

碳纤维复合材料/钛合金叠层钻孔工艺优化

刘俊义¹ 孙会来² 聂晓菊¹ 赵方方²

(1 天津工业大学机械学院,天津 300387)

(2 天津大学机械学院,天津 3003887)

文 摘 在不同的工艺参数下用硬质合金麻花钻分别对碳纤维复合材料板和碳纤维复合材料板/钛合金叠层板进行钻孔,对钻孔过程用 Abaqus 有限元软件进行三维仿真,对比仿真和试验结果的轴向力和制孔效果。结果表明,在保证制孔的质量的前提下,选取合理的工艺参数,得到叠层材料制孔的工艺参数的优化结论。

关键词 复合材料,钛合金,临界轴向力,麻花钻

中图分类号: TG52; V262.4

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2018.02.016

Process Optimization for Drilling of Laminated Carbon Fiber Reinforced Plastic and Titanium Alloy Materials

LIU Junyi¹ SUN Huilai² NIE Xiaojun¹ ZHAO Fangfang²

(1 School of Mechanical Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387)

(2 School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract The drilling process of CFRP and CFRP/Titanium stacks under various processing parameters with twist drill was studied. And the process of drilling was simulated by using the finite element software Abaqus of 3d simulation module. Comparing critical thrust force and drilling hole quality of the simulation and test result, it shows that choose reasonable processing parameters under the premise of ensuring the quality of the hole, the optimum conclusions about processing parameters of drilling stacks materials can be obtained.

Key words CFRP, Titanium alloy, Critical thrust force, Twist drill

0 引言

近年来碳纤维复合材料(CFRP)在航空航天领域大量使用^[1-3],对其安全性能要求很严格,因此为提高制孔质量将其与金属材料叠加制孔,利用两种材料不同的特点获得更优良的综合性能。碳纤维脆性大、抗冲击能力差和层间强度低等缺点^[4],制孔过程中会出现孔入口劈裂、出口撕裂、起毛,孔壁发生分层、表面粗糙度大等问题。

碳纤维复合材料在钻孔的过程中,孔分层主要由于钻头推入和推出时轴向力超过临界轴向力导致,临界轴向力是在钻削碳纤维复合材料板时当刀具钻透最底层碳纤维时的轴向力,即最大轴向力。ZHANG

等人建立轴向力的理论模型,预测导致分层的临界轴向力^[5];王豪等人用不同种类的刀具对碳纤维复合材料/铝合金进行钻孔,选择出最优的制孔刀具^[6]。

本文为了探究碳纤维复合材料单板和碳纤维复合材料/钛合金叠层材料在不同工艺参数下用麻花钻制孔的情况,并将临界轴向力的大小作为制孔质量的评价标准,优化制孔工艺参数。

1 CFRP 制孔工艺模型建立

在碳纤维复合材料钻孔过程中,随着刀具的不断推进,复合材料板未切削层慢慢减小,轴向力不断增大,最底层的复合材料层与增强材料开始发生分离,产生分层,图1为麻花钻制孔分层的模型。

收稿日期:2017-05-31

第一作者简介:刘俊义,1990年出生,硕士研究生,主要从事复合材料加工方面研究。E-mail:Liu_JY1990@163.com

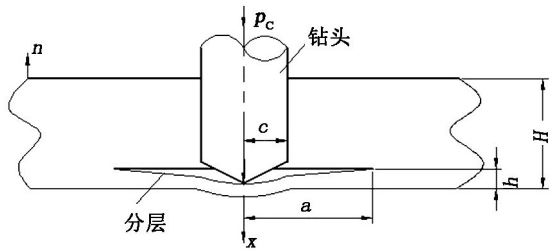


图1 麻花钻制孔分层的模型

Fig.1 Delamination model of drilling with twist drill

ZHANG 等人^[5]借助线弹性断裂力学(LEFM)和经典板壳弯曲理论,能量守恒方程可表示为:

$$p_c d\omega_0 = G_{IC} dA + dU \quad (1)$$

式中, p_c 表示钻削轴向力; $d\omega_0$ 表示钻头的位移; G_{IC} 表示单位面积上的临界裂纹扩展能量; dA 表示分层裂纹面积的增量; dU 表示应变能的微分。根据上式推导出临界轴向力模型可表示为

