

项目公示信息（科技进步奖）

一、项目名称：电磁复合材料控形控性及应用服役技术

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省教育厅

提名意见：由陕西科技大学、天津大学、南京理工大学、西安石油大学、上海市计量测试技术研究院、江西悦安新材料股份有限公司、西安英利科电气科技有限公司共同完成的《电磁复合材料控形控性及应用服役技术》完成了高性能吸波材料及其复合材料的理论设计、制备工艺、加工技术及应用的全过程研究，形成了围绕吸波材料性能调控、机理机制研究、测试组装方法、多功能电磁功能器件开发等一系列高水平科技成果。该项目的研究成果为提升宽频域、多功能电磁材料的开发及应用提供了新的材料与技术支撑，应用前景广阔、社会及经济效益显著。项目成果总体达到国际先进水平。提名材料齐全、规范，经完成单位公示，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省科学技术奖提名条件。特提名为陕西省科学技术二等奖。

三、项目简介

随着现代科技的迅速发展,特别是在电子信息、航空航天等领域,对材料科学的需求愈加严苛。电磁复合材料因其独特的电磁性能在这些领域中扮演着核心角色。传统的电磁吸波材料虽然能够满足基本的吸波需求,但面临吸波效率低、频带窄、重量大和环境适应性差等多方面限制,难以适应复杂且多变的现代应用场景。为了突破这些技术瓶颈,陕西科技大学牵头,联合天津大学、南京理工大学、西安石油大学、上海市计量测试技术研究院、江西悦安新材料股份有限公司、西安英利科电气科技有限公司,共同开展了电磁复合材料的控形控性技术研发。这一跨学科、跨领域的合作旨在开发出一种新型的高效能电磁复合材料,以满足未来科技发展的高标准需求,对未来推动我国电磁波吸收材料的发展,保障我国安全具有重要的应用价值和战略价值。

(一) 技术内容

本项目围绕电磁波吸收材料的形状可控和性能自主调节两方面,聚焦于纳米吸波材料制备的核心工艺和组装技术,通过坚持不懈的研发和性能迭代优选,形成了吸波材料控形控性技术标准和产业规范。以引领者的角色推动多功能性吸波材料的技术自主可控和大规模应用,实现中国吸波技术领域达到国际领先水平。本项目的主要技术内容包括:1)开发了一种基于纳米技术的电磁复合材料制备方法,利用纳米尺度的精确控制,实现了复合材料内部结构的优化配置,在微观层面改善材料的电磁性能;2)研发了一种新型的宽频带吸波材料,采用多层结构,每层具有不同的介电特性,能够在一个更宽的频率范围内有效吸收电磁波;3)提出电磁伪装吸波材料“限域耦合”设计思想,发展软磁/介电界面增强策略,阐明其耗散机制,构建多元协同调控法,创制三明治、中空、核壳等纳米复合吸波材料;4)提出磁场诱导可控制备普适法,发明永磁装置生长低维磁性吸波材料,揭示网络桥接耗散机制,突破精准制备难题,创制超薄轻质宽频强吸收系列材料。

(二) 技术价值与贡献

1. 首创纳米技术控制电磁材料复合方法

项目团队通过“电弧熔炼-速凝甩带-机械球磨”关键技术,分别制备了Nd、La 掺杂 FeCo 合金 $(\text{Nd/La})_x(\text{Co}_{0.72}\text{Fe}_{0.28})_{1-x}$ ($x=0.025, 0.075, 0.1$) 高性能吸波剂粉体材料。对于Nd 掺杂样品,随着掺杂量的提高,

Ku 波段的吸收性能明显增强,有效吸收带宽从 2.11 GHz 拓宽至 5.19 GHz。对于 La 掺杂的样品,各掺杂量下的钴铁合金均在 2-18 GHz 都呈现强电磁波吸收,在较低掺杂量下,样品可在 S 波段获得 -76 dB 的强吸收,并且在 X 波段附近获得了 5.99 GHz 的有效吸收带宽。通过提升 La 掺杂量,有效吸收带宽扩充至 7.34 GHz,在保持了中低频强吸收能力的同时,有效吸收频带也逐渐向高频移动,达到了国际同行先进水平。

