

# 碳纤维增强复合材料单向层合板直角自由切削热特性试验

文亮<sup>1</sup>, 姜丽萍<sup>2</sup>, 张烘州<sup>2</sup>, 蔡晓江<sup>1</sup>, 安庆龙<sup>1</sup>, 陈明<sup>\*1</sup>

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 上海飞机制造有限公司, 上海 200436)

**摘要:** 为揭示碳纤维增强复合材料(CFRP)切削温度与切削要素之间的关系, 采用直角自由切削对 CFRP 单向层合板进行了切削试验, 并采用 OMEGA-0.05 mm 高灵敏 K 型热电偶对切削温度进行测量, 讨论了切削参数、刀具几何参数及材料参数对切削温度的影响。结果表明: 对切削温度的影响程度由高到低的参数依次为切削速度、切削厚度、刀具后角和钝圆半径, 切削参数对温度的影响效应不受纤维方向角的影响; 不同于金属材料, CFRP 纤维方向角对切削温度影响突出, 顺纤维方向上的切削温度明显高于逆纤维方向上的, 切削温度在  $\theta=90^\circ$  时达到最大值, 且为  $\theta=0^\circ$  时的 2 倍; CFRP 切削回弹对刀具后刀面与已加工表面的接触状况影响较大, 从而影响切削温度, 加剧了切削温度的各向异性特征, 且第 3 变形区切削热对切削温度影响突出; CFRP 切削温度范围窄, 最大切削温度在 300 °C 左右, 将导致切削质量对温度变化更为敏感。

**关键词:** 各向异性; 碳纤维增强复合材料; 纤维方向角; 切削温度; 刀具几何参数

**中图分类号:** TB332

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3851(2015)05-1469-11

复合材料由于具有高的比强度、比刚度以及可设计性等优点, 在现代工业中已被极为广泛地应用<sup>[1-3]</sup>, 层合板是复合材料结构的主要形式之一<sup>[4]</sup>。复合材料与传统单相金属材料的切削加工过程有着明显的区别<sup>[5-8]</sup>, 这使得切削加工领域必须面对新的挑战。这一方面是由于复合材料的各向异性和非均匀性; 另一方面则是由其组成材料本身的切削加工性能所决定。面对航空制造业的巨大需求, 围绕碳纤维增强复合材料(CFRP)切削加工的基础研究也相应展开。

研究 CFRP 在切削过程中的力是研究其切削机制的一个重要方面。力是切削过程中各种物理现象的根源, 切削过程中的力、热共同作用影响切削加工表面质量。切削热和由它导致的切削温度是影响切削过程的重要物理因素之一, 切削时所消耗能量的 97%~99% 转化为热能<sup>[9]</sup>。大量的热能使切削区的温度升高, 直接影响到刀具的寿命和工件的加工精度及表面质量。因此研究切削热和切削温度对生产实践有着重要的指导意义<sup>[10]</sup>。

虽然 CFRP 的切削温度并不高(与其他结构强度相似的金属材料相比)<sup>[11]</sup>, 但 CFRP 中树脂基体是一种对温度敏感的热固性高分子材料, 在切削温度的影响下极容易软化、失去强度, 甚至碳化分解<sup>[12-13]</sup>, 这就导致其中的增强碳纤维容易在失去支撑和保护后受到切削力的影响而产生加工缺陷, 间接影响 CFRP 的切削加工质量和加工效率。此外, 切削过程中产生的切削热在已加工表面上堆积极易引发缺陷形成, 如烧伤、起毛、撕裂等<sup>[14]</sup>。研究 CFRP 切削温度的产生及变化规律, 对切削温度进行预测和控制, 对于提高切削加工质量和加工效率均有重要的应用价值。

Sreejith 等<sup>[15]</sup>采用红外光纤传感器测量了采用聚晶金刚石(Polycrystalline diamond, PCD)刀具切削高温酚醛树脂基碳纤维复合材料时的切削温度, 并结合比切削能得到了临界切削速度 300 m/min 和临界切削温度 330~350 °C。结果显示: 当切削速度超过临界切削速度值后, 切削温度会快速上升; 在超过临界切削温度之后, CFRP 的切削比能快速

收稿日期: 2014-10-16; 录用日期: 2014-12-09; 网络出版时间: 2014-12-30 08:31

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.tb.20141230.0831.002.html

基金项目: 国家“863”计划(2013AA040104); 国家自然科学基金(51105253, 51475298)

通讯作者: 陈明, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为难加工材料加工与精密加工理论。 E-mail: mchen@sjtu.edu.cn

**引用格式:** 文亮, 姜丽萍, 张烘州, 等. 碳纤维增强复合材料单向层合板直角自由切削热特性试验[J]. 复合材料学报, 2015, 32(5): 1469-1479. Wen L, Jiang L P, Zhang H Z, et al. Test on thermal characteristics when orthogonally free machining carbon fiber reinforced plastic unidirectional laminates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(5): 1469-1479.

上升,即材料的切削加工的功耗上升、难加工性加大。该研究只考虑了在 0°一种纤维方向角下工件材料的切削热现象。

Brinksmeier 等<sup>[16]</sup>采用人工热电偶的测温方法得到了 CFRP-Al-Titanium 3 层叠层材料的钻削温度和螺旋铣孔温度,通过对比不同切削温度下的表面质量得到了切削温度与 CFRP 表面质量呈负相关的结论。

大连理工大学的鲍永杰<sup>[17]</sup>通过多种试验研究了切削温度在 CFRP 钻削过程中的影响作用,基于模拟试验得到了 CFRP 在切削加工中存在明显的力热耦合作用,切削温度的升高会造成加工缺陷的出现,树脂的粘结、保护作用逐渐丧失,出现层间分层等,并导致加工质量下降。该研究均基于外部加热的模拟温度场进行讨论,这与实际切削温度场相差仍较大。

纤维方向角  $\theta$  是影响 CFRP 切削过程的一个重要因素,其定义为切削速度  $V_c$  与碳纤维方向(指向未切削材料层)所夹的角度。由于进行 CFRP 切削温度试验与建模均较为复杂,相关的研究较少,考虑不同纤维方向角下的切削温度的各向异性的研究国内外也鲜有报道。

1 试验材料与方法

直角自由切削是最为简化的一种切削加工方式,只有主切削刃参与切削加工,且主切削刃与切

削速度的方向垂直<sup>[10]</sup>。直角自由切削最能简单、直观反映工件材料与刀具刃口上的相互作用规律,在切削加工中是一种研究材料切削去除机制时常用的基础研究手段<sup>[18]</sup>。采用直角自由切削研究碳纤维增强复合材料的力热特性。

1.1 试验材料和刀具

试验材料为 CFRP 单向层合板,铺层方向为同向铺层(均为 0°方向),规格如下:

T700 级 CFRP 层合板,基体为改性环氧树脂 LT-03A,共 40 层铺层,厚度为 5 mm。

CFRP 层合板材料的名义碳纤维体积分数为 60%,CFRP 单向层合板力学性能如表 1 所示。

试验中 CFRP 层合板尺寸为 25 mm×30 mm 的小块板料,如图 1 所示。通过对 0°同向铺层的 CFRP 层合板沿不同方向切割形成从 0°到 180°(间隔为 15°)的板料,由此得到不同纤维方向角下的切削试验材料。不同纤维方向角下的切削加工关系包括平行切削关系、垂直切削关系、顺纤维切削关系以及逆纤维切削关系。

刀具均为特殊定制的正交飞刀,如图 2 所示。为考察不同刀具参数对 CFRP 层合板直角自由切削温度的影响,共考虑了 2 种刀具后角(7°、15°),5 种刀具前角(-5°、5°、15°、25°、35°),4 种刃口钝圆半径(10、15、25、35  $\mu\text{m}$ ),不同钝圆半径的正交飞刀如图 3 所示。

表 1 CFRP 单向层合板力学性能  
Table 1 Mechanical properties of CFRP unidirectional laminates

| Parameter | Tensile strength/MPa | Tensile modulus/GPa | Compressive strength/MPa | Interlaminar shear strength/MPa | 90° tensile strength/MPa | Bending strength/MPa |
|-----------|----------------------|---------------------|--------------------------|---------------------------------|--------------------------|----------------------|
| Value     | 2 450                | 125                 | 1 430                    | 92                              | 70                       | 1 580                |

Note: Unspecified mechanical performance parameters are measured along the fiber orientation.

