
7.2.2 液相烧结的基本过程	136
7.2.3 影响液相烧结的因素	138
7.2.4 烧结过程中对磁体晶粒尺寸的控制	140

7.3 稀土永磁材料的烧结与热处理工艺	143
7.3.1 烧结与热处理工艺制度	143
7.3.2 真空烧结与热处理设备	146
7.3.3 烧结工艺操作	147
7.4 烧结稀土永磁体的加工与检验	148
7.4.1 机械加工	148
7.4.2 表面处理	151
7.4.3 产品的检测	153
7.4.4 产品的充磁与退磁	155
复习思考题	155
8 烧结 NdFeB 永磁材料	156
8.1 烧结 NdFeB 永磁合金的成分设计	156
8.1.1 烧结 NdFeB 永磁材料的牌号与性能	156
8.1.2 三元烧结 NdFeB 永磁材料的成分与性能	158
8.1.3 氧在烧结 NdFeB 永磁体中的作用	160
8.2 三元以上的烧结 NdFeB 永磁材料	161
8.2.1 三元以上的 (Nd, RE) (Fe, M ₁ , M ₂) B 烧结永磁材料	161
8.2.2 低成本的 RE-Fe-B (RE=La, Ce, MM, Pr) 烧结永磁材料	163
8.2.3 具有低温度系数的烧结 RE-Fe-B 永磁材料	165
8.3 烧结 NdFeB 永磁材料的磁能积	166
8.3.1 烧结 NdFeB 永磁体的 B_r 和 $(BH)_m$ 的极限值	166
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	167
8.3.3 高磁能积烧结 NdFeB 永磁材料的成分考虑	168
8.3.4 高磁能积烧结 NdFeB 永磁材料的理想显微结构	169
8.3.5 实验室研制的高磁能积 NdFeB 永磁材料	171
8.4 烧结 NdFeB 永磁材料的矫顽力	173
8.4.1 烧结 NdFeB 永磁材料的形核场 H_N 与矫顽力	173
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	174
8.4.3 烧结 NdFeB 永磁材料的形核场 H_N	175
8.4.4 添加元素的晶界显微结构	177
8.4.5 高矫顽力烧结 NdFeB 永磁材料的成分及结构设计	179
复习思考题	181
9 稀土钴永磁材料	182
9.1 稀土钴永磁材料的品种规格及性能	182
9.2 RECo ₅ 型稀土钴永磁材料	184
9.2.1 SmCo ₅ 永磁材料的成分与磁性能的关系	184
9.2.2 SmCo ₅ 永磁合金的 750℃ 回火效应	185
9.2.3 SmCo ₅ 合金烧结和热处理工艺与磁性能的关系	187
9.2.4 PrCo ₅ 和 (Sm, Pr) Co ₅ 永磁材料	189

9.2.5	MMCo ₅ 和 Ce (Co, Cu, Fe) ₅ 永磁材料	190
9.3	2:17 型 Sm (Co, Cu, Fe, Zr) _z 稀土钴永磁材料	191
9.3.1	2:17 型 Sm (Co, Cu, Fe, Zr) _z 永磁材料的成分	191
9.3.2	高矫顽力 Sm (Co, Cu, Fe, Zr) _{7.4} 合金的显微组织	193
9.3.3	高矫顽力 Sm (Co, Cu, Fe, Zr) _{7.4} 合金的矫顽力	194
9.3.4	高矫顽力 Sm (Co, Cu, Fe, Zr) _{7.4} 永磁材料的稳定性	196
	复习思考题	196
10	其他稀土-铁系永磁材料	198
10.1	热变形各向异性 REFeB 永磁材料	198
10.1.1	REFeB 合金的铸造-热变形制备技术	198
10.1.2	REFeB 合金的粉末-致密化-热变形制备技术	204
10.2	稀土-铁系间隙化合物永磁材料	206
10.2.1	稀土-铁系间隙化合物永磁材料的基本原理	206
10.2.2	Sm ₂ Fe ₁₇ N _x 间隙化合物永磁材料	207
10.2.3	其他稀土-铁系间隙化合物永磁材料	211
10.3	双相纳米晶复合永磁材料	213
10.3.1	双相纳米晶复合永磁材料的特征	213
10.3.2	双相纳米晶复合永磁材料的磁学分析	214
10.3.3	双相纳米晶复合 RE ₂ Fe ₁₄ B/ α -Fe 系永磁材料	216
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	219
10.3.5	双相纳米晶复合永磁材料的新进展	220
	复习思考题	222
	参考文献	223



