

2.5D C/SiC 复合材料铣削材料去除的实验研究

侯兆鑫 刘畅 高磊

(天津工业大学机械工程学院, 天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津 300387)

文 摘 为了探究 2.5D C/SiC 复合材料铣削加工的材料去除特性, 分别选用端铣刀和鱼鳞铣刀对 2.5D C/SiC 复合材料开展普通铣削和超声振动辅助铣削实验。分析了四种铣削工况下切削力、切削温度的变化规律, 研究了 0° 、 90° 和 z 向针刺纤维的去除特性。结果表明, 相比于传统端铣刀和普通铣削, 鱼鳞铣刀和超声振动辅助铣削分别可以显著地降低切削力和切削温度。超声振动辅助铣削可以使纤维的整体去除变为破碎去除, 减小表面缺陷。鱼鳞铣刀和超声振动辅助铣削的组合工艺方式可以较大程度地降低表面缺陷、切削力和切削温度, 提高工件表面质量, 为 2.5D C/SiC 复合材料低损伤铣削提供了可行性。

关键词 2.5D C/SiC 复合材料, 超声振动辅助铣削, 切削力, 切削温度, 材料去除

中图分类号: TB332

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2024.04.016

Experimental Study on Material Removal in Milling of 2.5D C/SiC Composites

HOU Zhaoxin LIU Chang GAO Lei

(Tianjin Major Laboratory of Advanced Mechatronics Equipment Technology, School of Mechanical Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract To explore the material removal characteristics of 2.5D C/SiC composite milling, end mills and fish-scale mills were used to perform conventional milling (CM) and ultrasonic vibration-assisted milling (UAM) on 2.5D C/SiC composites. The changing laws of cutting force and cutting temperature under four milling conditions were analyzed, and the removal characteristics of 0° , 90° and z -direction needle punched fibers were studied. The results show that, compared with traditional end mill and CM, fish-scale mills and UAM can significantly reduce cutting force and cutting temperature, respectively. UAM can change the overall removal of fibers into broken removal and reduce surface defects. The combined process of fish-scale mills and UAM can greatly reduce surface defects, cutting force and cutting temperature, improve the surface quality of the workpiece, and provide feasibility for low-damage milling of 2.5D C/SiC composites.

Key words 2.5D C/SiC composites, UAM, Cutting force, Cutting temperature, Material removal

0 引言

2.5D C/SiC 复合材料具有高比强度、高比模量、耐高温、耐磨、导热率低及耐腐蚀等优异的性能, 被广泛应用于国防及航空航天工业等高科技工程领域^[1-3]。然而在实际应用中, 为了满足 2.5D C/SiC 复合材料构件尺寸精度和形状上的严格公差, 需要进行大量的后续铣削以获得连接槽、连接平面等装配结构。由于 2.5D C/SiC 复合材料具有较强的各向异性和不均匀性, 在铣削时极易出现毛刺、崩边等损伤。因此, 探究 2.5D C/SiC 复合材料低损伤铣削方法, 从而对工业实际加工进行指导至关重要。

吴煜斌等^[4]对 C/SiC 复合材料进行铣削实验, 研究了刀具种类及切削参数对切削质量和表面粗糙度的影响。何涛等^[5]通过观察加工表面/亚表面损伤, 分析了铣削加工表面形成机制。毕铭智^[6]发现铣削 C/SiC 复合材料极易发生毛刺和崩边。黄青林等^[7]利用 PCD 铣刀对 SiC/SiC 复合材料进行单因素铣削实验, 发现表面粗糙度与切削力变化趋势相同, 高转速和小切削宽度可以得到好的表面质量。

超声振动辅助铣削和鱼鳞铣刀铣削是目前对 C/SiC 复合材料铣削工艺进行改进的方法。钟祥福^[8]发现超声振动辅助铣削与传统铣削相比可以有效的降

收稿日期: 2022-05-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51705362); 天津市研究生科研创新项目 (2021YJSB233)

第一作者简介: 侯兆鑫, 1996 年出生, 硕士, 主要从事 2.5D C/SiC 复合材料铣削工艺工作。E-mail: houzhaox@163.com

通信作者: 刘畅, 1989 年出生, 副教授/博士生导师, 主要从事复合材料低损伤加工理论及技术研究工作。E-mail: liuchang@tiangong.edu.cn

低切削力,抑制毛刺、崩边等损伤,从而提高加工表面质量。王明海等^[9]从超声振动辅助加工的运动轨迹方面分析了抑制复合材料损伤的机理,发现施加超声振动的加工方式的三向切削力 F_x 、 F_y 、 F_z 比传统铣削方式的分别降低了33%、29%、11%。方胜等^[10]将C/C复合材料超声振动铣磨加工与传统加工方式相关加工因素(表面质量、切削力等)进行对比,发现超声振动铣磨加工表面粗糙度一般可降低15%~35%,各项切削力降低40%左右。湛青坡^[11]将沿进给方向的超声波水平振动及沿轴向的纵向振动施加到传统方式的加工中。结果表明水平振动及纵向振动均能实现刀具与材料的断续加工,均能降低加工过程中的作用力,但纵向振动加工质量更好。

