

基于自动铺放成型的复合材料制造质量监督方法研究

邹峰 夏开阳 张鸽 车晓阳 刘一帆

空装驻西安地区第一军事代表室 陕西西安 710089

摘要: 随着航空制造对轻量化、高强度材料需求的增长,先进复合材料在飞机结构中的应用比例持续提升。同时,复合材料制造工艺的复杂性对质量监督提出了更高要求。本文从先进复合材料制造技术入手,介绍了复合材料在航空领域的发展与应用,分析自动铺放技术对质量监督的挑战,提出了覆盖复合材料制造全流程的质量监督方法策略。

关键词: 复合材料; 自动铺放; 质量监督

1. 引言

航空复合材料以有机高分子为基体,碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维为增强材料,通过复合工艺制备而成^[1]。航空复合材料具有较高的比强度和比模量,抗疲劳性能好,作为实现飞行器轻量化与高强度的结构设计基础,已成为现代飞行器发展的脊梁。

20 世纪初,结构轻量化成为制约飞行器性能的重要因素。以 NASA 为首的复合材料研究机构首次将复合材料应用于飞行器的机身和机翼主承力结构中,将飞行器结构重量减少 25% 以上。空客公司制造的 A350XWB 客机中进一步扩大了复合材料在机翼和机身中的使用率,同时增加了复合材料在机舱门、内部支撑构件上的应用,复合材料使用率高达 53%^[2]。国内航空复合材料的发展同样经历了从次承力结构到主承力结构的变化,其制件在飞行器中的尺寸和重量大幅增加,传统的手工铺贴从生产效率和产品质量已不满足制造需求,采用自动化制造已成为必然趋势。复合材料自动铺放技术作为现代高端制造的核心技术之一,是通过自动化设备将预浸料按设计轨迹精准铺设,以实现复杂构件的高效成型,如航空飞行器的机翼壁板/翼梁、机身壁板等复杂结构。

然而复杂的飞行器结构设计对航空复合材料制造工艺提出了更高要求,特别是复合材料零部件在飞机主承力结构中的应用,其制造质量直接影响飞行安全。如何有效开展质量监督,成为亟待解决的难题。

2. 航空复合材料成型工艺

2.1 传统手工铺设

传统的航空复合材料成型工艺常采用手工铺设的方法,目前仍应用于部分飞行器原型机的制造中。手工铺设依靠预

浸料自动剪裁下料系统、激光定位系统等专用设备保证工作人员的铺设质量,加工过程中,可对蒙皮厚度进行局部加强以适应不同结构。手动铺设要求工作人员具有较高的技术及经验,不仅成本高效率低,还易产生废品,难以对加工过程进行有效的质量控制。

2.2 自动铺放成型技术

随着飞机制造的发展和研制需求,复合材料制造模式逐步由手工铺贴成型向自动化成型转变。复合材料自动铺放成型技术依据铺放材料形态不同分为自动铺带技术和自动铺丝技术两种^[3]。自动铺带技术采用自动铺放机带动复合材料预浸带加热并导出,通过多轴自动化控制系统实现铺带位置的精准定位,铺设过程中在压辊作用下将预浸带铺叠在指定位置,切割刀将预浸带按预定形状切断,回收系统将背纸材料回收。自动铺丝技术将纤维缠绕技术与自动铺带技术相结合,通过纤维缠绕、铺叠、辊压、切割进行加工,即用铺丝头将多束预浸纤维丝在压辊作用下形成纤维带,再按照预定路径进行铺放,如图 1 所示^[4]。目前复合材料自动铺放设备分为龙门、卧式和机器人铺放。与专用数控机床相比,机器人铺设技术具有成本低、灵活度高、通用性好、容错率强的优点,但在复合材料制造领域仍处于半自动化状态,机器人的精密控制、多机械臂的协同作业和制造过程中的缺陷检测仍需要进一步研究。

复合材料自动铺放成型技术与传统手工铺贴成型工艺相比,在产品一致性、操作可靠性、工艺稳定性、人为因素干扰等方面具有明显优势,更适应大尺寸、异型复杂构件的自动化成型,极大地提高了产品制造效率和质量。

