

今日材料所

NIMTE TODAY

2022
NO.

05-06

2022 No. 05-06 今日材料所 NIMTE TODAY

稀土永磁：推动科技进步 创造美好生活

 **CNITECH**
中国科学院宁波材料技术与工程研究所

如需订阅，请联系：
中国科学院宁波材料技术与工程研究所 王雪珍，孟丽
地址：中国浙江省宁波市镇海区中官西路 1219 号 邮编：315201
电话：0574-86685563 传真：0574-87910728
邮箱：wangxzh@nimte.ac.cn

前言

随着时代的进步和社会的快速发展，稀土永磁材料在新能源汽车、磁悬浮列车、风力发电和节能家电等领域得到了广泛应用，稀土永磁材料的需求不断增长，同时对性能及稳定性提出了更高的要求；此外，高科技领域的发展对超高性能稀土永磁材料的依赖与日俱增。中科院宁波材料所稀土永磁材料联合创新中心在资源节约型高性能稀土永磁材料及其产业化关键制备技术和应用技术方面开展了大量的研发工作，针对我国稀土资源的特点，突破高端钕铁硼材料重稀土减量化技术并推向产业化，提升我国稀土永磁材料行业技术水平与产品的市场竞争力；开展高丰度稀土永磁材料产业化技术研发，推动高丰度稀土永磁体性能的提高及商业化应用，促进稀土资源的综合平衡利用；发展了系列高性能高稳定钴基永磁材料，解决了高精度惯性仪表用关键永磁材料的稳定性技术难题，满足高效节能电机、工业智能控制、节能家电和雷达通讯定位等高端应用需求，推动我国稀土永磁材料产业升级，为实现“碳达峰”、“碳中和”贡献力量。

目录

团队介绍	03	科研进展	15
团队概况		多尺度组织结构调控改善纳米晶钕铁硼永磁材料性能	
主要团队成员		尖端装备用高性能钕钴永磁材料产业化关键技术及应用	
		基于电控磁力技术的新型器件与装备研发	
		耐高温高稳定钴基永磁材料的研发和应用	
科研进展	09	特邀访谈	26
烧结钕铁硼重稀土集约化利用关键技术及应用		强磁推动科技进步	
高丰度稀土永磁关键制备技术及产业化应用			

团队介绍

团队概况

由中国工程院院士李卫领衔的中科院宁波材料所稀土永磁材料联合创新中心，是国际一流的稀土永磁材料专业研究机构，致力于汇聚国际高端人才，建成国家级稀土永磁材料研究及应用示范技术研发基地，打造世界最强的稀土磁性材料产业集群。目前，稀土永磁材料联合创新中心有研究人员 93 名，包括院士 1 名、研究员 / 正高级工程师 11 名、副研究员 / 高级工程师 10 名，助理研究员 / 工程师 / 高级助理 27 名、博士后 4 名、以及研究生 40 名，此外，中心还有高级客聘研究员 4 名。

稀土永磁材料联合创新中心先后承担国家“863”计划项目、国家重点研发计划、科技部国际合作项目、浙江省重点研发计划、浙江省尖兵研发攻关计划等国家省市重大科研项目，此外还承担了国内外知名企业委托开发项目，取得了一系列创新性成果，打破了国外先进企业在高性能 / 高稳定性稀土永磁材料产业技术

方面的垄断与封锁。中心重点针对新能源等领域对高性能永磁材料的需求，以提高稀土永磁材料的磁性能和稀土资源的综合平衡利用为出发点，开展产业化关键技术研发；基于矫顽力机理发展组织结构设计与精细调控技术，发展了晶粒壳层强化的复合结构磁体制备技术，解决了重稀土依赖型的高矫顽力和高磁能积的非兼容性难题，实现了重稀土高质化利用，开发出综合磁性能（磁能积 + 矫顽力）83 的超高性能稀土永磁材料，达到国际领先水平。相关成果获国家科技进步二等奖、中国专利优秀奖、北京市科技进步一等奖、中国稀土科学技术一等奖、新材料成果转化奖。开发的高性能烧结钕铁硼和钕钴永磁材料关键制备技术在宁波韵升、宁波松科、宁波科田、宁波同创、宁波科星等骨干企业成功实现产业转化，产品应用于汽车电机、轨道交通牵引电机、计算机硬盘音圈电机等领域，近三年新增产值约 50 亿元。

主要团队成员



李卫

中国工程院院士，主任，首席科学家

主要从事高性能稀土永磁新材料、产业化关键技术研发和创新工作，获得了低温度系数、高磁能积钕铁硼永磁材料，特殊取向稀土永磁环和新型钕永磁体等多项核心技术创新成果，率领团队为我国稀土永磁产业发展壮大做出了重要贡献。发表 SCI 收录论文 200 余篇，获国家授权发明专利 30 余项。先后荣获国家科技进步一等奖、二等奖、国家发明三等奖、中国工程院光华工程科技奖等 6 项国家级奖励。2015 年当选为中国工程院院士。



董生智

副主任，博士，研究员

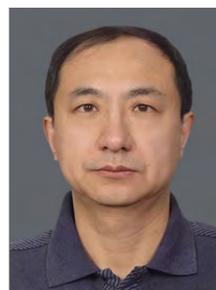
主要从事稀土永磁材料的结构、磁性能、温度特性、矫顽力机制以及磁体的制备技术研发，主持承担国家自然科学基金、国防科工委等十多项国家及部委级科研项目，在研制具有良好温度稳定性磁体方面取得了重大进展。曾就职于美国通用电气研发中心，成功参与了 GE 第一台永磁核磁共振磁体及第一台永磁风能电机的研制，发表学术论文 30 余篇，申请专利 10 余项，并多次受邀在国际国内学术会议上做专题报告。获冶金科技进步二等奖、北京市科技进步一等奖等多项奖励，2018 年起获国务院颁发的政府特殊津贴。



闫阿儒

常务副主任，博士，研究员

主要从事先进稀土永磁材料关键技术研究，重点针对稀土资源平衡利用、新能源与节能领域应用需求的先进稀土永磁材料产业化技术、新型稀土永磁材料关键技术等内容进行系统研究。发表 SCI 收录论文 240 余篇，申请发明专利 160 余项，已获得授权发明专利 94 项。承担国家“863”重大项目、科技部国际合作项目、国家重点研发计划、工信部工业强基、省市重大攻关，及国内外知名企业委托开发项目。获国家科技进步奖二等奖、稀土科学技术奖一等奖、新材料成果转化奖、中国产学研合作创新成果奖等多项奖励。



冯海波

副主任，博士，研究员

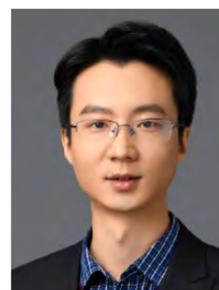
主要从事高性能稀土磁性材料制备关键技术和器件、材料的微观组织结构表征、性能与结构的关联与控制等研究，开发了速凝带微结构控制、双主相法制备高丰度新型含钕磁体等产业化技术，研发的高磁能积高均匀性磁体、低膨胀低温度系数永磁体和特种永磁体及器件已成功应用于多个装备和型号。发表学术论文 30 余篇，获国家发明专利 20 余项。获国家科技进步二等奖和冶金科技进步一等奖，入选科技部中青年科技创新领军人才和国家高层次人才特殊支持计划。



陈仁杰

博士，研究员

主要从事烧结稀土永磁材料、热压 / 热变形稀土永磁材料的研究与产业化技术开发工作，在国内首次掌握了制备热压 / 热变形辐射取向 NdFeB 环形磁体的关键技术，填补了国内在此领域的空白。发表 SCI 收录论文 60 余篇，申请中国发明专利 11 项、国际发明专利 2 项。主持国家自然科学基金、中科院院地合作项目等多项研究课题，作为研究骨干参与国家“863”重点项目课题、科技部国际合作项目等国家、省部级科研项目 and 多项横向课题。获中国优秀专利奖、浙江省科技进步二等奖、宁波市科技进步一等奖等奖励 5 项。2013 年入选宁波市“4321 人才工程”，2019 年入选宁波市领军拔尖人才。



郭帅

博士，研究员

主要从事超高性能稀土永磁材料、高矫顽力稀土永磁材料矫顽力增强机制及重稀土减量化技术开发研究，高丰度稀土永磁材料产业化关键技术等多项成果在合作企业实现产业化。发表论文 70 余篇，申请发明专利 40 多项，参与编著专著一部。主持国家重点研发计划、工信部稀土专项、浙江省重点研发计划、国家自然科学基金及多项企业委托研发项目，担任中国材料研究学会青年工作委员会理事、《稀土》杂志青年编委。获得中国稀土科学技术一等奖、浙江省科技进步二等奖、中科院院地合作优秀产业化团队奖、宁波市科技进步一等奖等多项奖励。宁波市领军拔尖人才入选者。