GEIER等^[12]发现相较于传统端铣刀铣削CFRP,采用鱼鳞铣刀加工的质量明显提高,鱼鳞铣刀的未切断纤维的平均比面积是传统铣削的十分之一。AHMAD等^[13]研究发现鱼鳞铣刀主要抑制了CFRP加工表面分层现象。WANG等^[14]通过刀具制作和实验验证,发现的多齿刀具右微切削刃和左微切削刃沿刀具周向交替排列的方法对抑制CFRP纤维损伤具有明显的优势。KUO等^[15]分析了鱼鳞铣刀切削刃之间的相互力学作用,及其对CFRP加工表面的形状和缺陷形成的影响,发现切削过程中, F_x 减少了约65%。

目前为止,大多数铣削研究集中在单向或2D C/SiC复合材料,对2.5D C/SiC复合材料铣削工艺研究较少。本文分别选用传统端铣刀和鱼鳞铣刀对2.5D C/SiC复合材料开展普通铣削和超声振动辅助铣削实验,着重对不同工艺下的切削力、切削温度、纤维的去除情况以及表面粗糙度进行探究。

1 实验

1.1 工件材料与刀具

以2.5D C/SiC复合材料为实验材料,2.5D C/SiC复合材料由0°纤维层、90°纤维层、SiC基体、z向针刺纤维、热解碳(PyC)层和短小纤维层组成(2.5D C/SiC复合材料的单元微观结构如图1所示),增强纤维为

T-300™碳纤维,单根纤维直径约为6.8 μm。0°纤维和90°纤维各自在平面内平铺成层状结构且0°纤维层和90°纤维层呈二维正交结构。z向针刺纤维刺入平铺好的0°纤维层和90°纤维层,针刺纤维使复合材料层与层之间的连接更加紧密,提高了材料的拉伸性能^[16]。其中0°纤维层、90°纤维层、短小纤维层和z向针刺纤维首先被制备成针刺预制体,然后在针刺预制体外层沉积热解碳(PyC)层,最后沉积SiC基体形成完整材料。2.5D C/SiC复合材料的材料性能如表1所示。

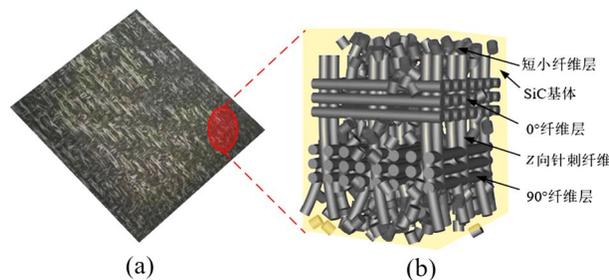


图1 2.5D C/SiC复合材料工件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 2.5D C/SiC composite workpiece

表1 2.5D C/SiC复合材料参数

Tab. 1 2.5D C/SiC composite parameters

$D/\mu\text{m}$	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$\Psi_i/\%$	孔隙率/%	R/MPa
6.8	1.7	40	17	181

实验使用两种不同类型的铣刀:第一种是直径4 mm的传统端铣刀;第二种是直径4 mm的鱼鳞铣刀。刀具体结构如图2所示,其几何参数如表2所示。



图2 传统端铣刀(上)和鱼鳞铣刀(下)结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of traditional end mill (up) and scales mill (down)

表2 刀具参数

Tab. 2 Tool parameters

刀具	刀具材料	涂层	D/mm	前角/(°)	左螺旋槽数量/个	右螺旋槽数量/个	左螺旋角度 $\varphi/(\text{°})$	右螺旋角度 $\varphi/(\text{°})$
传统端铣刀	硬质合金	无涂层	4	0	-	2	-	30
鱼鳞铣刀	硬质合金	无涂层	4	7	12	10	25	27

1.2 实验步骤

2.5D C/SiC复合材料加工对比性研究是在XK714D型三轴数控加工中心上进行的[图3(c)]。在普通铣削和超声振动辅助铣削的加工方式下,选用传统端铣刀和鱼鳞铣刀进行了一系列铣削实验,

采用顺铣的铣削方式。鱼鳞铣刀的多齿结构在CFRP低损伤加工中显示出不错的效果,并且超声振动辅助加工对C/SiC复合材料这种硬脆性材料也展现出优良的加工性能^[17-18]。因此选择鱼鳞铣刀与超声振动辅助铣削与传统端铣刀普通铣削进行对比分

