



全国“星火计划”丛书

任伯胜等 编

东南大学出版社

稀土永磁材料的开发 和应用

2581/15

内 容 提 要

本书以1983年研制成功的第三代稀土永磁材料——钕铁硼磁体为主，对稀土永磁材料的开发和应用作了比较系统的介绍。第一章介绍稀土永磁材料的发展和现状，包括发展概况、基本磁性能、实用开发近况、市场和价格预测以及原材料供应等；第二章扼要介绍铁磁学和金属学的基本知识，各种磁性能的来源和提高途径；第三章介绍稀土氧化物和稀土金属的制取工艺；第四、五章分别介绍稀土永磁材料的制造工艺、应用基础知识和应用的实例等。

本书内容深入浅出，通俗易懂，可供乡镇企业中的工程技术人员、干部、工人阅读。也可作为其它技术开发单位和高等院校师生开拓思路、知识更新的参考书。

责任编辑 洪焕兴

稀土永磁材料的开发和运用

任伯胜等 编

东南大学出版社出版

南京四牌楼2号

江苏省新华书店发行 高淳印刷厂印刷

开本787×1092毫米 1/32 印张6.625 字数148千

1989年12月第1版 1989年12月第1次印刷

印数：1—3000册

ISBN 7-81023-277-0

T·5

定价：2.85元

《全国“星火计划”丛书》编委会

主任委员

杨 浚

副主任委员(以姓氏笔划为序)

卢鸣谷 罗见龙 徐 简

委 员(以姓氏笔划为序)

王晓方 向华明 米景九

应日珽 张志强 张崇高

金耀明 赵汝霖 俞福良

柴淑敏 徐 骏 高承增

序

经党中央、国务院批准实施的“星火计划”，其目的是把科学技术引向农村，以振兴农村经济，促进农村经济结构的改革，意义深远。

实施“星火计划”的目标之一是，在农村知识青年中培训一批技术骨干和乡镇企业骨干，使之掌握一、二门先进的适用技术或基本的乡镇企业管理知识。为此，亟需出版《“星火计划”丛书》。以保证教学质量。

中国出版工作者协会科技出版工作委员会主动提出愿意组织全国各科技出版社共同协作出版《“星火计划”丛书》，为“星火计划”服务。据此，国家科委决定委托中国出版工作者协会科技出版工作委员会组织出版《全国“星火计划”丛书》，并要求出版物科学性、针对性强，复盖面广，理论联系实际，文字通俗易懂。

愿《全国“星火计划”丛书》的出版能促进科技的“星火”在广大农村逐渐形成“燎原”之势。同时，我们也希望广大读者对《全国“星火计划”丛书》的不足之处乃至缺点、错误提出批评和建议，以便不断改进提高。

《全国“星火计划”丛书》编委会

1987年4月28日

前 言

永磁材料的种类很多，稀土永磁材料是其中重要的一大类。从诞生到现在，稀土永磁材料已发展了三代：第一代是 SmCo_5 （钐钴5）型永磁体；第二代是 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ （钐2钴17）型永磁体；第三代是Nd-Fe-B（钕铁硼）型永磁体。钕铁硼永磁材料以其极高的磁能积轰动于世，成为世界上最强的永磁体，被人们称之为“磁王”。它的问世，迅速改变着永磁材料的研究、生产、应用等领域的格局和发展，在永磁材料的发展史上具有重要的地位。

我国稀土资源极其丰富，占世界总储藏量的80%以上。不但储量大，而且分布广，类型多。稀土的年产量，也跃居世界前列。这为我国开发和应用稀土永磁材料提供了雄厚的物质基础。

稀土永磁材料的应用领域十分广泛。随着科学技术的发展，需求量逐年增长。新型的钕铁硼永磁材料，尤其具有广阔的市场和巨大的竞争能力，国内外发展甚为迅速。我国钕铁硼永磁于1984年初研制成功，便迅速转化为生产力，其产品有半数以上打入国际市场，成为很有前途的外向型产业。

