

碳纤维增强聚醚醚酮正交切削加工的切屑形成和表面质量研究

郭睿虎^{1,2} 杨涛^{1,2} 杜宇¹ 孙瑜¹

(1 天津工业大学机械工程学院, 天津 300387)

(2 天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津 300387)

文 摘 为研究纤维取向角和切削深度对碳纤维增强聚醚醚酮(CF/PEEK)复合材料的去除机理、切削力和表面质量的影响,设置了不同的切削深度和切削速度,对CF/PEEK进行了正交切削实验。实验结果表明,影响CF/PEEK加工过程的主要因素是纤维取向,0°与45°会形成连续卷曲的切屑,切屑曲率和切削深度有关;90°和135°在较小切深的情况下会形成连续切屑,较大切深(0.1 mm以上)则会形成崩碎切屑并伴随极其严重的损伤;对加工表面形貌分析可知,与传统热固性复合材料加工不同,CF/PEEK基于其基体的属性,形成了切屑连续性和加工表面质量上的差异。

关键词 碳纤维增强聚醚醚酮复合材料,切屑形成,切削力,切削机理,正交切削

中图分类号:TB332

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2025.02.015

Investigation on the Chip Formation and Surface Quality in Orthogonal Cutting of Carbon Fiber Reinforced Polyether Ether Ketone

GUO Ruihu^{1,2} YANG Tao^{1,2} DU Yu¹ SU Yu¹

(1 School of Mechanical Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387)

(2 Advanced Mechatronics Equipment Technology Tianjin Area Major Laboratory, Tianjin 300387)

Abstract To explore the influence of fiber orientation angle and cutting depth on the removal mechanism cutting force, and surface quality of carbon fiber-reinforced polyetheretherketone (CF/PEEK) composites, different cutting depths and cutting speeds were set up, and orthogonal cutting experiments on CF/PEEK were carried out. The experimental results demonstrate that the fiber orientation is the primary factor affecting the machining process of CFPEEK. Continuous and curled chips are formed at 0° and 45°, and the curvature of the chips is associated with the cutting depth. At 90° and 135°, continuous chips are formed when the cutting depth is relatively small, while above a cutting depth of 0.1 mm, fragmented chips are formed, accompanied by extremely serious damage. Analysis on the machined surface morphology reveals that, unlike the processing of traditional thermosetting composites, due to the properties of the matrix, CF/PEEK exhibits acts differently in chip continuity and machined surface quality.

Key words Carbon fiber reinforced polyether ether ketone composite, Chip formation, Cutting forces, Machining mechanism, Orthogonal cutting

0 引言

碳纤维增强复合材料(CFRP)具有高强度、轻质、高耐腐蚀性和低线胀系数等优点,使得在航空航天、船舶、汽车等领域的应用越发广泛。根据基体的性质,纤维增强聚合物复合材料可分为热固性和热塑性复合材料。与热固性聚合物基复合材料相比,

热塑性聚合物基复合材料抗冲击好、抗疲劳好、可回收、加工成型快、造价低等突出特点而受到广泛关注^[1-2]。聚醚醚酮(PEEK)作为一种具有优异的力学性能、化学稳定性和热稳定性等优点的新型高性能聚合物,使得碳纤维增强聚醚醚酮复合材料(CF/PEEK)成为极具代表性的热塑性聚合物基复合材料

收稿日期:2022-11-15

基金项目:天津市131创新型人才团队(201916);天津市自然科学基金(20JCQNJC00050)

第一作者简介:郭睿虎,1998年出生,硕士,研究方向为复合材料机械加工与检测。E-mail:unshangmengyi@126.com

通信作者:杨涛,1970年出生,教授。E-mail:yangtao@tjpu.edu.cn

(CFRTP)之一^[3]。为了赋予复合材料零件的尺寸公差和装配,通常需要诸如铣削和钻孔等二次制造工艺^[4-6]。正交切削是指刀具主切削刃与切削速度方向垂直的切削过程,尽管在传统的工业加工过程中并不常见,但该操作提供了对加工CFRP材料变形的基本理解,是所有加工操作的基础。国内外学者针对CFRP去除进行了研究,呈脆性的碳纤维会在切削刃的作用下发生断裂,并形成粉末状切屑,而热塑性树脂基体的材料特性会导致长切屑的产生^[7-10],然而,由于复合材料特性存在明显不同,难以准确预测识别复合材料的切屑形成机制。因此,需要新的分析方法更好地了解CFRTP的材料去除和切屑形成过程。本文开展了CF/PEEK的正交切割实验,分析了切削过程中的切屑形成机制和作用力,并将其与CFRP的切削机制相关联。

