



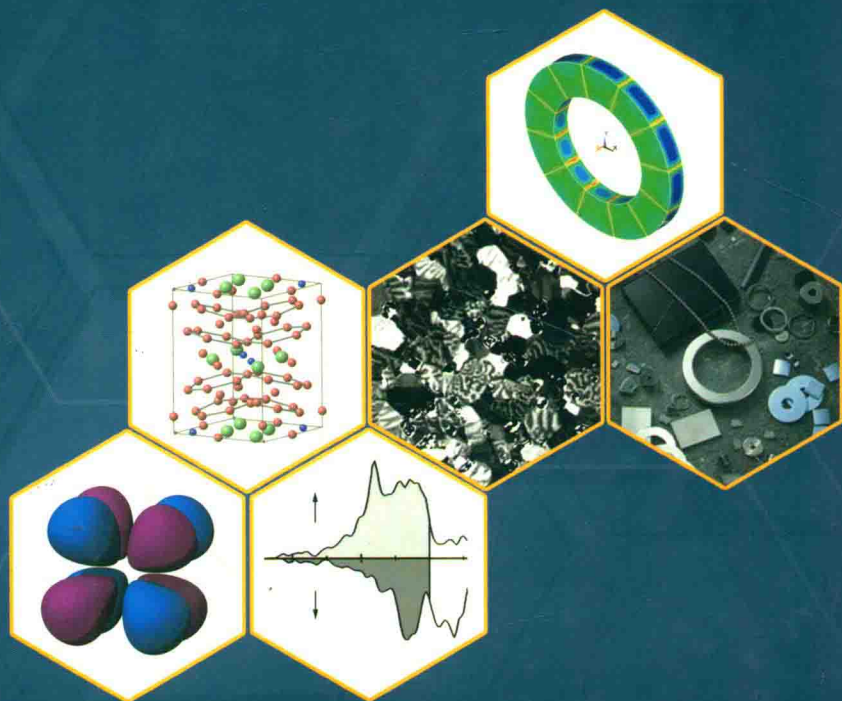
“十三五”国家重点出版物出版规划项目

# 稀土永磁材料

Rare-earth Permanent Magnet Materials

(下册)

胡伯平 饶晓雷 王亦忠 编著



冶金工业出版社  
www.cnmp.com.cn

“十三五”国家重点出版物出版规划项目  
国家科学技术学术著作出版基金资助出版

# 稀土永磁材料

## (下册)

胡伯平 饶晓雷 王亦忠 编著

北京  
冶金工业出版社  
2017

## 内 容 提 要

本书简要回顾了永磁材料的发展历史,对过去五十年来国内外稀土永磁材料相关的研究开发工作和磁体制备技术进行了梳理。全书分上下两册共9章,从稀土永磁材料的理论基础到制备技术,从稀土过渡族合金的相图、晶体结构到稀土永磁材料的内禀磁性、永磁性及它们之间的关系,均进行了全面的介绍和深入的讨论。本书为下册,内容包括:第6章介绍稀土永磁材料的其他物理化学性能;第7章介绍主要稀土永磁材料的磁化和反磁化行为,特别是利用微磁学理论并结合显微结构、磁畴观察和磁性测量等大量实验数据,详细地阐述了在稀土永磁材料中的矫顽力机制;在前几章的基础上,第8章全面深入地介绍主要稀土永磁材料的制备工艺及其同永磁参数与显微结构之间的密切关系,尤其注重讨论了高性能磁体、特殊应用磁体和各种稀土添加磁体的制备原理和技术;最后,第9章简要介绍稀土永磁材料的应用和磁路设计。

本书适合从事稀土永磁材料科研、生产与应用等相关技术领域的科技人员、管理和销售人员阅读,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

稀土永磁材料.下册/胡伯平,饶晓雷,王亦忠编著. —北京:  
冶金工业出版社,2017.1

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-5024-7502-4

I. ①稀… II. ①胡… ②饶… ③王… III. ①稀土永磁材料  
IV. ①TM273

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第048444号

出版人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcb@cnmp.com.cn

策划编辑 谭学余 责任编辑 戈 兰 李培禄 陈慰萍 美术编辑 彭子赫

版式设计 孙跃红 责任校对 石 静 王永欣 责任印制 李玉山 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7502-4

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2017年1月第1版,2017年1月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16;27.75印张;671千字;429页

136.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

# 序



经过两年多的辛勤劳作，这本由胡伯平、饶晓雷和王亦忠编著的《稀土永磁材料》终于同读者见面了，在此我谨表示由衷的祝贺！

20世纪60年代诞生了第一代稀土永磁材料钐钴，其高剩磁和高矫顽力掀起了永磁材料的新篇章；而自20世纪80年代初第三代稀土永磁材料钕铁硼问世以来，优异的性价比确立了其“永磁王”的地位。稀土永磁材料在国际能源、交通、通信、机械、医疗和家电等多个领域得到了广泛应用，并正在绿色能源和工业智能化方面扮演重要角色，已经成为当今社会不可或缺的重要功能材料。

