

DOI:10.16356/j.2097-6771.2026.02.001

# 低空飞行器高性能结构件轻量化低成本大规模制造关键技术

张陈平, 李麒阳, 陈玉洁, 郝欣甫, 孙以泽

(东华大学机械工程学院, 上海 201620)

**摘要:** 低空飞行器是国家安全与低空经济的核心载体, 而高性能结构件是低空飞行器的关键承力部件, 其高性能、轻量化、低成本、大规模快捷制造一直是行业的难点与痛点。针对上述问题, 本文论述了高性能纤维增强复合材料结构件的设计与制造关键技术, 重点剖析了结构件, 尤其是异形结构件设计理论匮乏、制造成本高昂及生产效率低下等难题, 探讨了数字化仿真与正向设计在精确设计中的应用。深入阐述了结构件预成型、液体成型、精密机加工及复合工艺等, 提出了全流程自动化制造的堵点、卡点解决方案。指明了基于具身智能与柔性制造的自动化生产线是突破成本瓶颈、实现快捷制造的必然路径, 旨在为我国低空飞行器结构件的高性能、轻量化、低成本、大规模快捷制造提供理论依据与技术支持。

**关键词:** 低空飞行器; 复合工艺; 数字化设计; 全流程自动化制造

**中图分类号:** V11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2026)02-0249-17

## Key Technologies for Lightweight, Low-Cost and Mass Production of High-Performance Structural Components for Low-Altitude Vehicles

ZHANG Chenping, LI Qiyang, CHEN Yujie, CHI Xinfu, SUN Yize

(College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** Low-altitude aircraft are central to national security and the low-altitude economy, and high-performance structural components serve as their critical load-bearing elements. Achieving high performance, lightweight design, low-cost, large-scale, and rapid manufacturing has long been a major challenge and pain point for the industry. To address these issues, this paper discusses the key technologies for the design and manufacturing of high-performance fiber-reinforced composite structural components. It focuses on analyzing challenges such as the lack of design theories for structural components, especially non-standard ones, high manufacturing costs, and low production efficiency, and explores the application of digital simulation and forward design in precision design. The paper provides an in-depth discussion of structural component preform molding, liquid molding, precision machining, and composite processes, and proposes solutions to bottlenecks and obstacles in end-to-end automated manufacturing. It identifies automated production lines based on embodied intelligence and flexible manufacturing as the inevitable path to breaking through cost bottlenecks and achieving rapid manufacturing, aiming to provide theoretical foundations and technical support for the high-performance, lightweight, low-cost, and large-scale rapid manufacturing of structural components for Chinese low-altitude aircraft.

**Key words:** low-altitude aircraft; multi-process coordination; digital design; fully automated manufacturing process

**基金项目:** 中国工程院科技战略咨询项目(2025-XZ-81)。

**收稿日期:** 2026-03-10; **修订日期:** 2026-03-27

**通信作者:** 孙以泽, 男, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 研究方向为纺织装备与控制, E-mail: sunyz@dhu.edu.cn。

**引用格式:** 张陈平, 李麒阳, 陈玉洁, 等. 低空飞行器高性能结构件轻量化低成本大规模制造关键技术[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2026, 58(2): 249-265. ZHANG Chenping, LI Qiyang, CHEN Yujie, et al. Key technologies for lightweight, low-cost and mass production of high-performance structural components for low-altitude vehicles[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics(Natural Science Edition), 2026, 58(2): 249-265.

全空域飞行器的发展对于维护国家主权与推动经济发展至关重要,其中低空领域因其特殊的战略地位,对成本控制与制造效率表现出极高的敏感性<sup>[1-2]</sup>。在国防军工领域,俄乌冲突、美以伊冲突等现代局部战争已充分证明,低成本、大规模的无人作战平台是实现“饱和攻击”与非对称作战的关键力量,这对飞行器的快捷制造与低成本提出了严苛要求。在民用领域,低空经济作为国家重点布

局的六大战略性新兴产业之一,涵盖了电动垂直起降飞行器(Electric vertical take-off and landing, eVTOL)、空中物流等新兴业态,如图 1 所示<sup>[3]</sup>,被视为典型的“新质生产力”<sup>[4-5]</sup>。无论是国防军工的消耗性作战需求,还是民生领域对大众化接受度的考量,都必须以低成本、高效率的制造技术为前提。因此,低空飞行器不仅是低空经济这一蓝海市场的核心载体,更是国家安全与国民经济的重要抓手。

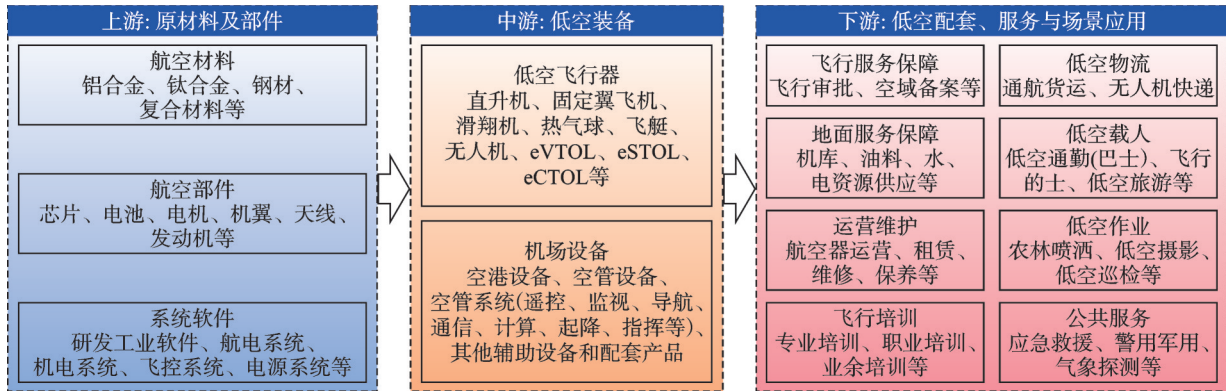


图 1 低空经济的产业链解析<sup>[3]</sup>

Fig.1 Analysis of the industrial chain of low-altitude economy<sup>[3]</sup>

复合材料在低空飞行器结构件中的应用已成为实现轻量化与高性能的必然选择<sup>[6]</sup>。相较于传统的层合板结构,三维编织复合材料展现出显著的技术优势<sup>[7]</sup>。传统铺层结构虽然工艺成熟,但存在层间性能弱的固有缺陷,在低空飞行器面临的复杂动态载荷下,极易发生分层、疲劳破坏,且抗冲击性能低,难以满足核心承力构件的安全需求。相比之下,如图 2 所示<sup>[8]</sup>,三维编织技术通过纤维在空间三维方向的交织,从根本上消除了分层问题,大幅提升了结构的整体性、耐疲劳性与抗冲击损伤容限,是制造高性能结构件的理想材料<sup>[9]</sup>。然而,要充分发挥三维编织复合材料的潜力,必须攻克全流程自动化制造的难题,涉及自动上纱、工件转接、工

序衔接等关键环节,已经成为当前实现低成本大规模制造的技术瓶颈。

目前,国内外学者围绕三维编织复合材料开展了大量研究。高校及科研院所(北京航空航天大学、哈尔滨工业大学、西北工业大学、南京航空航天大学、东华大学等)主要集中在编织机理、结构设计及性能表征等基础理论研究,为技术发展奠定了坚实基础<sup>[10-12]</sup>;而相关企业(云路复材等)则致力于推动技术的落地应用,在自动化装备研发与工程化实践方面进行了积极探索<sup>[7]</sup>。尽管已有显著进展,但针对低空飞行器结构件,尤其是异形结构件,如何实现从设计、编织到成形的全流程自动化、低成本快捷制造,仍缺乏系统性的技术迭代与集成创新。基于此,本综述将重点论述低空飞行器复合材料结构件的轻量化设计、数字化仿真及低成本自动化制造关键技术,旨在打通全流程自动化堵点,为我国低空飞行器产业的高质量发展提供理论支撑与技术指引。

## 1 低空飞行器复合材料结构件轻量化设计

在低空飞行器产业快速发展的背景下,随着无人飞行器与载人电动垂直起降飞行器需求的急速攀升,对材料与结构的轻量化与低成本提出了严苛要求。有效载荷提升与续航效率优化是低空飞行器的核心竞争力,而实现这一目标的关键途径在于推进材料、结构与制造工艺的深度融合<sup>[13]</sup>。碳纤

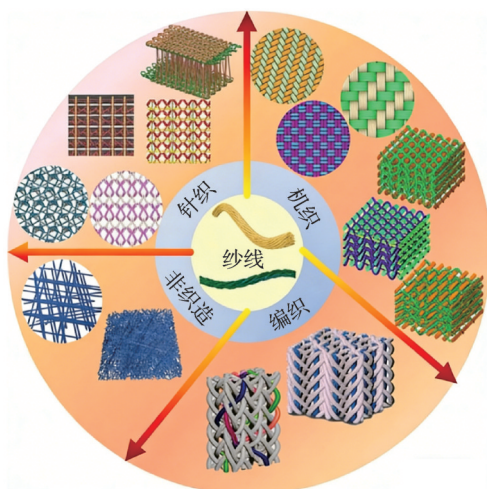


图 2 先进复合材料纺织结构类型<sup>[8]</sup>

Fig.2 Advanced composite textile structure types<sup>[8]</sup>

维复合材料凭借其高比强度、高比模量等优势,已成为实现结构轻量化的核心材料,在显著减轻飞行器重量、提升飞行性能方面发挥着不可替代的作用<sup>[14-15]</sup>。然而,尽管轻量化技术应用日益广泛,行业在设计与制造环节仍面临核心挑战:一方面,气动效率、结构刚性与轻量化指标之间的协同优化难度大,难以兼顾;另一方面,现有制造工艺与装备功能相对单一,缺乏针对异形结构件特定需求的多工艺定制化设计与制造能力。这些问题严重制约了低空飞行器性能的进一步突破,凸显了自主研发先进轻量化设计技术的战略必要性。

### 1.1 高性能纤维增强复合材料

在众多材料体系中,高性能纤维增强复合材料凭借其优越的比强度、比模量以及可设计性强等核心优势,已成为实现低空飞行器结构减重与性能跃升的关键物质基础(图3)。当前,低空飞行器广泛

采用的复合材料体系主要包括碳纤维、芳纶纤维、玻璃纤维以及先进热塑性复合材料等,各类材料依据其特性在不同结构部位发挥着关键作用。碳纤维复合材料因其卓越的比强度和比模量,被广泛应用于机身主框架、旋翼桨叶等主承力部件,是保障结构强度的核心;芳纶纤维复合材料凭借优异的抗冲击性和阻燃性,常用于制造防撞结构件和内部防护层,有效提升飞行安全性;玻璃纤维复合材料则因其良好的透波性与经济性,成为雷达罩和天线罩的首选材料;而聚醚醚酮(PEEK)等高性能热塑性复合材料凭借耐疲劳、可回收等特性,在连接件、支架等次承力结构中展现出广阔应用前景。随着材料体系的不断完善与制造工艺的持续革新,高性能纤维增强复合材料正推动低空飞行器向着更轻、更强、更安全的方向发展,为后续的结构精细化设计与制造奠定了坚实基础。



