

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.01.038

大孔径大厚度 TC21/CFRP/TC21 叠层制孔仿真

邱建平, 杨旭, 郝浩杰, 张斌, 孟宪本

(中航西安飞机工业集团股份有限公司, 陕西 西安 710089)

摘 要:碳纤维增强复合材料和钛合金在大孔径大厚度的叠层制孔时, 不合理的分刀方案会导致刀具磨损, 影响制孔质量。为确定合适的分刀方案, 采用 Johnson-Cook 模型, 建立钛合金本构模型, 基于 Hashin 损伤判据, 模拟 CFRP 在钻削过程中的损伤, 建立 TC21/CFRP/TC21 叠层制孔有限元仿真模型, 研究不同分刀方案下叠层材料钻孔过程钻削力和转矩的分布规律。结果表明: 钻削大厚度 TC21/T800/TC21 叠层结构, 采用钻初孔—扩孔—铰孔分刀方案的钻削力和转矩都低于钻初孔—铰孔分刀方案, 且刀具磨损量小、孔壁毛刺少。

关键词:叠层制孔; CFRP; 大厚度; 有限元仿真

中图分类号: TB33; TG52 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2025)01-0180-07

Large Aperture and Large Thickness TC21/CFRP/TC21 Laminated Drilling Simulation

QIU Jianping, YANG Xu, HAO Haojie, ZHANG Bin, MENG Xianben

(AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Company Ltd., Xi'an 710089, China)

Abstract: In the laminated hole making of large aperture and large thickness of carbon fiber reinforced composite materials and titanium alloys, unreasonable tool splitting scheme may lead to tool wear, which affects the quality of hole making. To determine the appropriate tool splitting scheme, the classic Johnson-Cook model was applied to establish the constitutive model of titanium alloy, the damage of CFRP in the drilling process was simulated based on the Hashin damage criterion to build the finite element simulation model of TC21/CFRP/TC21 laminated hole making and study the distribution law of drilling force and torque in the drilling process of laminated material under different splitting schemes. The results show that in the process of drilling the large-thickness TC21/T800/TC21 stacked structure, the drilling force and torque of the reaming hole splitting scheme using the drilling the initial hole — hole expanding — reaming are lower than that of the drilling the initial hole — reaming, and the tool wear is small and the hole wall burr is less.

Keywords: laminated drilling; CFRP; large thickness; finite element simulation

0 引言

在 CFRP、Ti 合金等难加工材料叠层构件大孔径、大厚度制孔工况下, 加工刀具存在磨损严重、使用寿命低等问题, 导致常出现每个刀具只钻一个就报废的状况。切削加工是一个复杂的材料失效破坏过程, 对于钛复钛叠层构件, 在实际生产中, 材料性能、钻削力的变化等都是影响刀具磨损的重要因素^[1-2]。

由于试验成本高、耗时长, 学者们进行了大量的叠层结构有限元仿真。黄秋实等^[3]应用有限元方法模拟了 CFRP/Ti 叠层在 CFRP—Ti 和 Ti—CFRP 两种钻削顺序下的制孔, 叠层总厚度为 12 mm, 刀具直径为 8 mm, 探究了钻削顺序对叠层结构钻削应力、温度及制孔质量的影响规律。刘书暖等^[4]建立了 CFRP/Ti 叠层钻孔工艺参数多

目标优化模型, 以 T700-TDE85/Ti-6Al-4V 叠层构件为对象, 其中 CFRP 板厚 4.5 mm, 钛合金板厚 3 mm, 钻头直径 6 mm, 得到了最优工艺参数。谢昌嵩等^[5]利用 AdvantEdge 金属切削仿真软件建立了刀具直径为 6.2 mm 扩孔钻加工 CFRP/Al 叠层的有限元模型, 采用单因素试验法分别讨论扩孔钻槽前角和刃倾角对切屑形态、转矩和切削力等的影响。黄树涛等^[6]利用 Abaqus 建立 CFRP/Al 三维钻削有限元模型, 叠层总厚度为 5.08 mm, 仿真分析 PCD 麻花钻高速钻削 CFRP/Al 时钻削力、转矩和应力分布的变化规律。结果表明: 高转速低进给可获得较小的钻削力和转矩。在复合材料钻削仿真的研究领域中小孔径小厚度的叠层结构分析钻削力、制孔质量有较多成果, 但对于复合材料叠层大孔径大厚度钻削过程仿真分刀方案对孔质量的影响却鲜有研究。

