

陕西省自然科学奖公示信息

(2025年度)

一、项目基本情况

项目名称	SiC 高温结构吸波材料介电与力学性能协同提升机理及方法
主要完成人	丁冬海，穆阳，罗发，肖国庆，李皓
主要完成单位	西安建筑科技大学、中国飞行试验研究院、西北工业大学

二、提名意见（适用于提名单位）

提 名 者	陕西省教育厅	提名等级	<input type="checkbox"/> 一等奖 <input checked="" type="checkbox"/> 二等奖
<p>提名意见：</p> <p>该项目针对制约 SiCf/SiC 高温结构吸波材料力学性能与吸波性能难以协同提升的关键科学问题，从 SiC 纤维预制体、界面层、基体对复合材料吸波、介电性能的影响以及复合材料介电温度响应机理等角度，揭示了纤维、界面层、基体与复合材料整体电磁阻抗特性和力学行为的内在联系，为协同提升高温结构吸波材料介电和力学性能提供了必要的理论基础和共性指导。主要成果包括：（1）发现 SiC 纤维表面的连续富碳层（厚度约 50 nm）是导致国产 SiC 纤维阻抗失配、吸波性能不良的主要原因，突破了碳硅比单一因素决定 SiC 纤维介电性能的传统认知局限。（2）建立了高介电和低介电填料调控 SiCf/SiC 复合材料力学性能和电性能的方法。阐明了官能团对 CNTs 均匀稳定分散的作用机制，首次建立 CNTs 均匀分散协同提升 SiCf/SiC 复合材料吸波性能和力学性能的新方法。（3）构建了 SiC 纤维及 SiCf/SiC 复合材料高温介电性能演变物理模型，阐明了低介电界面层和低温氧化对 SiCf/SiC 复合材料力学性能和高温介电性能调控机理。该项目在本领域顶尖期刊 Carbon, Composites Part A 等发表论文 60 多篇，出版英文专著章节 1 章，授权发明专利 8 项。5 篇代表作 SCI 他引 291 次，获得了欧洲科学院院士、中国工程院院士、世界陶瓷科学院院士等国际权威专家的高度评价。符合陕西省自然科学奖的推荐条件，同意申报陕西省自然科学二等奖。</p> <p>说明：省科学技术奖一、二等奖项目，实行按等级标准提名、独立评审表决的机制。提名单者应严格依据省科学技术奖的标准条件，说明提名项目的贡献程度及等级建议。“提名一等奖”评审落选项目不再降格参评二等奖。项目组与提名单位沟通后，做出提名等级意见；提名项目提交后，提名等级建议不得变更。</p>			

三、项目简介

(限 2 页)

随着预警探测和拦截打击系统组网能力的提升,雷达隐身性能成为飞行器等大型武器装备战场生存与突防的关键。航空发动机作为飞行器尾向最重要的雷达散射源,受气动与高温条件约束,迫切需要能够集吸波、防热、承载于一体的高温结构吸波材料。高温结构吸波材料允许厚度较大,可以替代原有金属材料应用于航空发动机以减轻飞行器重量,作为新一代武器装备的特种功能材料,对国家安全意义重大,但由于约束边界条件多、综合性能优化设计空间小、材料电性能高温演变规律复杂,目前尚未获得广泛应用。

SiC_f/SiC 复合材料具有抗氧化、断裂韧性高、电性能可调等优点,被认为是最有前景的高温结构型吸波材料。但是人们对 SiC_f/SiC 复合材料阻抗特性、损耗机理等方面认识还不清楚,力学性能与吸波性能难以兼顾,导致其尚未获得广泛的工程应用。本项目在国家自然科学基金项目、陕西省自然科学基金项目、凝固技术国家重点实验室开放基金重点项目等项目支持下,围绕 SiC_f/SiC 复合材料介电、力学性能协同提升机理这一核心科学问题,从连续 SiC 纤维预制体、界面层、基体对复合材料吸波、介电性能的影响以及复合材料介电温度响应机理等角度入手,展开系统研究。主要科学发现如下:

