

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

航空装备纺织复合材料结构抗冲击设计制造关键技术及应用

二、提名者及提名意见

提名者：孙以泽，东华大学，教授，纺织科学与工程。

提名意见：该项目围绕我国新一代航空装备对纺织复合材料抗冲击设计需求开展应用基础与技术攻关，在纺织复合材料的多尺度力学理论、结构抗冲击设计与评估、高性能制造方面取得突破性进展。创新性主要体现在：（1）建立了纺织复合材料高精度动态性能表征与多尺度理论体系；（2）提出了纺织复合材料结构抗冲击性能评估与设计方法；（3）建立了纺织复合材料高性能自动化制造技术；（4）建立了航空装备纺织复合材料结构符合性验证方法；成果获国内外专家高度认可，支撑了 CJ1000A 等多型航空发动机和“掠影”等无人机装备的研制，总体技术达到国际先进水平，经济和社会效益显著。

推荐该项目申报 2026 年度陕西省科学技术进步一等奖。

三、项目简介

项目属纺织科学技术、航空器结构与设计、固体力学深度融合的交叉技术领域，是支持航空装备结构抗冲击设计及纺织复合材料工程应用的重要创新。纺织复合材料因其轻质高强和优异的可设计性，已成为新一代航空装备的主要材料体系之一。而纺织复合材料的多尺度几何特性及复杂失效模式，极大地增加了结构抗冲击设计与制造的难度。该项目自 2017 年起在国家重大专项子课题、国家自然科学基金、国家重大型号研制任务、陕西省重点研发计划等项目的支持下，从纺织复合材料的动态性能表征与预测、结构抗冲击性能评估与设计、航空装备高性能制造以及符合性验证四个方面开展研究工作，主要科技创新如下：

1. 建立了纺织复合材料高精度动态性能表征与多尺度理论体系

针对纺织复合材料多尺度结构特性致失效机理不明晰、尺寸敏感性强和性能预示难等挑战，建立了单纤维束复合材料和大单胞纺织复合材料的动态测试方法，解决了强动载荷顺滑传递难题，发现了纺织复合材料的强尺寸效应和分段率敏感性；提出了考虑拉剪耦合效应的三维损伤失效理论和细观有限元仿真方法，实现了宏细观力学响应的高精度预测，阐明了尺寸效应的形成机制及其与织物构型的关联关系；建立了高普适度的纺织复合材料等效性能多尺度理论预测模型并开发了计算软件，填补了纺织复合材料强度与渐进失效行为预测理论的国际空白，应用于航空发动机机匣和飞行器进气道结构的织物构型设计。

2. 提出了纺织复合材料结构抗冲击性能评估与设计方法

针对纺织复合材料结构抗冲击性能评估中异形弹体冲击姿态难控制、织物结构影响机制复杂、模型预测精度和计算效率难兼顾等挑战，发明了多级脱弹装置

和弹体姿态实时监测方法，实现了异形弹体三维耦合姿态角的精准控制和测量；建立了融合声-光-热的冲击损伤高通量表征技术，国内首次获得多谱系纺织复合材料的抗冲击性能，揭示了织物构型和混杂形式的影响规律与作用机制；提出了理论数值融合的协同多尺度仿真方法，实现了多种纺织复合材料结构临界穿透速度的精确预测，且计算效率较精细化模型提升两个数量级以上；提出的纺织构型提升复合材料机匣临界穿透阈值 27.5%、飞机进气道冲击后剩余性能 26.4%。

3. 建立了航空装备纺织复合材料高性能自动化制造技术

针对进气道、机匣等空间异构多曲率结构预制体织造工艺参数难推演、成型质量差、检测效率低等工程难题，提出了基于模型重构算法的通用纺织结构设计方法，实现了多参数耦合下纺织装备-织物结构-工艺参数的数字化集成设计；研制了二维三轴编织装备，建立了高性能纤维束织造专用送纱收纱机构优化模型，开发了自动化数控系统，实现了进气道、机匣预制体的自动化织造；搭建了复合材料协同织造-在线检测-VARI 成型平台，应用于纺织复合材料进气道的高精度成型，降低进气道制造成本 77%、提高生产效率 3 倍。

