

# 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

复合材料结构高承载胶接修复机理及力学性能评估方法

## 二、提名者及提名意见

提名者：陕西省教育厅

提名意见：

高承载复合材料胶接结构广泛应用于新一代飞行器主承力连接结构及修复结构，服役时其各类载荷下的失效机理缺乏系统阐明，外场原位修复胶接补片的层间韧性不够，应力及强度预测时精度和效率不能满足设计和评价需求。基于以上迫切问题，该成果的三个重要科学发现系统揭示了高承载复合材料胶接结构多损伤竞争失效机理，创新提出了高承载复合材料胶接修复增韧新方法 with 机理，突破了高承载复合材料胶接结构的性能预测新方法，总体达到国际先进水平，效果成效显著，在行业取得了应用和认可。

该项目成果资料齐全，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省自然科学奖的申报条件，提名该项目为陕西省自然科学奖二等奖。

## 三、项目简介

新一代航空器高承载复合材料胶接修复结构继续服役时存在问题：服役时其各类载荷（静力/冲击/疲劳）下的损伤竞争失效机理尚不明确；外场原位修复时由于固化压力不足及温度不能过高导致复合材料补片的层间断裂韧性太低，修补区域的抗冲击性与剩余强度大大降低；修补区胶层应力及连接强度预测时精度和效率不能满足设计和评价需求。

难点和挑战：第一，由于修补区斜坡或阶梯甚至曲面式胶接界面的存在，高承载复合材料胶接修复结构损伤机理复杂，特别是低速冲击载荷下的损伤竞争失效机理，而国内外缺乏系统解释；第二，既要层间增韧又不能影响原工艺和强度，给高承载复合材料胶接原位修复的增韧修复工艺提出了挑战；第三，国际上现有的高承载复合材料胶接修复结构胶层剪应力/剥离应力及静强度预测方法精度和效率不够，解析理论和渐进损伤有限元建模存在难度与挑战。

主要发现一：高承载复合材料胶接结构多损伤竞争失效机理。研究了高承载斜接式和阶梯式胶接结构的面内拉伸、冲击、冲后拉伸失效及拉-拉疲劳失效，阐明了复合材料层内/层间、胶层内聚/粘附失效形式之间的竞争演化顺序，明确了结构冲击损伤的相对敏感位置，厘清了冲击能量-剩余拉伸强度关系的阈值及变化规律，发现了疲劳损伤起始与扩展路径并明确了其疲劳强度与寿命。

主要发现二：高承载复合材料胶接修复增韧新方法 with 机理。提出了在复合材料预浸料层间表面喷附特定面密度的多壁碳纳米管  $\text{mwCNTs}$  及多层石墨烯  $\text{mGs}$  的层间增韧方法，将该方法应用于湿铺贴修复补片制备过程中，形成了一型和二

型层间断裂韧性提高至原来的 2 倍以上的原位增韧修复技术，发现了其“山脊状”的裂纹形貌，揭示了纳米材料阻断裂纹扩展及由基体拔出的增韧机理。

主要发现三：高承载复合材料胶接结构的性能预测新方法。首先，解决了 Wang（澳大利亚技术科学与工程院院士）半解析方法应力预测精度和功能不足的问题，开发了可预测任意曲面胶接结构剪切/剥离应力的通用弹/塑性半解析法 USAM 及形状优化方法。第二，建立了智能化适用于动/静载荷的三维渐进损伤有限元数值模型 3D-PDM，基于深度神经网络智能算法建立了融合真实损伤信息的有限元模型，考虑了复合材料及胶层的材料、几何非线性和冲击工况中的接触非线性，可实现参数化建模计算各类载荷下复合材料层内、层间及胶层的损伤竞争演化模拟。