稀土永磁材料发展五十年，钕铁硼“永磁王”问世三十多年，三环公司也成长了三十年，相伴而行，共同发展。稀土元素具有独特的物理和化学特性，稀土是经济发展的重要资源。我国是全球公认的稀土大国，党和国家领导人对稀土及其应用都给予了极大的关怀，期待我国成为真正的稀土强国。三环公司能够发展到今天的规模，成为我国稀土永磁产业的领头企业，并在国际同行中举足轻重，得益于天时——第三代稀土永磁材料钕铁硼的发现、地利——我国得天独厚的稀土资源、人和——党和国家领导人的关怀、国家和地方政府的支持、国内稀土永磁界的共同奋斗以及三环公司全体员工的勤奋努力。从1986年三环公司在宁波建设中国第一个钕铁硼工厂，到今天全国稀土永磁体的产量占全球产量的85%以上，我国在稀土永磁舞台上发展和业绩令世人瞩目。

近年来，可持续发展的大势席卷全球，对改善能源结构、发展再生能源、提高能效、节能减排、倡导低碳生活等方面提出了全新的要求，风力发电、新能源汽车、节能家电、工业智能化等低碳经济产业的发展为稀土永磁材料提供了广阔的市场空间，同时对稀土永磁产业本身来讲

也面临着巨大的机遇和挑战。为了适应这种发展，帮助我国广大的稀土永磁工作者在供给侧着力，研发、制备和提供满足市场需求的稀土永磁新产品，系统地梳理和总结五十年以来稀土永磁材料的研发成果和制备技术势在必行，本书也应运而生。作为三环研发人员的代表，三位编著者三十多年来一直从事稀土永磁材料的研究开发和产业化，不仅在稀土永磁材料基础理论方面训练有素、造诣深厚，而且在稀土永磁材料制备和产业化方面也有较丰富的经验。这本出自于行业领头企业研发人员之手的专著，系统总结了国内外稀土永磁材料的研究成果，深入讨论了稀土永磁材料的内禀磁性和硬磁性，全面介绍了稀土永磁材料的制备工艺和技术，对于从事稀土永磁材料事业的研究人员和生产一线的技术人员均有很好的参考价值。

我期望三环公司研发人员编著的这本《稀土永磁材料》能够为推动我国稀土永磁材料的进一步发展贡献一份力量。

中国工程院院士

王震西

2016年8月于北京

# 前 言



自20世纪60年代发现稀土永磁材料以来，五十年过去了。在过去的五十年中，稀土永磁材料不断发展，经历了第一代1:5型钐钴永磁材料、第二代2:17型钐钴永磁材料、第三代2:14:1型钕铁硼永磁材料，以及近些年人们研究开发的1:12型钐铁化合物、间隙原子稀土金属间化合物和纳米晶复合永磁材料等。特别是1983年钕铁硼出现以来，由于其优异的性价比，得到了迅猛的发展和广泛的应用。而绿色低碳的应用需求，如新能源汽车、风力发电、节能家电等，又为稀土永磁材料的发展提供了非常广阔的空间。

我国稀土资源丰富，稀土永磁材料发展具有得天独厚的条件。伴随钕铁硼的发现和发展的，我国稀土永磁材料产业独领风骚，成为了稀土应用的龙头。近几年，在我国的稀土应用中稀土永磁材料占比超过40%，我国稀土永磁体的产量占全球产量的85%以上。中国稀土永磁产业的超常发展，使得全球稀土永磁产业保持了迅猛增长的态势，2005年至2015年的十年间，全球年均增长率为10%左右。

进入21世纪后，烧结磁体制备的工艺技术有了长足发展，其中包括采用条片浇铸(SC)、氢破碎(HD)、气流磨(JM)等技术手段，降低了磁体的总稀土含量和成本，同时较大幅度地提高了磁体的性能。近几年发展起来的新技术主要代表有，以优化晶粒边界为目的的晶界扩散方法(GBD)和双合金方法(包括双主相方法)以及为获得高矫顽力为目的的晶粒细化方法等。此外，对氧含量控制技术的广泛采用，使得磁体获得高的磁性能(尤其是高矫顽力)成为可能，同时控氧技术也是保持烧结稀土永磁产品高稳定性和一致性的关键因素。

近年来，烧结钕铁硼磁体产品研发主要朝两个方向发展：一是高性能，二是低成本。随着烧结钕铁硼磁体在风力发电、混合动力汽车/纯电动汽车和节能家电/工业电机等低碳经济领域的应用，双高磁性能(高最大磁能积 $(BH)_{\max}$ 和高内禀矫顽力 $H_{cJ}$ )的烧结钕铁硼磁体成为重大需求。另外，为了促

进稀土资源的综合平衡利用，满足低成本的消费市场，以 Ce 和混合稀土合金为重要原料的稀土铁硼磁体已经被开发成功并投放市场。

为了总结过去五十年来国内外稀土永磁材料的研究成果，更好地推动我国稀土永磁材料科研和生产的发展，我们在从事三十多年稀土永磁材料研究和生产的基础上，在繁忙的工作之余用了两年时间完成了本书的编写工作。在编写本书的过程中，我们力求对过去五十年来国内外（包括三环公司）在有关稀土永磁材料的合金相图、晶体结构、内禀磁性、永磁特性、其他物理化学特性和与永磁特性相关的显微结构以及实现这些显微结构的各种工艺技术等方面的研究成果进行全面的介绍。

