



2014—2015

稀土科学技术 学科发展报告

REPORT ON ADVANCES IN RARE
EARTH SCIENCE AND TECHNOLOGY

中国科学技术协会 主编 中国稀土学会 编著

 中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

2014—2015

稀土科学技术 学科发展报告

REPORT ON ADVANCES IN
RARE EARTH SCIENCE AND TECHNOLOGY

中国科学技术协会 主编
中国稀土学会 编著

中国科学技术出版社
· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

2014—2015 稀土科学技术学科发展报告 / 中国科学技术协会主编; 中国稀土学会编著. —北京: 中国科学技术出版社, 2016.2

(中国科协学科发展研究系列报告)

ISBN 978-7-5046-7096-0

I. ① 2… II. ① 中… ② 中… III. ① 稀土族—学科发展—研究报告—中国—2014—2015 IV. ① O614.33-12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 025817 号

策划编辑	吕建华 许 慧
责任编辑	高立波
装帧设计	中文天地
责任校对	刘洪岩
责任印制	张建农

出 版	中国科学技术出版社
发 行	科学普及出版社发行部
地 址	北京市海淀区中关村南大街16号
邮 编	100081
发行电话	010-62103130
传 真	010-62179148
网 址	http://www.cspbooks.com.cn

开 本	787mm × 1092mm 1/16
字 数	429千字
印 张	19.75
版 次	2016年4月第1版
印 次	2016年4月第1次印刷
印 刷	北京盛通印刷股份有限公司
书 号	ISBN 978-7-5046-7096-0 / O · 186
定 价	80.00元

(凡购买本社图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换)



2014—2015 稀土科学技术学科发展报告

首席科学家 李 卫

专 家 组

组 长 林东鲁

成 员 (按姓氏笔画排序)

干 勇	牛京考	卞祖强	方以坤	古宏伟
左铁镛	龙志奇	卢冠忠	朱明刚	任国浩
庄卫东	刘荣辉	闫阿儒	闫慧忠	严纯华
李 卫	李永绣	李发伸	李星国	李振民
李维民	杨金波	肖方明	吴晓东	沈保根
张安文	张志东	张志宏	张国成	张洪杰
岳 明	周 栋	孟 健	赵栋梁	胡凤霞
胡伯平	洪广言	都有为	徐怡庄	高学绪
郭 耘	黄小卫	黄焦宏	屠海令	蒋成保
蒋利军	潘裕柏			

学术秘书 张 莉 李振民 刘一力 方以坤

党的十八届五中全会提出要发挥科技创新在全面创新中的引领作用，推动战略前沿领域创新突破，为经济社会发展提供持久动力。国家“十三五”规划也对科技创新进行了战略部署。

要在科技创新中赢得先机，明确科技发展的重点领域和方向，培育具有竞争新优势的战略支点和突破口十分重要。从2006年开始，中国科协所属全国学会发挥自身优势，聚集全国高质量学术资源和优秀人才队伍，持续开展学科发展研究，通过对相关学科在发展态势、学术影响、代表性成果、国际合作、人才队伍建设等方面的最新进展的梳理和分析以及与国外相关学科的比较，总结学科研究热点与重要进展，提出各学科领域的发展趋势和发展策略，引导学科结构优化调整，推动完善学科布局，促进学科交叉融合和均衡发展。至2013年，共有104个全国学会开展了186项学科发展研究，编辑出版系列学科发展报告186卷，先后有1.8万名专家学者参与了学科发展研讨，有7000余位专家执笔撰写学科发展报告。学科发展研究逐步得到国内外科学界的广泛关注，得到国家有关决策部门的高度重视，为国家超前规划科技创新战略布局、抢占科技发展制高点提供了重要参考。

2014年，中国科协组织33个全国学会，分别就其相关学科或领域的发展状况进行系统研究，编写了33卷学科发展报告（2014—2015）以及1卷学科发展报告综合卷。从本次出版的学科发展报告可以看出，近几年来，我国在基础研究、应用研究和交叉学科研究方面取得了突出性的科研成果，国家科研投入不断增加，科研队伍不断优化和成长，学科结构正在逐步改善，学科的国际合作与交流加强，科技实力和水平不断提升。同时本次学科发展报告也揭示出我国学科发展存在一些问题，包括基础研究薄弱，缺乏重大原创性科研成果；公众理解科学程度不够，给科学决策和学科建设带来负面影响；科研成果转化存在体制机制障碍，创新资源配置碎片化和效率不高；学科制度的设计不能很好地满足学科多样性发展的需求；等等。急切需要从人才、经费、制度、平台、机制等多方面采取措施加以改善，以推动学科建设和科学研究的持续发展。