析。实验参数如表3所示。本文的研究重点是比较不同工艺下的铣削质量,不讨论切削参数对质量的影响,因此选择固定切削参数。

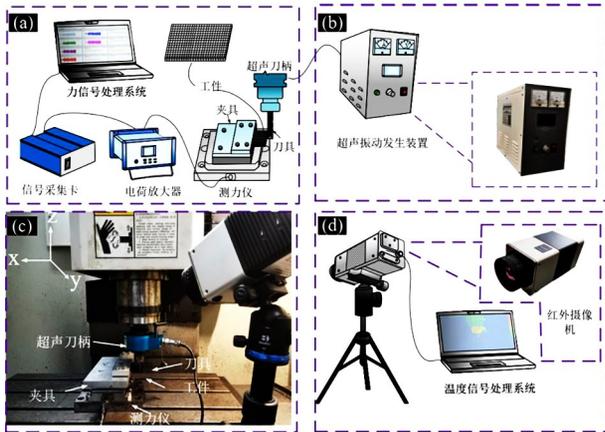


图3 铣削2.5D C/SiC复合材料的实验装置

Fig. 3 Experimental device for milling 2.5D C/SiC composites

表3 铣削实验加工参数

Tab. 3 Milling experimental machining parameters

组次	方法	刀具	切削参数
1	普通铣削	传统端铣刀	切削速度:0.5 m/min 进给速度:0.01 mm/r
2	超声振动辅助铣削	鱼鳞铣刀	径向切深:0.4 mm 振幅:0.3 mm
3	普通铣削	传统端铣刀	超声波频率:30 kHz
4	超声振动辅助铣削	鱼鳞铣刀	

切削力测量程序如图3(a)所示,工件通过特制夹具安装在切削力测力板上,通过(Kistler 9257A型)三向压电测力仪、(Kistler 5070型)电荷放大器及相应的数据采集与处理系统在铣削过程中实时采集测量三个正交方向上的力分量,分别记为 F_x 、 F_y 、 F_z ,再由切削力测量系统中DynoWare软件处理,滤去原始力信号中的噪声区,进而得到稳定阶段的切削力信号,并对力信号特征值进行了分析。

外接超声波发生装置的超声波主轴刀柄安装在三轴数控加工中心上,安装在三轴数控加工中心之前,将铣刀与超声波振动调至共振,图3(b)示出了超声波辅助加工装置的示意图。在实验过程中,切削区的温度是由分辨率为1 024×768 像素/30 Hz的固定式长波红外热像仪(VarioCAM HD head 880)测量,红外热像仪被固定在切削区域前面,能够拍摄铣刀与材料接触区,并且设置连续自动对焦和热点捕捉测量温度[图3(d)]。

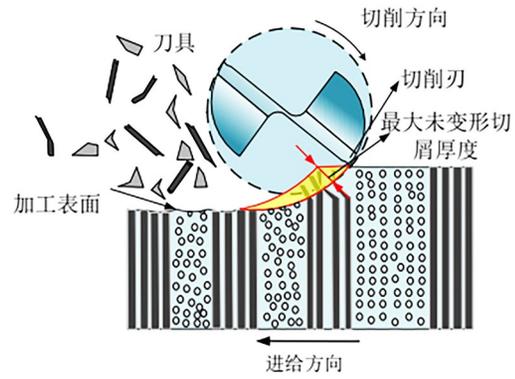
为确保加工精度与实验结果的准确性,每次实验均采用新的铣刀。将加工好的工件在超声振动水洗装置中进行水洗,洗掉表面杂质并干燥,然后进行

后续分析步骤。

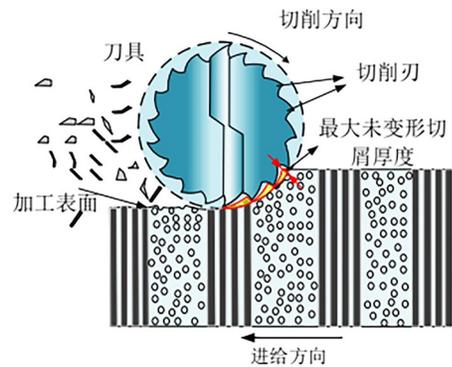
2 结果与分析

2.1 切削力

图4中显示在同等进给量的情况下,鱼鳞铣刀每齿的材料去除量比传统端铣刀小得多,因此鱼鳞铣刀能够对工件进行局部切削,通过这种小材料去除量和局部切削的方式使得切削过程中的变形区域减小。



(a) 传统端铣刀



(b) 鱼鳞铣刀

图4 传统端铣刀及鱼鳞铣刀每齿最大未变形切屑厚度示意图

Fig. 4 Diagram of the maximum undeformed chip thickness for per tooth of traditional end mills and scales mill