2.3 复合材料 3D 打印技术

3D 打印技术是一种自下而上的成型技术,利用激光、电子束、光固化等方式实现材料的逐层累积、一体成型。目前航空复合材料常采用熔融沉积制造(FDM)、立体光刻技术(SLA)进行 3D 打印制造^[5]。3D 打印技术受限于喷头活动范围,目前常应用于小型航空复材零件的制造中,未来在材料使用性、打印稳定性、产品性能方面将进行更多的改进。近期,连续纤维 3D 打印技术也成为最近热门的复材自动化成型技术之一[6-8]。但 3D 打印技术受限于喷头活动范围,目前常应用于小型航空复材零件的制造中,未来在材料使用性、打印稳定性、产品性能方面将进行更多的改进。

3. 先进复合材料成型工艺对质量监督的新挑战

复合材料先进成型工艺与传统手工铺设相比,可以大幅提升生产效率,实现自动化操作,大大缩短生产周期。同时,能够精准控制纤维的铺放角度、位置和张力,保证了复合材料结构的尺寸精度和一致性,实现复杂形状结构件的一体化制造,减少了拼接和组装工序,降低人为因素导致的缺陷。以自动铺放成型为代表的复合材料制造技术因其工艺的复杂性,对开展质量监督工作带来新的挑战。

3.1 工艺参数耦合失效

自动铺放成型工艺参数具有高精度、强耦合的特点,核心参数包括铺放速度、纤维张力、铺层角度、定位精度等,参数间存在显著耦合效应:当铺丝设备张力波动与模具温度梯度变化协同作用时,会提高产生孔隙的概率;因铺放头振动产生的纤维排向偏差,将导致层间剪切强度下降。如何确定工艺参数,预测参数组合对性能的影响,实施有效控制,直接影响复合材料实物质量。

3.2 仿真验证精度偏离

对于大型复合材料制件,在实际生产前需进行工艺仿真,若仿真结果出现偏差,可能会导致实际生产中出现产品缺陷,如间隙、角度偏差超出产品规范,产品与设备发生碰撞等,不仅对产品质量产生不可逆影响,还可能对高价值高精度的铺放设备产生破坏。因此加强对工艺仿真过程的监督,模拟优化参数组合,提前预防规避风险,成为了自动化制造质量监督中的关键环节。

3.3 铺放设备误差积累

自动铺放设备相对于其他数控设备,除传统的机械、电气、控制系统等部分,还集成了送丝、剪切、重送、压实、

加热等多个功能。设备关键部件的磨损、老化或者异常可能导致纤维铺放路径偏差、张力失控或者压力不均,进而引发层间褶皱、纤维角度误差等缺陷。然而,自动铺放是一个持续的制造过程,仅仅依靠人力、肉眼难以持续的观察纠错。如果在铺放过程中已经出现偏差,后续将难以检查。这就需要探索新的质量监督模式,加强对自动铺放设备的管控。

3.4 检验检测技术瓶颈

对于自动铺放成型的复合材料零件,如何在制造过程中准确的将设计及工艺要素传达至设备执行,并对相关参数进行实时监控,及时发现生产过程中的问题,面临巨大挑战。如铺放过程出现超温,树脂在铺放过程中出现不规则固化;在热压罐固化阶段,热电偶失效造成罐内温度失控,内部温度均匀度差造成产品固化变形加剧;超声波 C 扫和 X 射线等常规检测方法对复合材料内部缺陷检出率受检测环境、产品厚度、表面粗糙度等因素影响制约,仅达 70%。如何实时监测相关制造波动和缺陷,还存在一些技术瓶颈。

4. 复合材料质量监督方法策略

4.1 构建复合材料质量监督体系

通过对复合材料自动化制造全生命周期开展流程分析,针对“设计、工艺、试制、制造”四个阶段,结合复材自动铺放成型技术特点,从工艺仿真监督、自动铺放设备前置监管、生产过程控制、数字化检测等维度进行质量管控,逐项识别监督要素,明确监督时机、监督内容和监督方法,将质量监督要求融入复合材料研制生产全流程,构建复合材料零件自动化制造全生命周期质量监督体系,推动产品高质量交付。

4.2 工艺仿真监督

对于高价值、长周期的复合材料制件,在实际生产前使用虚拟制造技术和数字孪生等方法,模拟不同参数下的生产过程。通过模拟丝束张力、铺丝速度等对复合材料性能的影响,快速找到最优参数组合;开展碰撞仿真模拟机床运动轨迹,提前发现制造过程中工装与铺丝头干涉等情况;通过可视化的手段,进行角度及间隙分析,对可能超差部位进行调整。因此加强对工艺仿真的监督,可以提前发现潜在问题,减少因参数不合理导致的缺陷。