中国科协所属全国学会是我国科技团体的中坚力量，学科类别齐全，学术资源丰富，汇聚了跨学科、跨行业、跨地域的高层次科技人才。近年来，中国科协通过组织全国学会

开展学科发展研究，逐步形成了相对稳定的研究、编撰和服务管理团队，具有开展学科发展研究的组织和人才优势。2014—2015 学科发展研究报告凝聚着 1200 多位专家学者的心血。在这里我衷心感谢各有关学会的大力支持，衷心感谢各学科专家的积极参与，衷心感谢付出辛勤劳动的全体人员！同时希望中国科协及其所属全国学会紧紧围绕科技创新要求和国家经济社会发展需要，坚持不懈地开展学科研究，继续提高学科发展报告的质量，建立起我国学科发展研究的支撑体系，出成果、出思想、出人才，为我国科技创新夯实基础。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '李锐' (Li Rui), written in a cursive style.

2016 年 3 月

稀土元素由于其原子结构的特殊性而具有优异的光、电、磁、热等特性，可用于制备许多高新技术新材料，被科学家称为“21 世纪新材料的宝库”。稀土元素广泛应用于国民经济和国防工业的各个领域，对改造提升石化、冶金、玻璃、陶瓷、纺织等传统产业以及培育发展新能源、新材料、新能源汽车、节能环保、高端装备、高端新型电子信息等战略新兴产业起着重要的作用。

稀土产业是中国的优势产业。经过多年发展，中国在稀土开采、冶炼分离和应用技术研发等方面取得了很大进步，产业规模不断扩大。中国稀土产业已取得了“四个世界第一”：资源量世界第一、生产规模世界第一、消费量世界第一、出口量世界第一。中国稀土分离工艺取得了举世瞩目的成就，溶剂萃取分离技术达到国际领先水平。但是，中国稀土产业在核心专利拥有量、高端装备、高附加值产品、高新技术领域应用等方面与国外尚有差距。

为了全面了解和掌握稀土科学技术学科发展最新进展，提升中国稀土科技的原始创新能力，促进稀土科学技术学科与相关学科的交叉融合，在中国科学技术协会组织领导下，中国稀土学会承担了《2014—2015 稀土科学技术学科发展报告》的撰写工作。

中国稀土学会成立了以钢铁研究总院李卫教授为首席科学家的专家组，组织各学科专业委员会专家，设立 12 个专题研究小组，在收集资料、调查研究和充分掌握信息的基础上，经过多次研讨和修改，并征求了行业内多位专家的意见，最终形成本报告。

在编写过程中，我们力图站在学科前沿和国家战略需求的高度，比较分析稀土科学技术学科的国内外研究动态、前沿和发展趋势；对近 5 年来产生的主要新观点、新理论、新方法和新技术进展及成果进行了评述；对未来发展的优先问题、发展方向和对策提出了展望和建议。

本书是中国稀土学会第一次组织编写的学科发展报告，由于稀土科学技术涉及面广，内容多，同时受到篇幅和时间的限制，很难涵盖稀土学科发展的全部内容，可能存在一些疏漏，研究深度和广度有待进一步提高，敬请广大读者批评指正。

序 / 韩启德
前言 / 中国稀土学会

综合报告

稀土科学技术学科研究进展和发展趋势 / 3

- 一、引言 / 3
 - 二、近些年的最新研究进展 / 4
 - 三、国内外研究进展比较 / 21
 - 四、发展趋势及展望 / 27
- 参考文献 / 30

专题报告

稀土冶炼分离技术研究 / 37
稀土永磁材料研究 / 49
特种稀土磁性材料研究 / 67
稀土催化材料研究 / 94
稀土储氢材料研究 / 126
稀土发光材料研究 / 152
稀土超导材料研究 / 170
稀土晶体材料研究 / 191
稀土在钢铁及有色金属中的应用研究 / 213
稀土高分子助剂研究 / 224
稀土玻璃材料研究 / 237
稀土陶瓷材料研究 / 259

