

C/SiC 复合材料铣削表面完整性研究

何 涛 傅玉灿 苏宏华 丁 凯

(南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016)

摘要:采用 PCD 刀具进行了 C/SiC 复合材料的铣削加工实验,通过观察加工表面/亚表面损伤,分析了 C/SiC 复合材料铣削加工表面形成机制,并结合切削力讨论了铣削参数对加工表面形貌和粗糙度的影响。研究结果表明,C/SiC 材料以脆性断裂方式实现去除;加工表面存在纤维的层状脆断、拔出和纤维束断裂等现象;碳纤维区域粗糙度随铣削参数的变化规律与表面微观形貌基本一致;提高切削速度能改善表面质量,增大切深会使表面质量严重恶化,每齿进给量对表面质量影响较小。

关键词:C/SiC 复合材料;表面形貌;亚表面损伤;表面粗糙度

中图分类号:TH162 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2014)05-0701-06

Study on Surface Integrity in Milling of C/SiC Composite

He Tao, Fu Yucan, Su Honghua, Ding Kai

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The milling experiments of C/SiC composite with PCD tools are conducted, and surface formation mechanism is analyzed by observing surface/subsurface damages. The effect of milling parameters on surface topography and surface roughness is discussed with the analysis of cutting force. The results show that C/SiC composite is removed in the mechanism of brittle fracture. Laminated fracture, pull-out and fracture in bundle of carbon fiber can be observed on the machined surface. The effect of milling parameters on surface roughness is basically the same with that on surface topography. The higher cutting speed can improve the surface quality, the bigger axial depth of cut will worsen the surface quality and the feed per tooth has no significant influence on surface quality.

Key words: C/SiC composite; surface topography; subsurface damage; surface roughness

碳纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料 C/SiC 综合了碳纤维优良的力学性能和碳化硅陶瓷基体良好的化学和热稳定性,具有密度低、抗氧化性好、耐腐蚀、良好的摩擦磨损性能以及耐高温等优点^[1],是一种很有潜力的热结构材料,在国防和航空航天领域得到广泛的应用^[2]。

与 C/SiC 复合材料的制备技术相比,对其加工技术的研究较少。而 C/SiC 较大的加工难度也限制了其在工业领域的广泛应用^[3]。目前针对 C/SiC 复合材料的常规加工方法一般是磨削和切削。磨削加工能够获得较好的精度和表面质量,但是加

工效率较低^[4-5]。而采用切削方法加工这一类复合材料往往存在两个问题:一是刀具磨损严重,二是加工表面质量较差。针对这两个问题,文献[6,7]研究了不同刀具铣削 C/C-SiC 材料时的磨损情况,发现硬质合金刀具和 DLC 涂层刀具磨损严重,而 PCD 刀具磨损较慢,适合用来加工 C/C-SiC 材料。王平等^[8]研究了 C/SiC 复合材料的车削加工工艺,发现高速钢和硬质合金刀具磨损很快,而金刚石刀具刀尖保持锋利的时间成倍延长,且能提高加工表面质量。毕铭智^[9]在进行 C/SiC 复合材料槽铣时指出硬质合金刀具极易出现毛刺和崩边,

而 PCD 刀具产生的缺陷较轻微。但在这些文献中都没有对加工表面完整性进行充分的研究,同时 C/SiC 复合材料本身的缺陷又导致加工表面质量很难简单地用粗糙度进行评价^[10],因此复合材料铣削时的表面形成机制和工艺参数对表面质量的影响目前还不清楚。本文在以上研究的基础上选择使用 PCD 刀具对 C/SiC 复合材料进行铣削加工。通过观察铣削表面和亚表面损伤,对表面形成机制进行了研究,并结合切削力分析了铣削用量对加工表面形貌和粗糙度的影响规律,以期 C/SiC 复合材料铣削工艺参数和表面完整性研究提供实验基础和理论参考。