2. 首创多层阻抗渐变宽频吸波复合材料的电磁散射模型

项目团队提出了一种用于多层阻抗渐变吸波稀土材料设计的改进分布式估计算法,具有平衡局部和全局搜索能力,有效减少仿真次数,具有效率高、鲁棒性强的特点,并具体探究了多种纳米材料的吸波性能与厚度的关系。基于此算法,对纳米基多层阻抗渐变薄复合材料的有效吸波带宽和厚度进行了优化,在初始种群中最优的个体的吸波频带为 10.2-12.8 GHz 的条件下,经算法 IEDA 优化后吸波频带可达到 7.5-16.9 GHz,覆盖 X 波段,并部分覆盖 C、Ku 波段,相对带宽达到 77.1%,表明优化后的多层阻抗渐变吸波复合材料的等效阻抗与自由空间达到了良好的匹配效果,达到了国际同行先进水平。

3. 首创软磁/介电异质界面限域电磁耦合增强新策略

发明了一种多元、多尺度、多界面电磁耦合的性能调控方法。这种方法综合考虑了材料的组成、结构和界面特性,实现了电磁波吸收性能的多效协同优化。在实际材料开发上,我们研制了包括三明治结构、中空结构、核壳结构在内的多种异质吸波纳米复合材料。这些结构的设计使得材料在超宽频范围内展现出优异的吸波性能。相较于现役材料,这些新型复合材料的密度降低了 50-70%,有效吸波频宽扩展到了现役的 3 倍以上,反射损耗在多个频段内能够达到 -40 dB 以上,大幅提高了材料的实用性和效率。该项目的研究成果为提升我国电子设备在宽频电磁侦查下的生存与突防能力提供了新的材料与技术支撑,应用前景广阔、经济效益显著。

4. 研发出低维磁性吸波材料的永磁体磁场诱导生长新装置

创新性地开发了永磁体磁场诱导生长装置。永磁体磁场诱导生长装置可在预设磁场中定向控速生长,精准定制微观结构,同步提升吸波性能。揭示低维磁性材料的网络桥接耗散机制,据此突破功能基元精准制备瓶颈,创制系列新型吸波材料。所得材料涂层厚仅 1 mm、密度 0.7 kg/m³、树脂填充率低至 2 wt%,兼具宽频强吸收与大幅减重优势,应用前景广阔。

(三) 应用推广及效益情况

企业应用:本技术在江西悦安新材料股份有限公司、西安英利科电气科技有限公司等合作企业中的应用已经开始产生明显效益,以江

西悦安新材料股份有限公司为例，从 2020 年引入纳米技术控制电磁材料复合方法和永磁体磁场诱导生长新装置后，仅 2023 年新增销售额达 1754.84 万元，新增利润达 1044.2 万元。这些企业利用新开发的电磁复合材料，不仅改善了产品性能，还扩展了产品的市场应用范围。

社会效益：该技术的实施和推广对环境保护和资源节约产生了积极影响。高效的材料利用和环保的生产过程减少了对环境的负担，符合国家对可持续发展的战略目标。此外，通过提供高性能材料，本技术还促进了国家在全球科技竞争中的地位提升，加强了国家的科技安全 and 经济独立性。

四、客观评价

本项目围绕电磁波吸收材料的形状可控和性能自主调节两方面，聚焦于纳米吸波材料制备的核心工艺和组装技术，通过坚持不懈的研发和性能迭代优选，形成了吸波材料控形控性技术标准和产业规范。以引领者的角色推动多功能性吸波材料的技术自主可控和大规模应用，实现中国吸波技术领域达到国际领先水平。

