

CFRP-TC4 叠层板的钻削实验

胡立湘 李鹏南 陈明 邱新义

(湖南科技大学机电工程学院,湘潭 411201)

文 摘 采用硬质合金麻花钻对 CFRP-TC4 叠层板进行钻削试验,分析了钛合金层加工参数对钻削力、钻削温度和加工孔质量的影响。结果表明:随着转速的增加,钛合金层的轴向力逐渐减小;随着钛合金层进给量的增加,钛合金层与 CFRP 层的轴向力之比逐渐增加。运用指数公式模型对钛合金层轴向力实验结果进行回归分析,得到轴向力与转速以及进给量之间的关系式: $F_z = 2\ 088n^{-0.1222} \cdot f_r^{0.2016}$,并对该方程进行了检验验证,误差均小于 10%;在钛合金层进给量不变时,随着钛合金层转速的增加,CFRP 的最大烧伤环直径和层间最高温度逐渐增加。

关键词 钻削,轴向力,层间温度,回归分析,烧伤环

中图分类号:TH16

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2017.03.019

Investigation of Drilling CFRP - TC4 Stacks

HU Lixiang LI Pengnan CHEN Ming QIU Xingyi

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)

Abstract Using carbide twist drills, the influence of machining parameters on cutting force, cutting temperature and hole quality of titanium alloy have been analyzed. The results show that with the increase of speed, axial force of the titanium alloy layer decreases gradually, and with the increase of feed, the specific value axial force of CFRP/titanium alloy layer ratio increase gradually. The exponential formula models of drilling force were obtained through regression analysis method and the regulation of the drilling force influenced by the feed and cutting speed was obtained respectively, $F_z = 2\ 088n^{-0.1222} \cdot f_r^{0.2016}$. The error of the two equations have been tested both less than 10%. When the feed is constant on titanium alloy layer, with the increase of speed on titanium alloy layer, the maximum discoloration ring diameter and the highest interpass temperature of CFRP increased gradually.

Key words Drilling, Drilling axial force, Interpass temperature, Regression analysis, Discoloration ring

0 引言

CFRP-钛合金叠层板具有较好的抗腐蚀性和韧性。在航空航天与国防军工新产品的研制与生产中正在得到越来越广泛的应用^[1];由于 CFRP 和钛金都属于典型难加工材料并且具有不同的机械和热学特性^[2-3],使得加工 CFRP-钛合金叠层板时刀具磨损、破损非常快速,从而影响孔加工质量。因此一些专家学者进行了一些研究。Kyung-Hee Park^[4]发现钻削 CFRP-钛合金叠层板材料刀具磨损的主要原因是钛合金中硬质物和硬质纤维的刮擦以及切屑的粘结。

M.Senthilkumar^[5]分析了不同钻顶角的麻花钻钻削 CFRP-钛合金叠层板时的刀具磨损,结果表明小钻尖角的刀具磨损更严重。Dave.Kim^[6]发现钻削 CFRP-钛合金叠层板材料时,钛合金层主要是加速刀具后刀面的磨损,CFRP 层主要是损坏切削刃。在公开发表的文献中,关于钻削叠层板材料刀具磨损对钻削力和钻削温度的研究较少。Redouane Zitoun^[7]分析了钻削 CFRP-铝合金叠层板材料时转速和进给量对钻削轴向力的影响。Bin Luo^[8]建立了钻削 CFRP-钛合金叠层板材料的钻削轴向力预测模型,误差值小于

收稿日期:2016-04-05;修回日期:2017-02-13

基金项目:国家自然科学基金(NO.51275168)

第一作者简介:胡立湘,1991 年出生,硕士,主要研究碳纤维复合材料-钛合金叠层板加工系列化刀具切削性能。E-mail:924079729@qq.com

5%。本文主要对钻削 CFRP-钛合金叠层板的钻削力和钻削温度进行了研究,此外还分析了钻削温度对孔质量的影响等。

1 实验

1.1 材料和刀具

刀具为整体硬质合金麻花钻,材料为 K10,直径为 6 mm,钻顶角为 130°,螺旋角为 25°;CFRP-TC4 叠层板(碳纤维为 T700,钛合金为 Ti6Al4V),厚度分别为 3 和 10 mm。

