

# CFRP/Ti叠层结构制孔仿真与实验研究

刘颖 李嘉陶 杨凡

中航西飞民用飞机有限责任公司 陕西 西安 710089

**摘要:** 针对CFRP/Ti叠层的钻削机理开展研究,通过CFRP/Ti叠层结构制孔仿真和实验对照,探究了钻削过程中的钻削机理,揭示了异质叠层结构钻削力演变规律。根据CFRP和钛合金不同的物理特性,确定其本构关系。对CFRP、钛合金和刀具进行关键参数及接触的设置,建立并求解制孔仿真模型。开展叠层结构制孔实验,分析不同参数下制孔轴向力在实验与仿真过程中的差异,结合应力云图和实验孔的截面图,探究轴向力与加工损伤之间的关联关系。

**关键词:** CFRP/Ti叠层; 制孔仿真; 加工损伤

## 引言

目前在飞机结构装配中经常使用CFRP与钛合金叠层结构。其相比传统的CFRP/Al叠层有更好的强度、刚度和在热电化学方面的兼容性<sup>[1]</sup>。飞机装配过程中存在大量制孔工作,制孔质量直接关系到生产成本、装配质量和飞机安全性。为了提高CFRP/Ti叠层结构的制孔质量和加工效率,通常用相同参数一体化制孔来加工叠层结构<sup>[2]</sup>。因两种材料的材料性能和制孔参数差异很大,在加工过程中容易导致层间间隙、毛刺、孔壁损伤等一系列缺陷<sup>[3]</sup>。尽可能减少制孔缺陷,这是飞机装配中急需解决的一个重要问题。本文通过CFRP/Ti叠层结构的制孔仿真分析和实验对照,研究了钻削过程的切削机理,揭示了钻削力的演变规律,旨在减少制孔过程中的质量缺陷,提高飞机装配质量。

## 1 CFRP/Ti 叠层结构钻削仿真模型

### 1.1 模型几何参数及材料参数

建立的有限元模型与实验用的材料参数尺寸相同。实验采用的CFRP材料是T700/TDE-85碳纤维环氧树脂,铺层方式为 $[0^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ/0^\circ]_{4s}$ ,采用的钛合金是Ti-6Al-4V。尺寸为:150mm×30mm、CFRP厚4.5mm,钛合金厚3mm。

本文将采用简化模型对CFRP/Ti叠层结构制孔进行仿真。CFRP模型简化为9层,纤维方向按实验材料,钻头使用航标推荐的硬质合金标准麻花钻,直径为6mm,顶角为118°,牌号为YG8。材料性能材料性能参考行标规范。

### 1.2 CFRP/Ti叠层结构的本构模型及损伤准则

目前的有限元仿真模型中,复合材料普遍采用Hashin失效准则,CFRP材料模型选用弹性本构模型,不考虑塑性应变的影响。通常用Johnson-Cook模型对金属材料进行

定义,也适用于Ti6Al4V,本文采用该模型对钛合金进行定义。

### 1.3 仿真模型的建立

本文中的钻头和叠层样板是采用CATIA建模,进行网格划分后,导入ABAQUS进行仿真。采用铺层建模法来模拟碳纤维的复合材料层合板的特征,在compositelayup中针对每一层板赋予复合材料纤维方向。本文所建立的CFRP/Ti叠层结构钻削模型采用ABAQUS中的Dynamic-Explicit模块进行求解。最终的装配体如图1所示。



图1 钻削有限元网格模型

根据实际的加工状况,将刀具与实验样件之间的摩擦力系数设定为0.5。设定钻头为刚体,在仿真模拟过程中钻头的外形与尺寸不会随着加工的深入发生改变。限制叠层板材的X、Y、Z三个方向自由度(即 $U_y = U_z = U_{rx} = U_{ry} = U_{rz} = 0$ ),结合实验的装夹特点,边界条件为材料对边的侧边固定。对于钻头,设置X、Y两个方向的速度和转速为零(即 $U_x = U_y = U_{rx} = U_{ry} = 0$ ),其加工驱动方式为通过把位移和速度施加在位于钻头轴线上参考点,此点通过刚体约束与钻头进行绑定。

## 2 CFRP/Ti 叠层结构钻削仿真模型求解与分析

### 2.1 仿真参数的设置

在对CFRP/Ti复合叠层结构进行制孔时,主要参考钻削钛合金的加工参数。参数选择区间为:主轴转速选400~1600r/min,进给量选0.02~0.12mm/r。本文在钻削仿真过程分析中选取了一组较为典型的参数组合,即主

轴转速 $S=500\text{r/m}$ ，进给量 $f=0.06\text{mm/r}$ ，钻顶角 $k=118^\circ$ 。在后续与实验对比进行模型验证时，采用了多组对比进行分析。

