

# PTFE/CFRP/ 铝合金叠层材料钻削试验研究<sup>\*</sup>

## Experimental Investigation on Drilling of PTFE/CFRP/Aluminum Stack

上海交通大学机械与动力工程学院 王昌赢 邱坤贤 魏莹莹 安庆龙 陈明  
上海航天控制技术研究所 蔡晓江

**[摘要]** 对 PTFE/CFRP/ 铝合金叠层材料进行了钻削试验研究。结果表明:最高钻削温度随主轴转速的增大而增大,但随进给量的增大反而下降;相同钻削参数下,从铝合金侧钻入能获得更低的钻削温度;采用较大的进给量有利于铝合金形成碎屑状切屑,避免带状切屑排出时划伤已加工 CFRP 表面;采用较低主轴转速和较大的进给量可获得更好的铝合金孔出口质量。

**关键词:** 碳纤维增强复合材料(CFRP) 叠层材料 钻削力 钻削温度 切屑形态

**[ABSTRACT]** An experimental study on drilling a stack made of PTFE/CFRP/aluminum is investigated in terms of drilling forces, cutting temperatures, chip morphology and push-out hole quality. The results reveal that drilling temperature increases when the spindle speed is elevated while decreases as the feed rate increases. Under the same drilling condition, lower drilling temperature can be obtained while the drilling sequence starting from the aluminum layer. High feed rate is observed to facilitate the formation of segmented chips, which can reduce the surface damage of the composite hole during the chip removal process. Besides, when the drilling operation is performed under the cutting condition of low spindle speed and high feed rate, better push-out quality of aluminum layer will be obtained.

**Keywords:** Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) Stack Drilling forces Drilling temperature Chip morphology

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.10.090

碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymers,简称 CFRP)是一种以碳或石墨纤维为增强体的树脂基复合材料,具有质量轻、比强度高、比刚度大、减振和抗疲劳性能好以及可设计性强等诸多优点<sup>[1]</sup>,已在航空航天领域得到了广泛的应用。由于碳纤维硬度

高(53~65HRC)、脆性大,而且表面较光滑使得其与树脂的结合力较弱,故而使得 CFRP 具有层间强度低、抗冲击能力差等缺点,结构连接是其应用的薄弱环节之一,为此,通常将其与金属材料叠加在一起组合成叠层材料进行连接和装配。目前,这种叠层材料主要应用在航空航天结构制造领域。

为提高装配精度,常将 CFRP 和金属材料叠放在一起制孔,以利于实现叠层结构件钻削和装配的一体化、自动化生产,提高装配效率和经济效益<sup>[2]</sup>;此外,金属层能起到对 CFRP 的支撑和保护作用,减小 CFRP 在钻削过程产生的出口分层缺陷。然而,各层材料之间机械加工性能的较大差异以及 CFRP 本身的难加工特性使得 CFRP/ 金属叠层材料的钻削加工成为了一大难点<sup>[3]</sup>,如制孔精度差、CFRP 树脂易烧伤、金属层出口毛刺等问题<sup>[4]</sup>。

目前,国内外有关叠层材料的钻削研究报道还较少,而且主要集中在切削加工性上。相对而言,对于钻削温度的研究则更少。于晓江等<sup>[5]</sup>通过研究 CFRP/ 钛合金叠层材料制孔工艺发现钻削钛合金时,轴向力明显大于 CFRP,而且从复合材料侧钻入得到的孔径精度和孔壁质量高于从钛合金侧钻入。Brinksmeier 等<sup>[6]</sup>对铝合金 /CFRP/ 钛合金叠层材料进行了钻削试验,研究表明:较高的切削速度会导致更大的制孔表层损伤。Zitoune 等<sup>[2]</sup>通过对 CFRP 和铝合金叠层材料进行钻削力试验发现,钻削 CFRP 和铝合金时的轴向力都随着进给量增大而增大,而钻削速度对轴向力无明显影响。

本文通过钻削试验,研究了聚四氟乙烯(Polytetrafluoroethylene,简称 PTFE)/CFRP/ 铝合金叠层材料钻削过程中钻削力、钻削温度的变化特点,讨论了切削速度和进给量对钻削力、钻削温度的影响,分析了铝合金的切屑状态及其对钻削过程的影响,以期为实际生产提供参考。

## 1 试验设计

### 1.1 工件材料

试验采用由 PTFE、T800S/250F 型 CFRP 和

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(51475298),上海交通大学博士后研究基金项目(14X100030001),中国博士后基金项目(2014M560331)资助。

