

CF/PEEK 复合材料超声辅助铣削力和表面质量研究

孙 瑜^{1,2} 杨 涛^{1,2} 杜 宇² 郭睿虎²

(1 天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津 300387)

(2 天津工业大学机械工程学院, 天津 300387)

文 摘 为改善碳纤维增强聚醚醚酮复合材料(CF/PEEK)在铣削加工时所产生的毛刺、分层以及表面凹坑等缺陷,采用超声辅助铣削的加工方式分别沿 0° 、 45° 、 90° 、 135° 四种纤维方向角对CF/PEEK进行实验,并与传统铣削进行对比研究。结果表明:超声辅助铣削与传统铣削相比,切削力更小且加工质量更优。沿 90° 纤维方向角对试件进行超声辅助铣削,切削力、表面粗糙度和毛刺高度降幅最显著,分别降低了16.79%、28.9%和71.9%。而且在相同的加工参数下,超声辅助铣削与传统铣削相比,能够有效地改善表面凹坑、分层等表面缺陷。

关键词 CF/PEEK, 超声辅助铣削, 纤维方向角, 切削力, 表面质量

中图分类号:TB332

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2023.05.012

Ultrasonic-assisted Milling Force and Surface Quality Study of CF/PEEK Composites

SUN Yu^{1,2} YANG Tao^{1,2} DU Yu² GUO Ruihu²

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

(2 School of Mechanical Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387)

Abstract In order to improve the milling of carbon fibre reinforced polyether ether ketone (CF/PEEK) composites with defects such as burrs, delamination and surface pits, the processing method of ultrasound-assisted milling with CF/PEEK at four fibre orientation angles of 0° , 45° , 90° and 135° was carried out and compared with conventional milling. The results show that ultrasonic-assisted milling has lower cutting forces and better machining quality than conventional milling. The most significant reductions in cutting forces, surface roughness and burr height are achieved by ultrasound-assisted milling of specimens along a 90° fibre orientation angle, with reductions of 16.79%, 28.9% and 71.9% respectively. Furthermore, ultrasonic-assisted milling is effective in improving surface defects such as surface pits and delamination, compared to conventional milling under the same machining parameters.

Key words CF/PEEK, Ultrasound-assisted milling, Fibre orientation angle, Cutting force, Surface quality

0 引言

碳纤维增强聚醚醚酮复合材料(CF/PEEK)作为典型的热塑性复合材料,由于具有优异抗疲劳性、耐化学腐蚀性、耐湿热性以及透射性等优点,所以被广泛应用于航空航天、先进武器系统、汽车以及医疗等领域^[1]。近年来,国内外对CF/PEEK的优化和加工也进行了很多的研究,但由于CF/PEEK具有各向异性、不均匀性以及较高的比强度都增加了其加工难度,是公认的难加工材料^[2]。

超声辅助铣削(UAM)通过给刀具高频的振动,

从而实现微观上刀-屑分离的加工方式,与传统铣削(CM)相比切削力降低,表面质量提高。对于UAM加工,近年来国内外专家对其开展了大量的研究。胡安东等^[3]对CFRP进行超声铣磨实验,研究表明超声铣磨与传统铣磨相比切削力更小、加工质量更好;陈光等^[4]对CFRP超声螺旋铣孔质量的机制进行研究,建立了轴向超声辅助螺旋铣孔的运动学方程,发现超声铣削工艺参数影响制孔质量;魏学涛等^[5]对轴向超声铣削进行铣削力的建模和实验的研究,得出了超声振动辅助铣削的模型,为超声振动辅助铣削的

收稿日期:2022-01-17

基金项目:天津市自然科学基金(20JCQNJC00050)

