

复合材料结构装配工艺研究与分析

周 亚

广东汇天航空航天科技有限公司广州分公司 广东 广州 510000

摘要：复合材料结构装配工艺对结构性能与可靠性影响深远。本文首先阐述复合材料结构装配工艺基础，涵盖分类、特点与关键要素；接着剖析装配工艺关键环节，包括装配前准备、核心操作及装配后处理；随后探讨材料特性、工艺参数、环境因素对装配工艺的影响；最后提出装配工艺优化方向，涉及装配工艺方法、参数及工具与设备优化。通过系统研究与分析，为提升复合材料结构装配质量、优化装配工艺提供理论依据与实践参考，推动复合材料结构装配技术向更高水平发展。

关键词：复合材料；结构装配工艺；关键环节；影响因素；优化方向

引言：在航空航天、汽车制造等众多领域，复合材料因其优异的性能得到广泛应用，复合材料结构装配工艺的重要性日益凸显。与传统金属结构装配工艺不同，复合材料结构装配工艺面临诸多挑战，如装配精度要求高、材料适配性要求严格、工艺操作具有特殊性等。合理的装配工艺不仅能确保复合材料结构满足设计要求，还能提升结构的整体性能与可靠性。深入研究复合材料结构装配工艺，分析关键环节、影响因素并提出优化方向，对于提高复合材料结构装配质量、推动相关行业发展具有重要的现实意义。

1 复合材料结构装配工艺基础

1.1 复合材料结构装配工艺分类

复合材料结构装配工艺分类依据连接方式与成型特点划分，形成多种适配不同结构需求的工艺类型。机械连接装配工艺通过紧固件实现复合材料构件的可拆卸连接，依靠紧固件的紧固力保障连接强度，适配需要后期维护与拆卸的结构装配需求，遵循机械连接的基本力学原理。胶接装配工艺依托专用胶粘剂实现构件间的无缝连接，通过胶粘剂的粘结作用形成整体结构，注重粘结面的贴合度与胶粘剂的适配性，适用于对结构整体性要求较高的装配场景。混合连接装配工艺融合机械连接与胶接装配的技术优势，兼顾连接强度与结构整体性，弥补单一连接工艺的局限性，适配复杂结构的装配需求。整体成型装配工艺则是在构件成型过程中完成装配，将多个构件一体化成型，减少连接环节，提升结构整体性能，适用于结构形状复杂、整体性要求极高的场景。

1.2 复合材料结构装配工艺特点

复合材料结构装配工艺具有鲜明的技术特点，与传统金属结构装配工艺存在显著差异。装配精度要求贯穿整个装配过程，复合材料构件自身特性决定装配过程中

需严格控制尺寸偏差，避免精度不足影响结构连接强度与整体性能，一般来说，复合材料结构装配的尺寸偏差需控制在 $\pm 0.1\text{mm}$ 以内，这是由复合材料的力学特性与结构设计要求决定的。材料适配性要求体现在装配工艺与复合材料特性的精准匹配，不同类型复合材料的物理、化学特性不同，需对应选用适配的装配工艺与辅助材料，避免工艺与材料不匹配导致装配质量缺陷。工艺操作特殊性源于复合材料的易损性，装配过程中需控制操作力度与流程，避免对构件造成损伤，同时注重操作的规范性与严谨性^[1]。装配过程稳定性要求强调装配过程中环境、设备、操作等各环节的稳定，任何环节的波动都可能影响装配质量，需通过科学管控保障装配过程的稳定性。

1.3 复合材料结构装配关键要素

复合材料结构装配的质量与效率，取决于多个关键要素的协同把控。装配界面处理是基础要素，需对构件装配界面进行清洁、打磨等处理，去除表面杂质与氧化层，提升界面贴合度与连接可靠性，为后续装配环节奠定基础，其技术要求符合复合材料装配的界面工程理论。装配定位方式直接影响装配精度，需选用适宜的定位工装与方法，实现构件的精准定位，控制构件间的相对位置偏差，确保装配尺寸符合设计要求。装配应力控制是核心要素，复合材料构件在装配过程中易产生应力集中，需通过优化装配顺序、控制操作力度等方式，合理释放与控制装配应力，避免应力集中导致构件变形或损伤，保障装配后结构的稳定性与耐久性。