(1)阐明了表面层对 SiC 纤维预制体微波反射/吸收转化的调控机理,构建了 SiC 纤维预制体阻抗匹配与增韧兼容性的调控方法。

发现 SiC 纤维表面的连续富碳层(厚度约 50 nm)是导致 SiC 纤维阻抗失配、吸波性能不良的主要原因,突破了碳硅比单一因素决定 SiC 纤维介电性能的传统认知局限。首次精准刻画了热解碳界面层厚度导致 SiC_f/SiC 复合材料由吸收向反射转化的物理机制。发展了 BN、PIP-SiC、CVD-SiC、BN/SiC、ZrO₂ 五种电磁波阻抗匹配和力学增韧兼容的界面层制备方法,突破了传统热解碳界面层对 SiC_f/SiC 复合材料阻抗匹配与力学强韧化的矛盾,实现了 SiC_f/SiC 复合材料力学性能与吸波性能协同提升。

(2)提出了新型的力学性能和吸波性能兼容 Si-O-C 基体,阐明了纳米填料表面化学特性对分散状态的作用机理。

建立了微纳米填料调控 SiC_f/SiC 复合材料力学性能和电性能的方法建立了高介电和低介电填料调控 SiC_f/SiC 复合材料力学性能和电性能的系统方法。阐明了表面官能团对 CNTs 在陶瓷先驱体溶液中均匀稳定分散的物理机制,首次提出通过 CNTs 在陶瓷基体中的均匀分散,协同提升 SiC_f/SiC 复合材料吸波性能和力学性能的新策略,抗弯强度提升 120%,X 波段有效吸收频带 3.1GHz,突破了高导电纳米碳填料对复合材料阻抗匹配与力学强韧化的矛盾。

(3)揭示了微纳米填料对 SiC_f/SiC 复合材料介电常数温度响应行为的影响规律,阐明了高温介电性能演变的物理机制。

基于德拜弛豫电介质原理和玻尔兹曼统计热力学,推导出了复介电常数随温度升高而变化的物理模型构建了 SiC 纤维及 SiC_f/SiC 复合材料高温介电性能演变物理模型,阐明了低介电界面层和低温氧化对 SiC_f/SiC 复合材料力学性能和高温介电性能调控机理,验证了复合材料高温介电性能演变物理模型的准确性。制备出 800~1000℃ 时的反射率在 8.2-12.4 GHz 频段内均小于 -8.0 dB 的,抗弯强度大于 200 MPa 的高温

结构吸波材料。

该项目在本领域顶尖期刊 Carbon, Composites Part A, Journal of the European Ceramic Society, Journal of the American Ceramic Society, Ceramics International 等发表论文 60 多篇，出版英文专著 1 章，授权发明专利 8 项。上述这些研究成果得到了众多国内外专家广泛关注，5 篇代表作 SCI 他引 291 次，美国、德国、意大利、法国、韩国、新加坡、中国等国家的 Paolo Colombo、Peter Greil、Ralf Riedel、张立同、李贺军、董绍明、傅正义等 20 多位院士、会士等权威学者发表在 Progress in Materials Science, International Materials Review, Acta Materialia 等高水平学术期刊的 论文引用代表作原图，多处引用并高度评价本成果代表作，并跟踪研究，研究成果产生了重要的学术影响。项目 2 项发明专利获转化应用。项目完成人中 1 人入选中国科协青年人才托举计划、1 人入选陕西省青年拔尖人才计划、1 人获陕西省优秀博士学位论文。

四、客观评价

【限 2 页。围绕科学发现点的原创性、公认度和科学价值进行客观、真实、准确评价。填写的评价内容要有客观依据，主要包括国内外同行在重要学术刊物（专著）和重要国际学术会议等公开发表的学术性评价意见，国内外重要科技奖励等，可在附件中提供证明材料。非公开资料（如私人信函等）不能作为评价依据。】

该项目在本领域顶尖期刊 Carbon, Composites Part A, Journal of European Ceramic Society 等发表论文 60 多篇，出版英文专著章节 1 章，授权发明专利 8 项。该项目 5 篇代表作 SCI 他引 291 次。引用学者包括 10 余名院士以及权威学会 Fellow、国际期刊主编。

