

# 航空高强度碳纤维单向层合结构复合材料 在切削过程中的各向异性行为研究

蔡晓江 邱坤贤 王呈栋 明伟伟 安庆龙 陈明

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海, 200240)

**摘要:**单向层合结构的高强度碳纤维增强树脂基复合材料已逐渐发展成为航空承力结构件的主要材料, 相关的切削加工需求也越来越多。由于显著的各向异性, 单向层合结构的碳纤维复合材料易在切削加工中形成缺陷, 难切削加工性明显。采用直角自由切削试验的方法, 得到了 T700 航空高强度碳纤维单向层合结构复合材料在不同纤维方向角下的切削力、切削比能、切削温度、切削加工表面。基于试验结果讨论了碳纤维单向层合材料在切削过程中力热行为的各向异性, 得到了不同切削参数条件下的切削比能图谱以及碳纤维复合材料的切削热源和传导模型。通过扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)分析了典型切削加工表面的特征, 得到了不同纤维方向下的表面形成规律。

**关键词:**碳纤维增强复合材料; 正交切削; 各向异性; 切削力; 切削温度; 表面形貌

中图分类号: TG501

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2014)05-0684-10

## Study on Anisotropic Behaviors in Cutting of Aviation High-Strength CFRP Materials with Unidirectional Laminate Structure

Cai Xiaojiang, Qiu Kunxian, Wang Chengdong, Ming Weiwei, An Qinglong, Chen Ming

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

**Abstract:** High-strength carbon fiber reinforced polymer (CFRP) with unidirectional laminate structure has gradually developed into major materials in load-bearing aerospace components, and relevant demand in cutting and machining is increasing. Owing to significant anisotropy, CFRP materials with unidirectional laminate structure incline to produce defects and are typical difficult-to-machine materials. By orthogonal cutting experiments, cutting force, specific energy, cutting temperature and machined surface are obtained when cutting T700 high-strength CFRP unidirectional laminates under different fiber orientations. Based on experimental results, mechanical and thermal anisotropy of CFRP uniform laminates are discussed, specific energy maps under different cutting parameters are achieved, heat sources are studied, and the conduction model is established. By scanning electron microscope (SEM) topography of typical surfaces, surface formation mechanism under different fiber orientations is given.

**Key words:** carbon fiber reinforced polymer (CFRP); orthogonal cutting; anisotropy; cutting force; cutting temperature; surface topography

碳纤维增强复合材料(Carbon fiber reinforced polymer, CFRP)作为最具代表性的一种先进树脂基复合材料, 由于其具有比强度和比刚度大、耐腐

蚀、可设计性强等诸多优势<sup>[1-2]</sup>, 自 20 世纪 70 年代开始应用于航空领域。随着全球航空业的快速发展, 无论是强调飞行性能的军机, 还是强调安全、经

**基金项目:** 国家科技重大专项基金(2012ZX04003-031)资助项目; 国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)(2013AA040104)资助项目。

**收稿日期:** 2014-05-10; **修订日期:** 2014-07-10

**通信作者:** 陈明, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: mchen@sjtu.edu.cn。

济、环保、舒适的民航,更轻、更强的复合材料化飞机结构已经成为大势所趋,在过去几十年里,CFRP 材料已经逐步替代传统的铝合金、高强钢等金属材料成为主要的航空结构件材料。由于 CFRP 材料构件可以直接通过材料成型过程实现复杂结构件的近净成型,当大量采用 CFRP 材料之后即可节省掉通过切削加工完成大余量的材料去除,制造装配效率得到了极大的提高。尽管如此,为了使 CFRP 材料构件能够达到最终零件所要求的几何尺寸、形状精度和表面质量,材料成型之后再行切削加工是难以避免的。

CFRP 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>[3-4]</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相材料本身的切削加工性能所决定。CFRP 材料的物理机械性能有显著各向异性,如 CFRP 层合板的层间结合强度仅为其沿纤维方向抗拉强度的 5%~20%<sup>[5]</sup>,易在切削力的作用下形成层间分层。CFRP 材料由碳纤维和树脂两相材料组成,其中碳纤维为典型高硬、高强的增强相,是典型的硬脆性难加工材料;树脂则是对热极为敏感的材料,易在切削温度影响下发生失效,失去对碳纤维的支撑和保护。两相材料与刀具的切削匹配性能差异较大,在同一切削刃口的作用下,两相材料容易产生切削中材料分离过程的不协调,如 CFRP 材料加工表面粗糙度和尺寸精度下降,纤维拔出、撕裂、起毛、烧伤等现象。由上可知,复合材料从材料组成和复合属性上导致了切削加工性能较差、切削过程材料去除规律复杂、易形成切削加工缺陷。

面对航空制造业具大的需求以及 CFRP 材料切削加工存在的挑战,国内外研究者也开展了一些研究工作,主要涉及切削工艺参数优化<sup>[1, 2, 6]</sup>、刀具结构匹配<sup>[7-9]</sup>、加工表面缺陷<sup>[10-12]</sup>等方面,但针对各向异性特征下材料的切削去除机理研究仍较少,尤其缺少深入研究和解决 CFRP 单向层合材料在切削过程中的各向异性行为研究。显著的各向异性特征是造成 CFRP 单向层合结构的复合材料难加工、易出现加工表面缺陷的根本原因,也是其区别与传统各向同性金属材料的关键之处。另外,目前文献主要涉及的是低强度等级的 CFRP 材料,仍缺少已经大量应用于航空制造业的 T700 及其以上级别碳纤维单向层合板材料的相关切削加工研究。

本文针对 T700 级高强度 CFRP 单向层合材料开展直角自由切削试验,研究其在切削过程中的

力热的各向异性行为,共考虑了 0°(180°),15°,30°,45°,60°,75°,90°,105°,120°,135°,150°,165°共 12 种  $\theta$  角方向,以及切削速度和切削厚度变化对各向异性行为的影响规律。此外,对各向异性的力热行为共同作用形成的加工表面进行分析,得到了典型方向上加工表面的形成机理以及表面微观缺陷形成机理。

