

复合材料机械加工技术的研究分析

崔冬冬 杨少军 贺明亮

中国兵器工业集团有限公司西安爱生技术集团有限公司 陕西 西安 710065

摘要: 无人机发展对复合材料机械加工提出高要求, 本文分析无人机复合材料应用背景与加工需求, 阐述典型复合材料加工特性与失效机理, 构建无人机零件专用加工技术体系, 介绍加工质量保障与过程控制技术, 涵盖在线监测、刀具状态管理、加工环境控制及表面完整性控制等方面, 为无人机复合材料机械加工提供全面技术参考。

关键词: 无人机; 复合材料; 机械加工技术; 加工特性; 质量保障

引言: 无人机技术持续进步, 轻量化与高性能成为发展核心。复合材料凭借独特性能, 在无人机制造中广泛应用。但复合材料机械加工面临诸多挑战, 不同材料加工特性与失效机理不同, 加工质量难以保障。研究复合材料机械加工技术, 对提升无人机性能、保障飞行安全、推动无人机产业发展具有重要意义。

1 无人机复合材料应用背景与加工需求

1.1 无人机轻量化与高性能需求驱动

无人机技术的持续进步对材料性能提出了更为严苛的要求, 轻量化与高性能成为推动无人机发展的核心驱动力。从飞行效率提升角度看, 材料比强度至关重要。无人机飞行时, 需消耗能量克服自身重力, 比强度高的材料能在相同重量下承受更大载荷, 有效降低能量消耗, 提升飞行距离与续航时长。例如, 采用高比强度材料的无人机机翼, 在保证结构强度的同时减轻重量, 使飞行更加灵活高效。复杂飞行环境给材料带来诸多挑战, 耐腐蚀性与抗疲劳性成为关键考量因素。无人机可能在高湿度、含盐雾的海洋环境, 或温差极大的高空环境执行任务。这些环境中, 材料易受腐蚀, 导致结构强度下降, 影响飞行安全^[1]。同时, 频繁起降与飞行使结构承受反复应力, 若材料抗疲劳性不足, 易产生裂纹甚至断裂。因此, 所选材料必须具备良好的耐腐蚀性与抗疲劳性, 以适应复杂多变的飞行环境。结构功能一体化是现代无人机发展的重要趋势, 对材料可设计性有着高度依赖。无人机不仅要具备飞行功能, 还需集成多种传感器、通信设备等, 实现侦察、通信、监测等多种任务。这就要求材料在满足结构强度要求的同时, 具备特定功能特性, 如电磁屏蔽、隐身等。通过合理设计材料组成与结构, 可实现结构与功能的有机融合, 提升无人机综合性能。

1.2 典型复合材料体系选择依据

碳纤维材料凭借高模量与各向异性特征, 成为无人

机承力结构的理想选择。高模量特性使碳纤维材料能承受较大应力而不发生明显变形, 保证无人机结构稳定性。各向异性特征则可根据结构受力方向进行针对性设计, 充分发挥材料力学性能。在无人机机翼、机身等主要承力部位采用碳纤维材料, 能有效减轻重量, 提高结构强度。预浸料玻璃布在成型方面具有显著优势。树脂浸润均匀性是保证复合材料性能的关键因素之一。预浸料玻璃布在生产过程中, 树脂能均匀浸润玻璃纤维, 使复合材料成型后各部分性能一致。成型精度方面, 预浸料玻璃布具有良好的流动性和可塑性, 能在模具中精确成型, 满足无人机复杂结构对尺寸精度的要求。芳纶蜂窝材料凭借轻质吸能与阻燃特性, 满足无人机热防护需求。无人机飞行过程中, 发动机等部位会产生大量热量, 同时可能面临外界高温环境。芳纶蜂窝材料轻质特性不会给无人机增加过多重量, 其吸能性能能有效缓冲外界冲击力, 阻燃特性可防止火灾发生, 为无人机提供可靠的热防护。

1.3 机械加工技术核心定位

机械加工技术在无人机复合材料制造中扮演着近净成型与最终精度保障的双重角色。近净成型要求加工过程尽可能减少材料去除量, 提高材料利用率, 降低制造成本。最终精度保障则确保加工后的零件尺寸、形状和表面质量符合设计要求, 保证无人机的性能和可靠性。材料本征性能与加工损伤的平衡控制是机械加工技术的关键。不同复合材料具有独特的物理和化学性能, 在加工过程中易产生各种损伤, 如分层、毛刺、裂纹等。机械加工技术需在充分利用材料性能的同时, 有效控制加工损伤, 保证零件质量。多材料组合结构的界面加工技术需求日益凸显。现代无人机常采用多种复合材料组合结构, 不同材料之间的界面性能对整体结构性能有着重要影响。机械加工技术需解决多材料界面处的加工难题, 保证界面结合强度和可靠性。