$$p_c = \sqrt{\frac{\pi G_{IC}}{\xi(C_3 - K)}} \quad (2)$$

式中, C_3 和 K 是由复合材料板的力学性能决定。

2 钻孔工艺的仿真模型建立

2.1 刀具和工件的模型建立

刀具选用的是标准麻花钻,材料为硬质合金 YG8,刀具参数为直径为 6 mm,顶角为 100° ,螺旋角为 30° 。

CFRP/钛合金叠层板的模型采用实体单元建模,碳纤维复合板的铺层角度为 $0^\circ/90^\circ$ 的正交板,共 13 层,如图 2 所示。

CFRP 板和钛合金板的厚度均为 2 mm。工件材料分别是 T300 和 Ti-6Al-4V。

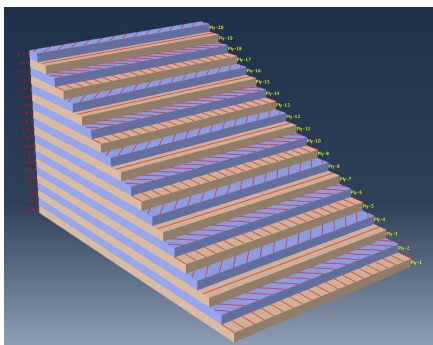


图2 CFRP 的铺层示意图

Fig.2 CFRP layer diagram

试验中用的是汉川 XK714D 数控立式铣床,数控系统为 FANUCOI-MD。主轴转速范围是 60 ~ 5 000 r/min,进给速度范围是 2.5 ~ 5 000 mm/min。轴向力的测试系统选用 KISTLER9257B 三向压电式测力仪,后处理软件是 DYNO WARE 分别对 x 、 y 和 z 三个方

向的轴向力和力矩进行处理。

2.2 仿真条件设置

对钛合金设置本构模型和损伤模型都是 JOHN-SON-COOK 模型^[7-9],碳纤维复合材料设置强度参数,损伤模型和演化都为 HASHIN 理论网格划分直接影响仿真的计算精度、切屑形状等,为了提高仿真速度,增加仿真精度,在钻头与板接触的位置,网格划分的小而密集;远离钻头的位置,网格划分的大而稀疏。

碳纤维复合材料和钛合金的网格单元类型为八节点实体单元(C3D8R),钻头的单元类型为 4 节点线性四面体单元(C3D4)。

仿真的刀具设置刚体,避免刀具变形对仿真结果的影响。

本文利用 Abaqus 软件对制孔过程进行有限元仿真,分别设置不同的主轴转速和进给量,观察不同加工参数对仿真结果的影响,对比分析仿真结果。试验的工艺参数如表 1 所示。

表 1 试验工艺参数表

Tab.1 Process parameters list in test

钻孔个数	主轴转速/ $r \cdot \min^{-1}$	进给速度/ $\text{mm} \cdot \min^{-1}$
1 ~ 3	2000	150/180/210
4 ~ 6	3000	150/180/210
7 ~ 9	4000	150/180/210
10 ~ 12	5000	150/180/210

3 结果分析

3.1 仿真结果分析

对仿真得到的结果进行分析,对比在进给速度为 150 mm/min 下不同主轴转速的临界轴向力图像,如图 3 所示。

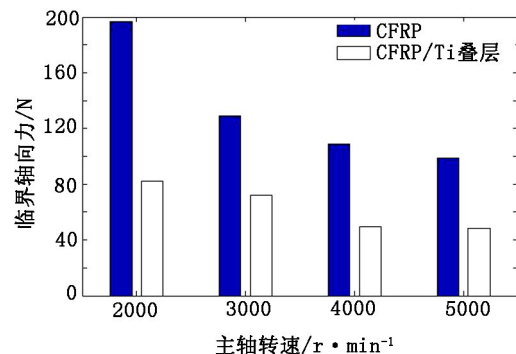


图3 仿真临界轴向力的对比图

Fig.3 Comparison of the critical thrust force in the simulation

由图 3 可以看出,在同一主轴转速下 CFRP/钛合金叠层的制孔的临界轴向力始终相对较小,而且仿真

结果中云图变化小,因此选取 CFRP/钛合金叠层材料制孔质量较好。仿真应力变化云图,如图 4 所示。可知,当钻头刚接触到 CFRP 板时云图开始有应力反应,说明轴向力开始产生。在刀具钻削过程中,由于刀具的不断推进 CFRP 板发生变形,在钻头附近的区域应力大且应力云图中应力方向沿着纤维方向。