(1) 科技成果专家评价结论

2024 年 3 月 31 日、2024 年 4 月 15 日，中国工程院院士徐卫林，中国科学院院士沈保根等专家对项目进行鉴定认为，(1) 提出了电磁伪装吸波材料的磁场诱导可控制备普适性新方法，发明了低维磁性吸波材料的永磁体磁场诱导生长新装置，阐明了低维磁性材料的网络桥接电磁波耗散新机制，突破了低维磁性吸波材料功能基元精准制备关键技术难题，创制了系列涂层厚度薄、密度轻、频带宽、吸波能力强的低维吸波材料。(2) 提出了电磁伪装吸波材料的限域电磁耦合组构设计新思想，发展了软磁/介电异质界面限域电磁耦合增强新策略，揭示了限域空间电磁耦合增强电磁波耗散的物理机制，发明了电磁伪装吸波材料多元、多尺度、多界面电磁耦合多效协同性能调控新方法，研制了三明治结构、中空结构、核壳结构等异质吸波纳米复合材料，吸波材料密度比现役降低 50-70%，复合材料有效吸波频宽是现役的 2 倍。评价结果：该项目主要完成了低维宽频吸波材料及其复合材料的理论、制备、工艺及应用的全过程自主研究，形成了从宽频吸波材料构型设计方法到多重损耗机制吸波材料跨尺度可控构筑技术再到多种轻量化电磁伪装复合材料的系统成果。提升电子装备在宽频电磁侦查下的生存与突防能力，应用前景广阔、经济效益显著。

(2) 该项目生产的宽频吸波材料及其复合材料

创新点一：通过纳米吸波材料制备的核心工艺和组装技术制备形

状可控和性能自主调节的电磁波吸收波材料，首创纳米技术控制电磁材料复合方法。项目团队将低价值稀土镧，铈与铁钴合金熔炼，并根据成果中建议的雾化，球磨工艺参数对合金进行制粉及后处理，成功开发出电磁参数与当前市售羰基铁粉相近的镧，铈共掺型铁钴合金纳米片。采取该成果宁波中杭磁材有限公司成功开发了极具市场竞争力的新型吸波粉体材料，区别于传统羰基铁粉需依靠剧毒五羰基铁制备，安评，环评要求高，生产线上风险点多，该成果环境友好，大幅降低了总成本。

创新点二：首创多层阻抗渐变宽频吸波复合材料的电磁散射模型，项目团队提出了一种用于多层阻抗渐变吸波稀土材料设计的改进分布式估计算法，具有平衡局部和全局搜索能力，有效减少仿真次数，具有效率高、鲁棒性强的特点，并具体探究了四种稀土材料的吸波性能与厚度的关系。基于此算法，对稀土基多层阻抗渐变薄复合材料的有效吸波带宽和厚度进行了优化，在初始种群中最优的个体的吸波频带为 10.2-12.8 GHz 的条件下，经算法 IEDA 优化后吸波频带可达到 7.5-16.9 GHz，覆盖 X 波段，并部分覆盖 C、Ku 波段，相对带宽达到 77.1%，表明优化后的多层阻抗渐变吸波复合材料的等效阻抗与自由空间达到了良好的匹配效果，达到了国际同行先进水平。

创新点三：首创软磁/介电异质界面限域电磁耦合增强新策略，发明了一种多元、多尺度、多界面电磁耦合的性能调控方法。这种方法综合考虑了材料的组成、结构和界面特性，实现了电磁波吸收性能的多效协同优化。在实际材料开发上，我们研制了包括三明治结构、中空结构、核壳结构在内的多种异质吸波纳米复合材料。这些结构的设计使得材料在超宽频范围内展现出优异的吸波性能。相较于现役材料，这些新型复合材料的密度降低了 50-70%，有效吸波频宽扩展到了现役的 3 倍以上，反射损耗在多个频段内能够达到 -40 dB 以上，大幅提高了材料的实用性和效率。中国科学院院士沈保根评价该项目的研究成果为提升电子装备在宽频电磁侦查下的生存与突防能力提供了新的材料与技术支撑，应用前景广阔、经济效益显著。项目成果总体达到国际先进水平。

创新点四：研发出低维磁性吸波材料的永磁体磁场诱导生长新装置，阐明了低维磁性材料的网络桥接电磁波耗散新机制，突破了低维磁性吸波材料功能基元精准制备关键技术难题，创造了系列涂层厚度薄，密度轻，频带宽，吸波能力强的低维吸波材料，吸波材料在树脂中填充比由传统 $>30\text{wt}\%$ 降低至 $<10\text{wt}\%$ ，最低达 $2\text{wt}\%$ ，复合涂层面密度由传统 $>1.5\text{kg}/\text{m}^2$ 降低至 $0.7\text{kg}/\text{m}^2$ ，厚度低至 1mm。中国工程院院士徐卫林评价该项目的研究成果为提升电子装备在宽频电磁侦查下的生存与突防能力提供了新的材料与技术支撑，应用前景广阔、经济