第一作者简介:孙瑜,1997年出生,硕士研究生,主要从事复合材料机械加工与检测工作。E-mail:sunyu1633@163.com

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

优化提供了理论基础;高国富等^[6]对超声铣削C/C复合材料铣削力进行理论建模,并得出铣削力的理论曲线的波形变化趋势与实际测得的铣削力的趋势一致;张存鹰等^[7]对超声铣削系统振动特性研究,发现超声铣削相对于传统铣削两种材料Ra值分别降低了78%和47%;徐林红等^[8]对石墨烯铝基复合材料进行超声铣削研究,发现当每转进给量为1 mm/r,振幅为3.05 μm 时,石墨烯铝基复合材料的可加工性最优;HALIM等^[9]对CFRP进行超声铣削与传统铣削加工的对比实验,实验发现超声铣削力和温度都有降低。对于热塑性CFRP切削加工的研究,ALEJANDRO等^[10]用不同刀具对热塑性CFRP进行铣削实验,研究发现铣削后刀具表面会产生粘刀现象;QIN等^[11]对CF/PEEK与热固性CFRP进行切削对比实验,研究发现由于PEEK基体具有延展性,加工后表面质量更优,但是PEEK基体在加工时易软化,加工后表面涂覆量更大;XU等^[12]对CF/PEEK与CF/PI进行切削加工对比实验,研究发现CF/PEEK相对于与CF/PI基体延展性更好,加工时产生连续的切

屑,加工后的表面质量更好。然而,国内外很少有对CF/PEEK进行UAM加工切削力和表面质量研究。为此,本文将沿不同纤维方向角对CF/PEEK进行UAM与CM实验,研究不同纤维方向下,UAM加工力和表面质量的变化并进行对比分析。

1 实验

1.1 材料及设备

采用 0° 、 45° 、 90° 和 135° 四种不同纤维方向的单向CF/PEEK复合材料层合板,基体为PEEK,增强体为T700碳纤维,纤维质量分数为60%。试件尺寸为 $100\text{ mm}\times 30\text{ mm}\times 5.5\text{ mm}$,铺层数量为40层,每层厚度约为0.14 mm。

实验在汉川XK714D数控机床上进行,使用美顺公司生产的JT40超声辅助加工设备并采用瑞士Kistler-9257B型测力仪对切削力进行测试,如图1所示。实验使用4 mm直径的金刚石涂层硬质合金四刃铣刀,螺旋角为 40° ,刃长为11 mm。使用日本Mitutoyu-SJ201粗糙度仪、德国Leica-dvm6超景深数码相机对已加工试件进行表面质量分析。