第一作者简介: 邱建平(1977—), 男, 四川乐山人, 高级工程师, 硕士, 研究方向为数字化飞机装配技术, qiu Fengss@foxmail.com。

加工大厚度、大孔径叠层构件,采用一次加工的工艺方案往往会带来刀具磨损严重、孔壁质量差等问题,因此需要采用多次加工工艺,包括钻孔、扩孔、铰孔。为探究大孔径、大厚度叠层结构钻削过程中不同分刀方案的钻削力和转矩,本文建立了一种叠层制孔有限元仿真模型,分析了两种不同厚度叠层和两种工艺顺序钻削过程中的钻削力及转矩水平,并对不同分刀方案做出评估,得到适合加工大厚度、大孔径叠层结构的分刀方案。

1 有限元仿真建模

选取了 TC21/CFRP/TC21 叠层构件大孔径、大厚度加工工况作为仿真对象,按总体厚度分为 55 mm 和 80 mm 两种工况。在总体厚度 55 mm 构件中,叠层顺序为:15 mm 厚度的钛合金、25 mm (15 mm+10 mm) 厚度的复材、15 mm 厚度的钛合金;总体厚度 80 mm 构件中,叠层顺序为:25 mm 厚度的钛合金、35 mm (20 mm+15 mm) 厚度的复材、20 mm 厚度的钛合金。两种厚度叠层的终孔规格均为 $\Phi 17.75$ mm。采用两种分刀方案:方案 A 为钻初孔 $\Phi 17.00$ mm—铰孔 $\Phi 17.75$ mm;方案 B 为钻初孔 $\Phi 11.455$ mm—扩孔 $\Phi 16.000$ mm—铰孔 $\Phi 17.750$ mm。

1.1 TC21/CFRP/TC21 钻削仿真模型的建立

刀具采用直柄标准麻花钻,通过 CATIA 建立模型,钻头顶角为 118° ,螺旋角 $\beta=30^\circ$,横刃长度 0.8 mm,直径分别为 11.455 mm、16 mm、17 mm、17.75 mm,采用 YG8 硬质合金材料,其中 $\Phi 11.455$ mm 刀具模型如图 1 所示。为节省运算时间,只截取钻头部分,并导入 Abaqus。TC21/CFRP/TC21 三维钻削仿真装配模型如图 2、图 3 所示。



图 1 $\Phi 11.455$ mm 刀具模型

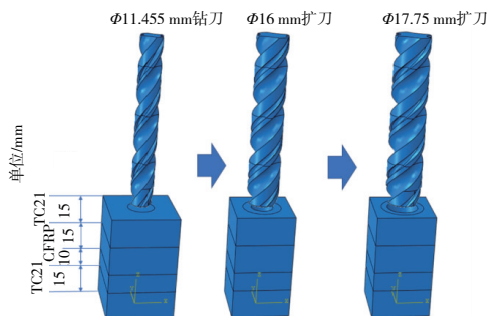


图 2 叠层总厚 55 mm 下方方案 B 装配模型及钻孔工艺

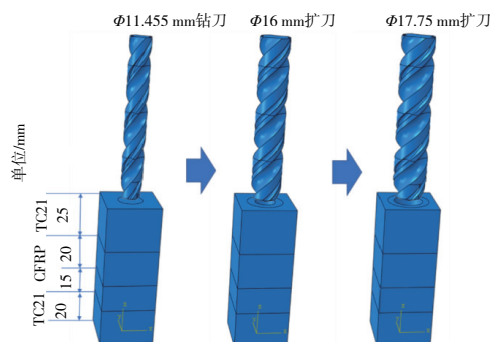


图 3 叠层总厚 80 mm 下方方案 B 装配模型及钻孔工艺

1.2 TC21/CFRP/TC21 叠层结构材料本构模型

材料本构模型是用来描述材料的力学性质,表征材料变形过程中的动态响应的模型。利用 Johnson-Cook 模型构建 TC21 本构模型,模型可表示为^[7]

$$\sigma = [A + B (\varepsilon_p)^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中: σ 为流动应力; A 、 B 、 n 、 C 和 m 为材料系数; ε_p 为应变; $\dot{\varepsilon}$ 为应变率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率; T_{room} 和 T_{melt} 分别为室温 and 材料熔化温度。TC21 的 Johnson-Cook 本构模型的各个参数如表 1 所示,TC21 的性能参数如表 2 所示。

