

复合材料维修技术现状与发展研究

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：复合材料维修技术涵盖损伤机理、评估方法、维修技术现状、优化方向及发展趋势四大模块。损伤机理包括纤维断裂、基体开裂、界面脱粘及分层，环境因素加剧材料退化。评估方法依托超声波、红外热成像及X射线检测，建立损伤与剩余强度关系。传统维修采用填补、粘接及补片修复，先进技术涉及热塑性焊接及智能自修复。优化方向聚焦固化与铺层工艺、胶粘剂与增强材料筛选以及检测与操作流程改进。发展趋势体现为智能化监测与决策、绿色化材料与工艺以及集成化维修管理，形成覆盖全生命周期的技术体系。

关键词：复合材料；维修技术；发展趋势

引言：复合材料因比强度高、可设计性强等优势在工业领域广泛应用，但其服役过程中易产生基体裂纹、分层及纤维断裂等损伤，维修技术成为保障结构安全与延长服役寿命的关键环节。复合材料维修的基础理论涉及损伤微观机制与无损评估方法，为维修决策提供科学依据。传统维修技术如粘接修复与补片铺层已形成成熟工艺，但面临效率与耐久性挑战。先进技术如热塑性焊接与智能自修复展示了提升维修质量的潜力。针对当前技术局限，工艺参数、材料选择及维修流程的优化成为研究重点，而智能化、绿色化与集成化代表了未来发展方向。

1 复合材料维修技术的基础理论

1.1 复合材料损伤机理与分类

纤维增强材料在受力过程中断裂的微观机制源于纤维内部缺陷处的应力集中，当局部应力超过纤维极限强度时引发脆性断裂。树脂基体在应力作用下的开裂模式包括微裂纹萌生、扩展及贯穿，主要受基体韧性、交联密度及残余热应力影响。纤维与基体界面结合失效的原因涉及界面化学键断裂、分子间作用力减弱及摩擦磨损，导致载荷传递能力下降。复合材料层间由于应力集中或环境因素导致的分层现象，其形成与层间剪切应力分布、层间结合强度及湿热膨胀系数差异密切相关。湿度作用引起基体塑化及体积膨胀，高温环境加速基体热氧化与热分解，化学介质渗透导致分子链降解或溶胀，由此引发的损伤类型包括基体裂纹网络、纤维腐蚀及界面脱粘，最终降低材料整体性与力学性能。

1.2 复合材料损伤评估方法

超声波检测利用高频声波在材料中的反射与透射特

性识别内部缺陷，其优点包括灵敏度高及深度定位准确，缺点为对近表面缺陷及复杂几何形状适应性差。红外热成像基于热激励后缺陷区域表面温度差异实现损伤可视化，优点为检测速度快且覆盖面积大，缺点为对深层小缺陷分辨能力有限。X射线检测通过射线吸收差异显示内部结构，优点为可识别体积型缺陷及密度变化，缺点为设备成本高且存在辐射防护要求。基于无损检测结果的损伤尺寸测量采用特征信号阈值分割与图像重建技术，位置定位依靠多探头阵列或扫描轨迹算法，严重程度分级依据缺陷面积、深度及形态参数综合评判^[1]。损伤对复合材料结构剩余承载能力的影响分析表明，压缩强度受分层面积与层位深度影响显著，拉伸强度受纤维断裂密度控制，据此建立损伤-剩余强度关系模型，实现结构维修阈值的量化判定。

2 复合材料维修技术现状

2.1 传统维修技术

针对复合材料表面划痕、凹坑等轻微损伤的填补、打磨及涂层修复方法，其核心在于通过填充材料恢复表面平整度并重新建立防护层。填补工序采用与基体相容的填充膏体，经固化后进行精细打磨以消除残余台阶效应，最后施加防护涂层抵御环境侵蚀。采用胶粘剂对复合材料内部或结构损伤进行粘接修复的工艺流程包括表面处理、胶粘剂选择及固化条件控制三个关键环节。表面处理通过机械打磨或等离子活化去除污染层并增加粘接面积，胶粘剂选择需匹配基体化学性质与服役载荷类型，固化条件控制则涉及温度、压力及时间参数的精确调节以确保界面充分交联。通过在损伤区域铺设附加纤维层并浸渍树脂进行修复的方法，其增强效果取决于补