## 1 试验方案

### 1.1 工件材料和刀具

采用的试验材料为 T700/LT-03A CFRP 单向层合板,铺层方向为同向铺层(均为 0°方向)共 40 层铺层,厚度为 5 mm。其中碳纤维体积分数均为 60%,相关的力学性能指标如表 1 所示。试验中 CFRP 层合板被切割成尺寸为 25 mm×30 mm 的小块板料,通过对 0°CFRP 层合板按不同方向切割形成从 0°到 180°每隔 15°一个不同的纤维方向角,得到的 CFRP 小块料可以用来进行不同纤维方向角下的直角自由切削试验。试验所用刀具均为特殊定制的正交飞刀,只有一条主切削刃参与切削加工。表 2 为 CFRP 单向层合板直角自由切削试验的参数汇总表。

表 1 试验用 CFRP 单向层合板力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of unidirectional CFRP laminates

拉伸强度/ MPa	拉伸模量/ GPa	压缩强度/ MPa	面内剪切强度/ MPa	90°拉伸强度/ MPa	抗弯强度/ MPa
2 450	125	1 430	92	70	1 580

注:未说明的力学性能参数均为 0°方向性能。

表 2 CFRP 层合板直角自由切削试验参数表

Tab. 2 Machining parameters in orthogonal cutting of CFRP laminates

工件材料参数	数值
纤维方向角 $\theta/(^\circ)$	0,90 (平行、垂直) 15,30,45,60,75 (顺纤维) 105,120,135,150,165 (逆纤维)
切削加工参数	数值
切削速度 $V_c/(m \cdot \min^{-1})$	100,150,200,250,300
切削厚度 $a_c/mm$	0.005,0.01,0.015,0.020,0.025
刀具参数	数值
前角 $\gamma_0/(^\circ)$	25
后角 $\alpha/(^\circ)$	15
刃口钝圆半径 $r_e/\mu m$	15(涂层之后的钝圆)
刀具材料	硬质合金+CVD 金刚石涂层

## 1.2 试验配置

CFRP单向层合板直角自由切削试验的配置图如图1所示。试验中的正交切削运动是由KENT-KGS-1020AH平面磨床完成的,将磨床的砂轮盘换成专门设计的飞刀盘,将正交飞刀装在飞刀盘上。当磨床主轴旋转时就可以带动正交飞刀做飞切运动。切削力的采集通过Kistler-9272测力仪和Kistler-5017B放大器完成。瞬时切削温度的测量是通过人工热电偶的方法来完成的。热电偶被夹在两块CFRP材料块的中间,试验时热电偶随工件材料一起被切掉,从而记录下工件材料被切瞬时的切削温度。热电偶采用OMEGA-0.05 mm高灵敏K型热电偶(测温范围 $0 \sim 1370^{\circ}\text{C}$ ,分辨率 $0.1^{\circ}\text{C}$ ),热电势信号是通过快速响应热电势采集仪记录,采集频率100 kHz。

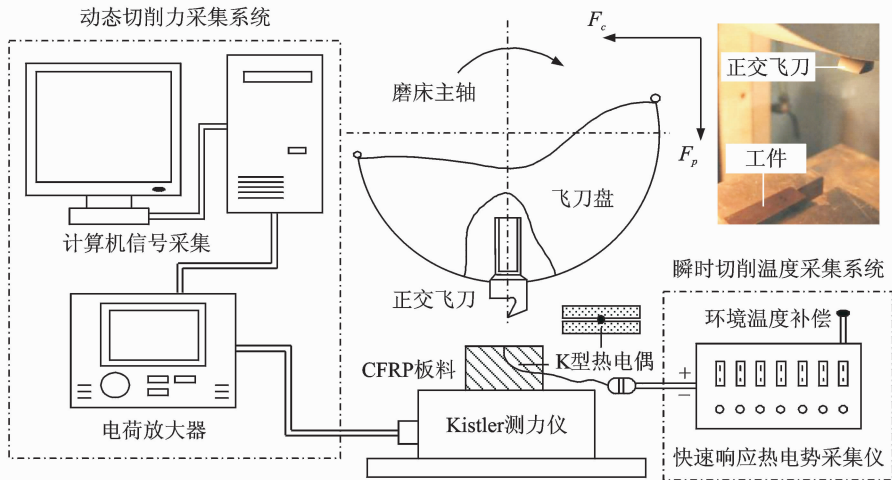


图1 CFRP层合板直角自由切削试验配置图

Fig. 1 Scheme of orthogonal cutting of CFRP laminates

## 2 试验结果与分析

### 2.1 力热行为的各向异性

#### 2.1.1 切削力和切削比能

纤维方向角 $\theta$ 在 $0 \sim 180^{\circ}$ 方向范围内连续变化时,CFRP单向层合材料的主切削力 $F_c$ 和切深抗力 $F_p$ 均有明显波动变化,表现出显著的各向异性,如图2(a)所示。 $F_p$ 均大于相应 $F_c$ ,说明CFRP单向层合材料加工回弹严重,且回弹反抗的程度同样具有各向异性。

T700/LT-03A CFRP层合板单层材料周向切削时的切削比能图谱,如图2(b)所示。可以看到,CFRP层合板单层材料在一周之内的切削比能 $\mu$ 方向性明显,整个图谱呈“鸽子”形状;在逆纤维切削的二、四象限切削比能较小,在顺纤维切削的一