AMS4050 铝合金组成的叠层板料作为工件材料,其尺寸为  $300\text{mm} \times 200\text{mm} \times 24\text{mm}$ 。其中,PTFE、CFRP 和铝合金的厚度分别为  $10\text{mm}$ 、 $8\text{mm}$  和  $6\text{mm}$ ,3 者用螺栓紧密联接,图 1 给出了试验所用叠层板料的侧视图。PTFE 是一种人工合成高分子材料,具有优异的化学稳定性,工作温度可达  $250^\circ\text{C}$ ,在叠层材料中主要起对 CFRP 的支撑和保护作用,以减小 CFRP 在钻削过程中产生的出口分层、毛刺或入口撕裂等缺陷。对于 CFRP 层合板,其碳纤维牌号为 Toray-T800S,基体材料为 Toray-250F 环氧树脂,共铺 48 层,每层厚约  $0.167\text{mm}$ ,表 1 给出了其组成性质。PTFE、T800S/250F CFRP 和 AMS4050 铝合金的机械性能如表 2 所示。



图1 PTFE、CFRP和铝合金叠层板料  
Fig.1 PTFE/CFRP/aluminium stacks

表1 T800S/250F CFRP复合材料组成性质

增强材料	基体材料	纤维体积含量 /%	纤维束	铺层数
T800S	250F	60	$5\mu\text{m}$ , 24K	48

注:铺层方式为  $[\pm 45/0/-45/0/45/0/45/0/-45/0/-45/0/45/90/45/0/-45/0/0/-45/90/45/0]_s$ 。

表2 试验各层材料机械性能

材料	抗拉强度 /MPa	断裂伸长 /%	单束强度 / ( $\text{g} \cdot 10^{-3}\text{m}^{-1}$ )
PTFE	27.6	238	—
T800S/250F CFRP	5880	2.0	1030 (24K)
4050 铝合金	510	10	—

## 1.2 试验刀具

为适应钻削加工 CFRP 时对刀具切削刃的快速磨损,试验中采用了类金刚石涂层的硬质合金麻花钻进行叠层材料的钻削加工,该钻头经过修磨后具有双锋角和双后刀面,表 3 给出了钻头形貌及部分几何参数。

表3 钻头形貌和几何角度

钻头直径 $d/\text{mm}$	钻头形貌(双锋角、双后刀面)	锋角 $2\phi / (^\circ)$	螺旋角 $\beta / (^\circ)$
9.53		125	30

## 1.3 试验布置及测试手段

钻削试验在 DECKEL MAHO 公司的 DMU70V 数控加工中心进行,其行程范围为 X 轴  $710\text{mm}$ ,Y 轴  $520\text{mm}$ ,Z 轴  $520\text{mm}$ ;具有五轴联动功能(主轴: X、Y、Z 轴,工作台: B、C 轴);主轴转速范围为:  $20\sim 12000\text{r}/\text{min}$ ;定位精度为  $0.01\text{mm}$ 。试验采用关于主轴转速( $n$ )和每转进给量( $f$ )的单因素法进行设计,其中主轴转速取 3 水平:  $1000\text{r}/\text{min}$ 、 $2000\text{r}/\text{min}$  和  $3000\text{r}/\text{min}$ ;每转进给量取 4 水平:  $0.02\text{mm}/\text{r}$ 、 $0.04\text{mm}/\text{r}$ 、 $0.06\text{mm}/\text{r}$ 、 $0.08\text{mm}/\text{r}$ 。试验采用干式钻削方法。

图 2 给出了试验现场照片。切削力的测量使用了 KISTLER9272 型四向压电式测力仪,并通过 KISTLER5017B 电荷放大器以及相应的数据采集与处理系统来获得切削力数据。采用人工热电偶法测量钻削温度,其方法是将标准的热电偶丝埋入钻头后刀面的 2 个内冷孔内,再通过存储式测温模块获取钻削温度数据,如图 3 所示。钻削完成后,采用 KEYENCE VHX-500FE 超景深三维显微系统拍摄已加工孔出口形貌。

