

碳纤维增强复合材料安全关键部件的径向编织自动化成型研究

邓玉娟¹, 姚彬启², 倪惠芳², 姜晓云², 余猛钢², 毛海军³

¹衢州职业技术学院机电工程学院, 浙江 衢州

²衢州市荣胜环保科技有限公司, 浙江 衢州

³浙江管卫建设有限公司, 浙江 衢州

收稿日期: 2025年9月12日; 录用日期: 2025年11月3日; 发布日期: 2025年11月14日

摘要

在汽车工业向电动化、智能化转型背景下, 轻量化是解决续航里程焦虑、提升整车能效及动态性能的核心路径, 碳纤维增强复合材料(CFRP)是实现目标的关键材料。本文聚焦两类对结构可靠性要求高的CFRP关键部件: 轮圈与高压储氢气瓶。轮圈轻量化对车辆NVH和操控稳定性影响大, 储氢气瓶结构完整性关乎整车安全。但传统手工叠层工艺效率低、质量一致性差, 制约了高性能复合材料部件规模化应用。本文从高级研发工程师视角, 剖析碳纤维轮圈市场驱动力与制造瓶颈, 阐述复合材料径向编织自动化预成型技术原理与优势, 结合轮圈开发实例, 探讨该技术作为平台化制造工艺在推动安全关键部件产业化中的应用潜力与未来挑战, 为探究复合材料部件失效机理与防护技术提供制造端参考。

关键词

碳纤维, 轻量化, 复合材料, 自动化, 失效机理

Research on Automated Radial Braiding Forming of Carbon Fiber Reinforced Composite Safety-Critical Components

Yujuan Deng¹, Binqi Yao², Huifang Ni², Xiaoyun Jiang², Menggang Yu², Haijun Mao³

¹School of Mechanical and Electrical Engineering, Quzhou College of Technology, Quzhou Zhejiang

²Bozhou Rongsheng Environmental Protection Technology Co., Ltd., Quzhou Zhejiang

³Zhejiang Guanwei Construction Co., Ltd., Quzhou Zhejiang

文章引用: 邓玉娟, 姚彬启, 倪惠芳, 姜晓云, 余猛钢, 毛海军. 碳纤维增强复合材料安全关键部件的径向编织自动化成型研究[J]. 纳米技术, 2025, 15(4): 101-108. DOI: 10.12677/nat.2025.154011

Abstract

Against the backdrop of the automotive industry's transition toward electrification and intelligence, lightweighting has emerged as a core pathway to address range anxiety, enhance vehicle energy efficiency, and improve dynamic performance. Carbon fiber reinforced composites (CFRP) serve as a critical material in achieving these goals. This study focuses on two types of CFRP safety-critical components with high reliability requirements: wheel rims and high-pressure hydrogen storage tanks. Lightweight wheel rims significantly impact vehicle NVH (Noise, Vibration, and Harshness) and handling stability, while the structural integrity of hydrogen storage tanks is vital for overall vehicle safety. However, traditional manual layup processes suffer from low efficiency and inconsistent quality, hindering the large-scale application of high-performance composite components. From the perspective of a senior R&D engineer, this paper analyzes market drivers and manufacturing bottlenecks for carbon fiber wheel rims, elucidates the principles and advantages of automated radial braiding preforming technology for composites, and explores its potential as a platform manufacturing process in industrializing safety-critical components through case studies on wheel rim development. The study also discusses future challenges and provides manufacturing-side insights for investigating composite component failure mechanisms and protective technologies.