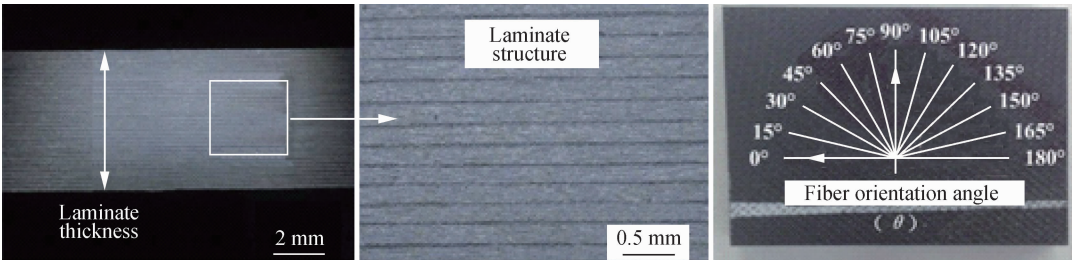


图 1 工件材料(0°同向铺层的 CFRP 层合板)  
Fig. 1 Workpiece materials (0° synclastic CFRP laminates)

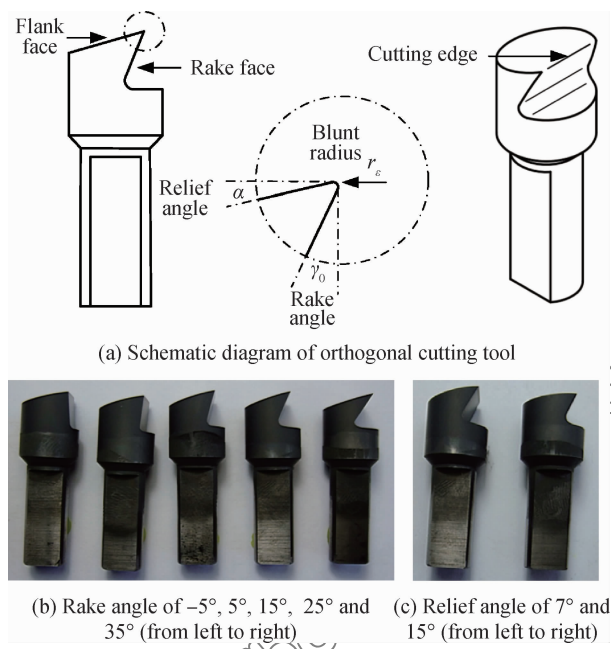


图2 试验用正交飞刀  
Fig. 2 Orthogonal cutting tool in tests

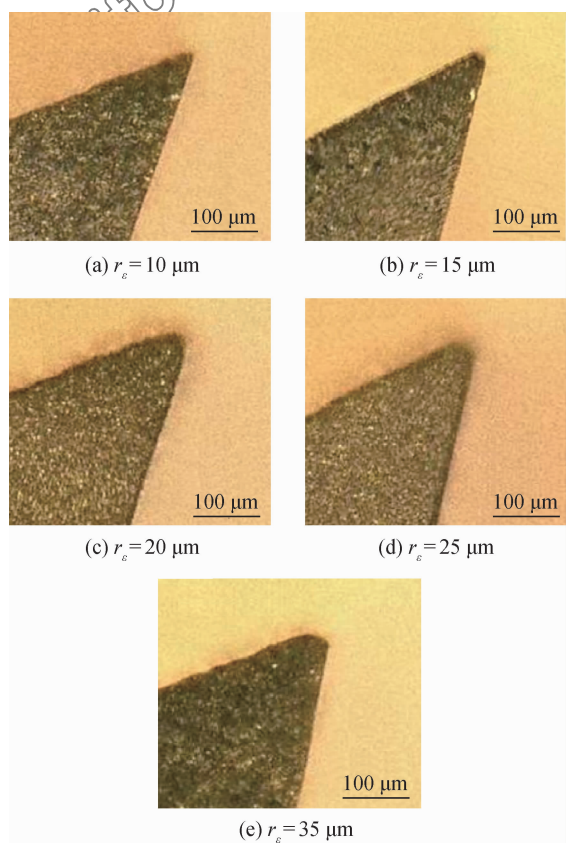


图3 不同钝圆半径的正交飞刀

Fig. 3 Orthogonal cutting tool with different blunt radius

当切削速度较高时，CFRP 的高硬度碳纤维增强相将导致刀具磨损迅速发展，为改善刀具磨损程

度，避免刀具磨损对试验产生的影响，试验所用刀具均为金刚石涂层刀具硬质合金刀具。金刚石涂层刀具的涂层厚度为 5~6 μm，硬质合金刀具材料牌号均为 YG6。

1.2 试验方法

图 4 为 CFRP 单向层合板直角自由切削试验配置图。采用正交飞刀切削的方法，由具有一定纤维方向的 CFRP 板料来实现不同纤维方向角下的切削。在试验中对切削力和瞬时切削温度进行了在线采集。

1.2.1 切削力测量

切削力通过 Kistler-9272 测力仪采集，测力仪安装于平面磨床的工作台面上，工件材料固定于测力仪上。测力仪得到的电荷信号经过 Kistler-5017B 放大器放大，并最终通过计算机信号采集系统完成切削力的采集。同一条件下重复 3 次切削试验，切削力数值均取峰值。

1.2.2 切削温度测量

瞬时切削温度通过人工热电偶测量，热电偶被夹在两块 CFRP 块的中间，如图 4 所示。热电偶采用 OMEGA-0.05 mm 高灵敏 K 型热电偶，测温范围为 0~1 370 ℃，分辨率为 0.1 ℃；空气中 427 ℃到 38 ℃的响应时间为 0.004 s。热电势信号通过快速响应热电势采集仪记录，采集频率可达 100 kHz，以保证瞬时切削温度信号的捕捉。采集过程中考虑了环境温度对测量的影响，增加了对环境温度的实时补偿。

切削过程中刀具切削刃在切削工件的同时也会直接切削热电偶，并在切削瞬间由刀具接通热电偶的两极形成回路。此时，热电偶热端所处的位置就会在切削温度  $T_c$  的影响下形成热电势  $U_{emf}$ ，再通过热电偶标定曲线就可以换算出此点的切削温度  $P_c$ 。切削温度  $T_c$  的位置是处于工件加工表面、刀具、切屑三者交汇的切削区域中心处， $T_c$  可以视为工件加工表面温度。