1 绪 论

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。21 世纪，中国将成为稀土永磁材料生产和开发的基地与中心。

1.1 磁性材料的概念

磁性是物质的最基本属性之一。磁性材料自古就被人们所利用。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。现代磁学的建立及磁性材料的发展则是近 100 年的事，有力地促进了近代工业技术的进步。

人们于 18~19 世纪借助仪器对弱磁性有了认识，1845 年，法拉第（M. Faraday）建立了抗磁性与顺磁性的学说；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的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。20 世纪 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 族发展到 4f 族。

近 20 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，遍及了各种元素及其合金和化合物，包括金属、半导体和绝缘体，有机材料和无机材料。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。软磁材料的矫顽力小于 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的特性，如用于变压器、电感线圈、电动机和发电机的铁芯，在磁记录仪中用作磁场传感器，或用于应力-应变量器。

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”表示具有有机粘结剂的各向同性材料；“3”表示具有有机粘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，粘结钕-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 $X=1, 2, \dots$ ，为材料的等级。

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
	钕-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, $n=4.5 \sim 6.5$)	

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。具有粘结剂的永磁材料，在牌号末尾加“P”字表示。例如，NdFeB380/80 表示 $(BH)_{max}$ 为 $366 \sim 398 \text{kJ}/\text{m}^3$ ， H_{cj} 为 $800 \text{kA}/\text{m}$ 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 1-2 永磁材料的磁性能

GB/T9637 和 IEC50 (121) 的术语号	磁 性 能	符 号	单 位
4.9	BH 磁能积的最大值 (也简短地称为“最大 BH 积”)	$(BH)_{max}$	kJ/m^3
2.26	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	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	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·m ⁻¹	$(BH)_{max}$ /kJ·m ⁻³	$T_c/^\circ\text{C}$	$\delta/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
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
永磁陶瓷（铁氧体）	Hard ferrite32/25	S1-1-10	0.41	250	32.0	500	4.9
1:5 钕钴合金	XGS165/80	R5-1-3	0.9	800	165	727	8.1
2:17 钕钴合金	XGS205/70	R5-1-14	1.05	700	205	827	8.2
粘结钕钴永磁	XGN65/60	R5-3-1	0.5	600	65		7.4
烧结钕铁硼永磁	NdFeB260/80	R7-1-8	1.18	800	260	310	7.4
粘结钕铁硼永磁			1.0	800	80		
纳米晶复合永磁			1.2	240	240		
热变形永磁			1.3	1100	42	500	7.7
铁铬钴合金	FeCrCo35/5	R6-1-3	1.05	51	35	637	7.6
铁镍铜合金			1.3	48	44	320	5.1
锰铝碳合金			0.6	210			
铂钴系合金	PtCo60/40	R2-0-1	0.6	400	60.0	527	15.5
铂铁系合金			1.0	340	154		

铸造 AlNiCo 永磁材料的磁性能中等，居里温度 T_c 高，温度稳定性好。铸造永磁材料自 1930 年出现后取代了磁钢，一度成为主流永磁材料。但它含有较多的战略金属钴和镍，磁体价格高，故 20 世纪 60 年代稀土永磁材料出现后，其产量已逐年降低。

铁氧体永磁材料的原材料丰富，磁体价格低，虽然磁性能不高，但仍然在汽车工业、音响、通讯、家用电器、办公自动化设备中得到广泛的应用，其产量以每年 10% 左右的速度增长。预测未来 20~30 年内，铁氧体永磁材料仍然是得到广泛应用的永磁材料之一。

