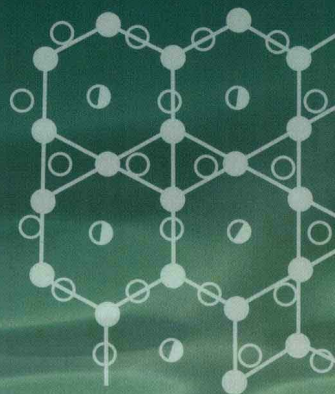


QIANGCITI

XITU YONGCI CAILIAO YUANLI
ZHIZAO YU YINGYONG



强磁体

——稀土永磁材料原理、 制造与应用

潘树明 编著



化学工业出版社

QIANGCITI XITU YONGCI CAILIAO YUANLI
ZHIZAO YU YINGYONG

强磁体

——稀土永磁材料原理、 制造与应用

潘树明 编著



化学工业出版社

·北京·

序 1

材料是现代文明的三大支柱之一，新材料视为新技术革命的基础和先导，材料涉及的领域极为广泛，国家的工农业建设和国防建设，人民生活水平的提高，无不与材料密切相关，所以材料的科学研究、新产品开发、工业大生产与合理应用都关系到社会进步、国家安全。当前最热门的是以分子或原子尺度人工合成的功能材料，如薄膜材料、超晶格材料和原子簇材料等。

稀土永磁材料是稀土功能材料之一，通常把磁化后再去掉外磁场而能长期保持磁性的物质叫永磁体、硬磁体或简称永磁。可用于制造磁功能器件的强磁材料称为磁性材料。它包括硬磁材料、软磁材料、磁致伸缩材料、磁性薄膜、半硬磁材料、磁性微粉、磁性液体、磁致冷材料以及磁蓄冷材料和软磁材料。

稀土永磁材料具有机械能与电磁能相互转换的功能。利用其能量转变功能和磁的各种物理效应可将永磁材料做成多种永磁功能器件，是当前开发和生产的热门。

北京有色金属研究总院教授级高级工程师潘树明编著的《强磁体——稀土永磁材料原理、制造与应用》一书有以下特点。

1. 总结了几十年国内外稀土永磁材料科学理论、工艺技术及应用，尤其是当前的最新发展的永磁理论。
2. 科学地阐述作者几十年和国内外发展的生产工艺技术，特别是近几年出现的专利新工艺技术。
3. 系统地阐明了永磁材料的基础理论，制备原理、技术、生产中的创新。
4. 将冶金学、金属学、晶体学、铁磁学、材料科学的基本理论融会贯通应用于稀土永磁材料，该书对相关的基本概念、基本原理作出清晰的论述。
5. 从作者的长期研究实践上升为理论，指导材料、工艺创新，再验证理论的正确性，丰富发展了理论，用新理论再指导材料生产实践。本书体现了理论与实践相结合，对培养青年科技人员十分有益，对发展稀土永磁材料的研究、教学及生产将发挥重要的参考作用。

中国是稀土资源大国，将资源优势转化为更高的经济效益，需要科技工作者付出更大的努力，进一步推动可持续发展。该书的出版也将对稀土永磁材料的研究教学、生产、开发和工艺理论的创新起到积极的推动作用。

师昌绪
2010.4.19

(师昌绪，著名金属学及材料科学家，中国科学院及中国工程院资深院士，曾任中国工程院副院长、中国科学院技术科学部主任等，现任国家自然科学基金委员会特邀顾问，两院资深院士联谊会会长等。早年留学美国，获博士学位。在高温合金、高强度钢及航空发动机材料的研究和发展方面有突出贡献，荣获2010年度国家最高科学技术奖。)

序 2

永磁材料又称硬磁材料，是一类经过外加强磁场磁化再去掉外磁场以后能长期保留其较高剩余磁性、并能经受不太强的外加磁场和其他环境因素（如温度和振动等）的干扰的强磁材料，因这类强磁材料能长期保留其剩磁，故称永磁材料。又因为具有高的矫顽力，能经受外加不太强的磁场（即远低于矫顽力）的干扰，故又称硬磁材料。