1.2 实验设备

KV800 数控铣床,四川长征机床厂;采用由 Kistler 9253B23 测力仪测量 x 、 y 、 z 三个方向的钻削力,采样频率设置为 8 kHz,钻削轴向力测试系统见图 1。M & T HORIZON) 快速响应热电偶采集仪测温系统,上海好耐电子科技有限公司;日本基恩士超景深三维显微系统(KEYENCE VHX-500FE)。

生,且 CFRP 的切屑硬度很高,对刀具损伤很大,因此在钻削区域附近安装吸尘口,及时吸走大量的粉尘。

1.3 实验参数

钻削时分别采用不同的加工参数,CFRP 层加工参数固定: $n=2\ 000\ \text{r/min}$, $f=0.025\ \text{mm/r}$,钛合金层加工参数变化(TC4 层: $n=(300、500、700、900)\ \text{r/min}$, $f=(0.03、0.04、0.05、0.06)\ \text{mm/r}$,钻削时从碳纤维复合材料层钻入,钛合金层钻出。

2 结果和分析

2.1 钻削力的研究

CFRP 结构钻削所伴随的分层现象,通常是复合材料应用的瓶颈。减少 CFRP 层合板钻削分层的关键在于降低制孔过程中的钻削推力。由于 CFRP 具有较低的热导率,且树脂具有较低的转变温度(软化或熔融),因此钻削过程中所产生的热量会导致零件加工表面形成热损伤。随着刀具磨损的增加钻削轴向力和钻削温度也随之变化,从而影响孔加工质量。

2.1.1 切削用量对钻削力的影响

图 2 为当 CFRP 参数固定时,不同钛合金层加工参数下不同钻孔数的钻削轴向力。随着钻孔数的增加,CFRP 层和钛合金层轴向力呈增加的趋势。这是由于随着钻孔数的增加刀具的磨损也随之增加导致刀具变钝,而在高速下刀具的磨损程度相比于低速下更加严重。在相同加工参数下随着钻孔数增加钛合金层轴向力相比 CFRP 的轴向力增加更快速。此外,钛合金层轴向力约为 CFRP 层的 5 倍左右。