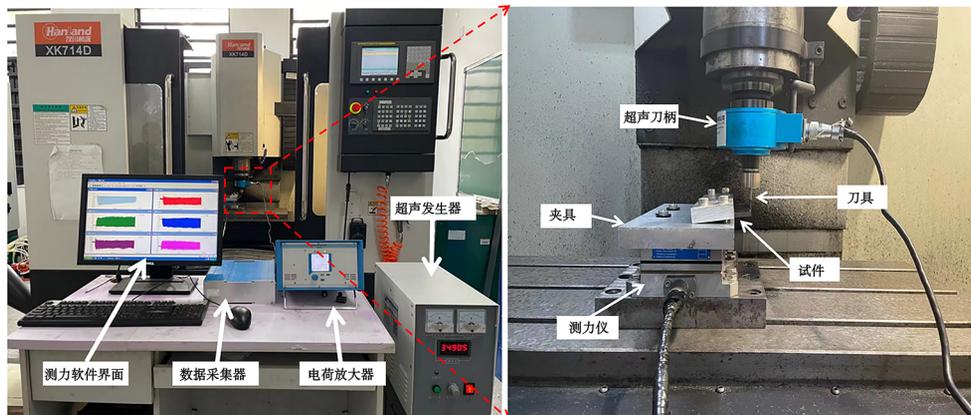


图1 实验装置图

Fig. 1 Experimental set-up diagram

1.2 实验方法

铣削方式为沿 0° 、 45° 、 90° 、 135° 四种纤维方向角进行顺铣加工。纤维方向角 θ 的定义,如图2所示。

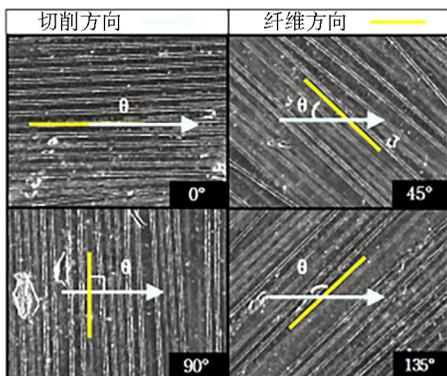


图2 铣削纤维方向角示意图

Fig. 2 Diagram of milling fibre orientation angle

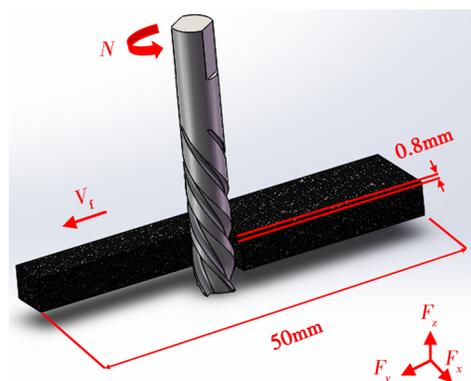


图3 铣削方式示意图

Fig. 3 Diagram of the milling method

超声辅助加工的频率为34 kHz。机床主轴转速 N 为3 000 r/min,每转进给量 f_r 取0.01、0.03、0.05 mm/r三种不同的值,轴向切深 a_p 为板厚5.5 mm,铣削长

度 L 为 50 mm, 铣削宽度 a_c 为 0.8 mm, 如图 3 所示。由于在铣削加工过程中, 垂直于进给方向上的切削力 F_x 远大于平行于进给方向上的力 F_y 和轴向力 F_z , 因此定义 F_x 为主切削力, 主要讨论 F_x 在不同铣削条件下的变化。

实验共设置 12 组, 每组实验包括 UAM 和 CM 两种铣削方式, 通过设置不同的每转进给量 (0.01、0.03、0.05 mm/r) 和不同的纤维方向角 (0° 、 45° 、 90° 、 135°), 对 UAM 与 CM 进行切削力和表面质量对比分析, 具体实验方案如表 1 所示。

表 1 试验方案
Tab. 1 Experimental program

序号	$f/\text{mm}\cdot\text{r}^{-1}$	$\theta/(\circ)$	铣削方式
1	0.01	0	CM/UAM
2	0.01	45	CM/UAM
3	0.01	90	CM/UAM
4	0.01	135	CM/UAM
5	0.03	0	CM/UAM
6	0.03	45	CM/UAM
7	0.03	90	CM/UAM
8	0.03	135	CM/UAM
9	0.05	0	CM/UAM
10	0.05	45	CM/UAM
11	0.05	90	CM/UAM
12	0.05	135	CM/UAM

2 结果与讨论

2.1 切削力

因为 UAM 加工的振动为周期性振动, 所以铣刀刀刃在主切削力 F_x 方向上的位移如下式^[6]:

$$H_x = r \cos(\omega t - n\theta) + A \sin(2\pi f t) \quad (1)$$

即主切削力也存在周期性的变化, 公式如下^[6]:

$$F_x(t) = F_x + H_x \sin(\omega t) \quad (2)$$

式中, f 为频率, A 为振幅, n 为铣刀齿数, ω 为铣刀旋转频率, r 为铣刀半径, H_x 为铣刀在 x 方向上的位移, θ 为齿尖角。且 (1) 式相对应的主切削力 F_x 的动力学方程^[6]如下:

$$M_x \frac{\partial^2 S_x}{\partial t^2} + C_x \frac{\partial S_x}{\partial t} + K_x = F_x(t) \quad (3)$$