1 实验条件及过程

1.1 实验材料

实验中使用的 C/SiC 陶瓷基复合材料为二维编织结构,碳纤维为 $0^\circ/90^\circ$ 方向编织。材料具体组成包括碳纤维(体积分数约为 45%)、SiC 基体和孔隙,如图 1 所示。

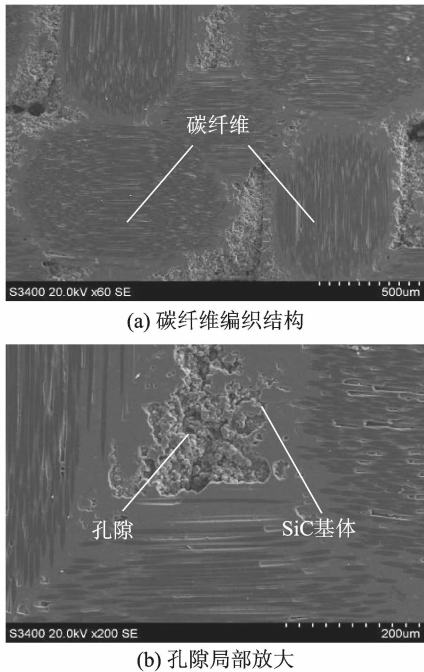


图 1 C/SiC 复合材料微观形貌

Fig. 1 Microtopography of C/SiC composite

1.2 实验方法

实验装置及测力系统如图 2 所示。使用的机床为 XS5040 立铣床,选用的刀具为 Walter 公司生产的 PCD 刀片,颗粒度 $25\ \mu\text{m}$,前角 8° ,后角 10° 。配合使用的刀杆型号为 R217.69-2020.0-09-2A,刀杆直径 20 mm。测力和观察表面形貌所使用的试样尺寸为 $35\ \text{mm} \times 8\ \text{mm} \times 5\ \text{mm}$,亚表面

损伤实验的试样如图 3 所示,所有试样均用石蜡粘在夹具上。采用 KISTLER9272 三向压电晶体测力仪对切削力进行测量。实验中采用的铣削方法为顺铣,单齿端铣加工,实验在干切条件下进行。为了分析各参数对加工表面质量的影响,设计了如表 1 所示的单因素实验,其中主轴转速为 $200 \sim 800\ \text{r/min}$,轴向切深为 $0.4 \sim 0.8\ \text{mm}$,每齿进给量为 $0.1 \sim 0.3\ \text{mm/z}$,径向切宽固定为 $8\ \text{mm}$ 。

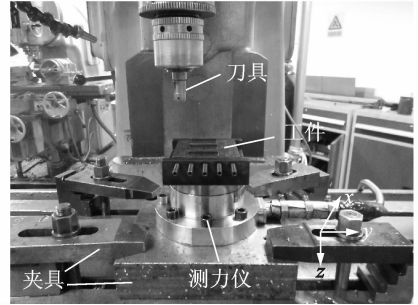


图 2 实验装置

Fig. 2 Experimental apparatus

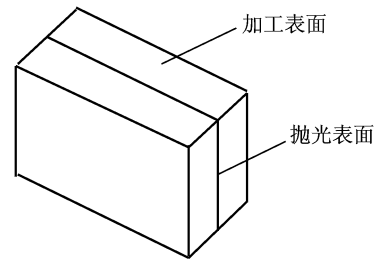


图 3 亚表面损伤实验试样示意图

Fig. 3 Sample schematic of subsurface damage

表 1 铣削参数

Tab. 1 Milling parameters

切削速度 $v_s /$ ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	轴向切深 a_p / mm	每齿进给量 $f_z / (\text{mm} \cdot \text{z}^{-1})$
12.6, 31.4, 50.2	0.4	0.2
25.1	0.4, 0.6, 0.8	0.25
25.1	0.4	0.1, 0.2, 0.3

