

CFRP/Ti叠层结构制孔缺陷分布与评价研究

刘颖 杨凡 李嘉陶

中航西飞民用飞机有限责任公司 陕西 西安 710089

摘要: 为进一步满足飞机研制中以碳纤维增强复合材料 (CFRP) 和钛合金 (Ti) 等为代表的新材料的装配要求, 保证飞机的装配质量与疲劳强度。本文针对CFRP/Ti叠层结构制孔工艺的质量控制进行了实验研究。通过设计正交实验, 选取主轴转速、进给量和钻头角作为主要工艺参数, 对CFRP/Ti叠层结构进行制孔, 并通过精密测量设备评估了制孔缺陷, 如CFRP撕裂、分层、毛刺和孔壁粗糙度等。通过对复合材料、钛合金及其过渡域的损伤进行量化表征和评价, 采用三因素方差分析方法, 进一步揭示了不同工艺参数对制孔质量的影响程度, 并通过响应面函数模型建立了制孔质量与工艺参数之间的定量关联模型, 并验证了模型的准确性。本研究为进一步优化CFRP/Ti叠层结构的制孔加工工艺, 提高制孔效率及质量提供了重要的科学依据。

关键字: 碳纤维增强复合材料; CFRP/Ti叠层; 制孔质量

前言

飞机研发与性能优越的新材料应用紧密相关, 旨在提升结构强度刚度的同时减轻飞机重量。CFRP因其可设计性强与低成本, 在新型号飞机设计中广泛使用。CFRP/Ti叠层结构可以提供比CFRP/Al更高的强度、刚度以及良好的热电化学兼容性, 在飞机结构装配中广泛使用。CFRP与钛合金作为难加工材料, 其性能差异大。CFRP显示出各向异性, 容易产生分层、撕裂等缺陷^[1]; 钛合金的特性易导致烧蚀、孔径不圆、毛刺等损伤^[2]。为提高CFRP/Ti叠层的制孔效率, 通常采用同参数一体化制孔加工, 但因两种材料性能与制孔参数的巨大差异, 面临诸多挑战, 如在过渡区不能满足同时高精度加工两种材料的需求。由于飞机大部件装配时先固定长桁再覆蒙皮, 并通过螺栓或铆钉进行机械连接, 需进行大量制孔, 干涉连接利用铆钉或螺栓直径略大于孔径实现预胀紧, 提高结构疲劳寿命。干涉量是连接件直径与孔径差值, 对疲劳寿命影响大, 干涉量控制在1-1.4%可获最高疲劳寿命^[3]。CFRP/Ti装配采用干涉配合, 要求连接孔尺寸精度高、表面质量好以满足干涉量要求。

Li^[4]的研究表明, 采用可变速进给率钻孔方法能够改善孔的出口表面质量, 减少纤维拉出和分层损伤, 但这种方法会降低生产效率。Wang^[5]在CFRP/Ti6Al4V叠层钻孔中采用啄式钻孔和可变速进给率相结合的方式, 通过调整加工参数, 实现了较常规钻削更佳的制孔质量, 包括降低粗糙度、改善圆度和减少分层损伤。南城根^[6]通过正交试验研究了CFRP/Ti叠层钻孔过程, 发现在大进给量的条件下, 切削钛合金产生的高温高硬度切屑是造成CFRP孔径超差和入口撕裂的主要原因。

本文进行了CFRP/Ti叠层结构制孔的正交实验, 基于缺陷评估模型测定了多项质量指标。通过三因素方差分析揭示了各种质量缺陷与工艺参数的相关关系, 采用响应面函数建立了制孔质量与工艺参数的回归模型, 并验证了模型的准确性, 为进一步优化制孔工艺参数, 提高制孔质量及制孔效率提供依据。

1 CFRP/Ti 叠层结构钻削实验

实验使用JDCT1200E-A12S型机床, 实验通过Kistler 9257A型三通道测力仪、Kistler 5073型电荷放大器以及HBM GEN2i数据采集器来实现采集的切削过程中的轴向力, 如图1所示。采用HDMI工业相机和SEM扫描电镜测量CFRP撕裂/分层, 用数字式三维视频显微镜测量出口毛刺高度, 用便携式表面粗糙度仪MarSurf M300测量孔壁粗糙度, 通过实验设备测量轴向力, 对CFRP/Ti叠层结构制孔的质量指标进行精确分析。