夏卫星

博士，研究员

主要从事透射电镜原位表征手段、利用洛伦兹透射电镜技术表征稀土永磁材料的微观结构磁畴结构、研究矫顽力、温度稳定性等宏观性能的内在物理机制研究。参与完成自然科学基金重点项目、国家重点研发计划、中科院科研装备研制计划、浙江省科技创新团队等科研项目。在 Adv. Mater.、Acta Mater.、Appl. Phys. Lett.、Nano Lett.、Microscopy 等杂志发表 100 多篇学术论文，多次受邀在国际会议上作学术报告，获得授权发明专利 10 余件，培养研究生 30 余名。宁波市海外高层次人才入选者。



刘壮

博士，研究员

主要从事烧结钕钴永磁材料的制备、微结构、内禀磁特性和矫顽力机制的研究及产业化技术研发，开发出具有国际先进水平的高性能、耐高温、高稳定性钕钴永磁材料及其产业技术。发表论文 30 余篇，申请中国发明专利 15 项，授权发明专利 9 项，其中包括 2 项国际 PCT 专利，参与撰写专著 2 部。主持国家重点研发计划课题、浙江省重点研发计划，宁波市 2025 专项等各类重大项目 10 余项，参与完成国家“863”计划、科技部重大国际合作等重大项目。入选中国材料学会青年工作委员会理事，中国稀土期刊青年编委。获得宁波市科技进步一等奖 2 项、中科院院地合作奖 1 项。宁波市领军拔尖人才入选者。



丁勇

博士，正高级工程师

主要从事超高性能稀土永磁材料研究和产业化工作，承担国家重点研发计划等项目研发。发表论文 20 篇，授权发明专利 14 项，PCT 专利 3 项，合著著作 1 部。获浙江省科技进步二等奖 2 项、浙江省科技进步三等奖 1 项、中国优秀专利奖 2 项、浙江省专利金奖 1 项、宁波市科学技术一等奖 4 项。获得宁波市科技局认定的技术成果 4 项、中科院院长优秀奖、中国产学研合作创新奖、2018 年度宁波市青年材料科学家奖、2019 年度宁波“十大最美青匠”称号。受聘于 CSTM 稀土领域专家委员、电动汽车电驱动系统专家委员，2021 年受聘浙江高端人才青委会专家委员。



孙颖莉

硕士，正高级工程师

主要从事耐高温、高稳定性烧结 SmCo 稀土永磁材料和高性能铝镍钴永磁材料的研究和开发，带领团队开发的高性能高稳定性铝镍钴永磁材料和超低温系数钕钴永磁材料已应用于多种型号装备中，在永磁材料的磁性检测方面积累了丰富经验，先后为用户企业研制开发了两套温度系数检测装置。电工合金标委会专家委员，负责起草并颁布了磁性材料国家检测标准 2 项，永磁材料所级检测标准 3 项。发表核心期刊论文 11 篇，申请国家发明专利 17 项。先后主持了中科院创新基金、地方省市和企业委托等多项研发项目，获得宁波市科技进步一等奖 2 项。

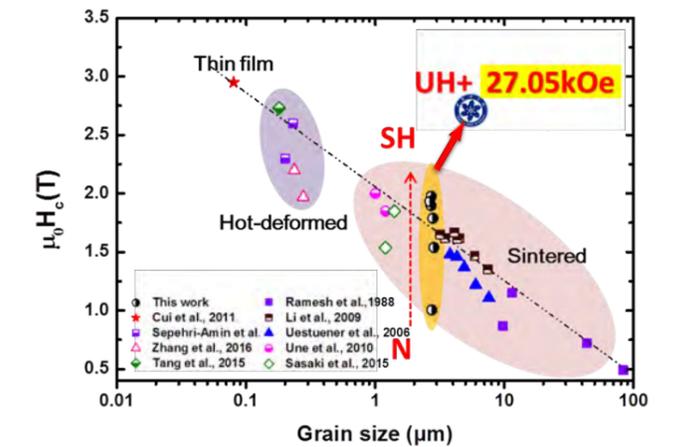
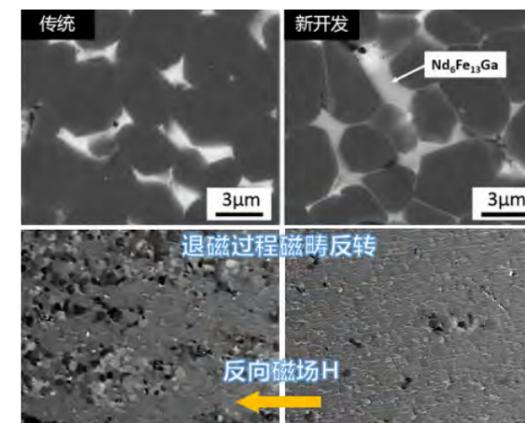
科研进展

烧结钕铁硼重稀土集约化利用关键技术及应用

烧结钕铁硼作为第三代稀土永磁材料，兼具高矫顽力与高剩磁特性，其开发和应用体现了我国战略新兴产业领域的重大发展需求方向，是我国高技术产业的发展重点之一。近年来，随着电子信息、汽车、新能源、轨道交通等领域的技术进步，对烧结钕铁硼永磁材料提出了更高的技术要求，高性能烧结钕铁硼材料已成为国家实施节能减排、碳达峰碳中和发展战略的关键材料之一。昂贵稀缺的重稀土元素（镝和铽）以其形成的永磁相具有高的抗退磁和耐高温能力，在稀土永磁材料特别是耐高温高矫顽力稀土永磁材料中起到关键的作用，其带来

的弊端是最大磁能积的急剧恶化及成本的增加。随着实际应用对低成本高矫顽力高稳定性磁体需求的增加，重稀土高质化利用技术迅速成为研究和产业需求的重点，打破高端稀土永磁材料对重稀土的依赖对推动稀土资源集约化利用具有重要意义。

中科院宁波材料所稀土永磁材料联合创新中心围绕稀土永磁高效、均衡、高质化利用的核心科学与技术问题开展全链条创新研究。近年来，团队基于对烧结钕铁硼材料稳定性关键影响因素的认识，从材料组织结构与磁体综合性能依赖关系出发，澄清晶粒尺寸、晶界相分

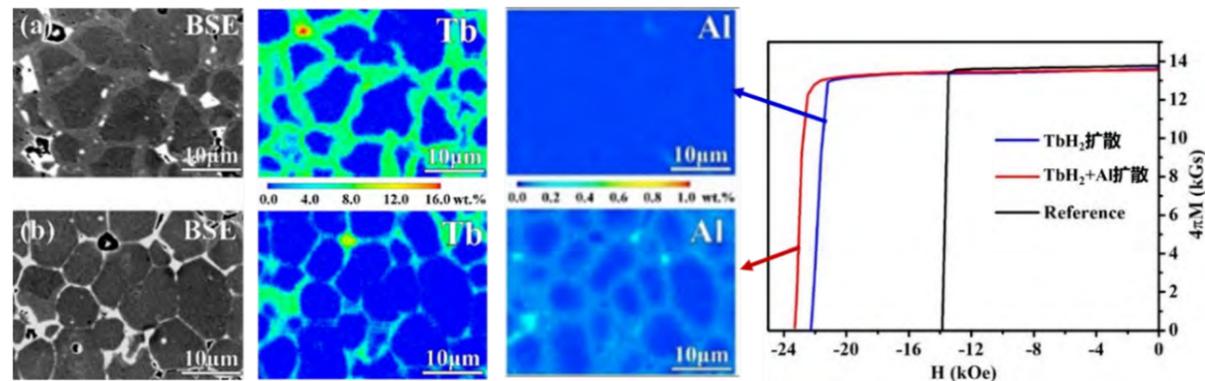


无重稀土烧结钕铁硼组织结构优化、退磁行为分析及磁性能对比

布状态、磁性等组织结构特征与磁体矫顽力之间的内在联系。利用压力场辅助烧结技术调控磁体液相烧结过程，实现磁体低温烧致密化并显著抑制晶粒生长，获得平均晶粒尺寸 2.6 μm 的细晶磁体，大幅提升磁体的耐温特性。通过合金低硼成分体系创新设计及涡流感应处理技术开发，综合晶界成相过程对晶粒外延层的溶解析出作用和涡流感应对晶界液相的电磁搅拌作用，构建连续均匀的非磁性晶界相包覆主相晶粒的组织结构，有效实现晶粒表层缺陷修复和晶间去磁耦合，成功开发出矫顽力大于 27 kOe 的无重稀土烧结 Nd-Fe-B 磁体。进一步通过有限元微磁学模拟建立了磁体表层晶界优化的梯度结构模型，在此基础上设计开发了系列外源辅相合金和基体成分的匹配模式，通过磁体表层区域晶界相定量引入，实现晶界微区的成分

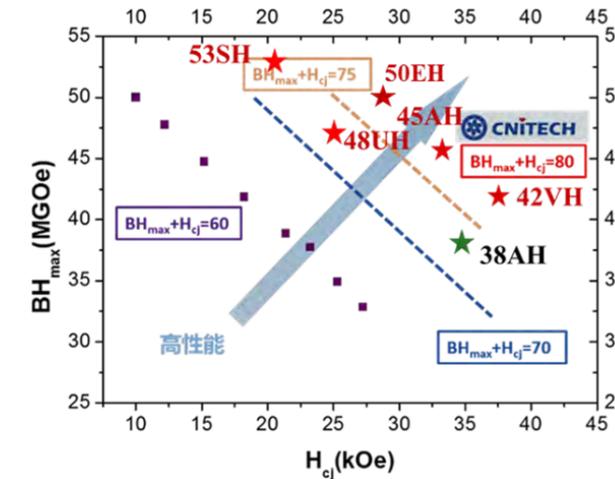
和界面结构状态的梯度调控，有效抑制了晶界相对磁体主相比比例的稀释。成功开发获得 40 UH、42 SHT、45 SH 等系列无重稀土高矫顽力烧结 Nd-Fe-B 磁体，性能处于国际领先水平，较常规商业磁体节省原材料成本 20% 以上。相关技术在宁波科田磁业实现转移转化，为推动新能源驱动电机的核心部件去重稀土化提供支撑。

