

2026 年度拟提名陕西省自然科学奖项目公示内容

一、项目名称

耐极端高温陶瓷改性碳/碳复合材料微结构设计及抗氧化烧蚀机理

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省融办

提名意见：

碳/碳（C/C）复合材料是先进空天飞行器及其动力系统不可或缺的关键高温材料，但抗长时氧化烧蚀性能不足严重制约其可靠应用，实现 C/C 复合材料极端高温环境下的稳定服役已成为亟待解决的挑战性难题。该项目历经十余年攻关，阐明高取向层状组织降低陶瓷晶粒取向差、半共格界面增强原子级啮合、引入弹性应变场提升陶瓷涂层断裂韧性与内聚力机理，发展了原位反应与扩散固溶协同调控方法，实现陶瓷涂层与 C/C 界面相容；揭示氧化膨胀封填、压应力诱导核壳结构内愈合相定域释放、低能晶面/高活性晶界优先氧化的裂纹愈合机制，创新提出晶态-非晶态异质复合阻碍氧扩散、多组元协同调控 Si-O 键思路，成功构筑宽温域-高阻氧-自愈合涂层氧化膜；诠释孪晶转变-反相畴界-晶界弛豫多级塑性变形耗散热冲击应变、熔融相补偿愈合裂纹超高温烧蚀抑制机理，创新发展了多元陶瓷选区改性构筑梯度结构方法，大幅提升复合材料长寿命抗烧蚀性能。

该项目主要成果发表于 *Composites Part B*、*Corrosion Science*、*Carbon* 等本领域权威期刊，获授权发明专利 28 件，成果有力支撑航发型号预研和高速飞行器超高温热结构/热防护材料研制。

提名该项目为陕西省自然科学奖一等奖。

三、项目简介

碳/碳（C/C）复合材料是先进空天飞行器及其动力系统不可或缺的关键高温材料，但长时抗氧化烧蚀性能不足严重制约该材料在极端环境下的可靠应用，超高温陶瓷改性是国际公认的解决此难题的理想途径。然而热结构件长期服役于强气动热冲击、宽温域瞬时剧变、超高温长时冲刷耦合的极端“热-力-氧”耦合环境，使得传统涂层与改性 C/C 复合材料面临强烈热震引起界面失配、宽温域抗氧化寿命不足、极高温下烧蚀损耗严重等核心瓶颈，如何实现极端高温氧化烧蚀环境下的可靠服役已成为亟待解决的挑战性难题，其涉及的关键科学问题包括跨尺度界面强韧化与应力协调机制、缺陷宽温域自愈合与高阻氧氧化膜稳定构筑原理、超高温长时抗氧化烧蚀机理。该项目在国家自然科学基金（创新群体、重大、重点、青 A、青 B）、国家重点研发计划、国防基础科研等资助下，围绕上述“热-力-氧”耦合环境下的关键科学问题开展系统研究，取得如下主要科学发现：

1. 阐明高取向层状组织降低陶瓷晶粒取向差、半共格增强原子级界面啮合、引入弹性应变场提升陶瓷涂层断裂韧性与内聚力机理，基于此发展了原位反应与

扩散固溶协同的界面相容性调控方法，使陶瓷涂层与 C/C 复合材料界面结合强度提升 2~3 倍，解决了超高温极端环境下因界面不匹配导致的涂层应力损伤难题。

2. 揭示氧化膨胀封填、压应力诱导核壳结构内愈合相定域释放、低能晶面/高活性晶界优先氧化的裂纹愈合机制，创新提出晶态-非晶态异质复合阻碍氧扩散、多组元协同调控 Si-O 键思路，1500℃有效防护 2000 小时，“对新一代航空发动机热端部件轻量化和提升耐温能力意义重大”。

3. 诠释孪晶转变-反相畴界-晶界弛豫多级塑性变形耗散热冲击应变、熔融相补偿超高温烧蚀抑制机理，创新发展多元陶瓷选区改性构筑梯度结构方法，解决了氧化膜脆性剥落与粉化冲蚀导致超高温长时抗烧蚀性能不足的难题，为新一代高速飞行器热结构件研制“提供重要技术支撑”。