4. 建立了航空装备纺织复合材料结构符合性验证方法

针对航空纺织复合材料结构抗冲击性能的符合性验证路线不明晰等问题，建立了仿真试验融合的纺织复合材料结构积木式符合性验证路线，提出了模型有效性、试验可靠性、服役工况等效性和包容裕度等复合材料机匣包容性验证方法，支撑了国内首个商用大涵道比涡扇发动机 CJ1000A 的机匣包容性设计及适航符合性验证。

上述创新成果已应用于中国航发商发、中国航发动力所、中航工业成飞、航天 703 所、兵器 204 所、成都纵横无人机、上海云路复材、爱思达航天、中航天水飞机工业有限责任公司、辽宁通用航空研究院等十余家单位的多个型号研制任务，包括 CJ1000A 机匣和某型航空发动机压气机包容环、“掠影”进气道的抗冲击设计及制造，近三年为相关企业创造的经济效益总计 5.49 亿元。

该项目已获得授权发明专利 35 项、软著 5 项，发表高水平学术论文 105 篇，编撰专著 3 本，牵头制定国家标准 5 项，获陕西省高等学校科学技术研究优秀成果奖一等奖 1 项。科技查新、项目验收意见和鉴定意见表明，本项目总体技术达到国际先进水平，其中纺织复合材料等效性能理论预测模型、理论数值融合的协同多尺度冲击仿真分析方法、纺织复合材料动态拉伸测试技术等达到国际领先水平）

四、客观评价

1. 项目验收意见

（1）以中国航发沈阳发动机研究所王维岩副总师为组长的验收组对“某代机复合材料抗冲击性能多尺度分析方法研究”项目的评价：本课题在纺织复合材料动态力学性能测试、细观有限元模型、多尺度仿真方法和平板典型件抗冲击性能预测方法等方面取得了诸多创新性成果...研究成果达到了国内领先水平。

（2）以中国航发沈阳发动机研究所曹航副总师为组长的验收组对“建立复

合材料高应变率下本构和失效模型”项目的评价：本项目在芳纶复合材料的理论建模和数值仿真方法上技术先进，建立的纺织复合材料动态力学加载与测试技术达到国际领先水平，为航空发动机复合材料包容环的设计提供了有力的理论支撑。

（3）以航天材料及工艺研究所耿东兵研究员为组长的验收组对“包容仿真和平板冲击试验测”项目的评价：本项目建立的复合材料冲击动力学高精度试验与多尺度仿真方法，弹体姿态控制偏差在 10° 以内，机匣典型件穿透速度阈值的仿真预测误差在10%以内...优化后的混杂结构相比纯碳复合材料抗冲击性能提升27.5%，在CJ1000A风扇机匣及某型航空发动机包容环研制中得到应用。

2. 科技鉴定意见

在中国航空运输协会组织的科学技术评价中，以民航科学技术研究院姚宏宇院长为组长的专家组对“航空发动机叶片包容性适航审定技术研究”的评价意见为：本项目对民用航空发动机复合材料机匣的包容性设计、验证和适航审定具有重要意义，多层级仿真模型结合试验验证的适航审定方法填补了国内复合材料机匣包容性审定的空白，项目研究成果达到了国内领先水平。

3. 应用单位评价

（1）中国航发沈阳发动机研究所：该项目成功建立了国际领先的纺织复合材料动态力学加载与测试技术，发展了多尺度仿真方法及结构抗冲击技术，成功应用于本单位航空发动机复合材料包容环的抗冲击设计工作，仿真预测结果与试验结果相比误差低于15%，在提升发动机安全性和轻量化方面发挥了重要作用。

（2）中国航发商用航空发动机有限责任公司：该项目建立的典型复合材料结构高精度冲击试验方法，冲击速度精度在5%以内。相关研究成果被应用于本单位CJ1000A风扇机匣结构的抗冲击设计工作，有力地保证了型号研制进度。

（3）南京玻璃纤维研究设计院有限公司：该项目建立的航空发动机编织复合材料抗冲击设计技术，有力推进了大涵道比航空发动机风扇机匣材料体系和织物构型的优选和设计，为纺织复合材料风扇叶片鸟撞和机匣包容性提供了分析工具和关键数据支撑。