此外，晶界扩散技术作为重稀土高效利用的关键技术，近年来成为产业界的关注重点。团队通过技术方法的不断创新和提高，充分挖掘了重稀土元素的应用潜能，利用电泳沉积、自动喷涂等工艺在磁体表面沉积均匀连续、厚度可控的重稀土化合物涂层，经晶界扩散处理实现无重稀土磁体中扩散 0.81 wt% Tb 时矫顽力提升 ~10 kOe；扩散后磁体磁能积偏差小于 1%，矫顽力偏差小于 2.5%，实现了磁体矫顽



复合晶界扩散技术磁体元素分布及磁性能对比

力精确调控，解决了薄片产品一致性的难题。在此基础上进一步从扩散源的设计和改性的角度出发，发展多元扩散物体系，开发重稀土多组元共扩散技术，实现对扩散磁体壳层结构、晶界相分布及扩散深度的综合调控。通过铝与重稀土的共扩散，降低了晶界相中的重稀土浓度，减小了晶粒富重稀土壳层厚度，同时利用铝优化晶界结构、弱化晶界相铁磁性，增强晶



开发的系列超高综合性能烧结钕铁硼磁体磁性能及相关技术应用于轨道交通牵引电机

团队在烧结钕铁硼重稀土集约化利用方向得到了国家重点研发计划、浙江省尖兵计划、宁波市 2025 专项等重大项目的支持，成果获得中国优秀专利奖、中国稀土科技进步一等奖、

间去磁耦合作用，保障了矫顽力的提升效果，进一步降低重稀土使用量 74% 以上。综合上述技术的突破，团队率先开发出 50 EH、45 AH、42 VH 等系列牌号高综合性能磁体，综合磁性能超过 83，相关技术在宁波韵升进行产业化推广，产品于国内首次实现了钕铁硼永磁体在宁波轨道交通 4 号线、5 号线中的应用，综合能耗降低 33.4%。



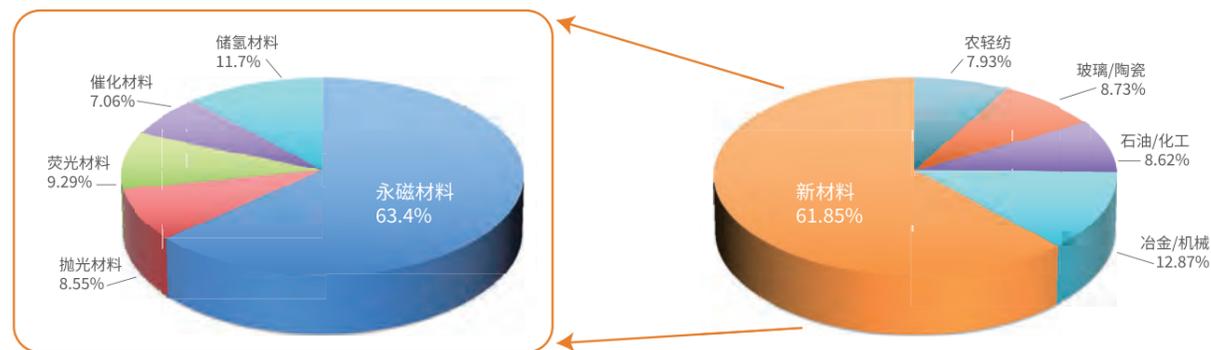
宁波市科技进步一等奖 2 项奖励。相关技术成果取得了显著的经济效益和社会效益，近三年推动企业新增销售额 44.14 亿元。

高丰度稀土永磁关键制备技术及产业化应用

我国是稀土大国，拥有丰富的稀土资源。稀土元素在地壳中的分布呈现共伴生的特性，主要以北方的轻稀土矿及南方的离子型中重稀土矿为主，不仅满足了国内经济社会发展的需要，而且为全球稀土供应作出了重要贡献。当前，中国以 23% 的稀土资源承担了世界 90% 以上的市场供应。中国生产的稀土永磁材料总产量占世界总产量的 80% 以上，消耗了我国稀土总应用量的 40% 左右，稀土永磁材料产业的发展对稀土资源的平衡利用起到举足轻重的作用。随着我国稀土永磁材料产量的快速增长，以及全球对稀土永磁材料需求量的迅速增加，导致是稀土元素的需求应用快速增长，高效、合理、均衡利用稀土资源是我国稀土产业可持续发展战略的重中之重。目前永磁材料中使用的稀土元素，主要集中于 Nd、Pr、Dy、Tb，而伴生

开采提炼出的高丰度稀土元素（如 Ce、La、Y 等）大量富集，造成稀土元素利用的严重失衡，制约我国稀土资源利用的健康持续发展。加强对这些大量积压的高丰度稀土在永磁材料中应用的研究，增加高丰度稀土的使用量，对资源平衡利用、降低永磁材料成本和促进稀土应用技术的可持续发展具有重要意义。

中科院宁波材料所稀土永磁材料联合创新中心对稀土元素的综合平衡利用开展了深入细致地研究工作。团队创新变革传统的以“炒菜法”和“试错法”为主的稀土永磁材料研发模式，首次将材料基因工程理论应用在长制备流程的钕铁硼复杂材料体系的研究中，开展了高丰度稀土永磁材料的成相规律与相结构演变研究、多主相高丰度稀土永磁材料的成分、组织结构与磁性能关系规律研究以及高丰度稀土永磁材

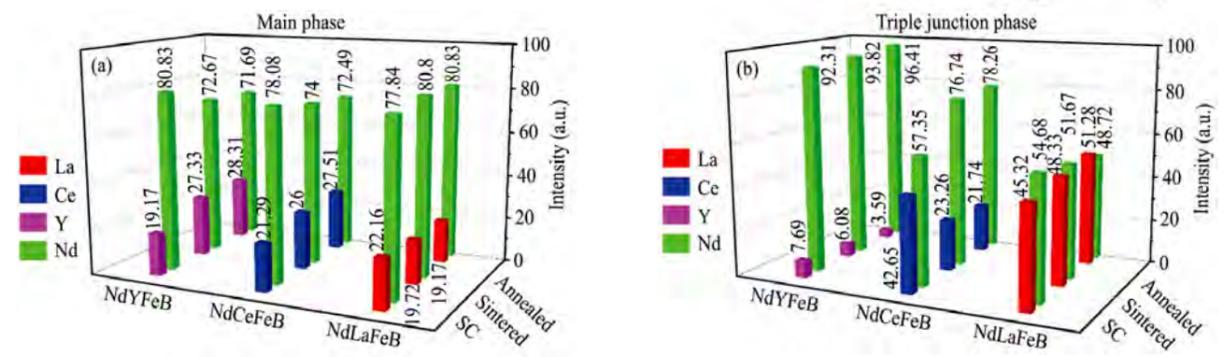


稀土应用状况

料的高通量规模组合式制备技术研究，完成了国家重点研发计划项目“基于材料基因工程的高丰度稀土永磁材料研究”。同时开发出高通量稀土永磁材料快速制备和表征技术，并在国际上首次建立了系统的高丰度永磁材料成分、工艺、结构和性能的关联数据库，有力推动了高丰度稀土在永磁材料中的规模化利用，促进高丰度稀土永磁材料在中高端领域的应用。

基于材料基因工程方法，团队首先系统研究了 La, Ce, Y 元素在粉末冶金制备周期中的物相和组织结构演变过程。研究发现，在速凝、烧结和回火热处理工艺过程中高丰度元素呈现一定的迁移特性。在速凝过程中，La 和 Ce 在合金的晶界相中大量富集，而 Y 主要富集于合金的主相；在烧结及回火过程中，La 从主相晶粒中逐渐排出，富集在晶界富稀土相中，Ce 和 Y 从富稀土相中逐渐迁移进入主相中。结合回火阶段合金处于长时间的高温条件，这一过程中

高丰度稀土元素的迁移行为主要受不同稀土元素的 2:14:1 主相形成能影响。随后，在阐明高丰度稀土元素冶金行为的基础上，团队利用 Y、Ce 元素的协同效应，设计了 YCe 共同替代 Nd 的 (Nd, YCe)-Fe-B 磁体，发现随着 Y 含量的升高，磁体的矫顽力大幅度的提升，剩磁和磁能积略微降低。对 YCe 共同替代磁体的微结构和元素分布分析发现，磁体晶粒中自发生成了表层富 Nd、核心富 Y 的核-壳结构，这种元素偏聚效应可在主相晶粒表层形成富 Nd 的 (Nd, YCe)₂Fe₁₄B 相，提高了主相晶粒表层各向异性场，从而提高磁体的矫顽力。此外，利用 Y 元素改善 Nd-Fe-B 磁体的高温稳定性，团队设计了富稀土含镱的 Y 取代合金成分体系，使磁体在热处理过程中形成富铁晶界相，实现了对晶界相空间分布的优化，有效提升了 Y 取代磁体的矫顽力。Y 取代 15% 稀土磁体中，矫顽力通过热处理过程由 1.16 T 提升至 1.72 T，同时磁