实验中,由于铣削过程中轴向力 F_z 很小,并且对铣削过程影响不大,所以本文中不研究轴向力。普通铣削和超声振动辅助铣削条件下使用两种刀具的径向力信号数据如图5所示。

明显看出,传统端铣刀与鱼鳞铣刀切削过程中,径向力 F_x 在测量时间内呈周期性变化,力信号曲线上的每一个峰值都表示铣削过程中的刀刃正在去除材料的过程。鱼鳞铣刀径向力与传统端铣刀径向力相比有较大波动,鱼鳞铣刀进行铣削时,每一时刻都有一定数量的微齿同时与工件进行作用,所以鱼鳞铣刀铣削过程中力信号波动较大。

如图6所示,当使用同一种刀具时,超声振动辅助铣削条件下,切削力分量显著减小。相较于传统

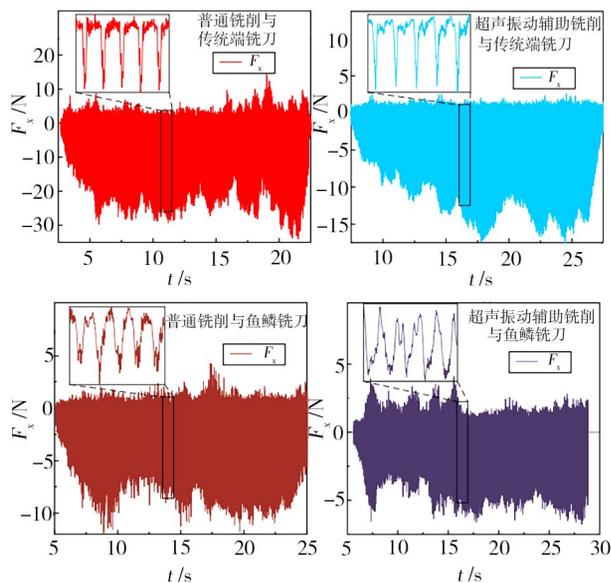


图5 不同工况下的径向切削力信号曲线

Fig. 5 Radial milling force signal curves under different machining conditions

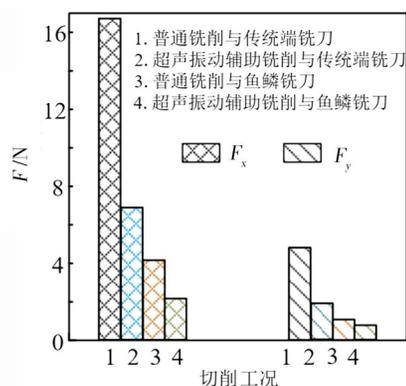


图6 不同工况下的 F_x 和 F_y 的数值对比

Fig. 6 Numerical comparison of F_x and F_y under different working conditions

端铣刀普通铣削, 超声振动辅助铣削条件下径向力 F_x 、切向力 F_y 的平均值分别降低 61.6% 和 54.3%。相较于鱼鳞铣刀普通铣削, 超声振动辅助加铣削条件下径向力 F_x 降低 37.6%, 切向力 F_y 的平均值降低 15.24%。这是由于超声振动辅助铣削是将超声波轴向高频运动与刀具高速旋转切削运动结合起来。当刀具和超声波发生器产生的轴向超声振动达到共振时, 刀具在超声振动振幅作用下, 在刀具进给运动的同时刀具上下振动, 刀具与工件不断分离, 交替接触, 加大刀具对工件的锤击作用, 因此工件受到较大的冲击力, 增加工件微裂纹产生, 促进材料的去除, 降低了去除材料所需的切削力。当在同一种铣削条件下时, 鱼鳞铣刀的切削力分量明显降低。在普通铣削条件下, 对于传统端铣刀而言, 鱼鳞铣刀径向力 F_x 、切向力 F_y 的平均值分别降低 78.26% 和 78.07%。在超声振动辅助铣削条件下, 对于传统端铣刀而言,

鱼鳞铣刀径向力 F_x 、切向力 F_y 的平均值分别降低 64.63% 和 51.49%。这是由于鱼鳞铣刀的微齿对工件进行微切削, 鱼鳞铣刀每齿的材料去除量比传统端铣刀小得多, 使工件材料去除区域材料的变形减小, 降低了切削区域的切削力。

2.2 切削温度

图7显示在四种铣削条件下整个切削过程的温度变化趋势, 各种工况下的初始温度接近室温 25 °C。

在图中可以明显看出在四种工况下随着刀具的进给, 铣削温度从室温不断上升, 这是由于铣削过程中热量不断累积, 热量累积的速度大于热量散失的温度所致, 前期温度上升趋势平缓, 当刀具即将到达切削距离末端时, 温度急剧上升, 达到整个铣削过程中温度的最大值, 其原因是立铣刀在加工区域的边角处进进出出时, 两侧存在轴向和径向摩擦。