ABSTRACTS IN ENGLISH

Comprehensive Report / 285

Advances in Rare Earth Science and Technology / 285

Reports on Special Topics / 290

Advances in Rare Earth Separation and Purification / 290

Advances in Rare Earth Permanent Magnetic Materials / 291

Advances in Other Rare Earth Magnetic Materials / 292

Advances in Rare Earth Catalytic Materials / 293

Advances in Rare Earth Hydrogen Storage Material / 294

Advances in Rare Earth Luminescent Materials / 296

Advances in Rare Earth Superconductors / 298

Advances in Rare Earth Crystals / 298

Advances in Applications of Rare Earth in Steel, Iron and Nonferrous Metals / 299

Advances in Rare Earth Polymer Additives / 300

Advances in Rare Earth Glass / 300

Advances in Rare Earth Ceramics Materials / 301

索引 / 302

综合报告



稀土科学技术学科研究 进展和发展趋势

一、引言

化学元素周期表中镧系元素——镧(La)、铈(Ce)、镨(Pr)、钕(Nd)、钷(Pm)、钐(Sm)、铕(Eu)、钆(Gd)、铽(Tb)、镝(Dy)、钬(Ho)、铒(Er)、铥(Tm)、镱(Yb)、镱(Lu)以及与镧系的15个元素同族的元素——钇(Y)和钪(Sc)共17种元素,称为稀土元素(rare earth)。稀土元素因其自身独特的电子结构而赋予其优异的电、光、磁、热性能,可以与其他材料形成性能各异、品种繁多的新型功能材料(图1),并大幅度的提高其他产品的性能和质量,尤其是在稀土永磁材料中的应用已占到30%左右,已超出工业“黄金”和“维生素”的概念,被世界各国视为战略性资源。在中央和各级政府的持续支持下,经过全国稀土科技和产业界近60年的共同努力,中国稀土工业已实现了从资源大国到生产大国的第一次跨越,成为世界上稀土产品产量与消费量最多的国家,在国际稀土贸易中的份额占95%以上。伴随着稀土产业的发展,稀土科学技术得到了长足的进步,部分技术已达到或超过世界先进水平,引领相关行业或产业的进步。

本学科发展报告旨在回顾、总结和科学评价2011—2015年中国稀土科学技术学科的重要发展和成果,着重介绍中国学者在稀土冶炼分离技术、稀土永磁材料、特种稀土磁性材料、稀土催化材料,稀土储氢材料、稀土发光材料、稀土超导材料、稀土晶体材料、稀土在钢铁及有色金属中的应用、稀土助剂、稀土玻璃、稀土陶瓷材料等方面所获得的重要成果和进展,与国际相关领域发展水平的比较,以及对本学科发展的趋势及展望。

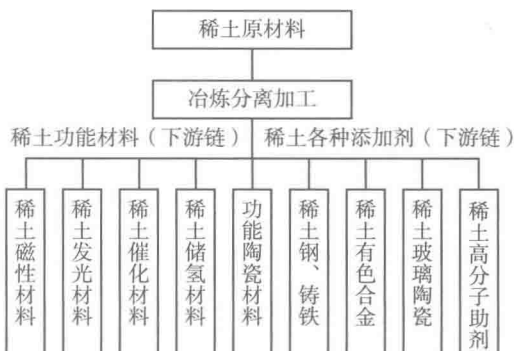


图 1 稀土产业链结构图

二、近些年的最新研究进展

(一) 稀土冶炼分离技术

目前, 中国稀土冶炼分离能力达到 400000t-REO/a 以上, 稀土年产量为 100000t-REO 左右, 占世界总产量的 90% 以上, 其中 80% 左右的稀土产品在国内应用^[1, 2]。由于稀土冶炼分离过程酸碱等化工原料消耗高, 产生大量的“三废”, 单纯通过末端治理将给企业带来沉重负担, 加之部分生产企业环保设施不健全, 稀土冶炼分离企业面临较大的环保压力。在稀土行业面临严峻挑战的国际和国内大背景下, 稀土冶炼分离技术的发展又面临新的挑战, 发展稀土绿色分离化学与冶炼分离工业应用技术是解决中国稀土资源高效利用和环境污染, 巩固中国稀土国际地位的必经之路。