图3 低空飞行器高性能纤维增强复合材料应用

Fig.3 Application of high-performance fiber-reinforced composite materials in low-altitude aircraft

### 1.2 低空飞行器核心结构件外形设计

低空飞行器的核心需求主要围绕轻量化设计、气动性能优化与结构可靠性保障3个维度展开,其技术路径因飞行器尺度及运行工况的差异而呈现显著分化。具体而言,小型低空飞行器主要面临雷诺数工况下的升力效率不足与阵风敏感性等问题,而中大型低空飞行器则需在气动性能优化与结构承载可靠性之间寻求协同平衡。

针对小型低空飞行器在低雷诺数设计工况下存在的升力效率不足、易受阵风扰动等技术瓶颈,Drela<sup>[16]</sup>创新性地构建了适用于低雷诺数环境的翼型设计体系。该体系结合数值仿真方法与展向多翼型适配技术,并引入气动-几何约束协同优化机制,为后续低雷诺数反弯翼型的设计奠定了重要理论基础。在此基础上,西北工业大学研究团队<sup>[17]</sup>聚焦低雷诺数条件下翼型升阻特性恶化及失速特性剧烈的关键问题,采用反弯翼型优化设计方法,使最大升力系数提升12.6%,有效改善了飞行器的气动性能与失速特性。

对于中大型低空飞行器,其核心技术矛盾在于

气动性能提升与结构可靠性保障之间的平衡。哈尔滨工业大学团队<sup>[18]</sup>以变弯度机翼为研究对象,提出可变形蒙皮与柔性后缘一体化设计方法,在通过结构简化实现减重目标的同时,显著提升了翼面气动外形的连续性。北京航空航天大学团队<sup>[19]</sup>则聚焦后缘无缝光滑变形设计,实现了有效迎角范围的扩大与结构轻量化的协同优化。上述研究为破解中大型低空飞行器气动性能与结构可靠性之间的矛盾提供了可行的技术路径。

### 1.3 基于复合工艺的低空飞行器复材结构件设计

低空飞行器复材结构件的传统制造工艺往往依赖多层多向铺放或缠绕,通过改变纤维方向与增加层数来提升性能。这种方式不仅增加了结构重量与壁厚,限制了径厚比的优化,也制约了其在复杂场景下的应用。为此,研究人员提出了铺丝、缠绕、编织等多工艺融合的复合成形技术,所制备的薄壁结构件在碰撞安全性、变形控制及结构稳定性方面表现优异。然而,在复合工艺结构件中,结构配置顺序、纤维方向及细观结构的差异会导致截然不同的裂纹萌生形式与应力分布,这为结构设计与

性能预测带来了新的挑战。目前,多工艺复合制造技术已成为提升低空飞行器复材结构件性能的关键方向。东华大学团队<sup>[20]</sup>针对传统生产线数字化程度低、纤维易损伤、过程调控依赖经验等痛点,搭建了全自动化编织-铺层-缠绕-拉挤复合成形系统。该系统支持工艺推理、在线检测及个性化定制,有效提升了产线的集成度与智能化水平。

综上所述,多工艺复合制备技术正逐步突破传统单一工艺的性能瓶颈,成为实现低空飞行器结构件轻量化、高性能与多功能一体化的关键路径。以东华大学为代表的研究团队已在自动化装备研发、工艺参数调控及失效机理等方面取得了阶段性进展。然而,面向低空飞行器复杂服役环境的实际需求,该技术仍面临诸多挑战:如何建立跨尺度的工艺-结构-性能一体化模型、提升在线监测与自适应调控能力、发展多元工艺结构设计的多目标优化算法,以及开展坠撞、鸟撞、振动疲劳等典型工况下的失效机理与寿命预测研究,将是未来实现其工程化应用的理论与技术关键。

## 2 复合材料复杂外形结构件数字化仿真

低空飞行器结构件的低成本化涵盖设计与制

造两大环节,为响应行业对降低设计端成本的迫切需求、复合材料性能数字化设计技术应运而生,成为提升研发效率、实现性能精准调控的关键路径,能够大幅缩短试验周期并降低开发成本。然而,纺织结构复合材料的纤维预制体具有显著的随形变化特性,其在复杂外形下的性能响应机制尚不明确,目前仍缺乏系统、高效的数字化表征与预测手段,这严重制约了其在高性能领域的精准设计与应用拓展。此外,此类材料常用于关键承力部件,深入探究由纺织结构引起的纤维挤压、层间剥离、纤维断裂、基体开裂及界面脱粘等典型失效模式,对于保障结构完整性、提升可靠性及防止灾难性失效至关重要。因此,构建高保真预测模型与多尺度仿真工具,成为揭示失效机理、突破设计瓶颈的基础,对实现复合材料结构的性能评估、寿命预测与轻量化设计具有重大意义。

### 2.1 复杂外形结构件高保真建模

针对纺织结构复合材料的高保真建模,研究人员开展了大量探索性工作,目前主要形成了解析建模、运动学建模及有限元建模3大类方法。为清晰对比不同方法的适用场景与技术边界,现将3类典型方法进行对比,如表1所示。

表1 纺织结构复合材料高保真建模方法对比

Table 1 Comparison of high-fidelity modeling methods for textile structural composites

建模方法	适用几何复杂度	建模尺度	输入	输出	优缺点
解析建模	简单规则几何(圆柱、圆锥等)	介观/宏观	芯模几何参数、工艺参数	纱线路径、截面形态	计算效率高,通用性强;无法描述纱线滑移、桥接、堆积等复杂行为
运动学建模	中等复杂度几何(变曲率、变截面芯轴)	介观	芯模曲面、锭子/铺放轨迹	纤维束拓扑、几何覆盖状态	兼顾效率与灵活性,适用于常规异形件;难以处理凹槽、镂空、大斜率凸台
有限元建模	高复杂度异形结构(凸台、大斜率变截面、局部加强区)	介观/宏观	芯模CAD模型、接触与约束	应力分布、变形与损伤状态	仿真精度高,适应性强;鲁棒性差,计算成本高,设计周期长

由表1可知,有限元分析法虽然仿真精度高,适用于包含凸台、大斜率变截面等异形结构的芯模分析,但存在鲁棒性差、计算效率低及设计成本极高等显著缺点。解析法与运动学法在一定程度上保证了计算效率,具备高通用性与高灵活性,适用于常见的变曲率变截面复杂异形芯轴。然而,由于难以数字化描述成形过程中纱线滑移、桥接及堆积等异常状态,其在处理包含凹槽、镂空、大斜率凸台等复杂几何特征芯模时存在局限性。

从实验验证现状来看,现有模型多在规则或中等复杂度构件上完成了有效性验证,而针对低空飞行器典型的大曲率、变截面、局部异型特征的复杂结构件,相关实验验证与工程化应用仍较为缺乏,模型的工程边界与置信区间有待进一步明确。

针对上述技术瓶颈,东华大学团队<sup>[21]</sup>提出了

一种结合运动学与动力学的混合建模方法。该方法通过构建纱线相互接触等关键部分的力学效应模型进行编织过程仿真,有效避免了特殊异形结构的计算精度下降问题。相较于传统方法,该技术在计算效率上优于有限元法,在精度上优于单纯的运动学法,实现了精度与效率的良好平衡;同时,该方法基于算法开发,可自主集成平台及数据可视化插件,具备灵活的数据传输与展示能力。德累斯顿工业大学团队<sup>[22]</sup>证明了针对简单结构芯模的运动学织物仿真具有可行性与快捷性。

### 2.2 复合材料结构件多尺度损伤数值计算

为深入理解并精准预测复合材料在复杂工况下的损伤演化规律,研究人员开发了涵盖简化解析模型与复杂数值模拟的多种计算方法。经典层压理论及其衍生方法<sup>[23]</sup>为初步设计提供了便捷工

具,但在处理复杂损伤场景时往往精度有限。有限元方法(Finite element method, FEM)<sup>[24]</sup>作为一种强有力的模拟手段,结合连续损伤力学与内聚力模型<sup>[25]</sup>,能够有效模拟损伤的萌生与扩展过程。微观力学模型<sup>[26-27]</sup>则聚焦于组分材料性能,利用Mori-Tanaka<sup>[27]</sup>或Halpin-Tsai方程<sup>[28]</sup>预测微观尺度的有效性能与应力分布,揭示了微观结构对损伤机制的影响。多尺度模型<sup>[29]</sup>通过整合从微观结构细节到宏观行为的跨尺度分析,结合有限元与均质化技术捕捉尺度间的复杂相互作用。此外,人工智能技术<sup>[30-31]</sup>在损伤预测中的应用日益成熟,通过挖掘实验与模拟数据中的深层模式,为损伤起始、演进及失效预测提供了新的解决方案。

细观或微观尺度的物理机制决定了材料的宏观力学响应<sup>[32]</sup>。构建高效的集成计算框架,旨在将宏观与微观描述有机结合,在规避完全解析复杂

微观结构高昂计算成本的同时,精准提供关键力学信息<sup>[33]</sup>。西北工业大学团队<sup>[34]</sup>提出了一种新颖的协同半解析仿真方法,实现了中尺度与宏观尺度间力学响应与损伤演化的实时双向耦合,并针对冲击载荷开发了高效中尺度有限元模型<sup>[35]</sup>,将准静态仿真计算时间缩短了96.8%。然而,对于航空进气道、发动机叶片等复杂外形结构件,其变截面、变曲率的异形几何特征导致细观纺织结构对织造工艺参数极为敏感,传统多尺度分析方法难以兼顾工艺影响与计算精度。针对这一难题,东华大学团队<sup>[36]</sup>提出了一种考虑全场工艺效应的三维编织复合材料准静态行为计算方法(图4)。该方法基于运动学与动力学耦合求解实现织物拓扑结构的快速预测,构建了交织、挤压等介观行为的变化函数,并结合非线性刚度退化本构关系,实现了对复杂外形结构件损伤行为的精确求解。

