

2026 年度拟提名陕西省科技进步奖项目公示内容

一、项目名称

航空航天碳化硅陶瓷基复合材料关键技术体系创新与产业化应用

二、提名者及提名意见

提名者：中共陕西省委军民融合发展委员会办公室

提名意见：

该项目针对航空航天新一代重大装备对碳化硅陶瓷基复合材料（CMC-SiC）更高服役性能、短周期低成本制造、大批量高稳定生产的重大需求，在国家重大科技专项、发改委产业化项目等持续支持下，重点突破了 CMC-SiC 多元微结构和成分设计、多相复合工艺、高效批量制造等系列关键技术，并实现了产业化应用。

主要科技创新：①建立了面向结构功能一体化的多元微结构和成分设计方法，突破了不同服役环境下高性能结构功能一体化设计瓶颈。②提出了气、液、固相复合制备工艺，解决了不同微结构单元的精确快速制造难题，从而有效提升了材料高温服役性能。③发展了均匀性控制与批量化制造装备及应用方法，实现了大尺寸复杂型面热防护构件、复杂高精度热结构件、高精密轻质结构件的精准高效批量制造。

项目发表论文 470 余篇，出版专著 3 部；授权国家发明专利 84 项，美国专利 1 项；成果应用于 96 类 33000 余构件，已在国际上首颗激光雷达二氧化碳探测卫星、我国第二代数据中继卫星、可重复使用空天飞行器等 31 种型号上装机服役，推动 CMC-SiC 由前沿关键材料跨越成为广泛应用的先进骨干材料。近三年累计经济效益约 26.1082 亿元。

科技成果评价专家组认为，项目技术总体达到国际先进水平，其中气-液-固时空耦合工艺技术居国际领先。

提名该项目为陕西省科学技术进步奖一等奖。

三、项目简介

碳化硅陶瓷基复合材料（CMC-SiC）具有耐高温、低密度和高强韧等显著优势，在国家航空航天重大装备领域不可或缺。美欧已将其应用于新一代航空发动机热端部件、空天飞行器热防护系统等核心部件，并实施严格技术封锁，我国也将其列为国家战略材料。随着我国航空航天重大装备的快速发展，高分辨卫星、空天飞行器、航空发动机等新一代重大装备要求 CMC-SiC 具备更长寿命、更高温度及电磁功能，并实现短周期低成本制造、大批量高稳定生产。由此带来结构功能一体化多元微结构和成分设计难、多相耦合精确快速致密化难、均匀性控制与批量化生产难等一系列关键难题。开展 CMC-SiC 技术体系创新，对于推动航空航天重大装备研制及性能提升，需求迫切，意义重大。

在国家重大科技专项、发改委产业化项目等 22 个国家级项目持续支持下，团队历时 14 年，重点突破了 CMC-SiC 多元微结构和成分设计、多相复合工艺、高效批量制造等系列关键技术，并实现产业化应用。主要科技创新如下：

1. 建立了 CMC-SiC 多元微结构和成分设计方法。突破了微结构和成分双梯度化界面设计技术、元素定量掺杂与组元定域分布技术、多尺度缺陷调控技术，实现了满足不同服役环境要求的结构功能一体化微结构和成分按需设计，形成了长寿命 CMC-SiC、超高温 CMC-SiC、电磁响应型 CMC-SiC 等系列化材料体系。其中，利用多尺度缺陷调控技术设计了力学响应不敏感的低维异质共价复合型缺陷，实现了承载/电磁屏蔽的高效协同，制备的 C_f/CNTs-PyC/SiC 弯曲强度达到 435.5 MPa 的同时，平均屏蔽效能高达 64.7 dB，显著优于国内外同类技术的 122.6 MPa 和 38.1 dB。

2. 提出了 CMC-SiC 气、液、固相复合制备工艺。突破了气-液-固时空耦合工艺技术、强遗传性定位液-固反应技术、液-气前驱体可控热解制备技术，实现了不同微结构单元的精确快速制造，形成了与长寿命 CMC-SiC、超高温 CMC-SiC、电磁响应型 CMC-SiC 相适应的配套化工艺体系。其中，发明的气-液-固时空耦合工艺，从根本上解决了长寿命 CMC-SiC 中协同缓解应力/长效愈合作用的关键单元制造难题，制备的 SiC/SiC-SiHfBCN 在 1500°C 水氧腐蚀环境 80 MPa 拉应力下蠕变寿命≥300 小时，优于美国 NASA 同类技术。