（4）中国航发南方工业有限公司：该项目建立的高精度冲击试验与叶片外物冲击损伤预制技术，实现了用于整机试验的压气机叶片盘叶片冲击试验系统开发，为新一代战术直升机用涡轴发动机的外场保障提供了关键方法、模型和数据支撑，有力支撑了外场保障工作和型号服役安全。该技术和方法指标先进。

（5）中航复合材料有限责任公司：该项目建立的“机匣包容性建模及分析方法”被应用于我单位承制的某型航空发动机复合材料机匣的包容性分析，有力地保障了型号研制任务的顺利完成。

（6）西安近代化学研究所：采用该项目建立的金属靶与复合材料板高速冲击响应等效理论公式，为复合材料等效靶板设计及新型目标结构冲击失效评估提供了分析手段，应用于本单位承担的飞行器复合材料结构毁伤评估研究。

(7) 中国人民解放军 95072 部队参谋部：基于该项目成果研制的掠影靶机逼真模拟强敌目标，其隐身性能与大机动能力于任务中表现优异，24 小时内保质保量完成 2 次飞行任务，飞行保障能力优异。

4. 国内外学术评价

项目成果在国内外学术界产生了广泛影响，在 Compos Sci Technol、Compos A、Compos Struct、航空学报等重要刊物上共发表论文 105 篇，获国内外著名专家学者的积极引用。代表性引用评价如下：

(1) 印度弹道冲击实验室的项目经理 Yugai Kishor Joshi 在论文中评述项目完成人建立的细观有限元模型精度高；英国皇家工程院院士、布里斯托复合材料研究所主任 Michael Wisnom 教授在论文中评述该项目建立的模型较好的预测了复合材料的非线性力学行为；加拿大纤维材料讲席教授 Frank Ko 在论文中评价项目完成人建立了可预测纺织复合材料渐进损伤行为和强度性能的新理论模型。

(2) 英国牛津大学讲席教授、冲击动力学领域权威专家 Nik Petrinic 教授在关于复合材料动态力学行为的综述中评价该项目建立的动态测试方法实现了纤维束复合材料在 10^2 s^{-1} 应变率下的动态拉伸；中国科学院院士、北京大学魏悦广教授评述项目完成人发现了尺寸效应对复合材料力学性能的影响。

(3) 葡萄牙工程院院士、美国工程院院士、葡萄牙里斯本大学 Carlos Guedes Soares 教授，在论文中引用并评述项目完成人关于冲击载荷下复合材料层间损伤的研究提供了新的、深入的见解；中国科学院院士/空军工程大学李应红教授、北京理工大学梁军教授评价该项目提出了纺织复合材料多尺度冲击仿真方法并实现了对试验结果的高精度预测。

5. 主要完成人获奖情况

项目期间，主要完成人获全国优秀工作者、国家级高层次人才青年项目、陕西青年科技奖、中国复合材料学会青年科学家奖、杜庆华工程计算方法优秀青年学者奖、全国爆炸力学优秀青年学者、中国复合材料学会优秀博士论文提名奖。

五、应用情况

5.1 主要应用单位

该项目的创新技术成果近三年来在中国航发商发、中国航发动力所、航天 703 所、兵器 204 所、爱思达航天、中航天水飞机工业有限责任公司、辽宁通用航空研究院等单位的重点型号及产品研制中得到应用，已为相关企业创造出 5.49 亿元的经济效益。主要单位的应用情况如下表所示：