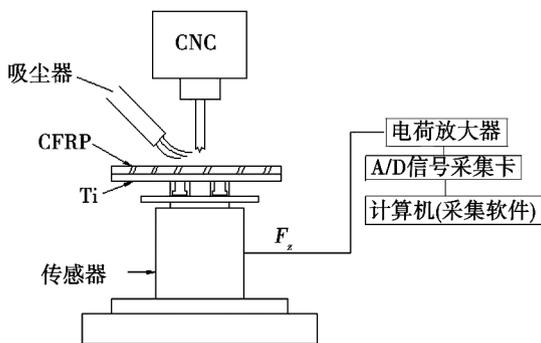


图 1 试验装置和数据采集系统

Fig.1 Schematic of test device and data acquisition system

试验采用干式切削,由于切削过程有导电粉尘产生

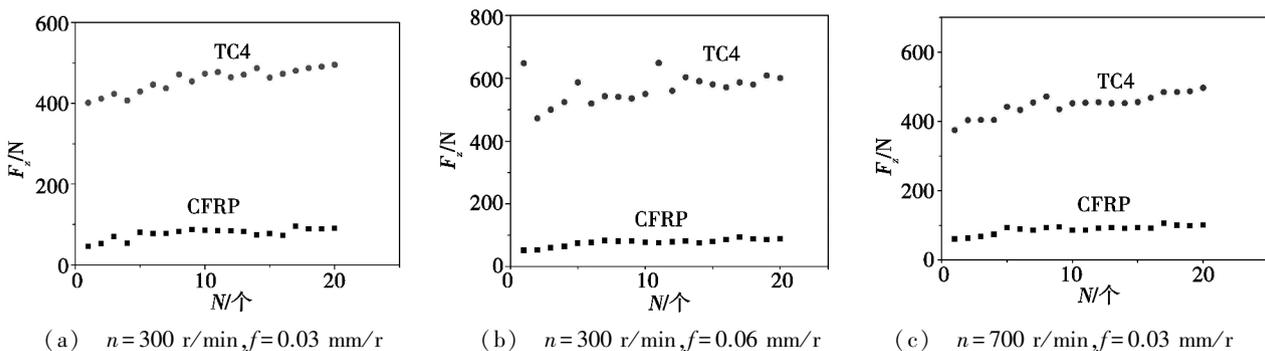


图 2 不同孔数 TC4 的轴向力变化趋势

Fig.2 Trends of axial force change with different numbers of holes

图 3 为当 CFRP 层参数固定时,不同钛合金层加工参数下的钻削轴向力(20 个孔的平均轴向力)。高钛合金层转速下的 CFRP 层的轴向力相比于低钛合金层转速下 CFRP 的轴向力更小。在进给速度为 0.05 mm/r 下,转速 500 r/min、700 r/min 分别比 300 r/min 的轴向力小了 9.5%、12.0%。在低转速下,随着进给量的增加钛合金层轴向力逐渐增加。这可能是由于随着进给量的增加切削温度逐渐升高^[9], (而

钛合金的热导率小,散热情况差。)使得切屑粘结在切削刃上,导致排屑受阻,增大了轴向力。

在较高转速下随着进给量的增加钛合金层轴向力先增加后减小。一方面,随着切削速度的增加切削温度逐渐升高,导致钻削力逐渐增加;另一方面,由于进给量的增加切屑横截面积也增加,使得断屑更加容易(切屑的刚度随着切屑的横截面积增加而增加),从而有利于切屑的排出;两方面因素叠加最终导致在

较高转速下轴向钻削力先增加后减小。

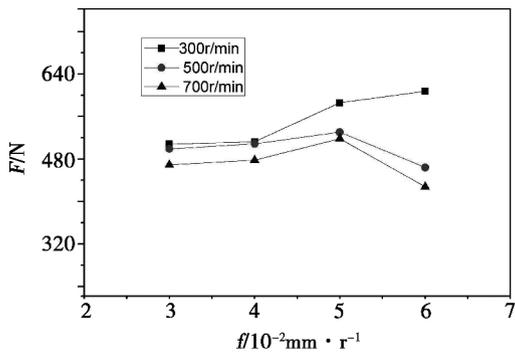


图3 钛合金层轴向力变化规律

Fig.3 Variation of titanium layer axial force

2.1.2 钻削轴向力预测模型及验证

2.1.2.1 钻削力建模

采用回归分析方法,建立整体硬质合金钻头钛合金层钻削力经验公式。在加工材料和刀具几何参数确定的前提条件下,指数关系能够较好的预测切削力与切削参数之间的这种复杂的关系,设钻削力经验公式的通用形式为^[10]:

$$F_z = D \times n^i \times f_r^j \quad (1)$$

式中, D 为常数, F_z 为轴向力, n 为主轴转速, f_r 为每转进给量。

2.1.2.2 钻削力的拟合公式

把选中的实验数据代入 Matlab 进行拟合,得到钻削力模型系数。为了验证该理论模型的准确性,试验转速为 900 r/min,进给量为 0.03、0.04、0.05 和 0.06 mm/r 的参数来校验理论值和实测值的符合度。钻削力经验公式拟合得:

$$D=2\ 088, i=-0.122\ 2, j=0.201\ 6$$

由(1)式可得:

$$F_z = 2\ 088n^{-0.1222} \times f_r^{0.2016} \quad (2)$$

可以看出,钛合金的轴向力与转速和进给量都密切相关。

2.1.2.3 钻削力公式的验证

表1为900 r/min时,不同进给量下,轴向力的理论预测值与实测值比较分析表。

表1 理论预测值与实测值比较分析

Tab.1 Comparative analysis of theoretical predictions and measured values

| $f_r/\text{mm} \cdot \text{r}^{-1}$ | F_z/N | | |
|-------------------------------------|----------------|-------|------|
| | 实测值 | 计算值 | 误差/% |
| 0.03 | 461.8 | 448.5 | 2.9 |
| 0.04 | 519.3 | 475.2 | 9.3 |
| 0.05 | 465.4 | 497.1 | 6.4 |
| 0.06 | 499.1 | 515.7 | 3.2 |