3. 发展了 CMC-SiC 均匀性控制与批量化制造装备及应用方法。突破了大尺度气、液、固相流场控制技术和大空间构件高效柔性排布技术，实现了大尺寸复杂型面热防护构件、复杂高精度热结构件、高精密轻质结构件的均匀性控制与精准高效批量制造，显著提升了产业化规模，建立了体系化的产业化制造装备。批产构件取样力学性能离散系数由 15% 降至 10% 以下，显著提升了构件一致性与稳定性。

在以上科技创新基础上研制和批产的 96 类 33000 余构件，已在 31 种型号上装机服役。成果应用于国际上首颗激光雷达二氧化碳探测卫星 DQ-1 号、我国第二代数据中继卫星天链二号等 8 种型号，显著提升了我国卫星在轨服役性能；支撑了可重复使用空天飞行器经受多次再入大气层和 268 天长期在轨驻留考验，使我国成为继美国后第二个掌握可重复使用空天飞行器的国家；有力支撑了我国新一代高推重比航空发动机研制。获批国家工程研究中心、国家级专精特新“小巨人”企业、陕西省产业链链主企业。近三年累计经济效益 26.1082 亿元。推动了 CMC-SiC 由前沿关键材料跨越成为广泛应用的先进骨干材料。

发表论文 470 余篇，出版专著 3 部，推动了 CMC-SiC 基础理论发展。授权国家发明专利 84 项，美国发明专利 1 项，提升了我国 CMC-SiC 技术创新能力。

科技成果评价专家组认为，项目技术总体达到国际先进水平，其中气-液-固时空耦合工艺技术居国际领先。

四、客观评价

项目发表论文 470 余篇，出版专著 3 部，是 CMC-SiC 领域发表论文最多、

他引次数最多的团队，有力推动了 CMC-SiC 基础理论发展；授权国家发明专利 84 项，美国发明专利 1 项，获中国专利银奖，显著提升我国 CMC-SiC 技术创新能力；成果应用于 10 家航空航天主机院所，推动 CMC-SiC 由前沿关键材料跨越成为广泛应用的先进骨干材料。项目成果在国际上具有重大的学科影响力，获得国内外广泛关注与高度评价，以及用户单位的高度评价与认可。

1. 专家评价

2025 年 6 月 22 日，中国复合材料学会在北京组织中国航天科技侯晓院士、哈尔滨工业大学赫晓东院士等 7 名专家对该成果进行了评价，认为：“该项目技术难度大、创新性强，拥有多项知识产权，核心技术自主可控。项目技术总体达到国际先进水平，其中气-液-固时空耦合工艺技术居国际领先。”

2. 项目验收意见

（1）国家重大科技专项“陶瓷基复合材料一体化成型与加工技术研究”项目验收意见：“突破了 CMC 构件结构与工艺一体化协同设计技术等关键技术，研制的样件已交付用户开展应用研究，对航空发动机新型号研制具有重要的支撑作用，取得了显著的军事效益和社会效益。”

（2）国家发展改革委产业化项目“高性能 SiC 陶瓷基复合材料在刹车和航空发动机领域的产业化及其技术研究”验收意见：“项目建成了高性能 SiC 陶瓷复材工程化和产业化示范线，并完成了相关考核验证和装机应用示范，突破制约高性能 SiC 陶瓷复材工程化和产业化的关键技术，为航空发动机用 SiC/SiC 复合材料产业化奠定基础，并实现我国碳陶刹车材料的产业化。”

（3）工信部工业强基项目“耐热结构领域超高温陶瓷基复合材料实施方案”验收意见：“突破了制约超高温 SiC 陶瓷复材产业化的一系列关键技术。实现了陶瓷复材在耐热结构上的应用，带动了我国超高温 SiC 陶瓷复材在空天飞行器、航天发动机、空间探测等领域的工程化和产业化技术的发展。”