图 5 为 CFRP 直角自由切削过程中热电势采集仪输出信号经过标定处理及滤波后在温度采集软件中得到的切削温度信号。切削过程中飞刀盘安装在磨床主轴上，由于飞刀盘的旋转惯性和 CFRP 加工回弹导致热电偶周期性接通，故切削温度信号呈等时间间隔分布。由此易知，此时切削温度值即为热电偶第一次被接通时输出的热电势所产生的温度，即切削最高温度。试验中切削温度数据均通过对 3 次相同切削条件下的测量结果取平均值获取。

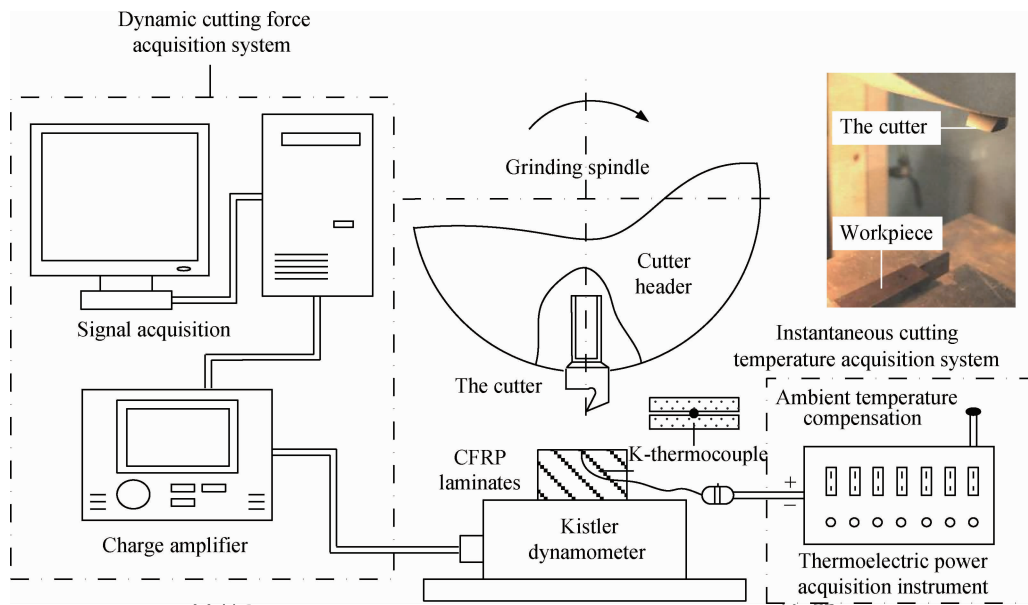


图 4 CFRP 单向层合板直角自由切削试验配置图

Fig. 4 Schematic of orthogonal free cutting of CFRP unidirectional laminates

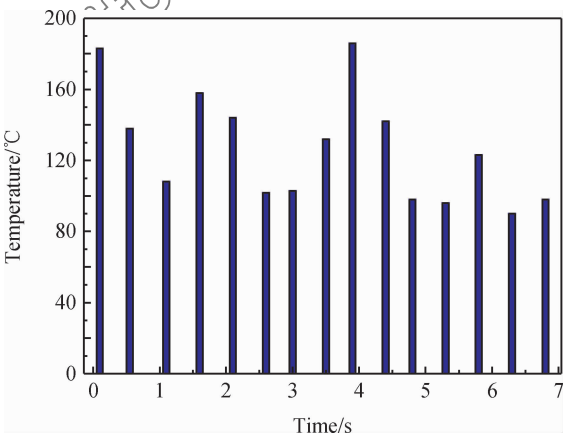


图 5 切削温度信号

Fig. 5 Cutting temperature signal

表 2 CFRP 单向层合板直角自由切削试验参数

Table 2 Test parameters in orthogonal free cutting CFRP unidirectional laminates

| Parameter                                   | Value                       |
|---------------------------------------------|-----------------------------|
| Fiber orientation angle $\theta/(^{\circ})$ | 0, 90                       |
|                                             | 15, 30, 45, 60, 75          |
| Cutting speed $V_c/(m \cdot min^{-1})$      | 105, 120, 135, 150, 165     |
|                                             | 100, 150, 200, 250, 300     |
| Cutting thickness $a_c/mm$                  | 0.005, 0.010, 0.015, 0.020, |
|                                             | 0.025                       |
| Rake angle $\gamma_0/(^{\circ})$            | -5, 5, 15, 25, 35           |
| Relief angle $\alpha_r/(^{\circ})$          | 7, 15                       |
| Blunt radius $r/\mu m$                      | 10, 15, 25, 35              |

1.2.3 机床

正交切削运动由 KENT-KGS-1020AH 平面磨床完成,磨床的砂轮盘被换成专门设计的飞刀盘,正交飞刀安装在飞刀盘上。磨床主轴旋转带动正交飞刀做飞切运动,垂直方向的进给由  $z$  向进给机构完成。

切削速度的范围为 100~300 m/min, 切削厚度范围为 0.005~0.025 mm。表 2 为 CFRP 单向层合板直角自由切削试验参数。图 6 为 CFRP 单向层合板直角自由切削试验现场照片,图 7 为其自由切削示意图。图中: $F_c$  和  $F_p$  分别为主切削力和切深抗力。

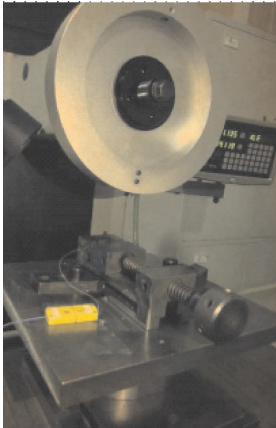


图 6 CFRP 单向层合板直角自由切削试验现场照片

Fig. 6 Photograph of orthogonal free cutting test of CFRP unidirectional laminates

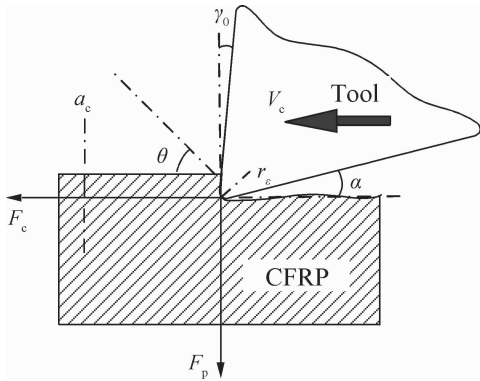


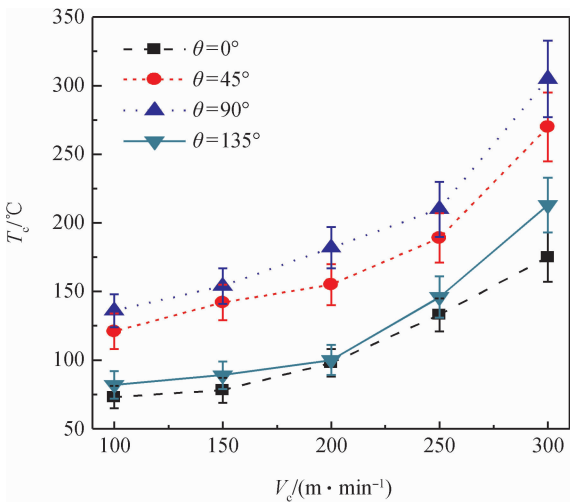
图 7 CFRP 单向层合板直角自由切削示意图  
Fig. 7 Schematic of orthogonal free cutting CFRP unidirectional laminates