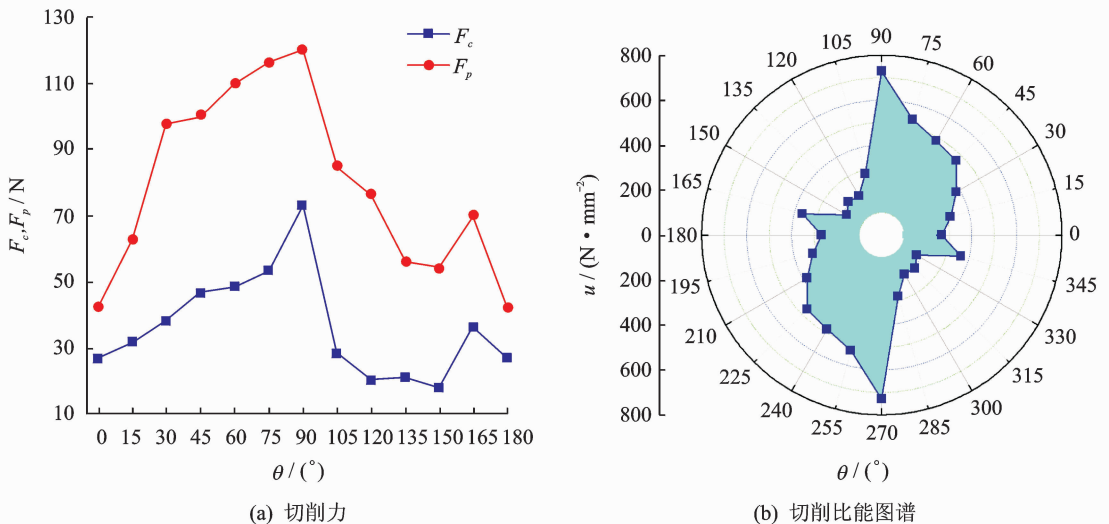


图2 CFRP层合板单层材料的切削力和切削比能图谱( $V_c=200 \text{ m/min}$ ,  $a_p=20 \mu\text{m}$ )

Fig. 2 Cutting force and specific energy map in cutting of CFRP uniform laminates ( $V_c=200 \text{ m/min}$ ,  $a_p=20 \mu\text{m}$ )

三象限切削比能偏大;切削比能的最大值出现在垂直纤维切削时( $\theta=90^\circ/270^\circ$ )约是最小值的3倍,形成“鸽子”形图谱的翅膀;在二、四象限靠近水平轴的位置( $\theta=165^\circ/345^\circ$ )有小幅的切削比能增大,形成“鸽子”形图谱的头和尾。

纤维方向角 $\theta$ 在 $0\sim 180^\circ$ 方向范围内连续变化时,CFRP材料的切削比能变化显著,即在切削加工时消耗的能量有着明显差别: $\theta=90^\circ$ 的垂直方向切削加工性能最差,切屑分离最困难; $\theta<90^\circ$ 的顺纤维方向切削加工性能随 $\theta$ 的增长呈线性增长; $\theta>90^\circ$ 的逆纤维方向切削性能优于 $\theta<90^\circ$ 的顺纤维方向,更易进行切屑分离; $\theta=0^\circ$ 的平行方向也是比较容易实现材料去除的方向。

### 2.1.2 切削热和切削温度

与常用结构金属材料(如碳钢)相比,CFRP材料整体切削温度水平较低,如图3所示。在 $V_c=200\text{ m/min}$ 的切削速度下,切削温度 $T_c$ 并没有超过 $200^\circ\text{C}$ 。CFRP材料在不同纤维方向角 $\theta$ 的影响下表现出了显著的各向异性。切削温度 $T_c$ 的峰值出现在 $\theta=90^\circ$ 方向上,即垂直方向上CFRP材料的切削温度 $T_c$ 最大。在 $\theta<90^\circ$ 的顺纤维方向上, $T_c$ 随 $\theta$ 角的增大基本呈线性增长关系,越小的顺纤维方向角下 $T_c$ 越小,越大的顺纤维方向角下 $T_c$ 越大;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 $T_c$ 首先有一个快速下之后随着纤维方向角 $\theta$ 的增大,除在 $\theta=165^\circ$ 方向上会略有上升外,总体呈快速下降趋势。

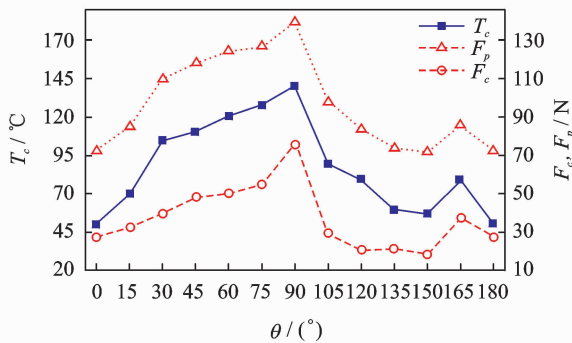


图3 CFRP层合板单向层合材料切削热及切削温度的产生( $V_c=200\text{ m/min}$ ,  $a_p=20\text{ }\mu\text{m}$ )

Fig. 3 Heat and temperature generation in cutting of CFRP uniform laminates ( $V_c=200\text{ m/min}$ ,  $a_p=20\text{ }\mu\text{m}$ )

在金属切削加工中,切削过程所消耗的机械能(切削力所做的功)被认为几乎全部转换为切削热,并通过切削温度的形式表现出来<sup>[13,14]</sup>。在正

交切削中,单位时间内由切削力产生的切削热可以认为是<sup>[14]</sup>: $P_c=F_c \cdot V_c$ 。据此可知,在切削条件切削速度 $V_c$ 相同的条件下,切削热 $P_c$ 是由主切削力 $F_c$ 的大小所决定的;而在刀具、工件材料、周围介质条件完全相同的条件下切削温度 $T_c$ 直接由 $P_c$ 的大小来决定,即主切削力 $F_c$ 与切削温度 $T_c$ 成正比关系, $F_c$ 越大 $T_c$ 越高。切深抗力 $F_p$ 虽然通过增加后刀面上的摩擦力与切削热的生成间接相关,但属于被动力并没有直接形成能量消耗和热量生成。

如图3所示,是CFRP材料切削温度 $T_c$ 、主切削力 $F_c$ 、切深抗力 $F_p$ 的对比曲线,可以发现与上述的金属切削加工规律不同,CFRP材料的切削温度 $T_c$ 与切深抗力 $F_p$ 呈更为显著的正比例关系,而与主切削力 $F_c$ 的曲线规律并不相似。因此,可以得到CFRP材料的切削热的产生与传导与传统各向同性金属材料并不相同。

试验中 $T_c$ 的温度值取自刀具切削刃上一点,热电偶热端位置如图4所示, $T_c$ 的位置是处于工件、刀具、切屑三者交汇的切削区域中心处, $T_c$ 可以描述为工件温度、刀具的切削刃温度或切屑底部温度。