3. 应用单位评价

（1）中国科学院上海技术物理研究所评价：“西安鑫垚陶瓷复合材料股份有限公司研制了大型 CMC 低膨胀次镜支撑筒轻质构件，成功应用于 DQ-1 激光雷达大气探测卫星望远镜系统，为我国新一代高精度大气探测卫星发展做出重要贡献。”

（2）西安空间无线电技术研究所评价：“西北工业大学和西安鑫垚陶瓷复合材料股份有限公司为我单位研制配套锁定臂等构件 200 余件，应用于我国第二代中继卫星星间链路天线，对天线在轨高精度型面保持起到重要作用，达到国际先进水平。”

（3）中国航空工业集团公司成都飞机设计研究所评价：“西北工业大学和西安鑫垚陶瓷复合材料股份有限公司完成了我单位某高速飞行器用轻质、耐热、承载一体化 C/SiC 及相应大型复杂型面热防护构件的研制，已装机应用，经受多次再入大气层和长期在轨驻留考验，表现良好。为我国某重大创新项目做出了重要贡献。”

(4) 北京航天长征飞行器研究所评价：“西北工业大学和西安鑫垚陶瓷复合材料股份有限公司研制的空气舵、水平翼构件共计 400 余件，累计完成 10 余次飞行试验验证，构件应用达到国内先进水平，首次实现 CMC 材料在高速飞行器的批量应用。”

(5) 北京临近空间飞行器系统工程研究所评价：“西安鑫垚陶瓷复合材料股份有限公司研制的轻质、防热、承载一体化关键产品，显著提升了 C/SiC 陶瓷基复合材料的技术成熟度及其在航天国防领域的工程应用水平，具有突出的军事和社会效益。”

(6) 西安航空制动科技有限公司评价：“西北工业大学和西安鑫垚陶瓷复合材料股份有限公司研制的碳化硅陶瓷基复合材料产品，已应用于 14 种机型，其中 13 种已定型批产，为我单位形成经济效益 19.6 亿元，实现了碳化硅陶瓷基复合材料在航空航天系统上的产业化应用，为我国航空航天系统的发展做出了重要贡献。”

4. 用户单位感谢信

(1) 北京空间机电研究所感谢信：“实践二十三号卫星和通信技术试验卫星十号，分别于 2023 年 1 月 9 日和 11 月 3 日成功发射入轨，卫星顺利进入预定轨道。贵公司为我所配套次镜筒及支架等结构件，研制过程顺利产品质量可靠！”

(2) 中国航天科工三十一研究所感谢信：“我们在喷管内层等产品生产方面持续深化合作，巩固和加深了双方友谊，为后续业务拓展奠定了坚实基础！”

5. 关键指标检测

(1) 经航天科工三院及国家电磁辐射控制材料工程技术研究中心检测， $C_f/CNTs-PyC/SiC$ 弯曲强度为 435.5 MPa，平均屏蔽效能为 64.7 dB。

(2) 经航天科工二院二〇七所检测，吸波陶瓷基复合材料发动机尾喷管模拟件相较于金属模拟件，雷达散射截面（RCS）均值降低 10 dBm²。

(3) 经极端环境服役性能与热防护性能实验室检测，SiC/SiC-SiHfBCN 复合材料在 1500°C、14 kPa H₂O: 8 kPa O₂: 78 kPa Ar 水氧环境中 80 MPa 拉应力作用下的蠕变寿命≥300 小时。

(4) 经中国航发湖南动力机械研究所检测，陶瓷基复合材料涡轮转子可承受 130000 r/min 的超速试验考核。

(5) 经湖南博翔新材料有限公司检测，在 2023 年至 2024 年大面积梯度改性构件、前缘本体构件取样（共 10 批）的弯曲强度离散系数均小于 10%。

五、应用情况

项目成果应用于轻质结构件、热防护构件、热结构件、高性能刹车构件等共 96 类 33000 余件的研制与批产，在我国空间卫星、空天飞行器、航空发动机等重大工程领域得到了应用，在 31 种型号上装机服役。具体应用情况如下：