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	中国航发沈阳发动机研究所	纺织复合材料多层级性能表征、多尺度仿真方法及结构抗冲击设计	某型航空发动机包容环的抗冲击设计	2021 年 8 月-至今	周战璇/ 13309818119
2	中国航发商用航空发动机有限责任公司	复合材料结构的抗冲击性能评估与航空发动机机匣包容性适航审定技术	CJ1000A 航空发动机风扇机匣的包容性设计与适航审定	2018 年 1 月-至今	时起珍/ 18217590682
3	南京玻璃纤维研究设计院有限公司	航空发动机编织复合材料结构抗冲击设计技术	CJ1000A 风扇机匣和叶片预制体研制	2018 年 1 月-至今	黄建/ 13515121145
4	航天材料及工艺研究所	复合材料高速冲击测试方法和多尺度仿真方法	CJ1000A 风扇机匣和某型航空发动机包容环研制	2021 年 1 月-至今	易凯/ 13811428076
5	中国航发南方工业有限公司	高精度冲击试验与叶片外物冲击损伤预制技术	某型航空发动机压气机叶片外场维修	2023 年 1 月-至今	颜诚/ 19973316136
6	中航复合材料有限责任公司	复合材料机匣包容性建模及分析方法	三维机织复合材料机匣研制	2023 年 1 月-至今	张宇/ 18911985482
7	西安近代化学研究所	编织复合材料的破片高速冲击响应等效分析方法	飞行器编织复合材料高速冲击毁伤评估	2019 年 3 月-至今	韩璐/ 18629018058

5.2 经济效益和社会效益

5.2.1 经济效益

(1) 成都纵横大鹏无人机科技有限公司：该项目成果应用于本公司多款无人机产品，使公司多款无人机产品可满足更多行业应用需求，为我公司的技术提升和收益增长做出了巨大贡献。近三年，采用该项目设计方法完成的本公司无人机结构实现累计新增销售额 47640.83 万元，累计新增利润 14839.07 万元。

(2) 爱思达航天科技有限公司：该项目技术成果应用于本公司承制的多个型号复合材料异形构件的设计与研制，使公司满足更多的行业应用需求，产生了良好的经济效益。近三年，采用本项目技术完成的复合材料产品实现累计新增销售额 28439.19 万元，累计新增利润 2728.63 万元。

(3) 云路复合材料（上海）有限公司：该项目建立的复合材料协同织造-在

线检测-VARI 成型制造单元应用于我公司航空纺织复合材料典型件的制造,提高了生产效率。近三年,采用项目中设计方法完成的本公司各类新增创新产品实现累计新增销售额 21515.31 万元,累计新增利润 5834.15 万元。

(4) 成都飞机工业(集团)有限责任公司:该项目成果降低了公司某型高空高速无人机的研制成本,为公司高性能飞翼无人机的市场推广奠定了良好的基础。近三年,累计产生经济效益 27983.12 万元。

(5) 中国飞机强度研究所:该项目技术成果在我单位承担的多项国家重点课题、横向试验任务中提供了关键方法、模型和基础数据支撑,为我单位承担的国产结构瞬态仿真软件的开发和飞行器结构的抗冲击设计任务提供了基础支持,保障了项目的顺利开展。近三年,累计新增销售额 3510 万元。

5.2.2 社会效益

(1) 该项技术成果支撑了我国首款大涵道比民用航空发动机 CJ1000A 的风扇机匣包容性设计,将助力 C919 动力系统打破 LEAP 系列垄断,推动中国高端装备制造跻身全球第一梯队;同时也有力支撑了多型军用航空发动机复合材料结构的抗冲击设计与研制。

(2) 项目团队在纺织复合材料、航空航天和冲击动力学领域人才培养、平台建设等方面成效突出。项目执行期间共培养研究生 40 余人,其中 80%以上进入国防院所从事国家重大装备型号研制工作。

(3) 该项目主要完成人作为主任委员单位和秘书长单位获准建设中国复合材料学会纺织结构复合材料分会,有力推进了纺织复合材料在航空航天领域的发展和合作交流。

(4) 该项目主要完成人承担多项科研兼职工作,包括:中国航空学会鸟撞分会主任、力学学会爆炸力学专委会副主任、中国复合材料学会纺织结构复合材料分会副主任/秘书长、全国碳纤维标准委员会委员、中国复合材料学会青年工作委员会执行委员、中国力学学会固体力学专委会复合材料工作组组员、International Journal of Impact Engineering、Composite Structures、Acta Mechanica Sinica、航空学报中英文版等期刊编委或青年编委等。