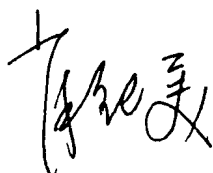
永磁材料是历史上发现最早，应用也最早的强磁材料，也是当代种类甚多和应用最早的强磁材料，是当代种类应用甚广的一大类强磁材料。

中国是应用磁性材料最早的国家（指南针），也是发展现代磁性材料工业最快的国家，就产量而言，中国已经是一个磁性材料大国。提高产品质量的技术水平，开发高技术低成本，提高产品行业效益和附加值，带动以磁性材料为基础的高技术发展，争取早日成为磁性材料强国，这是摆在中国人民日程上的一个历史性课题。

多年来在发展永磁材料的同时，也培养造就了一批水平较高的技术队伍，国家已把开发稀土新材料列为重点开发项目。二十一世纪中国将成为世界稀土永磁材料生产及开发的基础与中心。从这个历史高度来看，培养一批更高水平的管理人才来承担起上述任务也是急需的。要大力加强稀土永磁材料的创新开发、教育和学术交流活动，需要高质量地阐述稀土永磁材料的系统理论，特别是新概念、新理论的学术著作。北京有色金属研究总院教授级高级工程师潘树明同志应稀土强磁材料发展的需要，编著出《强磁体——稀土永磁材料原理、制造与应用》一书，该书是作者从几十年来的科研和生产实践中提出的创新理论，并将铁磁学，金属学、晶体学、冶金学、材料科学的基本理论融会贯通地应用于稀土永磁材料。该书对相关的基本概念、基本原理作出清晰的论述。著者将自己四十多年来从事稀土、永磁材料研究开发、产业化过程中作出的成果，建立多个工厂的经验及培养硕士、博士的经验和合作发表 250 多篇论文中有关的部分融入书中，提高了本书的质量。

本书的内容丰富、体系新颖、结构严谨合理，是一本实践理论交融，有特点又针对当前稀土永磁行业中向前发展的问题详尽阐述，提出今后发展的新见解，是一本可读性很强的好著作。该书的出版必将对当前和今后稀土永磁材料的教学、研究、生产、开发与创新起到积极的推动作用。

我预祝该书和具有上述同类特点的科技专著更多地出版。



2010年4月18日

（肖纪美教授为中国科学院资深院士，著名的材料物理专家，在材料科学领域内出版 28 本专著，发表了 300 多篇学术论文，在环境断裂方面科研成果获国家科研成果二等奖，获部级奖 15 项，曾在 17 个国家，国内 22 个省，150 多单位作 380 次讲学，对金属物理学发展起重要推动作用，得到国内外专家学者高度评价。）

序 3

材料是人类社会文明的柱石与里程碑。强磁体通常称为磁性材料，也称为磁性功能材料，稀土永磁材料是 20 世纪 60 年代出现发展起来的磁能积最高的一大类永磁材料，是重要的功能材料，它在现代农业、现代工业和科学技术中得到广泛的应用。

稀土永磁材料是以稀土金属元素与过渡族金属所形成的金属间化合物为基体的永磁材料，从 1967 年出现的 SmCo_5 系到发现 2:17 型 Sm-Co 和稀土铁基的 Nd-Fe-B 永磁材料。常称为 1, 2, 3 代稀土永磁材料，其中 2:17 型 Sm-Co 称为第二代稀土永磁材料，其特点是矫顽力高，可逆温度系数低，称为稳定性最强的稀土永磁材料。Nd-Fe-B 永磁材料是目前磁性能最高的永磁材料，其中烧结 Nd-Fe-B 永磁材料从 1983 年出现创世界纪录的磁能积之后，经过二十多年还没有超过它的最强的永磁材料，它仍处于发展阶段，目前实际生产的黏结各向异性 Nd-Fe-B 的性能还较低，提高性能的潜力还很大，生产 Nd-Fe-B 永磁材料的工艺技术，设备还在不断改进和完善。重要设备制造和国外先进国家相比还有差距，全世界市场对 Nd-Fe-B 系永磁材料的需求量还在不断地增加，预计到 2015 年全世界对烧结 Nd-Fe-B 永磁材料的需求量将增加到 10 多万吨。航天、航空的发展对使用温度达 500°C 的永磁体需要量愈来愈大，虽然用 2:17 型 Sm-Co 能满足一部分，但尚需开发提高。基于上述情况，当前需要一部结合当今发展的新理论与工艺现状，讨论稀土永磁材料的磁学、材料学原理，成分、显微组织结构、相图和晶体结构是当前纳米晶复合永磁材料的发展及其对稀土永磁材料的促进，材料应用的发展的专业书籍。