全书分上下两册共 9 章。第 1 章对永磁材料作一般介绍，包括稀土永磁材料的发展简史，稀土元素和稀土金属的结构和特性，以及稀土资源的概况；第 2 章介绍稀土过渡族元素的二元和多元相图；第 3 章介绍与稀土永磁材料相关的稀土过渡族金属间化合物的晶体结构；第 4 章重点讨论稀土永磁材料的内禀磁性；第 5 章着重介绍稀土永磁材料的永磁性能及其温度稳定性和长时间稳定性；第 6 章介绍稀土永磁材料永磁特性以外的其他物理和化学特性；第 7 章介绍永磁体的磁化和反磁化机制，重点论述了矫顽力理论，特别是运用微磁学理论和显微观察分析讨论稀土永磁材料的矫顽力行为；第 8 章重点讨论各类稀土永磁材料的生产工艺及其与性能之间的关系；第 9 章介绍稀土永磁材料的应用和磁路设计。

本书全面和系统地介绍了稀土永磁材料的相关知识，集晶体理论、磁性理论和微磁学理论与工艺原理和制造技术于一体，是一本阐述永磁材料原理和技术的专著，对从事永磁材料事业的人员，尤其对从事稀土永磁材料研究和生产的技术人员都有很好的参考价值，也可作为大专院校、科研院所磁学和材料专业学生的参考书。

在本书的编著过程中，我们得到了中科三环公司董事长、中国工程院院士王震西先生的积极支持，也得到了中科三环研究院和中科三环公司下属各企业同仁们的大力协助。特别是在成稿过程中，钮萼、陈治安、朱伟、杜飞、蔡道炎、叶选涨、金国顺、刘贵川、梁奕、王谚、秦国超、王湛、陈国安、赵玉刚、姜兵、张瑾等人在研发结果整理、磁测量、显微观察、文字校正、图形绘制、

文献查找等方面给予了热情帮助。在此，我们谨表示衷心的感谢！

三环公司成立于1985年，刚过三十岁生日。三位编著者在三环公司一直从事稀土永磁材料的研究开发和产业化，同三环公司一同成长。这本书，也是我们献给三环公司的三十岁生日礼物。三十岁正值青年，前面的路还很长、很长……。希望三环公司健康发展，永葆青春！

由于编著者水平所限，书中不妥之处，敬请读者批评指正。

编著者

2016年8月于北京



# 总目录



## 上册

- 第1章 引言
- 第2章 稀土过渡族合金相图
- 第3章 稀土过渡族金属间化合物的晶体结构
- 第4章 稀土永磁材料的内禀磁性
- 第5章 稀土永磁材料的永磁性能
- 索引

## 下册

- 第6章 稀土永磁材料的其他特性
- 第7章 稀土永磁材料的磁化和反磁化
- 第8章 稀土永磁材料制备
- 第9章 稀土永磁材料的应用
- 附录
- 索引

# 目 录



<b>第 6 章 稀土永磁材料的其他特性</b> .....	<b>1</b>
6.1 稀土永磁材料的力学特性 .....	2
6.1.1 金属材料力学特性的表征 .....	2
6.1.2 烧结稀土永磁材料的脆性断裂行为 .....	4
6.1.3 改善烧结 Nd-Fe-B 磁体脆性的研究 .....	8
6.1.4 粘结稀土永磁材料的力学特性 .....	14
6.2 稀土永磁材料的电学特性 .....	16
6.2.1 趋肤效应 .....	16
6.2.2 稀土永磁材料的涡流损耗 .....	16
6.2.3 稀土永磁材料的电学特性改善 .....	18
6.3 稀土永磁材料的热膨胀和磁致伸缩 .....	19
6.3.1 稀土永磁材料的热膨胀 .....	19
6.3.2 稀土永磁材料的磁致伸缩 .....	21
6.4 稀土永磁材料的抗辐射性能 .....	23
6.4.1 纯辐照对稀土永磁材料永磁性能的影响 .....	23
6.4.2 辐照对永磁材料永磁性能的综合影响 .....	24
6.5 稀土永磁材料的化学特性 .....	25
6.5.1 稀土永磁材料的氧化腐蚀 .....	26
6.5.2 稀土永磁材料的电化学腐蚀 .....	28
6.5.3 稀土永磁材料在氢气和氮气中的腐蚀 .....	33
6.5.4 稀土永磁材料的 C、N 和 O 杂质对磁体耐蚀性的影响 .....	34
参考文献 .....	37
<b>第 7 章 稀土永磁材料的磁化和反磁化</b> .....	<b>41</b>
7.1 磁畴和磁相互作用能 .....	41
7.1.1 磁畴和畴壁 .....	41
7.1.2 磁相互作用能 .....	43
7.1.3 单畴和单畴临界尺寸 .....	45
7.2 技术磁化过程 .....	47
7.2.1 起始磁化曲线 .....	47
7.2.2 可逆和不可逆的畴壁位移 .....	48
7.2.3 可逆和不可逆的磁畴转动 .....	50