Keywords

Carbon Fiber, Lightweighting, Composites, Automation, Failure Mechanism

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

全球范围内的汽车产业正在经历一场前所未有的深刻变革，这场变革主要由“能源转型”和“环境保护”这两大核心驱动力共同推动。在这样的背景下，纯电动汽车(Battery Electric Vehicle, BEV)以及氢燃料电池汽车(Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV)的市场渗透率正在以惊人的速度持续攀升。然而，在这两类新能源汽车的发展进程中，一个共同的技术难题逐渐显现出来，那就是能量储存单元所带来的额外质量问题。对于纯电动汽车而言，动力电池系统是其核心的能量储存装置；而对于氢燃料电池汽车来说，高压储氢系统则承担着同样的功能。这些能量储存单元的质量增加，成为了制约两类车型性能提升的重要因素。因此，轻量化设计成为了提升汽车续航里程、优化整车动态性能的关键所在，可以说是势在必行。在此发展态势下，国际上处于前沿领域的研究已经将关注的重点转向了自动化制造技术，例如自动纤维铺放(Automated Fiber Placement, AFP) [1]、三维编织等先进技术[2]，并且结合多尺度数值模拟手段，深入探究汽车部件在冲击、爆破、火烧等多种物理场耦合作用下的损伤演化过程与失效机理。在国内，相关研究也在重大科研项目的引领下加速推进，力求构建起从自动化制造到精准化性能预测与安全评估的完整技术体系。

在众多研究对象中，碳纤维轮圈和 IV 型储氢气瓶因其对轻量化与结构安全有着双重极端需求而备受

瞩目,成为最具代表性的研究对象[3][4]。碳纤维轮圈作为簧下质量的核心组成部分,其轻量化程度直接影响车辆的整体性能。而IV型储氢气瓶作为储氢系统的关键部件,其重要性更是不言而喻。然而,这两类部件的产业化进程长期以来一直受到传统手工叠层工艺在效率、成本与质量一致性方面根本性瓶颈的制约。这种制约不仅阻碍了部件的规模化应用,而且由于传统工艺固有的不确定性,为精确分析部件在极端载荷下的失效机理带来了巨大的挑战。从工程学的角度来看,新能源汽车的轻量化并不仅仅是简单的减轻重量,更是一种系统性的优化过程。以电动汽车为例,降低整备质量能够直接减少驱动车辆所需的能量,从而在不增加电池容量的前提下有效提升续航里程。根据车辆动力学原理,簧下质量(如轮圈、制动系统等)的降低,能够显著减小车轮在通过不平路面时所产生的惯性力。这样一来,悬架系统就能够更有效地吸收来自路面的冲击,进而改善车辆的乘坐舒适性(Noise, Vibration, and Harshness, NVH)与操控响应速度,提升车辆的抓地力,使操控更加精准。对于氢燃料电池汽车而言,轻量化的意义显得尤为关键。氢气虽具备极高的能量密度,但其体积能量密度较低,因而需借助高压方式将其储存于大体积的气瓶中。如今,氢能等领域的应用愈发广泛。当前,储气瓶大多采用金属或金属内胆复合材料增强结构。高密度聚乙烯(HDPE)塑料内胆凭借优异的耐腐蚀性、突出的密封性能以及较低的成本,在低压储气场景中优势显著。随着储气压力的提升,复合材料层必须大幅增厚才能满足承载需求,传统缠绕工艺与固化制度面临严峻挑战。大厚度结构固化时,树脂自放热会使内部温度梯度加剧,若超过HDPE内衬维卡软化温度(122°C),会引发内衬蠕变或泄漏,威胁储气安全。因此,气瓶的轻量化直接关系到氢燃料电池汽车的整车质量和续航能力。更为重要的是,气瓶在充放氢循环、车辆碰撞、甚至火灾等极端情况下必须确保结构的完整性,其安全性能是车辆设计的核心考量因素。任何微小的制造缺陷都有可能引发灾难性的后果[5]。所以,自动化、高精度、高效率的制造技术,是解决这些挑战的根本途径。如表1所示,在各项车辆组件的应用当中,使用传统轮圈的车轮其质量占比达全车重量的8%~9%,身为车辆唯一与地面接触的零件,同时也是簧下荷重(包括车轮、悬吊摇臂、煞车系统)的主要部分,轮胎与轮圈的减重对于节能与性能提升的效果都非常明显,车轮的转动惯量对车辆性能有着非常直接的影响,加上又属于车辆外观上最容易凸显风格与质感的部分,因此各种轻量化的轮圈产品很早便被市场所接受,从最早期的铁圈加盖、铸造铝圈、锻造铝圈、多片式复合材质乃至单体是全碳轮圈等设计均逐步朝更高强度且轻量的设计进行发展。