1. 科学发现点 1 的评价

（1）世界陶瓷科学院院士、德国埃尔朗根-纽伦堡大学 Peter Greil 教授和中国工程院院士张立同教授合作在期刊 International Materials Reviews 发表的两篇英文综述论文 59 (2014) 326-355、62 (2017) 117-172，共引用本项目论文 12 篇。引用代表作 1 的原图，将数据作为 SiC_f/SiC 复合材料典型介电性能，和其他类型陶瓷进行对比，评价“仅 310 nm 厚（3.3 vol. %）的连续热解碳界面层使 SiC_f/SiC 复合材料电磁屏蔽性能达到 25 dB”。

（2）中国材料研究学会副理事长、粉末冶金国家重点实验室主任、中南大学周科朝教授发表论文 Journal of Materials Research and Technology (2022)18:2770-2783 引用代表作 1 的结果，评价“SiC/SiC 复合材料总的吸波性能强烈依赖于陶瓷纤维、界面层及基体致密化工艺”。

（3）湖北省杰青、湖北省有突出贡献专家、华中科技大学江建军教授团队发表的论文多次引用本项目论文，多处引用代表作 2，基于项目研究结果，开展了 SiC 纤维电磁性能数值模拟研究。

2. 科学发现点 2 的评价

（1）世界陶瓷科学院院士、德国达姆斯塔特工业大学 Ralf Riedel 教授及其合作者发表在论文 Progress in Materials Science 109 (2020) 100623、International Materials Reviews 68 (2023) 487-520 多处引用本项目论文（代表作 4），并评价：“自由碳含量和结构有序度的增加从吸收和反射的角度导致总的屏蔽效能的增强”“使用导电填料是制备电磁功能聚合物衍生陶瓷的最高水平”“CNTs 和 PSO 较强的结合力及 CNTs 之间较强的静电斥力使羧基 CNTs 在陶瓷先驱体溶液中分散更均匀、CNTs/Si-O-C 复合材料的吸波性能和力学性能更好”，并进行了跟踪研究，制备出了吸波性能较好的 SiCN/MWCNT 纳米复合材料 J Mater Sci: Mater Electron (2024) 35:125。

（2）欧洲科学院院士、世界陶瓷科学院院士、美国宾夕法尼亚州立大学 Paolo Colombo 教授发表论文 Progress in Materials Science 128 (2022) 100969 引用项目本项目代表作 3 的实验结果说明含有填料或掺杂的聚合物衍生陶瓷具有宽频、高损耗、低密度的有效吸波性能。

（3）阿联酋哈利发大学 Andreas Schiffer 教授发表论文 Advanced Composites and Hybrid Materials (2025) 8:267 中大篇幅引用介绍本项目成果（代表作 3）并评价：“研究揭示了官能团对优化 CNTs 在聚合物衍生陶瓷基体中分散效果的极其重要的作用”。

(4)中国工程院李贺军院士发表论文 *Journal of Materials Science & Technology* 167 (2023) 213-227 引用代表作 3, 评价: “设计这样非晶基体/填料系统获得了良好的吸波性能”。

(5) 中国工程院傅正义院士发表论文 *Acta Materialia* 288 (2025) 120817 引用代表作 4 说明 SiC_f/SiC 复合材料作为高温电磁屏蔽在力学性能方面的优势。

(6) 第十四届陕西青年科技奖获得者、火箭军工程大学毕松教授发表论文 *Discover Nano*(2025) 20:107 引用介绍项目成果(代表作 3), 并评价: “羧基 CNTs 能够在 PSO 乙醇溶液中更稳定悬浮, 更均匀的分散, 取得高达 7.5 wt.%的渗透阈值”。

(7) 中国科学院沈阳国家材料实验室徐敬军研究员发表论文 *ACS Appl. Electron. Mater.* 2023, 5, 1558-1565 评价代表性成果 4: “9 wt.%的 Ti₃SiC₂ 使复合材料吸波和电磁屏蔽性能提升, 600℃高温电磁屏蔽性能由 30 dB 提高至 45 dB”。