本书是“星火”丛书之一，直接为国家“星火计划”服务。根据“星火”丛书编写的精神和要求，本书主要面向农村乡镇企业，以介绍和推广新型稀土永磁材料——钕铁硼为

主要内容，其目的是通过传播先进技术，期望造成“燎原”之势，加速农村工业化和城乡一体化，形成产业优势，促进地方经济的振兴，繁荣我国社会主义经济。因此，本书文字力求通俗易懂，便于乡镇企业中的技术人员、干部、工人阅读，也可供其他同志参考。

本书共分五章。第一、二章以及第五章的大部分由本书主编东南大学任伯胜编写；第三章由江南稀土材料总厂牛令娴、王勋铭编写；第四章由南京898厂研究所王坤明编写；第五章中第五节由本书审稿人余星锄编写。本书在编写中得到南京大学博士导师翟宏如、东南大学刘友鹏、机电部重庆仪表材料研究所张德武以及有关单位张树礼、丁听生、杨金林等同志的热忱帮助和支持。本书图稿描绘由东南大学马红霞担任。在此一并表示感谢。

由于时间仓促，并限于水平和经验，书中错误和不妥之处在所难免，我们殷切希望读者提出批评和建议。

编者

1989年3月

目 录

第一章 稀土永磁材料的发展与现状	1
第一节 发展概况.....	1
第二节 钕铁硼永磁材料性能的优缺点.....	5
一 衡量永磁材料性能的主要磁性参数.....	5
二 各类永磁材料性能的比较.....	8
第三节 实用开发的近期状况.....	10
一 进一步提高磁能积.....	10
二 改善热稳定性和抗氧化性.....	11
三 开发廉价钕铁硼永磁材料.....	14
四 开发生产新工艺.....	19
第四节 生产状况.....	20
一 国外生产状况.....	20
二 国内生产状况.....	21
第五节 稀土永磁合金的原材料.....	22
一 稀土原材料的资源.....	22
二 稀土原材料的供应与价格.....	24
第六节 稀土永磁材料的市场预测与价格 分析.....	26
一 市场预测.....	26
二 价格分析.....	29
第二章 稀土永磁材料的磁性来源	32
第一节 物质的铁磁性.....	32

一 什么是原子磁矩	32
二 为什么物质会产生铁磁性	35
第二节 稀土永磁合金基体相的结构和磁性	38
一 稀土永磁合金的晶体结构	39
二 稀土永磁合金的磁晶各向异性	44
三 稀土永磁合金的饱和磁化强度	47
四 稀土永磁合金的居里温度	50
五 添加合金元素的作用	51
第三节 稀土永磁合金的矫顽力	57
一 磁畴及其在反磁化过程中的变化	58
二 几种矫顽力理论的基本内容	64
三 稀土永磁合金的矫顽力机理	66
第三章 稀土氧化物及其金属的制取	70
第一节 氧化钆、氧化镨和氧化钐的制取	70
一 原料的获得	70
二 分离方法	72
三 萃取法制取稀土氧化物的工艺	73
第二节 稀土金属钆、镨、铈和钐的制取	76
一 熔盐电解法制取金属钆、镨、铈及其合金	76
二 金属热还原法制取金属钐	84
第四章 稀土永磁材料的制造工艺及其应用基础	89
第一节 稀土永磁合金制造的典型工艺和要点	89
一 典型工艺	89
二 工艺环节中的要点	90

第二节 配料	92
一 原材料	93
二 配方拟制	95
三 配方举例	95
第三节 熔炼	99
一 真空中频感应炉及其熔炼原理	100
二 感应线圈及坩埚的制作	101
三 熔炼工艺	102
第四节 制粉	102
一 对磁粉的要求	102
二 粉末的制备	103
第五节 磁场成型	108
一 磁场成型的基本概念	108
二 成型设备	111
三 压制工艺	112
第六节 烧结及热处理	112
一 烧结的基本过程和机理	112
二 烧结炉	113
三 几种常见的烧结工艺	114
第七节 粘结稀土永磁材料的制造	119
一 熔体快淬制粉工艺	120
二 磁粉的表面处理	121
三 粘结剂	122
四 混合和成型	122
第八节 稀土永磁材料的应用基础	123
一 磁路设计的基本原则	123
二 充磁	128