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	浸胶纱试样的制备方法及其压缩测试夹具	中国	ZL202110305774.5	2024.05.14	6999093	西北工业大学	张超; 顾佳辉; 赵振强; 杜春林
2	发明专利	一种空气炮多级脱弹装置	中国	ZL202210304556.4	2023.05.09	5955255	西北工业大学	赵振强; 陈小鹏; 李玉龙; 张超; 何宇鹏; 汤忠斌
3	软件著作权	纺织复合材料力学性能预测软件	中国	2022SR0799701	2022.6.21	9753900	西北工业大学	张超; 李玉龙; 党浩源; 张寅泉; 赵振强; 刘鹏
4	发明专利	弹体姿态角测量方法	中国	ZL202011191124.4	2023.10.03	6383915	西北工业大学	张超; 杜春林; 赵振强; 顾佳辉; 李玉龙
5	发明专利	发动机叶片和叶盘冲击损伤预制的试验装置和试验方法	中国	ZL202510399614.X	2025.06.10	7994894	西北工业大学	张超; 顾佳辉; 陈小鹏; 白杨; 杜春林; 譙业杰

6	发明专利	一种复合材料编织填充方法	中国	ZL201710152919.6	2019.02.22	3263377	成都飞机工业（集团）有限责任公司	徐伟伟; 单玉才; 王阳; 杨龙英; 张景晨
7	发明专利	一种基于 2.5D 编织的复合材料 S 型进气道筒体制造方法	中国	ZL202110346919.6	2022.05.06	5136944	成都飞机工业（集团）有限责任公司	罗维; 黄当明; 陈贵勇; 黄海超; 杨龙英
8	发明专利	一种基于二维编织的单向纤维增强复合材料管的制造方法	中国	ZL202110401300.0	2022.04.08	5060218	成都飞机工业（集团）有限责任公司	罗维; 陈贵勇; 郭强; 程勇; 文友谊
9	发明专利	动态复合加载试验装置、系统及方法	中国	ZL201810947680.6	2021.08.17	4616414	中国飞机强度研究所	惠旭龙; 舒挽; 白玉春; 刘小川; 葛宇静
10	软件著作权	高性能纤维环形编织工艺仿真软件	中国	2025SR1920950	2025.09.30	16577148	东华大学	张陈平

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
张超	1	副院长	教授	西北工业大学	西北工业大学	本项目的负责人，提出了本项目的 主要学术思想，本项目创新点一、二的主要 完成人，制定了总体的研究方案
赵振强	2	--	副教授	西北工业大学	西北工业大学	本项目创新点二的主要完成人，对创新 点一做出了重要贡献，建立了纺织复合 材料动态测试方法
罗维	3	主任工艺 师	高级工程 师	成都飞机工业（集 团）有限责任公司	成都飞机工业（集 团）有限责任公司	对创新点三做出了重要贡献，提出了机 器人辅助纺织复合材料编织预成型工 艺
惠旭龙	4	副部长	高级工程 师	中国飞机强度研究所	中国飞机强度研究所	对创新点二做出了重要贡献，为冲击试 验和工程符合性验证方法的提出提供 了技术支撑
陈禹陶	5	党副书 记	工程师	陕西省特种设备检验 检测研究院	陕西省特种设备检验 检测研究院	对创新点三做出了重要贡献，为纺织复 合材料的检测及工程应用提供了技术 支撑
陈杨	6	--	副教授	西北工业大学	西北工业大学	对创新点一做出了贡献，建立了纺织复 合材料率相关本构模型
徐伟伟	7	副总冶金 师	正高级工 程师	成都飞机工业（集 团）有限责任公司	成都飞机工业（集 团）有限责任公司	本项目创新点三的主要完成人，提出了 航空装备纺织复合材料高性能自动化