考虑到切削温度 $T_c$ 所处的特殊位置以及 $T_c$ 与切深抗力 $F_p$ 呈正比例关系而与主切削力 $F_c$ 的曲线规律并不相似的现象,可以假设出CFRP材料切削加工中切削热和切削温度的产生模型,如图4所示。

- ①CFRP材料切削功耗较小(对比常见碳钢金属材料),产生切削热也相应较少、切削温度较低。
- ②CFRP材料在切削加工的切屑形态为粉末

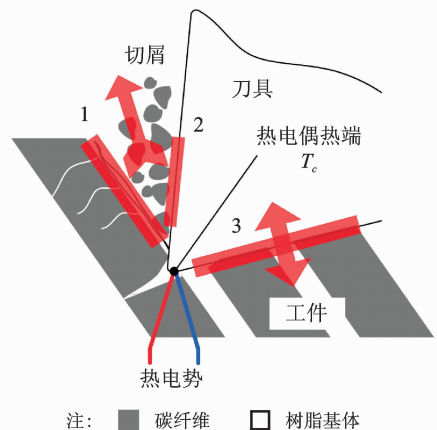


图4 CFRP材料正交切削热源与传导模型  
Fig. 4 Heat sources and conduction model in orthogonal cutting of CFRP materials

状且碳纤维的导热系数大,第一变形区和第二变形区产生的切削热量基本被粉末状切屑带走,这部分热量基本不会影响刀具与工件的温度。

③CFRP材料是一种加工回弹较为严重的材料,切深抗力 $F_p$ 水平较高,在 $F_p$ 的影响下工件与刀具后刀面接触摩擦的第三变形区会产生大量切削热,此部分切削热会向工件、刀具后刀面传导造成两者温度的上升,温度的上升幅度与 $F_p$ 成正比。

综上所述,在CFRP材料的正交切削中,刀具、工件的切削温度主要由切深抗力 $F_p$ 主导的第三变形区摩擦热所贡献。

### 2.1.3 切削参数的影响

切削速度 $V_c$ 对CFRP材料的切削比能 $u$ 影响较为显著,随着 $V_c$ 的提高切削比能图谱快速收缩,在所有纤维方向上切削性能都快速下降,即高速切

削能从整体上改善CFRP材料的改善切削性能、降低切削能耗,如图5所示。

切削比能图谱在 $V_c=100\sim 200$  m/min范围内都保持了完全相似“鸽子”形的形状规律, $V_c$ 的改变基本只是等比例改变了“鸽子”的大小,即切削速度 $V_c$ 在低速段对CFRP材料各个纤维方向上切削性能的影响是均匀的,CFRP材料的各向异性在低速切削时不受影响。与此不同的是,在 $V_c=200\sim 300$  m/min高速切削段,“鸽子”形图谱形状规律开始变化,随 $V_c$ 的提升图谱面积不再下降,并有变饱满的趋势,即在 $V_c$ 的高速段CFRP材料在各个纤维方向上的切削性能逐渐趋于一致,切削时的各向异性逐渐减弱。

切削速度 $V_c$ 主要通过切削温度 $T_c$ 的提高来影响CFRP单向层合材料的切削性能,高速条件下刀具后刀面与工件材料表面摩擦加剧,当 $T_c$ 达

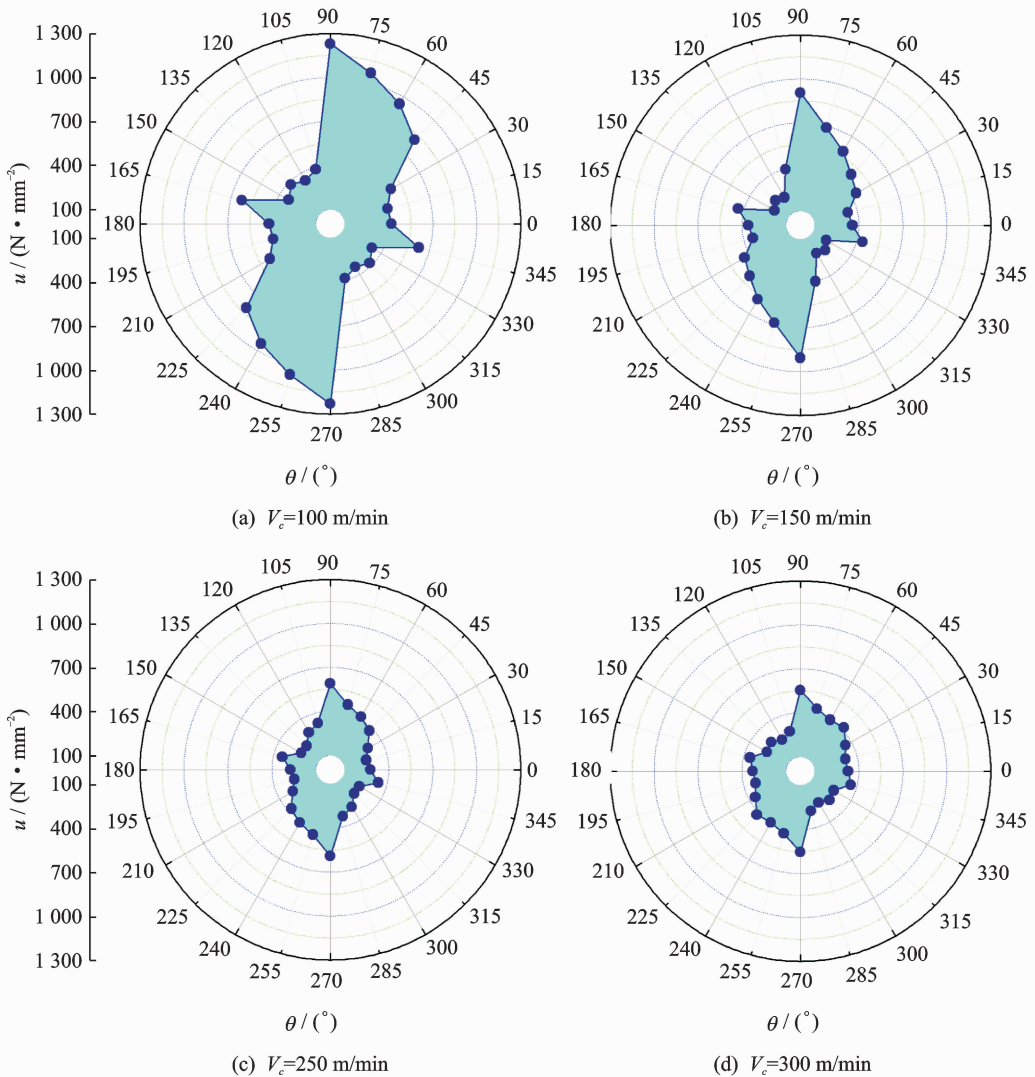


图5 切削速度对CFRP材料切削比能图谱的影响( $a_p=20$   $\mu\text{m}$ )