表 1 TC21 的 Johnson-Cook 本构模型参数

A/ MPa	B/ MPa	n/ MPa	C	m	ε_0	$T_{\text{room}}/$ ℃	$T_{\text{melt}}/$ ℃
782.7	498.4	0.28	0.028	1	1×10^{-5}	20	1 650

表 2 TC21 性能参数

密度/ (kg/m ³)	弹性模量/ MPa	泊松比	导热率/ (W/m·℃)	比热容/ (J/kg·℃)
4 440	230 000	0.33	6.8	611

在有限元仿真中,常用 Hashin 准则分析 CFRP 的损伤产生及损伤演化^[8-9]。Hashin 准则包括纤维的拉伸和压缩失效,基体的拉伸和压缩失效。

纤维拉伸破坏 ($\sigma_{11} \geq 0$) 以及纤维压缩破坏 ($\sigma_{11} < 0$) 失效因子计算式为

$$\begin{cases} F_f^T = \left(\frac{\sigma_{11}}{\sigma_{11}^f} \right)^2 + \alpha \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_{12}^f} \right)^2, \sigma_{11} \geq 0 \\ F_f^C = \left(\frac{\sigma_{11}}{\sigma_{11}^f} \right)^2, \sigma_{11} < 0 \end{cases} \quad (2)$$

基体拉伸破坏 ($\sigma_{22} \geq 0$) 以及基体压缩破坏 ($\sigma_{22} < 0$) 失效因子计算式为

$$\begin{cases} F_m^T = \left(\frac{\sigma_{22}}{\sigma_{22}^{f,t}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_{12}^f} \right)^2, & \sigma_{22} \geq 0 \\ F_m^C = \left(\frac{\sigma_{22}}{2\tau_{12}^f} \right)^2 + \left[\left(\frac{\sigma_{22}^{f,c}}{2\tau_{12}^f} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_{22}}{\sigma_{22}^{f,c}} + \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_{12}^f} \right)^2, & \sigma_{22} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: m 和 f 分别表示基体和纤维; C 和 T 分别表示压缩和拉伸; $\sigma_{11}^{f,t}$ 为纤维纵向拉伸强度; $\sigma_{11}^{f,c}$ 为纤维纵向压缩强度; $\sigma_{22}^{f,t}$ 为基体横向拉伸强度; $\sigma_{22}^{f,c}$ 为基体横向压缩强度; τ_{12}^f 为剪切强度; α 为切应力对纤维拉伸破坏的影响系数。CFRP 损伤模型下的各个参数如表 3 所示, CFRP 的性能参数表如 4 所示。以内聚力单元模拟复合材料层间损伤, 采用二次名义应力准则。

表 3 CFRP 的 Hashin 失效准则参数 单位: MPa

$\sigma_{11}^{f,t}$	$\sigma_{11}^{f,c}$	$\sigma_{22}^{f,t}$	$\sigma_{22}^{f,c}$	τ_{12}^f
1 900	1 000	84	250	110

表 4 CFRP 性能参数

$P/$ (kg/m ³)	$E1/$ MPa	$E2, E3/$ MPa	ν_{12}, ν_{13}	ν_{23}	$G12, G13/$ MPa	$G23/$ MPa
1 580	112 000	8 200	0.3	0.4	4 500	3 000

1.3 接触、边界条件和切削参数

定义法向接触属性为硬接触, 切向接触属性采用罚函数, 摩擦因数设置为 0.3。刀具和工件之间、工件与工件之间接触采用面面接触。TC21/CFRP/TC21 叠层板 4 个侧面约束所有移动和转动自由度, 限制钻头在 x 和 y 方向的移动和转动自由度, 赋予钻头沿 z 方向的进给速度及绕 z 方向的主轴转速, 图 4 为叠层结构三维模型边界条件设置。

由于本文的研究对象是 TC21/CFRP/TC21 叠层板的总厚度和钻孔分刀方案, 且仿真过程中需要排除切削参数对仿真结果的影响, 因此所有的钻削仿真都采用一致的刀具转速和进给速度, 刀具转速为 1 500 r/min, 进给速度为 0.03 mm/r。

1.4 网格设置

本研究中, CFRP 和 TC21 的单元类型采用 C3D8R, 层间的内聚力单元层的单元类型为 COH3D8。单元尺寸方面, 在保证计算精度的同时, 缩短计算时间, 只对制孔及其临近区域进行网