稀土永磁材料按照开发应用的时间顺序分为：20 世纪 60 年代开发的 SmCo_5 第一代稀土永磁材料，70 年代开发的 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 第二代稀土永磁材料，80 年代开发的 NdFeB 第三代稀土永磁材料以及其后开发的其他稀土-铁永磁材料。Sm-Co 系永磁材料居里点高，温度稳定性好，但含有较多战略金属钴和钐，磁体价格高，因此，应用受到限制，自 1994 年以来产量逐年降低。

稀土-铁永磁材料是指以稀土与铁形成的金属间化合物为基体的永磁材料。若按化学组成，稀土-铁永磁材料可分为：1) $\text{RE}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ （简称 2:14:1 型）化合物永磁材料；2) ThMn_{12} 型，如 Nd(Fe, M)₁₂ 化合物永磁材料；3) 间隙型稀土铁化合物，如 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$ 、Nd(Fe, M)₁₂N_x、Nd₃(Fe, M)₂₉N_x 等氮化物永磁材料；4) 双相纳米晶复合交换耦合永磁材料，如 Nd₂Fe₁₄B/

α -Fe、 $\text{Pr}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$ 、 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x/\alpha\text{-Fe}$ 永磁材料等。在上述稀土-铁化合物永磁材料中， $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 系（简称 NdFeB）永磁材料已在现代科学技术与信息产业中得到广泛的应用，在永磁材料中占有重要的地位。其他稀土-铁永磁材料还处于发展阶段，离实用化还有相当一段距离。NdFeB 永磁材料（包括烧结和粘结永磁材料）的磁性能高，相对价格较低，因而得到广泛应用，平均年增长率高达 20%~30%。

Fe-Cr-Co、Fe-Ni-Cu 和 Pt 基永磁材料由于原材料价格高，或加工费用高，一直未能成为主流永磁材料。Mn-Al-C 永磁材料则未到成熟期就开始萎缩。

永磁材料的应用主要是利用它在两磁极的气隙中产生的磁场强度 H_g 。 H_g 的大小与永磁材料的最大磁能积 $(BH)_m$ 的平方根成正比，因此可用 $(BH)_m$ 的不断提高来说明永磁材料的发展。图 1-1 是 20 世纪近百年内永磁材料最大磁能积 $(BH)_m$ 的进展。图 1-2 是不同永磁体在其周围空间产生一定磁场所需磁体体积的比较。 $(BH)_m$ 从 1880 年碳钢的 $2\text{kJ}/\text{m}^3$ 到目前 NdFeB 的 $440\text{kJ}/\text{m}^3$ ，性能提高几百倍，而在特定空间产生同样磁通所需磁体的体积明显减小，故 NdFeB 永磁体被称为超强磁体和当代磁王。人们预计在未来的 20~30 年内找出 $(BH)_m$ 更高的可取代 NdFeB 的新型永磁材料的可能性很小。