### 2.2 仿真结果分析

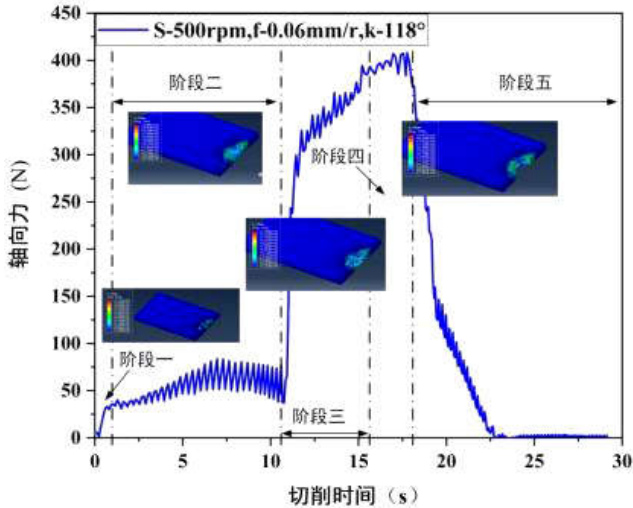


图2 CFRP/Ti叠层结构钻削力仿真输出曲线

如图2所示，CFRP/Ti叠层结构钻削力仿真曲线可分为五个阶段进行分析。阶段一，随着横刃接触并挤入CFRP板，轴向力快速增长直至稳定状态，通过应力云图可以看出应力集中在横刃附近；阶段二，在主切削刃作用下，轴向力稳定，应力沿径向扩展，这是由于刀具旋转对入口层合板形成了剥离作用，进而产生了入口撕裂和分层损伤；阶段三，钻头接触钛合金，轴向力剧增后趋稳，孔壁出现大量应力集中区域，钛合金切屑会引

起孔壁表面粗糙度增大，随着刃尖接触钛合金，下层板在集中载荷作用下开始发生向下的弹性变形，降低了对上层板的支撑作用，此时上层板在均布载荷的作用下出现分层；阶段四，钻削钛合金板，轴向力稳定，应力分布均匀化，随着加工深入，应力增大，这是由于钛合金加工时形成连续切屑，排屑时与孔壁挤压从而增大上层板应力，进一步恶化孔壁形貌；阶段五，钻头钻出钛合金，轴向力快速减小直至降为零。通过比较不同阶段的应力云图和轴向力变化可以发现，通过仿真过程中的应力分布和轴向力的演变规律，可以有效地揭示损伤成型的过程。

### 3 CFRP/Ti 结构轴向力实验与仿真结果分析

#### 3.1 实验准备

实验使用 $150\times 30\times 4.5\text{mm}$ 的CFRP板和3mm厚的钛合金板，在加工材料两侧分别预制两个连接孔，为配合夹具尺寸，两连接孔间距为100mm。实验用刀具为直径6mm、顶角 $118^\circ$ 硬质合金麻花钻。主轴转速选取500r/min和1500r/min，进给率选取 $0.05\text{mm/r}$ 和 $0.15\text{mm/r}$ ，共进行4组验证试验。

#### 3.2 实验结果分析

相较于刀具顶角，主轴转速和进给率对于轴向力的影响更大且更为复杂。因此，本文开展了4组实验，并通过与仿真结果进行对比，分析在实际钻削过程中产生偏差的原因，并结合应力云图和电镜扫描图探究钻削过程与实际制孔损伤成型机理之间的深度关联关系。

