

CFRP/Ti 叠层钻削力热行为与切屑成形分析*

王贤锋¹, 周 磊², 安庆龙², 陈 明²

(1. 上海飞机制造有限公司, 上海 201324;
2. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

[摘要] 碳纤维增强复合材料(CFRP)是一种以环氧树脂作为基体材料、碳纤维作为增强材料的复合材料,具有高强度、高比强度以及耐腐蚀性的特点。CFRP与钛合金是航空航天领域广泛使用的两种轻质的材料,经常作为叠层结构出现在大型客机的关键部位,使大型客机制造装配过程中需要对CFRP/Ti叠层进行大量的制孔。而CFRP/Ti叠层钻削过程中的力热变化与切屑形态会直接影响刀具的切削状态。在此基础上,对CFRP/Ti叠层钻削过程中的力热行为与切屑成形进行研究,这对于CFRP-Ti叠层实际钻削过程具有重要的指导意义。

关键词: CFRP/Ti 叠层; 力热行为; 切屑成形; 切削状态; 装配制孔

Analysis on Force-Thermal Behaviors and Chip Forming of CFRP/Ti Stacks Drilling

WANG Xianfeng¹, ZHOU Lei², AN Qinglong², CHEN Ming²

(1. Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201324, China;
2. School of Mechanical Engineering, Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200240, China)

[ABSTRACT] Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) is a kind of material with epoxy resin as matrix material and carbon fiber as reinforced material, which has the characteristics of high strength, high specific strength and corrosion resistance. CFRPs and titanium alloys are two kinds of lightweight materials widely used in aerospace fields. CFRPs and titanium alloys often appear as laminated structures in the key areas of large passenger aircraft, which leads to a large number of hole-making of CFRP/Ti stacks in the manufacturing and assembly processes of large passenger aircraft. The variation of heat and force as well as chip shape in the CFRP/Ti stacks drilling process will directly affect the cutting state of the tool. Therefore, the study of force-thermal behavior and chip forming in the CFRP/Ti stacks drilling process was carried out in this paper, which has important guiding significance for the actual drilling process of CFRP-Ti stack.

Keywords: CFRP/Ti stacks; Force-thermal behavior; Chip forming; Cutting state; Assembly drilling

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.23/24.096

碳纤维复合材料(CFRP)是一种以环氧树脂作为基体材料、碳纤维作为增强材料的复合材料^[1-2]。其具有高强度、高比强度以及耐腐蚀性的特点,能满足飞行器设计与制造过程中的减重需求,因此在军用战斗机、民用客机、运载火箭等航空航天领域作为一种新型材料逐渐取代传统的金属材料^[3-4]。自20世纪50年代以来,钛合金作为一种高强度、耐腐蚀性、耐高温的材料,开始逐渐替代先前大量使用的铝合金材料,成为航空航天领域广泛使用的一种更为轻质的材料^[5-7]。碳纤维增强

复合材料(CFRP)是大型客机平尾、机翼等重要结构件上使用最为广泛的一种新型复合材料^[8-9]。为更好地满足强度与比强度的要求,CFRP材料与钛合金经常作为叠层结构出现在大型客机的关键部位,从而能够形成它们之间优势互补^[10]。因此,大型客机制造装配过程中需要进行大量的CFRP/Ti叠层制孔,而CFRP/Ti叠层钻削过程中的力热行为对叠层材料制孔质量起着决定性因素。另外,CFRP/Ti叠层钻削过程中的力热行为也直接影响着刀具的磨损,包括刀具的磨损方式以及磨损速度。因此CFRP/Ti叠层钻削过程中的力热行为研究对于叠层制孔质量以及刀具磨损的研究具有重要意义。目前已经有学者对CFRP-Ti叠层的钻削加工