Fig. 5 Effects of cutting speed on specific energy map of CFRP of materials ( $a_p=20$   $\mu\text{m}$ )



到树脂基体的玻璃化转化温度时会出现机械性能的显著下降、甚至碳化降解,直接导致碳纤维失去支撑并相应失去对 CFRP 材料的增强作用,使得切削力迅速下降并趋于各向同性。

如图 6 所示,切削比能图谱的形状规律和数值范围都随  $a_c$  的不同发生了较大变化,其中在切削厚度最小  $a_c=5 \mu\text{m}$  时切削比能图谱最“饱满”,其形状偏离“鸽子”形也最远,在各个纤维方向上切削比能  $u$  的水平都较高,整周都表现出较强的难切削加工性。这种现象与纤维本身的属性有关,试验用 T700 碳纤维的单丝直径约为  $6\sim 8 \mu\text{m}$ ,即  $a_c=5 \mu\text{m}$  时直角自由切削试验在顺、逆纤维加工时切削均发生在纤维内部,会造成较大的切削比能。在  $a_c=10\sim 25 \mu\text{m}$  的切削厚度范围内,切削比能图谱基本保持了较为规律的“鸽子”形,其规律可以描述

为: $a_c$  增大,切削比能图谱变窄,即在  $\theta<90^\circ$  顺纤维方向和  $\theta>90^\circ$  的逆纤维方向上切削耗能都会随  $a_c$  的增大变小,切削加工性得到明显改善; $\theta=90^\circ$  的切削比能受  $a_c$  影响较小,在  $a_c$  超过纤维直径之后保持稳定,即此方向上切削性能不受切削厚度影响。

切削厚度  $a_c$  对 CFRP 单向层合材料切削性能  $u$  的影响主要是通过影响切削厚度与刀具刃口钝圆半径( $r_c=15 \mu\text{m}$ )的比例来实现的。 $a_c$  的增大使得刀具刃口钝圆前方由负前角条件挤压实现材料去除所占的比例下降,使得切削比能  $u$  明显下降。而  $\theta=90^\circ$  的切削比能未受明显影响,是由于此方向上的材料去除本身即以碳纤维挤压断裂成粉末状切屑为主, $a_c$  的改变并不改变 CFRP 材料的切削去除方式,即保持切削比能  $u$  稳定。

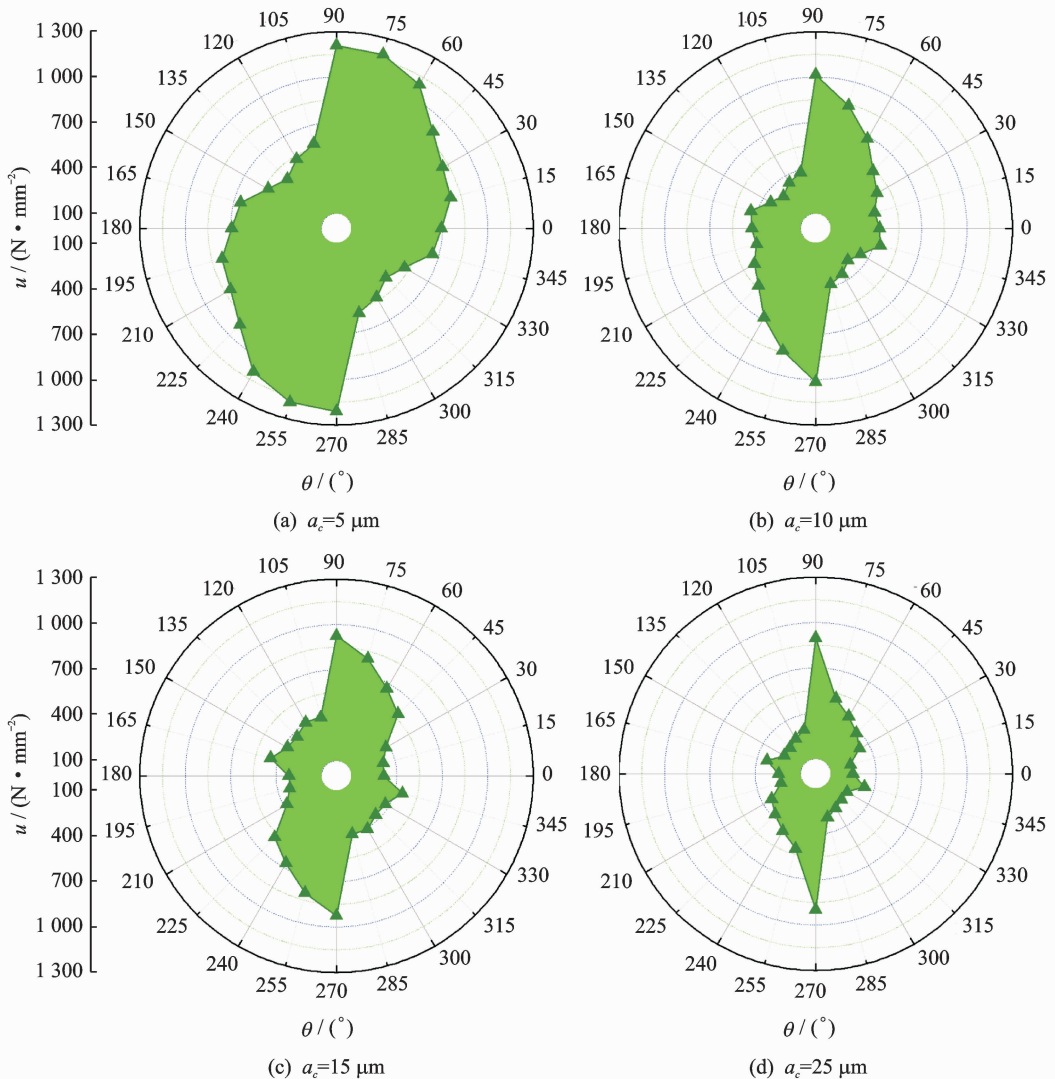


图 6 切削厚度对 CFRP 材料切削比能图谱的影响 ( $V_c=200 \text{ m/min}$ )