该项目主要成果发表于 Composites Part B、Corrosion Science、Carbon 等本领域权威期刊论文 210 余篇，5 篇代表性论文被 Nature Communications、Materials Today 等引 534 次。相关研究工作被欧洲科学院院士 Jon Binner、世界陶瓷科学院院士 W. Fahrenholtz 等著名学者评价为“最大限度阻氧（minimises the diffusion of oxygen）”、“优异的长寿命抗烧蚀性能（excellent long-life ablation resistance）”、“极端条件下性能卓越（deliver exceptional performance under extreme conditions）”。该项目培养研究生 60 余人，获省级和一级学会优博论文 10 篇，付前刚入选基金委青 A 和国家级领军人才，并连续入选爱思唯尔中国高被引学者和全球前 2%顶尖科学家榜单，张佳平入选基金委青 B，张雨雷入选国家级领军人才。该项目发展的长寿命抗氧化烧蚀方法获授权发明专利 28 件，成果有力支撑航发主机所型号预研和高速飞行器总体设计单位超高温热结构/热防护材料研制。

四、客观评价

该项目围绕极端环境下 C/C 复合材料抗氧化烧蚀防护中的界面强韧化、宽温域阻氧防护和超高温长时抗烧蚀等关键科学问题开展深入研究，形成了系统性原创成果。

发现点一：阐明的高取向层状组织降低陶瓷晶粒取向差、半共格增强原子级界面啮合，引入弹性应变场提升涂层断裂韧性与内聚力机理，回答了“涂层/改性层如何能够在强热-力耦合下不开裂、不剥落并保持高结合强度”的关键问题。

[1] 欧洲陶瓷学会前主席、欧洲科学院院士 Jon Binner 教授在 Int. Mater. Rev., 2019, 1652006 中引用该项目工作，评价认为能够缓解热应力、提升涂层断裂韧性（...alleviate thermal stresses ... increasing the coating toughness...），并且显著提升涂层损伤容限与抗热震性能（...remarkably improved resistance for oxidation and thermal shock）。

[2] 美国陶瓷学会会士、董事会董事 Rodney W. Trice 教授在 J. Eur. Ceram. Soc., 2023, 43(14), 6449-6460 中引用该项目工作，评价认为能够显著降低烧蚀和避免循环热震失效（...significantly reduced the ablation...and protected it from

failure in a thermal cycling experiment” , “...through an interlock mechanism...improves the thermal shock resistance)。

- [3] 中国工程院院士徐卫林教授团队在 *Materials Today*, 2025, 88,643-704 中引用本项目工作, 认为研制的强韧化涂层在极端条件下性能卓越 (...can deliver exceptional performance under extreme conditions...)。

发现点二: 阐明的氧化膨胀封填、压应力诱导核壳结构内愈合相定域释放、低能晶面/高活性晶界优先氧化的裂纹愈合机制以及提出的多组元掺杂调控 Si-O 键方法, 回答了“涂层如何能够在宽温域、长时间服役下持续阻氧防护”的关键问题。

- [1] 俄罗斯科学院院士、世界陶瓷科学院院士 E. A. Levashov 教授在 *Corrosion Science*, 2024, 227, 111721 中引用该项目工作, 评价认为提出的多组元掺杂调控 Si-O 键方法能降低蒸汽压、提升玻璃膜高温稳定性 (...increase in high-temperature stability of the modified silicate glass and the consequent decrease in vapor pressure)。
- [2] 中国科学院院士韩杰才教授团队在 *Composites Part A*, 2022, 162, 107159 中引用该项目工作, 认为该项目宽温域抗氧化涂层构筑方法能够提升整体防护性能 (...improve the overall anti-ablation performance above 1650°C)。
- [3] 中国科学院院士成会明研究员团队在 *Corrosion Science*, 2019, 147, 1-8 中引用该项目工作, 认为研制的宽温域抗氧化涂层是实现 1300 到 1650°C 长时防氧化最理想的体系之一 (At the temperatures from 1300°C to 1650°C... are the most promising candidates for long-term oxidation protection)。