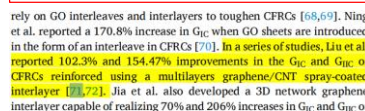
效果：较国际研究更为系统地阐明了高承载复合材料胶接结构静/动/疲劳的损伤竞争失效机理；首次使用纳米材料对高承载复合材料胶接修复补片进行增韧实验并使层间断裂韧性提高到原来的 2 倍以上，成功发现“山脊状”的裂纹的成因机制与增韧机理；USAM 较国际最新的半解析法精度提高了 5%，优化粘接曲面后应力峰值降幅高达 20%以上；3D-PDM 适用于此类结构动/静载荷的三维渐进损伤非线性精确模拟。

本成果依托国家自然科学基金等项目，SCI 他引 200 余次，出版教材 1 部。已发表论文得到了英国皇家工程院 Dear 院士、英国皇家航空学会 Camanho 院士、中国科学院郑海荣院士、Composite Structures 期刊主编 Fantuzzi 教授、美国密歇根大学 Sodano 教授等著名学者的正面评价。本成果曾获陕西高等学校科学技术研究优秀成果二等奖、空军首届航空创意大赛优秀奖等。本成果已成功应用于中国航空工业第一飞机设计研究院 MA700 飞机研制、中国人民解放军空军修理厂 5702、中国人民解放军海军修理厂 4724、中国航天科工集团三院 301 所等工程中。

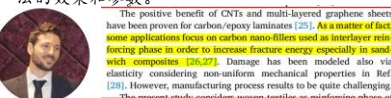
## 四、客观评价

### 1. 论文学术客观评价

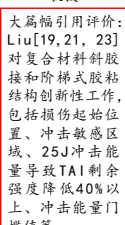
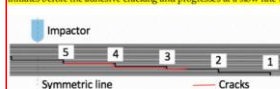
层间增韧修复方法评价：美国密歇根大学 Sodano 教授明确指出申请人通过在 CFRP 层间添加多层石墨烯和多壁碳纳米管分别取得了  $G_{IC}102.3\%$  和  $G_{IIC}154.47\%$  的增韧效果。爱尔兰都柏林大学 Murphy 教授大篇幅引用并指出增韧机理、增韧工艺及收益等，并采用相同的研究方法，利用不同的材料来进行研究，同时对标实验数据。Composite Structures 期刊主编 Fantuzzi 教授正面评价了本成果的层间增韧工作的可行性。美国欧道明大学 Mulqueen 教授指出本成果增韧修复工艺中由于 mWCNTs 从树脂基体中拔出大大提高了其  $G_{IC}$  值。[代表性引文 1-4]



changes in Mode I interlaminar fracture properties of carbon fiber epoxy composites. At the same particle density of 1 g/m<sup>3</sup>, Mode I fracture toughness increased by 12.3 % with MWNTs and 101.4 % with carbon nanotubes. The larger surface area of MW compared to MWNTs contributed to this difference. The MW surface peeling and vertical pullout mechanism increased crack resistance, resulting in fiber breakage and bridging. Carbon nanotubes (CNTs) have also been explored as fillers to improve the interlaminar performance of CFRPs. The high aspect ratio and the chemical properties of CNTs contribute to increased load transfer efficiency and enhanced interlaminar bonding. The presence of CNTs can enhance the fracture toughness and crack resistance of CFRPs by effectively bridging cracks and inhibiting their propagation [12–14]. Sur-



Tensile strength capability of stepped scarf repair after LVI (30 J) was studied by Liu et al. [23]. It was concluded that when the impact energy level exceeded 4 J, the microscopic visible damage could be found along the stepped adhesive line. The adhesive damage happened instantaneously leading to a sudden drop of the impact contact load. In all cases, catastrophic residual TAI strength capacity was reported. Feng et al. [24] studied the impact and TAI behaviours of



3



英国皇家航空学会院士  
Pedro Camanho教授评价：  
Liu[15]解决了铺层角度变化引起胶层剪应力重分配问题，提出了微元刚度分配法...