格细化, 网格尺寸设置为 0.05~0.075 mm 渐变, 厚度方向尺寸为 0.075 mm, 其他区域采用尺寸较大的网格, 尺寸为 1.2 mm。另外, 由于刀具并不是本文研究对象, 将其设置为刚体, 其单元类型采用 C3D4 单元, 网格尺寸为 0.4 mm。



图 4 叠层结构三维模型边界条件设置

2 有限元结果分析与讨论

2.1 不同分刀方案钻削力和转矩对比分析

钻削力和转矩是制孔过程的两个重要物理量, 影响制孔质量和刀具寿命。对两种分刀方案钻削过程进行仿真, 本文重点关注钻削力和转矩, 暂不考虑钻削热, 所以只讨论钻削力和转矩的变化情况。方案 A 与方案 B 钻削 55 mm 的叠层构件钻削力对比如图 5 所示, 转矩对比如图 6 所示 (本刊黑白印刷, 相关疑问咨询作者)。

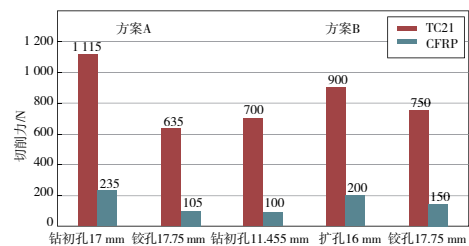


图 5 方案 A 与方案 B 钻削力对比图

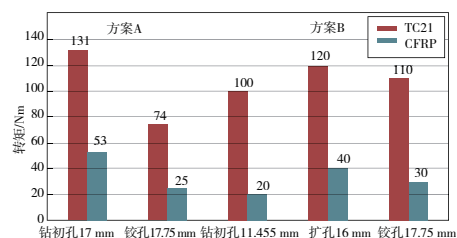


图 6 方案 A 与方案 B 转矩对比图

从图 5 和图 6 可以看出,方案 A 钻削 55 mm 厚度的叠层构件过程钻削力和转矩均有下降的趋势;而方案 B 钻削 55 mm 厚度的叠层构件过程钻削力和转矩均有先上升后下降的趋势。

方案 A 钻削过程中的钻削力和转矩均比方案 B 大。方案 A 钻削初孔与方案 B 钻削初孔相比,方案 B 的 TC21 钻削力和转矩分别降低了 37.27%、23.66%,CFRP 钻削力和转矩分别降低了 55.32%、52.83%。对于大孔径钻削工况,刀具增多可以使加工余量分配得更加精细、均匀,平均钻削力会更小,制孔质量更好,刀具磨损相对更小。

综上所述,可证明通过降低初孔孔径、改多刀扩孔方式的方案 B 有两个优点:更低的制孔钻削力,能有效减少 CFRP 制孔分层;更加均匀的余量分配,可以有效改善制孔过程受力分配不均衡的情况,以达到提高刀具使用寿命的目的。

2.2 不同叠层厚度钻孔过程的钻削力与力矩情况

由上一节可知,方案 B 分刀方案刀具受力更均衡、使用寿命长,因此采用方案 B 分刀方案对 55 mm 厚度和 80 mm 厚度的 TC21/CFRP/TC21 叠层构件钻削进行仿真分析,得到 55 mm 厚度及 80 mm 厚度的叠层构件钻初孔 $\Phi 11.455$ mm 钻削力随时间的变化曲线如图 7、图 8 所示。

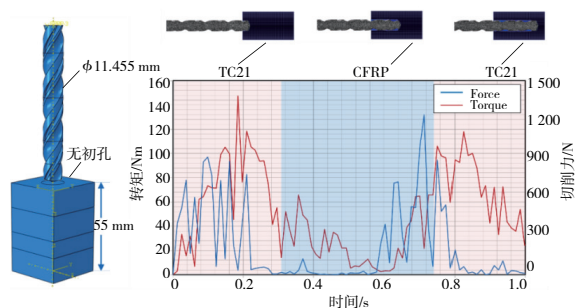


图 7 叠层总厚 55 mm 下钻孔 $\Phi 11.455$ mm 钻削力及转矩曲线

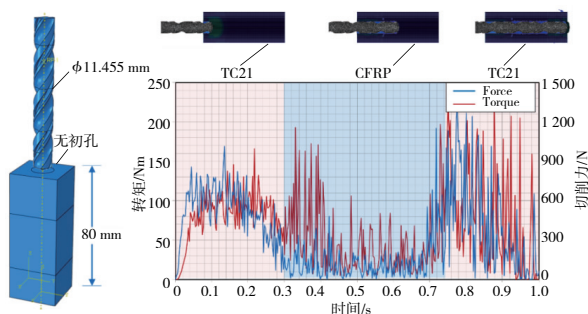


图 8 叠层总厚 80 mm 下钻孔 $\Phi 11.455$ mm 钻削力及转矩曲线

对“扩孔 $\Phi 16$ mm”和“铰孔 $\Phi 17.75$ mm”的工序方案进行仿真分析,55 mm 厚度叠层构件扩孔钻削力和转矩随时间的变化特征曲线分别如图 9、图 10 所示,80 mm 厚度叠层构件铰孔钻削力和转矩随时间的变化特征曲线分别如图 11、图 12 所示。