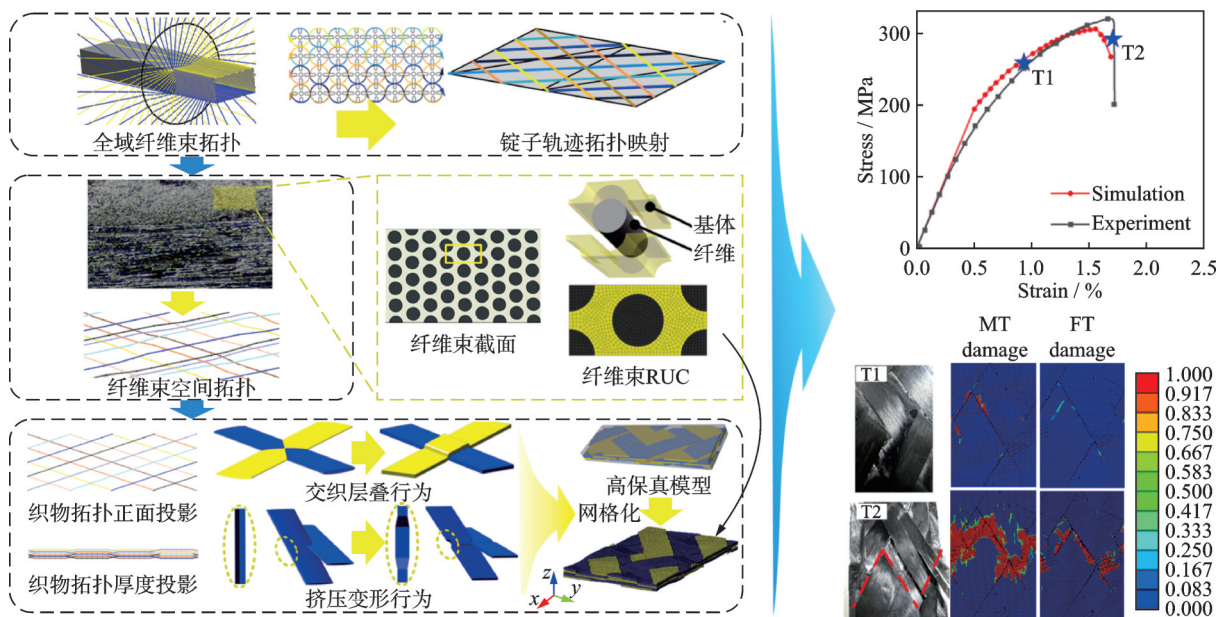


图4 考虑全场工艺效应的三维编织复合材料高保真建模与损伤计算<sup>[36]</sup>

Fig.4 High-fidelity modeling and damage calculation of 3D braided composites considering full-field process effects<sup>[36]</sup>

### 2.3 数据驱动的低空飞行器复合材料结构正向设计

传统低空飞行器纺织结构复合材料异形件设计多沿用“试错法”范式,即遵循“制备样品-试验验证-修正参数”的迭代路径。这种设计模式不仅周期漫长、成本高昂,且难以充分挖掘复合材料的可设计性潜力。特别是针对编织、铺层、缠绕等多工艺复合制备的复杂结构,纤维束的细观构型、界面结合状态与宏观力学性能之间的映射关系呈现高度非线性特征,使得基于经验的传统设计方法面临严峻挑战,已难以满足低空飞行器对低成本、高效率研发的迫切需求。

在此背景下,突破传统试错法局限,探索数字化正向设计方法已成为行业研究热点。斯图加特

大学团队<sup>[37]</sup>深入分析了编织复合材料细观结构对力学性能的影响机制,创新性地将编织工艺特性纳入考量,揭示了芯模周长、织物覆盖率与面内性能之间的内在关联。北京航空航天大学团队<sup>[38]</sup>基于“过程-结构-性能”框架表征了三维编织复合材料的力学性能,以锭子运动轨迹的数学函数为基础,将编织角度作为关键变量实现了性能的精准映射。东华大学团队<sup>[39]</sup>则进一步提出了“装备-工艺-结构-性能”多维度多尺度数字化设计方法(图5),该方法将制造装备特征与织造工艺参数纳入建模体系,实现了全场纤维束分布的精确描述;通过芯模网格重构算法,实现了任意区域本构的在线调节与整体性能的高精度预测,为复杂异形结构件的正向设计提供了全新的技术路径。

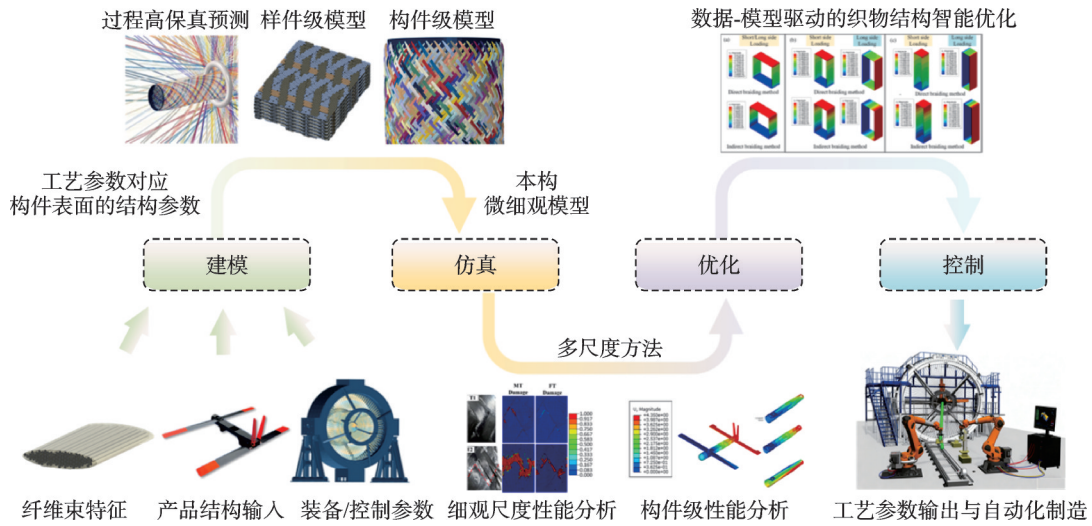


图5 装备-工艺-结构-性能多维度多尺度数字化设计方法<sup>[39]</sup>

Fig.5 Multi-dimensional and multi-scale digital design method for equipment-process-structure-performance<sup>[39]</sup>

### 3 复合材料结构件低成本自动化制造

#### 3.1 纺织结构复合材料预制体精确成形工艺

##### 3.1.1 三维编织

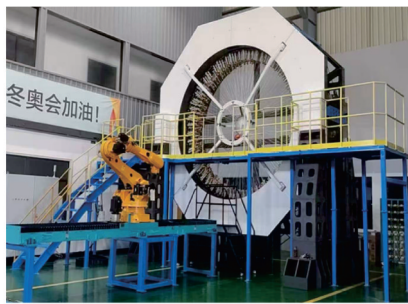
三维编织复合材料结构件具有结构设计性好、力学性能卓越、一体化近净成形等优势,是桨叶、机翼、机身以及机臂等尖端国防与重要民生领域低空飞行器的重大刚需。然而,针对上述国家刚需产品,国内主要以手工半机械化生产为主,自动化成形技术与装备是世界各国竞逐的热点,也被欧美等国家严密封锁,导致制造成本高昂且难以大规模生产。国内外知名企业如 Herzog、Spiraltex 与云路复材(图6)等对三维编织自动化装备进行深入研发,已实现三维编织装备高速、稳定运行。然而,对于

低空飞行器中所需的复杂外形结构件,当前装备的自动化程度与制造方法仍无法实现在变曲率、变截面位置的精确成形。

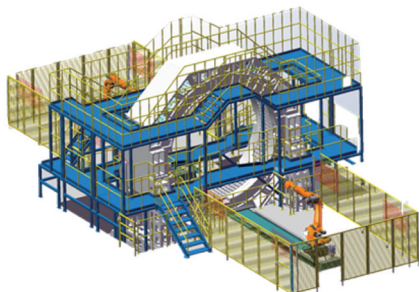
针对上述问题,需要从两个方面解决,首先解决编织软件上对于制造工艺参数的精确推理生成问题;其次,需要解决编织装备上多机器人、多驱动单元的精确控制问题;最后,通过反馈数据与模型预测数据对三维编织系统进行实时调控,实现低空飞行器复杂外形结构件预制体的精确成形。

在三维编织工艺的智能化推理方面,国内外学者围绕异形结构件的成形参数生成开展了系统性探索。针对传统算法在弯曲芯模轨迹规划中存在的求解效率低、纱线空间约束不足等问题,蒙特利尔综合理工大学团队<sup>[40]</sup>引入改进的逆运动学求解策略,通过约束编织过渡区域的纱线空间位姿,构建了适用于复杂几何型面的机器人牵引轨迹与速度预测模型。该方法显著提升了异形构件编织参数生成的适应性及计算效率,并在飞机隔框上得到了验证。在此基础上,东华大学团队<sup>[41]</sup>进一步提出了面向变曲率特征的偏心编织方法,揭示了偏心变姿态条件下纱线非均匀分布的形成机制,开发了以芯模几何特征为驱动的工艺参数推理算法。该研究有效抑制了变曲率区域常见的织物堆积与褶皱缺陷,提高了复杂曲面构件编织成形质量,如图7所示。

在三维编织多机器人控制方面,由于低空飞行器结构件特别是载人飞行器结构件尺寸较大、形状较为复杂,编织过程多机器人协同控制难度高,牵引机器人与预制体在线检测机器人需要对末端轨迹与关节运动进行实时优化。各高校研究人员(如哈尔滨工业大学、西北工业大学、东华大学、南京航空航天大学等)开展了一系列系统性的研究工作,