joint using the finite differences method and obtained an analytical solution for the shear stress distribution along with the adhesive bond line. However, this method did not consider differently oriented plies of the composite adherends, and the predicted peak shear stress of the adhesive at the intersection of 0° layers was too low and asymmetrical, as shown in Fig. 2. More recently, Liu Bin [15], based on Harman and Wang's method, introduced the rule of composite ply stiffness distribution and formulated a modified semi-analytical method (MAM) to determine the shear stress distribution of the adhesive. While the results obtained by this method were consistent with those obtained by FEM, the predicted peak shear stress in the adhesive was considerably underestimated, as shown in Fig. 2, and the effect of the wedge-shaped geometry at the boundary of the adhesive on the stress state was not captured. In addition, the smaller the number of layers was, or the smaller the scarf angle was, the greater the error between the results

The stress experienced by each differential element A and B in the same section can be then calculated considering the stiffness of each layer [15]. As shown in Fig. 6, when the coordinate of the integral point is  $x$ , each adherend A and B correspond to a wedge-shaped differential element with a size of  $dx \sin \alpha$ . The stress of differential element A  $\sigma_{A,A}(x)$  and differential element B  $\sigma_{B,B}(x)$ , as marked in Fig. 6, can be expressed by the total load  $P_0$  of the structure and stiffness parameters using Eqs. (12) and (13):

$$\sigma_{A,A}(x) = \frac{P(x)}{dx \sin \alpha} \frac{\int_0^x E_{AB}(t) dt}{\int_0^x E_{AB}(t) dt + \int_x^L E_{AB}(t) dt} \quad (12)$$

$$\sigma_{B,B}(x) = \frac{P_0 - P(x)}{dx \sin \alpha} \frac{\int_x^L E_{AB}(t) dt}{\int_0^x E_{AB}(t) dt + \int_x^L E_{AB}(t) dt} \quad (13)$$

Replacing the stress-strain relationship  $\epsilon_x = \sigma_x / E_x$  of each integral



An Improved Semi-analytical Method for the strength prediction of composite bonded scarf repairs

Bing Yan<sup>a,\*</sup>, Minghui Wang<sup>a,c</sup>, C. Koppala<sup>b,c</sup>, Frederic Daniel<sup>a,c</sup>, A. Arifin<sup>a,c</sup>, Xing Pan<sup>a</sup>, Pedro P. Camanho<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Key Laboratory of Advanced Structural Analysis and Design, School of Aeronautics and Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China

<sup>b</sup>Department of Mechanical Engineering, University of Illinois at Chicago, Chicago, IL 60607, USA

<sup>c</sup>European Research Institute for the Advancement of Composite Structures, Beijing 100191, China



Bonded flush repairs for aerospace composite structures: A review on modelling strategies and application to repairs optimization, reliability and durability

Jean-Baptiste Orsatelli<sup>a,\*</sup>, Eric Perronnet<sup>a</sup>, Frédéric Luchard<sup>a</sup>, Sébastien Schwartz<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>b</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>c</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>d</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>e</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>f</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>g</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>h</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>i</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>j</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>k</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>l</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>m</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>n</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>o</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>p</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>q</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>r</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>s</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>t</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>u</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>v</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>w</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>x</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>y</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>z</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>aa</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>ab</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>ac</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>ad</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>ae</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>af</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>ag</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>ah</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>ai</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>aj</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>ak</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>al</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>am</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>an</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>ao</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>ap</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>aq</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>ar</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>as</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>at</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>au</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>av</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>aw</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>ax</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>ay</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>az</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>ba</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>bb</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>bc</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>bd</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>be</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>bf</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>bg</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>bh</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>bi</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>bj</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>bk</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>bl</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>bm</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>bn</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>bo</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>bp</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>bq</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>br</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>bs</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>bt</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>bu</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>bv</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>bw</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>bx</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>by</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>bz</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>ca</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>cb</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>cc</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>cd</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>ce</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>cf</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>cg</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>ch</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>ci</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>cj</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>ck</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>cl</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>cm</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>cn</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>co</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>cp</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>cq</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>cr</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>cs</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>ct</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>cu</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>cv</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>cw</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>cx</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>cy</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

<sup>cz</sup>Centre d'Innovation pour l'Aviation, Université de Toulouse, 31000 Toulouse, France