效益显著。项目成果总体达到国际先进水平。

五、应用情况

该项目围绕电磁波吸收材料的形状可控和性能自主调节两方面，聚焦于纳米吸波材料制备的核心工艺和组装技术，通过坚持不懈的研发和性能迭代优选，形成了吸波材料控形控性技术标准和产业规范。

首先该项目完成了电磁复合材料纳米技术的制备，通过“电弧熔炼-速凝甩带-机械球磨”关键技术，通过调控 Nd、La 之间的配比在保持了中低频强吸收能力的同时，有效吸收频带也逐渐向高频移动，通过多层阻抗渐变吸波稀土材料设计的改进分布式估计算法，优化后的多层阻抗渐变吸波复合材料的等效阻抗与自由空间达到了良好的匹配效果，达到了国际同行先进水平。

其次同时提出了电磁伪装吸波材料的限域电磁耦合组构设计这种新思想，通过电磁伪装吸波材料多元、多尺度、多界面电磁耦合多效协同性能调控新方法，研制了三明治结构、中空结构、核壳结构等异质吸波纳米复合材料。提出了电磁伪装吸波材料的磁场诱导可控制备普适性新方法，发明了低维磁性吸波材料的永磁体磁场诱导生长新装置，阐明了低维磁性材料的网络桥接电磁波耗散新机制，突破了低维磁性吸波材料功能基元精准制备关键技术难题，创制了系列涂层厚度薄、密度轻、频带宽、吸波能力强的低维吸波材料。该项目的研究成果为提升电子装备在宽频电磁侦查下的生存与突防能力提供了新的材料与技术支撑，应用前景广阔、经济效益显著。项目成果总体达到国际先进水平。本项目生产出的电磁吸收材料已为江西悦安新材料股份有限公司、西安英利科电气科技有限公司实现了大批量连续供应。

(1) 该项目在整体技术应用，引领我国电磁材料的高速发展

2018 年悦安新材料股份获批江西省羰基金属粉体材料工程研究中心，悦安公司的主要产品羰基铁粉，悦安公司为国内自动化程度高、质控手段完善、工艺技术先进、产品产销量大的羰基铁粉生产企业(产能 5000 吨/年)。开发出羰基铁粉系列产品和超细合金粉末，各项指标达到国外同类产品技术性能指标。悦安公司的诞生，结束了国内羰基铁生产产量低、低水平徘徊的历史，开辟了利用外资、引进技术、加快发展的道路，引领了我国电磁吸波材料及相关企业的高质量发展。

(2) 企业应用

本技术在江西悦安新材料股份有限公司、西安英利科电气科技有限公司等合作企业中的应用已经开始产生明显效益，以江西悦安新材料股份有限公司为例，从 2020 年引入纳米技术控制电磁材料复合方法和永磁体磁场诱导生长新装置后，仅 2023 年新增销售额达 1754.84 万元，新增利润达 1044.2 万元。该公司采用由陕西科技大学，天津大学，南京理工大学等采用“电磁复合材料控形控性及应用服役技术”

联合开发的“高性能磁性多孔电磁波吸收粉体材料”作为复合材料中的吸波功能填料,开发出吸波聚氨酯涂层与吸波纤维增强环氧树脂复合板,经严格检测实现以下指标:1. 吸波材料填充比由传统 40-50wt% 降低至 15wt%, 最低可达 5%; 2. 复合材料有效吸波频宽较传统产品提升 60%; 3. 复合涂层, 板材厚度均匀, 无气泡, 剥落, 裂纹, 夹杂物等缺陷。

这些企业利用新开发的电磁复合材料, 不仅改善了产品性能, 还扩展了产品的市场应用范围。例如, 在电力系统的电磁干扰管理、电子设备的隐身材料应用等方面, 新材料都显示出了优越的性能, 引领我国电磁材料行业及相应企业的高速发展。