2 切削参数对切削温度的影响

图 8 为采用相同工件材料参数(T700 CFRP 层合板), 刀具参数( $\gamma_0=25^\circ$ ,  $\alpha=15^\circ$ ,  $r_e=15\text{ }\mu\text{m}$ , 金刚石涂层)的条件下, 切削速度  $V_c$  和切削厚度  $a_c$  对切削温度  $T_c$  的影响。

由图 8(a)可知, 随着切削速度  $V_c$  的提高, 切削温度  $T_c$  整体呈快速上升趋势。当  $V_c<200\text{ m/min}$ ,  $T_c$  的上升相对缓慢,  $V_c>200\text{ m/min}$  之后  $T_c$  呈快速上升趋势。图 8(b)表明, 随着切削厚度  $a_c$  的变大, 切削温度  $T_c$  整体呈缓慢上升趋势。

此外, 不同纤维方向角  $\theta=0, 45, 90, 135^\circ$  之间的切削温度  $T_c$  差异明显, 且在  $100\text{ m/min}<V_c<300\text{ m/min}$ ,  $5\text{ }\mu\text{m}<a_c<25\text{ }\mu\text{m}$  的范围内各向异性不受切削速度和切削厚度的影响。



(a) Effects of cutting speed

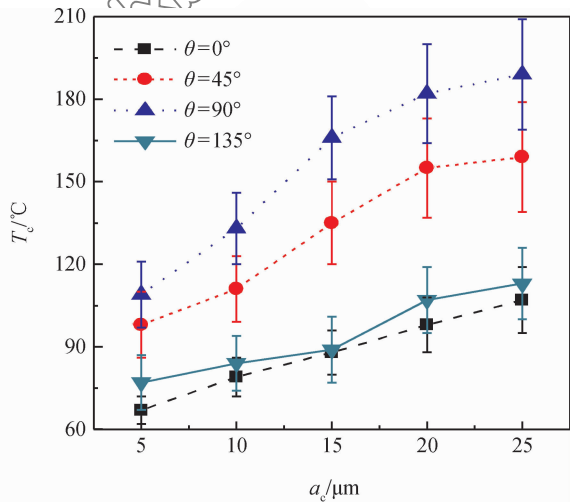
3 刀具参数对切削温度的影响

3.1 刀具前角对切削温度的影响

图 9 为采用相同工件材料参数(T700 CFRP 层合板), 切削参数( $V_c=100, 200, 300\text{ m/min}$ ,  $a_c=20\text{ }\mu\text{m}$ ), 刀具参数( $\alpha=15^\circ$ ,  $r_e=15\text{ }\mu\text{m}$ , 金刚石涂层)的条件下, 刀具前角  $\gamma_0$  对切削温度的影响。

从总体上看, 增大刀具前角  $\gamma_0$  能够降低 CFRP 的切削温度; 刀具前角  $\gamma_0$  对 CFRP 切削加工的影响存在方向性, 在  $\theta=0^\circ$  方向上  $\gamma_0$  对切削温度  $T_c$  的影响超过  $\theta=90^\circ$  方向上的。当  $\gamma_0$  为负前角时, 虽然刀具的散热体积更大, 但切削温度  $T_c$  明显高于正前角的情况, 尤其是  $\theta=0^\circ$  方向上。

由于在负前角切削 CFRP 时, 剪切角变小, 导致工件第 1 变形区剪切滑移变形增大, 随之切削力明显变大, 由此在第 1 变形区产生了大量摩擦热, 导致切削温度  $T_c$  的显著上升(如图 10 所示), 图 10(a)和图 10(c)为刀具前角对主切削力  $F_c$  的影响, 图 10(b)和图 10(d)为刀具前角对切深抗力  $F_p$  的影响。当  $\gamma_0$  为正前角时, 虽然随着  $\gamma_0$  的变大, 刀具的散热楔形体积变小, 但剪切角变大, 变形系数减小, 切削力也随之下降, 由此在切削区域主要由摩擦热导致的切削温度  $T_c$  也会逐渐下降。但由于沿  $\theta=90^\circ$  方向切削时, 纤维断裂方式与  $\theta=0^\circ$  方向存在明显差别, 树脂基体和碳纤维被脆性压断和剪断。此时, 改变  $\gamma_0$  的大小对 CFRP 在  $\theta=90^\circ$  纤维方向上的切削力影响较小, 故在此方向上切削温度  $T_c$  受影响相对有限。