式中, M_x 为铣刀质量, C_x 为铣刀阻尼, K_x 为铣刀刚度, S_x 为刀刃在各个方向的变形量。因为对于 CF/PEEK 复合材料来说, 刀刃主要切削的是纤维, 所以纤维方向的不同, 将直接影响刀刃变形量 S_x 的大小, 且由式 (3) 可知主切削力 F_x 随变形量 S_x 的变化而变化, 所以将沿不同的纤维方向角对试件进行 UAM 和 CM 加工, 对比分析主切削力 F_x 变化趋势和幅度是非

常有必要的。

图 4 为铣刀以不同的每转进给量沿不同纤维方向角对试件进行 UAM 与 CM 加工的切削力对比曲线 ($N=3\ 000\ \text{r/min}$)。从图中可以看出, 每转进给量增大, 切削力随之增大。因为随着每转进给量的增大, 每齿所切除的材料体积增大, 受到的切削阻力变大, 所以切削力增大。

对于 UAM 加工, 沿不同纤维方向角铣削的切削力变化一致且 135° 纤维方向切削力最大, 90° 纤维方向切削力最小, 0° 和 45° 纤维方向的切削力处于两者之间。因为沿 135° 和 0° 纤维方向角进行切削, 纤维受到刀尖的正压力作用, 纤维发生破碎和脱粘失效, 导致刀刃变形量 S_x 较大, 由式 (3) 可知切削力较大; 而沿 90° 和 45° 纤维方向角进行切削, 纤维受到弯曲应力与压应力的同时作用, 缺少下层纤维的支撑, 纤维发生弯曲断裂失效, 刀刃变形量 S_x 相对较小, 由式 (3) 可知切削力较小。

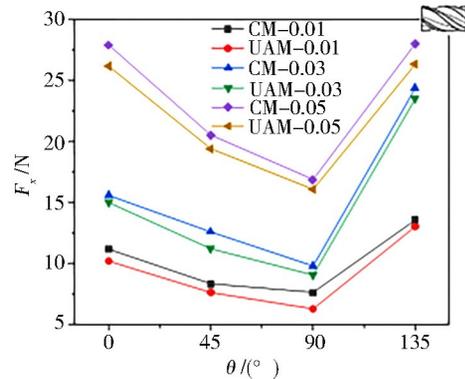


图 4 沿不同纤维方向角铣削力对比示意图

Fig. 4 Comparative diagram of milling forces along different fibre orientation angles

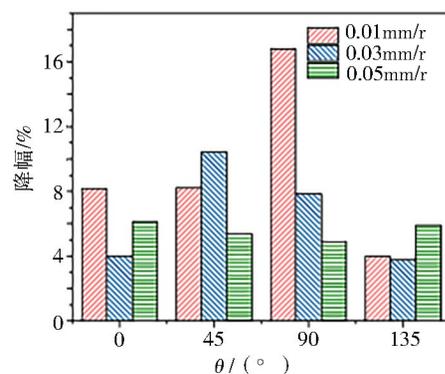


图 5 UAM 切削力降幅对比示意图

Fig. 5 Comparative diagram of UAM cutting force reduction

材料抵抗变形力和作用在刀具上的摩擦力是切削力的主要来源, 铣刀沿轴向高频振动, 使得铣刀更加锋利化^[1]并且降低了切屑的厚度, 减小了刀具和工件之间的摩擦力, 降低了切削抗力, 从而降低了切削力。

由图4和图5可知,当每转进给量为0.01 mm/r时,沿90°纤维方向的超声效果最为明显,CM切削力为7.564 N,UAM切削力为6.294 N,切削力降低了16.79%。当每转进给量0.03 mm/r时,45°纤维方向的超声效果最为明显,CM切削力为12.58 N,UAM切削力为11.2 N,切削力降低了10.97%。当每转进给量为0.05 mm/r时,0°纤维方向的超声效果最为明显,CM切削力为27.87 N,UAM切削力26.16 N,切削力降低了6.14%。