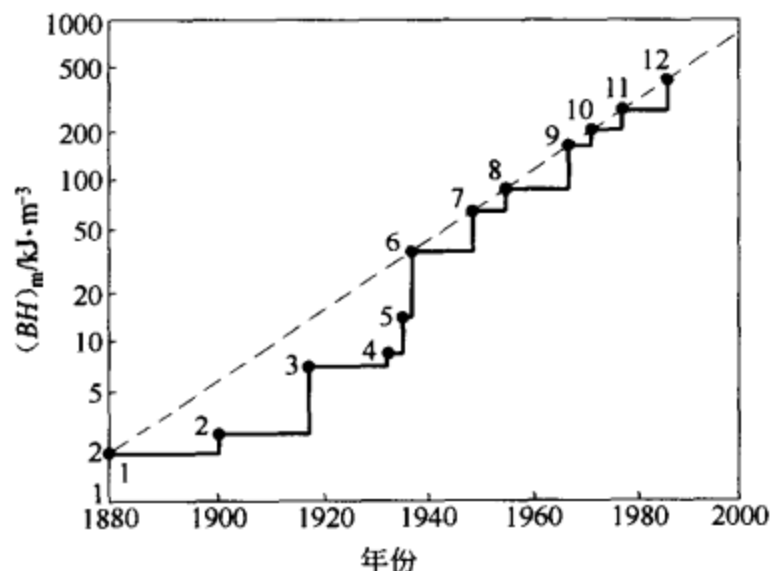


图 1-1 20 世纪永磁材料磁能积的进展

1—C 钢；2—W 钢；3—Co 钢；4—AlNiCo；5—AlNiCo-Ti；
6—AlNiCo-Ti-G；7—AlNiCo-Ti-GG；8—AlNiCo-Ti-xx；9—SmCo₅；10—(Sm,Pr)Co₅；
11—Sm₂Co₁₇；12—NdFeB

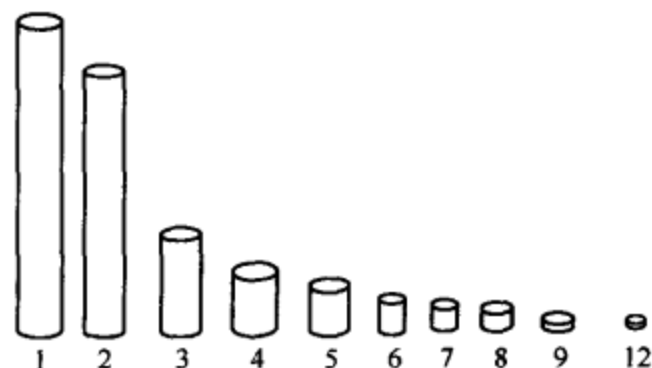


图 1-2 产生相同磁场的不同磁体体积比较

(图注同图 1-1)

1.4 永磁材料的应用

永磁材料具有机械能与电磁能相互转换的功能。利用其能量转换功能和磁的各种物理效应可将永磁材料制成多种多样的永磁功能器件。这些永磁功能器件已成为计算机、网络信息、通讯、航空航天、交通、办公自动化、家电、人体健康与保健等领域的核心功能器件。永磁材料已成为高新技术、新兴产业与社会进步的重要物质基础之一。

永磁材料应用的分类方法有多种，其中最基本的方法是从物理原理上进行分类，可分为下述几种。

1.4.1 电-机械转换

利用磁场与运动导线或载流导线的相互作用，制造发电机或永磁电机。永磁电机的品种很

多, 诸如音圈电机 (VCM)、步进电机、磁滞电机、线性电机、伺服电机等, 电机的容量小至几分瓦, 大至数百千伏安, 优点是不需要励磁绕组或励磁机, 体积小、重量轻、比功率高。尤其是各种微电机, 每年世界产量达 50 亿个之多, 主要用在计算机、网络信息、通讯、航空航天、交通运输、办公自动化、家用电器及儿童玩具中。此类应用还包括扬声器、耳机、电话、超声发声器等电-声转换器件; 磁光记录、激光聚焦、打印头、传感器等信号传输和转变装置。

1.4.2 磁-机械力或转矩转换

利用磁极间的相互作用力, 可实现磁悬浮、磁传动、磁起重等。典型的例子是已实用化的磁性轴承, 它没有摩擦, 不需要润滑, 寿命长, 主要应用于人造卫星、宇航器、高速飞行器的陀螺仪, 超高速离心机, 纺织机的涡轮机, 电量计, 特殊用途电机, 精密仪器和电度表等。磁悬浮列车运输系统的列车时速可达 500km/h, 能够实现运输系统的高速、无污染、无噪声等目标。永磁材料在磁力机械领域的应用还在开拓与发展中, 已广泛应用的有磁力传动器、磁制动器、磁打捞器、磁夹具、磁力泵、磁性阀、磁封门和磁性锁等。