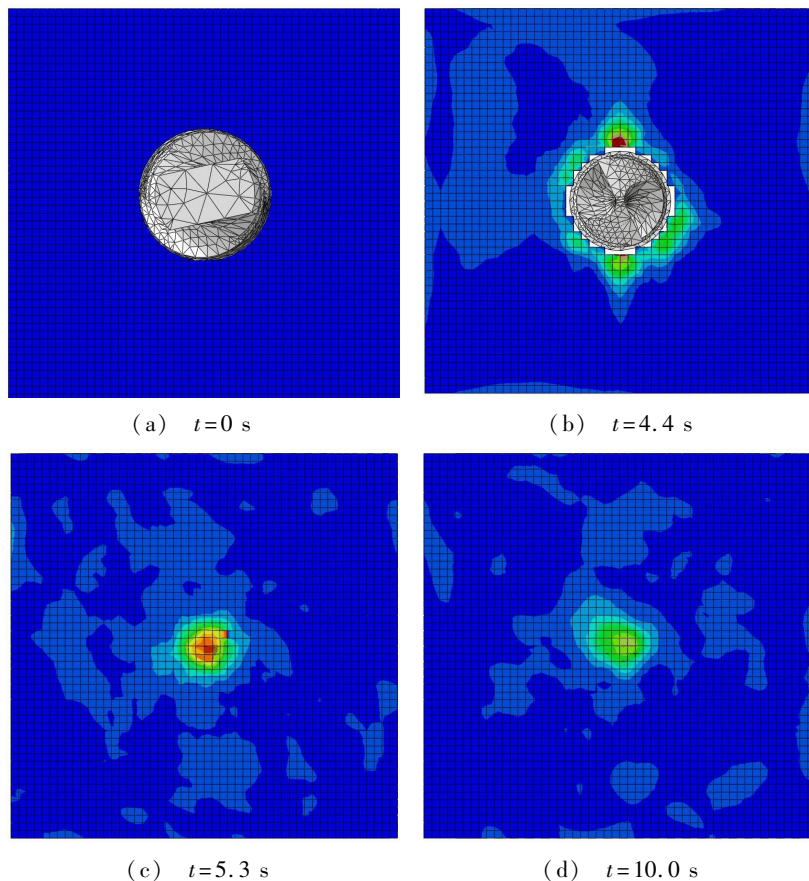


图 4 仿真过程中应力分析图

Fig. 4 Stress analysis diagram in the simulation

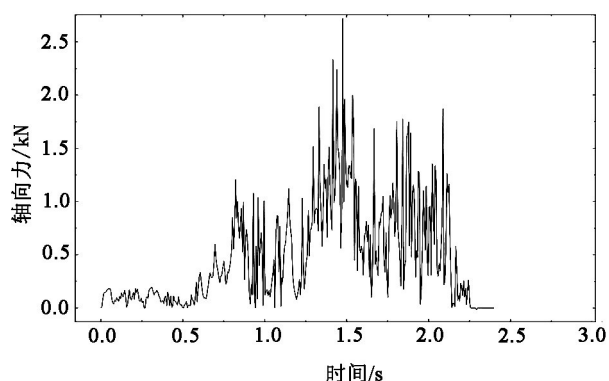


图 5 仿真过程中轴向力的变化图

Fig. 5 Thrust force variation curve in the simulation

由图 5 仿真制孔过程的轴向力的变化可分为 4 个阶段:

(1) $t=0 \sim 0.05$ s, 刀具开始接触并进入 CFRP

CFRP 的切屑主要是以粉末状出现,切屑排出的方向在孔出口处和沿着钻头的导屑槽。

麻花钻加工 CFRP/钛合金叠层材料过程中会产生轴向力,轴向力是导致孔出口处撕裂、CFRP 板分层的主要原因,直接影响制孔的质量,图 5 为仿真过程中轴向力的变化图。

板,刀具钻削横刃对 CFRP 板有垂直方向的压力,轴向力从零开始迅速增加;

(2) $t=0.05 \sim 0.7$ s, 是刀具进入 CFRP 板过程,轴向力平稳增加,在 0.7s 时轴向力最大,此时为导致 CFRP 板孔壁材料分层的临界轴向力;

(3) $t=0.7 \sim 1.5$ s, 刀具离开 CFRP 板进入钛合金板,轴向力急速增加,由于钛板比 CFRP 板硬度大,达到最大后慢慢减小并趋于平稳,此时的最大点是离开突破钛合金板时的轴向力;

(4) $t=1.5 \sim 2.3$ s, 轴向力先是趋于平稳,而后慢慢减小为 0,刀具慢慢钻出钛合金板直至刀具刀尖完全钻出。

3.2 试验结果分析

根据表 1 中的加工参数进行试验,结果如图 6 所示。由于轴向力的大小直接影响钻孔的质量,是造成孔出口撕裂、孔壁分层的主要原因。如图 6 可知,当

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2018 年 第 2 期

主轴转速为 5 000 r/min、进给速度为 150 mm/min 时,轴向力最小。对 CFRP 板的压力小,孔的出口毛刺少;高转速刀具对纤维切断的能力较强,撕裂长度相对较短,孔壁周围很少有分层。随着进给速度的增大,刀具主切削刃对未切削层的推力和横刃的挤压力增大,孔壁周围分层情况越严重,孔质量越差。