(a) Photograph of the 3D weaving equipment



(b) Schematic diagram of the 3D weaving equipment

图6 三维编织装备

Fig.6 Three-dimensional braiding equipment

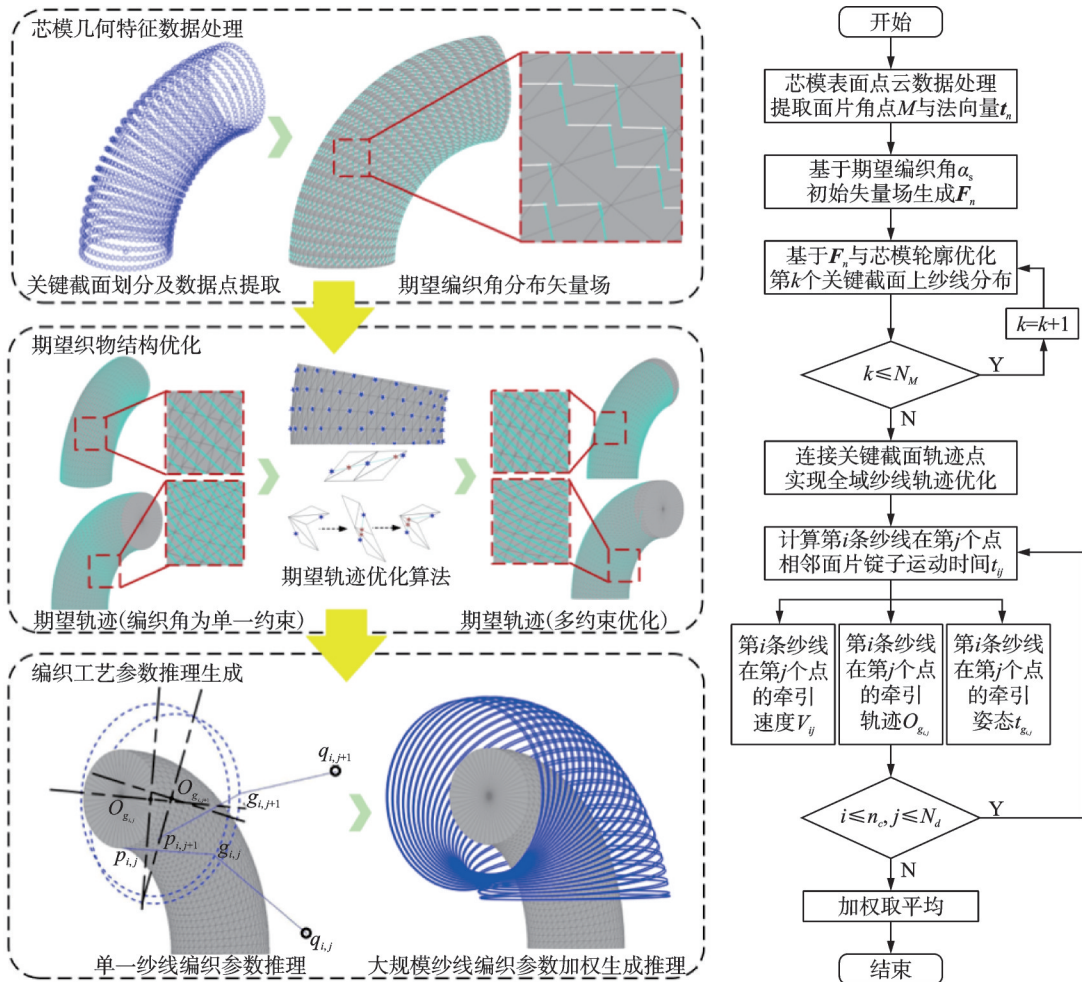


图 7 芯模结构特征驱动的偏心编织工艺参数推理算法<sup>[41]</sup>

Fig.7 Reasoning algorithm for eccentric braiding process parameters driven by core mold structural characteristics<sup>[41]</sup>

其中东华大学团队<sup>[42]</sup>首先构建了基于纱线-芯模相互作用力的末端轨迹补偿方法,在直纱假设前提下,推导了圆截面芯模编织过程中纱线对芯模的作用力表达式,建立芯模力平衡方程,并利用有限元仿真数据训练神经网络,实现了机器人末端轨迹的数据驱动式自适应补偿。然而,该方法主要聚焦于操作空间的轨迹规划,未充分考虑机器人在关节空

间的运动约束,导致实际编织过程中可能出现关节运动异常。为应对这一问题,团队进一步提出了基于零空间的最大可操作度协同调控策略,通过引入加权系数与零空间算子构建关节速度解,在保障编织连续性与稳定性的同时,实现了关节限位规避与负载能力优化等辅助任务的定向调控,从而提升了系统整体的鲁棒性与成形精度,如图 8 所示。

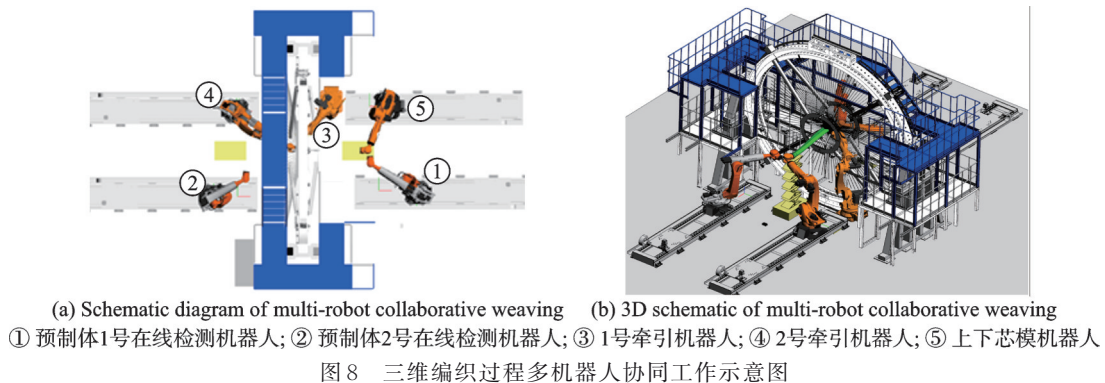


图 8 三维编织过程多机器人协同工作示意图

### 3.1.2 三维机织

三维机织是一种通过引入接结经纱贯穿厚度

方向,将多层经、纬纱交织成整体不分层结构的纺织成形技术。三维机织复合材料凭借其优异的抗

分层、抗冲击性能和损伤容限<sup>[43-44]</sup>,以及近净成形复杂异形件的能力,在高端装备领域极具应用潜力。该技术的研究始于20世纪80年代,经Fukuta等<sup>[45]</sup>的开创性工作及Khokar<sup>[46]</sup>对开口机构、引纬原理及整体织造成形方法的系统性突破,至21世纪欧洲已率先实现碳纤维等高性能材料的数字化织造与复杂结构近净成形。国内自20世纪90年代起,南京航空航天大学、东华大学、天津工业大学、南京玻璃纤维研究设计院、浙江理工大学等单位相继开展了2.5D织机、多剑杆织机的自主研发,逐步具备了角联锁、正交组织等典型结构的成形工艺能力。

如图9所示,三维机织复合材料已逐步应用于航空航天复材构件<sup>[47-48]</sup>。然而,传统的三维机织工艺设计仍高度依赖经验试错,存在设计效率低、成形精度难以保障等问题,制约了该技术的进一步推广与应用。针对这一现状,国内外学者展开了深入研究。Li等<sup>[49]</sup>提出了一种融合宏观成形模拟与介观单胞模型的分层多尺度计算方法,通过嵌入元法传递位移边界条件,实现了成形后扭曲结构预制体介观几何的准确重构,为复杂复合材料结构的性能评估及优化提供了有效途径。Sun等<sup>[50]</sup>则采用数字化表达方法,通过8个关键参数精准界定多层经纬纱结构(Multi-layer woven structure, MLWS)设计变量,构建了适用于新型复杂架构的通用设计方法与实施流程。

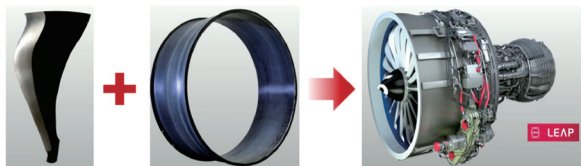


图9 Leap-X三维机织复合材料航空发动机叶片、机匣<sup>[47-48]</sup>

Fig.9 Aeroengine blades and casings manufactured by Leap-X 3D woven composite<sup>[47-58]</sup>

### 3.1.3 纤维缠绕

纤维缠绕技术是目前应用较为广泛的复合材料制造工艺,凭借其独特的工艺优势,已成为航空航天领域结构件制造的首选工艺之一。在高性能纤维缠绕过程中,实现构件几何轮廓与设计模型的高度吻合,并保障纤维排布、厚度分布及力学性能的可控性,是达成精确成形的核心目标。然而,非轴对称构件的几何复杂性对此构成了显著制约。此类芯模表面难以通过解析函数精确表达,导致传统基于微分几何的测地线与非线性测地线方法因依赖连续曲面方程而失效。若路径规划不当,极易在大曲率区域引发纤维架空或滑移,而在截面收缩区域则形成纤维重叠与堆积,进而导致制品厚度不

均、局部力学性能弱化,严重偏离预设的几何精度与承载要求。

为实现非轴对称构件的精确成形,缠绕路径需同时满足几何贴合性与纤维分布均匀性的双重约束,研究人员对此开展了大量工作并初步形成了解决方案。韩国釜山国立大学团队<sup>[51]</sup>开发了一种适用于三角形网格模型的无滑移、无架空路径生成算法,可处理轴对称与非轴对称芯模,但该方法在不同区域需设定差异化滑移系数,设计者需反复调整参数以达到预期效果,设计效率较低。东华大学团队<sup>[52]</sup>则提出了一种融合芯模几何特征、缠绕工艺与路径规划的非轴对称缠绕路径生成方法。该方法引入截面等效半径概念,建立了缠绕角随截面周长动态变化的调控机制,并基于二分法原理精确控制路径点收敛于目标位置,有效确保了多束纤维在周向上无重叠、无间隙的均匀排布,并在椭圆变截面管、偏心翼型件、风扇叶片等多种复杂非轴对称芯模上成功验证了其有效性与优越性。

### 3.1.4 干纤维铺放

干纤维自动铺放技术是融合自动纤维铺放自动化优势与液体成形低成本特点的先进复合材料制造技术,其技术核心围绕专用铺放装备的研发与工艺-性能匹配机理的研究展开,是航空航天领域复合材料构件高性能、低成本制造的重要发展方向。该技术的装备体系以铺放主机为核心,铺丝头作为核心执行部件,需集成丝束导向、夹紧、重送、切断、加热与压实等功能模块,并配套精准的张力控制系统与温度闭环控制系统,以此保障干纤维铺放的成形精度与预成形体质量<sup>[53]</sup>;而在工艺机理方面,铺放效果受温度、压力、张力等多类参数调控,层间粘结力的形成与定型剂的受热熔融、扩展及交联行为直接相关,预成形体的渗透特性则决定了后续液体成形的树脂浸润效果与构件最终质量<sup>[54-55]</sup>(图10)。

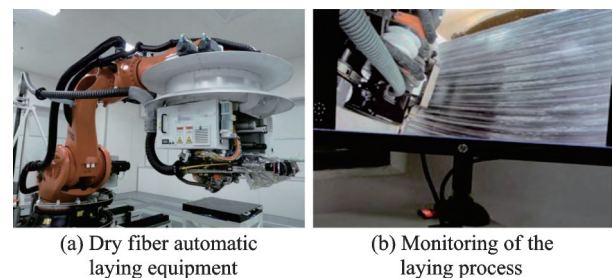


图10 干纤维自动铺放设备与缺陷监测<sup>[54-55]</sup>

Fig.10 Dry fiber automatic placement equipment and defect monitoring<sup>[54-55]</sup>

国内外学者围绕材料-工艺-性能的关联开展了大量系统性研究,Grisin等<sup>[56]</sup>发现引入2 mm丝束间隙可使预成形体灌注时间平均缩短75%,且

仅造成拉伸强度7%的小幅下降,为工艺参数优化提供了依据;刘军等<sup>[55]</sup>则针对国产干纤维开展了自动铺放工艺研究,确定了首层与非首层的差异化铺放参数,实现了109层典型铺层的稳定铺放,将层长度偏差与位置偏差均控制在±1 mm范围内,同时验证了国产干纤维与真空辅助成形工艺的适配性。

