

2025 年度拟提名陕西省自然科学奖项目公示内容

一、项目名称

新型吸波材料的可控构筑、物理机制及应用

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省教育厅

提名意见：

高性能吸波材料的研发仍存在吸波剂输入阻抗与损耗能力相矛盾、微观电磁损耗物理机制不清、面向应用的整体型吸波材料设计匮乏等难点。

针对以上问题，西北工业大学吴宏景教授团队设计并构筑了多层壳核结构，优化了材料的阻抗匹配；通过阐明新型电磁损耗机制及微观因素与宏观参数之间的关键桥梁机制，弥补了微观电磁损耗物理机制研究的不足，进而推动了新型吸波材料研发成果的工程应用。5 篇代表论文（4 篇为 ESI 高被引论文）SCI 他引 981 次，得到了包括发展中国家科学院院士、国际知名期刊《Carbon》主编 Mauricio Terrones 教授等 13 名国外院士在内的 27 名国外知名学者以及朱美芳、彭金辉、邓龙江、申长雨、张跃、沈宝根、段宁、冯守华、邹志刚、周玉、张立同等 20 位国内院士和 41 名杰青、国家级领军人才在内的国内知名学者的高度评价。相关成果获“陕西高等学校科学技术研究优秀成果”一等奖。

在工程应用方面，该项目团队为华为公司定制开发了 U6G 低剖面超结构材料；开发的防除冰-隐身一体化凝胶材料已在中国空气动力研究与发展中心结冰与防除冰重点实验室取得良好的应用评价；与华秦科技联合研发的某型歼击机中温防腐隐身涂层已实现批量应用，直接产值超过 1300 万元。

成果材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省自然科学奖提名条件。提名该项目为陕西省自然科学二等奖。

三、项目简介

高性能吸波材料的研发，目前仍存在吸波剂输入阻抗与损耗能力相矛盾、微观电磁损耗物理机制不清、面向应用的整体型吸波材料设计匮乏等难点。针对以上问题，该项目设计并构筑了多层壳核结构，优化了材料的阻抗匹配；阐明了新型电磁损耗机制及微观因素与宏观参数之间的关键桥梁机制，弥补了微观电磁损耗物理机制研究的不足；构筑并优化了整体型吸波材料结构设计并推动其工程应用。

主要创新点如下：

(1) 拓展多层核壳结构合成方法学，促进新型吸波剂构筑

针对输入阻抗与损耗能力协同效应的科学问题，通过化学诱导自组装法构筑了多层壳核等特殊微纳结构，发现了缺陷诱导介电极化机制可以调制介电极化行为以匹配磁损实现阻抗匹配，解决了本征介电常数不易调控的问题。该研究成果的原创性还在于铁氧体多层核壳结构自组装方法学的拓展。亦通过碱活化发泡技术，构筑了中空多孔微纳结构，发现了通过表/界面修饰工程可有效改善材料表面阻抗匹配及其微波频段电磁响应特性。相关文章受到了国内外学者的广泛关注和正面引用，SCI 他引 350 次。发展中国家科学院院士、墨西哥科学院院士 Mauricio Terrones 教授指出该项目团队提出的核壳结构合成方法学促进了新型吸波体系构筑；中国材料研究学会副理事长、亚太材料科学院院士、深圳大学徐坚教授对该项目团队提出的中空多孔材料的合成方法给予了充分肯定。

(2) 揭示微观因素关键调控机制，建立新型电磁吸收物理模型

针对目前从阻抗匹配宏观角度阐述吸波机理仍不充分，长期缺乏微观角度下的电磁吸收物理模型的问题，必须揭示影响宏观参数（电磁参数、样品厚度等）的微观因素（缺陷、表界面等）及其关键调控机制，才能全面揭示微观电磁损耗物理机制。该项目原创性地提出了硒硫共掺策略，揭示了硒硫空位共存协同调控电磁特性的新机制；通过阳离子竞争反应策略和聚合物液体调控策略，揭示了离子竞争关键调控机制，建立了新型电磁吸收物理模型，弥补了吸波材料宏观阻抗匹配理论的不足。相关文章发表以来，受到国内外学者的广泛关注和引用，SCI 他引 631 次。新西兰化学学院院士、新西兰化学界最高奖 Maurice Wilkins Center Prize for Chemical Science 奖获得者、新西兰奥克兰大学 Geoffrey Waterhouse 教授引用了该项目团队提出的关于微观电磁损耗物理机制的观点；中国工程院院士、哈尔滨工业大学周玉教授指出该项目团队的工作可以揭示微观因素和宏观性能之间的联系；中国科学院院士、吉林省科学技术协会主席、吉林大学冯守华教授指出该项目团队通过建立新型物理模型解决了吸收剂阻抗不匹配的问题；中国工程院院士、中组部副部长、昆明理工大学彭金辉教授指出该项目团队提出的缺陷调控等观点揭示了微观损耗机制；中国科学院院士、北京科技大学张跃教授对该