潘树明在稀土永磁材料研究与产业化、建厂及应用，开发工作近 40 年，为了科研工作需要在冶金化工材料专业之外又在北京大学物理系进修了磁学专业，为适应专业发展对书籍之需要，他用 4 年时间撰写了《强磁体——稀土永磁材料原理、制造与应用》一书。

本著作有以下几个显著的特点，即：

1. 作者几十年的研究和生产实践上升为理论，指导材料、工艺创新、再验证理论的正确性，丰富发展了理论，用新理论再指导科研生产实践。书中所阐述的内容体现了这一方面的理论与实践的结合，对稀土永磁材料的发展和青年人从事这一学科有启迪作用。

2. 作者将有关稀土永磁材料的磁学、磁性材料的理论发展和新理论观点编入本书，尤其是磁性经典和量子唯象学理论、量子力学和磁性理论，磁性的交换作用、磁性以及在稀土永磁上的应用都编著到书中，为进一步提高稀土永磁磁性能及创新研究提供参考和理论依据。

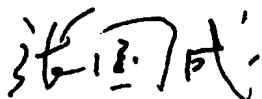
3. 创新点多：作者将国内外稀土永磁材料的创新工艺技术和当前国内外公布

的有关稀土永磁材料及应用专利，编入书中，为今后同行业中的创新研究将起到参考作用。

4. 材料的工艺技术性能和材料应用器件的密切结合。我国在稀土永磁材料的研发和永磁体的生产居世界首位。2008年，Nd-Fe-B的产量占全世界的85%，这和中国稀土的储量和产量居世界第一相适应。但是在材料的应用、器件的开发和国外有差距，本书针对这一问题，阐述了稀土永磁材料的应用开发，将对今后永磁材料的应用有参考价值。

5. 作者将稀土永磁1、2、3代之后的稀土永磁材料出现的新品种如双相纳米复合永磁材料、稀土间系永磁材料等均作为章节编著于书中，为当代研发新型永磁材料提供参考书。

我相信潘树明编著的《强磁体——稀土永磁材料原理、制造与应用》一书，一定能促进稀土永磁行业研发教学和生产发展。希望作者今后有更多的同类专著问世。



2009年10月10日

(张国成：中国工程院院士，国内外稀土冶金专家。长期从事稀土、稀有金属冶炼分离工作，先后五次获国家级奖励。20世纪60年代发明碱度法生产高纯氧化镧，解决了彩电用红色荧光粉。1987年发明硫酸强化焙烧萃取法冶炼包头稀土精矿新工艺，2002年发明镧电解还原工艺及设备，并首次用于甘肃稀土公司生产高纯氧化镧。1995年被选为中国工程院院士，1997年获得何梁何利科技奖。)

序 4

永磁材料的开发、生产和应用程度是现代国家经济发展程度的标志之一，当代永磁材料的家庭平均使用量被用来作为衡量现代国民生活的标准。永磁材料已广泛应用于计算机技术、信息技术、航天航空技术、交通运输技术、办公自动化技术、家电和医疗设备当中。

中国在古代磁现象的观测和应用中，许多方面都是世界上最早的。中国是磁的故乡，中国古代对于世界磁学的贡献是多方面的：磁石的发现，指南针的发明，人工磁化方法的应用，地磁偏角的发现和地磁倾角的应用，指南针在航海上的应用，磁石在医药上的应用，地球极光的观察和记录，太阳黑子的观察和记录等十几项发现、发明、应用和观察记录都具有的重大价值和意义。