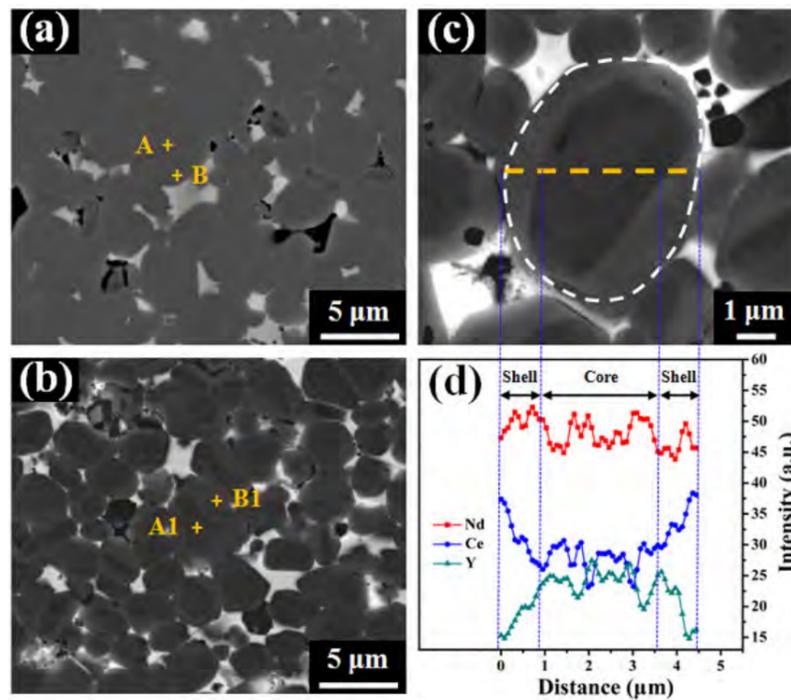


高丰度稀土元素 La/Ce/Y 磁体速凝片、烧结态及回火态元素含量

体 β 值 ($20 \sim 120^\circ\text{C}$) 为 $-0.605\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ，优于商业磁体的 β 值 ($20 \sim 120^\circ\text{C}$) 为 $-0.625\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ，表明 Y 取代磁体具有更优异的温度特性。

团队在高丰度稀土永磁关键制备和应用方向获得了国家重点研发计划、内蒙古重大专项、山东省重大科技创新工程等重大项目的支持，相关技术在中国铝业山东依诺威、宁波同创等企业进行产业化推广，有力推动了高丰度稀土在永磁材料中的规模化利用，促进高丰度稀土

永磁材料在中高端领域的应用，开发了 38H、40UH 等系列牌号的高性能含 Y 磁体，并进行了规模化生产，取得了显著的经济效益和社会效益。相关研究成果已申请多项发明专利，并发表在 *Acta Mater.* (154(2018) 343)、*Acta Mater.* (194 (2020) 547)、*Appl. Phys. Lett.* (110(2017) 172405) 等国际刊物上，同时获得中国优秀专利奖、中国稀土科技进步一等奖、宁波市科技进步一等奖等奖励。



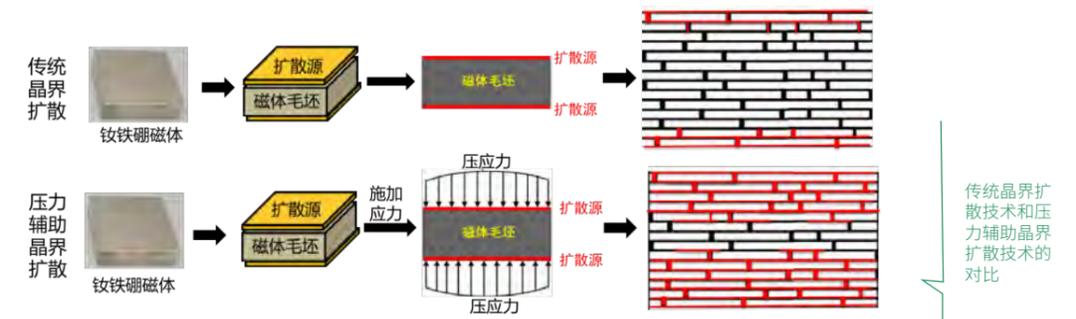
YCe 协同替代磁体微观结构和主相晶粒中的元素分布特征

多尺度组织结构调控改善纳米晶钕铁硼永磁材料性能

组织结构调控是改善材料性能的重要方法。为了提高纳米晶钕铁硼永磁材料的磁性能，中科院宁波材料所稀土永磁材料联合创新中心从磁体微观、介观和宏观结构着手，系统开展了调控晶界相含量与分布、抑制界面晶粒过度生长、设计构造三明治复合结构等多尺度组织结构调控的研究。

晶界扩散稀土元素是目前提升磁体矫顽力最

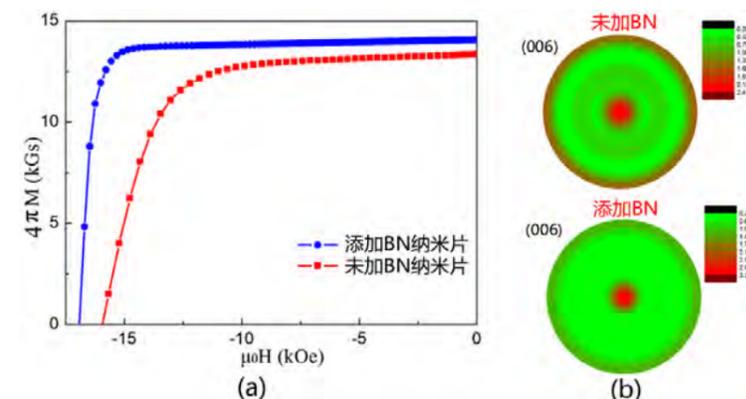
有效的方法之一。传统晶界扩散的驱动力主要依靠元素浓度梯度，从而导致扩散深度有限。对此，团队开发出压力辅助晶界扩散技术，借助压应力和浓度梯度的双驱动作用来提高晶界扩散的深度和效果。研究发现，压力辅助晶界扩散 DyCu 合金可大幅提高 Dy 元素的扩散深度和均匀程度，从而获得磁能积达 53 MGOe、矫顽力为 10 kOe



的钕铁硼磁体；添加 7 wt%PrGa 合金的无重稀土钕铁硼磁体可以达到商用 MQU-G 粉 (含 3.6 wt%Dy) 的磁性能。同时该技术还具有效率高、

节约重稀土等优点，为晶界扩散技术的产业化应用推广提供了新的技术思路。

纳米晶钕铁硼磁体内部的颗粒界面处通常存



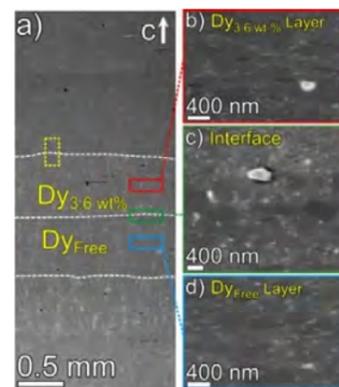
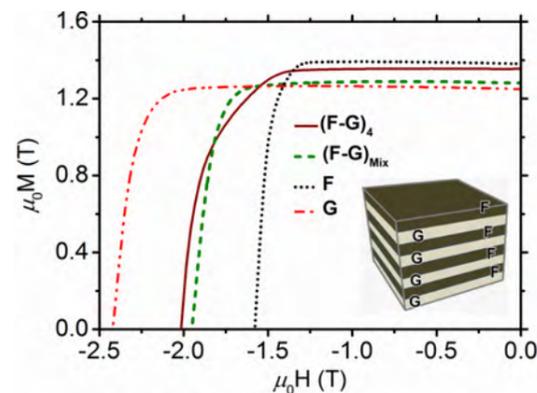
未添加和添加高熔点 BN 纳米片所制备磁体的磁性能和 (006) 晶面极图

在“准周期”的无取向粗大晶粒，这些晶粒对磁体的剩磁和矫顽力均具有负面影响。为此，团队在研究粗大晶粒生长规律和影响因素的基础上“对症下药”，采用掺杂高熔点纳米相 (WC 和 BN)、预扩散 Pr-Cu 低熔点相、磁粉预处理工艺等多种方法成功抑制了界面处的粗大晶粒，显著改善了磁体的矫顽力，同时剩磁和磁能积基本不降。研究还发现，掺杂 BN 纳米片能同时提高磁体的矫顽力和磁能积：磁体的矫顽力从 15.5 kOe 提高到 16.9 kOe，磁能积由 44 MGOe 提高到 49 MGOe。