表 1: 主要应用单位情况

序号	单位名称	应用的技术	应用对象及规模	应用起止时间	单位联系人
1	南京恒新新材料有限公司	电磁复合材料控性及应用服役技术	低频脉冲防护涂料/涂层	2020 年 1 月至今	张大利
2	广州市华维诺科技有限公司	电磁复合材料控性及应用服役技术	吸波/屏蔽一体化柔性海绵垫片	2020 年至今	黄新民
3	西安英利科电气科技有限公司	电磁复合材料控性及应用服役技术	吸波聚氨酯涂料与吸波纤维增强环氧树脂复合板	2020 年至今	李杰
4	江西悦安新材料股份有限公司	电磁复合材料控性及应用服役技术	吸波聚氨酯涂料与吸波纤维增强环氧树脂复合板	2020 年 1 月至今	朱敏峰

六、主要知识产权和标准规范等目录（限 10 条）

序号	知识产权类别	知识产权具体名称	国家 (地区)	授权号	授权日期	证书编号	权利人	发明人
1	论文	Dual-Step Redox Engineering of 2D CoNi-Alloy Embedded B, N-Doped Carbon Layers Toward Tunable Electromagnetic Wave Absorption and Light-Weight Infrared Stealth Heat Insulation Devices, <i>Advanced Materials</i> , 2024, 36, 2403322	其它	2024, 36, 2403322	2024 年 5 月 1 日	Advanced Materials	Shaanxi University of Science and Technology, etc.	W. Huang*, M. Song, S. Wang, B. Wang, J. Ma, T. Liu, Y. Zhang, Y. Kang, R. Che
2	论文	Phase Engineering in a Twin-Phase β/γ -MoCx Lightweight Nanoflower with Matched Fermi Level for Enhancing Electron Transport Across the Polarized Interfaces in Electromagnetic Wave Attenuation, <i>Advanced Functional Materials</i> , 2024, 34, 2410194	其它	2024, 34, 2410194	2024 年 9 月 19 日	Advanced Functional Materials	Shaanxi University of Science and Technology, etc.	T. Liu, C. Wang, X. Zhang, H. Huo, H. Li, W. Zhang, M. Ren, C. Yan, H. Huang*, W. Huang*
3	论文	In situ Mechanical Foaming of Hierarchical Porous MoC for Assembling Ultra-light, Self-cleaning, Heat-insulation, Flame-retardant	其它	2024, 35, 2414910	2024 年 10 月 10 日	Advanced Functional Materials	Shaanxi University of Science and Technology, etc.	Y. Zhang*, Y. Tian, N. Xu, P. Cui, L. Guo, J. Ma, Y. Kang, L. Qin, F. Wu*, L.

		and Infrared-stealth Device, <i>Advanced Functional Materials</i> , 2024, 35, 2414910						Zhang, W. Huang*
4	论文	High-density Nanopore Confined Vortical Dipoles and Magnetic Domains on Hierarchical Macro/Meso/Micro/Nano Porous Ultra-Light Graphited Carbon for Adsorbing Electromagnetic Wave, <i>Advanced Science</i> , 2023, 10 (28), 2303217	其它	2023, 10 (28), 2303217	2023 年 8 月 1 日	Advanced Science	Shaanxi University of Science and Technology, etc.	W. Huang*, X. Zhang, J. Chen, Q. Qiu, Y. Kang, K. Pei, S. Zuo, and R. Che*
5	论文	Multifunctional MoCx hybrid polyimide aerogel with modified porous defect engineering for highly efficient electromagnetic wave absorption, <i>Small</i> , 2024, 20, 2308378	其它	2024, 20, 2308378	2024 年 10 月 30 日	Small	Shaanxi University of Science and Technology, etc.	T. Liu, Y. Zhang, C. Wang, Y. Kang, M. Wang, F. Wu, W. Huang*
6	论文	Hetero-interface engineering on 9.0 wt% CoOx-doped CeO2 nanorods as electromagnetic wave absorber and integrated into multifunctional aerogel, <i>Small</i> , 2024, 20, 2311389	其它	2024, 20, 2311389	2024 年 3 月 14 日	Small	Shaanxi University of Science and Technology, etc.	W. Huang*, Wei Wang, C. Su, M. Song, Y. Kang, G. Fei*
7	论文	Thermally tailoring magnetic molecular sponges through self-propagating combustion	其它	2023, 6: 54	2023 年 1 月 10 日	Advanced Composites and Hybrid	Nanjing University of Science and	M. Sun, W. Cao, P. Zhu, Z. Xiong, C. Chen, J. Shu*,