* 基金项目: 国家自然科学基金(51475298); 国家商用飞机制造工程技术研究中心创新基金(COMAC-SFGS-2016-33277)。

力热行为、叠层钻削质量、钻削刀具磨损等进行了研究。Tsao 等^[11]借助有限元模型得到 CFRP 钻削轴向力与扭矩的仿真结果,并将仿真结果与试验测量结果对比,验证了仿真结果的准确性;Piquet 等^[12]研究了刀具几何形状对于 CFRP 钻削质量的影响,发现钻头与孔的接触长度越小 CFRP 钻削时出现分层的情况越少;Liu 等^[13]2012 年通过引入铣削力系数建立 CFRP 单向层合板铣削力模型,并发现在 45° 纤维切削角条件下得到的表面质量最好;Cong 等^[14]最早研究 CFRP 钻削时轴向力与分层的关系,并提出临界轴向力的概念;Karpal 等^[15]采用线弹性断裂力学模型,建立 CFRP 分层临界轴向力公式模型;Hintze 等^[16]进行了 CFRP 材料钻削的相关研究,得出结论是切削速度的增加会导致刀具磨损的增加,从而导致钻削过程中的轴向力增加。本文主要讨论 CFRP/Ti 叠层钻削的力热时变规律,对比 CFRP/Ti 叠层钻削与 CFRP、钛合金单一材料钻孔过程中力热行为的差异,分析切削力与切削温度对切屑成形的影响。

1 试验材料与设备

试验中使用的叠层材料为 T800/X850 碳纤维增强复合材料层合板和 TC4 钛合金板,两种试验板的平面尺寸均为 300mm × 200mm。其中复合材料层合板板厚为 9.5mm,钛合金板板厚为 7.5mm,两种材料的实物图如图 1 所示。T800/X850 层合板是一种采用

多向铺层的环氧树脂基碳纤维增强复合材料,铺层方式为 [+45°/-45°/0°/45°/0°/0°/-45°/90°/45°/0°/-45°/0°/-45°/90°/45°/0°],层合板组成成分和增强材料物理性能如表 1~2 所示。TC4 钛合金的化学组成成分如表 3 所示。

T800/X850 复合材料与 TC4 钛合金之间的物理性能差异较大,两种材料的物理性能对比如表 4 所示。可以发现,T800/X850 复合材料和 TC4 钛合金在密度、拉伸强度、热膨胀系数、导热系数等物理性能上都存在巨大差异。从强度方面来看,CFRP 的抗拉强度达到了钛合金的 3 倍,且由于 CFRP 密度较低,其比强度更是达到了钛合金的 8 倍以上,但 CFRP 存在各向异性的特点,在抗压强度以及层间结合强度上则远不如钛合金。另外,CFRP 和钛合金之间的热膨胀系数上也存在一定差异,且两者的导热系数都比较差,因此在加工工程中容易产生高温,影响刀具的切削加工性能。

试验中使用的刀具为 SECO 公司的硬质合金麻花钻,直径为 6.35mm,螺旋角为 35°,刀尖锋角为 140°,刀具牌号为 SD203A-02500-091-0315R1-T。切削刃长度为 34mm,无涂层且自带冷却孔;冷却孔与刀尖垂直距

表1 T800/X850碳纤维增强复合材料组成成分

Table 1 Composition of T800/X850 carbon fiber reinforced composites

增强材料	基体材料	密度/(g·cm ⁻³)	纤维体积分数/%	纤维束
T800	X850	1.6	65	5μm, 12K

表2 T800/X850碳纤维的基本物理性能

Table 2 Basic physical property of T800/X850 carbon fiber

物理性能	热膨胀系数/ ×10 ⁻⁶ s ⁻¹	导热系数/ (Cal·cm ⁻¹ · s ⁻¹ ·°C ⁻¹)	比热/ (Cal·g ⁻¹ · °C ⁻¹)	电阻系数/ (Ω·cm)	密度/ (g·cm ⁻³)	组成成分
T800/X850	0.56	0.0839	0.18	1.4×10 ⁻³	1.81	96%C

表3 TC4钛合金的化学组成成分

Table 3 Chemical composition of TC4 titanium alloy

Al	V	Fe	O	C	N	H	其他	Ti
5.50~6.75	3.50~4.50	<0.30	<0.20	<0.08	<0.05	<0.015	<0.5	余量

表4 T800/X850复合材料与TC4钛合金物理性能对比

Table 4 Comparison of physical property between T800/X850 composites and TC4 titanium alloy

材料	拉伸强度/MPa	伸长率/%	密度/(g·cm ⁻³)	弹性模量/GPa	线性热膨胀系数/ 10 ⁻⁶ s ⁻¹	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)
T800/X850	2840	1.5	1.60	168	~0	~1.0
TC4	950	8	4.43	113	9.1	7.0