由表1可知,钛合金轴向钻削力的最大误差为9.3%,轴向误差值均小于10%,说明理论公式预测的宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2017年 第3期

轴向力同实验所得的轴向力较符合。

2.2 钻削温度的研究

2.2.1 切削用量对钻削温度的影响

钻孔中的切屑变形,在动力学方面表现出一定的钻削抗力,切屑基本变形和切屑与前刀面摩擦的能量消耗,并全部转化成热能,构成了钻削中的热源。这些热量由切削区经刀具、工件和切屑等途径散出。在切削热的形成和消散过程中,刀具、工件、切屑均吸收一定比例的热量。图4为当CFRP层参数固定时,不同钛合金层加工参数下层间温度的变化趋势(CFRP和钛合金的接触区)。随着钛合金层转速的增加,层间温度也增加。这可能是由于一方面随着转速的增加导致钻削温度的上升,另一方面可能是由于随着钻削温度的上升导致切屑不能顺利排出,堵塞螺旋槽从而使热量不能随着切屑顺利排出(切削时有相当一部分热量传入了切屑^[21])。

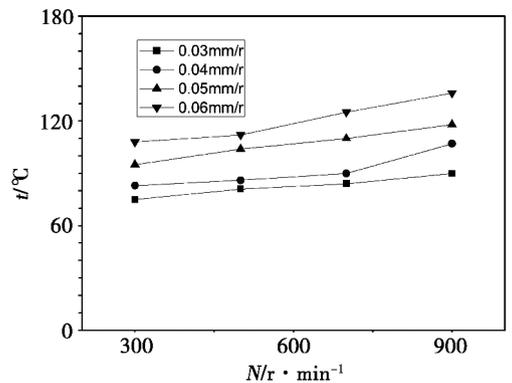


图4 钻孔数与层间温度的变化曲线

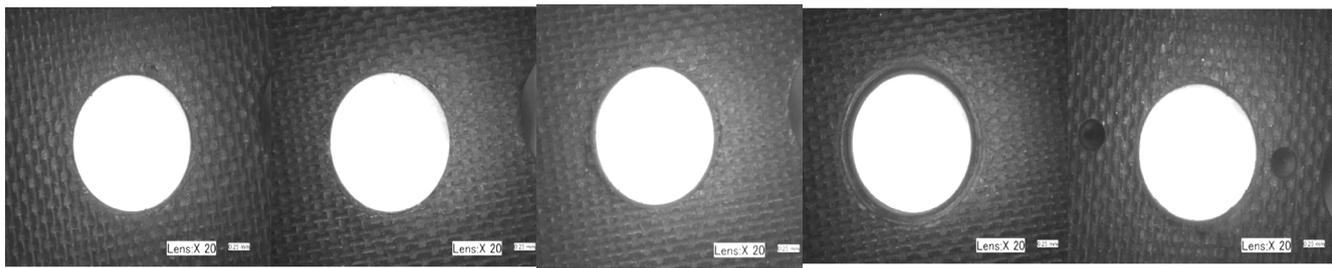
Fig.4 Temperature versus the number of layers

2.2.2 钻削温度对孔质量的影响

在钻削CFRP-钛合金叠层板时,由于钛合金的热导率很低导致钻削钛合金层时钛合金层的温度很高,从而使得CFRP结构发生改变(CFRP的温度不能超过120°C)。在转速为900 r/min时,进给量为0.03、0.04、0.05、0.06 mm/r,CFRP层均出现烧伤。在进给量为0.06 mm/r,转速为700 r/min时,在钻削第十个孔时也出现烧伤。图5为当CFRP层参数固定时,不同钛合金层加工参数下的烧伤图。

如图6所示,随着钻孔数的增加,烧伤区域逐渐增加。这是由于一方面,随着钻孔数的增加刀具磨损也增加,使得钻削温度也逐渐增加;另一方面,随着钻削温度的增加切屑的折断越来越困难,使切屑在CFRP出口处积聚加剧了其烧伤。