		to tune magnetic-dielectric synergy towards high-efficiency microwave absorption and Attenuation, <i>Advanced Composites and Hybrid Materials</i> , 2023, 6: 54				Materials	Technology, etc.	W. Huang*, Fan Wu*
8	发明专利	钴铁负载多孔碳海绵吸波材料的原位燃烧合成方法	中国	CN 115771889 B	2024 年 05 月 10 日	证书号 第 6985902 号	陕西科技大学	黄文欢, 朱鹏元, 卢兴, 杨雨豪, 张亚男, 康祎璠, 赵宁
9	发明专利	模板剂导向合成的多孔配位聚合物及其制备与应用, 发明专利	中国	CN 107417926 B	2020 年 11 月 27 日	证书号 第 7579774 号	陕西科技大学	张亚男, 成晶, 张鹏, 黄文欢, 张昱
10	计算机软件著作权	多层复合吸波材料电磁散射系数快速分析软件[简称:FlatRTA]V1.0	中国	2022SR05402 76	2022 年 04 月 28 日	软著登字第 9494475 号	南京理工大学	陶诗飞, 裴昌保, 吴凡, 王昊, 刘思行, 丁振东, 刘北辰

七、主要完成人情况

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目贡献
黄文欢	1	副院长	教授	陕西科技大学	陕西科技大学	科技创新 1 中开发基于纳米技术的电磁复合材料制备方法面临多项技术难题，有效解决纳米粒子的精确控制与批量生产的平衡，纳米粒子与基体材料的兼容性与界面稳定性，高活性纳米材料的稳定性问题等问题。成果 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 的主要完成人。
马嘉呈	2	无	讲师	陕西科技大学	陕西科技大学	科技创新 1 中开发基于纳米技术的电磁复合材料制备方法面临多项技术难题，有效解决纳米粒子与基体材料的兼容性与界面稳定性，高活性纳米材料的稳定性问题等问题。成果 1, 3 的主要完成人。
吴凡	3	无	教授	天津大学	天津大学	在科技创新 2 中首创多层阻抗渐变宽频吸波复合材料，引入分布式估计算法（IEDA），研发自适应材料分层技术先进控制算法，精细控制微观结构。科技创新 3 中提出多限域电磁耦合界面技术，多尺度结构的精细控制。成果 3, 5, 7, 10 的主要完成人。
康祎璠	4	无	副教授	陕西科技大学	陕西科技大学	科技创新 1 中开发基于纳米技术的电磁复合材料合成和性能调控面临多项技术难题，以及纳米材料与基材间的稳定性问题。成果 1, 3, 4, 5, 6, 8 的主要完成人。
张亚男	5	无	副教授	陕西科技大学	陕西科技大学	科技创新 1 中创新纳米粒子的精确控制技术，显著提升材料性能一致性，通过结构调控技术增强了材料本征性能。成果 1, 3, 5, 8, 9 的主要完成人。
刘潼	6	无	讲师	西安石油大学	西安石油大学	科技创新 1 中提出了自适应纳米特征结构，提高了其环境稳定性。成果 1, 2, 5 的主要完成人。

陈超婵	7	无	高级工程师	上海市 计量测 试技术 研究院	上海市 计量测 试技术 研究院	科技创新 2 中，研发自适应材料分层技术先进控制算法，科技创新 3 中，微观结构自适应调控技术：通过自适应控制技术，根据外部电磁环境的变化动态调整微观结构。成果 7 的主要完成人。
陶诗飞	8	无	副研究员	南京理 工大学	南京理 工大学	科技创新 2 中首创多层阻抗渐变宽频吸波复合材料，引入分布式估计算法（IEDA），研发自适应材料分层技术先进控制算法，精细控制微观结构。成果 10 的主要完成人。
王兵	9	总经理	高级工 程师	江西悦 安新材 料股份 有限公 司	江西悦 安新材 料股份 有限公 司	在科技创新 3 中，提出微观结构自适应调控技术：通过自适应控制技术，根据外部电磁环境的变化动态调整微观结构；轻量化材料技术：采用中空结构纳米材料串联方案和优化制造工艺，大幅减轻了材料的重量。项目实施，专利成果的推广应用。
吉少波	10	总工 程师	高级工 程师	西安英 利科电 气科技 有限公 司	西安英 利科电 气科技 有限公 司	在科技创新 3 中，提出(1)轻量化材料技术：采用中空结构纳米材料串联方案和优化制造工艺，大幅减轻了材料的重量(2)多限域电磁耦合界面技术：通过在微纳米尺度上构建软磁与介电界面，增强了界面处的电磁耦合作用项目实施专利成果的推广应用。