在全球汽车产业面临电动化与智能化浪潮的背景下,轻量化和高安全性已成为核心竞争要素。碳纤维增强复合材料(CFRP)凭借其优异的比强度和比模量,在安全关键部件(如轮圈、防撞梁)的应用中展现出巨大潜力。然而,传统的手工铺层或半自动化工艺难以保证复杂几何结构部件的质量一致性和生产效率,限制了CFRP在汽车领域的大规模应用。因此,开发一种高效、自动化、适用于复杂安全件制造的成形技术势在必行。

目前,制造复杂CFRP部件的自动化技术主要包括自动铺放(AFP)、纤维缠绕(Filament Winding)以及本研究聚焦的径向编织技术。AFP(Automated Fiber Placement)技术在大型、曲率变化小的结构上表现出色,能够精确控制纤维走向,但其设备昂贵、对复杂曲面铺放易产生褶皱、且生产效率相对较低。缠绕技术(Filament Winding)适用于具有旋转对称性的简单几何体,例如压力容器或驱动轴,但在处理汽车轮圈等非对称、变截面、带有开口的复杂结构时,纤维路径规划难度大,且难以实现真正意义上的三维空间预成形。

相较于上述技术,自动化径向编织技术能够高效、快速地将纤维以互锁的三维结构(如三向、四向甚至多向结构)进行预成形,其纤维连续性、抗分层性能和冲击韧性得到显著提升,这对于汽车安全关键部件至关重要。本文将探讨在汽车产业转型背景下,采用自动化径向编织技术制造碳纤维增强复合材料安全关键部件的必要性与可行性,并着重阐述其在轮圈制造中的技术创新性和工程应用意义。

Table 1. Basic information of typical new energy passenger vehicles
表 1. 典型新能源乘用车基本信息

车辆基本信息		参数	
外廓尺寸长(mm)	4765	是否允许外接充电	是
外廓尺寸宽(mm)	1837	纯电动模式下续驶里程(km)	120
外廓尺寸高(mm)	1495	排量/功率(ml/kW)	1498/81
总质量(kg)	1995	条件 A 试验电能消耗量(kW·h/100 km)	15.3
整备质量(kg)	1620	燃料消耗量(L/100 km, B 状态)	3.80
最高车速(km/h)	185	储能装置种类	磷酸铁锂蓄电池
燃料种类	汽油/电混合动力	驱动电机类型	永磁同步电机
		驱动电机峰值功率/转速/转矩(kW/(r/min)/N·m)	145/16,000/325

2. 市场发展现状

全球复合材料市场正处于高速增长期，尤其是在汽车领域，以 Koenigsegg、保时捷等为代表的顶级车型已成功应用碳纤维轮圈，验证了其极致的减重潜力[6][7]。然而，其高昂的制造成本与传统手工叠层(Hand Lay-up)工艺的深层瓶颈，构成了市场扩张的主要障碍。该工艺高度依赖人工，其根本性制约体现在四个方面：首先，工艺的随机性导致成品纤维体积分数、铺层角度与固化质量难以精确控制，造成力学性能的显著离散，直接干扰了对高应变率及多物理场耦合下失效行为的规律性认知；其次，复杂的铺贴工时与极低的生产效率无法满足汽车行业大规模、快节奏的生产需求；再次，预浸料的裁剪与铺放过程产生大量废料，材料利用率通常低于 70%；最后，对于轮辐与轮辋交汇处、储氢气瓶封头等复杂三维曲面，手工铺贴难以精确实现优化的纤维路径，限制了结构性能的发挥。因此，开发自动、高效、高质量的制造技术，是推动碳纤维关键部件产业化并支撑其失效机理深入研究的唯一出路[8] [9]。