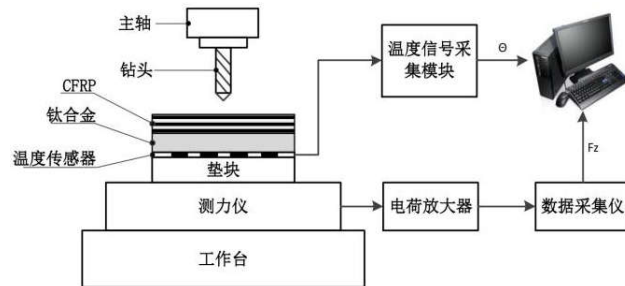


图1 叠层制孔损伤实验测量系统

实验选用CFRP尺寸为150×30×4.5mm, 铺层为[0°/90°/45°/0°/90°/0°/-45°/90°/0°]4s, 使用T-700型碳纤维和TDE-85型树脂; 选用TC-4型钛合金, 厚度3mm; 选用硬质合金麻花钻, 直径6mm, 钻头角分别为100°、118°和135°。

本文根据行标推荐加工参数范围,设计正交试验,选取3个因素分别为主轴转速、进给量和钻顶角,其中主轴转速设置了5个水平,分别为500/750/1000/1250/1500r/min,每转进给量设置了5个水平,分别为0.02/0.06/0.1/0.14/0.18mm/r,钻顶角设置了3个水平,A组100°、B组118°、C组135°,共计75组实验。

2 叠层制孔缺陷评价

2.1 CFRP分层和撕裂

在CFRP/Ti叠层结构制孔过程中,由于下层钛合金板的支撑,CFRP出口一般不会产生撕裂,撕裂主要发生在入口。本文采用撕裂面积来表征CFRP入口撕裂缺陷,其撕裂因子SL被定义为:

$$SL = \frac{\sum A_s}{3D \times 1.8} \quad (1)$$

式中, $\sum A_s$ 为CFRP入口所有撕裂面积之和, D 为孔的直径。

为了量化CFRP的分层缺陷程度,研究者们已经提出了几种评价指标,包括直径分层因子和面积分层因子等。在本研究中,本文采用修正分层因子 F_{da} 作为衡量CFRP分层缺陷程度的指标(如图2)。

$$F_{da} = \alpha \frac{D_{\max}}{D} + \beta \frac{A_{\max}}{A_{\text{nom}}} \quad (2)$$

其中 α 、 β 为权重系数, $\alpha + \beta = 1$, $\beta = \frac{A_{\text{del}}}{A_{\max} - A_{\text{nom}}}$, D_{\max} 为分层部分的最大直径, D 为孔的理论直径, A_{del} 为实际分层面积, A_{\max} 最大分层面积,以 D_{\max} 为直径计算; A_{nom} 为孔的公称面积,以 D 为直径计算。

2.2 孔壁表面粗糙度

CFRP作为一种各向异性材料,制孔后形成的孔壁几何特征与金属材料的有很大的不同。通过观察孔壁的剖面图,可以明显看到不同纤维方向角下的孔壁粗糙度存在显著差异。因此,在评估CFRP/Ti叠层结构制孔的表面粗糙度时,确定CFRP的采样位置主要是纤维方向角 θ 为0°和45°的孔壁,而钛合金的采样可以在孔壁的任意位置进行。所以表面粗糙度评价指标可以细分为:

(a) $R_a^{0^\circ}$: 当CFRP的纤维方向角 $\theta = 0^\circ$ 时孔壁的粗糙度值;