## 2. 应用客观评价

**应用评价（一）：航空复合材料结构修复评估方法与失效机理（航空工业一飞院）：**在航空工业第一飞机设计研究院 **MA700 型号**中获得应用，效果明显，评估方法在设计与试制过程中为失效机理分析、损伤评估和修理方案制定提供了理论方法和计算支持，计算精度和损伤模式识别能力有所提高，并能实现参数化建模，加快了试制过程中的问题处理，提高了工作效率。[应用证明 1]

**应用评价（二）：先进复合材料结构损伤及修理的预测方法（中国人民解放军 5702 厂）：**使用效果良好，有效节省人力，压缩评估时间，起到了损伤快速评估、修理方案快速设计与评估的作用。[应用证明 2]

**应用评价（三）：复合材料结构冲击损伤预测方法（中国航天科工三院 301 所）：**已成功用于预测陶瓷基复合材料结构的冲击和冲击后的服役行为，可在复杂应力下计算结构的损伤细观信息。[应用证明 3]

**应用评价（四）：飞机结构损伤评估及修理方案设计平台（中国人民解放军第 4724 厂）：**总体使用效果良好，大幅压缩修理周期，能够损伤快速评估、修理方案快速设计的作用。[应用证明 4]

## 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）

（按照表格所示栏目填写支撑本项目重要科学发现的代表性论文专著详细情况，不超过 8 篇，按重要程度排序。所列论文专著应公开发表 2 年以上即 2023 年 8 月 1 日以前公开发表。所列代表作及论文应以省内单位或个人为主要完成单位，署名第一单位（标号为 1 的单位）应为国内单位。

“作者”、“通讯作者（含共同通讯作者）”、“第一作者（含共同第一作者）”和“国内作者”，均应基于论文的全部作者进行填写，不得只填写本项目完成人或少填漏填。

其中，“作者”、“通讯作者（含共同通讯作者）”和“第一作者（含共同第一作者）”的姓名表述应与论文原文的署名保持一致，“国内作者”填写作者的中文姓名。

该表所列论文专著的知识产权归国内所有且无争议，未曾在往年国家科学技术奖励项目、往年省部级（政府）科学技术奖励项目和本年度其他陕西省科学技术奖提名项目中作为支撑材料出现。用于提名陕西省科学技术奖的情况，已征得未列入项目主要完成人和主要完成单位的作者的同意，其中，未列入项目主要完成人的第一作者、通讯作者（含共同第一作者、共同通讯作者）已出具知情同意书面签字意见，与其他作者的有关知情证明材料均存档备查。）

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	Thermosetting CFRP interlaminar toughening with multi-layers graphene and MWCNTs under mode I fracture	Composites Science and Technology	Liu Bin, Cao Shuanghui, Gao Nongyue, Cheng Laifei, Liu Yongsheng, Zhang Yi,	2019,183:107829	2019.9.17	Liu Bin, Cheng Laifei	Liu Bin	刘斌, 曹双辉, 高弄玥, 成来飞, 刘永胜, 张毅, 冯丹	56	SCI	是
2	The impact damage and residual load capacity of composite stepped	Composites Part B: Engineering	Liu Bin, Han Qing, Zhong Xiaoping, Lu Zhixian	2019,158:339-351	2018.10.1	Liu Bin	Liu Bin	刘斌, 韩庆, 钟小平, 卢智先	45	SCI	是
3	Experiment and design methods of composite scarf repair for primary-	Composites Part A: Applied Science and Manufacturing	Liu Bin, Xu Fei, Feng Wei, Yan Rui, Xie Wei	2016, 88: 27-38	2016.9.10	Xu Fei	Liu Bin	刘斌, 徐绯, 冯威, 闫蕊, 谢伟	37	SCI	是
4	Study on impact damage mechanisms and TAI capacity for the composite	Composite Structures	Liu Bin, Xu Fei, Qin Jian, Lu Zhixian	2017,181:183-193	2017.8 .31	Liu Bin	Liu Bin	刘斌, 徐绯, 秦坚, 卢智先	27	SCI	是