7.3 反磁化过程 .....	52
7.3.1 磁滞回线和退磁曲线 .....	52
7.3.2 矫顽力的起源 .....	55
7.3.3 普通磁体反磁化过程的四个阶段 .....	56
7.4 矫顽力的磁畴理论和唯象理论 .....	57
7.4.1 矫顽力的磁畴理论 .....	57
7.4.2 矫顽力的唯象理论 .....	58
7.5 矫顽力的微磁学理论 .....	60
7.5.1 微磁学理论简介 .....	60
7.5.2 理想单畴颗粒中磁矩的一致转动模式 .....	63
7.5.3 理想单畴颗粒中磁矩的非一致转动模式 .....	67
7.5.4 真实单个单畴颗粒的形核场 .....	70
7.5.5 单畴颗粒集合体的形核场 .....	78
7.5.6 多畴单晶磁体的反磁化 .....	87
7.5.7 多畴多晶磁体的反磁化 .....	92
7.6 烧结 1:5 型 Sm-Co 磁体的磁化和反磁化 .....	98
7.6.1 烧结 1:5 型 Sm-Co 磁体的磁化和反磁化实验观测 .....	98
7.6.2 烧结 1:5 型 Sm-Co 磁体的矫顽力的微磁学分析 .....	102
7.7 烧结 2:17 型 Sm-Co 磁体的磁化和反磁化 .....	105
7.7.1 烧结 2:17 型 Sm-Co 磁体的磁化和反磁化的实验观测 .....	106
7.7.2 烧结 2:17 型 Sm-Co 磁体的矫顽力的微磁学分析 .....	114
7.7.3 烧结 2:17 型 Sm-Co 磁体的矫顽力的角度关系 .....	115
7.8 烧结 Nd-Fe-B 磁体的磁化和反磁化 .....	116
7.8.1 烧结 Nd-Fe-B 磁体的磁化和反磁化的实验观测 .....	117
7.8.2 烧结 Nd-Fe-B 磁体的矫顽力的微磁学分析 .....	122
7.8.3 烧结 Nd-Fe-B 磁体的矫顽力的角度关系 .....	127
7.9 纳米晶 R-Fe-B 磁体的磁化和反磁化 .....	128
7.9.1 部分退耦两相纳米晶 R-Fe-B 磁体的磁化和反磁化 .....	130
7.9.2 成分正分的单相纳米晶 R-Fe-B 磁体的磁化和反磁化 .....	136
7.9.3 双相纳米晶 R-Fe-B 复合磁体的磁化和反磁化 .....	138
7.10 热压和热变形磁体的磁化和反磁化 .....	142
7.10.1 热压和热变形磁体的磁化和反磁化的实验观测 .....	143
7.10.2 热变形磁体的矫顽力的微磁学分析 .....	147
7.10.3 热变形磁体的矫顽力的角度关系 .....	151
7.11 间隙 R-Fe 化合物磁体的磁化和反磁化 .....	152
7.11.1 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$ 磁体的磁化和反磁化的实验观测 .....	152
7.11.2 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$ 磁体的矫顽力的微磁学分析 .....	154
7.11.3 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$ 磁体的矫顽力的角度关系 .....	157
参考文献 .....	159

<b>第 8 章 稀土永磁材料制备</b> .....	167
8.1 烧结磁体制备工艺 .....	168
8.1.1 原料准备和合金制备 .....	168
8.1.2 粉末制备 .....	174
8.1.3 磁场取向成形 .....	183
8.1.4 烧结和热处理 .....	189
8.1.5 机械加工 .....	194
8.2 烧结 Sm-Co 磁体制备 .....	199
8.2.1 高性能烧结 2:17 型 Sm-Co 磁体 .....	199
8.2.2 高使用温度烧结 1:7 型 Sm-Co 磁体 .....	205
8.3 烧结 Nd-Fe-B 磁体制备 .....	209
8.3.1 高磁能积烧结 Nd-Fe-B 磁体 .....	210
8.3.2 高矫顽力烧结 Nd-Fe-B 磁体 .....	215
8.3.3 低温度系数烧结 Nd-Fe-B 磁体 .....	233
8.3.4 高耐腐蚀性烧结 Nd-Fe-B 磁体 .....	238
8.3.5 Ce、MM 替代烧结 Nd-Fe-B 磁体 .....	272
8.4 粘结磁体制备 .....	295
8.4.1 Sm-Co 合金磁粉 .....	297
8.4.2 各向同性快淬稀土永磁粉末 .....	299
8.4.3 各向异性稀土永磁粉末 .....	318
8.4.4 磁粉与粘结剂的混合及混练 .....	331
8.4.5 混合体成形 .....	332
8.4.6 机械加工 .....	333
8.5 热压和热变形磁体 .....	333
8.6 磁体表面防护处理技术 .....	338
8.6.1 湿法涂装 .....	340
8.6.2 干法涂装 .....	343
8.6.3 耐高温涂装 .....	344
参考文献 .....	347
<b>第 9 章 稀土永磁材料的应用</b> .....	365
9.1 永磁体的应用原理和应用分类 .....	365
9.1.1 永磁体的应用原理 .....	365
9.1.2 稀土永磁体应用分类 .....	366
9.2 在永磁电机中的应用 .....	368
9.2.1 在能源领域的应用 .....	369
9.2.2 在交通运输领域的应用 .....	371