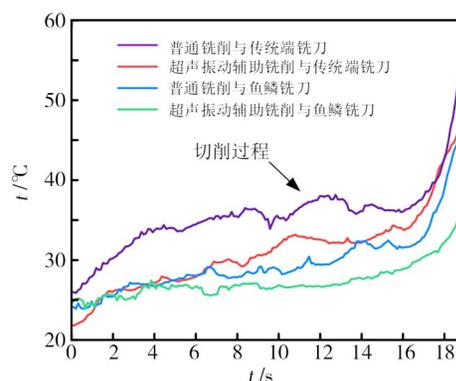


图7 不同工况下铣削过程中的温度曲线

Fig. 7 Temperature curves during milling under different working conditions

图8显示在四种加工条件下的铣削温度测量, 每个图像中的白色矩形框代表切削过程中测量的切削区最大温度(MT), 此区域显示的是刀具与工件相接触的区域。在图中显示, 在使用相同刀具时, 超声振动辅助铣削时的最大温度值小于普通铣削时的最大温度值。这是由于在传统加工中, 传统端铣刀与工件的接触是连续的, 而超声振动带动刀具振动, 刀具和工件反复接触和分离, 切削刃的切削特性已经从连续加工转变为间歇加工, 断续的刀具-工件接触避免了持续的摩擦热, 这降低了铣削温度。

在同种加工方式下, 鱼鳞铣刀铣削时的最大温度值小于传统端铣刀时的最大温度值。这是由于传统端铣刀和鱼鳞铣刀的结构不同造成的: 传统端铣刀在铣削过程中切削刃始终与工件接触, 并且在相同的进给下, 传统端铣刀每转一周期的材料去除量是鱼鳞铣刀的数倍, 增大了切削刃与工件的接触面积, 摩擦生热产生的热量较多。鱼鳞铣刀拥有独特的多齿结构和断屑螺旋槽结构, 多齿结构切削时和

超声振动辅助铣削时断续切削类似,都是使刀齿与工件反复接触-分离,降低铣削温度。另外断屑螺旋槽结构由左右螺旋槽相互交错切割而成,将整条切削刃分割,切削时各个微刃切削单元与工件接触面积降低,摩擦生热减少,因此铣削温度降低,左右螺旋槽增大了排屑能力,使切屑及时排除,有利于散热。

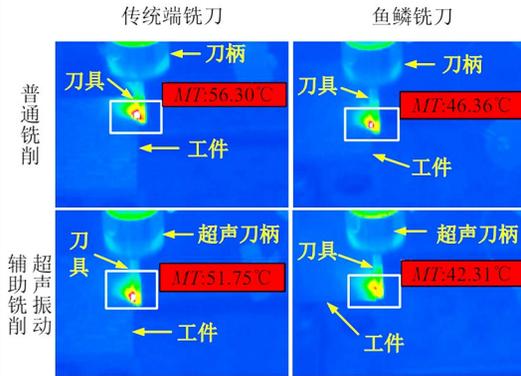


图8 红外热像仪测量不同工况下的最大铣削温度示意图
Fig. 8 Schematic diagram of the maximum cutting temperature under measured by infrared thermography different working conditions

2.3 2.5D C/SiC 复合材料纤维去除机理分析

如图9所示,2.5D C/SiC 复合材料具有复杂的结构。其中各向纤维在切削过程中与刀具切削刃的相互作用示意图如下,其中 0° 纤维与刀具进给方向平行, 90° 纤维与切削速度相互垂直,而 z 向针刺纤维则与切削刃平行。

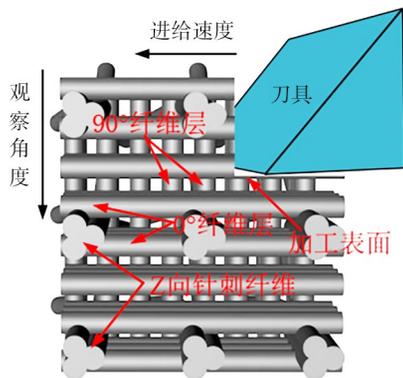
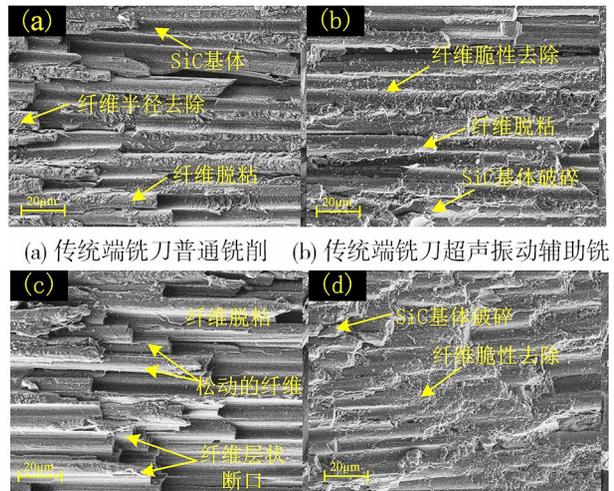