2 复合材料结构装配工艺关键环节

2.1 装配前准备工艺

装配前准备工艺是保障复合材料结构装配质量的前提，需围绕构件、工具、环境三大核心开展全面准备工作^[2]。复合材料构件预处理聚焦构件装配适配性，需对

构件表面进行针对性处理,去除生产过程中残留的杂质、毛刺及氧化层,调整构件尺寸精度,确保构件符合装配要求,为后续装配操作奠定基础,其处理标准遵循复合材料装配的预处理技术规范。装配工具与设备调试需针对装配过程中所需的定位工装、紧固工具、检测设备等进行全面调试,校准设备精度,检查工具完好状态,确保工具与设备能够稳定运行,满足装配操作的技术需求。装配环境调控需严格控制环境温度、湿度及洁净度,避免环境因素影响装配质量与材料性能,通过环境调控设备维持适宜的装配环境,保障装配过程顺利推进。

2.2 核心装配操作工艺

核心装配操作工艺是复合材料结构装配的核心环节,直接决定装配质量与结构性能,需注重各操作步骤的规范性与精准性。构件定位与对准工艺需依托专用定位工装,实现各复合材料构件的精准定位,调整构件间的相对位置,确保构件对准精度符合设计标准,避免定位偏差导致装配间隙异常或结构受力不均。连接部位处理工艺需根据装配连接方式,对构件连接部位进行针对性处理,优化连接面贴合度,清理连接面杂质,为后续连接操作提供良好条件,保障连接强度与可靠性。装配间隙控制工艺需通过专用检测工具实时监测构件间的装配间隙,采用适配的调整方法控制间隙大小,确保间隙处于合理范围,避免间隙过大或过小影响结构整体性与连接效果,契合复合材料装配的精度控制要求。

2.3 装配后处理工艺

装配后处理工艺是完善装配质量、提升结构性能的重要环节,需针对装配后的结构开展针对性处理。装配部位修整工艺需对装配过程中产生的多余物料、连接痕迹及尺寸偏差进行修整,使装配部位表面平整、尺寸精准,确保结构外观与性能符合设计要求。胶接固化工艺针对胶接装配的结构,控制固化温度与时间,确保胶粘剂充分固化,形成稳定的粘结连接,提升胶接部位的连接强度与耐久性,遵循复合材料胶接固化的技术原理^[3]。装配表面处理工艺需对装配后的结构表面进行清洁、防护处理,去除表面残留的污染物,涂抹专用防护涂层,提升结构表面抗腐蚀、抗老化能力,延长复合材料结构的使用寿命,满足结构长期使用的性能需求。

3 复合材料结构装配工艺影响因素

3.1 材料特性影响

材料特性是影响复合材料结构装配工艺实施效果与装配质量的基础因素,其自身性能差异直接作用于装配全过程。复合材料力学性能对装配工艺的影响体现在强度、刚度等指标上,不同力学性能的复合材料适配不同

装配方式,力学性能波动会导致装配过程中构件受力不均,易引发构件变形或损伤,需结合力学性能优化装配工艺细节。复合材料热膨胀特性会影响装配精度,温度变化时复合材料会产生热胀冷缩现象,若热膨胀特性不稳定,会导致装配后结构出现尺寸偏差,需在装配过程中针对性控制温度,适配热膨胀特性。复合材料表面特性决定装配连接可靠性,表面粗糙度、粘结性能等差异会影响连接面贴合度与连接强度,需通过表面预处理优化表面特性,保障装配连接效果,其影响规律符合复合材料界面结合理论。

3.2 工艺参数影响

工艺参数是调控复合材料结构装配质量的核心变量,合理设置工艺参数可有效提升装配精度与结构性能。装配温度参数直接影响装配过程的稳定性与材料适配性,温度过高或过低都会影响构件贴合效果与胶粘剂性能,需根据复合材料特性与装配方式,设定适宜的装配温度,确保装配过程顺利推进。压力控制参数影响连接部位的贴合紧密性,压力不足会导致连接面存在间隙,压力过大则可能造成构件损伤,需精准控制压力大小与施加方式,使连接部位达到最佳贴合状态。固化时间参数针对胶接装配工艺,固化时间不足会导致胶粘剂未充分固化,影响连接强度;固化时间过长则会增加装配周期,需结合胶粘剂特性与环境条件,设定合理的固化时间,保障胶接质量。

3.3 环境因素影响

环境因素作为外部干扰因素,对复合材料结构装配工艺的稳定性与装配质量具有显著影响,需严格管控装配环境条件。环境湿度会影响复合材料表面状态与胶粘剂性能,湿度过高易导致构件表面产生水汽,降低连接面粘结力,还可能引发材料受潮变质,需控制环境湿度在合理范围,避免湿度干扰装配过程。环境洁净度不足会导致杂质附着在构件连接面,影响连接贴合度与连接强度,甚至引发装配缺陷,需保持装配环境洁净,减少灰尘、杂质等对装配过程的影响。环境温度波动会破坏装配过程的稳定性,温度骤升骤降会导致复合材料产生不规则变形,影响装配精度,需采取保温措施,减少环境温度波动,维持装配环境温度稳定,契合复合材料装配的环境控制要求。

