

# 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

化学气相沉积高温陶瓷涂层微结构调控与长寿命氧化/烧蚀防护机理

## 二、提名者及提名意见

提名者：陕西省教育厅

提名意见：该项目针对空天飞行器及其动力系统等国家重大战略工程对抗氧化/烧蚀碳/碳（C/C）复合材料提出的迫切需求，在多项国家自然科学基金（创新群体、重大仪器专项、重点、面上）等项目的支持下，瞄准 C/C 表面化学气相沉积（CVD）高温陶瓷涂层微结构调控与长寿命氧化/烧蚀防护机理，围绕 CVD 陶瓷涂层微结构控制机制、高阻氧-自愈合-强韧化长寿命氧化/烧蚀防护机理、大尺寸异形构件表面涂层均匀性控制方法等关键科学问题开展深入研究，揭示了陶瓷涂层多级热解反应、异质/异构涂层生长与调控机制，提出了跨尺度增韧陶瓷涂层新策略，揭示了涂层多元协同长寿命氧化/烧蚀防护机理，创制出新型多功能 CVD 涂层沉积设备，攻克了大尺寸异形构件表面涂层均匀性差的难题，取得了具有重要科学意义和国际影响的原创性成果。该项目 5 篇代表作发表在复合材料领域顶刊 Composites Part B、材料领域 Top 期刊 Carbon 和 Corrosion Science 等上，平均影响因子 10.9，被 Nature Communications、Materials Today 等权威期刊他引 395 次，单篇最高他引 132 次，产生了重要的学术影响；授权发明专利 20 件，成果已在航空、航天等领域得到推广应用，获 2023 年陕西高等学校科学技术特等奖。该项目材料齐全、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奖一等奖。

## 三、项目简介

碳/碳（C/C）复合材料具有轻质、耐高温、高温力学性能保持率高等诸多优异特性，是航空发动机、航天高速飞行器等国家重大战略工程不可或缺的关键材料，但其高温易氧化、抗烧蚀性能不足，必须依赖高温陶瓷涂层进行氧化/烧蚀防护。化学气相沉积（CVD）工艺是制备航空发动机中心锥、航天高速飞行器大面积舱段等异形复杂 C/C 构件表面抗氧化/烧蚀陶瓷涂层的最有效手段。但传统 CVD 陶瓷涂层存在微结构调控难、缺陷愈合阻氧能力不足且易开裂剥落、大尺寸异形复杂构件表面沉积不均匀等难题，严重制约了其在高温极端环境下的长寿命可靠应用。该项目面向国家重大战略需求，在国家自然科学基金（创新群体、重大仪器专项、重点、面上）等项目的资助下，围绕 CVD 陶瓷涂层微结构调控机制、高阻氧-自愈合-强韧化长寿命氧化/烧蚀防护机理、大尺寸异形构件表面涂层均匀性控制方法等关键科学问题开展深入研究，取得具有重要科学意义和广泛国际影响力的创新性成果。重要科学发现有：

**(1) 阐明 CVD 陶瓷涂层前驱体多级热解反应、异质/异构涂层生长与微结构调控机制，创建系列化 CVD 高温陶瓷涂层体系，实现涂层主动设计与可控制备。**建立 CVD 陶瓷前驱体多级热解反应模型，探明气/液/固陶瓷前驱体气体传质扩散、热解产物吸附形成中间态粘滞层、界面化学反应、原子重排生成陶瓷涂层的物理化学过程，创建碳化物、硼化物、氮化物与硅化物等多种 CVD 陶瓷涂层体系。发现异质界面诱发晶格失配应变影响涂层择优生长取向、基底结构状态遗传效应、气体分压引发微结构转变、温度影响晶粒形核与生长等是决定涂层微结构的本质因素，建立“工艺-微结构-性能”的映射关系，实现满足不同服役环境需求的球状晶、针状晶、柱状晶等多种微结构涂层的主动设计与可控制备，经微结构调控后，涂层线烧蚀率降低 35.2%。