随着经济建设和国防建设的迅速发展、高新技术的兴起，以及科学研究受到国家的重视，中国当代磁学有了大规模的快速发展，主要表现是：中国科学院一些研究所，以及一些高等学校，一些产业、国防和地方部门的研究单位，都结合各自的需要和特点开展了磁学和磁性材料的研究工作，十几所高等学校建立了磁学或磁性材料专业，并培养了大批磁学人才，产业部门建立了大量的生产磁性材料和器件工厂，为磁学磁性材料研究和应用提供了广阔的天地。

21世纪中国将成为世界稀土新材料生产及开发的基地与中心，永磁材料从中国制造走向中国创造，完成任重道远的工作需要培养出大批具有创新型的科技人才，需要更多的创新的理论及其学术论著，北京有色金属研究总院潘树明教授应上述需要编著了《强磁体——稀土永磁材料原理、制造与应用》一书。

书中详细地阐述了稀土永磁材料制造原理、工艺以及制作稀土永磁材料成分、工艺的创新，永磁材料发展及稀土永磁与现代高新技术的关系，永磁材料发展历程、现状及发展前景。永磁材料的磁学基础，矫顽力理论及其理论的发展，得到最大矫顽力的条件，矫顽力的应力理论和掺杂理论，形核场和钉扎场的理论，强磁体的微观机理与铁磁性的量子力学理论，稀土永磁材料的相图与稀土金属间化合物的晶体结构、合金相与相变原理在稀土永磁合金在高温相变中的应用。稀土永磁材料的制备工艺。粉末磁场取向，烧结原理与热处理技术，黏结稀土永磁材料的原理制备工艺技术，双合金法制备烧结稀土铁基永磁材料工艺技术，稀土钴基永磁材料，2:17型Sm-Co永磁材料。稀土铁基永磁材料，双相纳米晶复合永磁材料，稀土永磁材料的稳定性、永磁材料的应用等。

本书有以下四个显著的特点，即：

1. 从作者几十年来长期研究实践上升到理论，用此理论指导材料设计，工艺上创新设计出材料的新品种，经过实践证实，再验证理论的正确性，丰富发展了理论，用新理论再指导材料新品种的生产实践，书中所阐述的体现了这一方面的理论

与实践的结合，对培养年轻人的研发生产实践有重要的参考作用。

2. 作者用超高压电镜中动态观察实验所发现的相变的规律性及相转变新信息、在低温下出现自旋重取向，提出了新的研究课题，在此基础上继续研发，对稀土永磁材料的创新研究有一定的推动作用。

3. 作者编著了新出现的永磁材料新品种的原理和工艺制造技术，对稀土永磁材料的发展也有重要的参考价值。

4. 本书编著了稀土永磁材料在近十几年来应用新进展和新出现的领域中的应用。

中国的稀土资源名列世界之首位，将资源优势大国转变为经济强国需要几代科技工作者共同努力才能实现。祝愿在这一发展中有更多的学术专著出现。

李国栋

2010年4月28日

（李国栋为中国科学物理研究所的磁学开放实验室研究员，国内外著名的磁学专家，磁学专著十几本，学术论文愈300篇，被国内外刊物引用300次以上，是中国科技大学等8所大学的兼职教授，在国内外应约作200余次学术报告，得到国内外同专业学者的高度评价，对中国磁学磁性材料的发展起了重要的推动作用。）

材料是人类社会文明的柱石与里程碑，永磁材料已成为衡量一个国家文明和发达程度的标志之一，已广泛用于现代科学技术，如信息技术、通讯技术、计算机技术、航天航空技术、交通运输、办公自动化技术、家电和医疗设备中。

稀土永磁材料是重要的功能材料，也是磁性能最强的永磁材料，中国稀土永磁材料的发展令人振奋，也令世界瞩目，其产值占中国永磁材料的50%以上。世界对稀土永磁材料的需求量每年以20%~30%的速度增长，稀土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，产品的品种还在不断地扩展，产品的质量在不断地提高，产品的应用也在不断扩大。

撰写本书的目的是：研究、总结稀土永磁材料在制造中出现的新工艺、新技术、新设备，研究四十年来稀土永磁行业中的实用技术、发明创造和应用；总结国内外的经验，开拓国内外市场，推动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创新；为在21世纪，中国稀土永磁材料产业技术与产品创世界一流水平，成为世界稀土永磁材料开发与生产基地，由产量大国变为稀土永磁经济强国贡献一份力量。