9.2.3 在电子信息领域的应用 .....	374
9.2.4 在消费电子领域的应用 .....	375
9.2.5 在自动化和机器人领域的应用 .....	376
9.2.6 在通用设备中的应用 .....	378
9.3 在磁力机械中的应用 .....	379
9.3.1 在矿山机械中的应用 .....	379
9.3.2 在磁性轴承中的应用 .....	379
9.3.3 在磁性分离技术中的应用 .....	382
9.4 在航空航天和尖端科技中的应用 .....	383
9.4.1 在微波管中的应用 .....	383
9.4.2 在卫星推进器中的应用 .....	384
9.4.3 在自由电子激光器中的应用 .....	384
9.5 各种磁效应的应用 .....	385
9.5.1 在核磁共振仪中的应用 .....	385
9.5.2 在信号传输工程中的应用 .....	386
9.5.3 在磁化技术中的应用 .....	387
9.5.4 在传感器中的应用 .....	387
9.6 磁路分析和设计 I——磁路计算 .....	392
9.6.1 磁路及磁路定律 .....	392
9.6.2 永磁体等效磁路 .....	394
9.6.3 磁路分析与计算实例 .....	396
9.7 磁路分析和设计 II——有限元模拟 .....	399
9.7.1 有限元分析简介 .....	399
9.7.2 二维有限元分析和模拟实例 .....	400
9.7.3 三维有限元分析和模拟实例 .....	403
参考文献 .....	408

**附录 .....** 410

附录 1 磁学及其磁参量的单位换算表 .....	410
附录 2 常用物理常数表 .....	411
附录 3 不同形状磁体的磁导系数 $P_c$ 的尺寸比关系图 .....	411
附录 4 退磁因子表 .....	412
附录 5 稀土永磁材料产品牌号与性能表 .....	413

**索引 .....** 425

## 稀土永磁材料的其他特性

永磁材料在理想状态应保持其磁性能恒久不变，我们确实可以感受到，在许多场合并不需要担心磁性能的丧失，它们似乎恒久不变地在提供磁性，不像电能供应那样至少还需要换电池，因此堪称“永久”。但从第 5 章我们已经了解到，永磁材料的磁性实际上是随着使用环境和时间而不断变化，需要对永磁材料的稳定性进行更确切的描述和系统研究。关于永磁材料稳定性最直观的描述，就是比较磁体在应用过程中受到周围环境影响前后，磁体永磁性能变化的程度。如果永磁性能变化很小，表示该永磁材料的稳定性好；如果永磁性能变化很大，表示该永磁材料的稳定性差。通常，永磁材料被用作一个磁场源，即在一定的气隙内提供一个无需电流源的恒定或可变的磁场，前者对应静态磁路，后者对应动态磁路。永磁体在气隙内所提供的磁场正比于永磁材料所处工作负载线对应的磁能积的平方根，即  $H_g \propto (BH)^{1/2}$ ，材料利用率最高的工作点应选在最大磁能积  $(BH)_{\max}$  附近。如第 5 章式 (5-1) 所述，永磁材料的最大磁能积取决于材料的剩磁  $B_r$ 、磁感应矫顽力  $H_{cb}$  和退磁曲线的方形度。如果这几个基本参数发生变化，磁体的永磁性能是一定会变的，因为这些变化反映的是磁体再充磁后的状况。如果再充磁不可恢复，意味着磁体宏观或微观结构的变化所致，例如宏观上的磁体磕边掉角和表面锈蚀或微观上的晶粒尺寸长大等。即使这三个参数不变，磁体的稳定性还受到其工作点或磁导系数变化的影响，它取决于磁体的尺寸和形状，以及与其共同构成磁应用器件的其他材料的状况。通常，当磁体的磁导系数较高时，即  $|P_c| \gg 1$ ，参数  $B_r$  的稳定性起主要作用；当  $|P_c| \ll 1$  时，参数  $H_{cb}$  的作用更大一些。

引起永磁材料磁性能变化的外界条件有温度、机械（振动或冲击）、电磁场、高能射线、化学作用等，而时间是使这些外界因素不断消磨磁体性能的基本变量，关于温度和磁场对磁体长时间稳定性的影响，在第 5 章有详细的说明，另外需要考虑的是机械稳定性、电磁场稳定性、高能射线稳定性和化学稳定性等。磁体使用环境不同，对永磁材料稳定性要求也不同。例如，在航天飞行器或军用弹道导弹中使用的永磁体，环境温度变化很大，需要磁体温度系数低才能确保器件正常工作；在太空使用的永磁体除了环境温差变化大以外，还不断受到各种高能射线的辐照，磁体材料必须具备抗辐射能力；在高速运转的电机、陀螺仪和磁性轴承中使用的永磁体需要材料有高的机械强度；在高频环境下工作的永磁体需要它的电导率尽量低，以降低磁体的涡流损耗和发热量；在电真空器件如磁控管和行波管中工作的永磁体，除需要低的磁体温度系数外，还希望其热导率高，以便很好地降温；在海洋工程领域中使用的永磁体，由于潮湿的空气和盐的作用，磁体表面会受到侵蚀，从而造成磁体表面的氧化和腐蚀；在化工工程领域中使用的永磁体，由于磁体表面受到各种酸和碱的侵蚀也将造成磁体的腐蚀。总之，对于一些在特殊环境下工作的永磁体，