(b) $R_a^{45^\circ}$: 当CFRP的纤维方向角 $\theta = 45^\circ$ 时孔壁的粗

$$F_{da} = 2.3075 + 5.1154e^{-5} \cdot n - 1.2682 \cdot f_r - 0.0192 \cdot \phi - 1.3784e^{-4} \cdot n \cdot f_r + 7.8928e^{-7} \cdot n \cdot \phi + 0.0186 \cdot f_r \cdot \phi - 3.6064e^{-8} \cdot n^2 + 1.6417 \cdot f_r^2 + 7.6418e^{-5} \cdot \phi^2$$

CFRP分层因子回归模型的确定系数 $R^2 = 0.87289$,说明了回归模型的准确性。同理可计算其他质量指标的函

糙度值;

(c) R_a^{Ti} : 钛合金孔壁的粗糙度值。

2.3 制孔质量主要评价因素分析

钻削CFRP/Ti叠层结构时,由于CFRP和钛合金两种材料之间具有相异的加工特性,这导致刀具在过渡区域的同时去除两种材料时行为发生动态变化,从而使得加工过程中的损伤形成和分布机制变得更加复杂。这种复杂性主要体现在以下方面:CFRP材料在钻削过程中易产生层间分离;CFRP和钛合金的孔壁粗糙度受到刀具动态变化和材料加工特性的影响,钛合金和CFRP孔壁粗糙度表现不同;CFRP在钻削入口处易产生撕裂现象,而在出口由于下层钛合金板的存在并不产生撕裂;钛合金在钻削出口处易产生毛刺缺陷,这是由钛合金的加工特性决定的。结合钻削过程中轴向力与损伤分布规律的分析,可以确定本文的主要表面质量评价因素为:CFRP分层、入口撕裂、表面粗糙度、出口毛刺,其评价方法如表1所示。

表1 CFRP/Ti叠层结构主要表面质量因素及其评价方法^[7]

表面质量因素	量化评价方法
CFRP撕裂因子	$SL = \sum A_s / (3D \times 1.8)$
CFRP分层因子	$F_{da} = \alpha \frac{D_{\max}}{D} + \beta \frac{A_{\max}}{A_{\text{nom}}}$
出口毛刺高度	$H = (\sum_i^n H_i) / k$
CFRP孔壁粗糙度	$Ra_{\text{cfp}} = \frac{R_a^{0^\circ} + R_a^{45^\circ}}{2}$
钛合金孔壁粗糙度	Ra_{Ti}

3 加工参数影响下制孔质量的分析

通过对各组实验数据的整合,结果如图3所示。

从实验数据分析得出,CFRP/Ti叠层结构制孔质量受不同工艺参数的影响呈现出各异趋势。通过对CFRP分层因子执行三因素方差分析,主轴转速(n)、进给量(f_r)以及钻顶角(ϕ)对CFRP分层因子的影响均具有显著性,其显著性水平达到了0.01以下,表明这些工艺参数对CFRP分层因子都有显著影响。

为研究CFRP/Ti叠层结构制孔时,工艺参数如何影响CFRP入口撕裂因子,通过回归分析,利用响应面函数关系作为模型,深入探讨CFRP分层因子与工艺参数间的具体函数关系。通过计算得:

数关系。为后续进行质量提升、工艺参数优化做好数据准备。

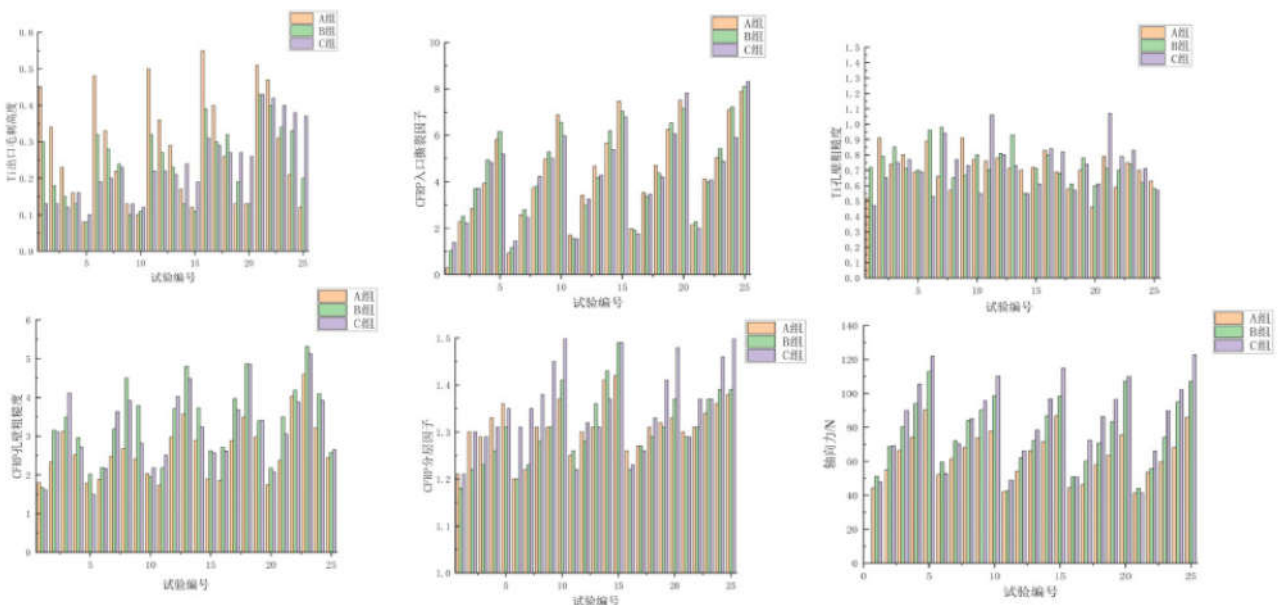


图3 不同工艺参数加工CFRP/Ti叠层结构实验结果统计

通过分析发现，主轴转速(n)和进给量(f_r)对CFRP入口撕裂因子具有显著影响，它们的显著性水平都低于0.01。而钻头角(ϕ)对该撕裂因子的影响不大，其显著性水平远高于0.05。进一步分析表明， n 、 f_r 和 ϕ 对 R_{acfrp} 的显著性水平均低于0.01，这证明它们是影响 R_{acfrp} 的主要因素。在分析 R_{aTi} 时，发现 f_r 对 R_{aTi} 有显著影响，其显著性水平低于0.05，而 n 和 ϕ 对 R_{aTi} 的影响不大，它们的显著性水平远高于0.05。此外， n 、 f_r 和 ϕ 对钛合金出口处毛刺高度及轴向力的影响显著，其显著性水平均低于0.05。

结语

(1) 进行了以主轴转速、进给量和钻头角为变量的CFRP/Ti叠层结构制孔质量分析实验，设计正交制孔实验，对不同工艺参数下的制孔缺陷进行了分析。

(2) 研究了实验过程中各种缺陷的测量及计算方法，并对造成的缺陷如分层、撕裂、毛刺和孔壁粗糙度进行了详细的测量和评估。

(3) 深入分析实验结果，利用三因素方差分析方法，识别了显著影响叠层结构制孔质量的工艺参数。

参考文献

[1]齐振超,刘书暖,程晖等.基于三维多相有限元的CFRP细观切削机理研究[J].机械工程学报,2016,52(15):170-176.

[2]陆翠.CFRP/Ti-6Al-4V叠层结构螺旋铣孔过程工艺优化研究[D].天津大学,2012.

[3]蔡晓江.基于复合材料各向异性的切削力热变化规律和表面质量评价试验研究[D].上海交通大学,2014.

[4]李云义,李树健,李鹏南等.CFRP/TC4叠层结构制孔技术对比实验[J].宇航材料工艺,2023,53(05):97-102.

[5]王昌赢.CFRP/Ti叠层结构钻削损伤对孔壁质量和制孔精度作用机理与损伤抑制技术[D].上海交通大学,2017.

[6]南成根,吴丹,马信国,等.碳纤维复合材料/钛合金叠层钻孔质量研究[J].机械工程学报,2016,52(11):177-185.

[7]刘书暖,夏文强,王宁,宋晔,骆彬,张开富.CFRP/Ti叠层构件钻孔工艺参数多目标优化方法[J].机械工程学报,2020,56(07):193-203.