本书共二十章。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章是永磁材料的磁学基础。阐述了量子力学和磁性、量子顺磁性和反磁性、磁性的经典和量子唯象学论、稀土永磁合金的磁性来源，为研发新型稀土磁性材料提供基础理论知识，是新型磁性材料创新和高等院校磁学理论教学的基础。

第3章介绍了稀土永磁合金的相图与稀土化合物的晶体结构相图。结构相图是阐明合金系相关关系和相转变的工具，它是表示金属或合金中各种相的平衡存在条件以及相之间平衡共存关系的一种简明图解，帮助人们系统地了解金属和合金在不同的条件下可能出现的各种组态，以及条件改变时，各种组态可能发生的转变的方向和限度。再把相图与相变机理和动力学结合起来，相图便可成为分析组织形成和变化的有力工具，是研制、生产和加工金属材料的重要参考资料。

第4章重点阐述合金相与相变的原理与基本规律。相变是材料科学的重要组成部分，固态相变理论是从事金属材料科学研究的一把金钥匙，不懂得固态金属相变，就等于不懂金属材料。在这一章里运用现代金属固态相变理论和观点，阐述本人三十多年来从事稀土永磁合金从室温到高温相变过程中的研究成果和发现，揭示稀土永磁合金高温相变，纳米晶形成与矫顽力的关系，稀土永磁合金高温相变驱动力、相变阻力、均匀形核、新相长大规律、相变自由焓等，目的是为科研人员 and 高等院校开发新型磁性材料，发现合金中新的磁性相，提高磁性材料性能提供参考。

第5章阐述稀土永磁材料的制备原理和熔炼工艺技术，目的是为稀土永磁材料

研发和生产企业的技术人员提供参考，根据产品使用者对稀土永磁体性能的要求而设计配方，选择工艺技术，指导工人生产。

第6章阐述稀土永磁合金制粉原理和工艺技术，包括湿法制粉和干法制粉原理、工艺和设备。本章内容包括国内外最优秀的稀土永磁体制粉设备原理、制粉工艺，如氢爆碎炉的使用技术，气流粉碎机的原理与设备、工艺技术，制粉中如何防氧化的关键技术。

第7章阐述稀土永磁合金粉末磁场取向与成型工艺技术。

第8章介绍稀土永磁材料的烧结原理、工艺技术。烧结对粉末冶金材料和制品的性能有着决定性的影响。烧结结果是粉末颗粒之间发生黏结，对永磁体强度增加和密度的提高起重要作用。本章内容以烧结原理、烧结原动力、烧结中物质的迁移、固相烧结的过程和工艺、气氛的控制、烧结炉设备为重点，并介绍了本人在生产实践中创出的大幅度提高烧结效率的烧结新工艺的专利技术。

第9章介绍了稀土永磁材料的时效、后加工技术原理、工艺技术。稀土永磁材料烧结之后的时效可以成倍提高合金的内禀矫顽力，时效工艺合理可以使材料的稳定性大幅度提高。只有通过稀土永磁体的后加工才能达到用户使用的规格尺寸和精度要求。本章也融入了本人从事研发实践中稀土永磁合金时效和后加工经验，利用这些优秀的工艺技术，材料成品率可大幅度提高。

第10章阐述黏结稀土永磁材料的原理、制备工艺技术。黏结稀土永磁体是把稀土永磁材料与树脂、塑料或低熔点合金等黏结剂均匀混合，然后用压制、挤出或注射成型方法制成的一种复合永磁体。当前此材料的用量增长很快，其增长幅度高于任何一种永磁材料。

第11章阐述 HDDR 稀土永磁材料的制备工艺技术和原理。

第12章~第14章阐述当前正在研发和走向产业化过程的稀土永磁材料粉末的机械合金制备工艺技术，纳米复合永磁材料制备工艺技术，稀土永磁材料的铸造——热变形法工艺技术。

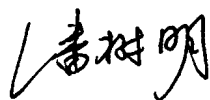
第15章~第17章介绍第一、二、三代稀土永磁材料。包括第一代 RCO_5 ($R=Sm, Pr$)、第二代 $Sm(Co, Cu, Fe, Er)_Z$ ($Z=6\sim 8$)、第三代 $R-Fe(M)-B$ 永磁材料的发现、材料性能和工艺技术，相变反应动力学，从室温到高温的相变和内禀矫顽力关系，矫顽力机制模型、材料的居里温度、材料的稳定性等。