稀土冶炼分离技术主要有湿法冶炼分离技术和火法冶炼分离技术。在湿法冶金领域, 丰富和发展了复杂体系串级萃取理论及其应用^[3], 解决了复杂体系联动萃取最小萃取量计算方法, 建立多组分体系杂质梯度解析方法, 通过极限条件下取消进料级组成假设, 得到了多组分复杂分离体系的最小萃取量与最小洗涤量公式; 开发成功萃取法制备超高纯稀土氧化物新技术^[4, 5], 实现了稀土杂质与非稀土杂质的有效控制, 建成 100t/a 超纯稀土氧化物生产线, 稳定生产出 5N 以上纯度的氧化镧、氧化钪、氧化铽、氧化铈和氧化钇等产品, 其中非稀土杂质 $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 1\text{ppm}$ ($1\text{ppm}=1 \times 10^{-6}$), $\text{CaO} < 5\text{ppm}$, $\text{SiO}_2 < 5\text{ppm}$; 开发了一种制备相对纯度大于 5N, 绝对纯度达到 4N 的高纯氧化钪的方法^[6], 将钪从 0.05% 降到了 0.95ppm, 铈从 0.2% 降到了 1.25ppm。

针对稀土分离过程存在的氨氮废水污染问题, 利用酸性磷类萃取剂协同萃取技术、萃取过程酸平衡技术、稀土浓度梯度调控技术等, 成功开发了“非皂化萃取分离稀土新工艺”, 从源头消除氨氮废水污染, 降低了生产和环保成本, 获得 2012 年度国家科学技术发明奖二等奖。针对高盐度废水排放问题, 为进一步实现化工试剂的循环利用, 开发了低碳低盐无氨氮萃取分离技术^[7-9], 以自然界丰富的廉价钙镁碱性化合物处理冶炼分离过程

产生的含镁废水，再利用回收的 CO_2 进行连续碳化制备高纯碳酸氢镁溶液，代替液铵、液碱和碳酸氢铵应用于稀土溶剂萃取分离提纯及沉淀富集稀土等，消除了氨氮废水产生；将稀土萃取和沉淀焙烧过程产生的 CO_2 气体进行有效回收，应用于碳化制备碳酸氢镁溶液，实现了 CO_2 循环利用和低碳排放；萃取分离和沉淀过程中产生的氯化镁废水循环用于制备碳酸氢镁溶液，实现镁的循环再利用和低盐排放，节省了高盐废水处理费用，运行成本大幅降低。

在火法冶炼分离技术方面，开展了超高纯稀土金属制备技术研究并取得重大突破，丰富和完善了工程化的稀土金属提纯手段；通过集成创新开发出 3 套超高纯稀土金属高效制备和提纯工艺技术，设计开发了多台套超高真空和高真空的稀土金属提纯装备，获得 10 多种绝对纯度大于 4N 的超高纯稀土金属（包括 C、S、N、O 气体在内的 70 多种杂质总含量小于 100ppm）。

（二）稀土永磁材料

稀土永磁材料已成为中国稀土应用领域中发展最快和最大产业，在高性能烧结磁体永磁材料的产业化关键技术突破方面取得了多项核心自主知识产权，材料的综合性能稳中有升，具备了生产高牌号烧结钕铁硼磁体的能力，产品的部分性能达到世界先进水平。近年来，稀土永磁在块体材料、纳米颗粒、磁性薄膜和稀土磁体回收技术方面取得了很大的进步。

在“十五”至“十二五”期间，针对千吨级高性能钕铁硼生产线中存在的共性问题，在企业的积极参与和不懈努力下，高性能烧结钕铁硼突破了“双合金”、细粉制备、“速凝工艺+双（永磁）主相”、自动成型、连续烧结、低氧工艺、晶界扩散、表面防护等关键工艺技术，使中国高性能烧结钕铁硼永磁材料的产业化水平基本与日本、德国相当，处于国际先进水平。