2.2 表面质量

2.2.1 表面缺陷

CF/PEEK 复合材料在铣削加工过程中的表面缺陷形式主要包括毛刺、分层以及表面凹坑等。毛刺高度、分层宽度以及凹坑面积是表面缺陷的评价要素,并以此为标准对表面缺陷进行分析。由于毛刺是影响装配精度的主要缺陷,因此本节着重对各工况下的毛刺高度进行量化表征和参数分析。

对主轴转速为3 000 r/min、每转进给量为0.01 mm/r时,沿不同的纤维方向角对试件进行UAM与CM加工。图6为0°纤维方向的表面形貌对比图,可以看出CM加工后的毛刺高度为0.63 mm,UAM加工后的毛刺高度为0.28 mm,降低了0.35 mm,降幅为55.6%。而且在UAM加工后纤维断裂现象明显改善,表面分层宽度略有减小。

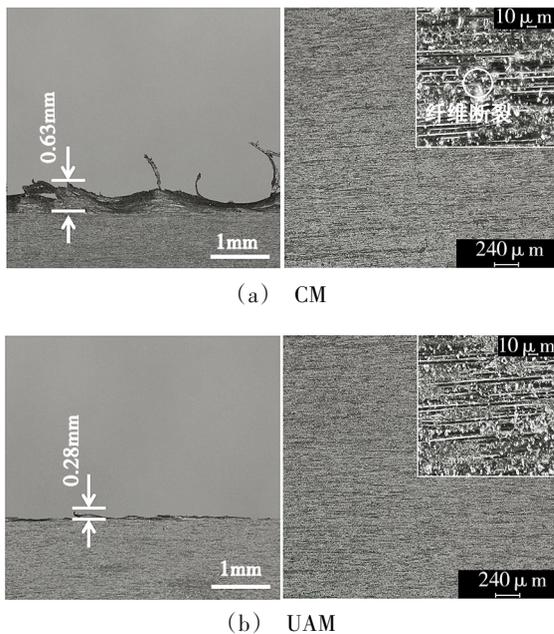


图6 沿0°纤维方向角铣削表面形貌对比

Fig. 6 Comparison of surface morphology along 0° fibre orientation angle milling

图7为45°纤维方向的表面形貌对比图,可以看出CM加工后的毛刺高度为1.76 mm,UAM加工后的毛刺高度为0.92 mm,降低了0.84 mm,降幅为47.73%。而且从图中可以看出CM加工表面纤维撕裂

裂明显比UAM加工表面要严重,从而导致分层宽度变宽。

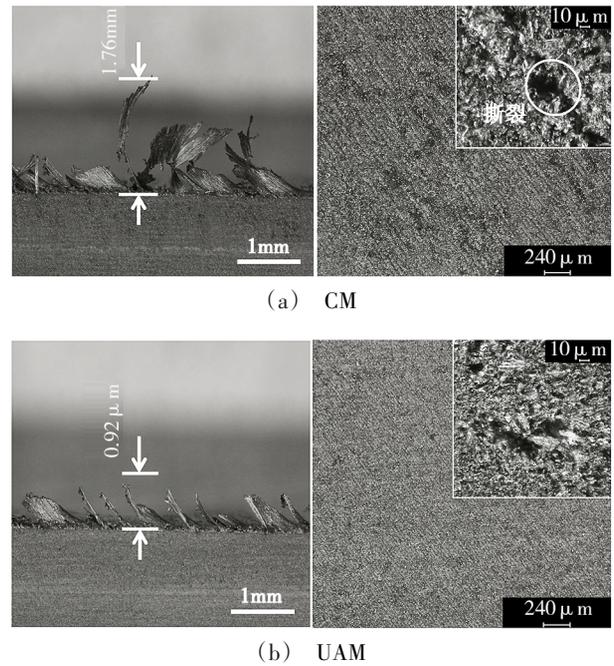


图7 沿45°纤维方向角铣削表面形貌对比

Fig. 7 Comparison of surface topography along 45° fibre orientation angle milling