1 实验

1.1 实验设备

本研究在汉川XK714D数控加工中心进行CF/PEEK层合板直角切削实验(图1),并使用Kistler 9257B型三向测力仪对切削力进行测量。为探讨CF/PEEK的相关切削机理,选定切削参数(表1)进行实验。在实验完成后对切屑宏观形态拍摄观察,并用ZEISS Sigma 300 SEM对加工后的表面形态进行观察分析,以了解切削过程中的切屑形成机制。

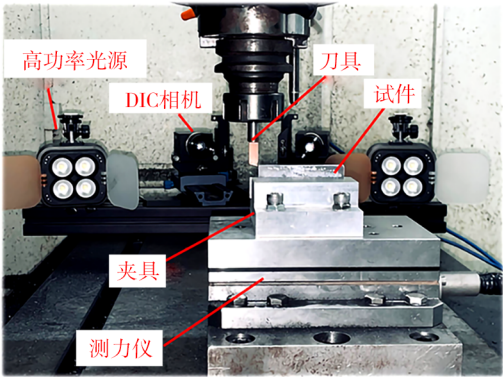


图1 正交切削实验装置
Fig. 1 Orthogonal cutting experimental setup

表1 实验参数

Tab. 1 Experimental parameters

纤维取向角/(°)	切削深度 a_f /mm	切削速度/mm·min ⁻¹
0, 45, 90, 135	0.03, 0.05, 0.1	0.3, 0.5

1.2 实验设置

实验中使用的T700/PEEK单向层压板纤维含量为66%,厚度为5 mm。在准备实验时,将这些材料切割成尺寸为80 mm×36 mm和不同纤维取向的试样。采用定制的直角切削刀具,刀具材质为硬质合金。刀具的前角和后角分别为10°和20°,切削刃半径为

5 μm。切削刃长度为7 mm,保证正交切削实验时刀具切穿整个工件。在实验时控制主轴转速为0进行正交切削(图2),并按照实验参数进行实验,每组实验结束后更换新刀具。每组实验重复3次,切削力取3次测量的平均值。

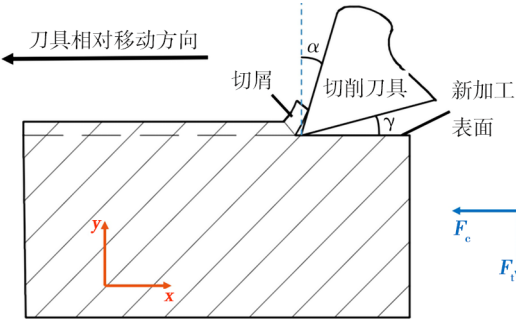


图2 正交切削示意图
Fig. 2 Schematic diagram of orthogonal cutting

2 结果与讨论

2.1 切屑形成

纤维方向是影响材料去除的主要因素。纤维取向为0°的CF/PEEK试件,在纤维取向切削过程中产生切屑的机理是:首先,平行于纤维的I型断裂将层压板从刀具边缘半径剥离,形成一个在前刀面上滑动的单独层。发生这种断裂是因为基体的拉伸强度远低于压缩载荷下的纤维强度。剥离的纤维和基体沿刀具前刀面滑动,在刀具压缩引起的纤维微屈曲的影响下,最终形成卷曲形状的切屑,如图3所示。

正纤维取向45°的CF/PEEK试件:45°纤维取向的试件,纤维和基体对切削过程起到了支撑作用,因为由切削刀具前进引起的对试件的压缩,使得试件沿垂直于纤维方向断裂,同时,基体发生塑性变形,断裂的纤维与基体沿平行于纤维方向滑动,形成卷曲状切屑,如图4所示。

由图3、图4我们可以观测到,随着切深的增加,所形成的切屑曲率也随之变大,这是因为随着切深的增加,切屑中的纤维长度也随之变长,断裂的纤维仍与基体黏合在一起,提升了切屑的强度,使得切屑更加不易弯曲。45°纤维与0°纤维的试件相比,由于材料对切削过程的支撑作用,因而曲率更大,上述现象也更加明显。