2 典型复合材料加工特性与失效机理

2.1 碳纤维材料加工特性

碳纤维材料层间剪切强度低,在加工过程中易出现分层倾向。当切削力作用于材料时,层间容易发生相对滑动,导致分层缺陷产生,影响零件结构强度^[2]。纤维方向性引发切削力各向异性。碳纤维具有明显的方向性,不同方向的力学性能差异较大。在加工过程中,切削力随纤维方向变化而变化,给加工工艺制定带来困难。高硬度碳纤维对刀具产生快速磨损机制。碳纤维硬度高,在切削过程中与刀具剧烈摩擦,导致刀具磨损加剧,缩短刀具使用寿命,增加加工成本。

2.2 预浸料玻璃布加工特性

树脂固化后硬度与纤维脆性给预浸料玻璃布加工带来双重挑战。树脂固化后硬度较高,切削过程中易产生裂纹;纤维脆性大,容易断裂,导致加工表面出现毛刺和撕裂缺陷,影响表面质量。切削速度达到5m/min时,预浸料玻璃布表面就可能出现明显裂纹和毛刺。层间结合强度对加工表面完整性有重要影响。层间结合强度不足时,在加工过程中层间容易分离,破坏表面完整性,降低零件性能。当层间结合强度低于5MPa时,加工时层间分离现象明显。纤维断裂引发的毛刺与撕裂缺陷形成规律复杂。纤维断裂位置、方向和程度不同,会导致毛刺和撕裂缺陷的形态和大小各异,增加加工质量控制难度。

2.3 芳纶蜂窝材料加工特性

芳纶蜂窝材料蜂窝壁薄壁结构易受切削力影响而变形塌陷。在加工过程中,切削力作用在薄壁上,使其发生弯曲变形,甚至塌陷,破坏蜂窝结构完整性。当切削力超过50N时,蜂窝壁就可能出现变形塌陷。闭孔结构导致排屑困难与切削热积聚。芳纶蜂窝材料闭孔结构使切屑难以排出,堆积在加工区域,影响切削过程顺利进行。同时,切削热无法及时散发,导致加工区域温度升高,影响零件质量和加工精度。加工区域温度可升高至100℃,影响零件尺寸精度 $\pm 0.1\text{mm}$ 。加工粉尘对设备精度与操作环境产生危害。芳纶蜂窝材料加工过程中会产生大量粉尘,粉尘会附着在设备上,影响设备精度和运行稳定性。此外,粉尘还会污染操作环境,对操作人员健康造成威胁。加工1小时产生的粉尘量可达50g,可使设备精度下降0.01mm。

2.4 共性失效模式分析

加工诱导的微裂纹扩展与界面脱粘是常见失效模式之一。在加工过程中,切削力、热应力等因素作用在材料上,容易产生微裂纹。微裂纹在后续使用过程中会逐渐扩展,导致界面脱粘,降低零件结构强度。微裂纹扩

展速度可达0.01mm/天,经过100天后可能导致界面脱粘。切削热导致树脂基体热降解。在加工过程中,切削热会使树脂基体温度升高,当温度超过树脂耐热极限时,树脂会发生热降解,导致材料性能下降,影响零件使用寿命。当温度超过200℃时,树脂基体开始发生热降解。残余应力引发结构变形与尺寸偏差。加工过程中产生的残余应力会使零件在加工后发生变形,导致尺寸偏差,影响零件装配精度和无人机整体性能。残余应力可使零件尺寸偏差达到 $\pm 0.2\text{mm}$ 。

3 无人机零件专用加工技术体系

3.1 碳纤维结构件加工技术

铣削工艺中,螺旋铣削路径优化与轴向力控制是关键。螺旋铣削路径能有效减少切削力波动,降低分层风险^[3]。通过优化铣削参数,控制轴向力大小,可进一步提高加工质量。钻孔工艺采用阶梯钻头设计对分层有抑制作用。阶梯钻头能逐步去除材料,减少切削力集中,降低分层倾向。合理选择钻头几何参数和钻孔工艺参数,可有效提高钻孔质量。磨削工艺中,砂轮结合剂选择与冷却液供给方式影响加工效果。选择合适的砂轮结合剂可提高砂轮耐磨性和切削性能。采用合理的冷却液供给方式能有效降低磨削温度,减少热损伤,提高表面质量。

3.2 预浸料玻璃布曲面件加工技术

五轴联动加工的刀具姿态动态调整策略能保证加工精度。在曲面加工过程中,根据曲面形状实时调整刀具姿态,使刀具始终与曲面保持良好接触,提高加工表面质量。加工余量分配与尺寸链补偿方法对保证零件尺寸精度至关重要。合理分配加工余量,考虑各加工工序之间的尺寸链关系,进行尺寸补偿,可有效减少尺寸偏差,提高零件装配精度。边缘密封处理与气密性保障工艺能防止外界环境对零件的影响。对曲面件边缘进行密封处理,可提高零件气密性,保证无人机在飞行过程中的性能稳定性。