(b) Effects of cutting thickness

图 8 切削速度和切削厚度对切削温度的影响

Fig. 8 Effects of cutting speed and cutting thickness on cutting temperature

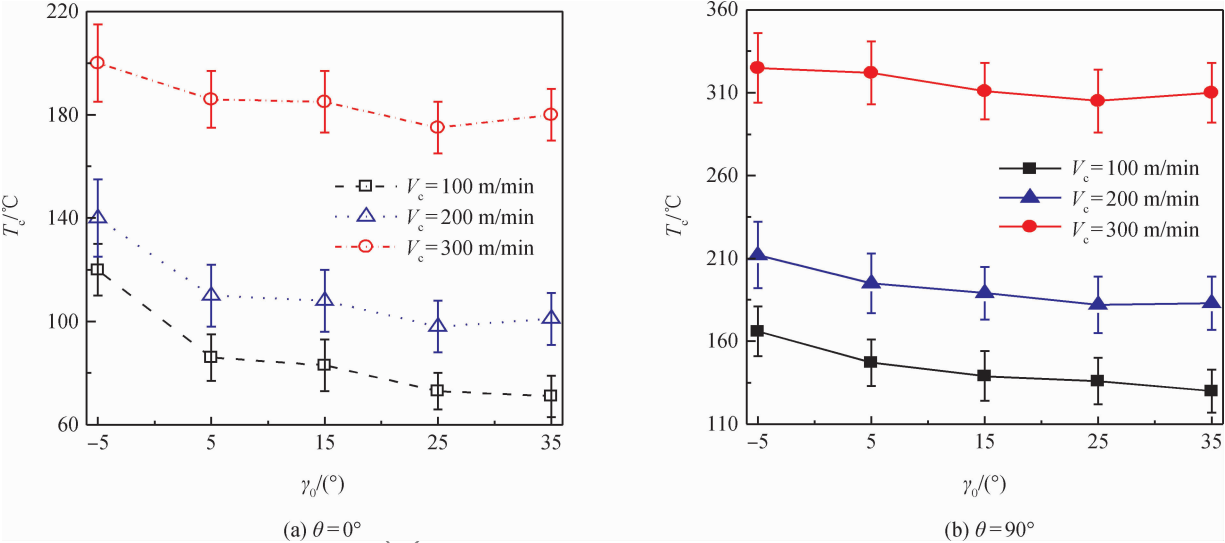


图 9 刀具前角对切削温度的影响

Fig. 9 Effects of rake angle of tool on cutting temperature

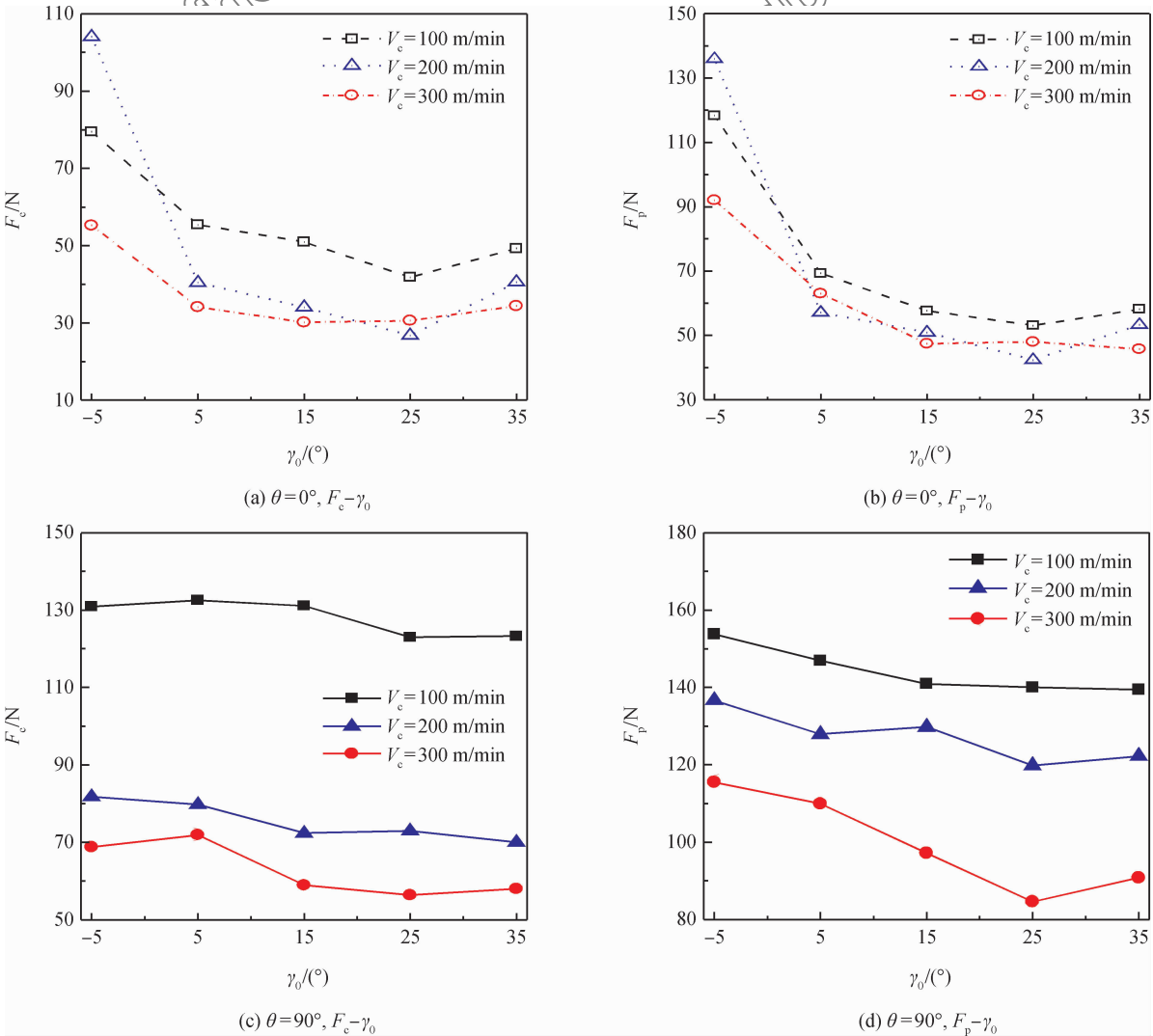


图 10 刀具前角对切削力的影响

Fig. 10 Effects of rake angle of tool on cutting force

3.2 刀具后角对切削温度的影响

图 11 为采用相同工件材料参数(T700 CFRP 层合板), 切削参数( $V_c=100、200、300\text{ m/min}$ ,  $a_c=20\text{ }\mu\text{m}$ ), 刀具参数( $\gamma_0=25^\circ$ ,  $r_e=15\text{ }\mu\text{m}$ , 金刚石涂层)的条件下, 刀具后角  $\alpha$  对切削温度的影响。

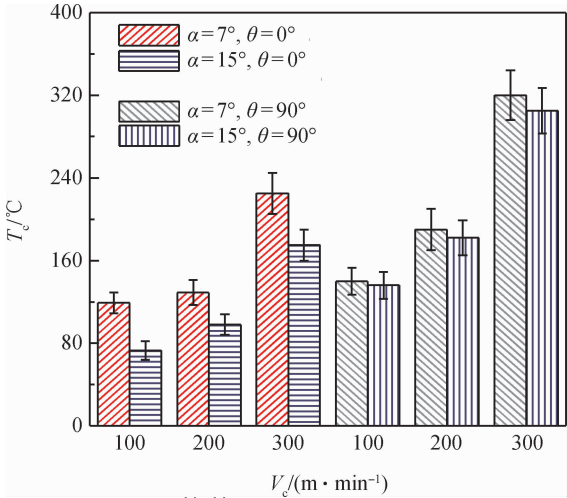


图 11 刀具后角对切削温度的影响

Fig. 11 Effects of relief angle of tool on cutting temperature

在  $\theta=0^\circ$  和  $\theta=90^\circ$  两个纤维方向上, 在更大的刀具后角( $\alpha=15^\circ$ )下切削温度  $T_c$  均低于小后角刀具下( $\alpha=7^\circ$ )。由于正交切削 CFRP 时造成切削刀具和工件切削温度上升的主要原因是工件回弹后刀具后刀面与工件表面的摩擦, 在更大的刀具后角下这种摩擦会得到有效缓解, 产生的摩擦热会显著下降, 并最终导致切削温度的下降。应该注意的是,

树脂基体和碳纤维由于其力学性能的差异, 两者的回弹量是不同的。

由于 CFRP 在  $\theta=0^\circ$  和  $\theta=90^\circ$  两个纤维方向上的压缩弹性模量不同, 刀具后刀面与已加工表面之间的接触面积也有较大区别。在  $\theta=0^\circ$  方向上 CFRP 的切削弹性回复较大, 故在后角  $\alpha$  增大之后切削温度  $T_c$  下降也更为明显; 而在  $\theta=90^\circ$  方向上弹性回复较小, 故  $\alpha$  增大之后  $T_c$  下降也较小。

图 12 为相应条件下刀具后角对切削力的影响。可知, 刀具后角对切削力的影响与对切削温度的影响具有相似性, 且切深抗力的变化更为明显。刀具后角对 CFRP 切削温度的影响, 实质上主要是通过切深抗力  $F_p$  的影响来改变切削温度。

3.3 刀具刃口钝圆半径对切削温度的影响

图 13 为采用相同工件材料参数(T700 CFRP 层合板), 切削参数( $V_c=100、200、300\text{ m/min}$ ,  $a_c=20\text{ }\mu\text{m}$ ), 刀具参数( $\gamma_0=25^\circ$ ,  $\alpha=15^\circ$ , 金刚石涂层)的条件下, 刀具刃口钝圆半径  $r_e$  对切削温度  $T_c$  的影响。