(8) 中国复合材料学会陶瓷基复合材料分会副理事长、上海大学李爱军教授发表论文 *Ceramics International* 50 (2024) 20167-20175, 评价代表作 4: “Mu 等在 SiC_f/SiC 复合材料中引入 Ti₃SiC₂ 使弯曲强度由 217 MPa 提高至 295 MPa, 总屏蔽效能由 20 dB 提高至 45 dB”。

3. 科学发现点 3 的评价

(1) 新加坡南洋理工大学 Edwin Hang Tong Teo 发表论文 *Nano Today* 53 (2023) 102011 引用代表作 5 的原图, 并评价 “含有 BN 界面层 SiC_f/SiC 复合材料直到 700℃仍然具有优越的电磁屏蔽性能”。

(2) 阿塞拜疆国家科学院 Elchin M. Huseynov 发表论文 (NANO: Brief Reports and Reviews(2018)13: 1830002) 3 处文字引用代表作 4 建立的介电常数随温度演变模型, 解释了中子辐射、非晶转变及团聚效应对纳米晶 SiC 介电常数的影响。

(3) 中国工程院董绍明院士 2024 年发表的两篇论文 *Journal of Materials Science & Technology* 182 (2024) 132-140 和 *Ceramics International* 50 (2024) 38582 - 38591 中 4 处引用介绍了代表作 4 关于 SiC 复合材料高温吸波性能的研究。

(4) 湖南省杰出青年基金获得者、中南大学李杨教授发表的综述论文 *Ceramics International* 48 (2022) 34107-34127 多次引用项目论文及原图, 评价代表作 5 “纤维/基体 BN 界面层可以允许应力由基体向纤维转移, 调控复合材料的力学性能”。

(5) 南京航空航天大学刘初阳教授发表论文 *J Mater Sci: Mater Electron* (2021) 32:25996-26006 引用代表作 5: “Mu 采用化学气相沉积法制备的 BN/SiC 复合材料在 700℃表现出杰出的吸波和力学性能”。

(6) 中国科学院兰州化学物理研究所材料磨损与防护国家重点实验室于元烈研究员发表的综述论文 *Materials Today Nano* 13 (2021) 100108 大篇幅引用代表作 5, 评价“很明显, h-BN 的引入可以提高复合材料的高温稳定性, 解决了复合材料高温介电和吸波性能的矛盾”。

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 (年 月 日)	通讯 作者 (含 共 同)	第一 作者 (含 共 同)	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	Electromagnetic interference shielding and dielectric properties of SiC _f /SiC composites containing pyrolytic carbon interphase	Carbon	Donghai Ding, Yimin Shi, Zhihong Wu, Wancheng Zhou, Fa Luo, Jin Chen	2013 年 60 卷 552-555 页	2013 年 8 月 1 日	Donghai Ding	Donghai Ding	丁冬海、史毅敏、武志红、周万城、罗发、陈晋	73	SCIE	是
2	Complex permittivity and microwave absorbing properties of SiC fiber woven fabrics	Journal of Materials Science	Donghai Ding, Wancheng Zhou, Biao Zhang, Fa Luo, Dongmei Zhu	2011 年 46 卷 2709-2714 页	2011 年 4 月 1 日	Donghai Ding	Donghai Ding	丁冬海、周万城、张标、罗发、朱冬梅	62	SCIE	是