发现点三: 揭示的氧化膜多重协同超高温抗烧蚀机理, 以及提出的多元陶瓷选区改性构筑梯度结构方法, 回答了“超高温烧蚀下如何实现长寿命稳定防护”的关键问题。

- [1] *Journal of the American Ceramic Society* 前主编、美国陶瓷学会会士、世界陶瓷科学院院士 W. Fahrenholtz 教授在 *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2025, 45,116963 中引用该项目工作, 认为通过氧化膜多重协同超高温抗烧蚀, 复合材料在 2373K 以上具有优异的长寿命抗烧蚀性能 (...excellent long-life ablation resistance above 2373 K)。
- [2] 中国工程院院士傅正义教授团队在 *Corrosion Science*, 2022, 207, 110606 中引用该项目工作, 评价认为研制的复合材料在 2200°C 以上抗烧蚀性能优异 (...exhibits excellent resistance to ablation above 2200°C)。
- [3] 中国科学院院士孙军教授团队在 *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2026, 46, 117934 中引用该项目工作, 认为项目发现的致密氧化膜耗散热冲击机制对提升抗烧蚀性能至关重要 (...the formation of a dense protective oxide layer... is very crucial for improving the ablation resistance ...)。

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	Micro/nano multiscale reinforcing strategies toward extreme high-temperature applications: Take carbon/carbon composites and their coatings as the examples	Journal of Materials Science & Technology	Qiangang Fu, Pei Zhang, Lei Zhuang, Lei Zhou, Jiaping Zhang, Jie Wang, Xianghui Hou, Ralf Riedel, Hejun Li	2022, 96, 31-68	2021 年 6 月 1 日	Qiangang Fu, Hejun Li	Qiangang Fu, Pei Zhang	付前刚, 张佩, 庄磊, 周磊, 张佳平, 王杰, 李贺军	191	Scopus	是

2	Ultra-high temperature performance of carbon fiber composite reinforced by HfC nanowires: A promising lightweight composites for aerospace engineering	Composites Part B: Engineering	Yanqin Fu, Yulei Zhang, Hui Chen, Liyuan Han, Xuemin Yin, Qiangang Fu, Jia Sun	2023, 250, 110453	2022 年 12 月 2 日	Yulei Zhang	Yanqin Fu	付艳芹, 张雨雷, 陈慧, 韩丽媛, 殷学民, 付前刚, 孙佳	62	Scopus	是
3	Effects of porous C/C density on the densification behavior and ablation property of C/C-ZrC-SiC composites	Carbon	Ke-zhi Li, Jing Xie, Qian-gang Fu, He-jun Li, Ling-jun Guo	2013, 57, 161-168	2013 年 1 月 29 日	Ke-zhi Li	Ke-zhi Li	李克智, 解静, 付前刚, 李贺军, 郭领军	119	Scopus	是

4	Ablation behaviour of C/C and C/C-ZrC-SiC composites with cone-shaped holes under an oxyacetylene flame	Corrosion Science	Lei Zhuang, Qiangang Fu, Biyi Tan, Yongan Guo, Qingwei Ren, Hejun Li, Bo Li, Jiaping Zhang	2016, 102, 84-92	2015 年 9 月 30 日	Qiangang Fu	Lei Zhuang	庄磊, 付前刚, 谭必毅, 郭永安, 任庆伟, 李贺军, 李博, 张佳平	96	Scopus	是
5	Ablation resistance of supersonic-atmosphere-plasma-spraying ZrC coating doped with ZrO ₂ for SiC-coated carbon/carbon composites	Corrosion Science	Yujun Jia, Hejun Li, Qiangang Fu, Zhigang Zhao, Jiajia Sun	2017, 123, 40-54	2017 年 4 月 12 日	Hejun Li, Qiangang Fu	Yujun Jia	贾瑜军, 李贺军, 付前刚, 赵志刚, 孙佳佳	66	Scopus	是
合 计									534	Scopus	是