试验中采用的切削厚度为  $a_c=20\text{ }\mu\text{m}$ , 由图 13 可以发现刀具刃口钝圆半径  $r_e$  对切削温度的影响以  $20\text{ }\mu\text{m}$  为分界分为两个阶段: 当  $r_e \leq a_c$  时, 切削温度  $T_c$  在较低的水平; 当  $r_e > a_c$  时, 切削温度  $T_c$  处于较高水平。由此可知, 刀具刃口钝圆半径  $r_e$  对 CFRP 切削加工影响与切削厚度  $a_c$  有直接关系, 选择  $r_e$  小于  $a_c$  的锋利切削刀有利于减小切削温度。当钝圆半径  $r_e > a_c$  时, 出现了明显的切削尺寸效

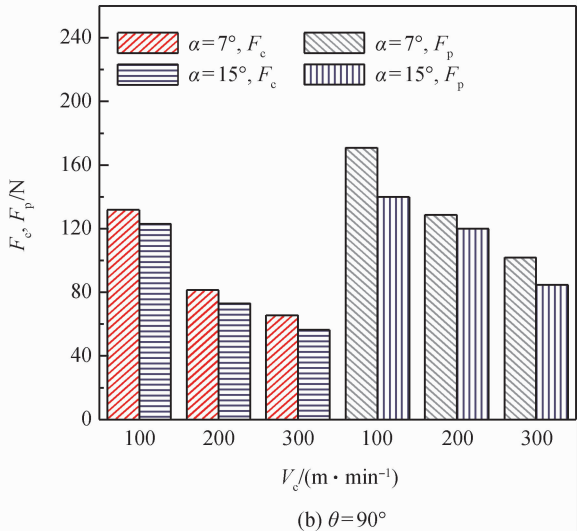
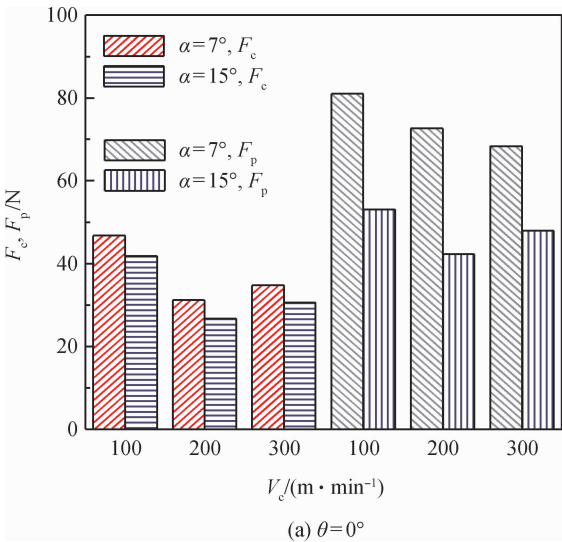


图 12 刀具后角对切削力的影响

Fig. 12 Effects of relief angle of tool on cutting force

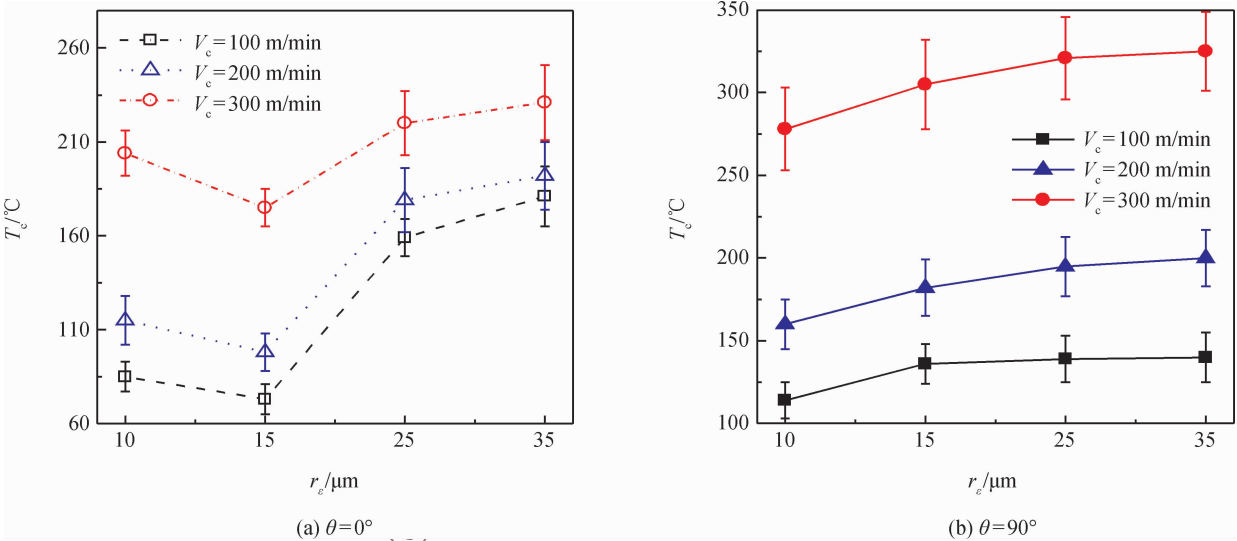


图 13 刀具刃口钝圆半径对切削温度的影响  
Fig.13 Effects of tool cutting edge blunt radius on cutting temperature

应。在小切深的情况下，刀具实际前角减小，刀具与纤维的挤压、摩擦作用加剧，从而消耗了较高的切削功，切削力及切削温度均明显增大。

在  $\theta=0^\circ$  的平行纤维方向上，钝圆  $r_e$  变化对切削温度  $T_c$  影响较大，在  $\theta=90^\circ$  垂直方向上，钝圆  $r_e$  变化对切削温度  $T_c$  的影响小于  $\theta=0^\circ$  方向上的， $T_c$  曲线变化较为平缓，不易受影响。这种规律与刀具几何角度对切削温度的影响极为相似。在小切深的情况下，刀具钝圆半径  $r_e$  主要是通过影响切削区域中刀具与工件的挤压、摩擦接触面积来影响切削温度的。因此刚性更差的  $\theta=0^\circ$  方向比  $\theta=90^\circ$  方向更易受刀具钝圆半径影响而产生切削温度  $T_c$  明显的波动。

4 纤维方向角对切削温度的影响

图 14 为采用相同切削参数 ( $V_c=200$  m/min,  $a_c=20$  μm)，刀具参数 ( $\gamma_0=25^\circ$ ,  $\alpha=15^\circ$ ,  $r_e=15$  μm, 金刚石涂层) 条件下, T700 CFRP 单向层合板在 12 种不同纤维方向角  $\theta$  ( $0\sim180^\circ$ ) 下, 切削温度  $T_c$  的变化曲线。可知, 与常用结构金属材料相比, CFRP 整体切削温度水平较低, 在  $V_c=200$  m/min 的切削速度下切削温度  $T_c$  并没有超过  $200^\circ\text{C}$ , CFRP 是一种切削温度较低的工程结构材料。

由图 14 可知, CFRP 切削温度在不同纤维方向角  $\theta$  的影响下表现出了极强的各向异性, 纤维方向角在  $0\sim180^\circ$  范围内连续变化时切削温度  $T_c$  波动变化显著。 $T_c$  的峰值出现在  $\theta=90^\circ$  方向上, 即垂直