通过数据分析等方式对工艺仿真进行监督,检查仿真程序所依据的数学模型和算法是否正确,是否符合复合材料自动化制造工艺的基本原理和物理规律。在仿真程序运行过

程中, 抽查监测程序的运行状态, 确认各阶段仿真结果是否符合预期, 确保仿真过程准确可控。

4.3 自动铺放设备前置监管

随着自动铺放成型技术的规模化应用, 复合材料质量特性的决定因素也发生了深刻变化, 自动铺放设备的稳定可靠成为质量监督的重点。采用参加评审、试验验证、体系监督等方式, 对自动铺放设备各阶段的关键节点进行前置监管。设计选型阶段重点关注设备能力是否匹配工艺需求, 督促开展设备关键功能识别、功能失效分析。安装验收阶段监督执行三级精度校准, 组织试验件试制, 充分验证设备加工能力。设备运行阶段督促建立设备健康档案, 对丝杠磨损、铺放张力波动等关键参数进行监测, 严格管理压辊、切刀、砧板、测头、定位球等消耗配件, 制定针对性的维护保养计划, 通过设备的稳定运行, 保证制造产品质量。

4.4 生产过程控制

自动铺放制造过程涉及众多工艺参数, 这些参数相互关联、相互影响。督促承制单位融合多源数据构建闭环监控体系, 系统分析铺放位置偏差、梯度温度场变化、铺放压辊压力等工艺参数与制造缺陷的关联性, 建立评估模型, 预测可能出现的超差风险, 动态调整铺放策略。对首次制造的零件, 会签首件鉴定目录, 参加开工前检查, 完成首件鉴定。选取关键工序, 采用固定项目提交检验的方式进行现场检查。当工艺参数发生重大更改时, 参加特殊过程确认或再确认, 重新进行首件鉴定。

4.5 复合材料数字化检测

针对超大型复合材料构件外形和内部缺陷检测, 督促承制单位开展大型复合材料形廓全场精确检测与分析、结构可视化检测与缺陷评估技术研究, 建立大视场面测量系统模型, 组织大厚度复合材料壁板内部缺陷和孔隙率超声检测与评估技术攻关, 实现对大尺寸壁板型面、轮廓特征等精准测量、内部缺陷的阵列超声可视化检测与评估和孔隙率超声数值评估。深入应用微焦点 CT 扫描、激光剪切干涉、光学

检测、红外热成像等检测方法, 实现在线检测和实时反馈, 提高复合材料数字化检测能力。

5. 结语

通过构建覆盖工艺设计、设备运行、生产过程、产品检验检测的复合材料制造全链条质量监督体系, 结合数字化检测与智能分析手段, 可有效应对自动铺放技术带来的挑战, 为航空复合材料制造提供可靠的质量保障。

参考文献:

- [1] 徐林, 刘传军, 赵崇书. 复合材料在民用飞机应用与发展趋势 [J]. 复合材料科学与工程, 2024(9):98-104.
- [2] 于士哲. 新型复合材料在飞行器设计中的应用与发展 [J]. 中国机械, 2024(23):30-33.
- [3] 郝大贤, 王伟, 王琦珑, 等. 复合材料加工领域机器人的应用与发展趋势 [J]. 机械工程学报, 2019,55(3):1-17.
- [4] 薛柯, 何大亮, 薛凯, 等. 大尺寸变截面翼梁的自动铺丝成型 [J]. 复合材料科学与工程, 2023(11):96-101,115.
- [5] 张明, 孙中刚, 郭艳华, 等. 3D 打印连续纤维增强树脂基复合材料的研究进展 [J]. 材料工程, 2025(2):50-70.
- [6] 党乐, 张梦雨, 成艳娜, 等. 3D 打印技术在复合材料中的应用与发展 [J]. 科技创新与应用, 2022,12(24):166-169.
- [7] 邱雯, 张帆, 谭跃刚, 等. 基于主应力轨迹线的连续碳纤维复合材料 3D 打印路径规划方法 [J]. 现代制造工程, 2024(6):22-27.
- [8] 袁野, 张秋菊, 陈威. 连续纤维复合材料 3D 打印纤维排布影响分析 [J]. 计算机与数字工程, 2024,52(7):2233-2238,2243.
- [9] 葛增如, 刘建光, 彭俊阳, 等. 连续纤维增强热塑性复合材料增材制造现状及应用前瞻 [J]. 航空制造技术, 2024,67(20):148-161.
- [10] 唐珊珊, 何大亮, 王显峰, 等. 自动铺丝技术在飞机整体机身壁板上的应用研究. 复合材料科学与技术, 2023(2):107-114.