第18章介绍双相纳米晶复合永磁材料。它是目前最有前途的永磁材料之一，这一材料及相关技术的发展，必将促进稀土永磁材料的技术进步和传统产品的性能升级，由此带来稀土永磁高新技术产品的发展。本章重点内容包括纳米晶复合材料的交换耦合模型、制造原理、制造工艺、产业化前景。

第19章阐述稀土永磁材料的稳定性，包括时间稳定性、温度稳定性、化学稳定性、冲击作用和机械振动下的稳定性、外磁场作用下的稳定性及磁性测量技术与设备。

第 20 章阐述永磁材料的应用与发展前景。

稀土永磁材料的永磁性来源于稀土与 3d 过渡族金属形成的某些特殊金属间化合物。人们利用永磁特性将其能量转换为磁的各种物理效应，已制成多种功能材料及器件，广泛用于电机工程、生物工程、微波通讯技术、计算机技术、自动化技术、磁分离技术、石化工业、汽车工业、仪表工业、音像工业等众多领域已成为新兴产业与社会进步、高新科学技术的重要物质基础之一，由于稀土元素结构的特殊性，而且有其他元素不具备的磁、电、光特性，从而可以制备成为用于高新技术的新品种，新材料，推动理论与材料的发展。本书作者水平有限，不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。



2011 年 5 月

第 1 章 绪论	1
1.1 稀土永磁材料在国民经济中的地位和作用	1
1.2 稀土永磁材料的现状与发展前景	1
1.3 稀土元素	2
1.4 稀土元素原子的外部电子层结构	2
1.5 稀土元素的原子半径和三价离子半径值	3
1.6 稀土元素的物理性质	4
1.7 永磁材料发展历程、磁学磁性材料发展大事记	5
1.7.1 永磁材料发展历程	5
1.7.2 磁学磁性材料发展的大事记	9
1.8 永磁材料优劣判断标准	11
参考文献	12
参考书目	12
第 2 章 永磁材料的磁学基础	14
2.1 永磁材料的技术磁参数	14
2.2 矫顽力的理论及其理论的发展	21
2.2.1 得到最大矫顽力的条件	21
2.2.2 矫顽力的应力理论和掺杂理论	21
2.2.3 形核场理论——形核场决定的矫顽力	21
2.2.4 钉扎场理论——钉扎场决定的矫顽力	22
2.3 强磁性的微观机理与铁磁性的量子力学理论	29
2.3.1 强磁性的微观来源机理与 Heisenberg, W 的量子力学理论	29
2.3.2 Hei Senberg (海森堡) 自发磁化理论要点	30
2.3.3 френель (弗伦克尔) 提出的铁磁物质的自发磁化理论要点	32
参考文献	34
参考书目	34
第 3 章 稀土永磁材料的相图与稀土化合物的晶体结构	36
3.1 引言	36
3.2 稀土-钴二元系相图及化合物	37
3.3 钐-钴-铜相图	44

3.4	钐-钴-铜-铁系永磁体相图	48
3.5	钐-钴-铜-铁-金属系 2:17 型永磁体相转变分析	49
3.6	稀土-铁二元相图及化合物	51
3.7	稀土-铁-硼三元系相图及化合物	55
3.8	钕-铁-硼三元系的非平衡状态图	64
3.9	镨-铁-硼三元系相图	64
3.10	钕-铁-碳三元系相图	70
3.11	晶体与晶体的七大晶系	70
3.12	稀土永磁化合物的晶体结构概述	71
3.13	Th ₂ Ni ₁₇ 型化合物的晶体结构	72
3.14	Th ₂ Zn ₁₇ 型化合物的晶体结构	74
3.15	稀土钴系化合物的晶体结构	76
3.16	La ₂ Fe ₁₄ B 化合物的晶体结构	77
3.17	R _{1+ε} Fe ₄ B ₄ 化合物的晶体结构	78
	参考文献	82
	参考书目	83