只有永磁材料同时满足永磁性能和以上所述的某些物理或化学特性方面的一些稳定性要求后,永磁体才能长期稳定地工作。除此之外,永磁材料还可能遇到一些额外要求。例如,绝大多数应用场合需要对磁体进行各种机械加工,要求永磁体具备良好的机械加工性能;永磁体总是与其他材料组装在一起使用,为了与其他材料紧密配合,希望磁体与相配材料的线膨胀系数差异尽量小;对于航空航天上应用的永磁材料,还要求材料的磁能积尽量高,以便降低器件的整体重量等。

第4章和第5章分别系统地介绍了稀土永磁材料的内禀磁性和永磁特性,本章将着重介绍稀土永磁材料在与其长时间稳定使用密切相关的其他物理特性,包括:力学特性、电学特性、热学特性、抗高能辐射特性等,以及稀土永磁材料的腐蚀机理和耐腐蚀性。从第5章我们了解到,稀土永磁材料主要分为烧结磁体、粘结磁体和热压及热压-热变形磁体三大类,每类材料的制备工艺不同,磁体本身的相组成和微结构存在明显差异,这些差异除了反映在永磁性能上以外,还会显著体现在这些物理、化学特性上,特别是粘结磁体,它实际上是磁粉和粘结剂的复合体系,其物理化学特性与粘结剂种类以及成型过程密切相关。以上这些对材料物理、化学性能的要求,具体对应到永磁材料的密度、维氏硬度、抗压强度、抗拉强度、冲击韧性、电导率、热导率、比热容、线膨胀系数、磁致伸缩系数和抗辐射性等各种物理特性参数,还包括在抗氧化和抗腐蚀方面的化学特性参数等。相对于广泛而深入的磁性研究而言,有关稀土永磁材料磁性能以外的这些物理和化学特性研究是很稀少的,数据积累有限,且不少实验研究的测量不确定性较大,甚至是半定量或定性描述,因此这些物理、化学参数通常都是作为参考性数据提供的。

## 6.1 稀土永磁材料的力学特性

稀土永磁材料的硬磁性主相为金属间化合物,普遍具有晶体结构复杂、滑移系少等特点,导致其韧性较差,特别是经过烧结工艺制备的烧结稀土永磁体,其韧性就更差。而粘结磁体的力学特性除了受磁粉合金自身性质的影响外,还需考虑粘结剂和添加剂的力学特性以及磁粉-粘结剂界面的相互作用特性。稀土永磁材料力学特性的宏观描述,主要是材料的强度和韧性相关参数,它们既影响到磁体的加工和正常运行,也影响到磁体长期服役的力学性能。

### 6.1.1 金属材料力学特性的表征

强度和韧性是一对矛盾:强度较高的材料,通常其韧性都较差,因而材料较脆;而韧性较高的材料,其强度一般都较低。强度指金属材料在静载荷作用下抵抗变形和断裂的能力,常见的有拉伸强度、压缩强度、弯曲强度、剪切强度和断裂韧性等。韧性指材料在断裂前吸收能量和进行塑性变形的能力。韧性材料比较柔软,它的拉伸断裂伸长率、抗冲击强度较大,硬度、拉伸强度和弹性模量相对较小。而与之相反的脆性材料的硬度、拉伸强度较大,断裂伸长率和冲击强度就可能低一些。

一般以拉伸强度作为韧性较好的金属材料的强度判断指标,需制作符合测量标准的样块,通过拉伸实验获得材料的拉伸曲线,并由此计算出金属材料的强度指标,如:杨氏模量  $E$  (MPa)、弹性极限  $\sigma_e$  (MPa)、屈服强度  $\sigma_s$  (MPa) 和拉伸强度  $R_m$  (MPa) 等。根据