3	Dispersing of functionalized CNTs in Si-O-C ceramics and electromagnetic wave absorbing and mechanical properties of CNTs/Si-O-C nanocomposites	Ceramics International	Donghai Ding, Jing Wang, Xinmin Yu, Guoqing Xiao, Chao Feng, Wentao Xu, Bing Bai, Ning Yang, Yunqin Gao, Xing Hou, Geping He	2020年46卷5407-5419页	2020年3月1日	Donghai Ding	Donghai Ding	丁冬海、王晶、于新民、肖国庆、冯超、徐文滔、白冰、杨宁、高云琴、侯星、贺格平	58	SCIE	是
4	High-temperature dielectric and electromagnetic interference shielding properties of SiC _f /SiC composites using Ti ₃ SiC ₂ as inert filler	Composites : Part A	Yang Mu, Wancheng Zhou, Feng Wan, Donghai Ding, Yang Hu, Fa Luo,	2015年77卷195-203页	2015年10月1日	Yang Mu	Yang Mu	穆阳、周万城、万峰、丁冬海、胡杨、罗发	72	SCIE	是
5	Temperature-dependent electromagnetic shielding properties of SiC _f /BN/SiC composites fabricated by chemical vapor infiltration process	Journal of Alloys and Compounds	Yang Mu, Hao Li, Jiaxin Deng, Wancheng Zhou	2017年724卷633-640页	2017年11月15日	Yang Mu	Yang Mu	穆阳、李皓、邓佳欣、周万城	26	SCIE	是
合 计									291		
补充说明（视情填写）：											

六、主要完成人情况表

姓 名	丁冬海	排 名	第一
行政职务	高温陶瓷研究所党支部书记		
技术职称	教授		
工作单位	西安建筑科技大学		
完成单位	西安建筑科技大学		
对本项目主要学术贡献： 作为项目负责人，在项目执行期间负责研究计划制定，技术方案论证，研究结果分析，以及论文撰写修改，是该项目重要科学发现点 1，2 主要学术思想的提出者，代表性论文的 1-3 的第一作者和通讯作者。发现 SiC 纤维表面富碳层对连续 SiC 纤维预制体电磁性能的决定作用，提出了利用表面热解碳层调控 SiC _f /SiC 复合材料吸收/屏蔽性能的新思路。提出制备液相浸渍法制备 h-BN 等阻抗匹配型界面层协同提升 SiC _f /SiC 复合材料吸波和力学性能。提出通过表面官能团提升 CNTs 在陶瓷先驱体中悬浮稳定性和陶瓷基体中分散性的新方法。投入本项目的工作量为 80%。			

姓 名	穆阳	排 名	第二
行政职务	所长		
技术职称	研究员		
工作单位	中国飞行试验研究院		
完成单位	中国飞行试验研究院		
对本项目主要学术贡献： 作为项目第二完成人，在项目研究内容执行期间，是代表性论文 4、5 的第一作者和通讯作者，提出了低介电微纳米填料改善 PIP-SiC _f /SiC 复合材料阻抗匹配特性的思想，发现微纳米填料抑制基体热解过程收缩的效应，通过基体改性实现了 SiC _f /SiC 复合材料吸波性能和力学性的协调提升。投入本项目的工作量 70%。			

姓 名	罗发	排 名	第三
行政职务	无		
技术职称	教授		
工作单位	西北工业大学		
完成单位	西北工业大学		
对本项目主要学术贡献： 合作完成发现点 1、2、3 的主要理论和实验工作，指导第一完成人、第二完成人、第五完成人开展本项目的研究，是代表作 1、2、4 的主要作者。参与完成了表面富碳层和热解碳界面层调控 SiC 纤维预制体和复合材料介电性能理论模型的建立和相关实验的设计实施。参与完成了表面富碳层和热解碳界面层调控 SiC 纤维预制体和复合材料介电性能理论模型的建立和相关实验的设计实施。参与完成适用于 SiC _f /SiC 高温结构吸波出来哦的阻抗匹配型界面层制备方法和工艺路线的设计实施。投入本项目的工作量 60%。			

姓 名	肖国庆	排 名	第四
行政职务	本科生院常务副院长		
技术职称	教授		
工作单位	西安建筑科技大学		
完成单位	西安建筑科技大学		
对本项目主要学术贡献： 对科学发现点 2 做出了贡献，提出了评价 CNTs 在先驱体溶液中悬浮稳定性的评价方法，参与了羧基化 CNTs 悬浮稳定机理分析研究。是代表性论文 3 的主要完成人。投入本项目工作量 50%。			

姓 名	李皓	排 名	第五
行政职务	研究室主任		
技术职称	高级工程师		
工作单位	中国飞行试验研究院		
完成单位	中国飞行试验研究院		
对本项目主要学术贡献： 合作完成发现点 3 的主要工作，是代表性论文 5 的作者之一，实验测试了 SiC _f /SiC 复合材料高温介电性能，验证了通过低介电界面层和低温氧化调控 SiC _f /SiC 复合材料介电性能温度响应行为方法的可行性。投入本项目工作量 50%。			