项目团队提出的电磁损耗机制给予了高度评价；中国科学院院士、国家知识产权局局长、郑州大学申长雨教授肯定了该项目团队在电磁波微观电磁损耗机制方面的工作。

(3) 推动新型吸波材料研发成果的工程应用

目前大量研究过度关注电磁波吸收剂粉体的设计和性能，而忽视了整体型吸波材料的研发，这是目前普遍存在的问题。针对该科学问题，提出了吸波剂整体性设计原则，考虑了吸波材料有效成分的设计合成，先后研发了低剖面超结构吸波材料、防除冰-隐身一体化吸波凝胶和耐腐蚀磁性吸波涂层，加速了新型吸波材料的研发与工程应用。**1)** 针对 5G 技术发展中 U6G 频段的电磁兼容和防护问题，研制了低剖面吸波材料，突破了低频波段宽频吸收的技术瓶颈，实现了 2-18 GHz 频段内斜入射 ($\pm 30^\circ$) 时衰减 < -10 dB。该成果为华为技术有限公司下一代通信技术提供技术储备，同时有助于实现微波暗室的小型化和国产化，经济价值与社会效益显著；**2)** 针对隐身飞机执行高空任务时机翼表面结冰导致的隐身性能衰减问题，开发了一种兼具吸波和防除冰功能的柔性凝胶涂层，阐明了微观电磁损耗机制与防除冰机制的耦合机理。经中国空气动力研究与发展中心结冰与防除冰重点实验室评估，肯定了涂层的环境适用性及工程应用价值，为隐身飞机机翼的防除冰需求提供了理论和技术支持；**3)** 针对高性能芯片测试环节的热管理和电磁兼容需求，研制出导热吸波一体化薄膜，阐明了导热-吸波的耦合机理。该薄膜已成功应用于渭南木王科技股份有限公司的芯片测试环节，在有效控制测试成本、保障产品良率以及加快产品上市周期方面展现出重要的战略价值；**4)** 针对目前海洋装备用吸波涂层在高温、盐雾、紫外、湿热等恶劣服役工况下性能快速衰减的问题，与陕西华秦科技实业股份有限公司联合开发出一种具有优异抗氧化和耐腐蚀性能的吸波涂层，阐明了吸波涂层耐腐蚀与吸波性能之间的协调机理。**①**推动了该隐身涂料在某型装备装机应用并进入小批量采购，直接产值累计超过 1300 万元，经济效益显著；**②**开发出应用于一飞院和试飞院某型载体试验件的低频吸波涂层，并完成大尺寸载体表面低频隐身涂料的生产和涂装。部分涂覆低频吸波涂层的载体经 365 所微波暗室和试飞院外场实飞测试，结果表明整机 RCS 优于其他研究单位的同类产品，隐身效果显著，符合应用要求；**③**在航空、航天等用户单位的多型载体开展了特种功能涂料和耐高温低发射率隐身材料研制、涂装及性能评价，结果达到预期目标。

四、客观评价

在新型吸波材料的设计制备、物理机制两个方面的 5 篇代表性文章发表以来, 受到了国内外一大批知名专家的引用与正面评价, 引用作者包括发展中国家科学院院士、国际知名期刊《Carbon》主编 **Mauricio Terrones** 教授等 13 名国外院士在内的 27 名国外知名学者以及朱美芳、彭金辉、邓龙江、申长雨、张跃、沈宝根、段宁、冯守华、邹志刚、周玉、张立同、李卫、徐世烺、俞建勇、王玉忠、刘益春、侯洵、傅正义、朱剑豪、吴新涛等 20 位国内院士和 41 名杰青、国家级领军人才, 其中:

①发展中国家科学院院士、墨西哥科学院院士、国际知名期刊《Carbon》主编、世界科学院 (TWAS) 工程奖获得者、美国宾夕法尼亚州立大学 **Mauricio Terrones** 教授在其发表于 *Carbon*, 2023, 212: 118150 上的研究论文中指出该项目团队提出的核壳结构合成方法学促进了新型吸波体系构筑, “此外, 已知多孔结构可有效降低材料密度。因此, 设计合理的多孔结构对平衡碳材料的阻抗匹配和介电损耗具有重要意义。” (In addition, the porous structure is known to reduce the density of material effectively. Therefore, the design of reasonable porous structures is significant to balance the impedance matching and dielectric loss of carbon materials.)。

②新西兰化学学院院士、新西兰化学界最高奖 **Maurice Wilkins Center Prize for Chemical Science** 奖获得者、新西兰奥克兰大学 **Geoffrey Waterhouse** 教授发表在 *Synthetic Met.*, 2022, 287: 117052 的研究论文中引用了该项目团队提出的关于微观电磁损耗物理机制的观点, “异质界面处的强电子相互作用, 以及导致不均匀空间电荷分布的界面电子结构重构, 起到增强界面极化的作用。” (Strong electron interactions at the heterogeneous interfaces, together with interfacial electronic structure reconfiguration leading to an uneven spatial charge distribution, act to enhance interface polarization.)。

③中国工程院院士、哈尔滨工业大学周玉教授在其发表于 *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34: 2316338 上的研究论文中指出该项目团队的工作可以揭示微观因素和宏观性能之间的联系, “**Wu** 和他的合作伙伴在水/有机/离子凝胶电磁波吸收方面的最新进展表明, 通过调整单体和溶剂的类型和比例, 有望实现介电常数的广泛明显规律性变化, 从而丰富介电基因库。” (Notably, recent developments in Hydro/Organo/Ionogels for EMA by **Wu and his partners** have shown promise in achieving a wide range of apparent regular changes in permittivity through adjustments in monomer and solvent types and proportions, potentially enriching the dielectric gene pool.)。

④中国科学院院士、吉林省科学技术协会主席、吉林大学冯守华教授在其发表在 *J. Mater. Sci. Technol.*, 2023, 164: 140-149 的研究论文中指出该项目团队通过建立的新型物理模型解决了吸收剂阻抗不匹配的问题, “例如, **Zhang** 等人利用材料丰富的非均质界面和缺陷来平衡阻抗匹配, 形成多重介电极化。” (**Zhang**

et al. exploited the heterogeneous interface of the material and the abundance of defects to balance the impedance matching and to form multiple dielectric polarizations.)。

⑤中国工程院院士、中组部副部长、昆明理工大学彭金辉教授发表在 *Nat. Commun.*, 2023, 14: 5951 的研究论文中指出该项目团队提出的缺陷调控等观点揭示了微观损耗机制,“异质界面的构建导致附近电子和晶体结构的不对称,这些缺陷导致晶格畸变、电荷失配、能带迁移,也有利于电磁波的衰减。所有这些措施都有望提高材料的吸收性能。”(Meanwhile, the construction of heterogeneous interfaces causes asymmetry of nearby electrons and crystal structure, and these defects lead to the lattice distortion, charge mismatch.…)。

⑥中国科学院院士、北京科技大学张跃教授在 *Mat. Sci. Eng. R.*, 2024, 159: 100795 的论文中对该项目团队提出的电磁损耗机制给予了高度评价,“Wu 等人选择了掺硒的 CoS₂ 和掺硫的 CoSe₂ 来提出空位工程,揭示了空位浓度与微波衰减能力之间的潜在机制…S 掺杂的 CoSe₂ 微波吸收体在 2.42 毫米处获得了 9.25 GHz 的宽 EAB。”(Wu et al. chosen Se-doped CoS₂ and S-doped CoSe₂ to propose vacancy engineering. The underlying mechanisms between vacancy concentration and microwave attenuation ability were uncovered. ... Prominently, the S-doped CoSe₂ microwave absorber harvested a broad EAB of 9.25 GHz at 2.42 mm.)。