《稀土永磁产业技术升级与集成创新》获得国家科技进步奖二等奖。项目在高性能磁性机理和新型 Ce 永磁材料探索方面取得突破，新型 Ce 永磁材料的研究成功将重塑应用量最大的中、低端稀土永磁市场，已成为高丰度稀土元素在永磁材料中应用的成功范例。“钕铁硼晶界组织重构及低成本高性能磁体生产关键技术”获 2013 年度国家技术发明奖二等奖。该项目通过改变传统生产工艺中自然形成的晶界富钕相成分，研发出具有不同性能特点的新晶界相钕铁硼材料。

在低（无）重稀土永磁材料研究方面，中国在通过晶界扩散、细化晶粒、双液相、添加稀土氢氧化物和双永磁主相等工艺方面进行了大量工作，许多科研院所、大学和企业，采用不同技术方法，使钕进入主相和晶界相的界面层，通过取代钕的晶位，增强硬磁性，抑制反磁化畴形核。并通过对磁体微观组织结构的控制，降低磁体的不可逆损失，改善退磁曲线的方形度，获得低温度系数。实验室已经气流磨粉粒度降低至 $2\mu\text{m}$ 左右，磁体晶粒度为 $5 \sim 6\mu\text{m}$ ，使重稀土含量降低，同时，明显降低矫顽力温度系数。最近日本发展出了

无压处理 (pressless process, PLP) 的工艺^[10, 11], 通过将气流磨制备的 $2\mu\text{m}$ 左右的磁粉经过该工艺后, 制备出矫顽力为 16.84kOe , 而磁能积仍保持 50MGOe 的无镨钕铁硼磁体, 相当于降低了同类磁体 $20\% \sim 30\%$ 的重稀土用量。

在各向异性黏结稀土永磁材料研究方面, 重点研究和开发了各向异性 R-Fe-N (R=Nd, Sm) 和 R-Fe-B (R=Nd, Pr) 黏结永磁材料, 阐明了间隙原子效应提高 R-Fe 材料磁性的物理根源, 提出了制备无缺陷单晶颗粒型各向异性永磁 R-Fe-N 磁粉的技术路线, 开发出了高性能各向异性 R-Fe-N 磁性材料和磁体的产业化关键技术和设备, 并建成了百吨级生产线。发现了织构型 HDDR (hydrogenation disproportionation desorption recombination) Nd-Fe-B 永磁粉形成的关键机制及其实现高矫顽力的方法, 成功实现高性能 HDDR (Pr, Nd)₂Fe₁₄B 磁粉和高温度稳定性磁粉的稳定制备。研究了单相磁体和杂化磁体制备技术, 制备了高性能的各向异性黏结磁体, 为未来实现各向异性磁体大规模的生产进行了积极的探索。

在纳米晶永磁材料研制方面, 研制出的各向异性纳米晶钕铁硼永磁经中国计量科学研究院测量, 最大磁能积达到了 53.67MGOe ^[12], 这是经由第三方权威专业测试机构测试给出的纳米晶永磁体的最高性能。由国内多家单位共同承担的国家“863”重大项目课题“热压稀土永磁体规模化制备关键技术”, 成功地解决了热变形磁体的均匀性和开裂问题, 大幅提高了磁体的磁能积以及制备效率, 建立了年产 10 万件辐射取向永磁环的产业化示范线。2011 年, 首次采用大形变率 ($>85\%$) 的热压/热流变方法, 制备出具有强烈磁各向异性的 SmCo₅ 纳米晶永磁体, 其磁能积较各向同性的热压磁体提高了 176% ^[13]。双相复合纳米晶稀土永磁块状磁体的研究在近年来也取得了较好进展, 主要体现在一些新技术的应用。科研人员以贫 Nd 的钕铁硼非晶合金为原料, 通过大形变率的热流变技术制备出全致密各向异性 $\alpha\text{-Fe/Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 双相复合纳米晶磁体^[14]。

利用一种以“自上而下”方式将微米级的颗粒破碎至纳米颗粒的新制备技术。在优化的制备工艺下, 制备的纳米片材料兼具强磁各向异性和高矫顽力 (最高 17.7kOe), 显示出优异的永磁特性, 还发展了低温 ($< -80^\circ\text{C}$) 表面活性剂辅助球磨制备稀土永磁纳米颗粒的方法, 发现低温有利于纳米颗粒形成量提高, 所制备的颗粒矫顽力大幅度提高^[15]。