稀土永磁材料的结构调控主要聚焦于微观尺度，而对介观和宏观尺度的结构调控研究较少。为此，团队针对多组不同材料体系设计构造了宏观“三明治”复合结构磁体，通过调控磁性相间长程磁耦合作用实现了微观到宏观尺度“软”和“硬”相复合，从而制备出了高性能的新型稀土永磁材料。团队通过富 La、Ce 的高丰度稀土快淬粉与钕铁硼磁粉在几微米到数十微米间有效耦合，构造出介观“三明治”结构的高丰度稀土永磁体。当 La-Ce 占稀土总量的 30 wt.% 时，磁体

最大磁能积达 44.9 MGOe，矫顽力达 12.4 kOe。利用商业 MQU-F 粉 (无重稀土) 和 MQU-G 粉 (含 3.6 wt%Dy) 这两种内禀磁性能差异较大的快淬磁粉，可以构造出平均层厚为 700 μm 的宏观多层复合结构磁体；通过在亚毫米量级上调控优化两相的最佳耦合距离，能够获得具有优异矫顽力、剩磁也优于共混粉末磁体的纳米晶钕铁硼磁体，从而证明宏观多层复合结构能够改善磁体的磁性能，也揭示出长程静磁耦合作用可突破纳米尺度限制，在微米或毫米范围内实现良好的磁耦合作用。这一特点为设计和制备新型高性能纳米晶钕铁硼磁体提供了新的思路。

上述工作已在 Acta Materialia (2018, 156: 136-145; 2019, 167: 103-111; 2019, 174: 332-341)、Scientific Reports (2016, 6: 38335)、Scripta Materialia (2017,132: 49-52; 2018,152: 127-131) 等领域知名期刊上发表，相关技术已获得多项国家发明专利授权 (ZL201610212535.4; ZL 201510834685.4; ZL201710910668.3; ZL 201710163692.5)。



采用 F 粉和 G 粉构造的宏观多层复合结构磁体的示意图及其磁性能和微观结构

尖端装备用高性能钕钴永磁材料产业化关键技术及应用

2:17 型钕钴永磁材料 [Sm(Co, Fe, Cu, Zr)_z] 具有良好的磁性能和温度稳定性，是轨道交通、高频通讯、航空航天等尖端领域的关键核心材料。我国钕钴永磁材料产业规模较大，但是生产技术相对落后，产品的磁能积和服役能力仍然明显落后于美国、日本、欧洲等发达国家和地区。随着我国高技术装备的跨越式发展，迫切需要发展具有更高磁性能和服役能力的钕钴永磁材料，以保障关键装备的高效能、高精度、高可靠性。

中科院宁波材料所稀土永磁材料联合创新中心以满足国家重大战略需求为目标，建立了钕钴永磁材料关键技术研发和中试产业化平台。团队围绕 2:17 型钕钴永磁材料微纳组织结构调控、核心磁性参数提升、关键制备工艺革新，发明了高铁含量钕钴永磁材料纳米胞状结构和

晶界区域组织的多尺度精细调控技术，突破了高温矫顽力的提升技术，率先在国内实现磁能积 ≥ 33 MGOe 高性能钕钴永磁材料的产业化，研制出 550° C 下磁能积达到 9.86 MGOe 的新型耐高温钕钴永磁材料，解决了 2:17 型钕钴合金氢破技术瓶颈，实现了磁粉的清洁高效制备，显著提升了行业的产业技术水平。开发的产品实现在新一代高能同步辐射光源、全天候惯性导航系统、高速轨道交通、5G 高频通讯、氢能源汽车等尖端领域的应用，有力地支撑了我国尖端技术的迭代升级。

团队在钕钴永磁材料方向得到了国家重点研发计划、浙江省重点研发计划、宁波市 2025 专项等重大项目的支持，获得授权发明专利 24 项，其中国际专利 5 项，发表高水平学术论文 18 篇，专著 1 本，获得宁波市科技进步一等奖



高性能高服役能力钕钴永磁材料及其关键技术研发思路

1项、宁波市专利优秀奖1项。相关技术已在宁波科星、宁波宁港、长汀卓尔、杭州科德等行业骨干企业实现产业化应用和推广，技术应用企业获批工信部工业强基项目、国家专精特新“小巨人”、行业单项冠军等，相关产品国内市占率超过40%，近四年技术带动新增产值超11亿元。

高性能钕钴永磁材料微纳结构调控和磁性强化技术

钕钴作为大功率永磁电机、波荡器等核心部件的关键材料，在我国高端轨道交通、5G微波通讯和同步辐射光源等系统的核心器件中发挥不可替代的应用价值。随着科技装备不断向高效能、轻质化和小型化发展，市场对高磁能积的钕钴永磁需求快速增长。目前国内商业的钕钴磁体主要以中低端产品为主，普遍磁性能较低，材料的技术水平还落后于发达国家，下游装备研发受到极大的制约。提高强磁性铁元素含量是增强钕钴永磁材料磁性能的基本途径，

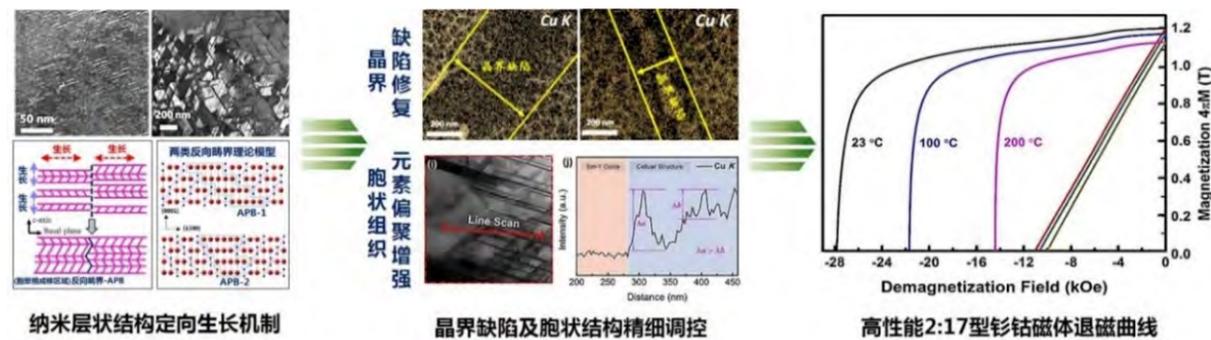
但铁含量增加极易产生杂相和缺陷，难以形成均匀一致的胞状结构，降低钉扎场和矫顽力，限制了磁能积的提高甚至导致磁能积的恶化。发展高铁含量钕钴永磁材料及关键制备技术，打通从材料设计、制备到应用结合的产业化关键技术瓶颈，对保持我国在稀土产业上的战略优势和国家安全，具有重要的战略意义和巨大的经济社会效益。

团队基于在高铁含量2:17型钕钴永磁材料纳米胞状结构演变研究所取得的新认识，通过对胞状结构缺陷、铜元素偏聚不足、晶界区域缺陷等多个关键技术问题的突破，实现了高铁含量钕钴永磁材料组织结构的精细化调控和磁性能的大幅提升。高铁含量2:17型钕钴永磁材料复杂物相演变过程的认识是解决组织结构调控瓶颈的理论基础，团队通过对高铁含量2:17型钕钴永磁材料在烧结、固溶、时效热处理等关键制备环节中物相结构变化的动态研究，提出纳米层状结构生长的胞状结构演变新机制，

揭示固溶态杂相、铜元素偏聚分布不足和晶界区域胞状结构缺陷是制约高铁含量钕钴永磁材料磁性能增强的关键因素。为消除固溶态杂相，采用成分体系设计和优化，缓解了体系中钕/铁/钴等元素的占位竞争，抑制了固溶过程中杂相析出，促进了胞状结构的形成。为修复晶界区域缺陷，通过增加2:17型钕钴磁粉的氢含量，利用烧结过程中残余氢的快速扩散和还原特性，实现了同样热处理条件下磁体晶粒尺寸长大24%，有效降低了晶界区域的体积分数；通过掺杂纳米氧化铜粉，利用高熔点氧化铜在晶界区域与基体稀土元素的置换反应，构造出了富铜晶界相，使晶界缺陷区域的宽度从~800纳米降低至~300纳米。基于以上技术，显著优化了高铁含量钕钴永磁材料的胞状结构，增强了胞壁对磁畴壁的钉扎作用，提升了磁体矫顽力，研制出系列高性能钕钴永磁材料，其中

铁含量大于20 wt.%的磁体磁性能达到：剩磁 $B_r=12$ kGs, 矫顽力 $H_{cj}>24.95$ kOe, 磁能积 $(BH)_{max}=33.10$ MGOe。

团队开发的高铁含量2:17型钕钴永磁材料的第三方检测结果如下表所示，作为比较对象，同时列出美国Arnold、美国EEC等国外知名企业开发的高性能钕钴磁体最高性能水平。团队开发的高性能钕钴磁体的磁能积超过33 MGOe，综合性能指标达到或超过国际同类产品最高水平，打破了国外对高磁能积钕钴永磁材料的垄断，开发的高性能钕钴永磁材料成功应用于北京新一代光源波荡器、中车集团高速列车永磁牵引电机、国睿科技5G基站用微波器件、金士顿科技氢能源汽车用压缩机等尖端装备，为我国高科技装备的发展提供了关键材料保障。