《金属材料拉伸试验 第1部分：室温试验方法》(GB/T 228.1—2010) (ISO 6892-1:2009, MOD)<sup>[1]</sup>的要求,对于厚度0.1~3mm的薄板,短比例试样为如图6-1所示的哑铃片,原始标距 $L_0$ 与原始横截面积 $S_0$ 平方根的比值 $k = L_0/S_0^{1/2} = 5.65$ ,哑铃片等截面区域的平行长度 $L_c \geq L_0 + b_0/2$ ,加上夹持段 $l$ 的试样总长度 $L_t \geq L_c + 2l$  ( $l = 5 \sim 10\text{mm}$ )。以横截面为 $10\text{mm} \times 2\text{mm}$ 的样品为例, $L_0 = 25.27\text{mm}$ , $L_c \geq L_0 + b_0/2 = 30.17\text{mm}$ ,试样总长度 $L_t = 40 \sim 50\text{mm}$ ;对于厚度3~4mm的棒材, $L_0 = (100 \pm 1)\text{mm}$ , $L_c \geq 120\text{mm}$ 。像烧结稀土永磁体这类脆性较大的材料,较难制作总长度 $L_t$ 偏大的样品,不太适合做拉伸试验,但测量压缩强度更加方便,特别是作相对比较的场合,《金属材料室温压缩试验方法》(GB/T 7314—2005)<sup>[2]</sup>可直接采用边长为5~10mm的立方体样块,方便地得到压缩强度,值得一提的是,该国标采用了美国材料与试验协会标准ASTM E9-89a (2000)《金属材料室温压缩试验方法》。

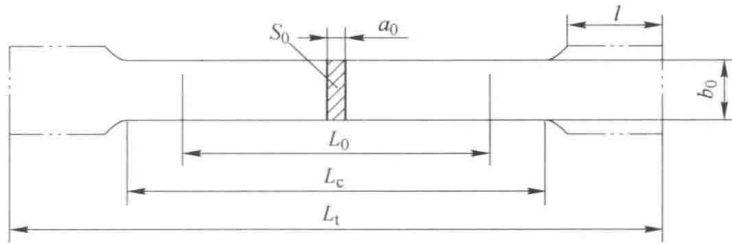


图 6-1 拉伸试验矩形截面样品的典型形状和尺寸关系<sup>[1]</sup>

另外,弯曲强度(抗弯强度)、冲击韧性(冲击强度)和断裂韧性倒是经常用来衡量脆性材料的三个力学指标。弯曲强度 $\sigma_b$  (MPa)试验是采用三点弯曲法测量材料弯曲断裂的应力,如图6-2所示,所参照的国家标准为《金属材料弯曲试验方法》(GB/T 232—2010) (ISO 7438: 2005, MOD)<sup>[3]</sup>,厚度 $a$ 、长度 $L$ 的样品用弯曲直径为 $D$ 的圆柱来测试,下支撑辊的间距 $l = (D + 3a) \pm a/2$ 。该方法的特点是试样加工容易,测试设备简单。

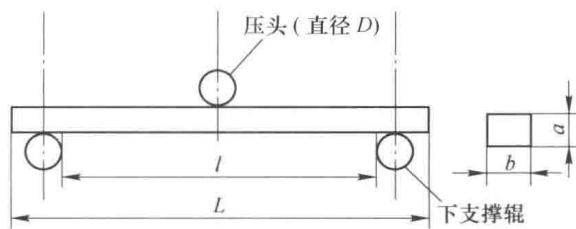


图 6-2 三点弯曲试验结构<sup>[3]</sup>

断裂韧性指金属材料阻止裂纹失稳扩展的能力,是材料抵抗脆性破坏的韧性参数,用 $K_{IC}$ 表示,其单位是 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。当裂纹尺寸一定时,材料的断裂韧性值越高,其裂纹失稳扩展所需要的临界应力就越大;当外力一定时,材料的断裂韧性值越高,其裂纹失稳扩展时的临界尺寸就越大。常用断裂前物体吸收的能量或外界对物体所做的功来表示,例如应力-应变曲线下的面积。测量断裂韧性的 SENB 法,是在试样中间开一裂纹,通过三点抗弯断裂进行测试,如图6-3所示。断裂韧性 $K_{IC}$ 可按照如下公式计算:

$$K_{IC} = Y \frac{3PL}{2bW^2} \sqrt{a} \quad (6-1)$$



式中,  $Y$  是试样尺寸  $a/W$  的函数, 可由相关的表查出; 其他参数都是试样尺寸, 具体定义见图 6-3, 其中  $a$  为带裂纹的缺口深度。

用于断裂韧性测量的试样, 其形状、尺寸及制备方法详见《金属材料平面应变断裂韧性  $K_{IC}$  试验方法》(GB/T 4161—2007)<sup>[4]</sup>, 本标准与国际标准《金属材料平面应变断裂韧性  $K_{IC}$  试验方法》(ISO 12737: 2005) 基本一致。

冲击韧性指金属材料抗冲击载荷而不被破坏的能力, 用  $\alpha_k$  代表, 其单位是  $J/m^2$ 。这里的冲击载荷是加载速度很快且作用时间很短的一种突发性载荷。经常用一次摆锤的冲击弯曲实验来测定金属材料的韧性。判断冲击韧性的指标是冲击试样缺口底部单位截面上冲击的吸收功。