图9 刀具与各向纤维相互作用示意图
Fig. 9 Schematic diagram of interaction between tool and isotropic fiber

图10显示 0° 纤维在不同工况铣削表面断裂状态的SEM图像。图10(a)、图10(c)加工表面堆叠有多个完整的碳纤维,碳纤维整根脱粘断裂,加工表面起伏较大。当传统端铣刀及鱼鳞铣刀顶刃(材料主要去除切削刃)切削时,切削刃主要作用于纤维与纤维的SiC层,切削力很容易超过SiC层的结合强度,迫使

纤维分离然后纤维脱粘弯曲断裂。图10(b)、图10(d)加工表面整体较为平滑,由纤维微脆性去除表面及破碎的基体组成。当超声振动辅助铣削时刀具在进给的同时进行高频、低振幅的振动,在刀具的振动挤压作用下,碳纤维内部会产生微裂纹,随着微裂纹继续扩展,直到材料被去除。



(a) 传统端铣刀普通铣削 (b) 传统端铣刀超声振动辅助铣削
(c) 鱼鳞铣刀普通铣削 (d) 鱼鳞铣刀超声振动辅助铣削
图10 四种工况下的 0° 纤维断裂状态

Fig. 10 0° fiber fracture state under four working conditions

图11显示 90° 纤维在不同工况铣削表面断裂状态的SEM图像。图11(a)加工表面充斥着参差不齐的纤维断裂面、纤维断裂引起的拔出凹坑和纤维与纤维之间SiC基体破碎产生的裂缝及空洞。一部分 90° 纤维被刀刃直接剪断,产生平整的纤维断裂面。另一部分 90° 纤维在刀刃的挤压与剪切作用下先产生法向的弯曲变形断裂,然后在纤维的张力侧被剪切断裂。纤维弯曲变形过程中,刀具使纤维产生平滑的切面。纤维剪切断裂过程中,纤维会稍微拔出,纤维会形成倾斜的 z 向的断裂形貌。随着刀具的进给,纤维会受到刀具前刀面的拾挤作用,纤维拔出形成凹坑。图11(b)、图11(c)、图11(d)加工表面整体较为平整,大部分是由平整的纤维平滑断口及纤维剪切断口形成。鱼鳞铣刀与超声振动辅助铣削都会减少切削力,从而减少纤维的变形程度,减少了纤维拔出及纤维弯曲断裂。

图12显示 z 向针刺纤维在不同工况铣削表面断裂状态的SEM图像。图12(a)由凹坑、破碎的基体及纤维组成,表面状态复杂。

整条微元切削刃参与对纤维的切削。随着进给运动,在刀具的挤压作用下基体首先破碎,纤维失去支撑产生大弯曲变形断裂。图12(c)加工表面由松动的纤维、纤维的层状断口、破碎的基体及纤维组成。多层鱼鳞铣刀顶刃对纤维进行多次切削作用,