七、主要完成单位情况表

单位名称	西安建筑科技大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>西安建筑科技大学作为该项目的第一完成单位，在项目研究内容执行期间，负责总体研究计划制定，技术方案的论证，可行性分析，研究结果分析等，为本项目的实行提供了各方面条件的支持，主要贡献有：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 在项目申报、研究期间负责项目的组织、管理和协调工作。为项目研究内容的实施和完成提供了设备和人员支持。 2. 为科研成果的推广、交流提供了平台。 3. 通过项目的实施，培养博士和硕士研究生共 10 名。 	

单位名称	中国飞行试验研究院
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>中国飞行试验研究院是第二完成人和第五完成人的工作单位，代表作 5 的第一完成单位。主导完成发现点 3 的主要理论和实验工作，实施了主要成果的应用验证。中国飞行试验研究院是中国唯一经国家授权的军民用飞机、航空发动机、机载设备等航空产品国家级鉴定试飞机构，是国家级的飞行试验技术研究机构，同时也是国家“飞机适航认可实验室，为本项目的实施提供了性能测试和验证平台。</p>	

单位名称	西北工业大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>合作完成发现点 1-3 的主要工作，是完成人 1、2 的博士毕业单位。完成人在西北工业大学进行高温结构吸波材料的研究过程中，形成了发现点 1-3 的部分学术思想。西北工业大学为本项目实施所需要的实验设备、软硬件设置提供了充分保障，确保了项目的顺利实施，是典型的服务国家重大战略需求、解决国家卡脖子技术的研究型高校，为本项目人才培养提供了良好的平台。</p>	

完成人合作关系说明

第 1 完成人丁冬海教授为西安建筑科技大学材料科学与工程学院教师，丁冬海教授为本项目的负责人。第 2 完成人穆阳为中国飞行试验研究院研究员。第 3 完成人罗发为西北工业大学材料学院教授、博士生导师，曾指导第 1 完成人、第 2 完成人在西北工业大学完成博士学位论文研究。本项目的 5 位完成人之间存在密切的科研合作关系。第 4 完成人和第 1 完成人是代表作 3 的共同作者。第 5 完成人和第 2 完成人是代表作 5 的共同作者。第 1、2、3 是代表作 4 的共同作者。第 1、2、3 完成人合作完成的“承载型 SiC 高温吸波材料微结构与性能关联性研究”得到了国内外同行的广泛认可，于 2019 年获得陕西省高等学校科学技术奖二等奖。

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者/项目排名	合作时间	合作成果	证明材料
1	共同获奖	丁冬海(1)、穆阳(2)、罗发(3)	2010 年-2019 年	承载型 SiC 高温吸波材料微结构与性能关联性研究	获奖证书
2	论文合著	丁冬海(1)、罗发(3)	2012 年-2013 年	Electromagnetic interference shielding and dielectric properties of SiC _f /SiC composites containing pyrolytic carbon interphase	代表作 1
3	论文合著	丁冬海(1)、罗发(3)	2008 年-2011 年	Complex permittivity and microwave absorbing properties of SiC fiber woven fabrics	代表作 2
4	论文合著	丁冬海(1)、肖国庆(4)	2017 年-2020 年	Dispersing of functionalized CNTs in Si-O-C ceramics and electromagnetic wave absorbing and mechanical properties of CNTs/Si-O-C nanocomposites	代表作 3
5	论文合著	穆阳(1)、丁冬海(2)、罗发(3)	2010 年-2015 年	High-temperature dielectric and electromagnetic interference shielding properties of SiC _f /SiC composites using Ti ₃ SiC ₂ as inert filler	代表作 4
6	论文合著	穆阳(2)、李皓(5)	2016 年-2017 年	Temperature-dependent electromagnetic shielding properties of SiC _f /BN/SiC composites fabricated by chemical vapor infiltration process	代表作 5
(不限条目)					