**(2) 阐明多元/多相陶瓷 CVD 涂层形核生长的竞争机制，创新发展多元固溶、多相镶嵌陶瓷涂层共沉积方法，揭示涂层多元协同长寿命氧化/烧蚀防护机理，突破传统陶瓷涂层阻氧及自愈合能力不足的瓶颈。**揭示混合前驱体热解及多元/多相涂层形核生长过程中的竞争机制，建立热力学计算结合多尺度模拟耦合模型，阐明气体浓度场、温度场和压力场对涂层物相组成及分布的影响规律，创新发展多元固溶、多相镶嵌涂层共沉积方法，解决多组分前驱体挥发焓与反应活化能差异大导致多元/多相涂层沉积无法同步的难题。揭示晶粒细化构筑强阻氧屏障、包晶转变析出熔融自愈合相、难熔骨架相-熔融相镶嵌结构提升氧化膜稳定性等多元协同长寿命氧化/烧蚀防护机理，突破传统 CVD 陶瓷涂层阻氧及自愈合能力不足的瓶颈，使带涂层 C/C 试验件在等离子风洞下（表面温度 2800℃）的服役寿命由初期不足 1000 秒提升至 2500 秒。

**(3) 揭示多层界面诱导裂纹偏转及纳米线细化晶粒与多级拔出协同增韧机理，提出构筑跨尺度增韧涂层新策略，实现陶瓷涂层断裂韧性和界面结合强度的同步提升。**阐明极端热力环境下陶瓷涂层裂纹萌生-扩展动态机制，提出介观多层交替仿生结构设计协同微观纳米线跨尺度增韧涂层新策略，阐明涂层层厚比、亚层成分、界面结合状态等对多层交替涂层断裂与氧化/烧蚀行为的影响规律，揭示层间界面诱导裂纹偏转消耗尖端扩展能的增韧机理；首创多层交替仿生涂层的一步 CVD 制备方法，解决多次沉积导致热应力累积的难题。揭示强韧兼顾核壳结构限制表面活性原子扩散重排、提升表面能势垒等抑制多元固溶纳米线异常长大的作用机制，使纳米线高温稳定温度提升至 2450℃；揭示纳米线诱发有序形核与细化晶粒、界面变形-撕裂脱粘-多级拔出的协同增韧机理，阐明微观钉扎与机械互锁增强界面结合与抗剥离性能的作用机制，解决传统 CVD 陶瓷涂层脆性开裂与易剥落的难题，使涂层断裂韧性提高 150-170%，界面结合强度提升 2-3 倍。

**(4) 提出涡流增强、双轴正交旋转及尾气在线实时检测反馈等提高异形构件表面涂层均匀性的新思路，创制出首台可双向旋转的多功能 CVD 涂层沉积设备，解决大尺寸异形构件表面涂层形性适应性差的国际性难题。**发现异形复杂构件表面局部湍流/回流流场是引起其表面涂层不均匀分布和致密性差的本质原因，

创新提出涡流增强、双轴正交旋转、气/液/固混合前驱体精确供给及尾气在线实时检测反馈等提高异形复杂构件表面涂层均匀性与致密性的思路与方法，成功研制出首台可双向旋转的多功能 CVD 涂层沉积设备，揭示旋转方式/速率、涡流流场、滞留时间协同控制的前驱体气体扩散与热解反应竞争机制，阐明涂层沉积反应流场、温度场及前驱体浓度场等对涂层均匀性和致密性的影响规律，实现中心锥、前缘等多种异形复杂构件表面陶瓷涂层的均匀可控沉积，涂层厚度差异降低 90% 以上。