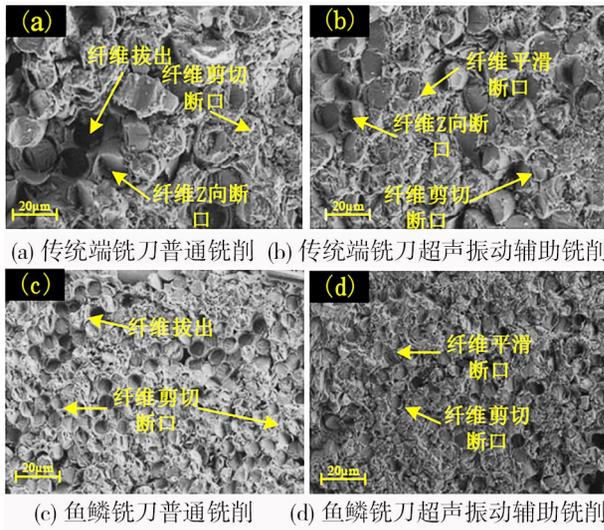


图 11 四种工况下 90° 纤维断裂状态

Fig. 11 90° fiber fracture state under four working conditions

形成所示的表面。图 12(b)、图 12(d)加工表面整体较为平滑,这是由于纤维及基体由脆性材料的塑性去除为主^[19]。

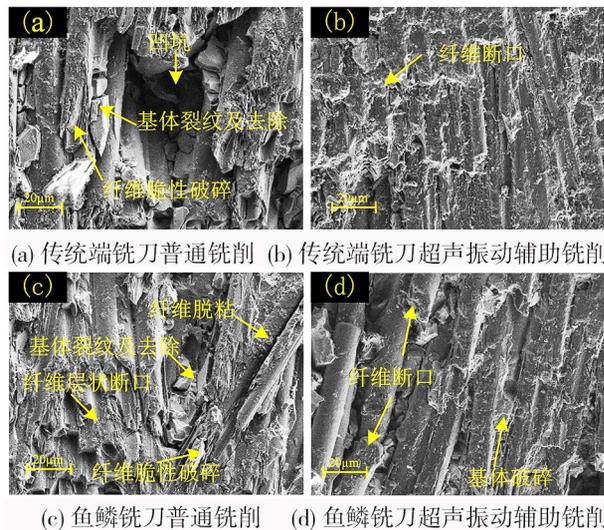


图 12 四种工况下 z 向针刺纤维断裂状态

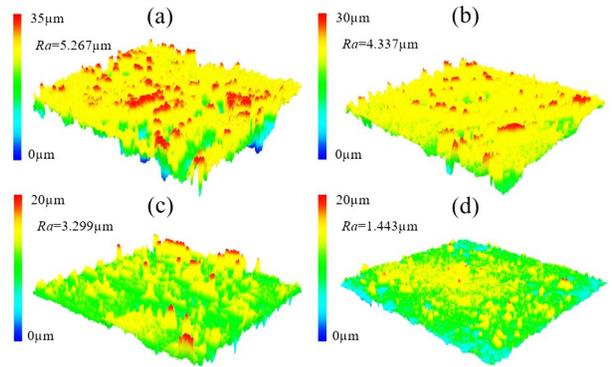
Fig. 12 z-direction needle punched fiber fracture state under four working conditions

超声振动辅助铣削表面相对光滑,纤维拔出、基体剥落损伤较少,没有大面积的纤维断裂坑。纤维与基体结合紧密,界面脱粘损伤较小。相比之下,普通铣削表面形貌上的纤维拔出损伤、纤维间隙和脱粘损伤较为严重。

2.4 表面粗糙度分析

表面粗糙度是评价机械加工表面的重要指标。图 13 显示不同工况下铣削表面三维形貌及粗糙度。从图中可以看出,随着加工方式的转换,表面粗糙度 Ra 逐渐降低,整体 Ra 从 $5.267 \mu\text{m}$ 降低到 $1.443 \mu\text{m}$ 。加工表面的凹坑及突起逐渐减少,表面逐渐平坦,表

面质量逐渐变好。



注: (a)传统端铣刀普通铣削, (b)传统端铣刀超声振动辅助铣削, (c)鱼鳞铣刀普通铣削, (d)鱼鳞铣刀超声振动辅助铣削。

图 13 不同工况下铣削表面三维形貌

Fig. 13 3D surface topography of milling under different conditions

这是由于传统端铣刀普通铣削每齿材料去除量最大,纤维受到刀具的推挤、剪切作用也较大。因此纤维断裂时的变形较大,材料加工表面的缺陷比较明显,表面粗糙度值 Ra 也相对较大。传统端铣刀超声振动辅助铣削由于超声振动增加了刀具对纤维的连续锤击作用,使纤维在尽可能的小的变形下破碎断裂,有效改善了传统端铣刀铣削过程质量较差的问题。而鱼鳞铣刀多层顶刃在铣削过程中对纤维进行多次切削作用,每一齿都对上一齿铣削过的表面进行修磨,提高了表面质量。鱼鳞铣刀超声振动辅助铣削主要是鱼鳞铣刀多齿切削与超声振动带来的锤击作用相结合,所得到的表面质量最好。

3 结论

(1) 比较四种工况下的切削力数值的大小表明使用鱼鳞铣刀及超声振动辅助铣削可以降低切削力。普通铣削时使用鱼鳞铣刀比传统端铣刀切削力降低了 78% 左右。超声辅助加工时,传统端铣刀切削力径向力为 F_x 、切向力为 F_y 的平均值分别降低 61.6% 和 54.3%,鱼鳞铣刀径向力为 F_x 、切向力为 F_y 的平均值分别降低 37.6% 和 15.24%。

(2) 鱼鳞铣刀铣削与超声振动辅助铣削都是断续切削,减少了刀具与工件的摩擦,可以有效的降低加工温度,改善材料的可加工性。

(3) 鱼鳞铣刀顶刃及传统端铣刀铣削时各向纤维以整根去除为主,表面较为粗糙,缺陷比较明显。适当的刀具振幅促进了 0° 纤维和 90° 纤维微裂纹的萌生和扩展,从而促进材料通过破碎去除,z 向针刺纤维通过脆性材料的塑性去除,有效地降低了加工表面粗糙度,提高了工件表面质量。