1. 空间卫星领域：通过科技创新，突破了大尺寸高精密轻质结构件制造技术。成果应用于高刚度高稳定性 DQ-1 大型 CMC 低膨胀次镜支撑筒轻质构件，我国第二代数据中继卫星星间链路天线配套高精密高稳定性锁定臂等构件，实

践二十三号卫星和通信技术试验卫星十号主支撑筒、主承力支架等复杂大尺寸高比刚度关键构件。CMC-SiC 尺寸稳定性、频率特性、线膨胀系数等关键性能指标满足型号设计要求，一致性好，对天线在轨高精度型面保持起到了重要作用，支撑 8 种空间卫星在轨稳定运行，性能良好。

2. 空天飞行器领域：通过科技创新，突破了大尺寸复杂型面热防护构件制造技术。成果应用于飞行器小型化大载荷的空气舵前缘、护板、折叠舵等隔热套件，大尺寸复杂形状、抗氧化、高强度的头部保护罩、安定面、后缘舵、水平翼、全动舵、舵机盖板、防热挡块等部件，飞行器轻质、防热、承载一体化的头锥、前缘边条、舵面、空气舵、水平翼等热防护构件等，共上千套产品。显著提升了耐高温 CMC-SiC 成熟度和工程应用水平，可满足耐高温承载一体化结构的使用需求，支撑我国 9 个型号飞行器的飞行验证与批产。

3. 航空发动机领域：通过科技创新，突破了复杂高精度热结构件制造技术。成果应用于超燃冲压发动机抗多介质高温氧化冲刷、大尺寸薄壁进气道及尾喷管构件，燃烧室火焰筒、涡轮外环、火焰稳定器、隔热屏等关键静止热端部件，高压涡轮导叶，低压涡轮导叶、后支板，核心机用排气机匣筒体、中心锥等新一代航空发动机构件，喷口等隐身构件，大尺寸薄壁回转体高密封性喷管构件。CMC-SiC 构件超过目前常用高温合金耐温能力上限，可扩展发动机热端部件燃气温度的设计上限，且与同结构的镍基高温合金构件相比，结构减重可>30%，为我国新一代高推重比航空发动机的论证和研制提供了重要支撑。

4. 高性能飞机刹车领域：通过科技创新，突破了高性能刹车构件批量制造与性能调控技术。成果应用于飞机刹车盘批量化生产中的表面质量控制、反应熔体渗透均匀性控制、刹车能载与残留硅调控，支撑 CMC-SiC 在飞机刹车系统上的批量化生产 3 万余件，应用于 14 种机型，其中 13 种已完成定型批产。

主要应用单位情况表

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/电话
1	中国科学院上海技术物理研究所	科技创新 1, 2, 3	应用于次镜支撑筒等构件，已成功服役于 DQ-1 激光雷达大气探测卫星望远镜系统。	2016 年至今	贾建军 13816537896
2	西安空间无线电技术研究所	科技创新 1, 2, 3	应用于锁定臂等构件，成功应用于我国第二代中继卫星天线，对天线在轨高精度型面保持起到了重要作用。	2016 年至今	李欢笑 18710713596
3	北京空间机电研究所	科技创新 1, 2, 3	应用于支撑筒、支架、前板、主承力板、三杆构件，服役于实践二十三号、通信技术试验卫星十号等多颗卫星。	2021 年至今	赵亮 010-68113670
4	北京空天技术研究所	科技创新 1, 2, 3	应用于头罩、安定面、后缘舵、水平翼、全动舵等核心	2020 年至今	郭明 13552286011