90°的纤维取向的CF/PEEK试件:切屑与切削深度相关。图5展示了不同切深下,90°纤维取向的试件的切屑成型形貌,可以观察到切屑中的纤维在小切深(0.03、0.05 mm)剪切断裂后仍与基体结合,最终形成连续的切屑。而对于较大的切削深度(0.1 mm以上),会发生模式II断裂,并且纤维从基体上脱落,形成块状切屑。

负纤维取向135°的CF/PEEK试件:由于切削工

具产生的严重压缩引起的纤维弯曲,纤维受到前刀面的作用,随刀具运动逐渐弯曲并最终断裂,产生不

连续的切屑。如图6所示,由于刀具接触产生的纤维弯矩,在层压板中会引起显著的潜在机加工损伤。

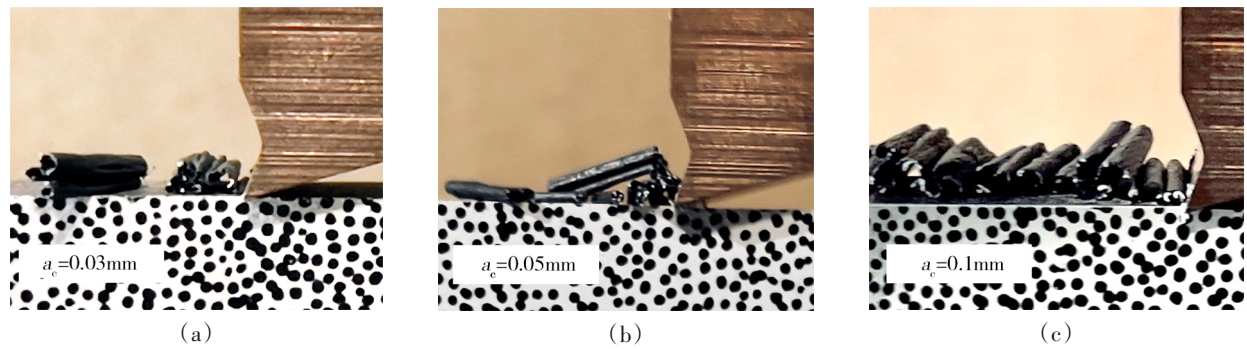


图3 相机拍摄下0°纤维取向的切屑成形形貌

Fig. 3 Chip forming morphology of 0° fiber orientation photographed by camera

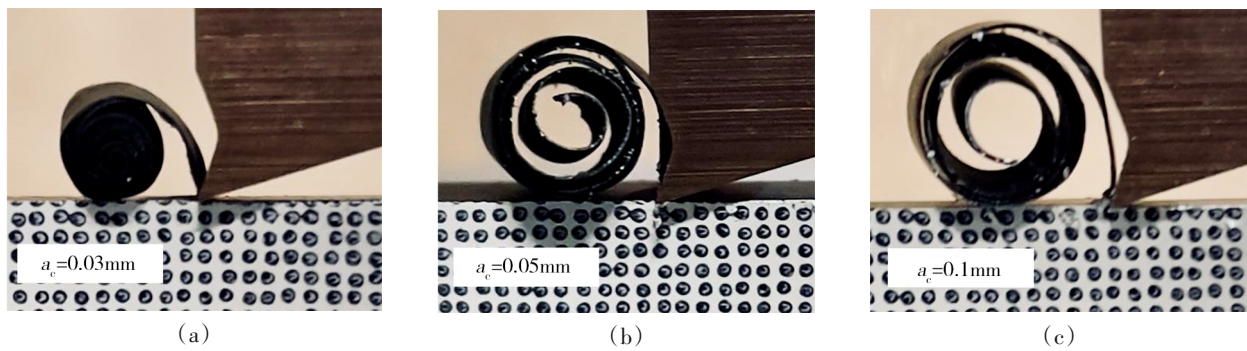


图4 相机拍摄下45°纤维取向的切屑成形形貌

Fig. 4 Chip forming morphology of 45° fiber orientation photographed by camera

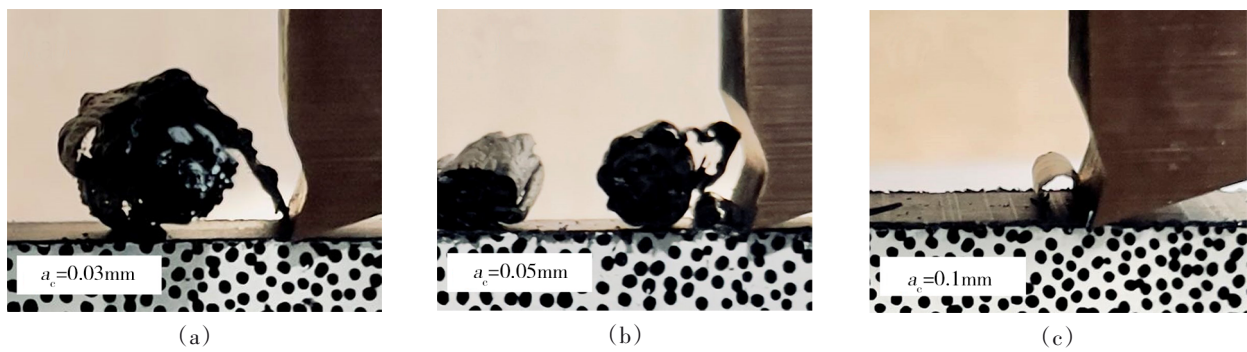


图5 相机拍摄下90°纤维取向的切屑成形形貌

Fig. 5 Chip forming morphology of 90° fiber orientation photographed by camera

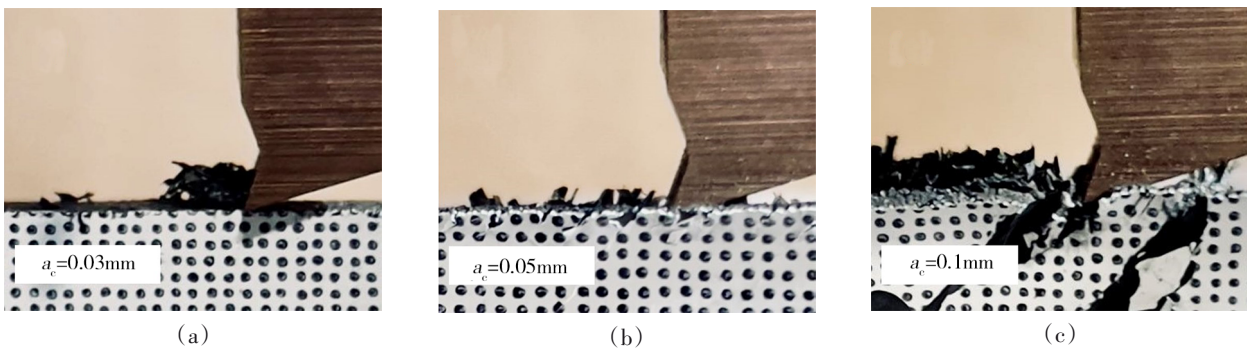


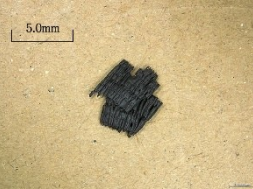