三 永磁磁场的稳定措施	131
四 气隙磁场和退磁曲线的测量	133
第五章 稀土永磁材料的应用举例	136
第一节 在利用永磁体的吸引力和排斥力	
方面的应用	137
一 钕铁硼永磁吸盘	137
二 磁性无活塞杆气缸	139
三 强磁场磁选机	141
四 磁力传动器	145
五 磁悬浮系统	149
六 磁流体密封	150
七 油井打捞器	151
八 磁闭锁继电器	152
九 其它	153
第二节 永磁体在控制电子运动方面的应用	153
一 磁控管中的应用	153
二 行波管中的应用	155
第三节 利用磁场引起物质某些变化方面的	
应用	157
一 磁水器	157
二 磁化节油器	159
三 强磁防蜡器	160
四 其它	163
第四节 磁场在医学方面的应用	193
一 磁性诊断技术——核磁共振成像装置	164
二 磁场疗法	169
三 制造磁性医用器械	171

第五节 利用磁场中电能机械能相互转换方面的应用	172
一 永磁电机	173
二 磁电式仪表	191
三 电声器件	195
附表 计量单位换算	198
参考文献	199

第一章 稀土永磁材料的发展和现状

第一节 发展概况

永磁材料是一种不需要消耗电能就可以持续提供磁场的物体。它具有能量与信息的转换功能，是重要的功能材料。我们的祖先早在二千年前，就使用天然磁铁矿(Fe_3O_4)制成指南针，给人类历史增添了文明。永磁材料发展到今天，应用领域十分广泛，已成为电子工业、仪表工业、电机和自动化控制系统的基础材料。因此，从20世纪70年代以来，永磁材料平均每年以10—15%的速度增长。其发展速度远大于钢铁材料。随着现代能源与信息技术的发展，其增长速度还有加快的趋势。

在永磁材料中，稀土永磁材料的发展速度最快。从1977年算起，10年间世界产量增长了50倍，产值增加了18倍。自1983年以来，稀土永磁材料的产值，仅次于永磁铁氧体而居于第二位。

稀土永磁材料是20世纪60年代中期开发出来的，在此以前使用的永磁材料主要有铝镍钴、永磁铁氧体和其它永磁材料。由于这些材料具有一定的优点，因此，目前仍继续研制、生产和使用着。比如，铝镍钴系永磁合金，除具有较高的磁能积(即衡量磁性能的主要参数，见第二节介绍)以外，

它的温度稳定性是目前常用永磁材料中最好的一种，其剩磁(B_r)的温度系数 $\alpha = -0.02\%/^{\circ}\text{C}$ ，即温度每升高 1°C ， B_r 仅减小万分之二。这种特性在制造高精度测量仪表和电子仪器中是非常重要的，它可以保证仪表在一定温度范围内工作的精确度。但是这种永磁体的成分中含有20—30%的钴元素，钴属于战略物资，在世界上的分布又极不均衡，主要集中在扎伊尔和赞比亚等国家，其供应状况容易受到国外诸因素的影响，价格亦非常昂贵。我国钴的来源有90%依靠进口，这样，给铝镍钴永磁材料的发展带来了一定的限制，继铝镍钴永磁材料以后开发的永磁铁氧体，尽管原料来源十分充裕，价格也非常低廉，但是，其磁能积是永磁材料中最低的。因此，它只能适用于磁性能要求不高的场合。

随着科学技术的进步和电子工业的发展，对高性能永磁材料的需求量在不断增长，以实现电子产品的“轻型化、薄型化、小型化和超小型化”。面对这种需求和趋势，便开发出了稀土永磁材料。

