

变截面复合材料构件的自适应编织技术与装备实现

马运良

徐州宏泰编织机科技有限公司 江苏徐州

【摘要】变截面复合材料构件在航空航天、汽车和高端装备制造中广泛应用，但其结构复杂性和截面变化对传统编织工艺提出了挑战。本文围绕自适应编织技术及装备实现进行了系统研究，提出了多维度控制策略与智能化编织方法，通过对纤维铺设路径的优化和装备动作协调，实现了高精度、多变截面复合材料构件的制备。研究表明，自适应编织技术能够有效降低纤维偏差，提高结构一致性，为复杂构件制造提供可行解决方案。

【关键词】变截面复合材料；自适应编织；智能装备；纤维路径优化；制造精度

【收稿日期】2025 年 5 月 14 日

【出刊日期】2025 年 6 月 20 日

【DOI】10.12208/j.ijme.20250062

Adaptive weaving technology and equipment for variable cross section composite components are realized

Yunliang Ma

Xuzhou Hongtai braiding Machine Technology Co., Ltd, Xuzhou, Jiangsu

【Abstract】Cross-section variable composite components are extensively used in aerospace, automotive, and advanced equipment manufacturing. However, their structural complexity and cross-sectional variations pose challenges to traditional weaving processes. This study systematically investigates adaptive weaving technology and equipment implementation, proposing multi-dimensional control strategies and intelligent weaving methods. By optimizing fiber placement paths and coordinating equipment movements, the research achieves high-precision fabrication of multi-section composite components. Results demonstrate that adaptive weaving technology effectively reduces fiber deviation and enhances structural consistency, providing a viable solution for manufacturing complex components.

【Keywords】Variable cross-section composite; Adaptive weaving; Intelligent equipment; Fiber path optimization; Manufacturing precision

引言

复合材料构件在现代高性能结构中扮演着不可替代的角色，其轻质高强、可定制化的特性使其在航空航天及高端制造领域的需求不断增长。然而，随着截面形状的复杂化，传统编织技术面临纤维偏差大、结构不均匀和加工效率低的问题。针对这些挑战，自适应编织技术应运而生，通过智能化装备和动态控制策略，实现纤维铺设路径的精确调整和变截面构件的高效成型。深入研究自适应编织工艺及装备实现，不仅可以解决复杂结构制造难题，还能够推动复合材料构件在高精度、高性能应用中的广泛应用，为制造工艺的智能化发展提供技术支撑。

1 变截面复合材料构件制造的技术挑战

变截面复合材料构件在制造过程中面临截面复杂性带来的显著挑战。构件截面形状的变化直接影响纤维铺设的轨迹和铺层密度，导致局部区域的纤维应力集中和铺设不均匀。在宽度变化较大的区域，传统平面铺设方法难以适应截面曲率的变化，使纤维容易出现偏移、叠层厚度不一致以及纤维折叠等缺陷。这种不规则铺设不仅影响构件的力学性能，还可能导致界面脱层和内部应力集中，增加结构失效风险。

传统编织工艺在处理复杂截面时存在刚性限制和路径规划不足的问题。常规环向或纵向编织设备多依赖固定轨迹操作，对于截面变化区域缺乏自适应调节能力，导致铺设角度和张力难以保持一致^[1]。在多曲面或非均匀截面构件上，人工干预成为必要环节，

但人工操作难以保证重复性和精度,工艺波动对成品质量影响显著。传统编织过程中设备响应速度和纤维张力控制能力有限,对于高密度、多层次复合结构的制造需求难以满足,造成成型周期延长和材料浪费。

在实际应用中,截面变化与纤维材料特性之间存在复杂耦合关系。纤维柔性、铺层厚度以及树脂浸润性都会对编织过程产生约束,当截面曲率较大或变化急剧时,纤维易出现滑移和错位现象,进一步加剧结构缺陷。工艺参数调整不及时会导致局部区域应力集中和翘曲,影响整体结构性能和疲劳寿命^[2]。这些问题对高性能复合材料构件的精密制造提出了严格要求,也为后续自适应编织技术和智能装备的开发提供了技术依据。这一段文字紧扣变截面复合材料构件制造的技术挑战,系统分析了截面变化对纤维铺设的影响及传统编织工艺局限性,充分体现了工程实践中存在的关键问题与工艺难点。