图8为90°纤维方向角的表面形貌对比图,可以看出CM加工后的毛刺高度为1.32 mm,UAM加工后的毛刺高度为0.37 mm,降低了0.95 mm,降幅为71.9%。从图中可以看出,UAM比CM加工后表面的分层宽度变窄。

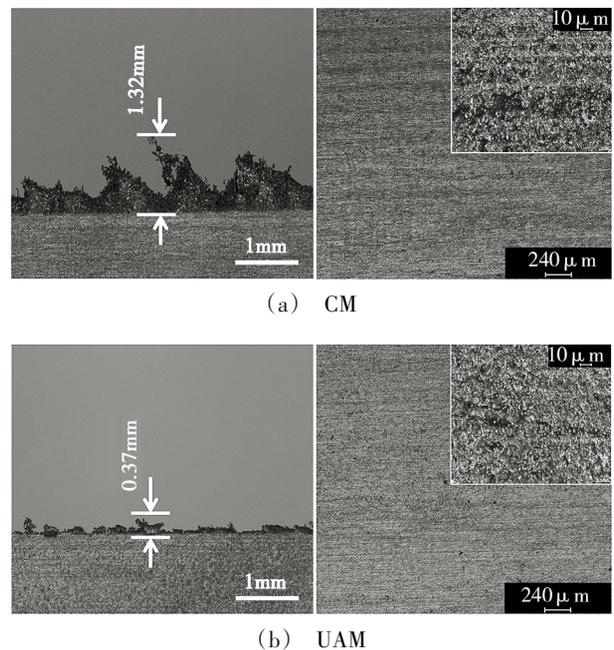


图8 沿90°纤维方向角铣削表面形貌对比

Fig. 8 Comparison of surface topography along 90° fibre orientation angle milling

图9为135°纤维方向角的表面形貌对比图,可以看出CM加工后的毛刺高度为1.41 mm,UAM加工后的毛刺高度为0.85 mm,降低了0.56 mm,降幅为39.70%。而且从图中可以看出UAM加工相较CM加工试件表面凹坑面积有明显变小。

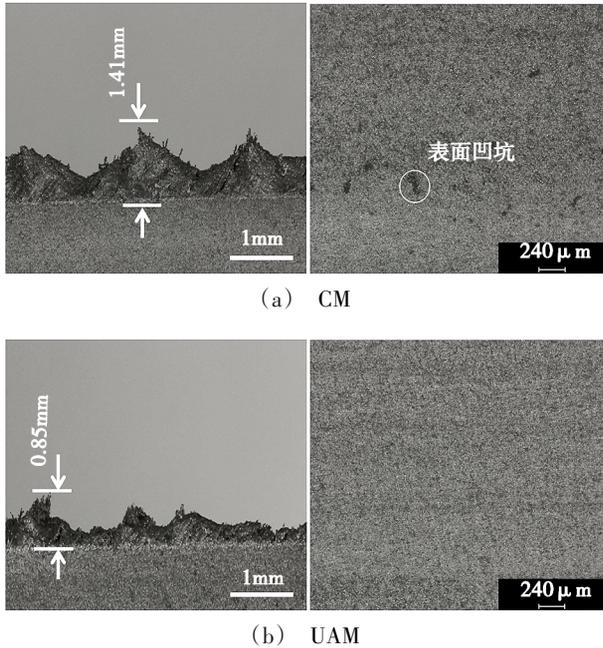


图9 沿135°纤维方向角铣削表面形貌对比

Fig. 9 Comparison of surface topography along 135° fibre orientation angle milling