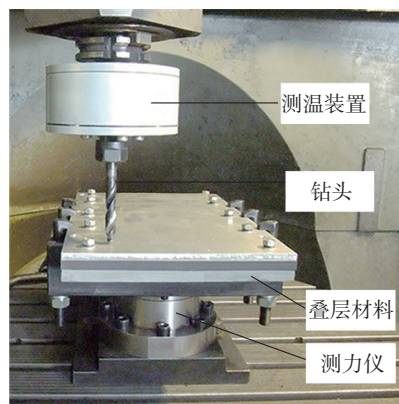


图2 试验现场照片

Fig.2 Photo of testing field

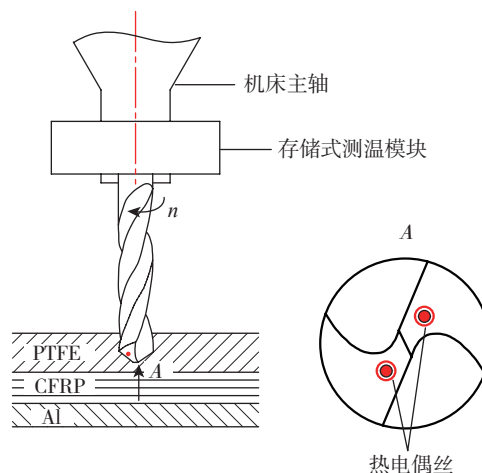


图3 钻削温度测量示意图

Fig.3 Diagram of drilling temperature measurement

## 2 试验结果及分析

### 2.1 钻削力

通过对不同钻削阶段的钻削力取平均值来获得钻削各层材料(PTFE、CFRP 和铝合金)时的钻削轴向力数据。图 4 给出了从 PTFE 侧钻入时钻削轴向力在不同的主轴转速下随不同材料的变化关系,进给量  $f$  均为  $0.08\text{mm/r}$ 。从图中可以看出,在一定的主轴转速下,钻削 PTFE、CFRP 和铝合金时的轴向力依次升高;而对同一种材料,随着主轴转速的提高,钻削轴向力逐渐升高。这是由于单位时间内材料移除速率增大,从而导致切削力上升。

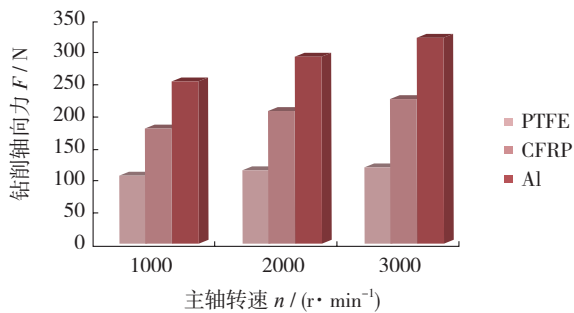


图4 轴向力随主轴转速的变化  
Fig.4 Variations of axial force with spindle speed

### 2.2 钻削温度

在 CFRP 的加工中,钻削温度是一项重要的状态参量,钻削温度过高,可能引起树脂烧伤、纤维脱粘等现象,还会使刀具磨损加快。非晶态聚合物材料根据所处温度不同一般可划分为 3 种力学状态:玻璃态、高弹态和黏流态。玻璃态和高弹态之间转变称为玻璃化转变,相应的转变温度称为玻璃化转变温度。常温下,环氧树脂工作在玻璃态,而当温度达到其玻璃化转变温度(一般在  $200^\circ\text{C}$  左右)时,其力学性能将会发生显著变化<sup>[7]</sup>,此时树脂将不能很好地起到黏结作用,因此,在 CFRP 的钻削加工中,钻削温度是需要关注的重要问题,应选择合适的加工参数,避免钻削温度达到或超过树脂的玻璃化温度。

图 5 给出了钻削过程中最高钻削温度随主轴转速和每转进给量的变化关系曲线,钻削温度数据由两热电偶丝测得的温度数据取平均值得到,由于热量的累积作用,最高钻削温度都出现在了钻削铝合金阶段。从图 5 中可以看出,在主轴转速为  $3000\text{r/min}$ 、进给量为  $0.02\text{mm/r}$  时,最高切削温度最大,为  $247^\circ\text{C}$ ;在主轴转速为  $1000\text{r/min}$  和进给量为  $0.06\text{mm/r}$  时,最高切削温度最小,为  $190^\circ\text{C}$ 。