传统手工叠层工艺的制约不仅体现在宏观的效率与成本上，更深层次地影响了产品的微观结构与性能。由于纤维束在手工铺贴过程中难以完全平顺地贴合复杂曲面，常常导致纤维起皱、气泡夹杂或树脂富集区域的出现，这些微观缺陷在服役过程中往往成为应力集中的源头。特别是在受到反复交变载荷(如轮圈在行驶过程中的动态载荷)或极端冲击载荷(如车辆碰撞)时，这些缺陷会加速损伤的萌生与扩展，极大地降低了部件的疲劳寿命和极限承载能力。此外，对于高压储氢气瓶，其纤维缠绕层需要承受高达 70 MPa 或更高的高压，任何微小的纤维错位或缠绕不均都可能导致局部应力峰值，从而成为潜在的爆破隐患[10] [11]。这使得传统工艺制造的产品在质量稳定性上存在天然的缺陷，也使得对其在多物理场(如压力、温度、冲击)耦合作用下的失效模式进行科学、可重复的实验分析变得异常困难[12] [13]。因此，自动化制造技术，尤其是能够构建连续、无接头纤维骨架的三维编织技术，成为解决这一根本性矛盾的关键突破口。

3. 核心技术

在众多自动化工艺中，三维编织技术通过多束纱线按预定轨迹相互穿插、交缠，形成一个整体的、连续的纤维网络结构。其独特的优势在于，纤维束在厚度方向(Z 向)形成机械互锁，赋予了结构优异的抗分层、抗冲击损伤容限，这对于承受动态冲击的轮圈与抵抗疲劳及极限内压的储氢气瓶至关重要。传统的平行式编织机(Maypole Braider)多用于制造恒定截面产品，而径向式编织机(Radial Braider)的革命性在于其所有线轴载体均径向朝向编织中心，避免了对宽扁碳纤维束的扭转损伤，从而能够平顺地贴合在轮

圈、气瓶封头等复杂变截面回转体内模表面，实现了几何构型的精确复现。

实现高质量编织预成型体的核心在于对关键工艺参数的精确调控，这包括通过设定线轴排列与运动速度比精确控制纤维的编织样式与角度；通过基于数学模型的精密计算对纤维覆盖率进行预测与控制，消除因缝隙导致的应力集中；以及通过伺服反馈系统对各纱束进行独立的张力闭环控制，以保证预成型体的几何精度、内部密实度及后续树脂浸润的均匀性。其中，纤维编织的理论模型是实现自动化控制的基础，例如，可以通过以下公式来预测编织覆盖率与角度：

$$\text{Percent Braid Coverage} = (2F - F^2) \times 100\% \quad (1)$$

$$F = \frac{N \times P \times d}{\sin(\alpha)} \quad (2)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{2\pi \times (D + 2d) \times P}{C} \right] \quad (3)$$

其中， F 为编织系数， N 为纱线根数， P 为编织节距， d 为纤维束直径， α 为编织角度， D 为编织芯模直径， C 为编织机线轴周长。通过对这些参数的精确控制，能够理论上预测并实现最优的纤维编织结构。径向编织技术通过其独特的机械结构设计，能够克服平行式编织机在制造非恒截面复杂曲面时遇到的技术障碍。在轮圈制造中，轮辋与轮辐的过渡区域具有显著的几何变化，手工铺贴难以确保纤维连续性，而径向编织机则能通过线轴载体的协同运动，实现纤维束的精确路径规划与铺设，从而形成一个无缝隙、一体化的整体预成型体。这种一体化结构从根本上杜绝了分层风险，显著提升了轮圈的抗冲击能力与疲劳寿命。对于高压储氢气瓶而言，其半球形封头部分是应力集中的关键区域，径向编织技术能够实现纤维在封头处的精确缠绕，确保应力在纤维骨架中的均匀分布，为气瓶的极端安全性能提供了可靠保障。

3.1. 复杂几何特征的工艺参数优化与分区控制策略

汽车轮圈在轮辋、轮辐和安装面等区域具有显著的变曲率和变厚度特征。传统的统一参数编织无法适应这些变化，容易导致纤维堆叠不均或张力集中。为此，本研究提出了基于有限元分析(FEA)的工艺参数优化方法和分区控制策略：