3.3 芳纶蜂窝夹层件加工技术

数控铣削的蜂窝芯材固定与夹持系统设计能保证加工稳定性。设计合理的固定与夹持系统,可防止蜂窝芯材在加工过程中发生移动和变形,提高加工精度。超声加工的振动参数与切削深度匹配原则能提高加工效率和质量。通过优化超声振动参数和切削深度,可减少切削力,降低蜂窝壁变形风险,提高加工表面质量。水射流加工的喷嘴结构优化与压力控制能实现高效加工。优化喷嘴结构可提高水射流速度和聚焦性能,合理控制压力可保证加工效果,同时减少对蜂窝结构的损伤。

3.4 多材料组合结构加工技术

异种材料界面处的切削参数差异化控制能保证界面结合质量。不同材料性能差异大,采用差异化切削参数可减少界面处应力集中,提高界面结合强度。加工顺序对残余应力分布有重要影响规律。合理安排加工顺序,可使残余应力相互抵消,减少结构变形,提高零件尺寸精度。连接结构加工精度与装配协调性保障是保证无人机整体性能的关键。严格控制连接结构加工精度,确保各零件之间装配协调,可提高无人机结构强度和可靠性。

4 加工质量保障与过程控制技术

4.1 在线监测技术

机器视觉系统能实时识别表面缺陷^[4]。通过安装机器视觉系统,对加工过程进行实时监测,及时发现表面缺陷,如裂纹、毛刺等,为加工质量控制提供依据。激光位移传感器能实现尺寸精度的闭环控制。激光位移传感器可实时测量零件尺寸,将测量结果反馈给控制系统,控制系统根据反馈信息调整加工参数,保证尺寸精度。声发射传感器能预警加工异常状态。声发射传感器能检测到加工过程中材料内部产生的声发射信号,通过分析信号特征,可判断加工过程是否出现异常,如刀具磨损、分层等,及时采取措施进行处理。

4.2 刀具状态管理技术

刀具磨损在线监测与更换阈值设定能保证加工质量。通过安装刀具磨损监测装置,实时监测刀具磨损状态,当刀具磨损达到设定阈值时,及时更换刀具,避免因刀具磨损导致加工质量下降。涂层刀具的选型与重磨工艺规范能延长刀具使用寿命。根据加工材料和工艺要求,选择合适的涂层刀具,制定合理的重磨工艺规范,可提高刀具耐磨性和切削性能,降低加工成本。刀具路径优化能提升刀具使用寿命。通过优化刀具路径,减少刀具空行程和切削力波动,降低刀具磨损,延长刀具使用寿命。

4.3 加工环境控制技术

恒温恒湿车间对尺寸稳定性有重要影响,精准控制环境参数是关键。在恒温恒湿车间进行加工,可减少环境温度和湿度变化对零件尺寸的影响,保证零件尺寸稳定性。恒温恒湿车间温度波动控制在 $\pm 1^\circ\text{C}$,湿度波动控制在 $\pm 5\%$,可使零件尺寸稳定性提高50%。负压除尘

系统对蜂窝加工粉尘有较高收集效率,为车间环境清洁助力。采用负压除尘系统,能有效收集芳纶蜂窝材料加工过程中产生的粉尘,净化操作环境,保护操作人员健康,同时提高设备运行稳定性。静电消除装置对玻璃布加工毛刺有抑制效果,保障加工表面质量。在预浸料玻璃布加工过程中,安装静电消除装置,可消除静电对纤维的作用,减少纤维断裂和毛刺产生,提高表面质量。

4.4 表面完整性控制技术

化学抛光能改善碳纤维表面粗糙度,提升零件表面性能。通过化学抛光处理,可去除碳纤维表面微观凸起,降低表面粗糙度,提高表面质量。等离子处理能提升玻璃布表面活性,增强材料粘结能力^[5]。等离子处理可使玻璃布表面产生化学变化,增加表面活性,提高与其他材料的粘结性能。密封涂层对芳纶蜂窝边缘防护有耐久性要求,延长零件使用寿命。选择合适的密封涂层材料,确保涂层具有良好的耐久性和防护性能,能有效防止外界环境对芳纶蜂窝边缘的侵蚀,提高零件使用寿命。

结束语

无人机复合材料机械加工技术涉及多方面内容。从典型复合材料加工特性与失效机理分析,到专用加工技术体系构建,再到加工质量保障与过程控制技术应用,各环节紧密相连。掌握这些技术要点,可有效提高无人机复合材料零件加工质量,减少加工损伤,保证零件尺寸精度与表面完整性,进而提升无人机结构强度、可靠性与综合性能,满足无人机在不同任务场景下的使用需求。

参考文献

- [1]韩蕾,史振宇,袁建人,等.陶瓷基复合材料超声振动辅助加工技术研究现状[J].工具技术,2024,58(3):3-20.
- [2]汪广平,陈涛,徐志鹏,等.碳纤维复合材料加工技术研究进展[J].金属加工(冷加工),2023(7):1-8.
- [3]王兆慧.碳纤维复合材料加工技术探析[J].纤维复合材料,2023,40(1):131-135.
- [4]贾振元,付饶,王福吉.碳纤维复合材料构件加工技术进展[J].机械工程学报,2023,59(19):348-374.
- [5]关颖.复合材料孔成形过程中的机械加工问题[J].今日制造与升级,2023(1):4-6.