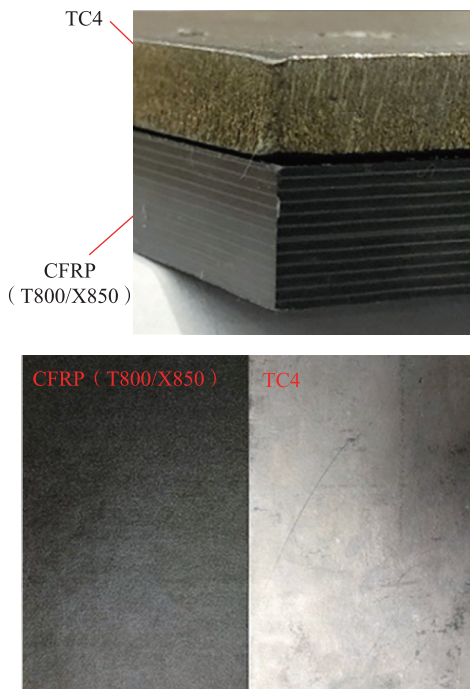


图1 T800/X850与TC4钛合金材料实物图

Fig.1 Pictures of T800/X850 and TC4 titanium alloy materials

离约 2mm, 试验正是通过在两个冷却孔中预埋热电偶的方式进行切削刃温度测量的。图 2 为预埋热电偶后 SECO 硬质合金钻头实物图。

本试验是在美国 HURCO VMX42 三轴立式数控加工中心上进行的, 其主轴的最高转速 12000r/min, 其各个方向的行程范围为: X 方向 1067mm, Y 方向 610mm, Z 方向 610mm, 定位精度为 0.01mm, 试验现场加工设备与夹具如图 3 所示。

试验中使用 Kistler 9272 测力仪进行钻削力的测量, 该测力仪利用压电式传感器进行测力, 共有 4 个通道, 分别用于测量轴向力、扭矩与两个方向的水平力, 本次试验主要关注叠层钻削过程中的轴向力与扭矩。该测力仪的主要基本技术参数为: 灵敏度 0.05N, 水平力量程 $\pm 5\text{kN}$, 轴向力量程 $-5\sim 20\text{kN}$, 扭矩量程 $\pm 200\text{N}\cdot\text{m}$ 。测力仪测量得到的力信号要通过信号线经过 Kistler 5070A 多通道电荷放大器进行放大后, 再通过数据采集卡转换为数字信号, 最后再将采集到的数字信号通过 USB 端口传输到电脑, 实现钻削力的测量。由于钻削试验对于力信号采样的频率要求并不高, 因此将测力仪的采样频率设置为 1kHz。

此外, 试验中的测温装置选用好耐公司的高速旋转测温装置, 该装置通过螺栓连接与刀柄固结, 并采用内嵌采集卡与处理器的方法, 使得其在跟随刀柄一起做高速旋转时仍然能够离线进行温度信号采集与记录, 旋转测温装置系统的实物图如图 4 所示。测温所使用的热

电偶为美国 Omega 标准 K 型热电偶, 该热电偶的温度测量范围为 $-200\sim 1370$, 温度测量精度为 ± 0.1 , 热电偶丝直径为 0.08mm, 本次试验中采样频率选择为 1Hz。

2 试验设计与方案

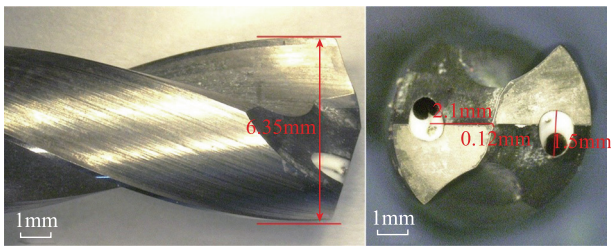
试验共分为 4 组, 试验 A 为 CFRP 单一材料钻削试验, 试验 B 为钛合金单一材料钻削试验, 试验 C 为 CFRP/Ti 叠层材料钻削试验, 记为 CFRP/Ti, 试验 D 为试验 C 的基础上增加退刀冷却过程的试验, 记为 CFRP-Ti。其中试验 A 的 CFRP 材料背后增加了背部塑料板的支撑, 试验 C 与试验 D 均为以 CFRP 为入口、钛合金为出口的叠层钻削试验。图 5 为上述不同试验方案之间的对比(实线为刀具切削行程, 虚线为非切削行程)。