第 4 章 合金相与相变的原理及在稀土永磁合金高温相变中的应用 85

4.1	合金相与相变的原理	85
4.1.1	相与相变	85
4.1.2	合金与材料	85
4.1.3	组织与结构	86
4.1.4	相变与结构的变化	86
4.1.5	相变的分类——热力学分类	86
4.1.6	相变的分类——动力学的分类	89
4.1.7	相变的分类——结构学分类	90
4.1.8	相变的驱动力	90
4.1.9	相变阻力	92
4.1.10	形核	92
4.1.11	新相长大的一些规律	92
4.1.12	固体相变动力学	93
4.1.13	马氏体相变	97
4.2	烧结 Nd-Fe-B 系永磁合金的室温相与高温相变	98
4.3	稀土永磁合金高温相变的应用	105
4.3.1	在材料科学、理论研究方面的应用	105
4.3.2	在材料制备工艺上的应用	106

参考文献	108
参考书目	108
第5章 稀土永磁材料的熔炼工艺	110
5.1 合金熔炼技术	110
5.2 快速凝固鳞片的显微组织优劣的判定标准	113
参考文献	113
参考书目	114
第6章 稀土永磁合金制粉原理与工艺技术	115
6.1 制粉原理与稀土永磁体粉末的特点	115
6.2 制造烧结稀土永磁体对磁性粉末的要求	115
6.3 机械球磨制粉技术	116
6.4 氢破碎和气流磨制粉	117
参考文献	122
参考书目	122
第7章 稀土永磁合金粉末磁场取向与成形工艺技术	123
7.1 磁场下成形概述	123
7.2 粉末在磁场下成形的过程和压坯质量分析	123
7.2.1 粉末特性	123
7.2.2 压件的形状及尺寸	124
7.2.3 压制条件	124
7.2.4 加压方式	124
7.2.5 加压速度	124
7.2.6 压制过程中力的分析	124
7.2.7 成形剂	124
7.2.8 成形剂的选择标准	125
7.2.9 物料压制过程中压坯质量的影响因素	125
7.3 稀土永磁合金粉末磁场取向与成形实例	126
7.4 常见压坯缺陷分析及改进措施	128
7.5 压制工艺的制定	130
7.6 压制工艺有关的参数	130
7.7 脱模方式	131
7.8 压制压力	131
7.9 磁场中成形工艺	131

参考文献	133
参考书目	133
第 8 章 稀土永磁材料的烧结原理、工艺技术	134
8.1 烧结的目的与实质	134
8.2 烧结温度的设定	134
8.3 高温烧结保温时间的设定	134
8.4 烧结原动力	135
8.5 烧结中的物质迁移	135
8.6 固相烧结的过程	136
8.7 晶界扩散的作用与晶界扩散机构	138
8.8 晶界显微组织与晶界相	139
8.9 塑性流动机构	142
8.10 中间阶段烧结的基本过程	143
8.11 最终阶段烧结的基本过程	144
8.12 烧结过程中粉末体烧结时再结晶	145
8.13 活化烧结	146
8.14 活化烧结的方法	146
8.15 烧结工艺的制定与烧结工艺技术	147
参考文献	149
参考书目	149
第 9 章 SmCo₅ 永磁材料的热处理与磁性能	150
9.1 SmCo ₅ 发展历程与回火效应	150
9.2 SmCo ₅ 永磁材料的 750℃ 回火效应与矫顽力下降的机理	151
9.3 SmCo ₅ 永磁材料制备工艺中热处理对矫顽力的影响	154
9.4 SmCo ₅ 永磁材料的矫顽力机理	157
参考文献	159
参考书目	160
第 10 章 黏结稀土永磁材料的原理制备工艺技术	161
10.1 黏结稀土永磁材料的特点	161
10.2 黏结稀土永磁材料的分类	161
10.3 黏结稀土永磁体的制备工艺技术	162
10.4 黏结稀土永磁材料的磁性能	163
10.5 黏结稀土永磁材料的应用	164