			热结构件，顺利通过了地面综合环境考核实验和飞行试验验证。		
5	北京机电工程研究所	科技创新 1, 2, 3	突破耐超高温、高强度、低烧蚀技术，应用于主承载结构、前缘结构等，通过各项试验考核。	2020 年 至今	林晔 13651002347
6	中国航空工业集团成都飞机设计研究所	科技创新 1, 2, 3	应用于高速飞行器头锥、前缘边条、舵面等构件，支撑飞行器经受了多次再入大气层和长期在轨驻留的考验，表现良好。	2015 年 至今	彭涛 028-85509251
7	北京航天长征飞行器研究所	科技创新 1, 2, 3	应用于空气舵、水平翼等构件，累计完成 10 余次飞行试验验证，首次实现 CMC 材料在高速飞行器的批量应用。	2019 年 至今	常远 010-68751241
8	北京临近空间飞行器系统工程研究所	科技创新 1, 2, 3	应用于控制舱、平台支架、拼接盖板、底遮板、舵、翼等构件，显著提升了 C/SiC 技术成熟度及其在航天领域的工程应用水平。	2021 年 至今	初洪宇 13401128373
9	中国航发四川燃气涡轮研究院	科技创新 1, 2, 3	应用于涡轮导叶、后支板、燃烧室、隔热屏、中心锥等构件，完成了地面台及高空台试验考核，可扩展热端部件燃气温度的设计上限。	2020 年 至 2022 年	刘巧沐 17318959872
10	西安航空制动科技有限公司	科技创新 1, 2, 3	应用于研制碳陶飞机刹车盘，已应用于 14 种机型，其中 13 种已定型批产，实现 CMC 材料在飞机刹车系统上的批量化应用。	2022 年 至今	任金伟 029-88453051

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	发明专利	溶胶-凝胶结合反应熔体渗透快速制备大厚度连续纤维增韧 SiC 基复合材料的方法	中国	ZL202111117274.5	2022 年 8 月 2 日	5350606	西北工业大学	成来飞；郭广达；叶昉；宋超坤；张立同
2	发明专利	超高温自愈合陶瓷基复合材料的多相耦合快速致密化方法	中国	ZL202011335106.9	2023 年 1 月 24 日	5710754	西北工业大学	栾新刚；徐鑫铭；张家豪；成来飞
3	发明专利	一种 SiC 纳米线增强 SiBCN 陶瓷的制备方法	中国	ZL201510377613.1	2017 年 6 月 6 日	2507924	西北工业大学	刘永胜；门静；张青；王晶；田卓；成来飞；张立同
4	发明专利	兼具优异成型性和良好力学性能的 SiC/SiC 陶瓷复合材料及制备方法	中国	ZL202210274085.7	2023 年 10 月 24 日	6429052	西北工业大学	成来飞；叶昉；李盛豪；李朝晨；张立同
5	发明专利	一种陶瓷基复合材料快速制备方法	中国	ZL201510724406.9	2017 年 8 月 8 日	2579096	西北工业大学	栾新刚；王建强；成来飞
6	发明专利	具有电磁阻抗渐变基体的吸波陶瓷基复合材料快速制备方法	中国	ZL201811199009.4	2021 年 3 月 23 日	4311529	西北工业大学	叶昉；殷小玮；李明星；莫然；成来飞；张立同
7	发明专利	航空发动机陶瓷基复合材料固定导向器叶片结构及其成型	中国	ZL201911289657.3	2021 年 12 月 14 日	4847109	西安鑫垚陶瓷复合材料股份有限公司	涂建勇；王佳民；陈旭；何江怡；王

								文红；卜石；成来飞
8	发明专利	一种 C/SiC 复合材料结构镜筒	中国	ZL202210884478.X	2025 年 4 月 4 日	7855166	西安鑫垚陶瓷复合材料股份有限公司	廖军刚；史思涛；吴亚明；陈旭；付志强；吕雉；赵兵兵；卜石
9	发明专利	一种改善流场均匀性的装置	中国	ZL201711132312.8	2024 年 3 月 1 日	6757062	西安鑫垚陶瓷复合材料股份有限公司	张晰；李建章；王义洪；王鹏；姜伟光；成来飞
10	发明专利	一种用于大壁厚陶瓷基复合材料零件 CVI 致密化方法	中国	ZL201911285046.1	2022 年 5 月 13 日	5150730	西安鑫垚陶瓷复合材料股份有限公司	杨云云；卜石；陈旭；马渊；赵兵兵；李建章；成来飞