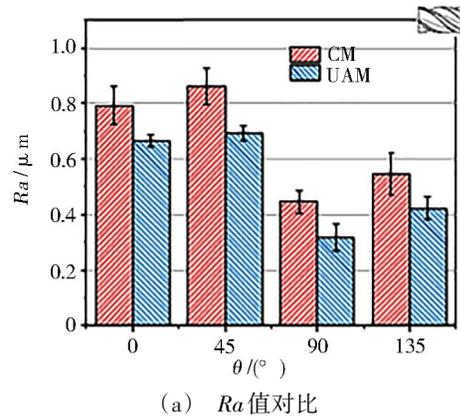
在铣削CF/PEEK复合材料过程中,由于热累积使得铣削温度不断升高,从而产生PEEK基体发生软化涂覆在被加工表面的现象。而UAM加工时,由于刀具的高频轴向振动,材料铣削表面温度有所降低,PEEK基体软化现象也相应减弱,使得PEEK基体在被加工表面涂覆量减少并且更加均匀,被加工表面更加光整,为此有效地改善了表面凹坑和分层现象。

2.2.2 表面粗糙度

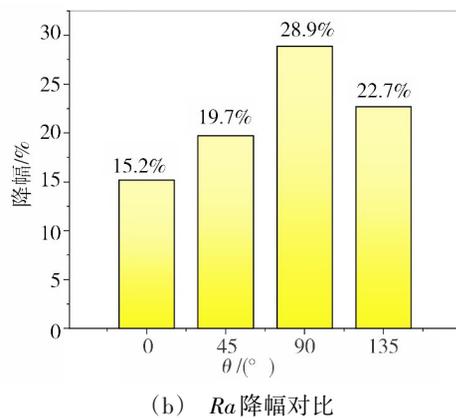
图10是主轴转速为3 000 r/min,每转进给量为0.01 mm/r时,铣刀沿不同的纤维方向角进行UAM与CM加工后表面粗糙度示意图。从图中可以直观地看出,UAM加工,45°纤维方向的Ra值最大,90°纤维方向Ra值最小,0°和135°居中。因为沿45°纤维方向角进行切削为逆纤维切削,所以Ra值较大;沿135°纤维方向角进行切削为顺纤维切削,所以Ra值较小。

沿90°纤维方向角UAM加工效果最为明显,CM加工Ra值为0.45 μm,UAM加工Ra值为0.32 μm,Ra值降低了28.9%。而沿0°纤维方向UAM加工效果最不明显,CM加工Ra值为0.79 μm,UAM加工Ra值为0.67 μm,Ra值降低了15.2%。沿45°和135°纤维

方向角UAM加工Ra值降幅居中,分别为19.7%、22.7%。



(a) Ra值对比



(b) Ra降幅对比

图10 UAM与CM表面粗糙度对比示意图

Fig. 10 The comparative schematic of UAM and CM surface roughness

沿90°纤维方向角进行切削时,纤维抗分层能力差且失效形式主要为纤维挤压断裂,加以轴向超声高频振动后,可以有效的减少纤维的分层和挤压断裂,所以UAM加工对Ra有明显改善;而沿0°纤维方向角进行切削时,会发生典型的纤维/树脂脱粘,因为在加工时树脂已经整体脱离了碳纤维,所以轴向超声高频振动对Ra改善不明显。

3 结论

(1)沿不同纤维方向角进行UAM加工,主切削力: $F_x(135^\circ) > F_x(0^\circ) > F_x(45^\circ) > F_x(90^\circ)$ 。随着每转进给量的增大,UAM加工相较CM加工主切削力降幅逐渐减小。当每转进给量为0.01 mm/r时,沿90°纤维方向角UAM加工主切削力降幅最大,降低了16.79%

(2)相对于CM加工,UAM加工后的材料表面凹坑、分层、毛刺有明显改善。沿0°、45°、90°、135°纤维方角进行UAM加工,毛刺高度分别降低了55.6%、47.73%、71.9%、39.7%。沿90°纤维方向角进行UAM加工,分

层现象明显减弱并且毛刺高度降低最显著。

(3)沿不同纤维方向角进行UAM加工,表面粗糙度: $Ra(90^\circ)<Ra(135^\circ)<Ra(0^\circ)<Ra(45^\circ)$ 。而相较于CM加工,UAM加工后的 Ra 值均有不同程度的降低,沿 90° 纤维方向角进行UAM加工, Ra 值降低最明显,降幅为28.9%,而 0° 纤维方向表面, Ra 值降低最不明显,降幅为15.2%。

参考文献

[1] 胡加卓,许治平,栾加双. 国外连续碳纤维增强聚醚醚酮复合材料研究进展[J]. 工业技术,2017,21(91):91-95.