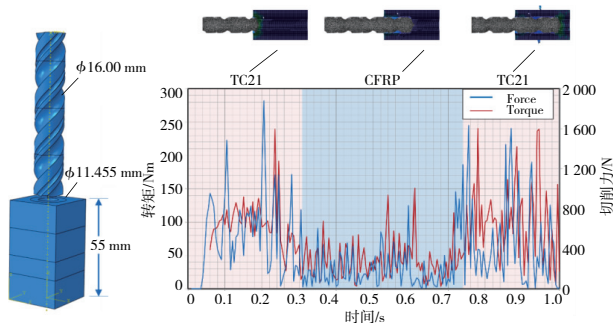


图 9 叠层总厚 55 mm 下初孔 $\Phi 11.455$ mm—扩孔 $\Phi 16.00$ mm 钻削力及转矩曲线

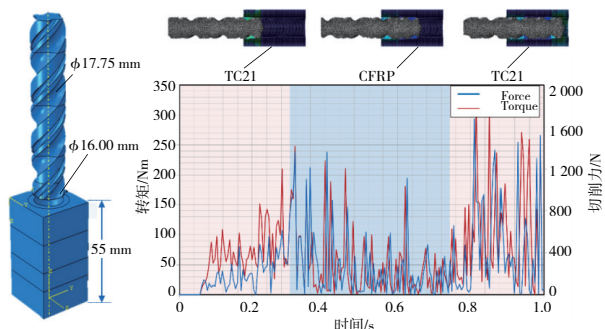


图 10 叠层总厚 55 mm 下扩孔 $\Phi 16.00$ mm—铰孔 $\Phi 17.75$ mm 钻削力及转矩曲线

叠层总厚 55 mm 钻初孔 $\Phi 11.455$ mm—扩孔 $\Phi 16.00$ mm 过程中,TC21 钻削力平均为 900 N,转矩平均为 120 Nm,CFRP 钻削力平均为 200 N,转矩平均为 40 Nm;扩孔 $\Phi 16.00$ mm—铰孔 $\Phi 17.75$ mm,TC21 钻削力平均为 750 N,转矩平均为 110 Nm,CFRP 钻削力平均为 150 N,转矩平均为 30 Nm。

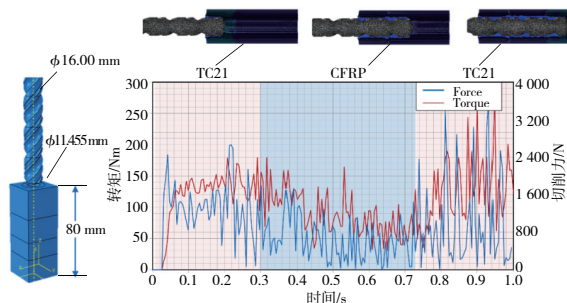


图 11 叠层总厚 80 mm 下初孔 $\Phi 11.455$ mm—扩孔 $\Phi 16.00$ mm 钻削力及转矩曲线

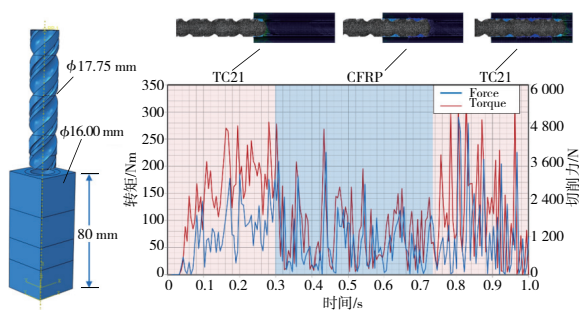


图 12 叠层总厚 80 mm 下初孔 $\Phi 16.00$ mm—扩孔 $\Phi 17.75$ mm 钻削力及转矩曲线

叠层总厚 80 mm 钻初孔 $\Phi 11.455$ mm—扩孔 $\Phi 16.00$ mm, TC21 钻削力平均为 1 300 N, 转矩平均为 170 Nm, CFRP 钻削力平均为 312 N, 转矩平均为 60 Nm; 扩孔 $\Phi 16.00$ mm—铰孔 $\Phi 17.75$ mm, TC21 钻削力平均为 1 000 N, 转矩平均为 140 Nm, CFRP 钻削力平均为 220 Nm, 转矩平均为 42 Nm。