Fig. 6 Effects of cutting depth on specific energy map of CFRP of materials ( $V_c=200 \text{ m/min}$ )

## 2.2 切削加工表面的各向异性

### 2.2.1 表面粗糙度

如图7所示,在正交切削同向铺层的CFRP单向层合板时,表面粗糙度 $R_a$ 具有显著各向异性,不同的 $\theta$ 方向上 $R_a$ 差异极大。在 $90^\circ < \theta < 180^\circ$ 逆纤维方向上,表面粗糙度 $R_a$ 恶化极为严重远远超过了顺纤维方向;相反在 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ 的顺纤维方向上, $R_a$ 值较小,加工表面较为平滑; $\theta = 90^\circ$ 则是 $R_a$ 值陡变的分界限。此外,沿着切削方向上的粗糙度 $R_a$ 值大于与之对应的加工表面在垂直切削方向上的 $R_a$ 值。

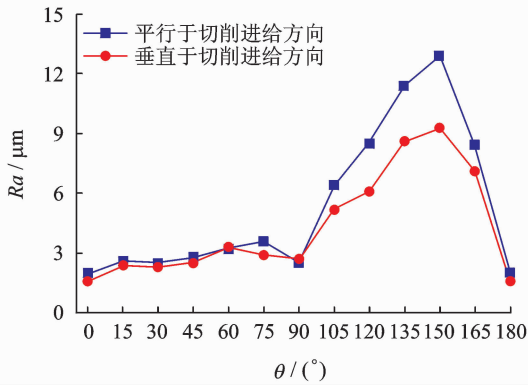


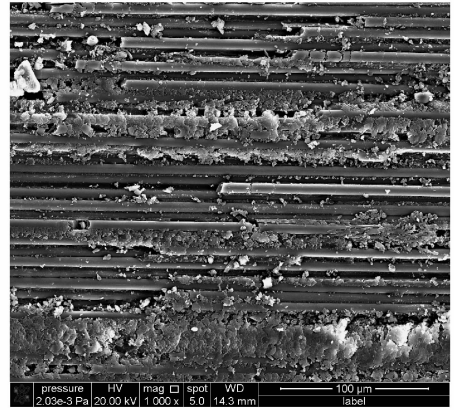
图7 纤维方向角对表面粗糙度 $R_a$ 的影响  
( $V_c = 200 \text{ m/min}$ ,  $a_p = 20 \mu\text{m}$ )

Fig. 7 Effects of fiber orientation angle on surface roughness  $R_a$  ( $V_c = 200 \text{ m/min}$ ,  $a_p = 20 \mu\text{m}$ )

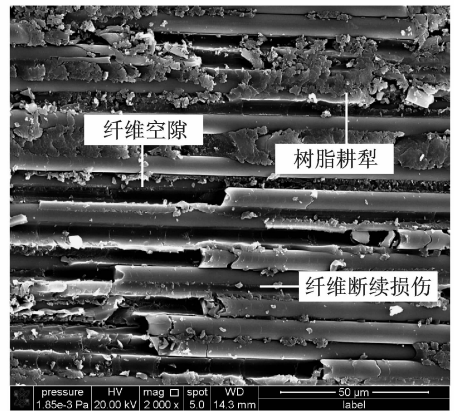
### 2.2.2 表面形貌

在 $\theta = 0^\circ$ 方向上,已加工表面的形成主要由界面分层分离实现,即主要依靠破坏强度较弱的碳纤维—树脂界面形成已加工表面,没有过多涉及到高强度增强相碳纤维的挤压、剪切、拉伸等剧烈的断裂行为,切削功耗较小,更容易形成光滑的已加工表面。如图8(a)所示,即为CFRP材料在 $\theta = 0^\circ$ 方向上的已加工表面形貌特征,可以看到 $0^\circ$ 纤维方向角条件下的加工表面的纤维断口较少,主要由长纤维的纵向铺成,表面相对平整、光滑。少量存在的纤维断口是在界面层剥分离未完全完成的纤维受到刀具进一步的挤压所形成的 $45^\circ$ 斜断裂口,即界面层剥分离和纤维 $0^\circ$ 挤压断裂是平行切削关系中的主要切断机制。除了连续长纤维铺成的光滑已加工表面之外, $0^\circ$ 纤维方向角条件下也存在少部分的微观表面缺陷,如图8(b)所示,主要有3种类型:(1)纤维空隙;(2)纤维断续损伤;(3)树脂耕犁。

与 $\theta = 0^\circ$ 相比, $\theta = 90^\circ$ 方向上每一根碳纤维都必须被刀具单独压断或剪断产生切屑分离,而不能



(a) 典型表面形貌



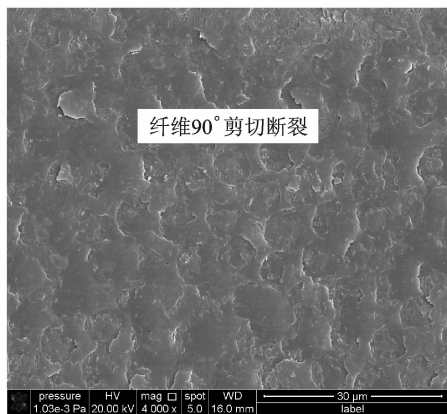
(b) 表面微观缺陷

图8  $0^\circ$ 纤维方向角下CFRP材料的切削表面形貌

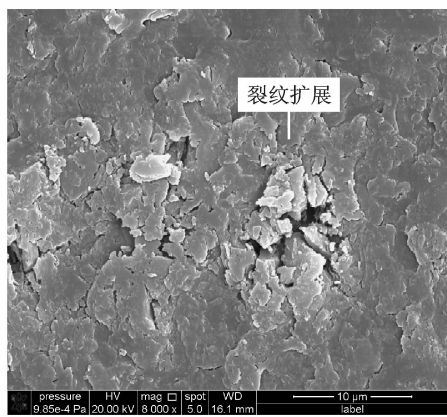
Fig. 8 Surface topography of CFRP materials cut with  $0^\circ$  orientation angle