1.4.3 微波器件

利用磁场与荷电粒子的相互作用, 可制成各种微波功率器件, 如微波通讯中的行波管、返波管、环型器等。这些器件都要用永磁体产生恒定磁场, 用以控制电子束运动, 实现高频或超高频振荡, 以及微波信号的放大、接收与显示的目的。永磁微波器件在雷达、卫星通讯、遥控遥测、电子跟踪、电子对抗等技术中应用广泛。此类应用还有显像管、粒子加速器、磁控溅射、磁控电镀等技术中的永磁体。

1.4.4 磁效应器件

利用磁场对物质的作用产生的各种效应, 如磁共振效应、磁化学效应、磁生物效应、磁光效应、磁霍尔效应等制造各种磁效应器件。在医疗与健身器械方面, 从大型的核磁共振成像仪 (MRI) 到小型的外科手术器械、磁疗器、磁疗服等, 都大量使用永磁体。使宏观物质磁化以改变物质内部结构或键合力的技术称为磁化技术, 例如, 用磁水器磁化过的硬水不再结垢, 浇灌磁化水可促进植物生长, 饮用磁化水可治疗某些疾病; 磁化减烟节油器已在汽车、轮船、火车、拖拉机、工业燃油炉中得到了应用; 在石油输油管装上磁防蜡器后, 原油中的蜡不再凝固。利用磁场将不同磁化率的物质分开的技术称为磁分离技术, 在选矿、原材料处理、水处理、垃圾处理, 以及在化学工业和食品工业中都得到了广泛应用。

1.5 稀土永磁材料的制备工艺

稀土永磁材料按制备工艺方法的不同, 可分为烧结永磁材料、粘结永磁材料和热变形永磁材料等, 制备工艺流程如图 1-3 所示。

稀土永磁材料的制备首先需获得具有特定化学成分和结晶组织的合金铸锭。以 NdFeB 合金的熔炼为例, 它是按一定配比将金属钕、铁硼合金和为某种目的有意添加的金属料加入真空感应炉, 在氩气保护下熔炼成 NdFeB 合金。将熔融的合金液浇注至水冷铜模中冷却, 得到合金铸锭。为了提高磁性能, 也可对铸锭进行高温等温退火均匀化处理, 以减少铸锭中析出的 α -Fe, 提高主磁性相 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 的体积分数。

烧结磁体的制备采用传统的粉末冶金工艺。将铸锭破碎至一定粒度 (小于 3mm), 并用机械法或氢碎法 (HD 法) 制备粗粉。然后将粗粉细磨至约 $5\mu\text{m}$ 左右的磁粉, 目前大规模生产采