与普通金属切削加工不同,最高钻削温度随每转进

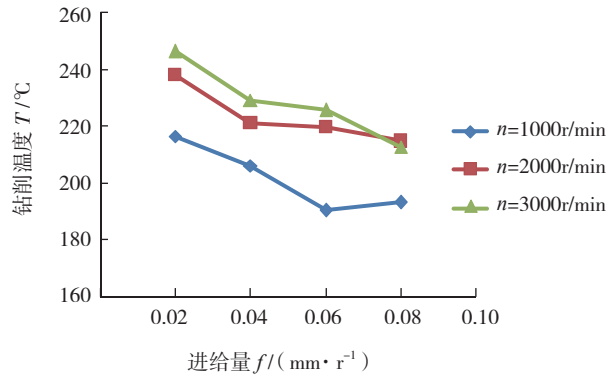


图5 最高钻削温度随主轴转速和进给量的变化  
Fig.5 Variations of maximum drilling temperature with spindle speed and feed rate

给量的增大反而下降。这可能是由于 CFRP 中高硬度的碳纤维在钻削过程中充当了磨粒的作用,使钻头快速磨损,温度升高,而这一过程在采用低进给量和高切削速度钻削时将表现得更为明显,因而选用较高的进给量和较低的切削速度能够获得更低的钻削温度。

另外,最高切削温度随主轴转速的提高都呈现增高的趋势,这是由于随着转速的提高,单位时间内钻头切削的材料体积增加,因此,产生更多的热量,使钻削温度升高。但从  $1000\sim 2000\text{r/min}$  比从  $2000\sim 3000\text{r/min}$  温升更高,甚至在进给量为  $0.08\text{mm/r}$  时,转速从  $2000\text{r/min}$  变为  $3000\text{r/min}$  时最高温度出现了负增长。

根据钻削的时间顺序,钻削过程可以分为 PTFE、CFRP、铝合金和钻出铝合金 4 个阶段,如图 6 所示。由于钻头主切削刃有一定长度,当主切削刃钻出时整个钻削过程才算完成。

图 7 给出了不同钻削顺序下的温度变化曲线,图中,曲线 A 代表从 PTFE 侧钻入,曲线 B 代表从铝合金侧钻入, A、B 曲线分别对应了时间相反的两横坐标轴。

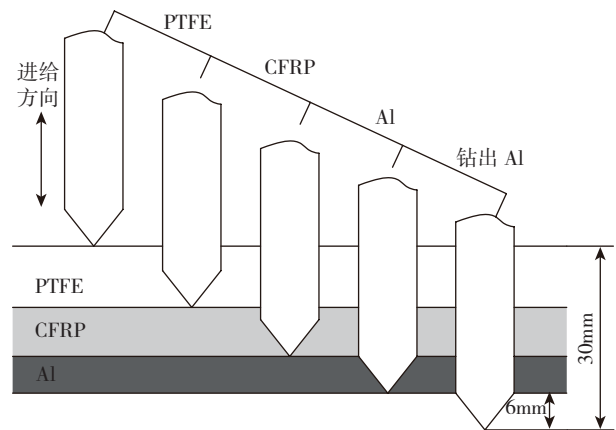


图6 叠层材料钻削过程示意图  
Fig.6 Diagram of drilling process of stacks

从图中可以看出,从 PTFE 侧钻入时,在 PTFE 阶段,由于 PTFE 易于加工、摩擦系数低,温度上升较缓慢;钻入 CFRP 时,温度开始急剧上升,这是由于 CFRP 强度和硬度高、导热性差;钻入铝合金后,温度达到了最大值,此时,由于铝合金较软,易于加工且导热性好,还未钻出铝合金时,钻削温度便开始下降。与曲线 A 不同,从铝合金侧钻入时,在铝合金阶段,温度上升较快(相比 PTFE,相同的温升,所用时间更短)。在 CFRP 阶段,温度上升相对曲线 A 变化较缓(相同时间内,曲线 A 温度上升 95℃,而曲线 B 温度上升 71℃),一方面这是由于钻削铝合金时切屑为带状或节状,这有利于切屑的排除,而从 PTFE 侧钻入时,切屑为粉末状,这不利于切屑的排除,影响了钻削 CFRP 时热量的扩散;另一方面铝合金的导热性较好,使得累积的钻削热量得以迅速扩散为后续钻削 CFRP 创造了有利的温度条件。