在高速下出现烧伤相比于低速下出现更早,在进给量为0.06 mm/r时,转速为900 r/min相比于转速为700 r/min和500 r/min,出现烧伤更早。此外,相同孔数下在高速下的烧伤环的最大半径相比于在低速下烧伤环最大半径更大。在进给量为0.06 mm/r且钻孔数为第20个孔时,



(a) 0.03 mm/r (b) 0.04 mm/r (c) 0.05 mm/r (d) 0.06 mm/r (e) 0.06 mm/r

图(a)~(d)转速为 900 r/min,图(e)转速为 700 r/min。

图 5 碳纤维复合材料烧伤图

Fig.5 Burns of carbon fiber composite material

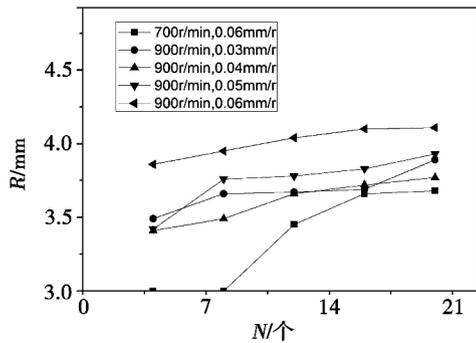


图 6 钻孔数与最大烧伤环半径的变化曲线

Fig.6 Bored with the maximum discoloration ring diameter curves

3 结论

(1)随着转速的增加,钛合金层的轴向力先增加后减小;随着钛合金层进给量的增加,钛合金层与CFRP层的轴向力之比逐渐增加。通过回归分析可以得到钻削轴向力的经验公式,误差均小于10%,根据上述拟合表达式,可以对钻削轴向力进行预测。

(2)在钛合金进给量为 0.03 mm/r 时,随着钛合金转速的增加层间温度逐渐增加;随着钻孔数的增加层间温度也呈增加趋势。

(3)在钛合金层进给量不变时,钛合金层的低转速下碳纤维复合材料的最大烧伤环半径最小;随着钻孔数的增加最大烧伤环半径也呈增加趋势。

参考文献

[1] DAVIM J P.复合材料制孔技术[M].陈明,安庆龙,明伟伟,译.北京:国防工业出版社,2013.
 [2] 艾兴.高速切削加工技术[M].北京:国防工业出版社,2003:242.

[3] 王奔,高航,郭东明.树脂固化温度与纤维铺设方式对 C/E 复合材料制孔质量的影响[J].机械工程学报,2011(12):19-25.

[4] KYUNG-HEE Park, AARON Beal, DAVE Kim. Tool wear drilling of composite/titanium stacks using carbide and polycrystalline diamond tools[J].Wear2011(271):2826-2835.

[5] CANTERO J L, TARDIO M M, CANTELI J A. Dry drilling of alloy Ti-6Al-4V[J].International journal of machine tools & manufacture,2005(45):1246-1255.

[6] SENTHILKUMAR M. Study on tool wear and chip formation during drilling carbon fiber reinforced polymer (CFRP)/titanium alloy (Ti6Al4V) stacks; International conference on design and manufacturing, Icondm 2013, India [C]. Selection and peer-review under responsibility of the organizing and review committee of IConDM, 2013.

[7] REDOUANE ZITOUNE. Influence of machining parameters and new nano-coated tool on drilling performance of CFRP/Aluminium sandwich[J].Composites: Part B, 2012(43):1480-1488.

[8] LUO Bin. A novel prediction model for thrust force and torque in drilling interface region of CFRP/Ti stacks[J].Springer: Int. J. Adv. Manuf. Technol, 2015.

[9] SENTHILKUMAR M. Study on tool wear and chip formation during drilling carbon fiber reinforced polymer (CFRP)/titanium alloy (Ti6Al4V) stacks; International conference on design and manufacturing, Icondm 2013, India [C]. Selection and peer-review under responsibility of the organizing and review committee of Icondm, 2013.

[10] 李桂玉,李剑峰,孙杰,等.硬质合金钻头钻削碳纤维增强复合材料工艺[J].粉末冶金材料科学与工程,2010,15(6):580-585.