参数优化：通过耦合编织角、牵引速度和纱线张力等关键参数，并结合结构力学分析，确定不同区域的最佳编织参数组合。

分区控制：将轮圈预成形过程划分为轮辋内区、轮辐过渡区和轮毂安装区三个主要区域。针对每个区域的几何特点，实时调整编织机台的牵引速度曲线和编织频率，实现纤维体积含量的精准分区控制，确保过渡区域的纤维连续性和紧密性。

3.2. 关键子系统的技术描述

为实现高精度、高稳定性的自动化编织，开发并集成了两个核心子系统：

机器人协同路径规划系统：针对径向编织机固定工作台的限制，采用六自由度工业机器人作为外部牵引系统。该系统利用逆运动学模型和预成形体表面几何模型，实时生成并调整机器人的协同路径轨迹。此路径规划不仅保证了预成形体在编织过程中的均匀受力，而且确保了复杂曲率处的纤维沿设计路径铺设，极大地提高了复杂形状部件的成形能力。

多通道纱线张力闭环控制系统：编织过程中，数十股乃至上百股纱线的张力一致性是保证产品质量的决定性因素。本系统采用高精度张力传感器实时监测每一路纱线的瞬间张力，并通过高响应速度的电磁制动器进行闭环反馈调节。该系统可以精确控制各通道张力在设定值 $\pm 5\%$ 范围内波动，有效避免了因张力不均导致预成形体纤维错位、孔隙率增大和力学性能分散的问题。

4. 开发实例与性能验证

4.1. 碳纤维轮圈开发实例概述

为验证径向编织技术在复杂汽车关键部件制造中的工程可行性与技术优势，团队基于 160 股大型环形径向编织设备(图 1)，开展了从数字化设计到实体样件的全流程工艺开发。该验证工作以系统工程方法展开，首先通过有限元分析(FEA)模拟轮圈在关键工况下的应力分布，定义纤维结构需求；继而将 CAE 分析结果转化为编织机的可执行工艺参数，并开发了与之匹配的可溶性内模。在制造阶段，通过机器人与编织机的协同运动，实现了对复杂轮圈外形的自动化、高精度包覆编织。最后，将干燥纤维预成型体置于闭合模具中，采用树脂传递模塑(RTM)工艺完成树脂注射与高温固化。

该工艺验证取得了显著成果：与传统工艺相比，自动化编织将单个预成型体的制造时间缩短至 1 小时以内，同时净尺寸成型使材料利用率提升至 95%以上，展现了巨大的成本与效率优势。更为关键的是，自动化控制确保了纤维架构的高度重复性与一致性，这为后续开展稳定、可靠的部件级性能测试与失效机理分析提供了高质量的研究样本，并验证了此平台化技术体系向 IV 型储氢气瓶等其他中空回转体部件迁移的可行性。在具体的工艺实施中，针对轮圈的轮辋、轮辐以及中心盘等不同区域的受力特点，设计了不同的纤维编织角度与密度。例如，在承受径向冲击的轮辋区域，采用了相对密集的编织，以增强其抗冲击韧性；而在承受扭矩传递的轮辐区域，则重点优化了纤维的斜向铺设，以最大化其抗扭刚度。通过这种局部优化与整体一致性相结合的策略，成功制造出性能卓越的轮圈样件。后续的疲劳测试与冲击测试结果表明，径向编织轮圈在承载能力和寿命上均远超传统工艺制造的轮圈，其失效模式也更具可预测性，这为深入研究 CFRP 部件在极端载荷下的损伤演化规律提供了坚实的数据基础。