CFRP/Ti 叠层钻孔对于刀具与加工参数的要求较高, 以较小的 CFRP 材料分层与界面损伤为优化目标进行参数优化试验, 以钻削 CFRP/Ti 叠层材料钻削为优化目标, 确定上述 4 组试验优化后的加工参数, 其中转速为 500r/min, 即线速度为 10m/min, 进给量选择为 0.06mm/r。

3 试验结果与分析

3.1 钻削力分析

图 6 为试验 A(CFRP) 与试验 B(Ti) 的轴向力时域



(a) 硬质合金钻头尺寸 (b) 内冷孔尺寸

图2 预埋热电偶硬质合金钻头

Fig.2 Carbide drill with embedded thermocouple

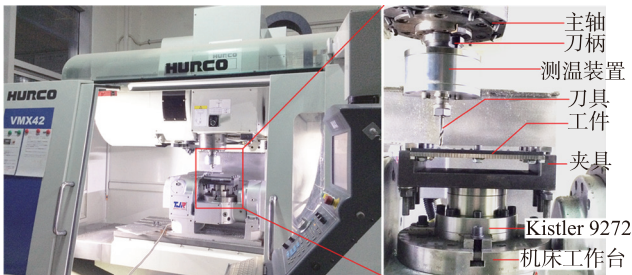


图3 试验现场加工设备与夹具

Fig.3 Experimental machining setup and fixture



图4 旋转测温装置系统

Fig.4 Rotating temperature measuring system

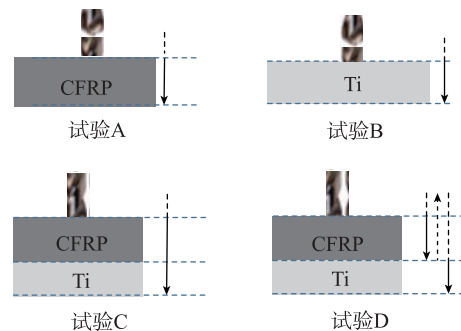


图5 不同试验方案的对比

Fig.5 Comparison of different test schemes

变化折线图,其中 A_1 、 A_2 、 A_3 分别对应是试验 A 的 3 个阶段, B_1 、 B_2 、 B_3 是试验 B 的 3 个阶段。对比试验 A 与试验 B 的轴向力,可以发现钻削钛合金时达到 CFRP 的 3.75 倍。将两次试验 15s 时刻附近的轴向力进行提取,可以得到钻削 CFRP 与钛合金轴向力的波形图。两个波形均为周期函数,且接近正弦函数,通过计算得到其

周期为 0.06s,这一周期刚好是刀具旋转一周时间的一半,这是由于钻头的两个刃差异不大,表现出来的切削力的波形也基本相同,因此切削力波形的周期为一个切削刃旋转到另一个切削刃的时间。

图 7 为试验 C(CFRP/Ti) 与试验 D (CRRP-Ti) 钻削过程的轴向力,其中 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 为试验 C 的 5