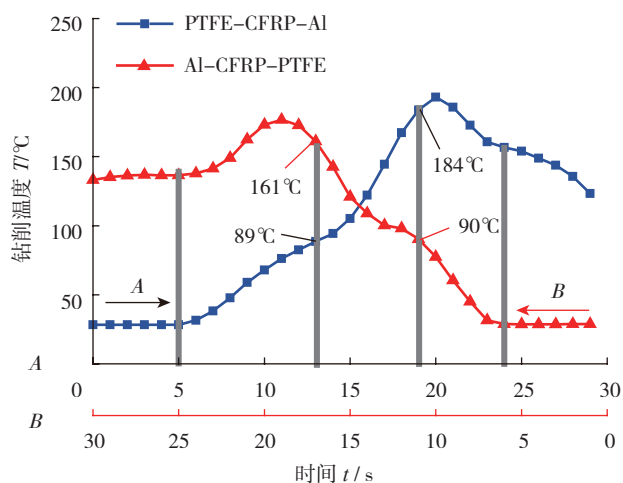


图7 从叠层材料不同侧钻削时温度曲线  
( $n=1000\text{r}/\text{min}$ ,  $f=0.08\text{mm}/\text{r}$ )

Fig.7 Temperature curves when drilling from different sides of stacks ( $n=1000\text{r}/\text{min}$ ,  $f=0.08\text{mm}/\text{r}$ )

## 2.3 铝合金切屑形态及其出口形貌

### 2.3.1 铝合金切屑形态

切削加工中,切屑形态对加工过程具有重要影响,而断屑性能是衡量刀具好坏的重要标准。通过增大切削层厚度可以提高钻头的断屑性能,钻头直径一定时,切削层厚度仅由进给速度决定。表 4 给出了进给量变化时的铝合金切屑形态,可以看出,在低进给量( $f=0.02\text{mm}/\text{r}$  或  $0.04\text{mm}/\text{r}$ )时,不论主轴转速如何变化(1000~3000r/min),钻削铝合金都产生了带状切屑;而进给量较高时,切屑基本呈现碎屑状。

一方面,节状切屑的产生将有利于叠层材料钻削、装配的自动化生产,缩短加工时间。另一方面,在叠层材料加工中,当先钻削 CFRP 后钻削铝合金时,加工铝

表4 钻削进给量对铝合金切屑形态的影响

进给量 $f/(\text{mm}\cdot\text{r}^{-1})$	主轴转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$		
	1000	2000	3000
0.02			
0.04			
0.06			
0.08			

合金产生的带状切屑沿钻头导屑槽向上排出的同时,会伴随钻头高速旋转,破坏已加工的 CFRP 孔表面,导致 CFRP 孔表面粗糙度上升,孔壁质量下降<sup>[2,4,8]</sup>,而节状切屑则更容易排出。因此,从不破坏 CFRP 制孔表面的角度出发,采用较大的进给量,使铝合金产生碎屑状的切屑更有利于 CFRP 制孔表面质量的提高。

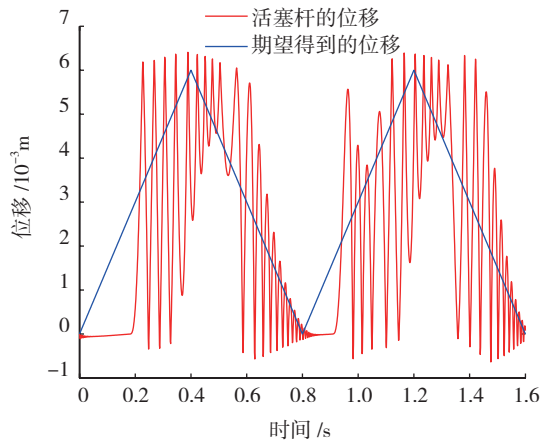
### 2.3.2 铝合金出口形貌

表 5 给出了铝合金出口形貌显微镜照片。可以看出,在进给量  $f=0.02\text{mm}/\text{r}$  时,随着主轴转速的提高,出口质量变差,这是因为切削速度的提高使加工铝合金时的切削温度增高,使铝合金塑性增强。在主轴转速  $n=3000\text{r}/\text{min}$  时,随着进给量增大,出口质量有变好的趋势。因此,从铝合金出口质量的角度出发,也应该在选