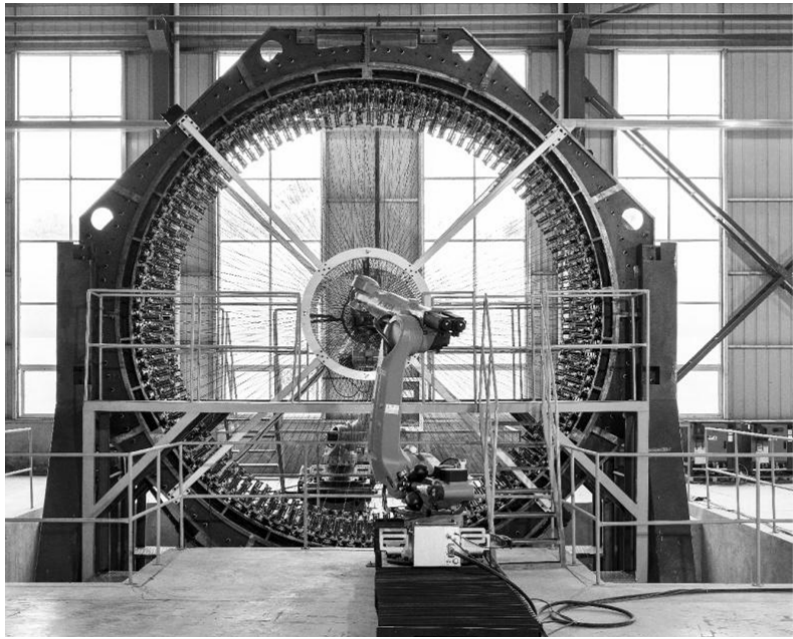


Figure 1. Composite radial weaving equipment
图 1. 复材径向编织设备

4.2. 性能验证

为定量评估(如表 2 所示)自动化径向编织 CFRP 轮圈的工程应用可行性和性能优势，本文进行了严格的力学性能对比测试。测试对象包括：采用径向编织技术制造的 CFRP 轮圈(试样 A)、相同几何尺寸的手

工叠层 CFRP 轮圈(对照品 B)，以及标准铝合金轮圈(对照品 C)。所有 CFRP 试样均采用相同的树脂体系和固化工艺。

Table 2. Comparison of test results
表 2. 测试结果对比

性能指标	测试标准	径向编织 CFRP 轮圈(A)	手工叠层 CFRP 轮圈(B)	铝合金轮圈(C)	标准差(A)
径向疲劳寿命(万次)	SAE J328	45.2 ± 3.1	28.5 ± 2.5	35.0 ± 1.8	3.1
13°冲击吸收能量(J)	VIA 国际标准	1450 ± 80	1100 ± 65	950 ± 50	80
极限弯矩(N·m)	行业自定义	16500 ± 120	13800 ± 100	10500 ± 80	120
失效率(%)	综合	5.0%	12.5%	3.0%	—

径向编织轮圈(A)在径向疲劳测试中主要表现为基体微裂纹扩展和纤维小范围断裂，但由于三维互锁结构提供的有效桥联效应，裂纹扩展速度慢，且未发生灾难性的宏观分层失效。而在冲击吸收能量测试中，径向编织件展现出更优秀的渐进式损伤特性，能量主要通过纤维/纤维和纤维/基体间的摩擦、小股纱线的拉出与断裂进行耗散。

相比之下，手工叠层件(B)的失效模式则以沿层间界面的分层和脆性断裂为主，这是其疲劳寿命和冲击性能较低的主要原因。铝合金轮圈(C)则在极限载荷下表现为塑性变形后断裂。

通过上述性能验证，证明自动化径向编织 CFRP 轮圈在关键力学性能上，尤其是疲劳寿命和冲击吸收能量方面，均显著优于手工叠层件，并在部分指标上超越了铝合金对照品，充分展现了该技术在汽车安全件应用中的技术优势和可行性。