图6 相机拍摄下135°纤维取向的切屑成形形貌

Fig. 6 Chip forming morphology of 135° fiber orientation photographed by camera

90°和135°的试件展现出一种不同于0°和45°试件的切削规律,当切削深度较小时,纤维被刀具弯曲剪断后,仍然与基体结合,并形成连续的切屑,随着切削深度的增加,受到剪切的纤维长度增加,基体的支撑作用增强,如图6所示,可以观察到严重的撕裂损伤以及试件开裂,并产生不连续的切屑。

为分析切削速度对切削实验的影响,本研究为所有试件配置选择300和500 mm/min切削速度,表2展现了在切削速度为300 mm/min和切削深度为0.03、0.05和0.1 mm时获得的切屑及其特性。切屑形成特征不随速度变化而变化。

表2 CF/PEEK切屑形貌
Tab. 2 Chip morphology of CF/PEEK

纤维取向/ $^{\circ}$	$a_c=0.03\text{mm}$	$a_c=0.05\text{mm}$	$a_c=0.1\text{mm}$
0			
45			
90			
135			

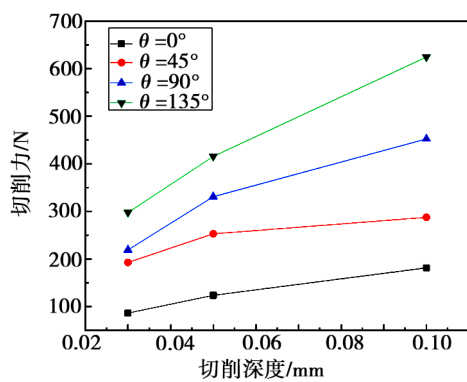
2.2 切削力

材料的去除机制是影响切削力大小最直接的因素。0°和90°单向层合板的切屑形貌表明了材料不同的去除机理,0°试件的切屑是主要以剥离的形式与试件分离,而90°试件中的纤维则以剪切和弯曲为主最终导致完全断裂,与剥离相比,这无疑将导致更高的切削力。切削深度越大,未变形的切屑厚度越大,因此材料变形、切屑断裂和切屑偏转所需的能量就越大。此外,在较高切削深度的正交切削中,工件材料与刀具前刀面的接触长度增加,也会导致摩擦力的增加。因此,在提高切削深度时会产生更大的切削力和推力。