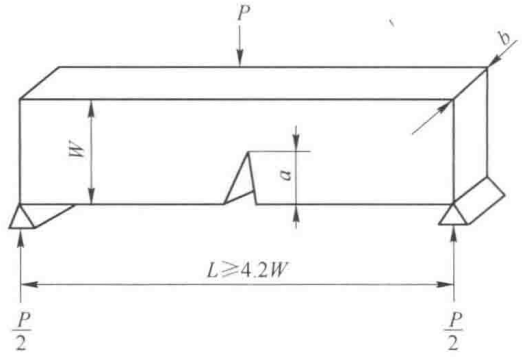


图 6-3 测量断裂韧性  $K_{IC}$  的 SENB 法<sup>[4]</sup>

### 6.1.2 烧结稀土永磁材料的脆性断裂行为

#### 6.1.2.1 烧结 Nd-Fe-B 磁体的力学特性参数

德国 VAC 的 Rodewald 等人<sup>[5]</sup> 系统研究了烧结 Nd-Fe-B 的压缩强度、弯曲强度和断裂韧性, 以及这些参数与烧结磁体平均晶粒尺寸  $\bar{d}$  的关系。他们将不同晶粒尺寸的烧结 (Nd, Dy)-Fe-TM-B 磁体沿取向方向切成  $5mm \times 5mm \times 5mm$  的立方体, 在取向方向施加压力, 测出对应的压缩强度平均值及标准偏差, 图 6-4 是压缩强度与平均晶粒尺寸的关系, 在平均粒度不大于  $6.5\mu m$  的细晶粒一侧, 测量的相对误差较大, 为  $\pm 6.5\% \sim \pm 16.5\%$ ,  $7\mu m$  以上相对误差不到  $\pm 3\%$ , 压缩强度的平均值在  $(960 \pm 50) N/mm^2$  之间变化, 不同平均晶粒尺寸的数值差异在测量误差范围以内, 且与 Rabinovich 等人<sup>[6]</sup> 的测量结果符合得很好。

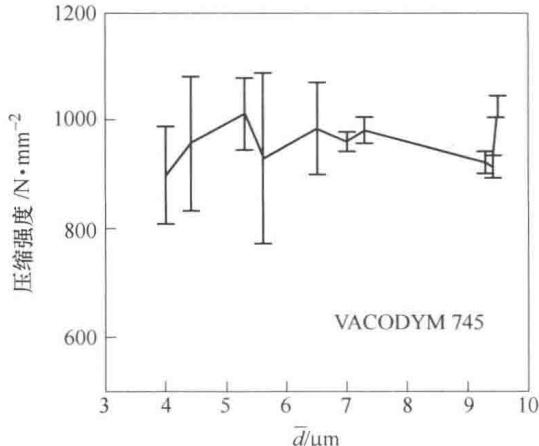


图 6-4 烧结 (Nd, Dy)-Fe-TM-B 磁体压缩强度与磁体平均晶粒尺寸的关系<sup>[5]</sup>

垂直于易磁化轴的弯曲强度, 平均而言弯曲强度为  $(330 \pm 20) N/mm^2$ , 与晶粒尺寸无关 (图 6-5), 平行于易磁化轴的弯曲强度比前者高  $4\% \sim 10\%$ , 这些结果与 Rabinovich 等人<sup>[6]</sup> 以及 Jiang 等人<sup>[7]</sup> 的结果也很吻合。如果将磁体磁化, 垂直方向上的弯曲强度会比不磁化的低  $10\% \sim 15\%$ , 其原因是缺口两侧附加了磁偶极相互作用力 (同性排斥力), 会促进缺口裂纹的传播。断裂韧性的测试样品是  $3mm \times 6mm \times 30mm$  的条状磁体, 在磁体中间线切割出一条  $0.2mm$  宽、 $3mm$  深的细槽, 按照 ASTM 314-64 标准作三点弯曲测试。加载  $10N$  负荷的维氏硬度数据展示在图 6-6 中, 其平均值与磁体晶粒尺寸的关系微乎其微, 因为即

另外, 垂直于取向方向的压缩强度比前者低  $4\% \sim 8\%$ 。弯曲强度是参照 ASTM 314-64 标准, 在  $5mm \times 2mm \times 50mm$  的条状磁体上测得的, 易磁化轴沿着  $50mm$  方向, 测量的是垂直于易磁化轴的弯曲强度, 平均而言弯曲强度为  $(330 \pm 20) N/mm^2$ , 与晶粒尺寸无关 (图 6-5), 平行于易磁化轴的弯曲强度比前者高  $4\% \sim 10\%$ , 这些结果与 Rabinovich 等人<sup>[6]</sup> 以及 Jiang 等人<sup>[7]</sup> 的结果也很吻合。如果将磁体磁化, 垂直方向上的弯曲强度会比不磁化的低  $10\% \sim 15\%$ , 其原因是缺口两侧附加了磁偶极相互作用力 (同性排斥力), 会促进缺口裂纹的传播。断裂韧性的测试样品是  $3mm \times 6mm \times 30mm$  的条状磁体, 在磁体中间线切割出一条  $0.2mm$  宽、 $3mm$  深的细槽, 按照 ASTM 314-64 标准作三点弯曲测试。加载  $10N$  负荷的维氏硬度数据展示在图 6-6 中, 其平均值与磁体晶粒尺寸的关系微乎其微, 因为即

试读结束, 需要全本请在线购买: [www.ertongbook.com](http://www.ertongbook.com)