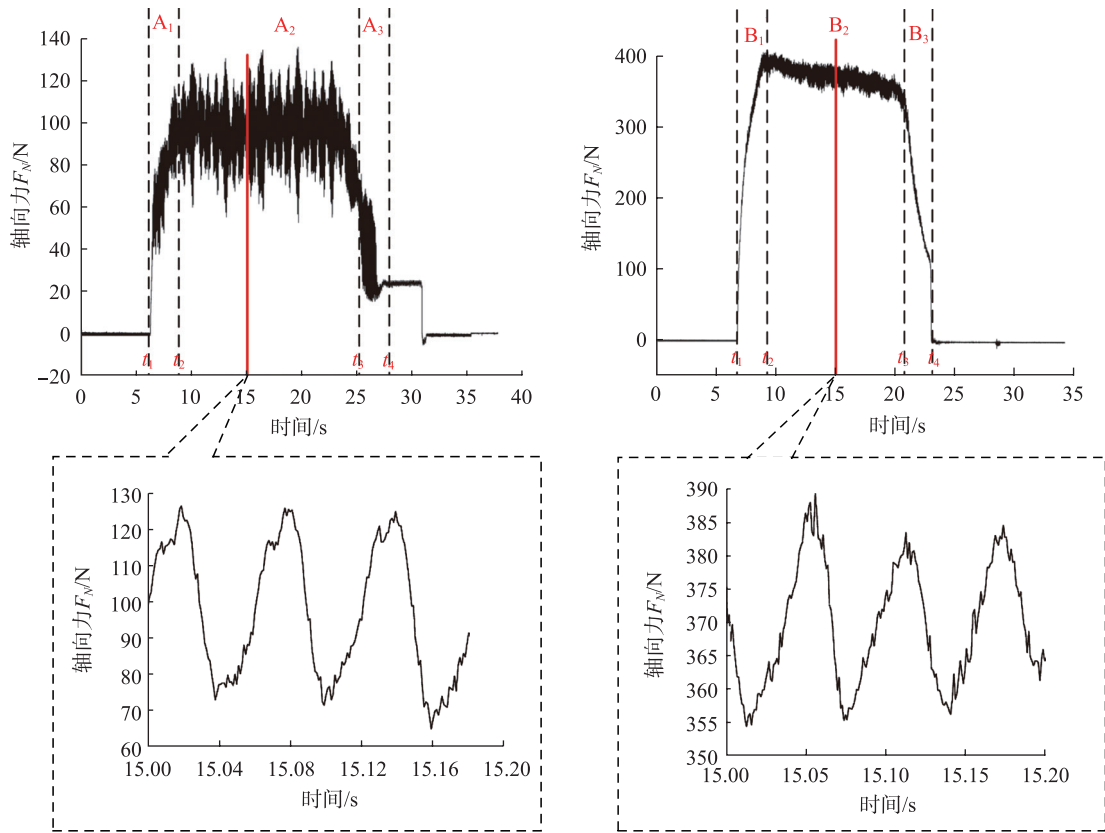


图6 试验A与试验B钻削过程的轴向力
Fig.6 Axial force of test A and test B during drilling process

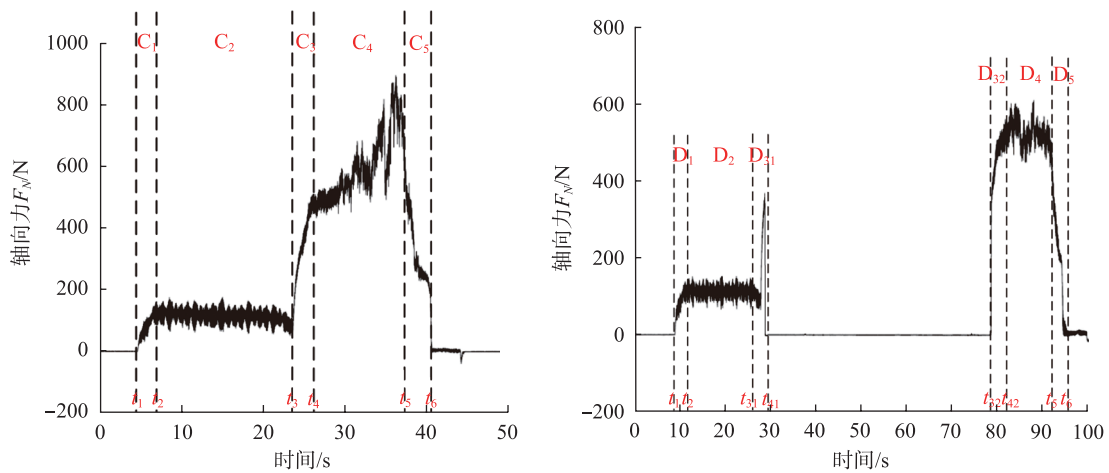


图7 试验C与试验D钻削过程的轴向力
Fig.7 Axial force of test C and test D during drilling process

个阶段, D_1 、 D_2 、 D_{31} (D_{32})、 D_4 、 D_5 为试验 D 的 5 个阶段。将试验 D 的 D_{31} 与 D_{32} 两个阶段叠加起来相当于试验 C 中的 C_3 阶段。

试验 C 在钻削钛合金时轴向力出现了爬升,这是由于钻削叠层时钛合金切屑出现了阻塞。对比试验 B(Ti) 与试验 C(CFRP/Ti)、D(CFRP-Ti) 发现钻削钛合金材料时,试验 C、D 要比试验 B 的轴向力大。叠层钻削过程中,CFRP 材料叠在钛合金上,钻削钛合金时排屑不畅,钛合金切屑与孔壁挤压刮擦导致了轴向力的增加。