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
成来飞	1	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	对科技创新 1, 2, 3 做出了创造性贡献, 包括: (1)建立了面向结构功能一体化的多元微结构和成分设计方法, 并指导方案实施; (2)提出了气、液、固相复合制备工艺, 并指导方案实施; (3)发展了均匀性控制与批量化制造装备及应用方法, 并指导方案实施。
栾新刚	2	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	对科技创新 1, 2 做出了创造性贡献, 包括: (1)提出了微结构和成分双梯度化界面技术, 并指导方案实施; (2)发展了气-液-固时空耦合工艺技术, 并指导方案实施。
叶昉	3	复合材料系主任	教授	西北工业大学	西北工业大学	对科技创新 1, 2 做出了创造性贡献, 包括: (1)提出了多尺度缺陷调控技术, 建立了承载/透波、承载/吸波一体化方法, 并指导方案实施; (2)发展了液-气前驱体可控热解制备技术, 并指导方案实施。
刘永胜	4	超高温结构复合材料国家级重点实验室副主任	教授	西北工业大学	西北工业大学	对科技创新 1, 2 做出了创造性贡献, 包括: (1)提出了元素定量掺杂与组元定域分布技术, 并指导方案实施; (2)发展了强遗传性定位液-固反应技术, 并指导方案实施。

张青	5	无	副研究员	西北工业大学	西北工业大学	对科技创新 1, 2 做出了创造性贡献, 包括: (1) 提出了承载/屏蔽一体化方法, 并指导方案实施; (2) 发展了催化转化法制备微观异质界面缺陷技术, 并指导方案实施。
涂建勇	6	总工程师	高级工程师	西安鑫垚陶瓷复合材料股份有限公司	西安鑫垚陶瓷复合材料股份有限公司	对科技创新 3 以及科技创新在航空发动机上的应用做出了创造性贡献, 包括: (1) 发展了系列化分流盘装置, 验证了小尺寸构件的批量化制造; (2) 推动了科技创新在复杂高精度航空发动机热结构件上的应用。
廖军刚	7	产品研发部部长	正高级工程师	西安鑫垚陶瓷复合材料股份有限公司	西安鑫垚陶瓷复合材料股份有限公司	对科技创新 3 以及科技创新在空间卫星上的应用做出了创造性贡献, 包括: (1) 发展了进气引导扩散装置, 验证了大尺寸构件的均匀化制造; (2) 推动了科技创新在大尺寸高精密空间卫星构件上的应用。
王鹏	8	工艺技术部部长	高级工程师	西安鑫垚陶瓷复合材料股份有限公司	西安鑫垚陶瓷复合材料股份有限公司	对科技创新 3 做出了创造性贡献, 包括: 发展了系列化扰流板装置, 实现了构件在制造装备中的高效柔性排布, 推动了构件的批量化制造。
陈翔	9	质量检验部部长	高级工程师	西安鑫垚陶瓷复合材料股份有限公司	西安鑫垚陶瓷复合材料股份有限公司	对科技创新 3 做出了创造性贡献, 包括: 发展了全流程质量监测和批量检测方法, 形成了构件排布数字化评价, 促进了构件的批量化制造。
张立同	10	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	对科技创新 1 以及科技创新的产业化应用做出了创造性贡献, 包括: (1) 提出了面向结构功能一体化的多元微结构和成

						分设计思想； (2)指导团队的关键技术体系创新在我国重大工程领域的应用验证。
陈旭	11	无	高级工程师	西北工业大学	西安鑫垚陶瓷复合材料股份有限公司	对科技创新 3 以及科技创新在空天飞行器上的应用做出了创造性贡献，包括： (1)发展了原料梯度进给方法，验证了厚壁复杂型面构件的均匀化制造； (2)推动了科技创新在复杂型面高速飞行器热防护构件上的应用。
范尚武	12	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	对科技创新 2 做出了创造性贡献，包括： 实施了气、液、固相复合制备工艺，支撑了超高温 CMC-SiC 材料体系的发展。
王晶	13	复合材料系主任助理	副研究员	西北工业大学	西北工业大学	对科技创新 2 做出了创造性贡献，包括： 实施了气、液、固相复合制备工艺，支撑了长寿命 CMC-SiC 材料体系的发展。
史思涛	14	无	工程师	西安鑫垚陶瓷复合材料股份有限公司	西安鑫垚陶瓷复合材料股份有限公司	对于科技创新 3 做出了创造性贡献，包括： 实施了大尺度 RMI 设备可控渗透-反应技术，支撑了碳陶制动盘产品的小批量制备与考核。
邓莹莹	15	无	工程师	国投陶瓷基复合材料研究院（西安）有限公司	西安鑫垚陶瓷复合材料股份有限公司	对科技创新 3 做出了创造性贡献，包括： 实施了 CVI 设备流场全域控制技术，支撑了卫星光机轻质构件的均匀化制造。

