

浙江省科技进步奖项目公示

一、项目名称：高性能高稳定性稀土永磁材料关键技术与产业化

二、推荐单位：中国科学院宁波材料技术与工程研究所

三、项目简介：

本项目属于有色金属及其合金材料领域。

稀土永磁材料作为支撑社会进步的重要基础功能材料，广泛应用于国民经济、社会发展和国防建设等领域。近年来，由于节能减排技术的迫切需求和工业技术的飞速发展，稀土永磁材料的应用领域得以迅速拓展，已成为我国最具资源特色的战略性新兴产业之一。以钕铁硼为代表的稀土铁基永磁材料是目前磁性能最高、应用最广、发展最快的永磁材料，但其存在温度稳定性低、耐腐蚀性差的缺点，需要添加大量昂贵稀缺的重稀土元素进行改善，造成稀土元素利用的严重失衡和价格差异的不断拉大，制约了我国稀土资源利用的健康持续发展。本项目基于材料显微结构与磁体综合性能依赖关系的研究，对钕铁硼制备流程各工艺环节进行深入分析和优化，攻克了超细晶粒和晶界改性技术难点，发明了涡流感应退火工艺和电泳沉积扩散技术，实现了材料组织结构的精确调控，研制出高温稳定性高耐蚀性的超高矫顽力及低/无重稀土钕铁硼基永磁材料，开发出高镨含量的新型永磁材料及其产业化技术，主要科技创新点如下：

- 1、开发出高稳定性超高矫顽力烧结钕铁硼永磁材料及其产业化关键制备技术；
- 2、开发出无重稀土的高矫顽力烧结钕铁硼永磁材料及其产业化关键制备技术；
- 3、发明了镨基无重稀土的新型高矫顽力永磁材料；
- 4、发明了电泳沉积扩散技术和速凝片晶界扩散技术。

本项目实施以来，获得国家发明专利 17 项，在国际学术期刊发表论文 16 篇。项目相关技术在宁波招宝磁业、宁波科田磁业、宁波松科磁材、浙江英洛华磁业、宁波同创强磁等企业进行产业化推广，产品应用于通讯设备、风力发电、永磁电机等高端应用领域，取得了显著的经济效益和社会效益，近三年新增销售额 23.74 亿元，利润 2.07 亿元，税收 1.15 亿元。本项目的成功实施，打破了国外在高端稀土永磁生产技术上的封锁，显著提升我国稀土永磁材料企业技术水平与产品的市场竞争力。

四、主要科技创新：

稀土永磁材料在国防军工、工业生产、人类生活等各个领域中都有着广泛而不可替代的应用，尤其是发展清洁能源、低碳经济不可或缺的重要材料基础，也是发展军事科技和尖端技术的核心材料，是世界各国尖端技术发展和战略竞争的热点之一。在新能源汽车、高速和磁悬浮列车、风力和潮汐发电、国防和航天等领域的应用对高性能稀土永磁的需求量迅速增长，对稀土永磁环境稳定性也提出越来越苛刻的要求。

得益于资源与人力优势，我国的稀土永磁产量已稳居世界第一，但由于缺乏核心技术和知识产权，我国稀土永磁材料及产业技术的发展仍未完全摆脱模仿国外的局面，国内企业技术相对落后，生产的相关产品主要应用于中低档器件，产品附加值低，资源利

用率低，严重影响了稀土永磁产业的可持续发展。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。我国把高端稀土永磁材料的开发与产业化作为战略性新兴产业领域的重大发展需求方向，列为“十三五”及今后的高技术产业的发展重点之一。

随着新能源技术的发展和节能减排工作的需要，提高磁体的矫顽力和温度稳定性的同时降低重稀土使用量已成为稀土永磁材料产业日益紧迫的关键技术，是稀土永磁材料主要发展趋势。本项目立足国民经济和尖端科技对稀土永磁材料稳定性的迫切需求，从材料综合性能与组织结构的依赖关系着手，通过研究制备工艺流程各环节对组织结构的影响规律，建立了钕铁硼合金晶粒生长模型，攻克了超细晶粒和晶界改性技术难点，实现了材料组织结构的精确调控，开发出高温稳定性高耐蚀性的超高矫顽力永磁材料，开发出高镨含量的新型永磁材料及其产业化技术，并进一步发明了涡流感应退火技术，结合超细晶粒技术，研制出无重稀土高稳定性钕铁硼磁体。在此基础上，与相关企业合作进行产业化技术推广，开发的新型稀土永磁材料广泛应用于通讯设备、风力发电、永磁电机等高端应用领域。