图 13 为钻孔过程工件 Mises 应力分布情况。在钻孔加工时, 总体来看, 钻削钛合金时的应力集中更加明显。钻削初期, 由于横刃与工件挤压作用和主切削刃切削长度的增加, 钻削力和转矩快速增大; 稳定钻削阶段, 仅主切削刃参与切削, 切削直径逐渐增大, 钻削力和转矩稳定增加, 达到峰值后钻削力和转矩有所减小; 钻削后期, 在副切削刃参与切削后, 主切削刃切削长度变短, 钻削力和转矩迅速变小, 因副切削刃与孔壁的挤压摩擦作用, 钻削力和转矩曲线波动较大。应力集中在钻头刀尖区域以及横刃处, 沿径向区域扩展。在应力集中区域, 刀具与工件的摩擦会加剧刀具的机械磨损, 造成刀具的使用寿命缩短。

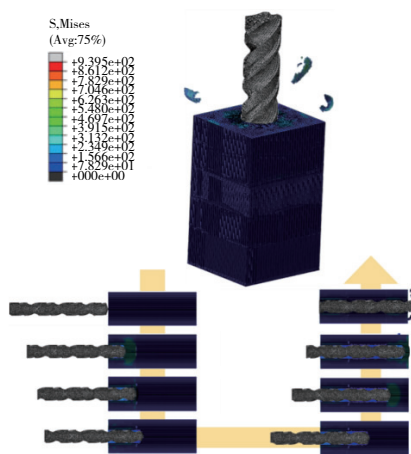


图 13 总厚度 80 mm、孔径 11.455 mm 钻孔仿真结果

图 14 和图 15 分别为总厚度 55 mm 与 80 mm 叠层构件的钻削力图、转矩图。从图中可以发现工件越厚, 钻削力和转矩整体水平越大, 越容易出现刀具磨损; 在扩孔 $\Phi 16$ mm 过程, 此过程扩孔加工余量较大, 钻削力和转矩整体水平都偏大, 容易出现刀具磨损; 铰孔 $\Phi 17.75$ mm 过程, 此过程扩孔的厚度偏小, 钻削力和转矩整体水平都偏小, 不容易出现刀具磨损。

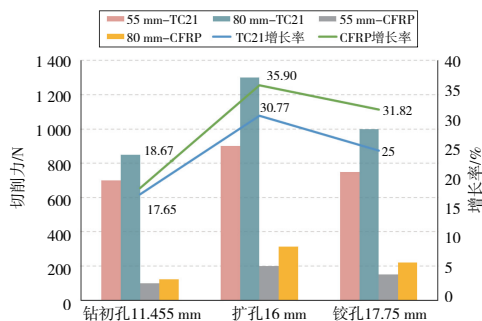


图 14 总厚度 55 mm 和 80 mm 叠层构件钻削力对比图

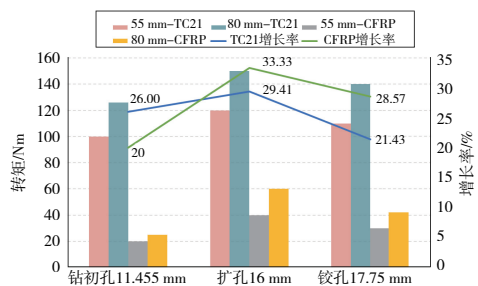


图 15 总厚度 55 mm 和 80 mm 叠层构件转矩图

3 验证试验设置及结果

3.1 试验设置及条件

钻削试验在型号为 MODUMILL 250T 的五轴数控机床上进行, 如图 16 所示。机床转速范围 100~12 000 r/min, 主轴功率为 30 kW, 最高转速为 18 000 r/min, 功率 12 kW, 转矩 87 Nm, 最大工作进给速度 20 m/min。对于钻削试验刀具, 本文选 Yestool 公司生产的型号为 YTDI-220T-FS 麻花钻, 顶角 120° , 螺旋角 22° , 横刃斜角 45° , 横刃厚度 0.76 mm。