HU Jiazhao, XU Zhiping, LUAN Jiashuang. Research progress of foreign continuous carbon fiber reinforced polyetheretherketone composites[J]. Industrial Technology, 2017,21(91):91-95.

[2] 张晓明,刘雄亚. 纤维增强热塑性复合材料及其应用[M]. 北京:化学工业出版社,2006:223-224.

ZHANG Xiaoming, LIU Xiongya. Fiber-reinforced thermoplastic composites and their applications [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006:223-224.

[3] 胡安东,陈燕,傅玉灿,等. 超声振动辅助铣磨加工对CFRP切削力和表面质量的影响[J]. 复合材料学报,2016,33(4):788-796.

HU Andong, CHEN Yan, FU Yucan, et al. Effects of ultrasonic vibration-assisted grinding on cutting force and surface quality of CFRP [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(4):788-796.

[4] 陈光,刘见,戈家影,等. 基于运动学及力热分析的CFRP超声振动辅助螺旋铣孔质量影响机制[J]. 机械工程学报,2021,57(1):199-209.

CHEN Guang, LIU Jian, GE Jiaying, et al. Experimental Study on ultrasonic vibration helical milling of CFRP based on kinematic and thermal-mechanical analysis [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(1):199-209.

[5] 魏学涛,岳彩旭,刘献礼,等. 轴向超声振动辅助铣削力的建模与实验研究[J]. 机械科学与技术,2021,40(12):1820-1828.

WEI Xuetao, YUE Caixu, LIU Xianli, et al. Modeling and experimental study of axial ultrasonic vibration-assisted milling

forces [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40(12):1820-1828.

[6] 高国富,胡二娟,向道辉,等. 超声铣削C/C复合材料铣削力的理论建模[J]. 振动与冲击,2018,37(10):8-13

GAO Guofu, HU Erjuan, XIANG Daohui, et al. Theoretical modeling of milling forces in C/C composites by ultrasonic milling [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(10):8-13.

[7] 张存鹰,赵波. 非均匀介质超声铣削系统振动特性研究[J]. 机械工程学报,2019,55(19):221-232.

ZHANG Cunying, ZHAO Bo. Vibration characteristics of the longitudinal-torsional composite inhomogeneous media ultrasonic milling system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(19): 221-232.

[8] 徐林红,陈勇,韩光超,等. 石墨烯铝基复合材料超声辅助微铣削工艺研究[J]. 北京理工大学学报,2021,41(8):894-900.

XU Linhong, CHEN Yong, HAN Guangchao, et al. Machinability research on the ultrasonic assisted micro-milling for graphene based aluminum matrix composite [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2021, 41(8):894-900.

[9] Nor Farah Huda Abd HALIM, HELEN Ascroft, STUART Barnes. Analysis of tool wear, cutting force, surface roughness and machining temperature during finishing operation of ultrasonic assisted milling (UAM) of carbon fibre reinforced plastic (CFRP)[J]. Procedia Engineering, 2017, 184:185-191.

[10] ALEJANDRO Sambruno, FERMIN Bañon, JORGE Salguero, et al. Study of milling of low thickness thermoplastic carbon fiber composites in function of tool geometry and cutting conditions [J]. Int. J. Adv. Manufact. Technol., 2021, 114(7/8): 2515-2526.

[11] QIN Xuda, WU Xiaozhong, LI Hao, et al. Numerical and experimental investigation of orthogonal cutting of carbon fiber-reinforced polyetheretherketone (CF/PEEK) [J]. Int. J. Adv. Manufact. Technol., 2021, 199(1/2):1003-1017.

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