4 复合材料结构装配工艺优化方向

4.1 装配工艺方法优化

装配工艺方法优化核心是通过改进装配核心操作模式,解决传统装配方法中存在的定位偏差、连接可靠性不足等问题,提升装配工艺的合理性与适用性^[4]。连接方

式优化需结合复合材料力学特性与装配结构需求,摒弃传统单一连接模式的局限性,整合机械连接与胶接连接的优势,形成适配复合材料结构的混合连接体系。优化过程中注重连接部位的受力均衡,减少连接过程中产生的局部应力集中,提升连接部位的整体性与耐久性,同时简化连接操作流程,降低装配难度。定位工艺优化聚焦装配过程中的精准定位需求,优化定位基准设计与定位方式选择,采用模块化定位思路,提升定位基准的稳定性与精准度。通过优化定位辅助装置,减少定位过程中的偏差积累,确保构件对准精度符合装配要求,避免定位偏差引发的装配间隙过大、构件错位等问题,为后续装配环节奠定良好基础。

4.2 装配工艺参数优化

装配工艺参数优化是实现装配质量精准调控的关键,通过科学调整工艺参数,平衡装配质量与装配效率,适配不同类型复合材料的装配需求。温度与压力参数优化需结合复合材料的热膨胀特性与力学性能,精准调整装配过程中的温度与压力大小,避免温度过高或过低、压力不足或过大导致的装配缺陷,使温度与压力参数与材料特性、装配方式形成适配,保障装配过程的稳定性与装配质量的一致性。固化工艺参数优化主要针对胶接装配工艺,结合胶粘剂特性与复合材料固化需求,优化固化温度、固化时间等核心参数,避免固化不充分或过度固化引发的连接强度不足、构件变形等问题,提升胶接部位的粘结性能与耐久性,同时合理缩短固化周期,提升装配效率,其优化依据贴合复合材料胶接固化的技术规律。

4.3 装配工具与设备优化

装配工具与设备优化是推动装配工艺升级的重要支撑,通过工具与设备的改进,提升装配精度、效率与稳定性。专用装配工具研发与应用聚焦复合材料装配的特殊性,针对不同结构构件的装配需求,研发适配性更强

的专用装配工具,替代传统通用工具,减少工具与构件的不匹配问题,降低装配过程中构件损伤风险,提升装配操作的便捷性与精准性^[5]。装配设备精度提升围绕现有装配设备的短板展开,对定位设备、检测设备、压力控制设备等进行升级改造,校准设备精度,提升设备运行的稳定性,减少设备误差对装配质量的影响。同时,融入先进的控制技术,实现装配设备的自动化调控,减少人为操作干预,提升装配过程的规范性与一致性,为复合材料结构装配工艺的优化提供设备保障,契合现代工业自动化与精细化生产的发展趋势。

结束语

复合材料结构装配工艺的研究与分析是一个复杂且系统的过程。从装配工艺基础的明确,到关键环节的把控,再到影响因素的剖析以及优化方向的探索,每一步都紧密相连且至关重要。通过不断优化装配工艺方法、精准调控工艺参数以及升级装配工具与设备,能够有效提升复合材料结构装配的精度、质量与效率。这不仅有助于满足复合材料结构日益增长的性能需求,还能推动复合材料在更多领域的广泛应用,为相关行业的技术进步与产业升级提供有力支撑,促进复合材料结构装配技术持续发展。

参考文献

- [1]尹甲宾,王全金.装配式建筑纸基复合材料模块化构件制备及施工工艺研究[J].华东纸业,2026,56(1):7-9.
- [2]吴立才.装配结构新型水泥基材料及其工艺研究[J].重庆建筑,2025,24(12):55-58.
- [3]邓洪.复合材料接触网腕臂结构及材料工艺研究[J].铁道工程学报,2021,38(6):69-74.
- [4]马喆昕,陈龙,王丽静.复合材料连接技术在飞机机身装配中的关键工艺[J].中国科技信息,2025(18):29-31.
- [5]姚知醒,贾广统,谭明维,等.飞机复合材料机身壁板装配技术分析和展望探讨[J].模型世界,2025(11):102-104.