20世纪60年代中期开发的第一代稀土永磁材料——钐钴5(SmCo_5 的1:5型合金)和20世纪70年代开发的第二代稀土永磁材料——钐2钴17($\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 的2:17型)，它们均具有良好的永磁性能， SmCo_5 型的最大磁能积 $(BH)_{\text{max}} \approx 160\text{kJ}/\text{m}^3$ ， $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 型的 $(BH)_{\text{max}} \approx 240\text{kJ}/\text{m}^3$ ，这些稀土-钴永磁体不仅磁能积高，而且剩磁 B_r 、矫顽力 H_c 和居里温度 T_c 也比较高，所以它们是一种高效率、高稳定性的永磁材料。由于它们有利于促进电子器件的“轻、薄、短、小”化，因此一问世便受到世界范围内的广泛重视，从研制成功到形成生产线，仅几年功夫，产量迅速增长。据统计，当时全世界

稀土-钴永磁材料的产量：1975年为14吨，1978年为270吨，1982年为500吨，七年内增长约36倍。尽管这种稀土永磁材料的磁能积比铝镍钴高，但是它们的成分中，除含有稀缺的稀土元素钐以外，仍然含有钴元素。其钐和钴的含量（重量百分数）分别为25—36%和50—60%。这样，使稀土-钴永磁体材料的发展受到了限制。

长时间以来，人们一直在探索寻求一种既不含稀缺元素而性能又好的永磁材料，尤其在出现稀土-钴永磁体以后，总想用资源丰富、价格低廉的铁来代换稀缺的钴。所以设想用铁和轻稀土元素作用，形成二元合金，使其获得象稀土钴那样的1:5型或2:17型化合物，并且具有很好的永磁性能。研究人员对此进行了多方面的研究和试验工作，结果均未成功。因为作为一种永磁材料，必须满足三个基本条件：有高的饱和磁化强度；有很强的单轴磁晶各向异性；居里温度远高于室温。而在铁和轻稀土元素形成的二元合金中，不存在1:5型化合物，2:17型化合物的居里温度在室温附近或低于室温，除稀土元素钐以外，其它2:17型化合物不具备单轴磁晶各向异性，轻稀土元素铈或铈与铁形成的2:17型化合物($\text{Nd}_2\text{Fe}_{17}$ ， $\text{Pr}_2\text{Fe}_{17}$)，其易磁化方向在基面内，亦不具备单轴磁晶各向异性。因此，它们都不能成为实用的永磁材料。

20世纪70年代初，人们发现重稀土元素与铁形成的化合物——铽铁2(TbFe_2)，用溅射法把液态合金高速冷却，使其来不及结晶，从而得到非晶态薄膜，再通过回火，使它从非晶态转变成晶态时，矫顽力会显著增大。20世纪80年代用这种溅射法已获得了铁基永磁合金。但在稀土矿中，重稀土

元素含量很少，且价格十分昂贵，所以它也不能发展成为实用的永磁材料。尽管如此，这项工作对后来的铁基稀土永磁合金的发展仍起了重要的启迪作用。

1983年，日本佐川真人等对铁基三元合金进行了广泛的研究，发现：在含有轻稀土元素钕的Nd-Fe-B三元合金中，存在一种 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 相，这种金属间化合物具有很强的单轴各向异性，呈四方晶体结构，并且制成了新型的永磁材料——Nd-Fe-B永磁体，其最大磁能积 $(BH)_{\max} = 380\text{kJ}/\text{m}^3$ ，创造了实用永磁材料的最高记录。从此，诞生了第三代稀土永磁材料——钕铁硼永磁合金。

第三代稀土永磁材料的问世，在稀土永磁材料的发展史上具有划时代的意义。它不仅具有高的磁能积，而且它实现了人们长期梦寐以求的愿望，即以廉价的铁取代了战略物资钴，同时用储量为钐的12—15倍的钕元素取代了钐。这种廉价而性能优异的磁体，可以不受资源限制而扩大生产和推广使用。因此，第三代稀土永磁材料的出现，引起了世界各国磁学界的极大兴趣。从1985年3月到1987年10月连续三年组织了三届“钕铁硼材料对永磁体使用者、生产者和原材料供应者的冲击”国际讨论会。事实表明，钕铁硼永磁合金的出现，正在迅速改变着永磁材料的研究、生产和应用等领域的格局和发展。