3.2 钻削温度分析

通过旋转测温装置,可以测量 4 组试验中刀具钻削工件材料时的刃口温度,即钻削温度。图 8 为进行 4 组试验新刀钻削工件过程中的温度变化,为对比不同试验钻削过程的温度变化差异,将各个试验得到的温度数据点按时间进行拼接,不同颜色的数据点自左向右分别为试验 A(CFRP)、试验 B(Ti)、试验 C(CFRP/Ti)、试验 D(CFRP-Ti)。可以发现,钻削钛合金时的温度要远高于钻削 CFRP,最高温度约为 CFRP 的 3 倍。试验 A、试验 C 与试验 D 在钻削 CFRP 时的温度基本相同,最高温度在 100 左右。而试验 B、试验 C、试验 D 在钻削钛合金时的温度差异较大,试验 B 的最高温度 280 左右,试验 C 的最高温度 370 左右,试验 D 的最高温度为 340 左右。试验 B 是钻削单一钛合金材料,钻削过程中刀具排屑顺畅,温度升高主要是由于切削钛合金过程中产生的热量。试验 C 与试验 D 钻削钛合金材料时的温度要比试验 B 高,一方面是 CFRP 叠层和 CFRP 切屑粉末影响了刀具本身的散热,另一方面是随着钻孔深度的增加,钛合金切屑在排出的过程中与孔壁挤压刮擦产生了一定的热量。试验 D 由于在钻削完 CFRP 材料后空冷至室温,因此钻削钛合金时的温度会低于试验 C。

研究不同试验加工过程中的钻削温度,主要关注 CFRP 与钛合金钻削过程中的最高温度,尤其是在 CFRP/Ti 钻削时的 CFRP 出口温度,即界面温度。图 8 中红色圆圈内的区域为试验 C(CFRP/Ti) 与试验 D(CFRP-Ti) 中刀具钻削到叠层界面时的温度。该界面温度直接决定了 CFRP 叠层出口的加工质量与精度,为防止 CFRP 的树脂基体出现玻璃化的情况,界面温度一般不超过 200。

3.3 切屑形貌分析

CFRP/Ti 叠层钻削过程中会产生 CFRP 材料与钛合金材料两种切屑,如图 9 所示,CFRP 材料切屑为黑色粉末状,钛合金切屑为螺旋带状。在钻削 CFRP 时,粉末状的 CFRP 切屑会在孔的钻削入口处堆积,影响刀具的散热,导致钻削温度增加。钛合金切屑较硬,在排屑过程中会与孔壁刮擦挤压,在钻削叠层材料时钛合金

切屑会对 CFRP 材料造成严重损伤,尤其是在钻削温度较高的情况下。

CFRP/Ti 叠层钻削时产生的切屑与钛合金不同,钻削叠层材料时钻削温度较高,钛合金切屑高温下会发生软化,且钛合金切屑在排屑过程中会与 CFRP 材料刮擦挤压,螺旋状的切屑被挤压变形,图 10 为挤压后的钛合金切屑。同时,退刀冷却对 CFRP/Ti 叠层钻削的钛合金

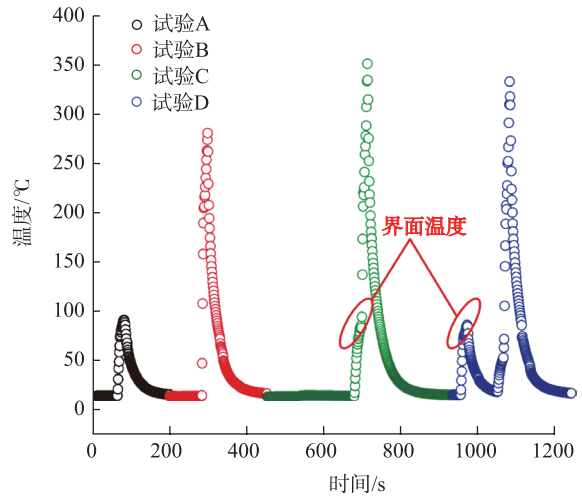


图8 不同试验加工过程中的钻削温度
Fig.8 Drilling temperature in different tests



(a) CFRP 切屑



(b) 钛合金切屑

图9 CFRP切屑与钛合金切屑
Fig.9 CFRP chip and titanium alloy chip



图10 CFRP/Ti叠层钻削过程中的钛合金切屑
Fig.10 Titanium alloy chip in CFRP/Ti drilling

切屑影响不大。

4 结论

本文主要研究 CFRP、钛合金及其叠层材料钻削时的力热行为以及切屑的成形,对比单一材料与叠层钻削之间差异,分析了退刀冷却对 CFRP/Ti 叠层钻削力热行为的影响,并得到以下结论:

(1) CFRP/Ti 叠层钻削时,由于叠层散热条件差且钛合金切屑与孔壁会刮擦挤压,钻削过程中的轴向力与钻削温度均高于单一材料钻削。

(2) CFRP 切削过程中会产生粉末状切屑,钛合金会产生螺旋带状切屑,在 CFRP/Ti 叠层钻削时,由于钻削深度较深,钛合金切屑受孔壁挤压严重。

(3) 在 CFRP/Ti 叠层钻削中增加退刀空冷的过程,可以降低钻削钛合金时轴向力与温度,对于改善叠层钻削时的钻削状态具有积极意义。

参考文献

- [1] GHASSEMIEHE. Performance and wear of coated carbide drill in machining of carbon fibre reinforced composite/titanium stack[J]. International Journal of Materials & Product Technology, 2012, 43 (1/2/3/4): 165-183.
- [2] 宋祚禹, 王西昌, 曹正华, 等. 碳纤维/聚酰亚胺树脂基复合材料开孔件的连接力学性能[J]. 航空制造技术, 2009, 52(S1): 139-140, 144.
- SONG Zuoyu, WANG Xichang, CAO Zhenghua, et al. Mechanical connection properties of carbon fiber/polyimide resin matrix composites with holes[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(S1): 139-140, 144.
- [3] EZUGWUE O, BONNEY J, SILVA RBD, et al. Surface integrity of finished turned Ti-6Al-4V alloy with PCD tools using conventional and high pressure coolant supplies[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(6): 884-891.
- [4] SREEJIT P S, KRISHNAMURTHY R, MALHOTRA, S K, et al. Evaluation of PCD tool performance during machining of carbon/phe-

nolic ablative composites[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 104 (1/2): 53-58.

[5] TASHIRO T, FUJIWARA J, INADA K. Drilling of CFRP/Ti-6Al-4V stacks[J]. Advanced Materials Research, 2011, 325: 369-374.

[6] WANG C Y, LIU G Y, AN Q L, et al. Occurrence and formation mechanism of surface cavity defects during orthogonal milling of CFRP laminates[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 109: 10-22.

[7] WANG C Y, CHEN Y H, AN Q L, et al. Drilling temperature and hole quality in drilling of CFRP/aluminum stacks using diamond coated drill[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2015, 16(8): 1689-1697.

[8] RAMULU M, BRANSON T, KIM D. A study on the drilling of composite and titanium stacks[J]. Composite Structures, 2001, 54(1): 67-77.

[9] SENTHILKUMAR M, PRABUKARTHI A, KRISHNARAJ V. Study on tool wear and chip formation during drilling carbon fiber reinforced polymer (CFRP)/titanium alloy (Ti6Al4V) stacks[J]. Procedia Engineering, 2013, 64: 582-592.

[10] ZITOUNE R, KRISHNARAJ V, COLLOMBET F. Study of drilling of composite material and aluminium stack[J]. Composite Structures, 2010, 92(5): 1246-1255.

[11] TSAO C C, HOCHENG H. Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(10): 1085-1090.

[12] PIQUET R, FERRET B, LACHAUD F, et al. Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2000, 31(10): 1107-1115.

[13] LIU J, ZHANG D, QIN L, et al. Feasibility study of the rotary ultrasonic elliptical machining of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 53(1): 141-150.

[14] CONG W L, PEI Z J, SUN X, et al. Rotary ultrasonic machining of CFRP: a mechanistic predictive model for cutting force[J]. Ultrasonics, 2014, 54(2): 663-675.

[15] KARPAT Y, BAHTIYAR O, DEĞER B. Mechanistic force modeling for milling of unidirectional carbon fiber reinforced polymer laminates[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 56: 79-93.

[16] HINTZE W, HARTMANN D, SCHÜTTE C. Occurrence and propagation of delamination during the machining of carbon fiber reinforced plastics (CFRPs)—An experimental study[J]. Composites Science and Technology, 2011, 71(15): 1719-1726.

通讯作者: 王贤锋, 高级工程师, 研究方向为装配工艺和制孔, E-mail: wangxianfeng@comac.cc.

(责编 古豪)