⑦中国科学院院士、国家知识产权局局长、郑州大学申长雨教授发表在 *J. Mater. Chem. C*, 2022, 10: 126-134 上的研究论文中肯定了该项目团队在电磁波微观损耗机制方面的工作,“ ϵ' 的典型频率依赖行为主要与高频电场变化导致电偶极子极化滞后加剧有关”(The typical frequency-dependent behavior of ϵ' is mainly associated with the aggravated polarization lag of electric dipole caused by high-frequency electric field changes)。

⑧中国材料研究学会副理事长、亚太材料科学院院士、深圳大学徐坚教授在其发表在 *Polymer*, 2023, 283: 126245 的研究论文中对该项目团队提出的中空多孔材料的合成方法给予了充分肯定,“引入纳米孔洞被认为是降低介电常数的有效方法。此外,引入多孔结构还能减轻材料重量、增加比表面积并产生其他效果。”(Introducing nanopores to introduce cavities is considered an effective method for reducing Dk. In addition, the introduction of a porous structure can also reduce the weight of materials, increase the specific surface area and produce other effects.)。

五、代表性论文专著目录（不超过 8 条，其中代表性论文不超过 5 篇，代表性专著不超过 3 部）

序号	论文专著名称	刊名	作者	年卷页码 (xx 年 xx 卷 xx 页)	发表时间	通讯作者	第一作者	国内作者	他引总次数	检索数据库	知识产权是否归国内所有
1	Defect Induced Polarization Loss in Multi-Shelled Spinel Hollow Spheres for Electromagnetic Wave Absorption Application	Advanced Science	Ming Qin, Limin Zhang, Xiaoru Zhao, Hongjing Wu	2021 年 8 卷 2004640	2021 年 2 月 8 日	Hongjing Wu	Ming Qin	秦明, 张利民, 赵小如, 吴宏景	276	Web of Science	是
2	Gelatin-derived N-doped hybrid carbon nanospheres With an adjustable porous structure for enhanced electromagnetic wave absorption	Advanced Composites and Hybrid Materials	Xiaoke Lu, Dongmei Zhu, Xin Li, Minghang Li, Qiang Chen, Yuchang Qing	2021 年 4 卷 946-956	2021 年 5 月 10 日	Qiang Chen	Xiaoke Lu	芦晓可, 朱冬梅, 李鑫, 李明航, 陈强, 卿玉长	74	Web of Science	是
3	A Competitive Reaction Strategy toward Binary Metal Sulfides for Tailoring Electromagnetic Wave Absorption	Advanced Functional Materials	Jiaolong Liu, Limin Zhang, Duyang Zang, Hongjing Wu	2021 年 31 卷 2105018	2021 年 8 月 6 日	Limin Zhang, Hongjing Wu	Jiaolong Liu	刘蛟龙, 张利民, 臧渡洋, 吴宏景	230	Web of Science	是

4	Anion-Doping-Induced Vacancy Engineering of Cobalt Sulfoselenide for Boosting Electromagnetic Wave Absorption	Advanced Functional Materials	Jiaolong Liu, Limin Zhang, Hongjing Wu	2022 年 32 卷 2200544	2022 年 3 月 23 日	Hongjing Wu	Jiaolong Liu	刘骁龙, 张利民, 吴宏景	195	Web of Science	是
5	Hydro/Organo/Ionogels: “Controllable” Electromagnetic Wave Absorbers	Advanced Materials	Zehao Zhao, Limin Zhang, Hongjing Wu	2022 年 34 卷 2205376	2022 年 9 月 28 日	Hongjing Wu	Zehao Zhao	赵泽昊, 张利民, 吴宏景	206	Web of Science	是
合 计									981		

六、主要完成人情况（不超过 6 人）

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
吴宏景	1	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	提出了新型吸波材料的设计制备及微观电磁损耗物理机制研究新思路, 组织团队联合攻关, 拓展多层核壳结构合成方法学, 促进新型吸波剂构筑【 代表性论文 1 】: 阐明了新型电磁损耗机制及微观因素与宏观参数之间的关键桥梁机制, 弥补了微观电磁损耗物理机制研究的不足【 代表性论文 3、4、5 】: 推动新型吸波材料研发成果实现应用价值, 与中国空气动力研究与发展中心结冰与防除冰重点实验室合作, 开展了“隐身-防除冰一体化涂层的研发”应用项目【 应用证明 1 】: 与陈强教授以及陕西华秦科技实业股份有限公司联合承研中温防腐雷达隐身涂层项目; 开发出应用于一飞院和试飞院某型载体试验件的低频吸波涂层。
陈强	2	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	提出了新型吸波材料的设计制备及微观电磁损耗物理机制研究新思路, 拓展