从1983年到现在，在短短的几年里，Nd-Fe-B磁体除迅速投入工业生产以外，同时也在应用理论和实用开发等方面，开展了广泛的研究工作，并且取得显著的进展。

第二节 钕铁硼永磁材料性能的优缺点

一、衡量永磁材料性能的主要磁性参数

永磁材料性能的好坏，是用其退磁曲线(即磁滞回线的第二象限部分)上的有关物理量来表征的。退磁曲线上任意一点对应的量值和计算的量值，是表示永磁体质量的重要数据。它们是剩磁 B_r 、矫顽力 H_c 和静态最大磁能积 $(BH)_{max}$ 等。此外，永磁材料在使用过程中，磁性能的稳定性也是重要的参量。

1. 最大磁能积、矫顽力、剩磁和隆起度

尽管永磁材料的应用是多种多样的，但其根本作用是利用它在给定空间产生一定的磁场强度，或者说利用它在单位体积的工作气隙内，产生尽可能大的磁能量 W 。由电工基础可以得出这个磁能量值为：

$$W = \frac{1}{8\pi} (B \cdot H) \quad (1-1)$$

式中的 B 和 H 分别表示退磁曲线上任意一点对应的磁感应强度和磁场强度。例如：图1-1中退磁曲线(即 B_rDH_c 曲线)上任意一点所对应的 B 和 H 值。另外，由式(1-1)可知， B 和 H 的乘积正比于磁能量，所以通常称 (BH) 为磁能积。

在永磁材料的退磁曲线上，不同点对应的 B 和 H 的乘积是不同的。在 B_r 点上，由于 $H = 0$ (相当于没有工作气隙的情况)，所以磁能积为零。在 H_c 点上，由于 $B = 0$ ，因此磁能积也为零。除了这两个极端的点以外，退磁曲线上的任何一点均或大或小的对应着一个磁能积值。并且其中有一个最大

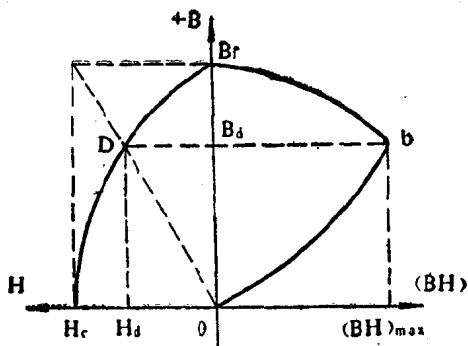


图1-1 退磁曲线和磁能积曲线

值。这个最大值称为最大磁能积，记为 $(BH)_{max}$ 。

图1-1中的 $0bBr$ 曲线，是磁能积 (BH) 随 B 值而变化的曲线，称为磁能积曲线。从图中可知，退磁曲线上的 D 点对应的 B_d 和 H_d 的乘积，就是永磁体的最大磁能积 $(BH)_{max}$ 。当永磁体在 D 点工作时，它将向体外空间（包括工作气隙）提供最大的磁能积 $(BH)_{max}$ 。所以 D 点被称为最佳工作点。因此，人们习惯于用最大磁能积 $(BH)_{max}$ 作为磁体内存储的最大磁能量，并以此作为衡量永磁体性能的重要参数。

此外， $(BH)_{max}$ 的大小，还与退磁曲线的形状有密切关系。退磁曲线凸出的程度（即隆起度 r ）越大，越接近矩形，则 $(BH)_{max}$ 越大。其关系式为：

$$r = \frac{(BH)_{max}}{B_r H_c} \quad (1-2)$$

由式(1-2)可知，如果两个磁体的剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 相同，而隆起度 r 不同时，其 $(BH)_{max}$ 是不同的。