主要科技创新点为：

创新技术一：耐高温超高矫顽力稀土永磁材料关键制备技术

开发出高稳定性超高矫顽力烧结稀土永磁材料及其产业化关键制备技术，解决了速凝片组织调控、晶粒细化、晶界钝化等技术难题，使烧结钕铁硼磁体的热稳定性和工作温度获得显著提升，开发的新型超高矫顽力磁体磁性能达到： $B_r = 12.38$ kGs， $H_{cj} = 35.87$ kOe， $(BH)_{max} = 37.23$ MGOe，磁体使用温度高于 $220\text{ }^\circ\text{C}$ ，磁体各项指标均达到国际先进水平，充分满足了电动汽车/混合动力汽车驱动电机等工作温度高、环境差的应用领域的需求。

创新技术二：重稀土减量化及无重稀土高矫顽力磁体关键制备技术

通过感应涡流退火、细化晶粒、晶界改性等新型工艺，研制出具有超细晶且晶界相均匀的无重稀土高矫顽力钕铁硼磁体，显著降低了高矫顽力烧结钕铁硼磁体的重稀土使用量，制备的无重稀土烧结钕铁硼磁体矫顽力 H_{cj} 达到 19.5 kOe，磁能积 $(BH)_{max}$ 为 42.43 MGOe，达到国际先进水平，实现重稀土资源稀高效利用。

创新技术三：镨基稀土永磁材料及其产业化技术

发明了镨基无重稀土的新型高矫顽力稀土永磁材料，通过装备与技术的优化，突破了速凝过程中柱状晶难以形成的技术瓶颈，结合低温烧结与退火制度，实现微观组织结构的精确调控，解决了镨元素导致温度稳定性降低和磁性能下降的难题，实现了产业化应用推广，研制的镨基无重稀土磁体磁性能达到： $B_r = 14.01$ kGs， $H_{cj} = 18.14$ kOe， $(BH)_{max} = 47.23$ MGOe，处于国际领先水平。

创新技术四：电泳沉积晶界扩散技术制备高矫顽力稀土永磁材料

利用重稀土晶界扩散调控磁体晶界精细结构来进一步挖掘材料的矫顽力潜力，先后发展了速凝片晶界扩散技术、电沉积晶界扩散技术等一系列磁体晶界表面扩散技术，实现重稀土高质化利用。采用电沉积的方法成功在磁体表面制备出均匀连续、厚度可控的重稀土富集涂层，扩散后在主相晶粒表层形成“core-shell”结构和晶界相增厚共同作用，

在相当于消耗 1.2 wt.%的 Dy 的条件下使磁体矫顽力提高~6.5 kOe, 实现了重稀土的高效利用。该方法与现在普遍采用的涂覆、热蒸发扩散相比, 对矫顽力的增强效果最好, 并能够精确控制重稀土扩散量及矫顽力增强幅度, 利于大规模产业推广。

五、主要完成人及技术贡献:

排名	姓名	技术职称	工作单位	对本项目技术创造性贡献	曾获国家、省科技奖励情况
1	闫阿儒	研究员	中国科学院宁波材料技术与工程研究所	提出高性能高稳定稀土永磁材料研发思路并指导研发完成	2014 年国家科学技术进步二等奖, 2014 年北京市科学技术奖一等
2	郭帅	副研究员	中国科学院宁波材料技术与工程研究所	完成无重稀土高矫顽力稀土永磁材料与 Pr 基高矫顽力稀土永磁材料关键技术研发	无
3	陈仁杰	研究员	中国科学院宁波材料技术与工程研究所	完成超高矫顽力稀土永磁材料研发	无
4	魏中华	助理经济师	浙江英洛华磁业有限公司	完成 Pr 基稀土永磁材料研发与产业化	无
5	陈岭	高级工程师	中国科学院宁波材料技术与工程研究所	完成稀土永磁材料晶界扩散技术研发, 完成无重稀土高矫顽力稀土永磁材料研发	无
6	易鹏鹏	高级工程师	宁波松科磁材有限公司	完成稀土永磁材料晶界扩散技术研发与产业化应用, 完成高性能高稳定性稀土永磁材料研发与产业化	无
7	刘壮	副研究员	中国科学院宁波材料技术与工程研究所	完成 Pr 基稀土永磁材料研发	无
8	贺琦军	高级工程师	宁波招宝磁业有限公司	完成超高矫顽力稀土永磁材料产业化技术应用	无
9	严长江	工程师	宁波科田磁业有限公司	完成高 Pr 含量稀土永磁材料研发与产业化, 完成无重稀土高矫顽力稀土永磁材料产业化应用	无
10	范逢春	无	宁波同创强磁材料有限公司	完成稀土永磁材料晶界扩散技术研发与产业化应用	无
11	曹学静	助理研究员	中国科学院宁波材料技	完成稀土永磁材料晶	无