像 $\theta = 0^\circ$ 方向在最底部一层发生剪切分层形成切屑分离。因此,在 $\theta = 90^\circ$ 方向上存在更多的碳纤维切断,相应的切削功耗也是更大的。如图9(a)所示,即为CFRP材料在垂直切削关系下的已加工表面形貌特征,可以看到 $90^\circ$ 纤维方向角条件下的加工表面主要由整齐的纤维横断面组成,表面基本平整。表面规律排布的纤维横断面是纤维受到刀具剪切作用而形成的,呈整齐平断面形貌,即碳纤维的 $90^\circ$ 剪切断裂是垂直切削关系中的主要切断机制,形成的断面是平整的横断面。

此外,在垂直切削关系中,对于未切削层材料垂直于纤维方向的 $90^\circ$ 压应力极易通过连续纤维反方向传递至工件材料内部,并在刀具刃口下的已加工表面上形成与纤维方向垂直的 $90^\circ$ 拉伸应力。当此应力超过CFRP材料的 $90^\circ$ 拉伸强度极限时(100 MPa以内),在已经加工表面上会发生碳纤维—树脂界面的微裂纹,并有可以继续扩展出现表面裂纹,如图9(b)所示。即, $90^\circ$ 纤维方向角条

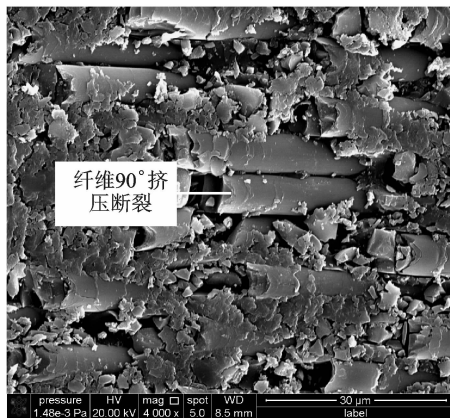


(a) 典型表面形貌

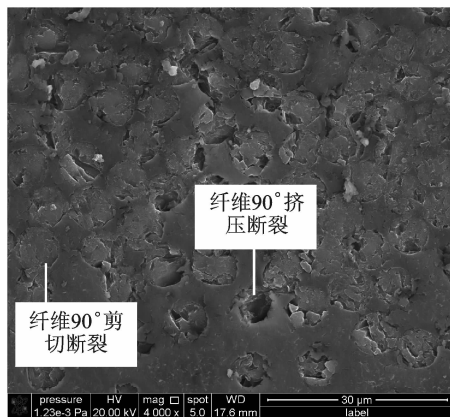


(b) 表面微观缺陷

图 9 90°纤维方向角下 CFRP 材料的切削表面形貌  
Fig. 9 Surface topography of CFRP materials cutted with 90°orientation angle



(a)  $\theta=15^\circ$  典型表面形貌及微观缺陷



(b)  $\theta=75^\circ$  典型表面形貌及微观缺陷

图 10 15°和 75°顺纤维方向角下 CFRP 材料的切削表面形貌

Fig. 10 Surface topography of CFRP materials cutted with orientation angles 15° and 75°

件下主要的微观表面缺陷是 90°拉伸微裂纹及其扩展。

在  $0^\circ < \theta < 90^\circ$  的顺纤维方向上, 随着  $\theta$  角的增大, 切削表面逐渐从类似  $\theta=0^\circ$  方向下的长纤维铺成表面演变为类似  $\theta=90^\circ$  方向下的纤维横断口组成的表面, 从相对平整光滑的加工表面逐渐演变为规律性起伏表面, 如图 10 所示。且在表面微观缺陷上也有逐渐演化的趋势:

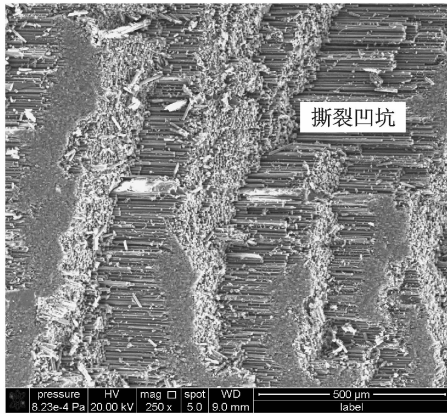
(1) 在  $\theta=15^\circ$  较小的顺纤维方向下, 出现了较为明显的树脂耕犁现象, 这是由于在这些纤维方向角条件下的工件刚性较差、加工回弹严重, 导致刀具后刀面更多与工件材料发生摩擦机制和耕犁机制, 并出现了纤维空隙和纤维断续损伤两种在  $\theta=90^\circ$  方向下的主要表面微观缺陷特征。即, 在较小的顺纤维方向角条件下, CFRP 材料的切削加工表面上纤维断口主要为 90°挤压断裂形成的斜断口, 但纤维断口并不主要构成加工表面, 摩擦和耕犁机制影响下的耕犁状树脂主要形成切削加工表面, 小