5. 结束语

本研究系统阐述了复合材料径向编织技术在应对新能源汽车轻量化与结构安全双重挑战中的核心作用。研究表明，相较于传统手工叠层工艺，径向编织技术凭借其自动化、高效率及对复杂构型的高适应性，为碳纤维轮圈、高压储氢气瓶等安全关键部件的制造提供了突破性的解决方案。工业技术研究院的开发实例进一步验证了该技术在提升生产效率、降低成本及保证产品质量一致性方面的巨大潜力，为该类部件的产业化奠定了坚实的工艺基础。然而，为推动该技术的规模化应用并支撑深度的安全科学研究，未来仍需应对若干挑战，包括通过开发快速固化树脂体系以缩短整体制造节拍；集成基于机器视觉的在线质量监控系统以实现零缺陷生产；建立完善的部件性能验证标准体系，特别是针对高应变率冲击、火灾等极端载荷下的失效边界与模式进行系统性研究；并最终构建完整、稳健的本土化供应链。解决上述问题，将使径向编织技术不仅能推动轻量化部件的普及，更能为制造下一代更安全、更可靠的新能源汽车提供关键技术支撑。未来，该技术有望与增材制造(3D 打印)等新兴工艺深度融合，实现复杂几何部件的快速原型制造与定制化生产，进一步拓展其在航空航天、医疗器械等高端制造领域的应用。同时，基于海量制造数据与性能测试结果，结合机器学习与人工智能技术，有望建立部件性能的“数字孪生”模型，实现对部件服役寿命的精准预测与健康监测，从而从根本上提升 CFRP 部件的可靠性与安全性。

基金项目

衢州市科技攻关项目(2024K188)资助。

参考文献

[1] 柯映林, 曲巍巍, 李江雄, 等. 碳纤维复合材料结构件自动铺放技术与装备研究进展[J]. 机械工程学报, 2023,

- 59(20): 401-435.
- [2] 曹忠亮, 郭登科, 林国军, 等. 碳纤维复合材料自动铺放关键技术的现状与发展趋势[J]. 材料导报, 2021, 35(21): 21185-21194.
- [3] 叶辉, 刘畅, 闫康康. 纤维增强复合材料在汽车覆盖件中的应用[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(2): 417-425.
- [4] 张为军, 薛忠民, 王欣, 等. 纤维增强复合材料典型应用与前景展望[J]. 复合材料科学与工程, 2024(S1): 30-37.
- [5] 孔祥宇, 胡始弘, 康济川, 等. 氢动力船加注过程高压氢气泄漏数值模拟[J]. 太阳能学报, 2024, 45(3): 298-304.
- [6] 王峰, 张家辉, 等. 用于汽车轻量化领域的碳纤维增强尼龙 66 复合材料的制备与研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(7): 101-104.
- [7] 苑之童, 李寅萱, 李明鹏, 等. 纤维含量对汽车内饰用夹层结构植物纤维增强 PP 复合材料性能的影响[J]. 塑料工业, 2024, 52(5): 140-146.
- [8] 曹丰, 曾志勇, 黄建, 等. 连续纤维增强复合材料的 3D 打印工艺及应用进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2023, 53(11): 1815-1833.
- [9] 杨磊, 周磊, 林宇东, 等. 激光增材制造连续碳纤维增强复合材料[J]. 机械工程学报, 2023, 59(19): 411-428.
- [10] 张登祥, 曾喆, 吴斐. CAES 储气库衬砌用 HTCC 力学性能及增韧机理研究[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2024, 25(1): 22-31.
- [11] Tang, W., He, L., Hui, X., Xu, Y., Yang, R., Liu, Y., *et al.* (2025) A Real-Time Optimization Method for Thermo-Chemical Coupled Curing Process of Composites with LSTM Network. *Journal of Manufacturing Processes*, **138**, 90-99. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2025.01.072>
- [12] Goncalves, P.T., Arteiro, A. and Rocha, N. (2023) Micro-Mechanical Analysis of the Effect of Ply Thickness on Curing Micro-Residual Stresses in a Carbon/Epoxy Composite Laminate. *Composite Structures*, **319**, Article ID: 117158. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117158>
- [13] Azeem, M., Ya, H.H., Alam, M.A., Kumar, M., Stabla, P., Smolnicki, M., *et al.* (2022) Application of Filament Winding Technology in Composite Pressure Vessels and Challenges: A Review. *Journal of Energy Storage*, **49**, Article ID: 103468. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103468>