5	Study on intelligent and visualization method of ultrasonic testing of composite materials based on	Applied Acoustics	Hu Qichun, Wei Xiaolong, Guo Hanyi, Xu Haojun, Li Caizhi, He Weifeng, Pei Binbin	2023,207: 109363	2023.4.4	Wei Xiaolong	Hu Qichun	胡启春, 魏小龙, 郭涵意, 徐浩军, 李才智, 何卫锋, 裴彬彬	11	SCI	是
6	飞机结构复合材料修理设计与分析	西北工业大学出版社	刘斌, 常楠, 徐绯, 侯赤	ISBN978-7-5612-7938-0 P1~202 页	2021.9.1	刘斌	刘斌	刘斌, 常楠, 徐绯, 侯赤		CNKI	是
7	航空复合材料结构湿热性能分析	航空工业出版社	张铁军	ISBN978-7-5165-3053-5 P1~36;140~150 页	2022.6	张铁军	张铁军	冯宇, 张铁军, 何宇廷	/	CNKI	是
8	先进复合材料飞机结构设计与应用	航空工业出版社	程普强 主编	ISBN 978-7-5165-1923-3 P551-579 页	2019.5	刘斌	刘斌	程普强 主编	/	CNKI	是
合 计									176		

## 六、主要完成人情况（不超过 6 人）

（所列完成人应为在陕个人，或与在陕个人合作的我国其他地域的个人（**第一完成人必须为全职在陕的个人**），且是“代表性论文专著”主要学术思想的提出者，并在“代表性论文专著”中有署名。应按表格要求逐项填写。附件所列验收、鉴定的专家组成员不能作为完成人。同一人同一年度只能作为一个提名项目的完成人参加陕西省科技奖的评审。附件所列验收、鉴定的专家组成员不能作为完成人。

**工作单位：**根据人事关系填写完成人现工作的单位，已退休的填写退休前的工作单位。

**完成单位：**填写完成人参与本项目主要研究工作时所在单位，应为国内法人单位。如涉及多个单位，应根据贡献大小填写一个单位。完成单位与奖励证书关联，请根据实际情况审慎填写。

**对本项目贡献：**不超过 300 字。应具体写明完成人对本项目做出的实质性贡献，并注明代表性论文专著编号。填报时括号部分内容删除。）

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
刘斌	1		副研究员	西北工业大学	西北工业大学	刘斌为本项目第一、第二、第三重要科学发现的主要完成人，创新地提出了高承载复合材料胶粘结构的预测方法，系统地揭示了高承载复合材料胶粘结构在静/动/疲劳载荷下的失效机理，开发了纳米材料层间增韧高承载复合材料胶粘补片的修复工艺并揭示了其增韧力学机理。支持本人贡献成立的证明材料在附件中的编号为 1,2,3,4,6。
魏小龙	2	全国重点实验室副主任	教授	中国人民解放军空军工程大学	中国人民解放军空军工程大学	魏小龙为本项目重要科学发现（三）的主要完成人之一，创新地提出了复合材料界面损伤失效检测方法，为高应变复合材料胶粘结构失效机理提供了检测手段，并将深度学习识别的损伤三维信息导入至 3D-FEM 渐进



						损伤有限元模型之中进行下一步的力学性能评价。
刘永胜	3	国家级实验室副主任	教授	西北工业大学	西北工业大学	刘永胜为本项目第二重要科学发现的主要完成人,创新地开发了纳米材料层间增韧高承载复合材料胶粘补片的修复工艺并揭示了其增韧力学机理。支持本人贡献成立的证明材料在附件中的编号为 1。
张铁军	4		讲师	中国人民解放军空军工程大学	中国人民解放军空军工程大学	张铁军为本项目重要发现(一)的主要参与人,主要为复合材料结构高承载胶接修复的环境适用性进行了验证。支持其贡献的附件材料见必备附件 7。
张毅	5		副研究员	西北工业大学	西北工业大学	张毅为本项目第二重要科学发现的主要参与人,创新地开发了纳米材料层间增韧高承载复合材料胶粘补片的修复工艺并揭示了其增韧力学机理。支持本人贡献成立的证明材料在附件中的编号为 1。
刘彦诚	6		研究生	西北工业大学	西北工业大学	参与西北工业大学部分自然科学基础研究项目,协助完成了高应变复合材料胶接结构失效机理的分析工作,将本项目的性能评估方法应用于飞机复合材料结构胶接修复的快速评估和修复方案快速生成工程需求之中。