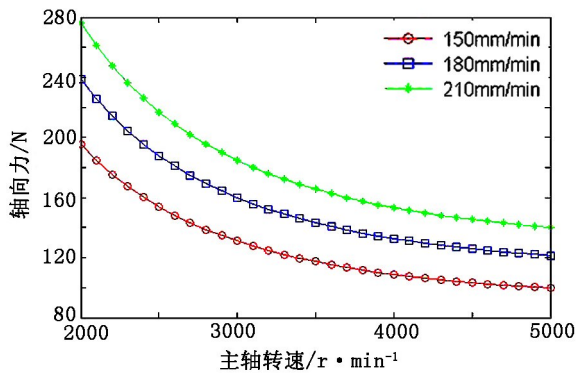


图6 试验中轴向力的变化图

Fig.6 Thrust force variation curves in the test

3.3 仿真与试验结果对比分析

上述仿真和试验探究了麻花钻加工 CFRP/钛合金叠层板,根据表 1 中的工艺参数进行仿真。将上述仿真与试验中测得临界轴向力数据进行对比见图 7。

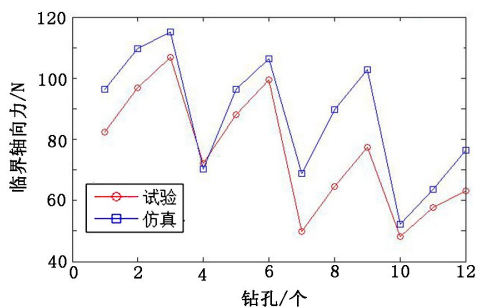


图7 仿真与试验数据对比

Fig.7 Comparison between simulation and test

由图 7 可以看出仿真与试验的临界轴向力的变化趋势几乎一致,当主轴转速一定时,临界轴向力随着进给速度的增大而增大;当进给速度一定时,临界轴向力随主轴转速的增大而减小。试验的临界轴向力数据整体要比仿真要小,主要是在仿真过程中接触设置、边界条件的设置等原因造成的,但仿真数据与试验数据的差距在误差内,通过仿真测量得到的轴向力

数据有效。

4 结论

(1)根据试验过程中工艺参数($n=2\ 000\sim 5\ 000$ r/min, $f=150\sim 210$ mm/min),得出选取较大主轴转速和较小进给速度进行钻孔,测得的临界轴向力最小,应力云图变化最小。

(2)加工 CFRP 板和 CFRP/钛合金叠层材料的试验过程中,用较大的主轴转速和较小的进给速度进行加工,临界轴向力的较小,孔质量相对较好。

(3)对仿真和试验结果进行分析,得出用硬质合金麻花钻 CFRP/钛合金叠层材料用高主轴转速和低进给速度可以尽量避免毛刺、出口处的劈裂和分层,孔质量更好。

参考文献

- [1] 苏霞. 先进复合材料制造技术[J]. 橡塑技术与装备, 2015 (24): 49-52.
- [2] 刘金刚, 沈登雄, 杨士勇. 国外耐高温聚合物基复合材料基体树脂研究与应用进展[J]. 宇航材料工艺, 2013, 43(4): 8-13.
- [3] 薛忠民, 张文玲, 吕琴. 2013 年中国复合材料行业发展回顾与展望[J]. 航空制造技术, 2014, 445(1/2): 41-46.
- [4] 姚运萍, 吴梦培, 徐雯. 碳纤维复合材料麻花钻钻孔轴向力的数值模拟[J]. 机械工程材料, 2015, 39(1): 107..
- [5] ZHANG L B, WANG L J, LIU X Y. A mechanical model for predicting critical thrust forces in drilling composite laminates[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2001, 215(2): 135-146.
- [6] 王豪, 胡坚, 孙鑫. 碳纤维复合材料/铝合金叠层制孔工艺试验研究[J]. 工具技术, 2015, 49(11): 63-67.
- [7] 惠旭龙, 牟让科, 白春玉, 等. TC4 钛合金动态力学性能及本构模型研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(22): 161-168.
- [8] ISBILIR O, GHASSEMIEH E. Finite element analysis of drilling of carbon fibre reinforced composites [J]. Applied Composite Materials, 2012, 19(3-4): 637-656.
- [9] SUN J, GUO Y B. Material flow stress and failure in multiscale machining titanium alloy Ti-6Al-4V[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 41(7): 651-659.