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
付前刚	1	院长	教授	西北工业大学	西北工业大学	项目负责人，第 1, 2, 3, 4, 5 篇代表性论文作者。对第一、第二、第三发现点做出贡献：1. 阐明高取向层状组织降低晶粒取向差提升涂层断裂韧性与内聚力机理；2. 揭示了氧化膨胀充填、低能晶面/高活性晶界优先氧化的裂纹愈合机制；3. 诠释孪晶转变-反相畴界-晶界弛豫多级塑性变形耗散热冲击应变机理。
张佳平	2	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	第 1, 4 篇代表性论文作者。对第二、第三发现点做出贡献：1. 提出晶态-非晶态异质复合阻碍氧扩散构筑宽温域-高阻氧-自愈合氧化膜思路，在中心锥、内锥体等构件表面制备涂层并通过考核验证；2. 创新发展了多元陶瓷选区改性构筑梯度结构方法。
孙佳	3	无	副教授	西北工业大学	西北工业大学	第 2 篇代表性论文作者。对第一发现点做出贡献：提出原位反应与扩散固溶协同的界面热物理相容性调控思路。
贾瑜军	4	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	第 5 篇代表性论文作者。对第二、三发现点做出贡献：提出多组元协同调控 Si-O 键构筑宽温域-高阻氧-自愈合氧化膜思路，在试验件表面制备涂层并通过电弧风洞考核验证。

张雨雷	5	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	第 2 篇代表性论文作者,对第一发现点做出贡献: 阐明半共格界面增强原子级啮合并引入弹性应变场提升涂层断裂韧性与内聚力机理。
庄磊	6	无	副教授	华南理工大学	西北工业大学	第 1, 4 篇代表性论文作者。对第二、第三发现点做出贡献: 揭示了压应力诱导愈合裂纹机制, 阐明氧化物熔融补偿愈合裂纹超高温烧蚀抑制机理。

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	西北工业大学作为该项目的完成单位，负责了项目总体规划，设计了整体技术路线。搭建了该项目中材料制备与性能研究的硬件平台，为耐极端高温陶瓷改性碳/碳复合材料微结构设计及抗氧化烧蚀机理提供了条件保障。组织研究团队开展攻关，取得的主要学术贡献包括：阐明高取向层状组织降低晶粒取向差提升陶瓷涂层断裂韧性与内聚力机理，发展了原位反应与扩散固溶协同的界面相容性调控方法；揭示氧化膨胀封填、压应力诱导核壳结构内愈合相定域释放、低能晶面/高活性晶界优先氧化的裂纹愈合机制，创新提出晶态-非晶态异质复合阻碍氧扩散、多组元协同调控 Si-O 键构筑宽温域-高阻氧-自愈氧化膜思路；诠释孪晶转变-反相畴界-晶界弛豫多级塑性变形耗散热冲击应变、熔融相补偿愈合裂纹超高温烧蚀抑制机理，创新发展了多元陶瓷选区改性构筑梯度结构方法，支撑了热结构/热防护材料研制。学校为项目的实施提供了管理及其它支持。

八、完成人合作关系说明

项目完成人付前刚（1/6）、张雨雷（5/6）师从李贺军院士，在李贺军院士指导下较早开展抗氧化烧蚀 C/C 复合材料研究。自 2012 年开始至今，付前刚教授主持该项目整体研究工作。项目执行期间，张佳平（2/6）于 2012 年加入团队，师从付前刚教授开展本科毕设以及攻读硕博博士学位，2020 年留校任教。孙佳（3/6）于 2014 年加入团队，师从付前刚教授攻读博士学位，2019 年留校任教。贾瑜军（4/6）师从李贺军院士，2013 年 9 月加入团队攻读博士学位，2020 年留校任教。庄磊（6/6）师从付前刚，2013 年 9 月加入团队攻读硕博博士学位。主要合作关系如下：

- （1）完成人付前刚、张佳平，庄磊自 2013 年 9 月至今开展合作研究。本项目执行期间，以共同发表论文方式合作，合作发表“Journal of Materials

Science & Technology, 2022, 96, 31-68(代表性论文 1)”和“Corrosion Science, 2016, 102, 84-92 (代表性论文 4)”等学术论文。

- (2) 完成人付前刚、孙佳、张雨雷自 2014 年 9 月至今开展合作研究。本项目执行期间，以共同发表论文方式合作，合作发表“Composites Part B: Engineering, 2023, 250, 110453 (代表性论文 2)”学术论文。
- (3) 完成人付前刚、贾瑜军自 2013 年 9 月至今开展合作研究，以共同发表论文方式合作，合作发表“Corrosion Science, 2017, 123, 40-54 (代表性论文 5)”学术论文。