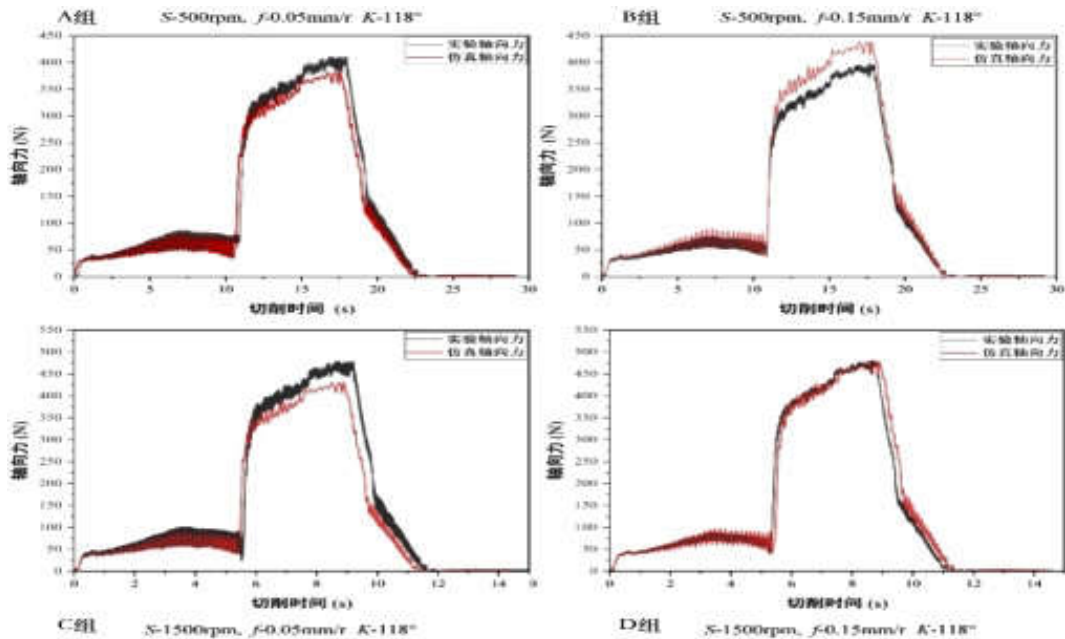


图3 不同加工参数下实验轴向力与仿真轴向力对比

如图3所示,在实际钻削CFRP/Ti叠层结构过程中,加工的振幅较大,但是从整体趋势来看,实验与仿真输出的轴向力最大误差小于25%,这充分地证明了仿真结果的有效性。通过对比发现,在A组的加工工况下,仿真计算的轴向力整体比实际测量值小,这是由于高进给量作用下,复合材料刚度差引发层间间隙,同时下层板在挤压作用下变形失去了对上层复合材料的支撑功能,易形成分层损伤。由于仿真过程中未考虑弹性形变载荷,因此在仿真的轴向力在层间较为稳定。在C组的加工工况下,仿真轴向力略高于实测值,尤其是加工钛合金时,主要原因是高转速条件下钛合金产生大量切削热,高温使材料软化更容易被去除,仿真未考虑温度对材料性能变化的影响。在D组的加工工况下,轴向力实测值振幅减小,这是因为进给量较大,同时在高转速下材料去除效率增加,加工过程较稳定。对比发现在不考虑结构变形和钻削热的情况下,建立的仿真模型能有效展示CFRP/Ti叠层结构钻削过程。

通过对比可知,异质叠层结构在实际钻削过程中的轴向力并不稳定,特别是在第三阶段,主要考虑复合材料的出口损伤以及层间损伤,以及考虑高温对于复合材料的影响。本文通过对比各阶段的应力云图和制孔损伤图,进一步通过轴向力揭示损伤的成型和分布。

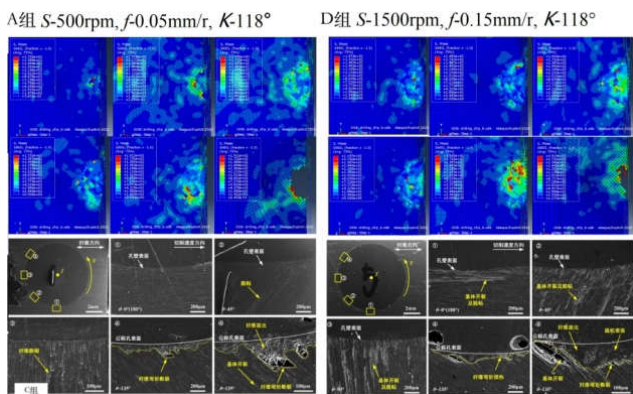


图4 孔周损伤和形成过程分析

如图4所示,在A组加工条件下,第一阶段主要以

横刃挤压为主,应力较为集中,同时因为转速较低入口段的剥离行为不明显,不易形成撕裂损伤;随着钻入第三阶段,由于其轴向力较低,复合材料不易产生分层损伤,但是在较低的转速下材料不易去除,因此产生了较大的应力集中;随着刀具进一步深入,钛合金在低进给率作用下出口毛刺较少,但是在低转速的加工条件下钛合金易形成连续切屑,在排出过程与孔壁进行摩擦产生了大量的应力集中点。通过对比出口表面的损伤可以发现,在低水平的加工条件下,孔周整体质量较好,无明显的分层和撕裂现象,并在低转速作用下无高温的侵蚀。

在D组的加工条件下,损伤在各阶段都发生并且随着刀具加工逐渐扩展。在第一阶段由于转速较大,材料应力扩展范围增加,在剪切力作用下剥离形成了入口撕裂;随着主切削刃的逐渐深入,上表面应力进一步扩展,容易形成了十分严重的撕裂损伤,同时轴向力的增大导致出口表面的应力集中且数值偏大,此时产生了分层损伤,失去支撑,在高进给作用下,钛合金切削过程中出口位置的应力集中表明形成了大量的钛合金毛刺。

结束语

本研究通过ABAQUS软件对CFRP/Ti复合材料的钻孔过程进行了详细的仿真模拟,并通过实验验证了模拟的有效性。研究建立了叠层结构钻削的仿真模型,分析了钻削过程中不同加工阶段的轴向力变化特性。通过比较应力云图和实验中的孔截面图,研究揭示了CFRP层合板加工损伤的轴向和径向分布规律,对于理解和优化CFRP/Ti叠层结构的钻削过程提供了重要的指导。

参考文献

[1]陈绍杰.复合材料技术发展对我国航空工业的挑战[J].高科技纤维与应用,2010,35(1):1-7.  
 [2]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.  
 [3]徐锦决,李超,冀敏.碳纤维增强复合材料/钛合金叠层结构钻削研究进展[J].工具技术,2020,54(12):3-9.