						特殊微纳结构合成方法学,促进新型吸波剂构筑【 代表性论文 2 】:与吴宏景教授以及陕西华秦科技实业股份有限公司联合承研中温防腐雷达隐身涂层项目;开发出应用于一飞院和试飞院某型载体试验件的低频吸波涂层。
张利民	3	无	副教授	西北工业大学	西北工业大学	合作开发了硒硫共掺策略,揭示了硒硫空位共存协同调控电磁特性的新机制【 代表性论文 3 】:合作提出了电磁波吸收的宏微观关键桥梁机制,通过设计阳离子竞争反应策略,实现了对材料组分、界面和缺陷的可控调节,达到了优化材料电磁参数与吸波性能的目的【 代表性论文 4 】:合作建立聚合物液体调控策略,阐述了凝胶的介电特性与固定液体的极性、离子电导率及非共价相互作用之间的相互关系【 代表性论文 5 】。
刘骁龙	4	无	讲师	西安电子科技大学	西北工业大学	在吴宏景教授指导下开发了硒硫共掺策略,揭示了硒硫空位共存协同调控电磁特性的新机制【 代表性论文 3 】:提出了电磁波吸收的宏微观关键桥梁机制,通过设计阳离子竞争反应策略,实

						现了对材料组分、界面和缺陷的可控调节,达到了优化材料电磁参数与吸波性能的目的【代表性论文 4】。
--	--	--	--	--	--	--

七、主要完成单位情况（不超过 3 个）

完成单位	排名	对本项目主要贡献（限 600 字）
西北工业大学	1	<p>西北工业大学是一所以发展航空、航天、航海（三航）等领域人才培养和科学研究为特色的国家“双一流”建设高校，隶属于工业和信息化部。1995 年首批进入“211 工程”，2001 年进入“985 工程”，2017 年进入“一流大学”建设高校（A 类）行列，是“卓越大学联盟”成员高校，是“一带一路”航天创新联盟发起高校。本单位的材料科学与工程专业为国家“双一流”建设学科和国家一级重点学科，在第五轮学科评估中跻身第一方阵前列；材料物理与化学专业属国家二级重点学科，隶属于国家一级重点学科材料科学与工程，拥有雄厚的科研实力和有优良的工作条件。</p> <p>西北工业大学为项目开展提供了科研平台和智力支持。该项目所在物理科学与技术学院聚焦物理学国际前沿和国家重大需求开展基础和应用基础研究，建有超常条件材料物理与化学教育部重点实验室和陕西省凝聚态结构与性质重点实验室，平台拥有材料制备和后处理所需的全部实验设备，为该项目开展面向国家重大需求的吸波（隐身）材料研究提供了良好的科研平台和硬件支持。分析测试中心拥有材料表征所需的专业测试人员和国际高端仪器设备，确保了测试数据的科学、准确、可靠，为项目的顺利实施提供了有力保障。图书馆提供了较为完善的文献信息资源，满足了项目开展所需的文献信息需求。</p>

八、完成人合作关系说明

申请团队针对吸波材料输入阻抗与损耗能力之间不匹配的问题，多年来开展合作研究，设计并构筑了多层壳核结构，优化了材料的阻抗匹配；阐明了新型电磁损耗机制及微观因素与宏观参数之间的关键桥梁机制，弥补了微观电磁损耗物理机制研究的不足；拓展了整体型吸波材料的制备方法和电磁损耗调控策略，促进了新型吸波材料军民科技成果应用。

①本人吴宏景作为项目的发起人，负责项目的整体规划和实施。

②与陈强教授以及陕西华秦科技实业股份有限公司合作完成了科工局专项工程“某型歼击机耐中温防腐雷达隐身涂层研制”项目，开发出一种耐温防腐吸波涂层材料，已在某型歼击机后机身蒙皮实现批量应用【应用证明3】。

③与张利民副教授合作，指导博士生刘骁龙提出了电磁波吸收的宏微观关键桥梁机制，通过设计阳离子竞争反应策略，实现了对材料组分、界面和缺陷的可控调节，达到了优化材料电磁参数与吸波性能的目的【代表性论文4】。