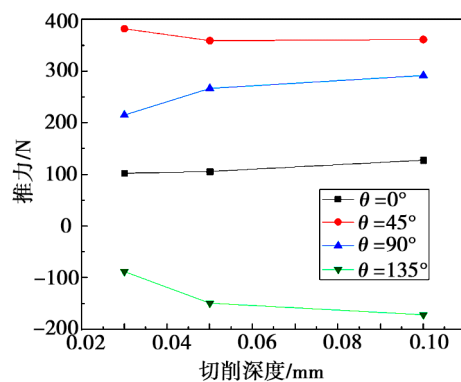
图7显示了不同纤维方向的切削力与切削深度的关系。切削力随着切深的增加而增大,实验结果也证实了前文中的分析结论,45°和0°纤维取向的试件,其切削力要远小于90°和135°纤维取向的试件。与进给方向的切削力不同,在切削135°纤维取向的

试件时产生了最小的推力[图7(b)],其中获得的推力方向与其他3种情况相反。这是由于在刀具的作用下,未断裂的纤维受到前刀面的作用力而向上弯曲,未分离的切屑对刀具施加向下的分力,因而产生相反方向的推力。

为分析切削速度对切削实验的影响,本研究为所有试件配置选择了两种切削速度(300和500 mm/min),在较高的切削速度下,切削力和推力的波动十分剧烈(图8),工件上材料成屑去除的频率更快导致的。如图9(a)所示,在其他切削条件给定的情况下,切削速度的提升,切削力也随之变大,以90°纤维取向的切削力增长幅度最为明显,其次则为135°纤维取向的试件,这也进一步说明了纤维取向对切削过程起着至关重要的因素。实验证明,切削速度的改变对推力没有明显的影响,增大切削速度没有导致更大的推力[图9(b)]。



(a) CF/PEEK 切削力



(b) CF/PEEK 推力

图7 切削速度 300 mm/min 的 CF/PEEK 的切削力与推力

Fig. 7 Cutting force and thrust of CF/PEEK with a cutting speed of 300mm/min

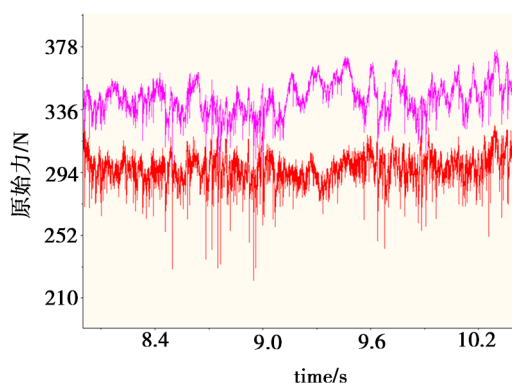
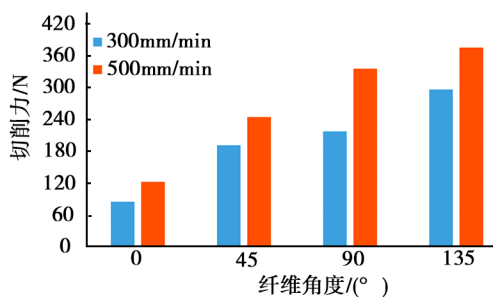
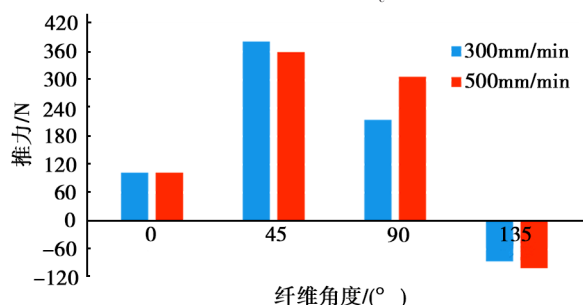