			术与工程研究所	界扩散技术研发	
12	林建强	工程师	宁波招宝磁业有限公司	完成超高矫顽力稀土永磁材料产业化技术应用	无

六、主要完成单位及创新推广贡献

排名	单位名称	对本项目科技创新和推广应用支撑作用情况
1	中国科学院宁波材料技术与工程研究所	完成超高矫顽力稀土永磁材料关键技术研发，发明涡流感应热处理技术、电泳沉积晶界扩散技术，开发Pr基高矫顽力稀土永磁材料、无重稀土永磁材料
2	宁波松科磁材有限公司	完成稀土永磁材料晶界扩散技术研发与产业化应用，完成高性能高稳定性稀土永磁材料产业化
3	宁波科田磁业有限公司	完成高Pr含量稀土永磁材料研发与产业化，完成无重稀土高矫顽力稀土永磁材料产业化应用，完成高性能高稳定性稀土永磁材料产业化
4	浙江英洛华磁业有限公司	完成Pr基稀土永磁材料研发与产业化，完成高性能高稳定性稀土永磁材料产业化
5	宁波招宝磁业有限公司	完成超高矫顽力稀土永磁材料产业化技术应用，完成高性能高稳定性稀土永磁材料产业化
6	宁波同创强磁材料有限公司	完成稀土永磁材料晶界扩散技术研发与产业化应用，完成高性能高稳定性稀土永磁材料产业化

七、经济（社会）效益

1. 直接经济效益

（单位：万元）

单位名称	2014年			2015年			2016年		
	销售收入	税收	利润	销售收入	税收	利润	销售收入	税收	利润
宁波松科磁材有限公司	15832.70	1108.29	1899.92	13482.38	943.77	1483.06	15686.56	941.19	1537.28
宁波科田磁业有限公司	13197.5	1178.8	1747.6	14361.1	1114.6	1544.4	13902	1311	1737
浙江英洛华磁业有限公司	10359.23	621.36	1056.62	12362.11	706.91	1636.51	16451.39	891.62	2191.55
宁波招宝磁业有限公司	34657	538	1306	30915	704	1965	28669	848	1678
宁波同创强磁材料有限公司	4200	320	165	5847	101	198	7492	171	576
合计	78246.43	3766.45	6175.14	76967.59	3570.28	6826.97	82200.95	4162.81	7719.83

2. 社会效益

通过本项目的实施及产业化应用推广，突破了一系列高端稀土永磁材料的关键制备技术并获得相关核心专利，大幅提高了稀土资源的利用效率，降低了产品制造中的资源消耗，促进了我国稀土永磁产业的健康可持续发展。所研发并产业化实施的重稀土减量化技术推广应用至行业内，获得的高稳定性稀土永磁材料满足高技术领域及尖端技术领域需求，打破了发达国家在高附加值高矫顽力磁体产业化技术的垄断，提升了我国在高附加值关键产品方面的研究水平及生产能力，优化了稀土永磁材料的产业结构并推动其可持续发展。

1. 本项目已培养 9 名博士和 4 名硕士研究生，博士后 8 名，工程师 2 名，并为企业培养和输送技术骨干 15 名。

2. 本项目在相关企业的推广应用，提升了企业的技术实力和产品的竞争力。在宁波松科磁材有限公司推广应用“高稳定性高服役稀土永磁材料关键制备技术”和“重稀土减量化及无重稀土高矫顽力磁体关键制备技术”，在浙江英洛华磁业有限公司推广应用“镨基稀土永磁材料及其产业化技术”，在宁波科田磁业有限公司推广应用“高 Pr 含量高矫顽力稀土永磁材料关键制备技术”和“无重稀土高矫顽力稀土永磁材料关键制备技术”，在宁波招宝磁业有限公司推广应用“耐高温超高矫顽力稀土永磁材料关键制备技术”，在宁波同创强磁材料有限公司推广应用“耐高温超高矫顽力稀土永磁材料关键制备技术”和“重稀土减量化及无重稀土高矫顽力磁体关键制备技术”。开发出 38SH、42SH、45SH、37AH 等高端稀土永磁材料，并成功进入风电、新能源汽车电机等高端应用市场。2014-2016 年，推广应用企业新增销售收入达 237414.97 万元，新增利润 20721.94 万元，新增税收 11499.54 万元。