高铁含量2:17型钕钴永磁材料胞状结构形成机理、组织结构精细调控和退磁曲线

宁波材料所开发的高性能磁体与国外同类产品的磁性能对比

高性能磁体	最高磁能积	矫顽力	剩磁
美国 Arnold 公司 *	33.3 MGOe	23 kOe	11.9 kGs
美国 EEC 公司 **	32~34 MGOe	≥ 18 kOe	11.7~11.9 kGs
NIMTE 宁波材料所	33.1 MGOe	>24.95 kOe	12.00 kGs

DC双连接—全球最高单用户速率

Sub 3GHz 天线, 5G AAU, 5G CPE

3Gbps所需频谱及带宽资源

频谱	3.5G	1.8G	2.1G
带宽	100M	20M	20M
MIMO	64T64R	4T4R	4T4R

新一代光源波荡器、高速列车永磁牵引电机、5G基站用微波器件

稀土氧化物复合的新型耐高温钕钴永磁材料制备技术

耐高温钕钴永磁材料是航空航天、深海和深空探测等领域动力系统、传感装置的核心材料受到国内外研究人员的广泛关注。1995年以来美国和欧盟都把高温磁体列为应积极推动的十大材料科学研究领域之一，烧结钕钴磁体的研究基本都是围绕 $\text{Sm}(\text{Co,Cu,Fe,Zr})_z$ 高温磁体 ($\geq 500^\circ\text{C}$) 开展。2000年，美国代顿大学和 EEC 公司联合研制出国防应用的最高使用温度为 550°C 的高温磁体。耐高温钕钴磁体是我国稀土永磁材料发展的一个重要方向，目前研制的磁体最高使用温度达到 550°C ，高温下磁性能的不足已成为制约耐高温钕钴磁体应用发展的瓶颈问题。已有研究表明，钕钴永磁材料高温条件下矫顽力的不足，是导致其磁性能难以提升的关键难点之一。

高铜含量的成分设计是传统耐高温钕钴永磁材料提升磁体高温矫顽力的主要途径，但过

多非磁性铜元素的添加大幅降低了磁体的室温及高温磁性能。团队从畴壁钉扎强化的角度，在低铜含量的钕钴成分体系中，探索提升铜元素偏聚的新技术方法，从而提升磁体耐温性的同时大幅增强磁体的高温磁性能。通过对钕钴永磁材料纳米胞状结构铜元素偏聚过程及机理的研究，发现孪晶界迁移是钕钴胞状结构中铜元素胞壁相偏聚的新动力，这为铜元素分布新调控技术的开发提供了理论指导。为增强铜元素在胞壁相的偏聚，通过微量复合 La_2O_3 、 Y_2O_3 等稀土氧化物，成功在稀土氧化物周边构建出大量的微孪晶结构，利用氧化物与基体的稀土元素互扩散，促使孪晶界的迁移，成功实现了氧化物周边胞壁相铜元素的偏聚增强，胞壁相与胞内相铜含量浓度差提升了 1 倍以上，磁体的室温和高温下的矫顽力得到有效提升。研究发现不同的稀土氧化物其对磁体矫顽力的提升幅度是不同的，利用该技术发展了系列不同耐高温特性的钕钴磁体，其中复合氧化钇的钕钴

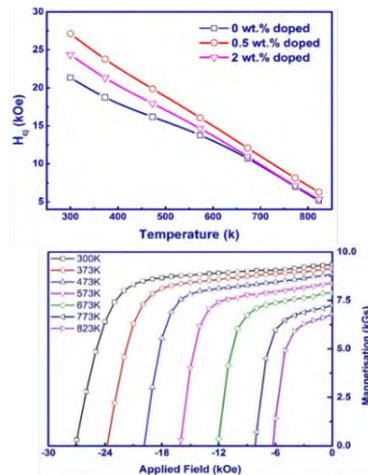
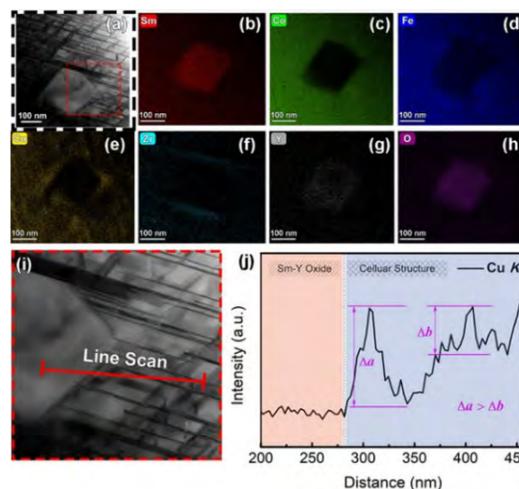
磁体在 550°C 下磁性能达到：剩磁 $B_r=6.78$ kGs，矫顽力 $H_{cj}=6.27$ kOe，磁能积 $(BH)_{\text{max}}=9.86$ MGOe，领先了美国 EEC 报道的耐高温磁体 550°C 的高温磁性能 (7 MGOe)。新型耐高温钕钴永磁制备技术的开发和应用将进一步提升钕钴磁体的高温磁性能，为我国大功率航空航天等尖端装备提供更强的高温磁场条件和关键材料的自主保障。

新型 2:17 型钕钴永磁材料高效清洁的氢破制粉技术

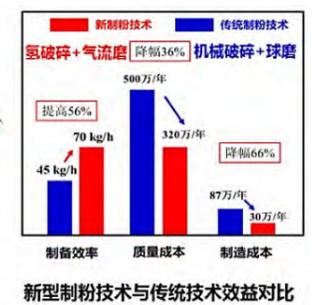
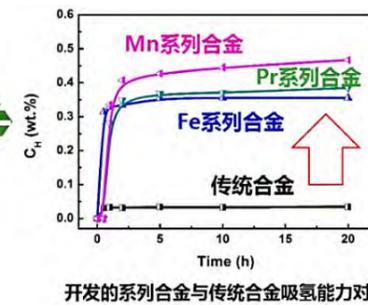
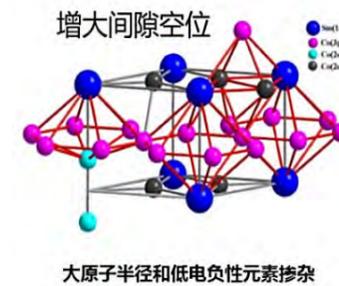
粉体作为 2:17 型钕钴磁体制备的前驱体，对磁体组织结构的优化具有重要作用。传统 2:17 型钕钴磁粉采用机械破碎和湿法球磨制备技术，存在粒度均匀性差、杂质含量高、效率低等缺点。氢破和气流磨作为粉末高效清洁制备技术，已被广泛应用于烧结钕铁硼永磁材料的工业化制备。与钕铁硼相比，2:17 型钕钴合金吸氢能力差，导致氢破条件苛刻（高氢压、长时间），严重制约生产效率的提升。

团队通过对 2:17 型钕钴合金吸氢机理的深

入研究，提出利用大直径和低电负性原子掺杂提升 2:17 型钕钴合金吸氢能力的方法，通过微量引入大直径和低电负性原子，增大晶格间隙，增强氢亲和力，设计并开发出锰掺杂、镨掺杂、高铁含量等系列高吸氢能力 2:17 型钕钴合金材料，相较于传统钕钴合金，吸氢能力提升 10 倍以上，实现了合金在室温、0.2~0.4 MPa 氢压和 3 小时吸氢时间下的高效破碎。基于强吸氢能力 2:17 型钕钴合金，采用氢破结合气流磨的工艺，制粉效率大幅提升，较传统机械破碎和湿法球磨工艺，所制备的粉体粒度分布半高峰宽从 $15\ \mu\text{m}$ 降低至 $8\ \mu\text{m}$ ，磁体氧含量降低至 1500 ppm，实现了磁粉的高效清洁制备，磁体的质量成本和制造成本大幅降低。与国外技术相比，所开发的氢破条件氢压降低 60%、氢破时间缩短 70%，具有显著的技术优势。新型制粉技术的应用，不仅为优化 2:17 型钕钴磁体的显微组织结构，开发高性能和高稳定性钕钴磁体奠定了基础，而且显著提升了钕钴产品的品质和市场竞争力，推动了行业技术的升级发展。