## 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	牵头承担国家级项目-国家自然科学基金青年项目“热/力/氧环境下 SiCf/SiC 复合材料裂纹竞争机理研究”，省部级项目-陕西省自然科学基金“先进飞机复合材料结构快速抢修中标准补片工艺及力学性能”，省部级项目-航空科学基金“复合材料热力耦合多尺度建模仿真和虚拟验证技术研究”。提出的高承载复合材料胶接修复结构的预测方法达到国际先进水平，精度较国际水平精度提高 5%，曲面优化后应力峰值降低 19%-25%。揭示并系统完善了高承载复合材料胶接结构在静/动/疲载荷下的失效机理。开发了纳米材料层间增韧高承载复合材料胶接补片的修复工艺并揭示了其增韧力学机理。成功推动了“高承载复合材料胶接修复结构损伤修复机理及性能评估方法”在国际学术界的正面积评价和在国内工业部门的工程（如 MA700 飞机）使用。
中国人民解放军 空军工程大学	2	牵头承担国家级项目-国家自然科学基金面上项目“激光冲击复合材料动态响应机理与界面结合强度检测评估方法”，国家级项目-装备综合科研重点项目“xx 飞机先进复合材料检测评估与快速修复技术研究”。提出了针对复合材料界面损伤失效的智能超声检测与超声点云三维重构方法，为高应变复合材料胶接结构失效机理提供了检测手段，为复合材料热力耦合多尺度建模仿真提供了三维精准建模支撑。推动超声点云识别精度(3DAP 值)达到 82.29%，识别速度达到 88ms/个；损伤点云测量的精度达到 0.01mm；复合材料力学性能评价的相关性达到 0.93。

## 八、完成人合作关系说明

自 2016 年项目立项以来，西北工业大学刘斌与中国人民解放军空军工程大学魏小龙、西北工业大学刘永胜、西北工业大学张毅、西北工业大学刘彦诚开展了复合材料高承载胶接结构修复机理与性能评估方法研究及应用，具体分工如下：

第一完成人刘斌（西北工业大学）为本项目三个重要科学发现的主要完成人，创新地提出了高承载复合材料胶接修复结构的预测方法，系统地揭示了高承载复合材料胶接结构在静/动/疲劳载荷下的失效机理，开发了纳米材料层间增韧高承载复合材料胶接补片的修复工艺并揭示了其增韧力学机理，是代表性论文 1、2、3、4 和 6 的第一作者，项目 3、4、5 的负责人。

第二完成人魏小龙（中国人民解放军空军工程大学）为本项目重要科学发现（三）的主要完成人之一，创新地提出了复合材料界面损伤失效的基于人工智能超声检测方法，为高应变复合材料胶接结构失效机理提供了检测手段，是代表性论文 6 的通讯作者，项目 1、2 的负责人或主要参与者。

第三完成人刘永胜（西北工业大学）对本项目的重要科学发现（二）纳米材料层间增韧修复工艺提供了很大帮助和指导，体现在如何增加层间断裂韧性而不降低原有工艺和强度的策略上，代表性论文 1 的共同著作者。

第四完成人张铁军（中国人民解放军空军工程大学）对本项目的重要科学发现（一）复合材料湿热性能提供了很大帮助和指导，体现在复合材料胶接结构湿热剩余强度及失效机理上，代表性著作 7 的共同著作者。

第五完成人张毅（西北工业大学）主要对本项目的重要科学发现（二）纳米材料层间增韧修复工艺提供了很大帮助和指导，体现在如何增加层间断裂韧性而不降低原有工艺和强度的策略上，代表性论文 1 的共同著作者。

第六完成人刘彦诚（西北工业大学）对本项目重要科学发现（三）中复合材料胶接修复结构评估方法的适用性改进提供了改进方案。