						制造技术的总体思想和技术路线
张欣玥	8	--	工程师	中国飞机强度研究所	中国飞机强度研究所	对创新点二做出了重要贡献，为纺织复合材料的冲击试验提供了技术支撑
王珏	9	主任设计师	高级工程师	成都飞机工业（集团）有限责任公司	成都飞机工业（集团）有限责任公司	对创新点三做出了贡献，提出了纺织复合材料构型设计与制造工艺方案
张陈平	10	--	讲师	东华大学	东华大学	对创新点三做出了贡献，负责编织装备的研发与关键专件优化，开发了复合材料的检测系统
曹俊超	11	--	其他	西北工业大学	西北工业大学	对创新点二做出了贡献，发展了复合材料动态性能测试技术，提出了机匣材料抗冲击性能提升策略
饶静	12	--	教授	北京航空航天大学	北京航空航天大学	对创新点三做出了贡献，为纺织复合材料的检测提供了技术支撑
朱永飞	13	董事长	--	云路复合材料（上海）有限公司	云路复合材料（上海）有限公司	对创新点三做出了贡献，为纺织复合材料制备工艺改进提供了技术支撑，完成了项目制造技术的产业化应用
牛艺杰	14	--	高级工程师	中国石油集团工程材料研究院有限公司	中国石油集团工程材料研究院有限公司	对创新点二做出了贡献，为纺织复合材料的抗冲击性能提升提供了技术支撑
王利光	15	副总经理	高级工程师	成都纵横大鹏无人机科技有限公司	成都纵横大鹏无人机科技有限公司	对创新点四做出了贡献，完成了系列无人机的适坠性符合性验证

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	对本项目所有科技创新的发现做出了贡献。提出了本项目的研究思路和主要方法，是创新点一、二的主要完成单位，创新点三和四的参与单位，与中航工业成飞、成都纵横等多家单位开展了项目合作和产业合作，实现了项目成果的有效应用。
成都飞机工业（集团）有限责任公司	2	对创新点三做出重要贡献。完成了纺织复合材料高性能制造技术的开发以及产业化应用。
中国飞机强度研究所	3	对创新点二做出了重要贡献。为冲击试验和工程符合性验证方法的提出提供了技术支撑。
陕西省特种设备检验检测研究院	4	对创新点三做出了重要贡献。为纺织复合材料的检测及工程应用提供了技术支撑。
云路复合材料（上海）有限公司	5	对创新点三做出了贡献。为纺织复合材料制备工艺改进提供了技术支撑，完成了项目制造技术的产业化应用。
东华大学	6	对科技创新点三做出了贡献。提出了复合材料协同织造-在线检测-VARI 成型平台，成功推广应用于航空纺织复合材料典型件的制造。
北京航空航天大学	7	对创新点三做出了重要贡献。为纺织复合材料的检测提供了技术支撑。
中国石油集团工程材料研究院有限公司	8	对创新点二做出了贡献。开发了预制体性能提升方法，为纺织复合材料抗冲击性能提升提供了技术支撑
成都纵横大鹏无人机科技有限公司	9	对创新点四做出了贡献。完成了系列无人机的适坠性符合性验证，并将项目成果应用于公司多款无人机产品。

九、完成人合作关系说明

项目完成人张超、赵振强、陈杨和曹俊超隶属于西北工业大学冲击动力学研究团队，共同参与了项目的研究过程。张超和赵振强自 2017 年项目开始即共同参与和承担了本项目相关的国家重大专项子课题、中国民用航空局民航安全能力建设项目和国家自然科学基金等项目。陈杨自 2020 年加入项目团队，与张超共同完成了本项目相关的本构理论研究任务，主要合作方式是项目合作。曹俊超从 2018 年开始在导师张超的指导下参与项目的主要试验表征及数值仿真工作，并在博士毕业留校后继续从事相关研究，与导师张超合作的主要方式是项目合作。

与成都飞机工业（集团）有限责任公司徐伟伟、罗维、王珏的合作方式主要是论文合作、项目合作和产业合作。与中国飞机强度研究所惠旭龙、张欣玥的合作方式主要是项目合作。与陕西省特种设备检验检测研究院陈禹陶的合作方式主要是项目合作。与云路复合材料（上海）有限公司朱永飞的合作方式主要是项目合作。与东华大学张陈平的合作方式主要是项目合作。与北京航空航天大学饶静的合作方式主要是项目合作。与中国石油集团工程材料研究院有限公司牛艺杰的合作方式主要是项目合作。与成都纵横大鹏无人机科技有限公司王利光的合作方式主要是项目合作。