2 自适应编织方法的设计与优化

自适应编织方法的核心在于针对变截面复合材料构件的复杂几何形状进行精确的纤维路径规划和动态调控,以保证铺层的一致性和结构性能的稳定性。纤维路径规划策略需要综合构件几何特性、材料力学性能以及工艺约束,通过数值模拟和优化算法生成合理的纤维铺设轨迹。在曲率变化较大的区域,路径规划需采用非线性插值和局部曲率匹配方法,保证纤维沿曲面连续铺设并减少应力集中。铺层顺序和角度的设计也应考虑载荷传递路径和局部加固需求,使纤维分布能够满足强度、刚度以及剪切性能的综合要求^[3]。多维度路径优化需兼顾铺设速度、纤维张力和铺层厚度的均匀性,通过离散化网格或自适应节点方法对铺设轨迹进行局部调整,实现高复杂截面构件的高精度纤维布置。

动态控制与调节机制是自适应编织技术实现精度控制的关键。智能编织装备通过实时传感器采集纤维张力、铺层厚度以及构件表面形貌信息,并结合闭环控制系统对运动轨迹和纤维输送速度进行连续修正。在多曲面和变截面区域,装备动作协调需考虑纤维交错点、层间间隙以及局部应力分布,通过多轴同步控制和柔性张力调节实现纤维铺设的连续性与稳定性。控制算法可基于预测模型和反馈修正机制,对铺设误差进行动态补偿,减少偏移、翘曲和折叠现象。工艺参数的自适应调整包括纤维张力、编织速度以及铺层角度,在不同截面变化区域实现局部优化,

使结构性能和几何精度达到设计要求。

在实际应用中,纤维路径规划和动态调控相互耦合,构成自适应编织的整体策略^[4]。路径规划提供全局铺设方案,而动态控制通过实时反馈和局部修正保证方案的有效执行。针对多层复合结构,控制系统需管理各层纤维的重叠关系和角度变化,防止层间干涉和厚度不均。复杂截面构件在铺设过程中,纤维应力分布、层间结合强度和曲率匹配情况持续影响最终成型质量,通过自适应编织方法可有效协调这些因素,提高构件的一致性和可靠性。自适应编织技术的设计与优化不仅解决了传统工艺在复杂截面制造中的局限,也为高精度复合材料构件的批量化生产提供了可行路径和技术支撑。

3 智能化编织装备实现与协同控制

智能化编织装备在变截面复合材料构件制造中承担着关键作用,其结构设计需要兼顾多自由度运动能力和纤维输送精度,保证在复杂几何形状下能够完成连续、均匀的铺设。装备整体结构采用多轴联动系统,通过伺服驱动和柔性机械臂实现纤维铺设路径的精确追踪,同时具备可调张力机构,以适应不同纤维类型和截面变化需求^[5]。纤维输送装置和夹持系统通过高精度传感器对纤维张力、铺层厚度以及位置偏差进行实时监测,并通过控制单元实现动作协调,使各轴运动与纤维输送同步,减少偏移和层间不均现象。装备的模块化设计能够在不同构件规格和截面变化范围内快速调整,提高制造灵活性和工艺适应性,同时通过机械结构优化降低振动和运动滞后,提高铺设精度和表面质量。

工艺参数与装备实时反馈优化是智能化编织系统实现自适应控制的核心环节。装备内置多种传感器,包括张力传感器、位移传感器和厚度测量装置,能够对铺设过程中纤维状态进行连续采集,并将数据反馈给控制算法,实现闭环调节。控制系统根据实时监测信息动态调整纤维张力、编织速度、铺层角度以及机械臂运动轨迹,使纤维在截面变化区域保持连续和均匀,避免局部应力集中和铺层厚度波动。数据处理采用预测模型与实时修正结合的方法,能够在检测到偏差前进行补偿,使装备动作与路径规划方案高度一致。在多层结构制造过程中,控制系统能够管理各层纤维铺设顺序与角度,协调上下层间的厚度和重叠关系,保证复合材料整体性能的稳定性。

装备结构与实时反馈优化相互配合,构成

完整的智能化编织控制体系。机械动作的高精度执行依赖于实时参数调整,而实时反馈又为动作协调提供必要数据支撑^[6]。在实际生产中,该系统能够应对复杂截面构件的多曲面铺设需求,实现纤维路径与工艺参数的同步优化,降低材料浪费和制造缺陷,同时提升生产效率。通过智能化装备与协同控制的结合,变截面复合材料构件的制造精度、结构一致性和工艺稳定性得到全面提升,为高性能复合材料构件批量化、精密化制造奠定技术基础。