该项目 5 篇代表性论文发表在复合材料领域顶刊 *Composites Part B* (IF: 14.2)、材料领域 Top 期刊 *Carbon* (IF: 11.6) 和 *Corrosion Science* (IF: 8.5) 等上，平均影响因子 10.9，被 *Nature Communications*、*Materials Today* 等权威期刊他引 395 次，单篇最高他引 132 次。该项目共培养博士/硕士 28 人，获省级或一级学会优博论文 4 篇；张雨雷入选教育部重大人才工程特聘教授并获 2020 年陕西省青年科技奖，李贺军院士获第二届全国创新争先奖，部分成果获 2023 年陕西高等学校科学技术特等奖。

研究成果被美国、英国、俄罗斯等 30 多个国家和地区的 100 余位知名学者广泛引用和积极评价，包括世界陶瓷科学院院士 (W. Fahrenholtz、R. Riedel 和 W. Krenkel 教授)、欧洲科学院院士 J. Binner 教授、俄罗斯科学院院士 E. A. Levashov 教授、英国皇家化学学会会士 A. K. Tyagi 教授和国内 9 名院士等本领域著名学者。项目成果被高度评价：“具有优异的抗烧蚀性能，是极具发展前途的抗烧蚀材料”；“2500℃ 超高温环境下的防护性能优异”；“应用于航空航天高温环境下的最佳候选材料”；“涂层提升了碳材料超高温下的抗烧蚀性能，并取得了巨大成功”。项目组核心成员受邀在本领域国内外重要学术会议做大会和邀请报告 40 余次，显著提升了国际影响力。

基于该项目理论成果发展的 CVD 涂层技术与方法获授权发明专利 20 件，已在航空、航天、核能和民用领域得到推广应用，包括中国航发沈阳发动机研究所、航天科工四院第四总体设计部、航天科技一院北京强度环境研究所等单位，突破了国家重大战略工程亟需的高推比航空发动机中心锥（首次通过核心机地面试车）、新一代航天飞行器大面积整体舱段（通过 2800℃、2500 秒风洞考核）、核能轻质翅片（填补国内空白）等多项关键材料应用难题，推广应用于新型 MOCVD 设备用石墨基座、耐高温堵盖等民用领域，使我国跻身于该领域国际前列，科学意义和社会效益十分显著。

## 四、客观评价

该项目 5 篇代表性论文发表在复合材料领域顶刊 *Composites Part B* (IF: 14.2) 等期刊上，平均影响因子 10.9，被 *Nature Communications*、*Materials Today* 等权威期刊他引 395 次，单篇最高他引 132 次；获 2023 年陕西高等学校科学技术特等奖[其他附件 2]。研究成果得到美国、英国、俄罗斯等 30 余个国家和地区及 100 余位领域内著名学者的广泛引用和积极评价。引文评价作者包括三位世界陶瓷科学院院士 (W. Fahrenholtz、R. Riedel 和 W. Krenkel 教授)、欧洲科学院院士 J.

Binner 教授、俄罗斯科学院院士 E. A. Levashov 教授、英国皇家化学学会会士 A. K. Tyagi 教授和国内 9 名院士等本领域著名学者。

1. 对于发现点一：英国皇家化学学会会士 A. K. Tyagi 教授在其论文【Progress in Solid State Chemistry, 2015, 43: 98-122】中高度评价该项目工作，认为制备的涂层“具有**极其优异的抗氧化性能** (...have **very good oxidation resistive properties**...)” [其他附件 4-1]；中国工程院院士蹇锡高教授在代表性引文 7 【Corrosion Science, 2019, 154: 1-10】中评价代表作[5]，认为制备的涂层“可以实现高温下**长寿命抗氧化** (...for **long term anti-oxidation** at high temperatures...)”；国家级领军人才邹晓新教授在代表性引文 8 【Nature Communications, 2023, 14: 5119】中评价认为，该项目“可以制备出多种不同的超高温陶瓷（代表作[5]），可将其用作高温结构材料和抗氧化涂层等（A number of various borides can be produced and used as, for example, high temperature structural materials, anti-oxidation coating materials...）”。