3. 通过本项目开展的新技术革新，突破高稳定性磁体制备技术瓶颈，使材料的磁性能、服役性达到或超过国外发达国家水平，为新能源技术和节能技术用永磁材料的生产提供技术支撑。取得了一批具有国际领先水平、明确应用前景的创新性研究成果，发展具有自主知识产权的永磁新材料和新技术，实现稀土资源的高质化利用，降低能耗并减少环境污染，为我国稀土科技和应用发展决策提供科学依据，引导我国稀土永磁材料产业的升级，为增强国际竞争能力提供人才保障和技术支撑。

八. 推广应用情况

应用单位名称	起止时间	单位联系人电话	推广应用量(情况)	销售收入(万元)	税收(万元)
博世(中国)投资有限公司	2008年3月-2013年8月	喻家庆 /18019026127	开展耐高温超高矫顽力稀土永磁材料装机实验验证，满足混合动力及纯电动汽车牵引电机需求	0	0

九、代表性论文论著及作者

作者	论文专著名称/刊物	年卷页码 (X年 X卷 X页)	SCI 他 引	他 引 总
Shuai Guo, Qiaoying Zhou, Renjie Chen, Don Lee, Aru Yan	Microstructure and magnetic properties of sintered Nd-Fe-B magnets with high hydrogen content/J. Appl. Phys.	2011 年 109 卷 07A734 页	3	5
丁勇, 陈仁杰, 郭帅, 刘兴民, 李东, 闫阿儒	添加 Dy 元素对钕铁硼速凝片微观组织和磁性影响研究/物理学报	2011 年 60(5) 卷 057103 页	0	1
Shuai Guo, Renjie Chen, Bo Zheng, Guanghui Yan, Don Lee, Aru Yan	Effect of Temperature Gradient on the Microstructure of the Rapidly Solidified Nd-Fe-B Strips/IEEE Trans. Magn.	2011 年 47(10) 卷 3267-3269 页	3	3
Youhao Liu, Shuai Guo, Renjie Chen, Don Lee, Aru Yan	Effect of heat treatment on microstructure and thermal stability of Nd-Fe-B sintered magnets/IEEE Trans. Magn.	2011 年 47(10) 卷 3270-3272 页	6	6
Guanghui Yan, Renjie Chen, Yong Ding, Shuai Guo, Don Lee, Aru Yan	The preparation of sintered NdFeB magnet with high-coercivity and high temperature-stability/J. Phys.: Conf. Ser.	2011 年 266 卷 012052 页	7	16
Bicheng Chen, Xingmin Liu, Renjie Chen, Shuai Guo, Don Lee, Aru Yan	The mechanism of enhanced magnetic properties of sintered permanent magnets by substitution of Pr for Nd/ J. Alloys Compd.	2012 年 516 卷 73-77 页	5	9
Bicheng Chen, Xingmin Liu, Shuai Guo, Changjiaing Yan, Renjie	Design and Fabrication of Dy-free sintered permanent magnets with high coercivity/ J. App. Phys	2012 年 111 卷 07A710-07A712 页	1	1
Chaowei Lin, Shuai Guo, Wenbiao Fu, Renjie Chen, Don Lee, Aru Yan	Dysprosium Diffusion Behavior and Microstructure Modification in Sintered Nd-Fe-B Magnets via Dual-Alloy	2013 年 49(7) 卷 3233-3236 页	2	5
Jinyun Ju, Xu Tang, Renjie Chen, Jinzhi Wang, Wenzong Yin, Don Lee, Aru	Fine-grained NdFeB magnets prepared by low temperature pre-sintering and subsequent hot pressing/Chin. Phys. B	2014 年 24(1) 卷 017504 页	2	2
Xuejing Cao, Ling Chen, Shuai Guo, Renjie Chen, Gaolin Yan, Aru Yan	Impact of TbF ₃ diffusion on coercivity and microstructure in sintered Nd-Fe-B magnets by electrophoretic deposition/Scripta Mater.	2016 年 11 卷 40-43 页	0	2