八、主要完成单位及创新推广贡献

完成单位 1-陕西科技大学：

1. 组织人力进行实验方案设计与研究，监督管理项目实施。
2. 在实验场地、仪器设备方面、分析测试仪器的使用以及评审验收等方面为项目提供便利和支持。
3. 利用会议、交流会等多种渠道，宣传推广项目。
4. 在项目实施过程中，陕西科技大学给予了很大支持；对项目的进度进行定期跟踪和把关，并配备了各科专业技术人员，在技术上给予关键性指导，在项目前期提供了两间实验室和相应实

验仪器设备等，并负责药品的采购；在实验期间，学校的轻化工助剂重点实验室承担了各种实验结果的检测 and 结果分析。

5. 作为本项目的主要完成单位，材料科学与工程学院及科技处等单位在科研工作安排、研究条件、实验检测设备、技术支持和人员配备等方面提供了大力支持，确保了项目的提前完成，并在理论和实际应用方面取得了显著成绩。

完成单位 2-天津大学：

1. 提供先进的材料制备和表征技术支持，参与核心技术研发。

2. 在项目研究中提供高水平实验平台和专业设备，确保技术实验的高效开展。

3. 通过学术交流和论文发表，积极推广项目成果。

4. 在项目实施中，天津大学提供了先进的实验技术和设备支持，尤其在纳米材料制备和性能测试环节发挥了重要作用；学校配备了专业技术团队，定期参与技术研讨和方案优化，并在项目中期提供了额外的资金和设备支持。

5. 作为本项目的重要参与单位，材料科学与工程学院在技术创新、实验条件和成果转化方面提供了关键支持，确保了项目在材料制备和性能优化方面的突破。

完成单位 3-南京理工大学：

1. 提供电磁性能测试和仿真分析技术支持，参与项目关键技术验证。

2. 提供先进的实验室和测试设备，确保实验数据的准确性。

3. 通过技术报告和行业会议推广项目技术成果。

4. 在项目实施过程中，南京理工大学提供了专业的电磁性能测试平台和仿真分析技术支持，尤其在电磁耦合机制研究中发挥

了重要作用；学校技术团队积极参与实验设计和数据分析，并在项目后期提供了额外的技术咨询和支持。

5. 作为本项目的重要合作单位，电子工程与光电技术学院在电磁材料性能测试和理论研究方面提供了重要支持，确保了项目技术验证的可靠性。

完成单位 4-西安石油大学：

1. 提供材料性能优化与技术支持，参与极端条件下的实验验证。

2. 在实验平台上提供设备和专业技术，确保技术研究的全面性。

3. 通过学术交流和技術报告推广项目成果。

4. 在项目实施过程中，西安石油大学提供了材料性能优化技术支持，尤其在复杂环境下的材料稳定性研究中发挥了关键作用；学校技术团队协助优化了实验方案，并推动了相关技术在多领域的推广。

完成单位 5-上海市计量测试技术研究院：

1. 提供高精度计量测试和标准制定支持，确保项目数据的科学性。

2. 提供先进的测试仪器和环境控制设备，保障实验条件的稳定性。

3. 通过标准制定和行业培训推广项目技术应用。

4. 在项目实施过程中，上海市计量测试技术研究院提供了高精度的计量测试支持，尤其在材料性能参数标准化方面发挥了关键作用；研究院配备了专业团队，参与数据验证和标准制定，并在项目后期协助完成了技术规范的编制。