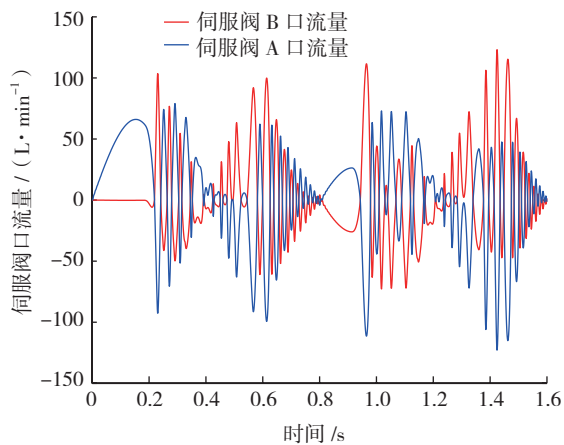
表5 铝合金出口形貌

进给量 $f/(\text{mm}\cdot\text{r}^{-1})$	主轴转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$		
	1000	2000	3000
0.02			
0.04			
0.06			
0.08			

(下转第 97 页)



(a) 液压缸位移图



(b) 伺服阀 A/B 口流量图

图5 采用软管连接时的仿真结果

Fig.5 Simulation results of flexible hole connection

## 4 结束语

通过仿真分析不同的液压缸行程、压力、管道模型等对液压伺服系统控制性能的影响,可以得到以下的结论。

(1) 在保证系统功能的前提下,应该尽量减小液压伺服油缸的行程,有利于提高伺服控制系统的响应速度,改善控制性能。

(2) 虽然增加系统的供油压力有利于提高系统的响应速度,但是当压力提高到一定程度时,再提高压力,系统的控制性能并不能得到很大提高,因此,在满足液压控制系统性能的前提下,应适当提高系统工作压力。

(3) 在设计过程中,伺服阀与液压缸必须采用刚度较好的硬管连接,并且伺服阀的安装位置尽可能地靠近伺服缸,以提高伺服控制系统的响应速度和控制性能。

## 参考文献

[1] Vairis A. On the extrusion stage of linear friction welding of

Ti6Al4V. *Materials Science And Engineering A*, 1999, 271(1/2): 477-484.

[2] 栾海英,陈贞发. 线性摩擦焊电液伺服系统的研制. *液压与气动*, 2007(1): 48-49.

[3] 丁立铭. 罗·罗公司研制出线性摩擦焊宽弦风扇整体叶盘. *航空制造技术*, 1999(6): 10.

(责编 亿霖)

(上接第 93 页)

择加工参数时使主轴转速较低、进给量较大。

## 3 结束语

本文采用类金刚石涂层硬质合金麻花钻进行 PTFE/CFRP/ 铝合金叠层材料的钻削试验,研究了叠层材料钻削过程中切削力、切削温度的变化特点,分析了铝合金切屑形态和出口形貌,得到研究结论如下:

(1) 在一定的主轴转速下,钻削 PTFE、CFRP 和铝合金时的轴向力依次升高;而对同一种材料,随着主轴转速的提高,钻削力逐渐增大。

(2) 最高钻削温度随主轴转速的增大而增大,但随进给量的增大反而下降;相同参数下,从铝合金侧钻入能获得更低的钻削温度。

(3) 采用较大的进给量有利于铝合金形成碎屑状切屑,避免带状切屑划伤已加工 CFRP 表面,而主轴转速对切屑形态影响不大;

(4) 采用较低主轴转速和较大的进给量可获得更好的铝合金出口表面质量。

## 参考文献

[1] 徐锦泐,蔡晓江,魏莹莹,等. 高强度型 T800S/250F CFRP 的制孔缺陷研究. *制造技术与机床*, 2013 (3): 97-100.

[2] Zitoun R, Krishnaraj V, Almabouacif B S, et al. Influence of machining parameters and new nano-coated tool on drilling performance of CFRP/aluminium sandwich. *Composites: Part B*, 2012, 43(3): 1480-1488.

[3] Park H K, Beal A, Kim D, et al. Tool wear in drilling of composite/titanium stacks using carbide and polycrystalline diamond tools. *Wear*, 2011, 271(11): 2826-2835.

[4] Ramulu M, Branson T, Kim D. A study on the drilling of composite and titanium stacks. *Composite Structures*, 2001, 54(1): 61-67.

[5] 于晓江,曹增强,蒋红宇. 碳纤维复合材料和钛合金结构制孔工艺研究. *航空制造技术*, 2011(3): 95-97.

[6] Brinksmeier E, Fangmann S, Rentsch R. Drilling of composites and resulting surface integrity. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2011, 60(1): 57-60.

[7] 杨鸣波,唐志玉. 高分子材料手册(上). 北京: 化学工业出版社, 2009.

[8] Zitoun R, Krishnaraj V, Collombet F. Study of drilling of composite material and aluminium stack. *Composite Structures*, 2010, 92(5): 1246-1255.

(责编 春早)