稀土氧化物复合的钕钴磁体显微组织结构及铜元素分布和磁性能



2:17 型钕钴合金晶体结构调控、吸氢量变化及新型制粉技术与传统技术对比

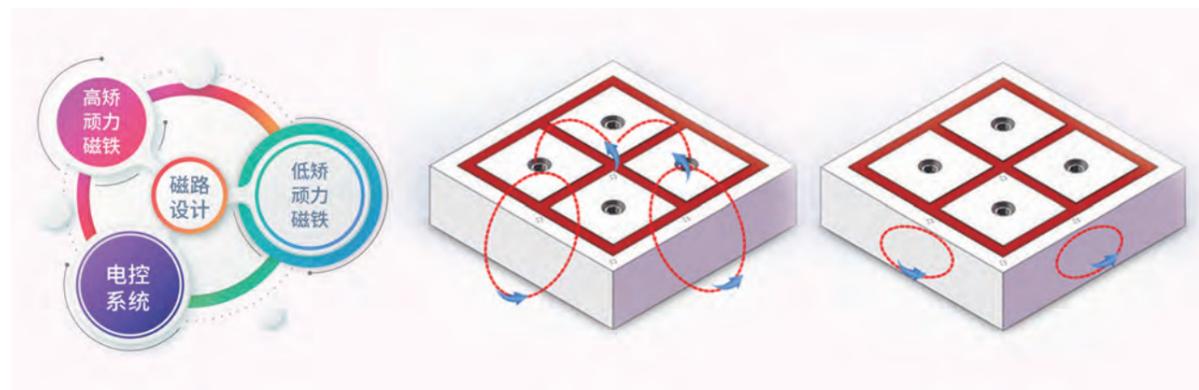
基于电控磁力技术的新型器件与装备研发

中科院宁波材料所自建所以来就秉持“料要成材，材要成器，器要好用”的原则，这种理念也深刻地影响着团队的发展。团队成员们认为，作为一种功能材料，磁性材料的作用同样要在器件或装备中才能得到完美地展现。

团队基于多年以来在稀土永磁材料、金属永磁材料、磁路设计和永磁电机等方面的研究基础，研发了新型电永磁吸盘为代表的多种器件与装备。电永磁吸盘的基本原理是通过电控系统，调控磁化特性不同的两种永磁材料，使磁场可以在吸盘表面和系统内部两种状态间转换。应用领域包括物料搬运、加工和快速换模等，是“机器人”和“精密制造”的关键环节之一。

电永磁吸盘可以用于起重器、磨/铣床、加工中心、注塑机、冲压/锻造设备、粉末成型机等通用机电产品，仅考虑每年新增的通用机电产品配套，国内市场需求就超过30亿元。

基于电控磁力技术的研究收获，团队还在微小型电永磁锁紧机构、经颅磁治疗仪、磁性爬壁机器人、自组装机机器人、定子永磁式步进电机等方面开展工作，部分成果已成功应用于核电和航天领域。相关项目获得了2016年第五届中国创新创业大赛（宁波赛区）团队组二等奖和新材料行业团队组第二名、2017年创业鄞州项目D类资助。



产品关键技术

吸放两种状态的表面磁通

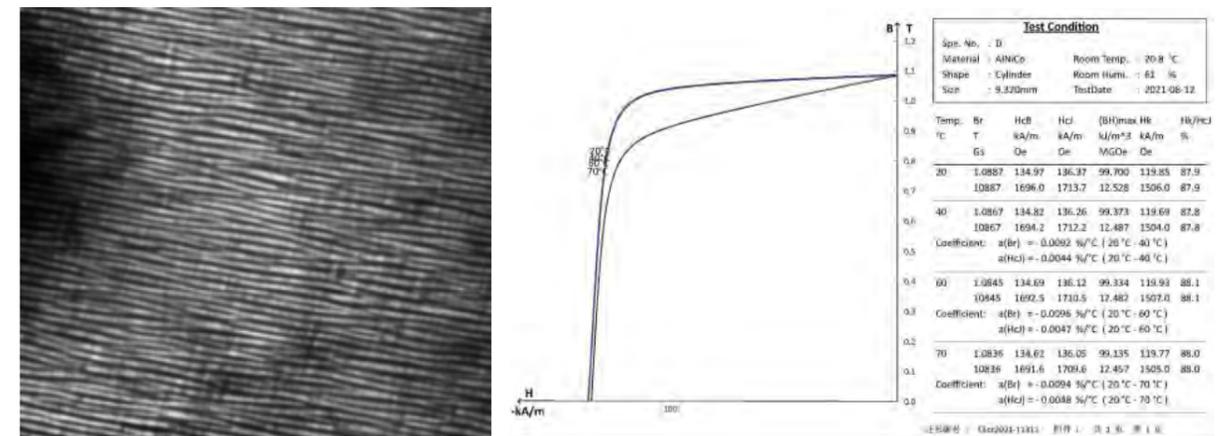
耐高温高稳定钴基永磁材料的研发和应用

永磁材料作为提供磁场的核心材料，其稳定性和可靠性水平极大地限制了惯性导航、微波通信、高温电机等技术产业的发展。作为第二代稀土永磁的钕钴磁体，不仅磁性能高，而且具有相对高的居里温度和温度稳定性，广泛应用于航空航天、电子工业、国防、通讯等领域，在部分尖端应用领域有着不可替代的地位。通常永磁体的磁性随着温度的升高会逐渐减弱，直到居里温度以上完全失去磁性，这种磁性随温度的变化或者失效会直接影响器件或系统的稳定可靠使用。随着我国轨道交通、航空航天、微波通讯等高端科技领域的飞速发展，对永磁材料温度稳定性提出了更苛刻的要求。钴基永

磁材料的磁性能源于其复杂的微观组织结构，但目前磁性能及其温度稳定性与组织结构依赖关系的认识依然不充分，同时磁体制备流程冗长，对精细结构的调控缺乏科学依据与有效手段，严重制约了磁性能和温度稳定性的提升。宁波材料所稀土永磁材料联合创新中心先进磁性材料与器件应用技术团队致力于钴基永磁材料成分、结构、性能关系构建，发展微观结构的精确控制技术，制备工艺优化和制备技术改进，开拓新型耐高温高稳定性钴基永磁材料。

耐 550°C 高温钕钴永磁体实现技术突破

在高温推力器、电子通信等领域迫切需求工作温度高于 500 °C 的永磁材料。团队系统分



高矫顽力低温度系数钕钴永磁体微观组织结构及磁性能曲线

析成分与复杂胞状组织结构间的深层次关系，阐明高温磁性的物理机制，掌握影响使用温度的主要因素，开发出使用温度 550°C，磁能积大于 7.5 MGOe 的高温永磁体。高于国际上报道的最高水平（550°C，磁能积 7 MGOe），达到国际先进水平。

开发出了超低温温度系数钕钴永磁材料

剩磁温度系数是衡量永磁材料稳定性的最主要参数。通常采用重稀土元素取代部分轻稀土元素来补偿剩磁温度系数，然而重稀土元素种类多，且每种元素可补偿的温度范围和补偿强度不同，尚缺乏精细调控技术。团队从成分、结构、内禀特性、外禀特性进行深入的认识，结合模拟分析和正交实验验证，提升了钕

钴稳定性精确调控技术。针对需求，利用多重稀土元素调配使用，制备出了在较宽的温度范围内（-40 °C ~80 °C），剩磁温度系数 -50 ppm/°C、磁能积大于 17 MGOe 的超低温温度系数钕钴磁体。

提出了“双低”温度系数钕钴永磁材料设计思路和制备方法

矫顽力温度系数是衡量永磁材料温度稳定性的另一参数。现有技术尚缺乏调控矫顽力温度稳定性的方法。团队自主开发了利用胞壁相自旋再取向行为调控矫顽力温度稳定性的新技术，发明了低剩磁温度系数、低矫顽力温度系数的“双低钕钴磁体”。较传统低剩磁温度系数钕钴磁体，在保证剩磁温度系数和磁能积相

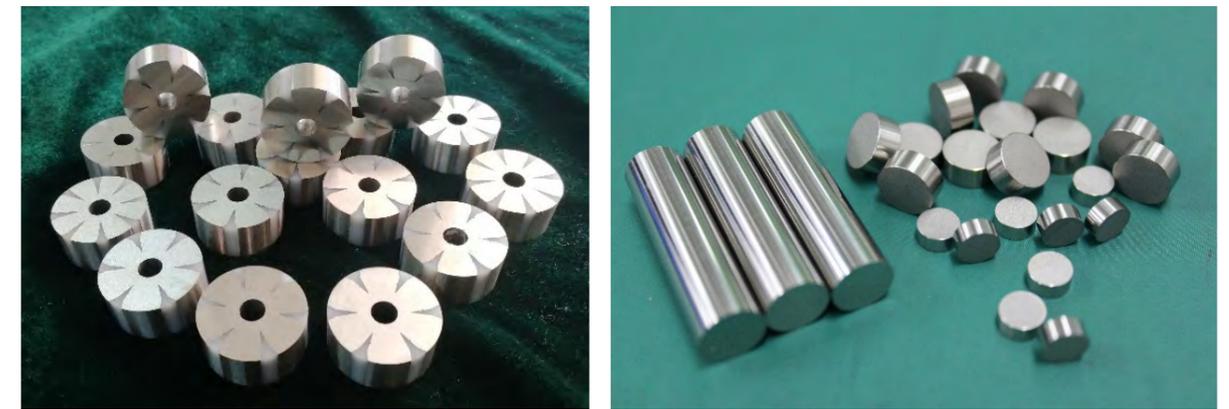
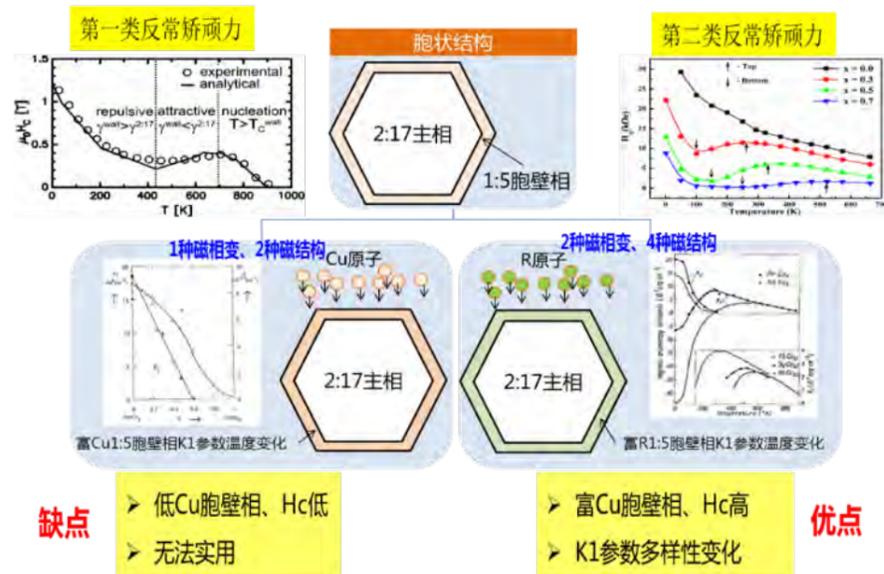
当的情况下，矫顽力温度系数提高 2 个数量级。研究表明，该材料在长期使用过程中，不受矫顽力温度起伏的影响，表现出更佳稳定性。目前已经得到中船重工 707 所的试用，在提升惯导仪表高精度、高可靠性方面具有巨大潜力。