八、主要完成单位情况及创新推广贡献

完成单位	排名	对本项目科技创新和应用推广情况的贡献
西北工业大学	1	对科技创新 1, 2, 3 和科技创新的应用推广做出了创造性贡献, 包括: (1) 发展了面向结构功能一体化的多元微结构和成分设计方法。突破了微结构和成分双梯度化界面设计、元素定量掺杂与组元定域分布、多尺度缺陷调控等技术。 (2) 发展了气、液、固相复合制备工艺。突破了气-液-固时空耦合工艺、强遗传性定位液-固反应、液-气前驱体可控热解制备等技术, 实现了不同微结构单元的精确快速制造。 (3) 发展了均匀性控制与批量化制造装备及应用方法。突破了大尺度气液固相流场控制和大空间构件高效柔性排布等技术。 (4) 推动了科技创新在高分辨卫星、空天飞行器、航空发动机、高性能飞机刹车等新一代重大装备上的应用。
西安鑫垚陶瓷复合材料股份有限公司	2	对科技创新 3 和科技创新的应用推广做出了创造性贡献, 包括: (1) 建立了体系化的产业化制造装备, 实现了不同类型 CMC-SiC 构件的均匀性控制与批量化制造, 显著提升了产业化规模。 (2) 将科技创新成果应用于 96 类 33000 余构件的研制和批产, 推动其在 31 种型号上装机服役, 实现了 CMC-SiC 的工程化和产业化。

九、完成人合作关系说明

本人作为本项目第一完成人, 与本项目完成人栾新刚、刘永胜、叶昉、张青、张立同、范尚武、王晶均为西北工业大学材料学院教师, 同属超高温结构复合材料重点实验室科研团队。西安鑫垚陶瓷复合材料股份有限公司是西北工业大学超高温结构复合材料重点实验室科技成果转化的高新技术企业, 本项目完成人涂建勇、廖军刚、王鹏、陈翔、陈旭、史思涛、邓莹莹在项目完成期间同属西安鑫垚陶瓷复合材料股份有限公司。

本项目完成人之间具有共同知识产权、共同获奖、共同立项等合作关系, 具体如下:

本人与张立同是知识产权 1/3/4/6 的共同发明人;

本人与栾新刚是知识产权 2/5 的共同发明人;

本人与叶昉是知识产权 1/4/6 的共同发明人;

本人与刘永胜、张青、王晶是知识产权 3 的共同发明人；

本人与涂建勇是知识产权 7 的共同发明人；

廖军刚、史思涛、陈旭是知识产权 8 的共同发明人；

本人与王鹏是知识产权 9 的共同发明人；

本人与陈旭是知识产权 7/10 的共同发明人；

本人与张立同、刘永胜、叶昉是 2016 年教育部自然科学一等奖“结构功能一体化陶瓷基复合材料的设计、制备与应用基础”的共同获奖人；

本人与张立同、刘永胜、范尚武是 2016 年陕西省科学技术一等奖“连续纤维增韧陶瓷基复合材料的强韧化基础研究”的共同获奖人；

本人与张立同是 2019 年教育部技术发明一等奖“陶瓷基复合材料缺陷控制的强韧化新技术”的共同获奖人；

本人与张立同、刘永胜、栾新刚是 2022 年国家级教学成果奖“面向航空航天重大需求和学科前沿，培养复合材料拔尖创新人才”的共同获奖人；

涂建勇、陈翔、廖军刚、史思涛、邓莹莹是“次镜筒”项目的共同完成人；

廖军刚、王鹏、陈翔、邓莹莹是“卫星光机支架组件”项目的共同完成人。