图8 切削速度为 500mm/min 的原始力曲线

Fig. 8 Original force curve with cutting speed of 500mm/min



(a) CF/PEEK 的切削力 ($a_c=0.05$ mm)



(b) CF/PEEK 的推力 ($a_c=0.05$ mm)

图9 300和500mm/min 切削速度的 CF/PEEK 的切削力与推力对比

Fig. 9 Comparison of cutting force and thrust of CF/PEEK with cutting speed of 300mm/min and 500mm/min

2.3 表面形貌分析

加工材料的表面形貌可以为分析切屑形成机制提供进一步的证据,特别是垂直于层合板厚度方向的纤维断裂形貌,从中可以获得机加工损伤的细节。

在本文中,对试件进行了扫描电子显微镜分析,从这些扫描电子显微镜图像中可以观察到纤维破坏的证据,可以进一步了解切屑形成过程中纤维和基体/界面的失效机制。通过图 10 可以发现, 0° 和 45° 纤维取向的加工表面相对光滑,而 90° 和 135° 纤维取向的表面特别粗糙,含有大量空隙,并且在以 90° 和 135° 纤维取向加工获得的表面并不平整,这是因为与切割过程中纤维受刀具作用弯曲以及未被切断的纤维回弹导致。

如图 11 所示,当 $\theta=0^\circ$ 时,切削力方向与切削速度方向平行,所以在刀具的作用下,纤维沿裂纹方向与

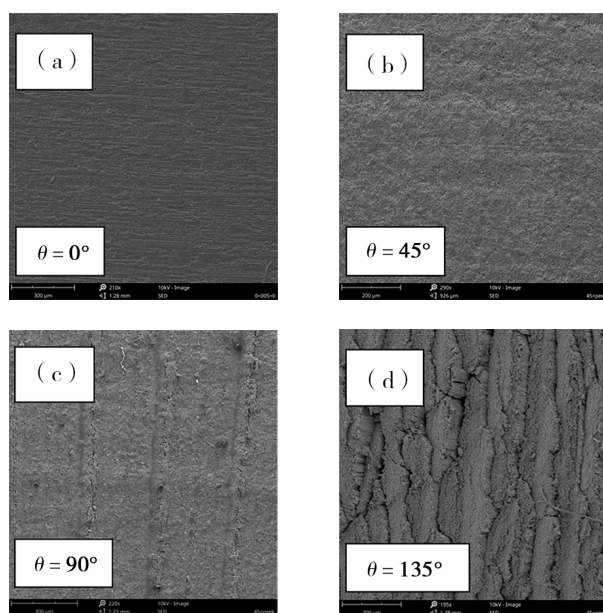


图10 CF/PEEK 层合板的表面形态

Fig. 10 Surface morphology of CF/PEEK laminates

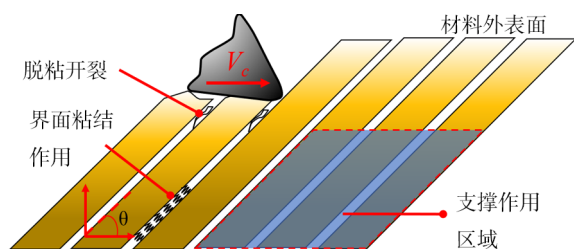


图 11 CF/PEEK 去除机理示意图

Fig. 11 Schematic diagram of CF/PEEK removal mechanism

基体剥离,未断裂的纤维在刀具前刀面的挤压下发生断裂,最终实现CF/PEEK的材料去除过程。当 θ 处于 $0^\circ \sim 90^\circ$ 时,此时属于顺纤维切削,在刀具的作用下,纤维发生弯曲变形,并伴随界面脱粘开裂现象,大量的未切削材料的支撑使得纤维的剪断更为容易,因而这种情况下也会得到不错的加工质量。当 $\theta = 90^\circ$ 时,材料的支撑作用较弱,在较小切深时,纤维

能够被有效剪断,但在大切深(0.1 mm 以上),材料无法被有效去除,因而形成板间开裂以及不平整的表面。当 θ 处于 $90^\circ \sim 135^\circ$ 时,此时属于逆纤维切削。未切削材料无法为切削过程提供足够的支撑,碳纤维在刀具作用下发生弯曲并与基体层发生开裂,裂纹沿纤维方向向试件内扩展,直到碳纤维到达弯曲极限后发生断裂,形成不平整的表面以及严重的材料损伤。