参考文献	164
参考书目	165
第 11 章 HDDR 法制备稀土永磁材料的原理与工艺技术	166
11.1 制备原理	166
11.2 制备工艺	167
11.2.1 制备各向同性钕-铁-硼磁粉的 HDDR 工艺	167
11.2.2 制备各向异性的钕-铁-硼黏结磁粉 HDDR 工艺	169
11.2.3 $\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{66}\text{Co}_{12}\text{B}_7$ 各向异性永磁材料的 HDDR 工艺技术	171
11.2.4 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ 型合金的不同含量 Sm 补偿及 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$ 的 HDDR 工艺技术	174
参考文献	175
参考书目	175
第 12 章 稀土永磁材料粉末的机械合金化制备工艺技术	176
12.1 机械合金化高温合金	176
12.2 机械合金化制备工艺技术	176
12.2.1 机械合金化制备各向同性 Sm-Fe-N 粉末	177
12.2.2 机械合金化 $\text{Sm}_x\text{Fe}_{85-x}\text{V}_{15}$ 合金的结构和磁性	178
参考文献	180
参考书目	180
第 13 章 双合金法制造烧结稀土铁基永磁材料	181
13.1 双合金法制备烧结稀土永磁材料的制备原理	181
13.2 双合金法制造烧结稀土铁基永磁材料的工艺技术	182
参考文献	183
参考书目	184
第 14 章 稀土铁系间隙化合物永磁材料	185
14.1 稀土铁系间隙化合物永磁材料的发展	185
14.2 ThMn_{12} 晶体结构	185
14.3 $\text{R}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$ 间隙化合物的结构	188
14.4 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{C}_x$ 间隙化合物永磁材料	190
14.5 $\text{Sm}_2(\text{Fe}, \text{M})_{17}\text{N}_x$ 磁粉的制备方法	192
14.6 合金元素	193

参考文献	194
参考书目	195
第 15 章 稀土钴永磁材料	197
15.1 稀土钴永磁材料的种类、品种和磁性	197
15.2 RCo ₅ 永磁材料的制造工艺技术	202
15.2.1 粉末冶金法	202
15.2.2 还原扩散法	205
15.3 PrCo ₅ 永磁材料	207
15.3.1 Cr ₂ O ₃ 的添加对烧结 PrCo ₅ 磁性能的影响	208
15.4 (SmPr)Co ₅ 永磁材料	209
15.5 MMCo ₅ 永磁材料	211
15.6 (SmHR)Co ₅ 永磁材料	211
15.7 Ce(Co,Cu,Fe) ₅ 永磁材料	211
15.8 第一代稀土永磁材料研究中的新进展	212
15.8.1 重稀土-钴系合金的相变	212
15.8.2 SmCo ₅ 化合物的价电子结构与磁性的关系	214
15.8.3 SmCo ₅ 永磁合金高温相变与磁性	214
参考文献	215
参考书目	216
第 16 章 第二代稀土永磁材料 2 : 17 型稀土钴永磁材料	217
16.1 2 : 17 型稀土钴永磁材料的发展和钐-钴-铜系永磁材料	217
16.2 钐-钴-铜-铁系永磁材料	219
16.3 钐-钴-铜-铁-金属系——(2 : 17 型 Sm-Co) 永磁材料	221
16.3.1 钐-钴-铜-铁-金属系永磁材料的种类和性质	221
16.3.2 钐-钴-铜-铁-金属系(2 : 17 型永磁材料)的成分	221
16.3.3 Sm(Co, Cu, Fe, Zr) _Z 永磁材料成分与高温相及其结构	224
16.4 2 : 17 型 Sm-Co 合金液相烧结工艺、显微组织与磁性	224
16.4.1 2 : 17 型 Sm-Co 合金液相烧结工艺	224
16.4.2 Sm(Co, Cu, Fe, Zr) _Z (7 ≤ Z ≤ 8.5) 永磁材料的显微组织形成机制	228
16.5 沉淀硬化 2 : 17 型 Sm-Co 永磁材料的矫顽力机理	230
16.6 低温度系数的 2 : 17 型 Sm-Co 永磁材料	240
16.7 重稀土-过渡金属化合物的亚铁磁性	242
16.8 Sm ₂ (Fe, Ga, Si, Cu) ₁₇ C _Y 化合物的磁晶各向异性和矫顽力	245