所用复合材料工件为国产 T800 级碳/环氧预浸料制备的 CFRP, CFRP 材料属性如表 5 所示。层压板铺层顺序、尺寸与仿真所用复材铺层一致, 层压板上下表面各铺贴一层织物, 所用钛合金工件为飞机常用的 TC21 锻件。选取 TC21/CFRP/

TC21 叠层构件大孔径大厚度加工工况作为实验对象,总体厚度 55 mm 和 80 mm 两种工况,两种厚度的叠层顺序与仿真叠层构件保持一致。钻削参数如表 6 所示,方案 A 和方案 B 每组进行 3 次试验。



图 16 钻削试验平台

表 5 T800 CFRP 材料属性

密度 / (kg/m ³)	纤维方向拉 伸强度/MPa	泊松比	纤维方向拉 伸模量/GPa	玻璃化转 变温度/℃
1.58×10 ³	5.49×10 ³	0.28	294	205

表 6 各工序试验参数

方案	孔加工工序 尺寸/mm	转速/ (r/min)	进给速度/ (mm/r)
方案 A	钻初孔 φ17	300	0.100
	铰孔 φ17.75	350	0.071
方案 B	钻初孔 φ11.455	260	0.077
	扩孔 φ16	300	0.067
	铰孔 φ17.75	300	0.067

3.2 试验结果

通过试验,得到麻花钻磨损情况和出入口缺陷图,分别如表 7、表 8 和图 17 所示。对比可知,方案 A 刀具磨损较为严重,可能导致刀具直接报废,而方案 B 刀具磨损在合理范围。由有限元仿真可知,方案 A 在钻初孔阶段钻削力和转矩较大,且刀具受力分配不均衡,所以加快了刀具磨损。因此方案 B 分刀方案比方案 A 更适合加工大孔径大厚度 TC21/CFRP/TC21 叠层结构。

表 7 方案 A(初孔—铰孔)刀具磨损 单位:mm

总厚度	工序	实验 1	实验 2	实验 3
55	初孔 φ17.00	0.095	0.105	0.142
	铰孔 φ17.75	0.018	0.020	0.025
80	初孔 φ17.00	0.102	0.125	0.155
	铰孔 φ17.75	0.018	0.021	0.025

表 8 方案 B(初孔—扩孔—铰孔)刀具磨损

单位:mm

总厚度	工序	实验 1	实验 2	实验 3
55	初孔 φ11.455	0.045	0.048	0.052
	扩孔 φ16.000	0.020	0.022	0.025
	铰孔 φ17.750	0.021	0.024	0.025
80	初孔 φ11.455	0.055	0.056	0.062
	扩孔 φ16.000	0.025	0.030	0.032
	铰孔 φ17.750	0.021	0.025	0.025

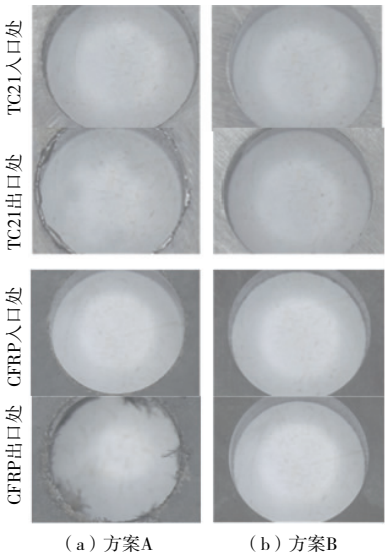


图 17 孔入口、出口缺陷图

由图 17 可知,方案 A 中 CFRP 和 TC21 在孔入口处都存在少量的毛刺,TC21 出口处存在大量毛刺,CFRP 在出口处存在大量毛刺和撕裂现象;方案 B 则相反。原因可能是方案 A 刀具磨损较为严重,且切削力较大,导致孔壁损伤较为严重,而方案 B 刀具磨损量小,刀具切削性能更好,则孔壁损伤较小。因此,分刀方案 B 更适合钻削大孔径、大厚度的 TC21/CFRP/TC21 叠层构件。

4 结语

本文针对 TC21/T800/TC21 大厚度、大孔径叠层结构制孔展开了研究,建立了叠层结构钻削仿真模型,对比了不同分刀方案 and 不同叠层结构的钻削力和转矩,得到以下结论:

1)通过有限元仿真和实验证明钻初孔—扩孔—铰孔相比钻初孔—铰孔加工余量分配更为均匀精细,钻削力和转矩较小,刀具磨损更小,刀具寿命更长,孔壁毛刺较少,证明了钻初孔—扩孔—