目前,干纤维铺放技术已在航空航天领域实现了多类典型构件的工程化验证与应用。国内方面,上海飞机制造有限公司联合东华大学完成了T形长桁预成形体的制备验证,国产干纤维制备的复合材料冲击后压缩强度最高可达315 MPa,为该技术的国产化工程应用奠定了基础<sup>[55]</sup>。国外方面,Hexcel公司联合Aerolia、Coriolis公司完成了飞机复合材料机身壁板制造;GKN航宇公司在欧盟“洁净天空”计划支持下制造的下一代复合材料整体机翼验证件,相较现有技术实现了构件减重5%、制造成本降低25%;MTorres公司制备了无铆钉、无紧固件的全复合材料机身壳体;俄罗斯联合飞机制造公司更是将该技术应用于MC-21客机翼梁、壁板蒙皮、中央翼盒等主要承力构件,实现了大型民用飞机机翼主承力构件首次采用非热压罐成形技术的工程突破<sup>[57]</sup>。

### 3.1.5 曲面缝合/针刺

复合材料缝合技术是指利用缝合纱线将多层织物缝合形成准三维整体结构的关键工艺<sup>[58]</sup>。如图11所示<sup>[59]</sup>,该技术通过在厚度方向(Z向)引入增强纤维,有效克服了传统层合板层间性能弱的缺陷,显著提升了结构的层间强度与抗冲击性能。缝合工艺主要分为单边缝合与双边缝合两大类:单边缝合技术包括ITA(Interlaminar tufting assembly)、OSS(One-side stitching)、弯针缝合及Tufting缝合等;双边缝合技术则涵盖锁式缝合、改进锁式缝合及链式缝合等<sup>[60-61]</sup>。

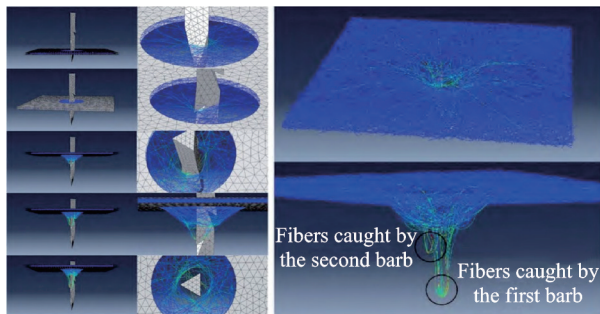


图11 针刺过程模拟<sup>[59]</sup>

Fig.11 Needleing process simulation<sup>[59]</sup>

在缝合工艺参数对构件性能的影响方面,研究表明缝线种类、直径与缝合密度是决定最终性能的关键变量,相关文献已系统揭示了其对构件力学性

能的影响规律<sup>[62-63]</sup>。在工程应用方面,缝合技术已在航空航天领域取得重要突破。美国NASA在ACT项目中利用缝合技术成功研制了13.5 m×2.7 m的大型机翼壁板并完成了应用验证;国内相关单位也通过该技术成功制造出机翼箱段壁板、盒型梁等关键承力构件,有力推动了缝合技术在复合材料结构制造中的工程化应用进程<sup>[60]</sup>。

### 3.1.6 多工艺复合成形

在上述单一工艺方法的基础上,根据构件的具体设计需求,将不同工艺进行有机集成可形成复合工艺方案,例如编织-机织、编织-缠绕、编织-铺放以及编织-针刺等。国内高校与科研院所已围绕复合工艺技术的理论建模<sup>[20]</sup>、缺陷形成机理<sup>[64]</sup>及力学性能<sup>[65]</sup>等方面开展了深入研究。实践证明,复合工艺能够显著提升构件的综合性能:如南京航空航天大学团队研究表明编织-针刺复合工艺有效提高了预制体的层间剥离强度<sup>[66]</sup>;而缠绕-针刺复合工艺对改善层间性能也具有积极影响<sup>[67]</sup>;铺放-编织复合工艺制备的构件则在抗冲击性能方面表现出显著优势。由此可见,多工艺复合成形并非单一工艺的简单叠加,而是通过深度融合各工艺的技术优势,成为制备综合性能更优异复合材料结构件的有效手段。

## 3.2 纺织结构复合材料液体成形方法

液体成形技术是实现低空飞行器高性能结构件低成本制造的关键手段,也是当前先进复合材料制造领域的研究热点<sup>[57]</sup>。针对该技术,国内外启动了多项重大科研项目,如美国NASA的HiCAM项目、欧盟的IIAMS项目、空客的WOT项目以及国内重点研发计划“先进结构与复合材料”专项等,相关成果已成功应用于MS-21与A220机型的机翼壁板制造<sup>[68]</sup>。如图12所示<sup>[68]</sup>,在液体成形工艺中,孔隙是最主要的缺陷形式<sup>[69-70]</sup>。对于主承力结构件,通常需严格控制孔隙含量低于1%。研究表明,孔隙含量与力学性能存在显著负相关,例如孔隙含量每增加1%,层间剪切强度便会降低10%以上<sup>[71]</sup>,这对成形工艺的质量控制提出了严苛要求。

目前,纺织结构复合材料液体成形以RTM、VARTM、HP-RTM为典型技术路线,不同工艺在成形压力、树脂体系、生产效率及制品质量方面存在差异,其关键技术指标对比如表2所示。

RTM工艺采用闭合模具,通过压力驱动树脂浸润预制体,成形精度与表面质量优异,适用于航空航天次承力与主承力构件;VARTM以真空为驱动力,设备投入低,适合大尺寸、小批量构件制造,但纤维体积分数与尺寸精度相对较低;HP-

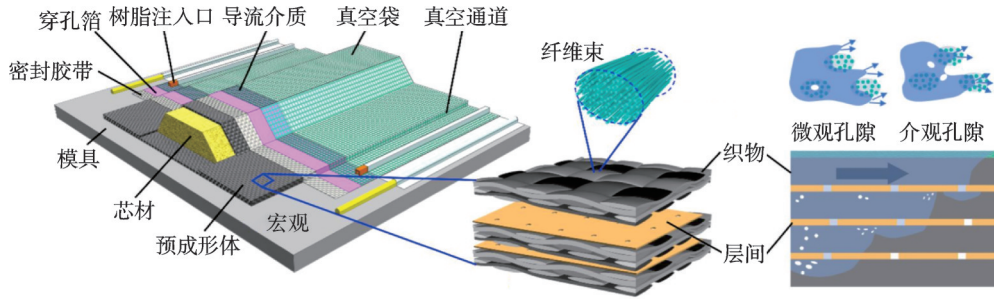
图 12 液体成形复合材料的多尺度构型及空隙缺陷<sup>[68]</sup>Fig.12 Multiscale configuration and void defects of liquid formed composites<sup>[68]</sup>

表 2 典型液体成形工艺路线及关键指标对比

Table 2 Comparison of typical liquid forming process routes and key indicators

工艺路线	成形压力/ MPa	纤维体积 分数/%	孔隙率/%	厚度偏差/ mm	成型周期/ min	适用场景
RTM	0.1~1.0	50~60	≤1.5	±0.1~0.3	30~90	中等复杂异形件、中等批量、力学性能要求较高构件
VARTM	常压(真空)	45~55	≤2.0	±0.2~0.5	60~180	大尺寸壁板、蒙皮,小批量、低成本需求
HP-RTM	3~15	60~70	≤1.0	±0.05~0.20	5~20	高精度主承力件、大批量自动化生产线
Light-RTM	0.2~0.5	50~58	≤1.2	±0.1~0.3	20~40	中小型结构件,兼顾成本与效率

RTM通过高压快速注射与高温固化,显著缩短成形周期,可实现高纤维体积分数与低孔隙率控制,是低空飞行器关键结构件自动化量产的核心工艺。通过工艺选型与参数优化,可实现液体成形构件孔隙率≤1%、纤维体积分数≥60%、厚度偏差控制在±0.1 mm以内,满足低空飞行器高性能与低成本的双重制造需求。

### 3.3 纺织结构复合材料高精加工技术

复合材料凭借其各向异性、复杂的结构特征以及性能对温度的敏感性,已成为典型的难加工材料,加工过程中极易产生毛刺、分层、撕裂等损伤。因此,复合材料的高质高效加工技术一直是机械制造领域的研究热点与难点。现有的加工技术体系主要涵盖传统机械加工与非传统加工(如水射流加工、电火花加工、激光加工等)两大类<sup>[72]</sup>。在传统精密机加工方面,大连理工大学等团队已建立了基础切削理论,揭示了材料去除机理<sup>[73-74]</sup>,并通过优化钴剂及铣削刀具结构<sup>[75-77]</sup>以及调控工艺参数,显著提升了加工质量与效率。

然而,由于传统机械加工存在固有的局限性,非传统加工技术成为实现更优加工效果的重要补充<sup>[78]</sup>。水射流加工利用高压水流进行材料去除,具有加工区温度低、能有效避免热损伤且效率高的特点,已成为复合材料常用加工方法之一;电火花加工利用脉冲放电产生的热能去除材料,作为非接触式加工方法,可有效避免机械作用力引发的损伤;激光加工则通过高功率密度激光束实现材料去除,同样具有非接触加工的典型优势<sup>[72]</sup>。此外,随

着工艺技术的发展,复合材料抽铆<sup>[79]</sup>、熔焊<sup>[80]</sup>、精密铣削<sup>[81]</sup>及磨抛<sup>[82]</sup>等技术也得到了深入研究与应用,进一步推动了构件向一体化与高精度成形方向发展。

## 4 面向全流程自动化的结构件智能生产

### 4.1 基于具身智能的复合材料连续大规模生产技术

#### 4.1.1 高性能纤维打纱机器人

在高性能复合材料制造过程中,特别是针对编织、机织等预制体成形工序,高性能增强纤维的精密展纱与复绕至关重要。该工艺通过目标纱锭的旋转运动与导纱头的直线往复运动,实现纤维在纱锭表面的螺旋形交织排布<sup>[83]</sup>,能够将原丝不可控、不均匀的原始张力重塑为性能均匀的预应力状态,通过降低张力波动显著提升结构一致性,是复材成形流程中不可或缺的关键环节。

目前,国外在该领域已实现从数字化向智能化的跨越,设备在600~1 000 m/min的高线速度下仍能保持张力波动控制在1%以内,具备极高的工艺可靠性,有效避免了断丝、跳纱现象。相比之下,国内主流展纱复绕工艺尚停留在“机器缠绕、人工换纱”的半自动化模式<sup>[84]</sup>,线速度普遍局限在300~500 m/min。由于张力反馈响应延迟较大,为避免纤维受损往往被迫降速运行,导致生产效率低、人工成本高。因此,实现全流程具身协同的智能化已成为行业的核心需求。

针对上述问题,研究者提出了基于具身智能的

高性能打纱机器人系统<sup>[85-86]</sup>。该系统突破了传统设备仅执行固定轨迹的局限,演变为具备人工智能算法、运动控制与多模态传感器的高度协同智能体。通过“感知-决策-执行”的实时物理交互,机器人利用视觉识别纤维表面毛羽与断丝,运用力觉感知微小张力波动,从而在动态变化的物理空间中实时优化运动参数,完成精密布纱。相比传统方法,该技术显著降低了纤维损伤率并提高了纱线张力一致性,是解决纤维脆性敏感、张力波动及工序衔接断层的重要路径。