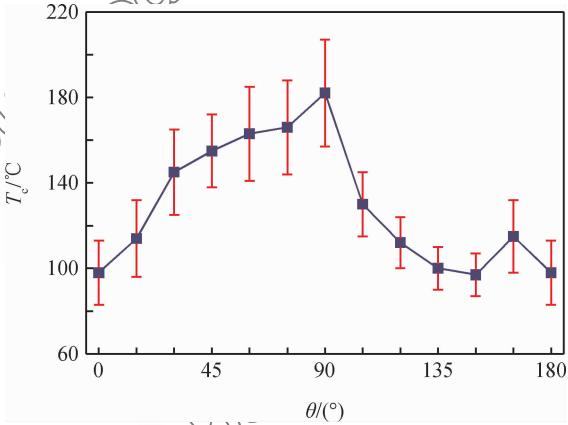


图 14 纤维方向角对切削温度的影响  
Fig.14 Effects of fiber orientation angle on cutting temperature

方向上的  $T_c$  最大, 可达  $182^\circ\text{C}(\pm12^\circ\text{C})$ 。 $T_c$  的最小值出现在  $\theta=150^\circ$  方向上, 为  $97^\circ\text{C}(\pm10^\circ\text{C})$ , 另外在  $\theta=0(180)^\circ$  的平行方向上,  $T_c$  水平同样很低, 为  $98^\circ\text{C}(\pm15^\circ\text{C})$ 。切削温度  $T_c$  最大值为最小值的 2 倍左右。以  $\theta=90^\circ$  的  $T_c$  峰值为界限,  $\theta<90^\circ$  的顺纤维方向上的  $T_c$  明显高于  $\theta>90^\circ$  的逆纤维方向上的, 即在其他切削条件相同的情况下, CFRP 在顺纤维方向更易产生较高切削温度。

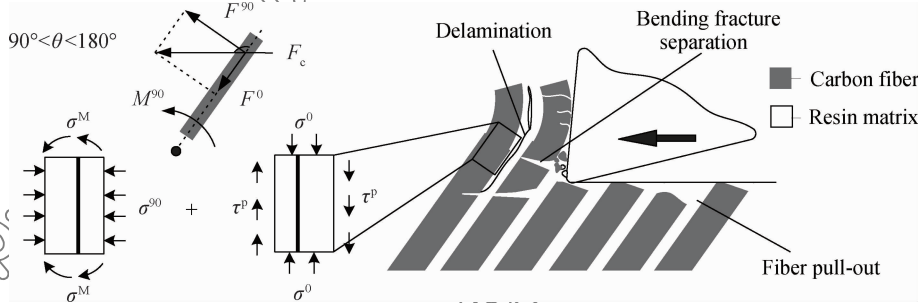
在  $\theta<90^\circ$  的顺纤维方向上, 切削温度  $T_c$  随  $\theta$  角的增大基本呈线性增长关系; 在  $\theta>90^\circ$  的逆纤维方向上, 在刚从垂直方向进入逆纤维方向之后  $T_c$  有一个快速下降, 之后随着纤维方向角  $\theta$  的增大,  $T_c$  呈下降趋势。值得注意的是, 当  $\theta=165^\circ$  时切削温

度  $T_c$  出现了突变(由于  $\theta$  的取值是离散的), 此时  $T_c$  明显高于  $\theta > 135^\circ$  之后的切削温度。切削温度  $T_c$  不仅受到纤维方向角的影响, 且与切削去除机制紧密相关。造成  $T_c$  突变的原因实际上是由于材料去除机制发生改变, 且此时这种变化对切削温度的影响起主导作用。

逆纤维切削关系中 CFRP 材料的去除机制如图 15 所示。当纤维方向角  $90^\circ < \theta < 180^\circ$  时, 被切 CFRP 层合板中碳纤维的方向(指向未切削材料层)与切削速度的方向呈钝角关系, 考虑到刀具的前角一般都不会过大, 逆纤维切削关系通常会造成未切削层材料与刀具在前刀面上方而非刀具刃口发生强烈

挤压作用。此时, 外载荷  $F_c$  集中的位置为刀具前刀面上,  $F_c$  将在碳纤维丝束上产生一个弯矩  $M^{90}$ , 同时产生  $0^\circ$  及  $90^\circ$  纤维方向上的挤压力  $F^0$  和  $F^{90}$ 。在  $M^{90}$ 、 $F^0$  及  $F^{90}$  的作用下, 未切削层材料内产生弯曲应力  $\sigma^M$ , 压应力  $\sigma^0$ 、 $\sigma^{90}$  及剪切应力  $\tau^p$ , 从而发生弯曲和挤压变形, 随着刀具的前进弯曲程度逐渐变大, 当达到碳纤维的弯曲强度极限之后发生弯曲折断, 并形成材料分离, 产生粉末状切屑。在  $\theta = 165^\circ$  时, 由于纤维方向角较大不易发生切屑的弯曲转动, 更多切屑形成, 受到前刀面的挤压作用增大, 切屑分离变难, 因此导致切削力及温度的上升。

图 16 为逆纤维方向角( $\theta = 150^\circ, 165^\circ$ )下 CFRP



Notes: The ratio of carbon fiber and the tool is schematic; actual carbon fiber diameter is 6-8  $\mu\text{m}$ .

图 15 逆纤维切削关系中 CFRP 材料的去除机制

Fig. 15 Material removal mechanism of CFRP in against-fiber cutting relationship

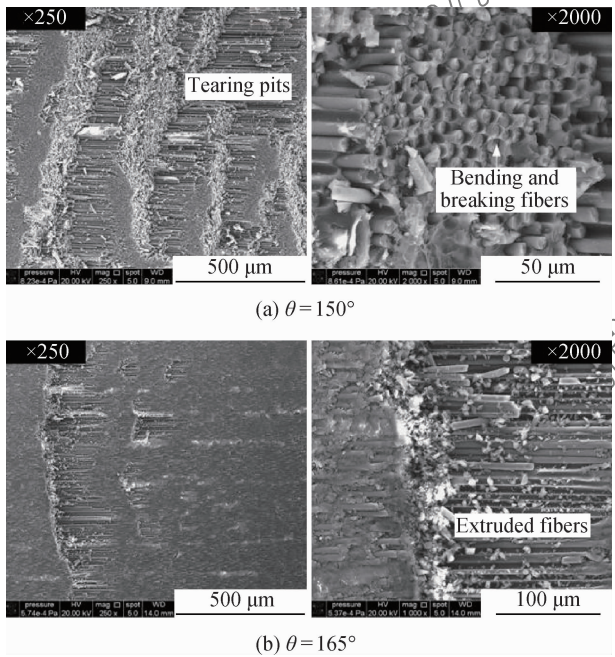


图 16 逆纤维方向角下 CFRP 单向层合板的切削表面形貌

Fig. 16 Cutting surface morphologies of CFRP unidirectional laminates against-fiber orientation

单向层合板的切削表面形貌。可知, 两种纤维方向角下的切削去除机制发生了显著变化。在逆纤维方向角  $\theta = 150^\circ$  条件下, 已加工表面主要呈现严重的撕裂凹坑, 粗糙度也非常大, 达到表面粗糙度  $R_a 13.0$  (平行于切削方向上测量), 可见此方向上 CFRP 材料的切削加工由于纤维弯曲折断出现了明显的撕裂向工件内部扩展的趋势。而在逆纤维方向角最大的  $\theta = 165^\circ$  条件下, 此时纤维受前刀面的挤压作用增大, 纤维弯曲折断不明显。已加工表面上的撕裂凹坑明显减少, 取而代之的是纤维纵向铺成的相对光滑的表面, 表面粗糙度也随之明显改善, 下降为  $R_a 8.5$ 。