2. 对于发现点二：世界陶瓷科学院院士、美国陶瓷学会会士 W. Fahrenholtz 教授在代表性引文 4 【Journal of the European Ceramic Society, 2025, 45: 116963】中高度评价代表作[3]，认为“研制的**新型涂层**在 2373 K 以上表现出**优异的长时抗氧化/烧蚀性能** (...a **novel** (Hf<sub>1/3</sub>Zr<sub>1/3</sub>Ti<sub>1/3</sub>)C carbide coating with **excellent long-life ablation resistance** above 2373 K...)”；中国工程院院士江东亮教授在其论文【Journal of the European Ceramic Society, 2020, 40: 1784】评价认为该项目“制备的 HfC-SiC 梯度陶瓷涂层在 **2500℃超高温环境下的防护性能优异** (...**improved the ablation resistance** of gradient HfC-SiC ceramic coating of up to **2500℃**)” [其他附件 4-2]；中国科学院院士孙军教授在代表性引文 2【Ceramics International, 2025, 51(11): 14608-14618】充分肯定代表作[2]成果，评价认为制备的多元异质陶瓷涂层“氧化过程中的相变有利于提高陶瓷的韧性 (...transformation...beneficial for enhancing the toughness of ceramics...)”。

3. 对于发现点三：欧洲科学院院士、欧洲陶瓷学会主席 J. Binner 教授在其超高温陶瓷复合材料性能及应用综述【International Materials Reviews, 2020, 65: 389】（代表性引文 1）中引用**该项目组 8 篇论文**（含代表作[1]），高度评价该项目成果，认为该项目 CVD 技术“能够制备纳米级陶瓷颗粒和纯净的陶瓷相 (...enable the infiltration of nano-size particles and pure phase compound...)”，并且认为“纳米线有助**缓解热应力**和**提高涂层韧性** (...the nanowires helping to **alleviate the thermal stresses** developed and **increasing the coating toughness**...)”；俄罗斯科学院院士、世界陶瓷科学院院士 E. A. Levashov 教授在代表性引文 5 【Journal of the European Ceramic Society, 2025, 45(9): 117293】高度评价代表作[4]，认为制备的材料“是**应用于航空航天高温环境下的最佳候选材料** (...as **prime candidates for high temperature applications in the aerospace sector**...)”；中国科学院院士韩杰才教授在代表性引文 6 【Journal of Materials Science & Technology, 2022, 102: 137-158】中充分肯定代表作[5]，认为“采用超高温陶瓷纳米线作为增强相，可

以提升超高温陶瓷的韧性和抗热震性能，克服陶瓷的固有脆性（...to improve the toughness and thermal shock resistance of UHTCs and to overcome their inherent brittleness...）”。

4. 对于发现点四：世界陶瓷科学院院士 R. Riedel 教授在其发表的论文【Journal of the European Ceramic Society, 2020, 40: 3499】中高度评价了该项目成果，认为该项目制备的陶瓷涂层“**具有优异的抗烧蚀性能，是极具发展前途的抗烧蚀材料（...highly promising materials of choice...excellent ablation resistance）**”[其他附件 4-3]；中国工程院院士周玉教授在代表性引文 3【Surface & Coatings Technology, 2024, 476: 130268】，评价认为代表作[2]制备的超高温陶瓷涂层在烧蚀过程中“可保护涂层和基底免受氧化（...protecting the coatings and substrates from oxidation...）”；中国工程院院士柴立元教授在其论文【Journal of Central South University, 2014, 21: 472】中充分肯定了该项目成果，评价认为制备的陶瓷涂层“**提升了碳材料超高温下的抗烧蚀性能，并取得了巨大成功（...improve the ablation resistance of carbon material at ultrahigh temperature...and achieved great success）**”[其他附件 4-4]。