#### 4.1.2 高性能纤维换纱机器人

在高性能纤维自动化生产过程中,受限于生产工艺与纱锭体积,单锭长度往往有限;而对于机翼长桁、大型陶瓷基复合材料管件等航空航天构件,所需纤维总量常远超单锭容量<sup>[87]</sup>。为保证生产连续性,防止纤维束出现空隙或重叠,需及时更换即将耗尽的旧纱筒,该过程是一个涵盖残量预测、空间寻迹、精密抓取与原位接头的复杂工艺链。

目前国内外技术差距显著:国外工业机器人已攻克高动态下的视觉寻迹与动作规划难题<sup>[88]</sup>,实现了基于视觉引导的自动换纱,通常在30~60 s内完成且支持不停机切换,全流程无人工干预。相比之下,国内仍依赖半自动方式<sup>[89]</sup>,需手动更换纱锭并进行人工空气捻接,换纱流程耗时3~5 min且必须停机。该过程繁琐低效,人工成本高,且因直接接触增加了污染风险。因此,在高速、高精度前提下实现安全换纱,是纺织行业亟待解决的核心问题之一。

针对上述挑战,研究者提出了基于具身智能的高性能纤维换纱机器人。该机器人利用视觉传感器实时解算纱锭残余半径<sup>[90]</sup>,实现非停机主动换纱;依托具身智能的灵巧操作能力,在狭小的编织机空间内自主规划无碰撞轨迹,精确完成旧锭落纱

与新锭上纱。相比传统半自动方法,该技术不仅消除了由停机带来的工艺波动,更大幅提高了工作效率,为高性能复合材料的智能化、连续化制造提供了坚实的技术保障。

#### 4.1.3 高性能纤维接头机器人

在高性能纤维自动化生产中,当单卷纤维耗尽而构件尚未成形完成时,需将新纱卷起始端与旧纱卷末端连接,此工序称为纤维接头<sup>[91]</sup>。该工艺旨在通过精密连接保障大尺寸、长路径三维编织的连续性,所形成的接头节点需承受编织过程中的高频张力与动态冲击载荷,是决定生产线连续稳定运行及最终构件力学性能一致性的关键环节。同时,在狭窄空间工况下,人工操作难度大且接头强力保持率易受人员疲劳状态影响,导致成本高、效率低、质量一致性差。因此,如何在纤维接头处实现应力传递连续性与几何通过性的协同优化,已成为当前研究的核心问题。

针对该技术挑战,英国 Airbond、国内上海瑞彦等企业<sup>[92]</sup>研制了适用于高性能纤维的智能捻接器。该装置可用于玻璃纤维、碳纤维等脆性纤维及芳纶等高韧性纤维的自动连接,并可作为机器人末端执行器集成于预制体成形系统中(图13)。相较于传统机械式接头设备或人工操作,机器人接头系统依托高频伺服反馈机制与主动张力控制算法,将纤维接头工艺重构为集感知、决策与执行于一体的闭环智能系统。系统通过力觉传感器实时捕获纤维受力状态,利用算法动态调节接头参数,并通过伺服系统实现高精度运动控制,将张力波动抑制在极小容差范围内。该机制有效避免了因张力过大引发的纤维损伤或张力不足导致的松弛与路径偏移,保障了构件内部应力分布的均匀性,显著提升了制品的抗冲击性能与疲劳寿命,为高性能复合材料构件的可控制造提供了关键技术支撑。

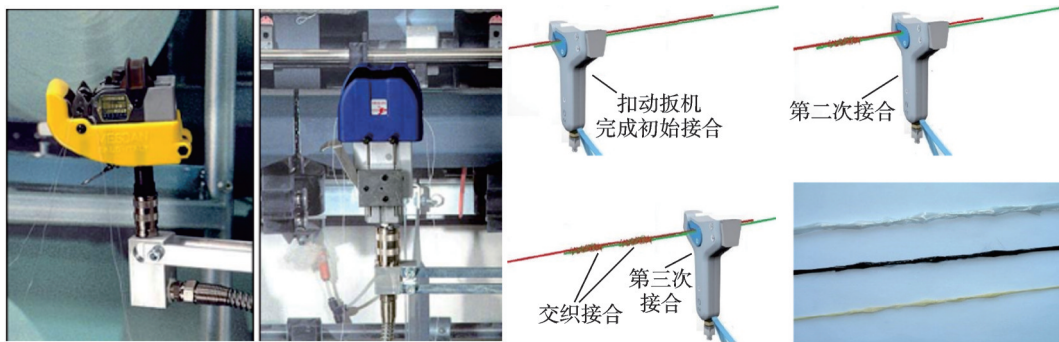


图13 高性能纤维束捻接机器人<sup>[92]</sup>

Fig.13 High-performance fiber bundle splicing robot<sup>[92]</sup>

## 4.2 复合材料结构件工序间自动衔接及柔性制造技术

在复合材料高性能纤维预制体的制备过程中,

纤维束在编织成形后至进入刚性模具前,通常处于准静态柔性形态,结构刚度尚未形成,对外界扰动极为敏感。在此阶段,人工转运与装夹工序极易诱

导纤维束发生微观尺度的空间位姿偏转,破坏预设的纤维空间几何映射路径。对于依赖精确几何拓扑以实现力学性能优化的精密编织构件而言,此种形态失稳将直接导致最终制品与设计模型之间产生几何偏差,成为制约高性能构件成形精度与性能一致性的关键瓶颈。

为克服制造过程中因物理状态不可控所引发的结构偏差问题,研究人员提出了工序间自动衔接与柔性制造技术。工序间自动衔接旨在通过自动化传输与定位系统,消除人工干预导致的随机误差与效率波动,保障各制造环节间空间几何信息的精准传递;柔性制造则聚焦于对非刚性预制体的自适应夹持与形态保持能力,通过动态调控施力方式与接触界面,实现复杂形态纤维结构件的无损转运与精确定位。两项技术的协同集成,推动了复合材料制造从传统手工技艺向数字化精密制造的范式转型,为复杂结构高性能构件的高质量成形提供了可行路径。

目前,国内外在该领域的技术发展存在显著差异。国外通过统一底层软件协议与开发高精度末端执行器,已实现全流程数字孪生闭环。利用 Ad-Path 或 Additive3D 等专业软件,将纤维路径规划、碰撞预测与在线缺陷检测直接关联;在大型构件制造中,已实现多机器人秒级协同作业,如一台机器人负责铺放,另一台同步进行超声检测或辅助支撑。相比之下,国内在三维编织和复杂结构件成形方面正处于从单机自动化向产线智能化跨越的关键期。尽管在编织、铺放等单项技术上已达国际水平,但在工序间的自动转运逻辑、柔性夹具的自适应性以及核心工艺仿真软件的自主化方面仍有待提升(图 14)。

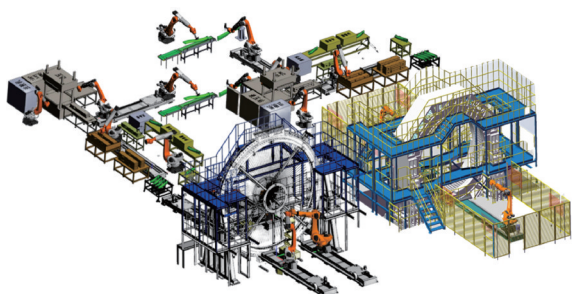


图 14 低空飞行器结构件柔性制造产线示意图

Fig.14 Schematic diagram of flexible manufacturing line for low-altitude vehicle structural components

## 5 总结与展望

本文系统综述了低空飞行器高性能结构件的轻量化设计、数字化仿真及低成本自动化制造关键

技术,深入探讨了基于三维编织等多工艺复合的预制体成形技术,为解决结构件(尤其是异形结构件)设计制造难题提供了理论依据与技术路径。展望未来,低空飞行器作为国防安全与经济的双重载体,其战略意义日益凸显。

在国防军工领域,常规武器的低成本、大规模快捷制造是提升国防实力的必然趋势。通过本文所述的全流程自动化制造技术,可显著降低无人作战平台的成本与生产周期,对于构建轻型、中型、重载系列化无人作战体系具有决定性支撑作用。这将有力推动武器装备向低空、超低空突防、隐身及高速飞行方向迈进,满足现代战争对装备高性能、低成本与规模化的双重需求。

在低空经济领域,随着技术的成熟与成本瓶颈的突破,低空飞行器将迎来爆发式增长。从空中的士、城际间定点运输,到丘陵高原运输、应急救援,再到岛礁间海上物流及环境监测监控,其应用场景覆盖面广、潜力巨大。低空经济正逐步成为国家战略性新兴产业与新的经济增长引擎,有望成为支撑中国经济高质量发展的支柱产业。本综述所提出的关键技术体系,将助力打通从设计到制造的全链条堵点,推动我国低空飞行器产业向高性能、低成本、大规模快捷制造方向跨越式发展,对提升我国在高端装备制造领域的核心竞争力、保障国防安全与推动低空经济发展具有深远的战略意义。

## 参考文献:

- [1] 张晓兰, 黄伟熔. 低空经济发展的全球态势、我国现状及促进策略[J]. 经济纵横, 2024(8): 53-62.  
ZHANG Xiaolan, HUANG Weirong. Development of low-altitude economy: Global trend, China's current situation, and promotion measures[J]. Economic Review, 2024(8): 53-62.
- [2] 刘先江, 宋丹, 徐政. 以低空经济打造新质生产力发展新引擎[J]. 北京航空航天大学学报(社会科学版), 2024, 37(5): 134-144.  
LIU Xianjiang, SONG Dan, XU Zheng. Creating a new engine for the development of new quality productive forces through low-altitude economy[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences Edition), 2024, 37(5): 134-144.
- [3] 周钰哲. 低空经济发展的理论逻辑、要素分析与实现路径[J]. 东南学术, 2024(4): 87-97.  
ZHOU Yuzhe. Low-altitude economy: Theoretical logic, development elements and path to realization [J]. Southeast Academic Research, 2024(4): 87-97.
- [4] 李牧南, 谢天琪. 中国低空经济发展的实践进路: 依托科技自立自强助力新质生产力形成[J]. 科技管理