进一步放大观察在加工表面存在的纤维中的微观断裂缺陷(图 12),不同纤维角度的CF/PEEK试件的加工表面均有大幅度的基体涂覆,相比于CFRP加工纤维的大量的裸露^[8,12],热塑性基体明显改善了加工表面质量。 0° 纤维试件的表面可以观察到基体脱粘与纤维的挤压断裂,但基本观察不到纤维缝隙,表明 0° 纤维的试件材料去除方式以纤维的剥离为主,并且热塑性基体减少了纤维脱粘的产生。 45° 纤维的试件可以观察到加工平面以下纤维的断裂,这是

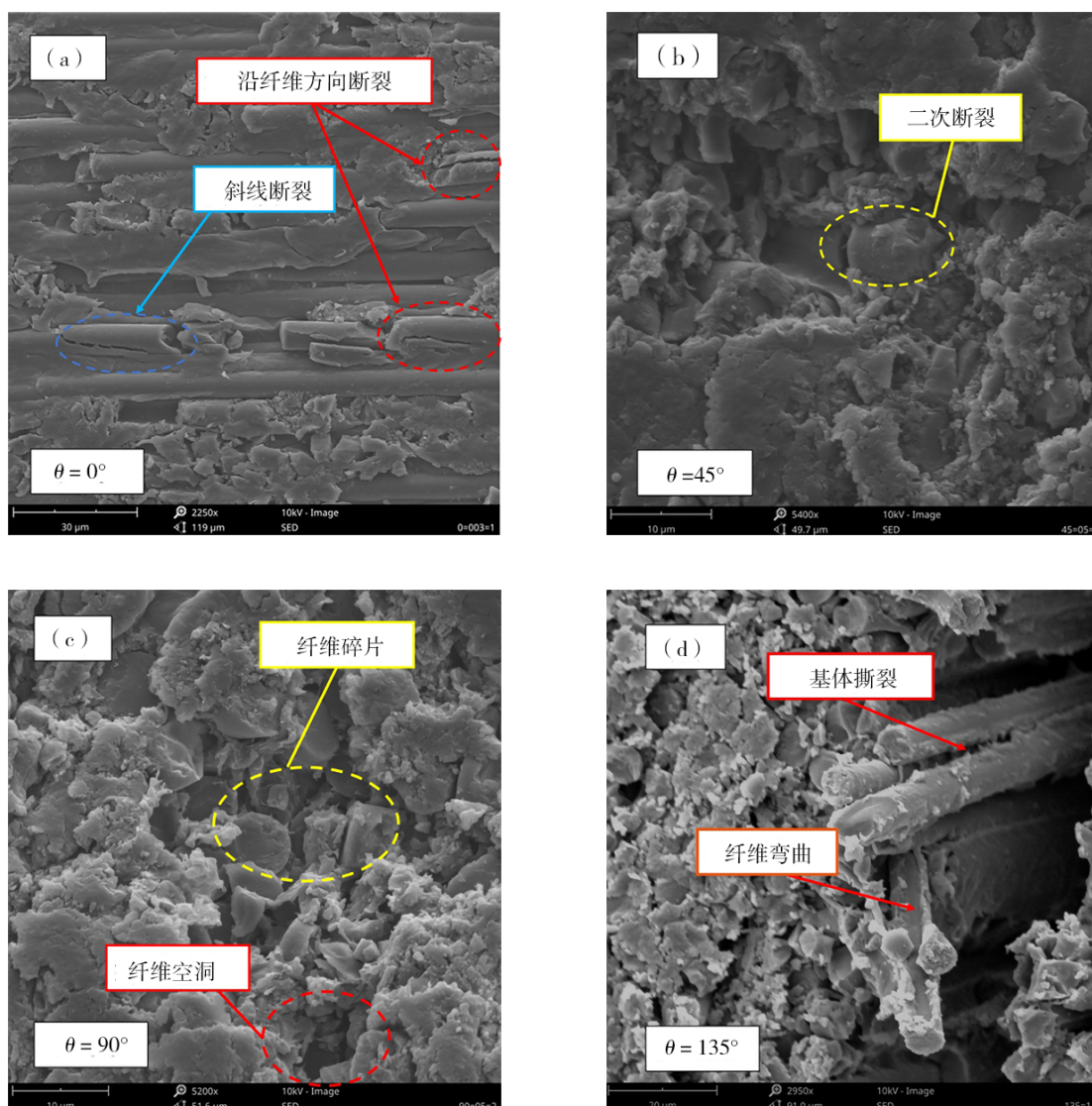


图 12 不同纤维角度下CF/PEEK切削形貌

Fig. 12 CF/PEEK cutting morphologies at different fiber angles

因为回弹的纤维作用发生二次断裂,观察表面形貌可以得出,45°纤维的试件以拉伸断裂和剪切断裂为主。90°纤维的试件可以观测到大范围的基质涂抹以及因刀具挤压而嵌入表面内部的纤维碎片,如果将纤维碎片从材料上分离,就可以观测到表面上大量存在的坑洞。90°纤维取向的材料去除机制是弯曲和剪切的组合。135°纤维的试件可以观测到,在切削平面下存在大量由纤维弯曲引起的断裂,纤维断裂的形式为拉伸断裂和弯曲断裂的组合,热塑性基体没有显著改善纤维和基体的开裂以及加工损伤,表明在135°纤维取向时,材料去除机制是弯曲和拉伸的组合。

4 结论

本文考虑了碳纤维增强聚醚醚酮复合材料的相关力学性能,在不同纤维取向角度和不同切割深度下进行了CF/PEEK正交切割实验,得到了以下结论。

(1)在0°和45°纤维取向切割CF/PEEK时,可以得到连续卷曲的切屑。0°纤维取向的切屑形成机制是刀具压缩纤维微屈曲,纤维/基质沿纤维方向剥离。45°纤维取向切割过程中的切屑形成机制是拉伸断裂和剪切断裂相结合。在这些加工条件下,可获得光滑平整的加工表面。

(2)在纤维取向为90°时,切屑形成机制为剪切和弯曲相结合。切屑的类型和表面质量与切割深度有关。切屑深度分别为0.03和0.05mm连续卷曲,表面光滑,纤维取向为135°时,切屑形成机制为弯曲和拉伸相结合,表面质量很差,热塑性基体不能显著降低135°纤维取向上的加工损伤。

(3)0°纤维方向的切削力最小,135°纤维方向的力最大,切削力大小随切削深度和切削速度的增加而增加,增大切削速度没有导致更大的推力。

参考文献

[1] 贾振元,毕广健,王福吉,等. 碳纤维增强树脂基复合材料切削机理研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(23): 199-208.

JIA Z. Y., BI G. J., WANG F. J., et al. Study on cutting mechanism of carbon fiber reinforced resin matrix composites[J].

Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(23): 199-208.

[2] VAUGHAN T. J., MCCARTHY C. T. Micromechanical modelling of the transverse damage behaviour in fiber reinforced composites [J]. Composites Science and Technology, 2011, 71(3): 388-396.

[3] KARPAT Y., DEGER B., BAHTIYAR O. Milling force modeling of multidirectional CFRP laminates [J]. Procedia CIRP, 2012, 1: 460-465.