5. 应用评价：该项目研究成果已应用于中国航发沈阳发动机研究所、航天科工四院第四总体设计部、航天科技一院北京强度环境研究所等单位，突破航空、航天、核能等领域国家重大战略亟需的大尺寸中心锥、大面积整体舱段、超薄轻质散热翅片等多项关键材料应用难题，得到应用单位充分肯定和一致好评。主要评价有：“国内相关单位已进行多年研究，但**一直未实现突破**”，“委托西北工业大学研制新一代航空发动机用碳/碳复材中心锥，该件最大直径 638mm，**已应用于核心机地面试车，在国内尚属首次，对推动我国航空发动机喷管轻量化、提高耐高温能力具有重要意义**”[其他附件 5-1]；“该构件结构复杂、尺寸大（最大尺寸为 1.1m），**制造难度大**”，“西北工业大学研制的超高温热防护 C/C 复合材料大面积整体舱段，轻质、力学及**抗氧化/烧蚀性能优异，对新一代高速飞行器大面积热防护系统的轻量化、简化结构设计、提高耐高温能力及服役稳定性具有重要意义**”[其他附件 5-2]；“在 2000℃ 极端耦合环境下材料烧蚀较轻、能保持较高的剩余强度，**对支撑我国新型航天高速飞行器热防护系统的研制具有重要意义**”[其他附件 5-3]；“通过实际服役环境安装模拟测试，其各项性能指标均满足要求，**在国内尚属首次，对我国核反应堆的轻量化具有重要意义**”[其他附件 5-4]；“制备出均匀致密、与构件具有良好结合且耐高温腐蚀性能优异的陶瓷涂层，对芯片高端制造装备国产化具有重大的社会效益”[其他附件 5-5]；“大尺寸堵盖产品表面涂层厚度均匀、致密且晶型结构一致，耐高温抗氧化性能良好”，“解决了目前传统堵盖产品存在的高温抗氧化性能不足的难题，延长产品使用寿命”[附件 5-6]。

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	Ablation resistance of HfC coating reinforced by HfC nanowires in cyclic ablation environment	Journal of the European Ceramic Society	Jincui Ren, Yulei Zhang, Pengfei Zhang, Tao Li, Jinhua Li, Yang Yang	2017 年 37 卷 2759-2768 页	2017 年 7 月 15 日	Yulei Zhang	Jincui Ren	任金翠, 张雨雷, 张鹏飞, 李涛, 李金华, 杨旻	109	SCI Expanded Web、Scopus、CNKI	是
2	Long-time ablation behavior of the multilayer alternating CVD-(SiC/HfC) <sub>3</sub> coating for carbon/carbon composites	Corrosion Science	Jian Zhang, Yulei Zhang, Yanqin Fu, Xiaofei Zhu, Ruicong Chen	2021 年 189 卷 109586 页	2021 年 8 月 15 日	Yulei Zhang	Jian Zhang	张建, 张雨雷, 付艳芹, 朱肖飞, 陈睿聪	47	SCI Expanded Web、Scopus、CNKI	是

3	A novel ( $\text{Hf}_{1/3}\text{Zr}_{1/3}\text{Ti}_{1/3}$ ) C medium-entropy carbide coating with excellent long-life ablation resistance applied above 2100 °C	Composites Part B: Engineering	Jiachen Li, Yulei Zhang, Yuanxiao Zhao, Yan Zou, Junshuai Lv, Jie Li	2023 年 251 卷 110467 页	2023 年 2 月 15 日	Yulei Zhang	Jiachen Li	李佳宸, 张 雨雷, 赵元 肖, 邹衍, 吕君帅, 李 捷	51	SCI Expanded Web、 Scopus、 CNKI	是
4	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 年 250 卷 110453 页	2023 年 2 月 1 日	Yulei Zhang	Yanqin Fu	付艳芹, 张 雨雷, 陈 慧, 韩丽 媛, 殷学 民, 付前 刚, 孙佳	56	SCI Expanded Web、 Scopus、 CNKI	是
5	Anti-oxidation and ablation properties of carbon/carbon composites infiltrated by hafnium boride	Carbon	Hejun Li, Dongjia Yao, Qiangang Fu, Lei Liu, Yulei Zhang, Xiyuan Yao, Yongjie Wang, Hailiang Li	2013 年 52 卷 418- 426 页	2013 年 2 月 1 日	Hejun Li	Hejun Li	李贺军, 姚 栋嘉, 付前 刚, 刘磊, 张雨雷, 姚 西媛, 王永 杰, 李海亮	132	SCI Expanded Web、 Scopus、 CNKI	是
合 计									395		