- 研究, 2024, 44(17): 1-9.
- LI Munan, XIE Tianqi. The approach of China low-altitude economic development: Relying on science and technology self-reliance to enable the formation of new quality productive forces[J]. *Science and Technology Management Research*, 2024, 44(17): 1-9.
- [5] 宋丹, 徐政. 低空经济赋能高质量发展的内在逻辑与实践路径[J]. *湖南社会科学*, 2024(5): 65-75.
- SONG Dan, XU Zheng. The inner logic and practical strategy of low altitude economy empowering high quality development[J]. *Social Sciences in Hunan*, 2024(5): 65-75.
- [6] 赵晓飞. 复合材料赋能低空经济发展: 对话南昌航空大学材料科学与工程学院教授梁红波[J]. *中国石油和化工*, 2025(7): 20-21.
- ZHAO Xiaofei. Composite materials empower low-altitude economic development: Dialogue with Liang hongbo, a professor at school of materials science and engineering, Nanchang Hangkong University[J]. *China Petroleum and Chemical Industry*, 2025(7): 20-21.
- [7] 郭金磊, 杨爱清, 黄志祥, 等. 三维编织复合材料在航空领域中的应用[J]. *合成纤维*, 2026, 55(2): 64-68.
- GUO Jinlei, YANG Aiqing, HUANG Zhixiang, et al. Applications of 3D woven composites in aerospace [J]. *Synthetic Fiber in China*, 2026, 55(2): 64-68.
- [8] ZHAO Z Y, LI B, MA P B. Advances in mechanical properties of flexible textile composites[J]. *Composite Structures*, 2023, 303: 116350.
- [9] 樊斌, 万亚静, 葛世超, 等. 三维编织复合材料的连接结构对其剪切性能及损伤演变的影响[J]. *热加工工艺*, 2025, 54(16): 159-164.
- FAN Bin, WAN Yajing, GE Shichao, et al. Effect of interlocking architecture on shear properties and damage evolution in 3D braided composites[J]. *Hot Working Technology*, 2025, 54(16): 159-164.
- [10] 韩振宇, 梅海洋, 付云忠, 等. 三维编织预成型体的织造及三维编织复合材料细观结构研究进展[J]. *材料工程*, 2018, 46(11): 25-36.
- HAN Zhenyu, MEI Haiyang, FU Yunzhong, et al. Research progress on preform forming and microstructure of 3D braided composites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2018, 46(11): 25-36.
- [11] 陈波. 三维编织 C/C 复合材料高温力学行为及寿命预测模型研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- CHEN Bo. Research on mechanical behavior and fatigue prediction method of 3D braided carbon/carbon composites at elevated temperature[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [12] 郝欣甫. 高性能纤维复合材料预制品三维编织数字化精确成形技术[J]. *纺织高校基础科学学报*, 2025, 38(6): 18-20.
- CHI Xinfu. Digital precision forming technology for high-performance fiber composite preforms via 3D braiding[J]. *Basic Sciences Journal of Textile Universities*, 2025, 38(6): 18-20.
- [13] 廖文和, 戴宁. 航空航天结构轻量化设计制造技术发展现状与挑战[J]. *南京航空航天大学学报*, 2023, 55(3): 347-360.
- LIAO Wenhe, DAI Ning. Development and challenge of lightweight design and manufacturing technology for aerospace structures[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2023, 55(3): 347-360.
- [14] SUDHIN A, REMANAN M, AJEESH G, et al. Comparison of properties of carbon fiber reinforced thermoplastic and thermosetting composites for aerospace applications[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 24: 453-462.
- [15] ZHANG C, LING Y Q, ZHANG X Q, et al. Ultrathin carbon fiber reinforced carbon nanotubes modified epoxy composites with superior mechanical and electrical properties for the aerospace field[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2022, 163: 107197.
- [16] DRELA M. Low-Reynolds-number airfoil design for the M.I.T. Daedalus prototype—A case study[J]. *Journal of Aircraft*, 1988, 25(8): 724-732.
- [17] 王科雷, 周洲, 甘文彪, 等. 太阳能无人机低雷诺数翼型气动特性研究[J]. *西北工业大学学报*, 2014, 32(2): 163-168.
- WANG Kelei, ZHOU Zhou, GAN Wenbiao, et al. Studying aerodynamic performances of the low-Reynolds-number airfoil of solar energy UAV[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2014, 32(2): 163-168.
- [18] 刘力搏. 基于可变形蒙皮的柔性后缘力学分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- LIU Libo. Mechanical analysis of trailing-edge with morphing skin[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [19] 程春晓, 李道春, 向锦武, 等. 柔性后缘可变形机翼气动特性分析[J]. *北京航空航天大学学报*, 2016, 42(2): 360-367.
- CHENG Chunxiao, LI Daochun, XIANG Jinwu, et al. Analysis on aerodynamic characteristics of morphing wing with flexible trailing edge[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, 42(2): 360-367.
- [20] 杨金, 李麒阳, 季霞, 等. 复合材料编织-缠绕-拉挤系统建模及其控制策略[J]. *纺织学报*, 2023, 44(7): 199-206.

- YANG Jin, LI Qiyang, JI Xia, et al. Modeling and control strategy of composite braidingwinding-pultrusion system[J]. *Journal of Textile Research*, 2023, 44(7): 199-206.
- [21] LI Q Y, JI C C, LI S Y, et al. Predicting the topology of braided structures in arbitrarily composite preforms based on yarn interactions[J]. *Textile Research Journal*, 2024, 94(19/20): 2201-2219.
- [22] KYOSEV Y, KÜHN T. Joining high thickness materials by sewing-first modelling steps of the stitched place[J]. *Applied Composite Materials*, 2022, 29(1): 83-93.
- [23] BISWAS D, BHATTACHARYYA R, RAY C. Stability and dynamic analyses of hybrid laminates using refined higher-order zigzag theory[J]. *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, 2024, 25(6): 406-426.
- [24] TURON A, CAMANHO P P, COSTA J, et al. A damage model for the simulation of delamination in advanced composites under variable-mode loading[J]. *Mechanics of Materials*, 2006, 38(11): 1072-1089.
- [25] TURON A, CAMANHO P P, COSTA J, et al. Accurate simulation of delamination growth under mixed-mode loading using cohesive elements: Definition of interlaminar strengths and elastic stiffness[J]. *Composite Structures*, 2010, 92(8): 1857-1864.
- [26] GHOSH G, DUDDU R, ANNAVARAPU C. A stabilized finite element method for enforcing stiff anisotropic cohesive laws using interface elements[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2019, 348: 1013-1038.
- [27] BARBERO E J, ABDELAL G F, CACERES A. A micromechanics approach for damage modeling of polymer matrix composites[J]. *Composite Structures*, 2005, 67(4): 427-436.
- [28] HALPIN AFFDL J C, KARDOS J L. The Halpin-Tsai equations: A review[J]. *Polymer Engineering & Science*, 1976, 16(5): 344-352.
- [29] TALREJA R, SINGH C V. Multiscale modeling for damage analysis[M]//*Multiscale Modeling and Simulation of Composite Materials and Structures*. Boston, MA: Springer US, 2007: 529-578.
- [30] ZOBEIRY N, REINER J, VAZIRI R. Theory-guided machine learning for damage characterization of composites[J]. *Composite Structures*, 2020, 246: 112407.
- [31] POST A, LIN S Y, WAAS A M, et al. Determining damage initiation of carbon fiber reinforced polymer composites using machine learning[J]. *Polymer Composites*, 2023, 44(2): 932-953.
- [32] KANOUTÉ P, BOSO D P, CHABOCHE J L, et al. Multiscale methods for composites: A review[J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2009, 16(1): 31-75.
- [33] MATOUŠ K, GEERS M G D, KOUZNETSOVA V G, et al. A review of predictive nonlinear theories for multiscale modeling of heterogeneous materials[J]. *Journal of Computational Physics*, 2017, 330: 192-220.
- [34] ZHANG C, WU B W, DANG H Y, et al. Theoretical-numerical integrated multi-scale model for fast prediction of progressive failure in textile composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2025, 271: 111341.
- [35] LIU P, DANG H Y, CAI Y L, et al. Visualization and interpretation of the impact failure behavior of textile composites using a highly efficient Meso-FE model [J]. *Composites Communications*, 2022, 29: 101004.
- [36] LI Q Y, LI C G, CHI X F, et al. Influence of process configuration and mandrel geometry variations on the mechanical behavior of 3D braided composites subjected to quasi-static loads[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2025, 306: 112794.
- [37] CZICHOS R, KRISCHLER R, HERING C, et al. Influence of fiber architecture variations on the mechanical behavior of carbon fiber braids subjected to quasi-static loads[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2025, 292: 112062.
- [38] LI Z J, LIU Z G, WANG Y, et al. Process-structure-performance modelling and progressive damage analysis of 3D rotary-four-directional rectangular braided composites under tensile load[J]. *Materials & Design*, 2023, 225: 111523.
- [39] LI S Y, MENG Z, LI Q Y, et al. Mesoscale modeling and simulation of the influence of carrier arrangement on tensile properties of 3D braided composites [J]. *Thin-Walled Structures*, 2026, 220: 114359.
- [40] MONNOT P, LÉVESQUE J, LABERGE LEBEL L. Automated braiding of a complex aircraft fuselage frame using a non-circular braiding model[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, 102: 48-63.
- [41] 崔博, 阳海棠, 李麒阳, 等. 基于偏心理论的异型构件编织工艺推理方法[J]. *天津工业大学学报*, 2025, 44(2): 1-7.
- CUI Bo, YANG Haitang, LI Qiyang, et al. Braiding process reasoning method for special-shaped components based on off-center theory[J]. *Journal of Tianjgong University*, 2025, 44(2): 1-7.
- [42] MENG Z, YAO L L, BU J Q, et al. Prediction method for offset compensation on three-dimensional man-