参考文献

- [1] ZHANG C, WANG H, LIU Y, et al. Thermal shock resistance of a 2D C/SiC composite and its damage mechanisms [J]. *Advances in Applied Ceramics*, 2013, 112(8): 499–504.
- [2] DU J, MING W, MA J, et al. New observations of the fiber orientations effect on machinability in grinding of C/SiC ceramic matrix composite [J]. *Ceramics International*, 2018, 44(12): 13916–13928.
- [3] YANG Y, QU S, GONG Y, et al. Investigating the grinding performance of unidirectional and 2.5D-C/SiCs [J]. *Ceramics International*, 2021, 47(4): 5123–5132.
- [4] 吴煜斌, 张飞飞, 王乐, 等. C/SiC复合材料表面粗糙度铣削加工工艺研究[J]. *航天制造技术*, 2021(1): 45–48.
- WU Y B, ZHANG F F, WANG L, et al. Study on milling process of surface roughness of C/SiC Composites [J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2021(1): 45–48.
- [5] 何涛, 傅玉灿, 苏宏华, 等. C/SiC复合材料铣削表面完整性研究[J]. *南京航空航天大学学报*, 2014, 46(5): 701–706.
- HE T, FU Y C, SU H H, et al. Study on milling surface integrity of C/SiC composites [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2014, 46(5): 701–706.
- [6] 毕铭智. C/SiC复合材料钻, 铣加工技术的试验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- BI M Z. Experimental Study on Drilling and Milling Technology of C/SiC Composites [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [7] 黄青林, 赵建设, 徐亮, 等. SiC_x/SiC复合材料铣削加工表面质量[J]. *宇航材料工艺*, 2022, 52(1): 89–93.
- HUANG Q L, ZHAO J S, XU L, et al. Quality of milling surface of silicon carbide fiber reinforced silicon carbide ceramic matrix composites [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2022, 52(1): 89–93.
- [8] 钟翔福. C/SiC复合材料旋转超声振动辅助铣削实验研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2019.
- ZHONG X F. Experimental Study on Rotary Ultrasonic Vibration Assisted Milling of C/SiC Composites [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2019.
- [9] 王明海, 姜庆杰, 王奔, 等. C/SiC复合材料超声扭转振动铣削抑制损伤产生的机理[J]. *现代制造工程*, 2016(3): 103–109.
- WANG M H, JIANG Q J, WANG B, et al. Mechanism of damage suppression in ultrasonic torsional vibration milling of C/SiC composites [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2016(3): 103–109.
- [10] 方胜, 徐涛, 陈旭辉, 等. C/C复合材料的超声振动铣磨加工技术[J]. *宇航材料工艺*, 2010, 40(2): 80–84.
- FANG S, XU T, CHEN X H, et al. Ultrasonic vibration grinding of C/C composites [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2010, 40(2): 80–84.
- [11] 湛青坡. 超声振动辅助铣磨三维针刺C/SiC复合材料加工工艺研究 [D]. 济南: 山东大学, 2018.
- ZHAN Q P. Research on Ultrasonic Vibration Assisted Milling of 3D Needled C/SiC Composites [D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [12] GEIER N, SZALAY T, BIRÓ I. Trochoid milling of carbon fibre-reinforced plastics (CFRP) [J]. *Procedia CIRP*, 2018, 77: 375–378.
- [13] SHEIKH-AHMAD J, URBAN N, CHERAGHI H. Machining damage in edge trimming of CFRP [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2012, 27(7): 802–808.
- [14] WANG F, ZHANG B, JIA Z, et al. Structural optimization method of multi-tooth cutter for surface damages suppression in edge trimming of carbon fiber reinforced plastics [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 46: 204–213.
- [15] KUO C, LIU J, CHANG T, et al. The effects of cutting conditions and tool geometry on mechanics, tool wear and machined surface integrity when routing CFRP composites [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 64: 113–129.
- [16] QU S, GONG Y, YANG Y, et al. Surface topography and roughness of silicon carbide ceramic matrix composites [J]. *Ceramics International*, 2018, 44(12): 14742–14753.
- [17] CHEN J, MING W, AN Q, et al. Mechanism and feasibility of ultrasonic-assisted milling to improve the machined surface quality of 2D C_x/SiC composites [J]. *Ceramics International*, 2020, 46(10): 15122–15136.
- [18] MAKHDUM F, HADNIS V A, ROY A, et al. Effect of ultrasonically-assisted drilling on carbon-fibre-reinforced plastics [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2014, 333(23): 5939–5952.
- [19] LIU Y, QUAN Y, WU C, et al. Single diamond scribing of SiC_x/SiC composite: Force and material removal mechanism study [J]. *Ceramics International*, 2021, 47(19): 27702–27709.