开发出了高矫顽力低温温度系数铝镍钴永磁材料。

铝镍钴永磁材料因同时具有较低的温度系数、较高的居里温度（ $T_c \geq 860\text{ }^\circ\text{C}$ ，工作温度 $\geq 500\text{ }^\circ\text{C}$ ）、且具有一些稀土永磁材料所没有的特殊物理和化学性质（如出色的力学性能、优异的耐酸碱腐蚀性和温度稳定性），一直是高精度仪器仪表首选的永磁材料。铝镍钴永磁材料因不含有稀土元素，所以稀土-过渡金属的反铁磁性耦合的温度补偿理论并不适用，其热磁理论仍遵循“布里渊”曲线。团队利用合金成分及微

量元素的优化技术、柱状晶结构调控技术及宽均温区磁场热处理技术改善铝镍钴合金的柱状晶结构和纳米调幅磁畴结构，形成均匀一致的双重结构，研制出了矫顽力大于 1750 Oe、温度系数优于 100 ppm/°C 的高稳定铝镍钴永磁材料。通过对批量化制备技术与检测关键装备核心技术的攻关，实现了高矫顽力低温温度系数铝镍钴永磁材料的批量稳定制备，并形成了高矫顽力高性能的铝镍钴永磁磁钢产品。完成了首台高精度磁稳定性检测设备核心部件设计和加工，攻克了永磁材料磁稳定性高精度检测的技术难题，延伸了高稳定钕基永磁材料在精密仪表中的“研产测用”技术链。

研制出的 3 种系列永磁材料，发展出 7 款产品型号，并形成相关产品标准，可满足不同应用场景需求，达到国际领先水平。



耐高温高稳定性钕基永磁材料产品

强磁推动科技进步



李卫

中国工程院院士

Q 作为我国稀土永磁材料产业发展的亲历者和参与者，您经历了我国稀土永磁产业从无到有、从小到大的过程，请您结合您的工作描述一下我国稀土永磁产业的发展历程。

A: 我国稀土永磁产业从上世纪八十年代中期开始，钕铁硼研究首先在实验室取得突破，研制出国内最高水平的 49 MGOe 磁体；九十年代开始中试生产，实现了从无到有，开发出了“双相烧结”等技术，获得低温度系数和正温度系数磁体；2000 年以后，“速凝工艺 + 氢破制粉技术”推广应用，实现了千吨级 N50-N55 档高性能磁体的产业化，促进产业从小到大的快速发展；2011 年以来，基于我国稀土资源特色，解决了稀土的高质化和平衡利用问题，促进整体产业转型和升级，实现了我国由稀土永磁制造大国向制造强国的转变，形成年产 20 万吨以上稀土永磁材料的产业集群，提升了我国稀土永磁产业的国际竞争力。

Q 您认为目前我国稀土永磁材料产业的优势在哪里？未来发展的瓶颈是什么？

A: 我国稀土永磁材料产业经历了三十余年的高速发展，已经建立了完整的产业链，供给了全世界约 85% 以上的稀土永磁材料。我们建立了上游冶炼分离、中游器件材料制备、下游应用的完整产业链，培育了广阔的应用市场，培养了一批研发和生产技术人才。这些都是我们多年来攻坚克难、持之以恒积累而来的。最近几年国际形势日趋紧张，西方国家在稀土永磁方面感受到战略压力，开始重新启动稀土资源和稀土永磁产业，但由于不具备这些关键的内外条件，短期尚不能改变稀土永磁的国际格局。当然我们前面讲的这些优势还是落脚在产业规模上，产业规模的形成在早期依赖丰富的资源和低廉的人力成本，随着国家对稀土资源战略性的调整和整体经济水平的提升，这些原先优势条件都逐渐的不再有了，也就意味着原先产业规模上高速扩张的时代已经结束了，现在的发展要转到依靠技术突破上来，那么科研创新能力就成了影响产业发展的核心问题。以烧结钕铁硼技术发展来看，历史上的几次重大突破，例如速凝、氢破、气流磨，乃至晶界扩散等技术，基本都是发达国家在引领，国内大多是引进消化。近年来，在若干关键技术方面，我们也逐渐取得一些创新性的进展，但总体看在重大原始创新方面，还要进一步加强。因此，搭建先进的研发平台、培养有创造力的团队、培育良性的创新生态环境都是我们目前必须重点努力的方向。

Q 能不能简单地谈一下您与中科院宁波材料所的渊源，以及您对稀土永磁材料联合创新中心的期望和思考。

A: 中科院宁波材料所是一个充满朝气和活力的单位。2004 年，在崔平所长的邀请下，我有幸参与了中科院宁波材料所的筹建工作，制订了稀土永磁材料科研方向的中长期发展规划，组建了稀土永磁材料事业部，这也是最早的几个科研单元之一，后来又进一步扩充了非晶软磁材料、机电装备，形成了磁性材料与机电装备事业部。前段时间在所里讨论规划的事情，我回顾了当年的发展规划，现在基本上全方位的超越了当时制订的中长期目标，说明材料所发展的速度很快。就稀土永磁而言，宁波有深厚的产业基础，也有很好的产业生态，这个方向在材料所已经初具规模，后面怎么进一步突破，确实需要仔细考量。前几年为进一步加强稀土永磁材料方向，在反复讨论研判后，材料所和钢铁研究总院两个单位达成共识，把钢研总院和宁波材料所的两个专业团队强强联合，建立钢研 - 宁波材料所稀土永磁材料联合创新中心，在规模上，我们已经做到了全球最大，我们研发的永磁材料的覆盖面也是最全的。下一步要培养人才、完善平台，在创新能力上也要做到全球最强。想要达到与我们国家稀土永磁材料产业地位相称的话，我们在研发上需要做的事情还很多，如未来新型材料与技术的前瞻性探索、资源平衡应用和循环利用技术、产业上的共性关键技术提升、智能化生产技术研发与示范等等，这些事情靠几个人是没有办法做的。材料和技术要突破，老的研发模式也要改革，我们现在建设稀土永磁材料联合创新中心，后面还希望能够进一步联合其他研发单位、产业单位，形成新型的产学研用创新链，希望能够探索出一条新路径，真正把研发做强、把产业做强。

Q 作为稀土永磁行业的顶级专家，您认为未来稀土永磁材料的突破点在哪里，并请谈谈您对稀土永磁研发和产业化的建议？

A: “百丈高楼千丈基”，我国要成为制造强国首先要成为材料强国，必须加大对新材料研发和产业化的支持力度，切实提升新材料自主保障能力，实现关键技术的突破。稀土永磁作为我国的关键战略性基础产业，在新一代信息技术、先进制造与机器人、航天航空，节能和新能源领域有着广阔的应用空间。对于稀土永磁材料的发展，我想应该从以下几方面考虑：一是要实施“材料并行”战略，稀土永磁材料要与先进制造业平行考虑，加大对新的稀土永磁材料研发和产业化的支持力度；二是加快整合稀土永磁材料领域创新资源，统筹我国稀土永磁材料领域各类优势创新资源，充分发挥骨干企业的创新主体作用，加快资源整合，建设开放、共享的全产业链创新平台；三是要平稳上游原材料价格，要鼓励对下游的运用，持续的价格上涨势必倒逼部分下游企业寻求稀土永磁电机替代方案，要避免市场萎缩；四是强化知识产权保护和科研人员激励，完善知识产权保护相关法律体系及其执行机制，落实科技人员激励指导文件，赋予国有科技企业更灵活的分配激励机制；五是发展稀土循环产业，保护珍贵战略资源，发展具有高性价比的新型钕磁体，实现稀土资源的翻番。