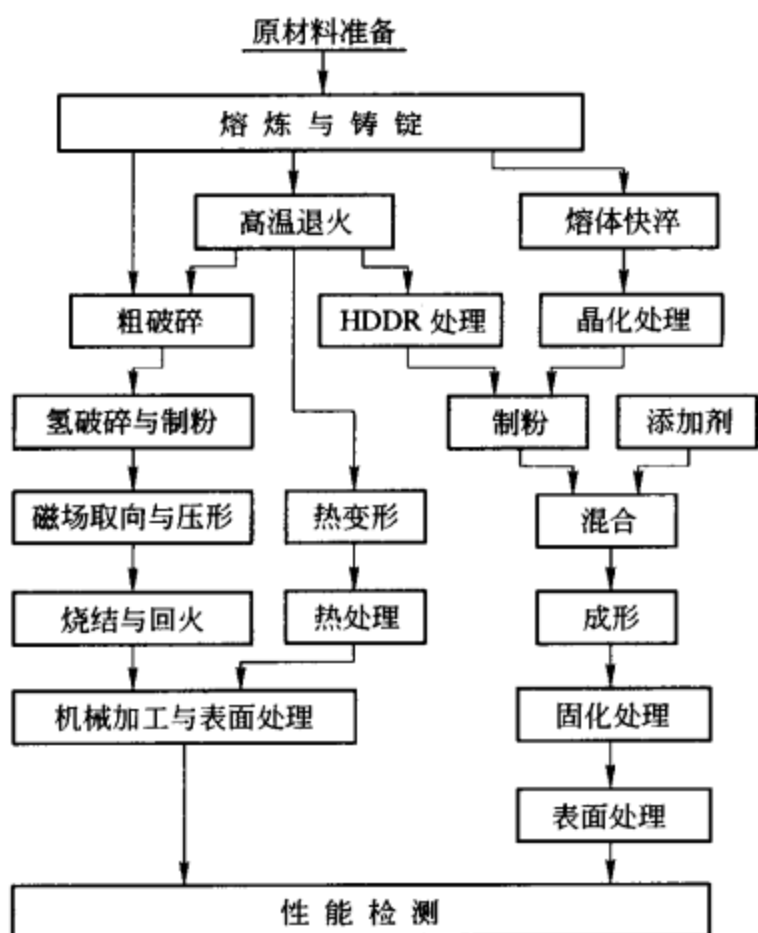


图 1-3 稀土永磁材料的制备工艺流程

用气流磨或搅拌磨制粉，实验研究采用球磨或小型气流磨制粉。将磁粉在磁场下取向并压制成型，或在等静压机中进一步压实。压坯的烧结和回火在真空烧结炉内于氩气保护下进行。用该工艺制备各向异性烧结磁体，其中铸锭组织、制粉、磁场成型、烧结及回火等工艺的工艺参数对磁体的磁性能有十分重要的影响。烧结磁体经过机械加工与表面处理，可制成所需形状的永磁体。

粘结磁体的制备采用熔体快淬法（MQ法）或 HDDR 法制备磁粉。快淬法是将铸锭熔化后浇至一旋转的水冷铜辊表面上，得到非晶态至微晶态的薄带，薄带的粗碎颗粒（约 $200\mu\text{m}$ ）经过适当热处理可得到纳米晶态（ $20\sim 40\text{nm}$ ）组织。HDDR 法是用氢气处理铸锭，经过氢化—歧化—解吸—再结晶过程，得到细小晶粒（约 $0.3\mu\text{m}$ ）的微粉。MQ 粉或 HDDR 粉经过轻微破碎即可得到粘结用磁粉。将磁粉与某些高分子化合物

（如环氧树脂）混合，采用压制成型、注射成型或其他方法使其成型并固化，便得到所需形状的粘结磁体。由于快淬法得到的是各向同性粉末，故快淬磁粉主要用于制备各向同性粘结磁体。当对快淬磁粉进行热压或热变形压力加工时，可得到各向异性磁体。HDDR 法得到的磁粉有各向同性和各向异性两种，可分别用于制备各向同性和各向异性粘结磁体。粘结磁体较烧结磁体的磁性能有所下降，但粘结磁体的磁性能稳定性好、工艺简单、尺寸精确、易于工业化大批量生产。

采用热变形工艺可制备各向异性的致密的磁体。铸造 PrFeB 永磁合金工艺大体上可分为合金的熔炼与铸锭、热变形、最后退火 3 个阶段。热变形工艺包括热压、热轧、锻粗等。铸态合金永磁性很差，经退火后，磁性有所提高，经热压或热轧后，由于产生了各向异性，所以磁性能提高幅度很大。铸造-热压或热轧法，是不同于粉末冶金法的另一类方法，可生产大块、异形磁体，而且大尺寸板状稀土-铁磁体只有通过热轧法才能获得。在热加工时，为防止合金氧化，需对合金包封，这是此工艺的难点。

1.6 NdFeB 永磁材料

1.6.1 NdFeB 永磁材料与高新技术

NdFeB 作为永磁材料中最新和最高磁性的材料，在高新技术产业中开拓出一类全新的永磁材料应用领域。现代科学技术与信息产业正在向集成化、小型化、轻量化、智能化方向发展，而具有超高能密度的 NdFeB 永磁材料的出现，有力的促进了现代科学技术与信息产业的发展，为新型产业的出现提供了物质保证。

根据世界各发达国家 1993 年的统计数据，当年 NdFeB 永磁体产量约 2000t，在计算机硬盘驱动器（HDD）和读写磁头音圈电机（VCM）中的应用占一多半（54%）；其次是电机的