- drel with spatial irregular shape[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2021, 50(8): 1205-1224.
- [43] GONG Y K, SONG Z R, NING H M, et al. A comprehensive review of characterization and simulation methods for thermo-stamping of 2D woven fabric reinforced thermoplastics[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 203: 108462.
- [44] ZHOU W, WENTE T, LIU D, et al. A comparative study of a quasi 3D woven composite with UD and 2D woven laminates[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, 139: 106139.
- [45] FUKUTA K, AOKI E, NAGATSUKA Y, et al. Method for formation of three-dimensional woven fabric and apparatus therefor: U.S. Patent 4615256[P]. 1986-10-07.
- [46] KHOKAR N. 3D-weaving: Theory and practice[J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2001, 92(2): 193-207.
- [47] BOGDANOVICH A E. An overview of three-dimensional braiding technologies[M]//*Advances in Braiding Technology*. Amsterdam: Elsevier, 2016: 3-78.
- [48] MARSH G. Aero engines lose weight thanks to composites[J]. *Reinforced Plastics*, 2012, 56(6): 32-35.
- [49] LI M R, LI H, GE J R, et al. A hierarchical multi-scaling method for modeling the mesoscale geometry of 3D woven composite preform with twisted structure [J]. *Composite Structures*, 2025, 354: 118778.
- [50] SUN F F, ZHOU H L, GU L J, et al. General method to digitalize multi-layer woven structure[J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2024, 115(7): 1039-1047.
- [51] FU J H, YUN J, JUNG Y. Filament winding path generation based on the inverse process of stability analysis for non-axisymmetric mandrels[J]. *Journal of Composite Materials*, 2017, 51(21): 2989-3002.
- [52] LI S, MENG Z, ZHANG Y J, et al. Uniform winding path generation for non-axisymmetric mandrels[J]. *Composite Structures*, 2025, 355: 118834.
- [53] 宋清华, 肖军, 文立伟, 等. 热塑性复合材料自动纤维铺放装备技术[J]. *复合材料学报*, 2016, 33(6): 1214-1222.
- SONG Qinghua, XIAO Jun, WEN Liwei, et al. Automated fiber placement system technology for thermoplastic composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33(6): 1214-1222.
- [54] 耿奕, 宁博, 陈吉平, 等. 用于航空复合材料的自动铺丝干纤维层间粘结性能[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(9): 4441-4458.
- GENG Yi, NING Bo, CHEN Jiping, et al. Study on the interlayer bonding property of dry fiber tows used in automated fiber placement for aerospace composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(9): 4441-4458.
- [55] 刘军, 陈俊林, 潘利剑, 等. 国产干纤维自动铺放及其真空辅助成型技术研究[J]. *航空制造技术*, 2025, 68(17): 14-21.
- LIU Jun, CHEN Junlin, PAN Lijian, et al. Automatic placement of domestic dry fibers and its vacuum-assisted molding technology[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2025, 68(17): 14-21.
- [56] GRISIN B, CAROSELLA S, MIDDENDORF P. Dry fibre placement: The influence of process parameters on mechanical laminate properties and infusion behaviour[J]. *Polymers*, 2021, 13(21): 3853.
- [57] 彭公秋, 白钰, 钟翔屿, 等. 干纤维自动铺放液体成型复合材料技术的研究进展[J]. *复合材料科学与工程*, 2024(3): 113-120.
- PENG Gongqiu, BAI Yu, ZHONG Xiangyu, et al. Research progress of dry fiber automatic placement liquid forming composites[J]. *Composites Science and Engineering*, 2024(3): 113-120.
- [58] 申皓, 玛日耶姆·阿卜力米提, 李志辉, 等. Tufting 复合材料预制体成形及数值仿真研究进展[J]. *复合材料学报*, 2024, 41(9): 4701-4719.
- SHEN Hao, ABULIMITI Mariyemu, LI Zhihui, et al. Advances in forming and numerical simulation research of tufted composite preforms[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(9): 4701-4719.
- [59] 梁军, 乔健伟, 葛敬冉. 针刺纤维复合材料单胞模型构建及力学性能研究进展[J]. *强度与环境*, 2023, 50(6): 9-31.
- LIANG Jun, QIAO Jianwei, GE Jingran. Research progress on mechanical properties of needled fiber composites[J]. *Structure & Environment Engineering*, 2023, 50(6): 9-31.
- [60] 党艺旋, 刘希艳, 刘昱君. 复合材料缝合技术的研究进展[J]. *纺织科技进展*, 2021, 43(11): 1-4.
- DANG Yixuan, LIU Xiyan, LIU Yujun. Research progress of composite material suture technology[J]. *Progress in Textile Science & Technology*, 2021, 43(11): 1-4.
- [61] 董九志, 耿争言, 王立文, 等. 复合材料预制体单边缝合技术研究进展[J]. *航空制造技术*, 2022, 65(16): 46-53.
- DONG Jiuzhi, GENG Zhengyan, WANG Liwen, et al. Research progress on one-sided stitching technology for composite preforms[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2022, 65(16): 46-53.
- [62] ZHAO C F, ZHANG Z D, WANG J F, et al. Numerical and theoretical analysis on the mechanical prop-

- erties of improved CP-GFRP splice sleeve[J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 137: 487-501.
- [63] TENG X F, SHI D Q, JING X, et al. Experimental, analytical and numerical investigation on tensile behavior of twisted fiber yarns[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(5): 278-288.
- [64] 季乐. 三维多层缠绕编织复合材料细观结构与力学性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.  
JI Le. Research on micro structure and mechanical properties of 3D multi-layer wrapping braid composites [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [65] 谭俊峰. 异形复合材料预制体单向纤维编织-缠绕协同成型关键技术研究[D]. 上海: 东华大学, 2025.  
TAN Junfeng. Research on key technologies for hybrid braiding-winding forming of complex-shaped composite preforms with unidirectional fibers[D]. Shanghai: Donghua University, 2025.
- [66] 周征西, 单忠德, 孙正, 等. 碳纤维复合材料编织-针刺预制体成形质量研究[J]. *高科技纤维与应用*, 2024, 49(3): 34-43.  
ZHOU Zhengxi, SHAN Zhongde, SUN Zheng, et al. Study on the forming quality of carbon fiber composite braided-punched preforms[J]. *Hi-Tech Fiber & Application*, 2024, 49(3): 34-43.
- [67] 张力. 布带缠绕针刺 C/C 复合材料的制备与性能研究[D]. 西安: 航天动力技术研究院, 2016.  
ZHANG Li. Preparation and properties of needle-punched C/C composites with cloth tape winding[D]. Xi'an: Academy of Aerospace Solid Propulsion Technology, 2016.
- [68] 李玉军, 闫超. 复合材料液体成型技术中的孔隙形成、演化及调控研究进展[J/OL]. *复合材料学报*: 1-16 [2025-11-24]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20251121.003>.  
LI Yujun, YAN Chao. Research progress on void formation, evolution, and control in liquid composite molding technology[J/OL]. *Acta Materiae Compositae Sinica*: 1-16 [2025-11-24]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20251121.003>.
- [69] FACCIOTTO S, SIMACEK P, ADVANI S G, et al. Modeling formation and evolution of voids in unsaturated dual scale preforms in resin transfer molding processes[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2023, 173: 107675.
- [70] CASTRO ARIAS J. X-ray tomographic investigation of resin flow in liquid moulding of composite materials [D]. Madrid, Spain: Universidad Politécnica de Madrid (UPM), 2020.
- [71] 史俊伟, 杨柳, 王文贵, 等. 孔隙对碳纤维/环氧树脂复合材料剪切性能和破坏模式的影响[J]. *复合材料学报*, 2024, 41(9): 5039-5052.  
SHI Junwei, YANG Liu, WANG Wengui, et al. Effects of voids on shear properties and failure mode of carbon fiber/epoxy resin composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(9): 5039-5052.
- [72] 贾振元, 付饶, 王福吉. 碳纤维复合材料构件加工技术进展[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(19): 348-374.  
JIA Zhenyuan, FU Rao, WANG Fuji. Research advance review of machining technology for carbon fiber reinforced polymer composite components[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(19): 348-374.
- [73] 贾振元, 毕广健, 王福吉, 等. 碳纤维增强树脂基复合材料切削机理研究[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(23): 199-208.  
JIA Zhenyuan, BI Guangjian, WANG Fuji, et al. The research of machining mechanism of carbon fiber reinforced plastic[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(23): 199-208.
- [74] SU Y L, JIA Z Y, NIU B, et al. Size effect of depth of cut on chip formation mechanism in machining of CFRP[J]. *Composite Structures*, 2017, 164: 316-327.
- [75] 付饶. CFRP 低损伤钻削制孔关键技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.  
FU Rao. Research of key technologies for low-damage drilling CFRP composites[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [76] JIA Z Y, FU R, NIU B, et al. Novel drill structure for damage reduction in drilling CFRP composites[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, 2016, 110: 55-65.
- [77] LI Y, WANG F J, ZHANG B Y, et al. A novel discrete-edge ball end milling cutter: Suitable for milling weakly rigid curved CFRP parts[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2023, 317: 117996.
- [78] 王岩, 景磊, 刘玉库, 等. 碳纤维树脂基复合材料加工研究进展[J]. *化纤与纺织技术*, 2025, 54(8): 7-9.  
WANG Yan, JING Lei, LIU Yuku, et al. Research progress in processing of carbon fiber resin matrix composites[J]. *Chemical Fiber & Textile Technology*, 2025, 54(8): 7-9.
- [79] 吴永进, 冯治国, 莫宁宁, 等. 铺层、孔径及板厚对 CFRP/Al 抽芯铆接头力学性能与损伤的影响[J/OL]. *复合材料学报*: 1-17 [2026-01-12]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20260112.001>.  
WU Yongjin, FENG Zhiguo, MO Ningning, et al. Influence of layup, aperture and plate thickness on the mechanical properties and damage of CFRP/Al blind riveted joints[J/OL]. *Acta Materiae Compositae*

- Sinica: 1-17 [2026-01-12]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20260112.001>.
- [80] 路鹏程, 王志平, 袁晓光. 碳纤维增强热塑性复合材料感应焊接研究进展[J]. 机械工程学报, 2025, 61(21): 403-426.
- LU Pengcheng, WANG Zhiping, YUAN Xiaoguang. Research progress in induction welding of carbon fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(21): 403-426.
- [81] 都炳智, 胡顺睿, 黄金成, 等. 难加工材料及其薄壁件超声铣削加工研究[J]. 模具工业, 2025, 51(11): 60-68.
- DU Bingzhi, HU Shunrui, HUANG Jincheng, et al. Research on ultrasonic vibration milling for difficult-to-cut material and thin-walled part[J]. Die & Mould Industry, 2025, 51(11): 60-68.
- [82] 石广业. 复合材料曲面罩壳类构件机器人磨抛工艺参数研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2024.
- SHI Guangye. Study on process parameters of robot grinding for composite material curved shell components[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2024.
- [83] BILISIK K. Multiaxis three-dimensional weaving for composites: A review[J]. Textile Research Journal, 2012, 82(7): 725-743.
- [84] WU R, ZENG W L, LI F F, et al. Study on winding forming process of glass fiber composite pressure vessel[J]. Materials, 2025, 18(11): 2485.
- [85] ZHANG J J, WANG L H, GAO R X. Embodied AI: A foundation for intelligent and autonomous manufacturing[J]. Engineering, 2025. DOI: 10.1016/j.eng.2025.12.026.
- [86] LIU H P, GUO D, CANGELOSI A. Embodied intelligence: A synergy of morphology, action, perception and learning[J]. ACM Computing Surveys, 2025, 57(7): 1-36.
- [87] XU G P, CHEN Y J, LIU L, et al. Automatic gripping strategy for package yarn end by composite robot based on RGB-D camera[J]. Textile Research Journal, 2025, 95(15/16): 1937-1955.
- [88] ABDIN Y, GHAEDSHARAF M, LABERGE LEBEL L. An integrated approach toward digital design and simulation of the automated overbraiding process for composite manufacturing[J]. Materials Today Communications, 2024, 41: 110559.
- [89] LI X P, HE X H, LIANG J H, et al. Research status of 3D braiding technology[J]. Applied Composite Materials, 2022, 29(1): 147-157.
- [90] XU C H, ZHENG T, XIE X K, et al. Multimodal sensing-computing devices: Toward a new paradigm for embodied intelligence[J]. Materials Today, 2026, 93: 103223.
- [91] JIANG L X, XIAO S, YANG B, et al. Finite element analysis of tensile properties for the single-strap butt joint of a carbon fiber reinforced composite[J]. Computing in Science & Engineering, 2019, 21(3): 42-50.
- [92] ALOTAIBI M S. Optical and mechanical characterization of spliced carbon fibre composites[D]. Sheffield, UK: University of Sheffield, 2024.

(编辑: 胥橙庭)