作为磁性微机电系统的核心器件, 永磁薄膜的研究受到广泛的关注。目前稀土永磁薄膜材料的研究中居于主导地位的是各向异性软硬磁双相复合纳米永磁薄膜。采用磁控溅射的方法制备了 Nd₂Fe₁₄B/Ta/Fe₆₇Co₃₃/Ta 多层膜, 其磁能积达到 61MGOe , 是目前报道的永磁材料的最高值^[16]。稀土永磁薄膜研究的另一热点是针对单相 (Nd₂Fe₁₄B、SmCo₅ 等) 薄膜的矫顽力提升和磁硬化机理的研究。中科院金属所则研究了 Dy 的晶界扩散对于单相钕铁硼永磁薄膜矫顽力的影响, 研究发现 Dy 扩散到晶粒边界层, 形成 (Nd, Dy)₂Fe₁₄B 相, 磁体的矫顽力因此提高了 61% ^[17]。

在稀土永磁回收利用技术方面, 回收方案的选择取决于磁体的组分和杂质的含量水平。采用短循环的话, 磁体的性能会有所降低, 化学提纯的方法可得到高品质的磁体, 可

是成本和周期会大大加长。而对于高氧含量的废旧 NdFeB，可行的办法是重新熔炼除氧。

(三) 特种稀土磁性材料

1. 稀土磁致冷材料

磁热效应是磁性材料的内禀性能，通过磁场与磁次晶格的耦合而感生。研究磁熵变、磁热效应除了对基本磁学问题的研究有重要理论意义之外，对于利用大磁热材料作为制冷工质来获得磁制冷应用也具有重要的实际意义。由于具有优越的应用前景，磁制冷技术除了超低温区应用之外，中、低温乃至室温区磁制冷材料和技术的研究也已经引起人们的极大关注。磁热效应和材料已成为磁性物理、材料物理的研究热点。近些年来全球发现的几类室温区巨磁热材料大大推动了室温磁制冷技术的发展。2015年1月，中国在美国举行的国际家电展（international consumer electronics show, CES, USA）上展出全球首台磁制冷酒柜，引起轰动，标志着磁制冷技术进入家庭、实现广普应用的可能性。

中、低温区是液氦、液氢和液氮制备的重要温区，在相关温区具有磁有序相变的材料一直是人们关注的研究对象。目前报道了多种在中、低温区具有巨磁热效应的重稀土金属间化合物，典型有： RAI_2 （ $R=Er, Ho, Dy, Gd, Pd$ ）； RCo_2 、 RNi_2 （ $R=Gd, Dy, Ho, Er$ ）； RNi （ $R=Gd, Ho, Er$ ）； $RNiAl$ 、 $RCoAl$ 、 $RCuAl$ （ $R=Tb, Dy, Ho$ ）。其中，具有Laves相的 RCo_2 ，特别是 $ErCo_2$ ，由于费米能级附近特殊的能带结构表现出丰富的磁相互作用从而呈现显著的磁热效应，是低温区最受瞩目的磁制冷材料之一。

室温磁热效应材料由于广普的磁制冷应用受到人们更多的关注。过去10多年时间发现的几类新型室温巨磁热材料体系大大推动了室温磁制冷技术的进展。这些材料包括 $Gd-Si-Ge$ ^[18]、 $LaCaMnO_3$ ^[19]、 $Ni-Mn-(Ga, In, Sn)$ ^[20]、 $La(Fe, Si)_{13}$ 基化合物^[21, 22]、 $FeRh$ 化合物^[23]、 $MnAs$ 基化合物^[24, 25]等，其共同特点是磁热效应均大幅超过传统材料 Gd ，相变性质为一级，并且多数呈现强烈的磁晶耦合和磁弹效应，磁相变伴随显著的晶体结构相变的发生和大的体积变化效应。在已发现的几类新型室温磁制冷材料中， $La(Fe, Si)_{13}$ 基化合物由于原材料价格低廉、无毒、易制备、对原材料纯度要求不高等特点^[26]受到人们更多关注，被国际同行公认为是最具应用前景的室温区磁制冷材料。 $La(Fe, Si)_{13}$ 基化合物的相变性质、制冷温区随组分宽温区可调（50 ~ 450K），多数组分的熵变幅度大幅超过 Gd 。