## 5 结 论

采用直角自由切削的方法, 研究了不同纤维方向角下切削参数和刀具几何参数对碳纤维增强复合材料(CFRP)单向层合板切削温度的影响规律。

(1) 对切削温度  $T_c$  影响较大的因素为切削速度  $V_c$ 、切削厚度  $a_c$ 、刀具后角  $\alpha$  以及刃口钝圆半径

$r_e$ , 且各种参数对切削温度的影响与切削力的变化存在紧密联系;  $r_e$  对  $T_c$  的影响与切削厚度  $a_c$  相关, 选择  $r_e < a_c$  的刀具有利于降低切削温度。

(2) 切削参数对切削温度的影响不具有方向性, 而刀具参数对切削温度的影响具有方向性, 在  $\theta=0^\circ$  的平行方向比  $\theta=90^\circ$  的垂直方向更容易受影响产生切削温度的波动。CFRP 切削温度的变化不仅由切削参数及刀具参数决定, 而且受到纤维方向角的影响。各方向上切削温度差异明显, 顺纤维方向上的切削温度明显高于逆纤维方向上。切削温度在  $90^\circ$  纤维方向上达到最大值,  $0^\circ$  方向的切削温度约为  $90^\circ$  方向的一半。

(3) 后刀面的接触状况对切削温度影响较大, 由于不同纤维方向角下 CFRP 压缩弹性模量的差异, 工件已加工表面的回弹不同, 造成后刀面与工件接触面积的不同从而间接影响切削温度, 加大了切削温度的各向异性特征; 不同于切削金属材料, 第 3 变形区切削热对切削温度影响最大。

(4) 与常见金属材料切削温度对比, CFRP 是一种切削温度较低的工程材料, 试验过程中所得到的最大切削温度在  $300^\circ\text{C}$  左右。CFRP 同时是一种切削温度变化范围较小的工程材料, 从而将导致切削效率和质量对切削温度变化更为敏感。

## 参考文献:

- [1] Wang R G, Wu W L, Gu W L. Introduction of composite materials [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1999: 1-7 (in Chinese).  
王荣国, 武卫莉, 谷万里. 复合材料概论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999: 1-7.
- [2] Ye L P, Feng P. Applications and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3): 24-36 (in Chinese).  
叶列平, 冯鹏. FRP 在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 24-36.
- [3] Chen S J. The development of advanced composite enterprises and institutions in China[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2013(1): 1-11 (in Chinese).  
陈绍杰. 论我国先进复合材料产事业的发展[J]. 高科技纤维与应用, 2013(1): 1-11.
- [4] Chen X B. Handbook of polymer matrix composites[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 50-51 (in Chinese).  
陈祥宝. 聚合物基复合材料手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 50-51.
- [5] Teti R. Machining of composite materials[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2002, 51(2): 611-634.
- [6] Abrao A M, Faria P E, Rubio J C, et al. Drilling of fiber reinforced plastics: A review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 186 (1-3): 1-7.
- [7] Komanduri R. Machining of fiber-reinforced composites[J]. Machining Science and Technology, 1997, 1 (1): 113-152.
- [8] Liu D F, Tang Y J, Cong W L. A review of mechanical drilling for composite laminates[J]. Composite Structures, 2012, 94(4): 1265-1279.
- [9] Taylor G I, Quinney H. The latent energy remaining in a metal after cold working[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, 1934, 143(849): 307-326.
- [10] Chen X Q, Peng X N. Principles of metal cutting and machine tools[M]. Beijing: Chinese Forestry Press, 2006: 59-60 (in Chinese).  
陈锡渠, 彭晓南. 金属切削原理与刀具[M]. 北京: 中国林业出版社, 2006: 59-60.
- [11] Zhang H J. Study on the drilling technology of CFRP[D]. Beijing: Beihang University, 1998 (in Chinese).  
张厚江. 碳纤维复合材料(CFRP)钻削加工技术的研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1998.
- [12] Griffis C A, Masumura R A, Chang C I. Thermal response of graphite epoxy composite subjected to rapid heating[J]. Journal of Composite Materials, 1981, 15(3): 427-442.
- [13] McManus H L N, Springer G S. High temperature thermo-mechanical behavior of carbon-phenolic and carbon-carbon composites, I. analysis[J]. Journal of Composite Materials, 1992, 26(2): 206-229.
- [14] König W, Grass P. Quality definition and assessment in drilling of fibre reinforced thermosets[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1989, 38 (1): 119-124.
- [15] Sreenith P S, Krishnamurthy R, Malhotra S K, et al. Evaluation of PCD tool performance during machining of carbon/phenolic ablative composites[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 104(1-2): 53-58.
- [16] Brinksmeier E, Fangmann S, Rentsch R. Drilling of composites and resulting surface integrity[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011, 60(1): 57-60.
- [17] Bao Y J. The formation mechanism of disfigurements during drilling and the high efficiency techniques of drilling C/E composite[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010 (in Chinese).  
鲍永杰. C/E 复合材料制孔缺陷成因与高效制孔技术[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [18] Shaw M C. Metal cutting principles[M]. New York: Oxford University Press, 2005: 16-17.

## Test on thermal characteristics when orthogonally free machining carbon fiber reinforced plastic unidirectional laminates

WEN Liang<sup>1</sup>, JIANG Liping<sup>2</sup>, ZHANG Hongzhou<sup>2</sup>,  
CAI Xiaojian<sup>1</sup>, AN Qinglong<sup>1</sup>, CHEN Ming<sup>\*1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200436, China)

**Abstract:** In order to reveal the relationship between the cutting temperature in machining carbon fiber reinforced plastic (CFRP) and the cutting factors, orthogonally free machining tests on CFRP unidirectional laminates were conducted. The cutting temperature was measured using OMEGA-0.05 mm K type high sensitive thermocouple. Discussions were made about the effects of cutting parameters, geometric parameters of tools and material parameters on cutting temperature. The results show that cutting speed, cutting thickness, relief angle of tool and blunt radius, in the sequence of descending, have great influence on cutting temperature. The influence of cutting parameters on the temperature is not affected by the fiber orientation angle. Unlike metal materials, the cutting temperature is greatly influenced by CFRP fiber orientation angle. The cutting temperature cut along fiber orientation is significantly higher than that opposite fiber orientation. The maximum cutting temperature is present to the fiber orientation angle of  $90^\circ$ , and the cutting temperature at the fiber orientation angle of  $90^\circ$  is 2 times of that at the fiber orientation angle of  $0^\circ$ . The spring back of CFRP has great influence on the contact condition between the tool flank and the machined surface, which will affect the cutting temperature eventually. This has exacerbated the anisotropy of the cutting temperature. Moreover, the heat in the third deformation zone has prominent effect on cutting temperature. CFRP has a narrow cutting temperature range, maximum cutting temperature is about  $300^\circ\text{C}$ , which will make cutting quality more sensitive to temperature changes.

**Keywords:** anisotropy; carbon fiber reinforced plastic; fiber orientation angle; cutting temperature; tool geometric parameters