5. 作为本项目的重要支持单位，在计量测试和标准制定方面提供了技术保障，确保了项目成果的科学性和可推广性。

完成单位 6-江西悦安新材料股份有限公司

1. 提供产业化技术支持，参与新型电磁复合材料的应用研发。

2. 在企业生产环境中提供实验场地和设备，保障技术转化的顺利进行。

3. 通过市场推广和产品应用案例，推广项目技术成果。

4. 在项目实施过程中，江西悦安新材料股份有限公司积极推动技术成果的产业化应用，尤其在电力系统电磁干扰管理和电子隐身材料领域取得了显著成效。

5. 作为本项目的重要产业合作单位，在技术转化、产品优化和市场推广方面提供了关键支持，确保了项目成果的实际应用价值。

完成单位 7-西安英利科电气科技有限公司

1. 提供设备研发和技术优化支持，参与项目工程化实施。

2. 提供企业实验平台和专业设备，保障技术验证和应用的可行性。

3. 通过行业技术交流和产品展示推广项目成果。

4. 在项目实施过程中，西安英利科电气科技有限公司提供了设备研发和工艺优化的技术支持，尤其在永磁体磁场诱导生长装置的开发中发挥了重要作用；企业技术团队积极参与项目试验，并协助完成了低维磁性吸波材料的工程化应用。

5. 作为本项目的重要产业合作单位，在设备研发、技术支持和工程化转化方面提供了重要保障，推动了项目成果的产业化落地。

九、完成人合作关系说明

本项目由陕西科技大学、天津大学、南京理工大学、西安石油大学、上海市计量测试技术研究院、江西悦安新材料股份有限公司及西安英利科电气科技有限公司联合完成，完成人包括黄文欢（陕西科技大学）、马嘉呈（陕西科技大学）、吴凡（天津大学）、康祎璠（陕西科技大学）、张亚男（陕西科技大学）、刘潼（西安石油大学）、陈超婵（上海市计量测试技术研究院）、陶诗飞（南京理工大学）、王兵（江西悦安新材料股份有限公司）、吉少波（西安英利科电气科技有限公司）。以下为完成人之间的合作关系说明：

1. 项目总体协调与技术领导

黄文欢作为陕西科技大学的代表，担任项目总体协调人，负责技术路线制定、实验方案设计及项目实施的监督管理。马嘉呈、康祎璠和张亚男作为陕西科技大学团队成员，与黄文欢密切合作，共同负责纳米技术控制电磁材料复合方法及多层阻抗渐变宽频吸波复合材料的研发与优化。

2. 核心技术研发与实验支持

吴凡（天津大学）负责先进纳米材料制备及性能测试技术的开发，与陕西科技大学团队协作，完成了基于“电弧熔炼-速凝甩带-机械球磨”技术的 Nd、La 掺杂 FeCo 合金吸波剂粉体材料的制备。

3. 电磁性能测试与仿真分析

陶诗飞（南京理工大学）负责电磁性能测试和仿真分析工作，提供了专业的测试平台和分布式估计算法（IEDA）优化支持，与陕西科技大学团队合作，成功拓展了多层阻抗渐变吸波复合材料的吸波频带至 7.5-16.9 GHz。

4. 计量测试与标准制定

陈超婵（上海市计量测试技术研究院）负责高精度计量测试和数据验证，提供了先进的测试仪器和环境控制设备，与其他完成人合作完成了材料性能参数的标准化，确保了项目数据的科学性与可靠性。

5. 产业应用与技术转化

王兵（江西悦安新材料股份有限公司）负责项目成果的产业化应用，协调企业资源推动新型电磁复合材料在电力系统电磁干扰管理和电子设备隐身材料中的应用。吉少波（西安英利科电气科技有限公司）提供企业技术支持，参与设备研发和工艺优化，确保技术成果的工程化转化。

6. 技术支持与性能优化

刘潼（西安石油大学）在材料性能优化与复杂环境下的实验验证中提供了技术支持，协助优化了实验方案并提升了材料的稳定性和适用性。

7. 跨单位协作与成果整合

各完成人通过定期的技术研讨会、数据共享及联合实验，实现了跨单位的技术协同。陕西科技大学作为牵头单位，统筹项目进度；天津大学提供材料制备技术支持；南京理工大学负责性能验证；上海市计量测试技术研究院确保测试标准；江西悦安新材料股份有限公司及西安英利科电气科技有限公司推动产业应用。所有完成人共同参与了软磁/介电异质界面限域电磁耦合增强新策略的研发，推动了项目在理论与应用上的突破。

通过上述合作关系，各完成人分工明确、协作紧密，确保了项目的顺利完成及其技术成果的全面提升。