片纤维取向、铺层顺序与原始结构的匹配程度,适用范围涵盖中等程度的穿透性损伤及局部刚度衰减区域,该方法能够有效恢复结构的载荷传递路径并抑制裂纹进一步扩展。

2.2 先进维修技术

热塑性复合材料在维修中的优势体现为可焊接性与可回收性,其维修工艺包括激光焊接与感应焊接。激光焊接利用高能光束局部熔化界面区域形成分子链扩散与缠结,感应焊接则依靠外加交变磁场激发植入界面的导电填料产生焦耳热,实现快速固结且无需额外胶粘剂。金属与复合材料连接部位损伤的特殊性在于电化学腐蚀风险与热膨胀系数差异引发的附加应力,适用于此类结构的维修方法包括机械连接与胶接机械混合连接。机械连接采用螺栓或铆钉传递载荷以避免界面应力集中,胶接机械混合连接则结合胶层均布应力与机械紧固抗剥离的双重优势^[2]。基于形状记忆聚合物、微胶囊自修复等智能材料的复合材料维修技术,其自感知机制通过嵌入传感网络监测应变与温度特征参数,自修复机制依赖微胶囊破裂释放修复剂填充微裂纹或形状记忆效应驱动裂纹面闭合,该技术在多次损伤累积场景中展现出自主恢复能力的发展潜力。

2.3 维修技术现状分析

传统维修技术成熟度较高,经过长期工业应用验证,其在常规环境下的可靠性及稳定性已形成系统性数据支撑。先进维修技术中热塑性焊接与智能自修复尚处于工程验证阶段,部分技术受限于专用设备成本与工艺窗口窄化问题,稳定性有待提升。不同维修技术在修复周期方面,传统胶粘与补片修复需经历较长固化等待时间,而激光焊接与感应焊接可实现分钟级快速修复。材料消耗方面,传统方法依赖预制胶膜与预浸料,先进技术中微胶囊及形状记忆材料制备工艺复杂且成本偏高。人工成本差异体现为传统技术依赖熟练操作人员的经验判断,先进技术则要求操作者掌握多学科交叉知识。提高维修效率的有效途径包括开发快速固化树脂体系与模块化维修设备,降低成本则需优化智能材料制备流程。维修后复合材料结构的力学性能恢复程度因技术类型而异,传统胶粘修复的强度恢复率受表面处理质量主导,先进焊接技术的恢复率取决于界面分子链扩散充分性。长期耐久性评估表明,湿热老化与疲劳载荷是影响维修质量的关键因素,维修界面的残余应力分布及抗蠕变能力直接决定结构服役寿命。

3 复合材料维修技术的优化方向

3.1 工艺参数优化

固化工艺优化需深入研究不同胶粘剂与树脂体系的固化特性,通过调整固化温度、时间及压力等参数实现固化过程的精准控制。温度影响交联反应速率与程度,时间决定固化是否充分,压力则作用于气泡排出与界面密实。合理匹配三项参数可提高维修结构的粘接强度和内部质量,减少气泡、未固化区域等缺陷的产生。铺层工艺优化针对敷层修复技术,需优化附加纤维层的铺层角度、顺序和层数。根据损伤部位的受力特点与复合材料结构的整体性能要求,合理设计铺层方案,使修复区域的力学性能得到增强,并与周围未损伤区域实现协同工作。表面处理工艺优化涉及打磨、清洁、活化等步骤的改进。选择更合适的表面处理方法与试剂,提高表面粗糙度和清洁度,从而增强胶粘剂与复合材料表面的粘接性能,最终提升维修质量。

3.2 材料选择优化

胶粘剂材料优化需根据不同的维修场景与损伤类型,筛选和研发性能更优的胶粘剂。重点考虑胶粘剂的粘接强度、韧性、耐温性及耐化学腐蚀性等综合性能,使其能够适应复杂的使用环境,提高维修结构的可靠性与耐久性。增强材料优化适用于敷层修复及金属与复合材料异种材料修复等场景。研究新型纤维材料包括高性能碳纤维、芳纶纤维等的性能特点,根据维修需求选择合适的纤维类型与规格,以提升修复区域的力学性能和抗损伤能力。智能材料优化聚焦于改进形状记忆聚合物、微胶囊自修复材料等智能材料的性能。提高形状记忆聚合物的形状恢复率与恢复速度,优化微胶囊自修复材料的触发条件与修复效率,使智能修复技术能够更有效地应用于复合材料维修^[3]。

3.3 维修流程优化

检测与评估流程优化需整合无损检测技术与损伤评估方法,建立高效准确的检测与评估流程。采用多技术联合检测的方式提高损伤识别的准确性与可靠性,开发智能化的损伤评估软件实现损伤信息的快速处理与分析,为维修决策提供更科学的依据。维修操作流程优化要求对维修过程中的各个操作环节进行细化与标准化,制定详细的操作指南与质量控制标准。通过培训维修人员提高其操作技能与规范意识,确保维修操作的准确性与一致性,减少人为因素对维修质量的影响。维修后检验流程优化需完善检验流程,增加检验项目与检验方法。除常规的外观检查与力学性能测试外,引入声发射检测、激光散斑干涉检测等先进技术,对维修结构进