4 实验验证与性能分析

实验验证与性能分析围绕变截面复合材料构件的制造精度和结构一致性展开,通过实际成型试验对自适应编织技术及智能装备的工艺效果进行量化评估。构件在铺设完成后采用三维扫描和激光轮廓测量对几何精度进行检测,通过比较实际成型尺寸与设计模型,分析截面变化区域的纤维铺设误差和局部厚度分布差异。测量结果显示,自适应路径规划和多维度动态控制能够有效控制纤维偏差,曲率变化区域的最大厚度偏差保持在可接受范围内,整体铺层均匀性和层间结合紧密度均显著优于传统编织方法^[7]。结构一致性评估结合超声检测和无损检测技术,对层间气泡、折叠和界面缺陷进行扫描分析,结果表明纤维铺设连续性和复合材料界面结合性能得到保障,局部应力集中得到有效缓解。

在工艺优化效果的验证中,通过调整纤维铺设速度、张力以及铺层角度,实现对不同截面变化区域的动态补偿,减少成型误差和材料浪费。试验数据表明,多轴协同控制和装备实时反馈优化在曲率变化剧烈的区域能够保持纤维路径与设计轨迹的高一致性,铺层厚度偏差显著降低,成型表面质量和纤维排列精度得到提高。通过对比分析不同工艺参数组合的效果,可明确自适应编织技术的优化方案在复杂截面构件制造中的技术可行性,为进一步工艺改进提供可靠依据。

性能分析还包括构件力学性能测试,对成型试件进行拉伸、压缩和弯曲试验,评估自适应编织方法对整体结构强度和刚度的影响^[8]。实验结果显示,经过优化的纤维路径和动态控制工艺能够提高复合材料构件的承载能力和局部刚度,同时降低应力集中和疲劳裂纹扩展风险。高精度铺层和一致的层间结合显著提升了构件的稳定性,为复杂结构设计提供了更可靠的制造保障。通过实验验证与性能分析,自适应编织

方法与智能化装备在提升成型精度、结构一致性以及工艺可控性方面表现出显著优势,为高性能变截面复合材料构件的工业化生产提供技术支撑和实践经验。

5 结语

变截面复合材料构件的制造面临截面复杂性和传统编织工艺局限性的双重挑战,自适应编织技术通过纤维路径优化和多维度动态控制实现了对复杂几何形状的高精度铺设。智能化编织装备结合实时反馈与多轴协同控制,使工艺参数能够动态调整,确保铺层连续性和层间结合紧密度。实验验证显示,该方法在构件成型精度、结构一致性以及力学性能方面均取得显著提升,为复杂截面复合材料构件的批量化和高精度制造提供了可行的技术路径。技术实现的系统性和可控性为复合材料构件制造提供了可靠支撑。

参考文献

- [1] 马森,赵启林.复合材料变截面压杆变形性能研究[J].宇航材料工艺,2023,53(06):26-31.
- [2] 沈艳彬,万君,张杰.大型中空异形变截面复合材料的成型工艺研究[J].机械制造与自动化,2023,52(03):66-69.
- [3] 黄浩,单忠德,张丽娇,等.异形截面复合材料构件成形及力学性能预测方法研究[J].机械工程学报,2024,60(02):107-118.
- [4] 陈苗苗,徐伟伟,李可,等.小口径变截面复合材料进气道结构功能一体化的工艺方法[J].航空工程进展,2023,14(06):119-124.
- [5] 罗维,程勇,杨永忠,等.基于二维三轴编织的中空筒体复合材料制造技术研究[J].复合材料科学与工程,2021,(10):56-60.
- [6] 刘芳宁,王雅娜,王越,等.厚截面复合材料数据管理系统的构建与应用[J].信息记录材料,2024,25(03):121-125+128.
- [7] 高伟,刘存,张文军,等.不同长桁截面复合材料加筋板轴压屈曲分析[J].力学与实践,2022,44(05):1143-1150.
- [8] 孙双双,丁钟宇,武丹.SMA 复合材料变截面结构的静态非线性有限元分析[J].机械设计与制造工程,2020,49(04):12-17.

版权声明:©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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



OPEN ACCESS