无论是室温或低温磁制冷材料，要制作成为主动或被动式磁制冷工作床，都需要经历规模化和稳定化制备、切割、加工成型、磁性与非磁性测试的这一流程。近年来，国内外学者在开发新材料体系的同时，也在加紧部署和实施磁制冷材料加工的战略路线，正是这个关键环节突破推进了磁制冷样机的发展。

2. 稀土微波磁性材料

在稀土微波磁性材料研究方面，中国科学工作者首先从理论上分析了通过超越斯诺

克极限,可同时提高材料的微波磁导率并将材料的自然共振频率控制在 5 ~ 20GHz 范围;指出:具有易面(易平面,易锥面)各向异性的稀土磁性材料可以开发成为新型的稀土微波磁性材料。在此基础上,做了大量的实验工作,制备了几类不同晶体结构的易面型稀土微波磁性材料,并用于微波吸收和抗电磁干扰,取得了很好的效果。

阐述了描述磁性材料高频磁性的双各向异性模型,并指出:双各向异性模型可以指导我们开发在高频下具有高磁导率的新型磁性材料,例如平面型稀土-3d 金属间化合物^[27]。用第一性原理计算分析了 NdCo₅ 的磁晶各向异性。用轨道磁矩的各向异性及其与点阵几何的关联解释了 NdCo₅ 平面磁各向异性的微观起源^[28,29]。R₂Fe₁₇N_{3-δ} (R=Ce,Pr,Nd) 的制备,电磁特性及微波吸收应用研究等^[30-37]。

3. 稀土超磁致伸缩材料

磁致伸缩材料是智能材料的一种,其长度和体积会随磁化状态的改变而发生变化,从而实现电磁能和机械能的相互转换,在换能、致动、传感等领域有重要应用。新型稀土超磁致伸缩材料以其高磁致伸缩性能、转换效率高、响应速度快等优点而广受关注。有关稀土超磁致伸缩材料的研究,包括磁致伸缩机理^[38]、材料制备技术^[39]、新的合金体系^[40]以及应用进展等,开展了大量的研究工作。例如,磁场凝固和磁场热处理对稀土超磁致伸缩合金块体的技术处理,以提高磁致伸缩性能;稀土超磁致伸缩薄膜材料是采用闪蒸、粒子束溅射、直流溅射、射频磁控溅射等方法在基片上进行镀膜,主要用于开发微型功能材料器件;用轻稀土 Nd 代替重稀土铽和镱来降低磁晶各向异性提高材料的磁致伸缩性能。

(四) 稀土催化材料

国际上对稀土催化剂的研究始于 20 世纪 60 年代中期,经过 40 多年的积累,对稀土的催化作用有了较深入的认识。大量的研究表明,稀土与其他组分之间可产生协同作用,而显著提高催化剂的性能。目前稀土元素特别是镧、铈等,已在石油加工、天然气等的催化燃烧、机动车尾气和有毒有害气体的净化、碳一化工、燃料电池(固体氧化物燃料电池)、烯烃聚合等诸多重要过程中得到广泛的应用^[41,42]。催化裂化(fluid catalytic cracking, FCC)是石油炼制最关键的一步。在 60 年代初期,稀土交换的 Y 型分子筛(RE-Y)代替了无定型硅铝催化剂,使汽油产率提高超过 10%,被誉为石油工业的革命。研究表明,在分子筛中引入稀土不仅可通过调节酸性位酸量和酸强度的分布,来改善催化剂的活性,调节产物的分布,同时稀土的引入还可增强分子筛的骨架稳定性。目前催化裂化技术的发展趋势有催化裂化新工艺的开发;针对不同原料油开发裂化产品的精细化控制技术以满足市场多变、灵活的需要;高效、低污染物排放的裂化技术等以及与此相对应的多组元催化剂的设计与制备工艺、新型基质材料和助剂的制备和工业应用等。

中国催化裂化催化剂的发展经历了跟踪、模仿、二次创新、技术创新等阶段,1987—1990 年,国内开发的超稳 Y 型催化剂与国外催化剂处于同等水平,但从 1996—1997 年以后,国产新催化剂性能明显优于国外同时代的新产品。由于国产催化剂许多是根据各炼油