铰孔的分刀方案更适合钻削大厚度、大孔径叠层结构;

2)对于大厚度的叠层结构,可以发现工件越厚,钻削力和转矩整体越大,叠层结构的总厚度和钻削力呈现正相关。

参考文献:

- [1] MAIER A, SCHRAMM N, KROLL L. Temperature - dependent interlaminar shear strength of unidirectional continuous fiber-reinforced thermoplastic profiles[J]. Composite Structures, 2021, 255: 112959.
- [2] HASSAN E A M, GE D T, ZHU S, et al. Enhancing CF/PEEK composites by CF decoration with polyimide and loosely-packed CNT arrays[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019, 127: 105613.
- [3] 黄秋实,徐锦洪,林铁宇.碳纤维增强复合材料/钛合金叠层结构钻削仿真研究[J]. 工具技术, 2022, 56(5): 10-15.
- [4] 刘书暖,夏文强,王宁,等. 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(7): 193-203.

- [5] 谢昌嵩,王贤锋,陆泰屹,等. 复合材料/铝合金叠层扩孔刀具仿真优化[J]. 工具技术, 2021, 55(10): 91-94.
- [6] 黄树涛,张攀,王浩涛.高速钻削碳纤维/铝合金叠层复合材料的钻削力有限元仿真[J]. 工具技术, 2018, 52(5): 63-68.
- [7] AURICH J C, KIRSCH B, MÜLLER C, et al. Quality of drilled and milled rivet holes in carbon fiber reinforced plastics[J]. Procedia CIRP, 2014, 24: 56-61.
- [8] HASHIN Z, ROTE M A. A fatigue failure criterion for fiber reinforced materials [J]. Journal of Composite Materials, 1973, 7(4): 448-464.
- [9] HASHIN Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites[J]. Journal of Applied Mechanics, 1980, 47(2): 329-334.

收稿日期:2023-03-06

(上接第 165 页)

学生的技术技能,更重要的是培养了他们面对复杂问题时的分析和创新能力^[8]。综上所述,通过在模拟电子技术实验教学中增强学生互动与反馈机制,不仅提升了教学的互动性和有效性,也显著促进了学生批判性思维和问题解决能力的发展,为他们未来的学术和职业生涯打下了坚实的基础。

4 结语

虚拟仿真技术的应用标志着教育方法向更加高效、互动和技术驱动的方向发展,为传统教育模式带来了重要的补充和创新。随着虚拟仿真技术的不断发展和完善,预计其将在教育领域发挥更加重要的作用。特别是在模拟电子技术等实验密集型课程中,这种技术的应用有可能成为主流的教学方式之一。它不仅能够为学生提供更安全、更灵活的实验环境,还能够通过模拟复杂的实验场景,增加教学的深度和广度。此外,虚拟仿真技术的应用也将激励教育者和技术开发者进一步创新,探索更多将技术和教育相结合的新方法,为全球教育领域的发展带来新的动力和视角。

参考文献:

- [1] 姚鹏,杨卫军,任静,等.基于虚仿实验的模电理论教学与实验教学融合[J].实验室科学, 2023, 26(4): 128-131.
- [2] 杨迪,胡娟,陈亮.“模拟电子技术实验”课程改革探索与实践[J].吉林工程技术师范学院学报, 2023, 39(7): 35-39.
- [3] 张松华,陆秀令,洪俊.应用型高校“两性一度”模拟电子技术实验课程教学改革与实践[J].中国现代教育装备, 2023(11): 148-150.
- [4] 王永玲,李剑锋,赵玉杰,等.基于虚拟仿真技术的模拟电子技术实验教学模式改革[J].高教学刊, 2023, 9(8): 10-15.
- [5] 李晓冬,张明.翻转课堂理念下的 SPOC 混合式教学探索:以模拟电子技术实验为例[J].教育观察, 2019, 8(1): 106-108.
- [6] 常奕.基于虚拟仿真的“模拟电子技术”课程实验教学改革[J].计算机产品与流通, 2018(5): 179.
- [7] 张涛,于金铃,周芸,等.浅谈物理师范专业“模拟电子技术实验”创新素质培养的实验室环境[J].教育教学论坛, 2017(51): 262-263.
- [8] 张瑾.基于 Proteus 仿真的模拟电子技术实验教学[J].南方农机, 2017, 48(20): 191.

收稿日期:2023-12-19