## 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
张雨雷	1	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	项目第一完成人，对发现点 1、2、4 做出重要贡献： 1.探明了气/液/固前驱体热解反应及涂层生长涉及的物理化学过程，揭示了 CVD 陶瓷涂层微结构调控机制（发现点 1，代表性论文[4]）； 2.提出了共沉积多元/多相高温陶瓷涂层的新思路，发展了多元固溶、多相镶嵌涂层的共沉积方法（发现点 2，代表性论文[1]）； 3.提出了提高复杂构件表面涂层均匀性与致密性的新思路和方法，解决了大尺寸异形复杂构件表面涂层均匀差的难题（发现点 4，代表性论文[2]）。
张建	2	无	助理研究员	清华大学	西北工业大学	项目主要完成人，对发现点 3、4 做出重要贡献： 1.创新发展了多层交替涂层的一步 CVD 制备方法，解决了多次沉积导致热应力累积的难题（发现点 3，代表性论文[2]）； 2.揭示了旋转方式/速率、涡流流场、滞



						留时间协同控制的前驱体气体扩散与热解反应竞争机制，建立了大尺寸异形复杂构件表面涂层均匀沉积模型（发现点 4，代表性论文[2]）。
付艳芹	3	无	副研究员	河南省科学院碳基复合材料研究院	西北工业大学	项目主要完成人，对发现点 1、3 做出重要贡献： 1.发现了界面诱发晶格失配应变影响涂层择优生长取向等决定涂层微结构的本质原因，建立了“工艺-微结构-性能”的映射关系（发现点 1，代表性论文[2]）； 2.揭示了核壳结构抑制纳米线异常长大的作用机理，提升了纳米线的高温稳定性（发现点 3，代表性论文[4]）。
李涛	4	无	副研究员	河南省科学院碳基复合材料研究院	西北工业大学	项目主要完成人，对发现点 1、3 做出重要贡献： 1.建立了 CVD 陶瓷涂层沉积前驱体多级热解反应模型，获得了热解反应涉及的各级产物之间的相对能量关系（发现点 1，代表性论文[1]）； 2.揭示了纳米线细化晶粒、界面变形-撕裂脱粘-多级拔出的协同增韧涂层机理，解决了陶瓷涂层脆性开裂难题（发现点 3，代表性论文[1]）。
李贺军	5	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	项目主要完成人，对发现点 2、4 做出重要贡献：

						<p>1.揭示了多元协同高阻氧-自愈合长寿命氧化/烧蚀防护机理，突破了传统CVD 高温陶瓷涂层阻氧及自愈合能力不足的难题（发现点 2，代表性论文[5]）；</p> <p>2.研制出首台提高涂层均匀性的多功能 CVD 涂层沉积设备，实现了中心锥、前缘等多种异形构件表面陶瓷涂层的均匀可控沉积（发现点 4，代表性论文[5]）。</p>
孙佳	6	无	副教授	西北工业大学	西北工业大学	<p>项目主要完成人，对发现点 3 做出重要贡献：</p> <p>1.发展了核壳结构纳米线增韧涂层CVD 制备工艺方法（发现点 3，代表性论文[4]）；</p> <p>2.阐明了微观钉扎与机械互锁增强界面结合与抗剥离性能的作用机理（发现点 3，代表性论文[4]）。</p>