[4] WANG H., HU Y. B., CONG W. L., et al. Burks rotary ultrasonic surface machining of CFRP composites: effects of horizontal ultrasonic vibration [J]. Procedia Manufacturing, 2019, 34: 399-407.

[5] WANG C., MING W., AN Q., et al. Machinability characteristics evolution of CFRP in a continuum of fiber orientation angles [J]. Mater Manuf Process, 2017, 32: 1041-1050.

[6] TETI R. Machining of composite materials [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2002, 51(2): 611-634.

[7] KOPLEV A., LYSTRUP A., VORM T. The cutting process, chips, and cutting forces in machining CFRP [J]. Composites, 1983, 14(4): 371-376.

[8] AN Q. L., CAI C. Y., CAI X. J., et al. Experimental investigation on the cutting mechanism and surface generation in orthogonal cutting of UD-CFRP laminates [J]. Composite Structures, 2019, 230: 111441.

[9] LASRI L., NOUARI M., EL MANSORI M. Modelling of chip separation in machining unidirectional FRP composites by stiffness degradation concept [J]. Composites Science and Technology, 2009, 69: 684-692.

[10] XU J., HUANG X., DAVIM J. P., et al. On the machining behavior of carbon fiber reinforced polyimide and PEEK thermoplastic composites [J]. Polym Compos, 2020, 41(9): 3649-3663.

[11] CHEGDANI F., MANSORI M. E. Mechanics of material removal when cutting natural fiber reinforced thermoplastic composites [J]. Polymer Testing, 2018, 67: 275-283.

[12] CHENG H., GAO J., KAFKA O. L., et al. A micro-scale cutting model for UD CFRP composites with thermomechanical coupling [J]. Composites Science and Technology, 2017, 153: 18-31.