Xuejing Cao, Ling Chen, Shuai Guo, Xiangbin Li, Pengpeng Yi, Aru Yan, Gaolin Yan	Coercivity enhancement of sintered Nd-Fe-B magnets by efficiently diffusing DyF3 based on electrophoretic deposition/J. Alloys Compd.	2015 年 631 卷 315-320 页	5	5
Ling Chen, Xuejing Cao, Shuai Guo, Jinghui Di, Guangfei Ding, Changjiang Yan, Renjie Chen, and Aru Yan	Coercivity Enhancement of Dy-Free Sintered Nd-Fe-B Magnets by Grain Refinement and Induction Heat Treatment/ IEEE Trans. Magn.	2015 年 51(11) 卷 2101403 页	1	1
Xuejing Cao, Ling Chen, Shuai Guo, Renjie Chen, Gaolin Yan, Aru Yan	Magnetic and Microstructural Properties of DyF3 -Coated Sintered Nd-Fe-B Magnets by Electrophoretic Deposition/ IEEE Trans. Magn.	2015 年 51(11) 卷 2101804 页	0	0
Guangfei Ding, Shuai Guo, Lingwen Cai, Ling Chen, Jian Liu, Don Lee, Aru Yan	Study on ultrafine-grained sintered Nd-Fe-B magnets produced from jet-milled HDDR powders/IEEE Trans. Magn.	2015 年 51(11) 卷 2102304 页	0	0
Xuejing Cao, Ling Chen, Shuai Guo, Fengchun Fan, Renjie Chen, Aru Yan	Effect of rare earth content on TbF3 diffusion in sintered Nd-Fe-B magnets by electrophoretic deposition/Scripta Mater.	2017 年 131 卷 24-28 页	0	0
Pengpeng Yi, Weijie Wang, Zhitong Wang, Aru Yan	Effects of Nb Addition on the Magnetic Properties and Exchange Coupling in the Melt Spun Nd _{13.3} Fe _{74.7-x} Co _{5.6} Ga _{0.4} B _{6.0} Nb _x Ribbons/Scientific Journal of Materials Science	2013 年 3(2) 卷 71-74 页	0	0

十、主要知识产权及发明人：

授权项目名称	知识产权类别	国别	授权号	发明人
一种烧结钕铁硼磁体材料及其制备方法	发明专利	中国	ZL 200910098064. 9	丁勇、陈仁杰、闫阿儒
提高烧结钕铁硼永磁材料性能的方法	发明专利	中国	ZL200910098063. 4	丁勇、陈仁杰、闫阿儒
一种提高烧结钕铁硼矫顽力的方法	发明专利	中国	ZL 200910101744. 1	郭帅、闫阿儒、李东

一种无钕无铽高矫顽力烧结稀土永磁体及其制备方法	发明专利	中国	ZL 201110048706.1	陈必成、刘兴民、李东、闫阿儒
低成本高矫顽力高磁能积烧结稀土永磁体及其制备方法	发明专利	中国	ZL 201110118478.0	陈必成、刘兴民、李东、闫阿儒
一种细晶粒各向异性致密化钕铁硼永磁体的制备方法	发明专利	中国	ZL201110371845.8	陈仁杰、唐旭、严长江、付文标、李东、闫阿儒
钕铁硼永磁体的制备方法	发明专利	中国	ZL201310351900.6	林建强
一种热稳定钕铁硼磁体的制备方法	发明专利	中国	ZL201510284570.2	林建强
实现粗粉二次研磨的气流磨装置	发明专利	中国	ZL201210155995.x	易鹏鹏
一种稀土永磁合金	发明专利	中国	ZL201310631686.x	易鹏鹏、汪维杰、卓开平、汪志通、包捷、王燕玲、卓金飞、卓桂丽、陈喜芬、卓开岳、李永敢
烧结钕铁硼废料再成型的方法	发明专利	中国	ZL201210236871.4	徐峰、王育平、周子翔、徐科勇
一种提高烧结钕铁硼磁体矫顽力的制造方法	发明专利	中国	ZL201310497038.X	徐峰、王育平、赵惠芬、刘茗
防止烧结钕铁硼磁体开裂的制造方法	发明专利	中国	ZL201310585772.1	徐峰、王育平
一种高性能烧结钕铁硼磁体和制备方法	发明专利	中国	ZL201410519324.6	徐峰、刘茗、王育平
一种无铬钝化膜的镀膜方法	发明专利	中国	ZL201010565262.4	樊熊飞、卢吉、陆钢峰、郑为亮
一种高性能钕铁硼磁体及其制备方法	发明专利	中国	ZL201310039127.X	赵红良
一种钕铁硼磁体及其制备方法	发明专利	中国	ZL201410240539.4	赵红良、范逢春、张子祥