## 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	西北工业大学为张雨雷教授团队提供了优越的软硬件条件，建立了 C/C 复合材料与高温陶瓷涂层 CVD 制备及考核实验室，确保了项目的顺利进行。主要学术贡献包括：揭示了 CVD 陶瓷涂层生长机理，创建了系列化高温陶瓷涂层体系，实现了不同微结构涂层主动设计与可控制备；提出了构建多元/多相、多层交替仿生结构等多种提高陶瓷涂层氧化/烧蚀防护性能的新思路，解决了传统陶瓷涂层阻氧能力不足及韧性差等难题，揭示了多元固溶诱导晶粒细化构筑强阻氧屏障、多元氧化物包晶转变析出熔融自愈合相、难熔骨架-熔融相多相镶嵌结构提升氧化膜稳定性等多元协同高阻氧-自愈合长寿命氧化/烧蚀防护机理；自主研发出多功能 CVD 陶瓷涂层沉积设备，攻克了大尺寸异形构件涂层工艺放大形性适应性差的国际难题，为实现 CVD 高温陶瓷涂层高性能制备和广泛应用奠定了理论及应用基础。该项目以上成果在西北工业大学完成，其知识产权归西北工业大学所有。
河南省科学院碳基复合材料研究院	2	河南省科学院碳基复合材料研究院为张雨雷教授团队提供了完备的软硬件条件，建立了 CVD 高温陶瓷涂层制备及极端耦合环境考核平台，与西北工业大学合作确保了项目的顺利进行。主要学术贡献包括：发展了超高温陶瓷纳米线形性调控及强韧兼顾核壳结构纳米线构筑方法，阐明了核壳结构抑制纳米线异常长大的作用机制，揭示了纳米线细化晶粒、多级拔出协同增韧机理；探明了大尺寸异形复杂构件表面涂层的沉积工艺规律，实现了大尺寸异形复杂 C/C 构件表面 CVD 高温陶瓷涂层均匀性制备，研制的试验件通过超高温极端环境考核，并推广 CVD 陶瓷涂层的应用。该项目以上成果在河南省科学院碳基复合材料研究院完成，其知识产权归河南省科学院碳基复合材料研究院所有。

## 八、完成人合作关系说明

该项目研究成果由本人与张建、付艳芹、李涛、李贺军和孙佳 6 位共同合作完成。其中本人师从李贺军院士，在李贺军院士指导下从攻读硕士研究生阶段就

开始抗氧化/烧蚀涂层的研究工作，自 2010 年开始至今，主持该项目整体研究工作。张建、付艳芹、李涛为本人在 2015 年-2023 年间指导的研究生（均为硕博连读），他们硕博连读期间一直从事本项目的相关研究工作。张建在博士毕业后继续在清华大学从事化学气相沉积高温陶瓷涂层制备及应用推广的研究，付艳芹继续从事化学气相沉积合成超高温陶瓷纳米线及强韧化涂层研究，李涛继续从事高温陶瓷涂层制备及长寿命氧化/烧蚀防护机理的研究。孙佳 2014 年加入本项目团队，主要从事纳米增韧材料的制备及高温陶瓷涂层氧化/烧蚀防护机理的研究。

6 位主要完成人的合作方式主要包括参与课题组项目、合著论文、合作申报专利和共同报奖等。支撑本项目研究所开展的课题均由本人和其他完成人共同完成，本项目主要知识产权和代表性论著均为本人和相应的完成人共同署名。此外，本人与张建、付艳芹、李涛、李贺军 5 位完成人均为 2023 年陕西高等学校科学技术特等奖《化学气相沉积高温陶瓷涂层微结构调控与长寿命防护机理》的主要完成人，具体完成人合作关系情况见《完成人合作关系情况汇总表》。

本人作为第一完成人，对本项目完成人合作关系及上述内容的真实性负责，特此说明。