行全面深入的检测,确保维修质量符合要求。

4 复合材料维修技术发展趋势

4.1 智能化维修技术

集成传感器与物联网技术的复合材料结构健康监测系统实现了损伤的实时感知与预警。传感器网络持续采集应变、温度及振动等物理参数,物联网平台将各节点互联形成分布式监测架构,系统通过内置算法分析实时数据,在损伤萌生阶段自动触发预警。机器人技术与三维打印技术在复合材料维修中可提高精度与效率,机器人系统通过视觉引导精确执行打磨、涂胶及铺放工序,三维打印技术依据损伤轮廓逐层沉积维修材料,实现复杂形状的原位成型。基于大数据分析的维修决策支持系统利用机器学习算法优化维修方案,系统从历史维修记录及无损检测数据中提取特征变量,建立损伤特征与维修策略之间的映射关系,自动推荐维修方法并预测修复后的性能恢复程度,实现从经验驱动向数据驱动的维修模式转变。

4.2 绿色化维修技术

低毒可降解胶粘剂与树脂的开发可减少维修过程对环境的影响,环保型材料采用生物基单体替代石油基溶剂,降低毒性排放,可降解树脂在达到服役寿命后能够分解为无害小分子。维修过程中的能源消耗通过低温固化技术与节能型加热设备得到优化,低温固化配方采用高活性固化剂使交联反应在较低温度下完成,节能型加热设备采用红外辐射或电磁感应等直接加热方式将能量集中于维修区域,提高热效率并缩短加热周期。复合材料维修废弃物的分类、回收与再利用体系实现了维修资源的循环利用,分类体系根据材料类型划分回收路径,回收技术采用机械粉碎或热解等方法将废弃物转化为再生纤维或填料,重新进入维修材料制备流程,减少填埋压力并降低对原生原材料的需求^[4]。

4.3 集成化维修技术

多种维修技术的有机结合形成了针对不同损伤类型与结构形式的综合维修解决方案,提高了维修的适

应性与灵活性,集成化策略根据损伤的几何特征与力学需求,从传统胶粘修复、补片修复、先进焊接及智能自修复等技术库中选取适用方法进行组合。在复合材料结构设计阶段考虑维修需求可优化结构可维修性,维修设计一体化引入可维修性评价指标作为设计优化的约束条件,设计阶段预留的维修接口与标准化连接区域使损伤发生后能够快速定位并实施修复,降低维修难度与成本^[5]。覆盖复合材料结构全生命周期的维修管理体系包括损伤预测、维修规划、维修执行与效果评估等环节,损伤预测基于服役载荷谱估算损伤概率与演化趋势,维修规划制定预防性维修计划并优化资源分配,效果评估验证修复质量并反馈至预测模型,形成闭环管理循环。

结束语: 复合材料维修技术的发展经历了从经验依赖的传统方法向数据驱动的智能体系演进。损伤机理的深入认识为精准评估与有效修复奠定了理论基础,多种无损检测手段的互补应用提升了损伤识别的可靠性。传统维修技术虽成熟可靠,但面对复杂服役环境与高性能要求仍显不足,工艺参数、材料选择及流程优化成为突破瓶颈的关键路径。未来,智能化监测与自动化设备将显著提升维修效率与精度,绿色化材料与节能工艺将降低环境负荷,集成化管理将贯穿结构全生命周期。多技术融合与跨学科协同是推动复合材料维修技术持续进步的核心动力。

参考文献

- [1] 陈国信. 复合材料修复技术在飞机维修中的应用[J]. 全面腐蚀控制,2025,39(9):47-49.
- [2] 白明玉. 飞机复合材料损伤检查及维修技术研究[J]. 科技创新与应用,2023,13(32):173-176.
- [3] 林正杰,段友社,白树成. 复合材料外场维修技术及几点建议[J]. 科技风,2023(18):160-162.
- [4] 刘轩邑,汪俊陶,邹鹏程,等. 复合材料修复技术与可修复性研究综述[J]. 航空制造技术,2024,67(20):80-89.
- [5] 胡俊山,弥世青,张胜平,等. 航空复合材料结构分层损伤机器人自动钻铆修复技术与装备[J]. 航空制造技术,2024,67(20):44-57,67.