顺纤维方向角条件下加工表面相对平整、光滑。

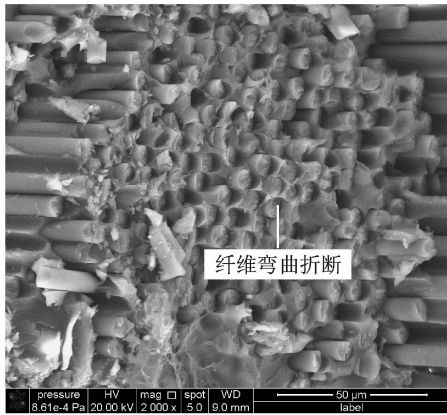
(2) 在  $\theta=75^\circ$  较大的顺纤维方向下, 加工表面逐渐演化至以纤维断口为主要特征的表面, 且纤维断口逐渐演化为剪切断裂形成的平整断口为主, 而挤压断裂形成的纤维斜断只少量存在。在较大的顺纤维方向角条件下, CFRP 材料的切削加工表面主要以纤维断口组成, 随着纤维方向角  $\theta$  的增大, 纤维 90°剪切断裂形成的平整横断口占主导地位, 而纤维 90°挤压断裂形成的斜断口逐渐减少。与小顺纤维方向角相比, 大顺纤维方向角条件下的加工表面有规律性起伏, 表面略粗糙。

在逆纤维切削关系中, CFRP 材料的碳纤维切断机理主要为弯曲折断, 切削去除较易发生、耗能不大, 但由于在碳纤维弯曲折断的过程中易于向工件内部传导裂纹和撕裂, 其已加工表面粗糙, 严重时主要由撕裂凹坑组成, 如图 11 所示。此外, 由于逆纤维加工中加工回弹现象不明显, 因此基本没有





(a) 典型表面形貌



(b) 表面微观缺陷

图 11 150°逆纤维方向角下 CFRP 材料的切削表面形貌  
Fig. 11 Surface topography of CFRP materials cut with 150° orientation angle

出现在顺纤维加工中较为严重的树脂摩擦和耕犁机制作用。

### 3 结 论

本文以 CFRP 材料的直角自由切削试验为基础,讨论了航空高强度碳纤维单向层合材料在切削过程中的力热行为的各向异性,得到以下主要结论:

#### (1) CFRP 材料的力行为各向异性

CFRP 材料的切削力具有显著各向异性,不同纤维方向角  $\theta$  条件下的切削比能差异明显,基于此提出了 T700/LT-03A CFRP 层合板单层材料周向切削时的切削比能图谱。

#### (2) CFRP 材料的切削参数

①切削速度  $V_c$  的影响:  $V_c$  对 CFRP 材料的切削比能影响显著,随着  $V_c$  的提高,切削比能图谱快速收缩,CFRP 材料的切削性能整体改善、切削能耗降低;  $V_c$  在小于 200 m/min 的低速段不影响材

料的各向异性,图谱形状保持不变;  $V_c$  在大于 200 m/min 的高速段 CFRP 材料的各向异性减弱,图谱在缩小的同时逐渐变饱满;

②切削厚度  $a_c$  的影响:  $a_c$  对 CFRP 材料的影响具有各向异性,  $\theta = 90^\circ$  方向受  $a_c$  影响较小,而在  $\theta < 90^\circ$  顺纤维方向和  $\theta > 90^\circ$  的逆纤维方向上的切削耗能都会随  $a_c$  的增大变小、切削加工性得到改善,即随着  $a_c$  增大,切削比能图谱变窄。

#### (3) CFRP 材料的切削温度

在 CFRP 材料的正交切削中,刀具、工件的切削温度主要由切深抗力  $F_p$  主导的第三变形区摩擦热所贡献。

#### (4) CFRP 材料的切屑去除与表面形成

①在  $\theta = 0^\circ$  方向上,切削去除机理为面内剪切应力主导的界面层剥分离,已加工表面主要由长纤维的纵向铺成,表面相对平整、光滑。

②在  $\theta = 90^\circ$  方向上,切削去除机理为  $90^\circ$  剪切应力主导的剪切断裂分离,已加工表面主要由整齐的纤维横断面组成。

③在  $0^\circ < \theta < 90^\circ$  方向上,切削去除机理包含①②两种机制,随  $\theta$  角增大加工表面逐渐从长纤维铺成光滑表面演变为纤维横断面组成的规律性起伏表面。

④在  $90^\circ < \theta < 180^\circ$  方向上,切削去除机理为面内弯曲应力主导的弯曲折断分离,加工表面主要由纤维弯断后留下的空隙(纤维拔出)、凹坑组成,粗糙度差。

### 参考文献:

- [1] Teti R. Machining of composite materials[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2002, 51(2): 611-634.
- [2] Komanduri R. Machining of fiber-reinforced composites[J]. Machining Science and Technology, 1997, 1(1): 113-152.
- [3] Konig W, Wulf C, Grab P, et al. Machining of fibre reinforced plastics[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 1985, 34(2): 537-548.
- [4] 陈绍杰. 复合材料技术与大型飞机[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 605-610.  
Chen Shaojie. Composite technology and large aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(3): 605-610.
- [5] 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.  
Ye Lieping, Feng Peng. Applications and develop-

- ment of fiber-reinforced polymer in engineering structures[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39 (3):24-36.
- [6] Arola D, Ramulu M. Orthogonal cutting of fiber-reinforced composites: A finite element analysis[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1997, 39(5):597-613.
- [7] Iliescu D, Gehin D, Gutierrez M E, et al. Modeling and tool wear in drilling of CFRP[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, 50 (2):204-213.
- [8] Tsao C, Hocheng H. Effects of exit back-up on delamination in drilling composite materials using a saw drill and a core drill[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, 45 (11): 1261-1270.
- [9] Tsao C C, Chiu Y C. Evaluation of drilling parameters on thrust force in drilling carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composite laminates using compound core-special drills[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2011, 51(9):740-744.
- [10] Krishnaraj V, Prabukarthi A, Ramanathan A, et al. Optimization of machining parameters at high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2012, 43 (4): 1791-1799.
- [11] 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.
- [12] Zitoune R, Collombet F. Numerical prediction of the thrust force responsible of delamination during the drilling of the long-fibre composite structures [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2007, 38(3):858-866.
- [13] Shaw M C. *Metal cutting principles*[M]. New York: Oxford University Press, 2005:30-31.
- [14] 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,2006:60-61.  
Chen Xiqu, Peng Xiaonan. *Metal cutting principle and tool* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2006:60-61.