采用 Keyence VK-X100 形状测量激光显微系统对工件加工表面粗糙度进行测量,测量结果由表面三维算术平均偏差值 S_a 表示。由于材料内部存在孔隙,若测量时将孔隙涵盖在内则难以反映加工表面特征,因此选取纤维区域取样面积约为 $0.5\ \text{mm} \times 0.5\ \text{mm}$ 的部分进行测量(见图 4)。对于每一试样,在相互垂直的纤维束内各选取 6 个上述面积的区域,测量出 12 组 S_a 值后取平均值作为最终表面粗糙度值。

采用 HitachiS-3400N II 型扫描电镜对 C/SiC

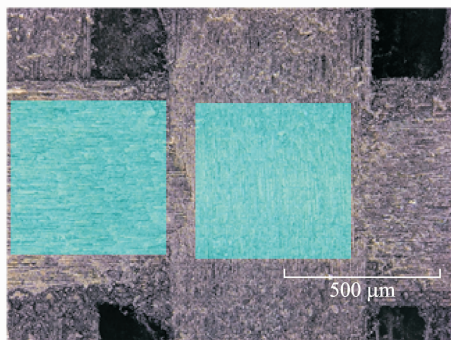


图 4 Sa 测量时的取样面积

Fig. 4 Sampling area in Sa measurement

复合材料铣削加工表面和亚表面的微观形貌进行观测,观测前对观测面进行喷金处理。

2 实验结果与讨论

2.1 实验结果

2.1.1 铣削力

图 5 为铣削 C/SiC 复合材料时切削速度、切削深度、每齿进给量与铣削力的关系曲线。可以看到径向分力 F_x 最大,轴向分力 F_z 次之,沿进给方向的分力 F_y 最小。

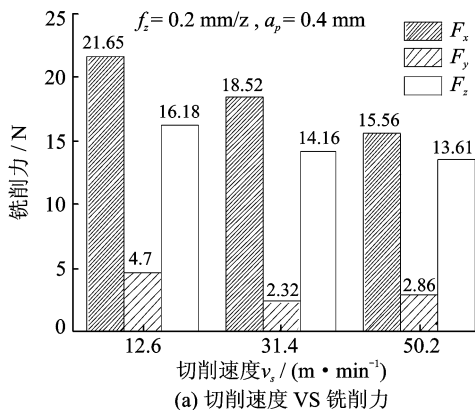
由图 5(a)可以看出:切削力随着切削速度的上升而下降,但是变化幅度相对较小。这是因为 C/SiC 复合材料是脆性材料,塑性变形很小,切屑和前刀面之间的摩擦也很小,所以切削速度对切削力的影响较小。

由图 5(b,c)可以看出:随着切削深度和每齿进给量的增大,切削力有明显的增大。因为进给量和轴向切深会影响切削层的几何形状,使得切削层的截面积增加,导致切削力快速上升。

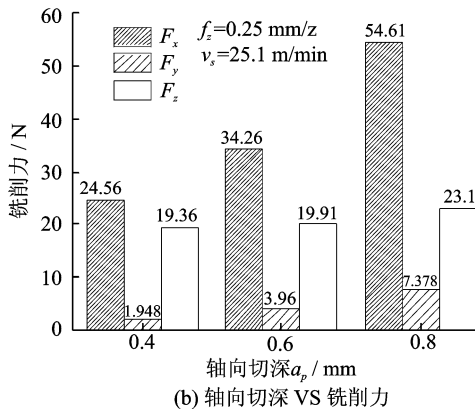
2.1.2 加工表面/亚表面损伤

图 6 为不同铣削速度下的加工表面放大 100 倍的扫描电镜照片。由图 6 可以看到,两个方向的在纤维束上都出现大面积的层状脆断剥落特征。对比图 6(a,b),可以看到当切削速度为 12.6 m/min 时,加工表面孔隙周围的纤维束有明显的断裂现象,导致孔隙出现一定程度的塌陷。而当切削速度为 50.2 m/min 时,纤维束没有出现明显断裂,说明此时加工表面的主要损伤形式为碳纤维层状脆断剥落。

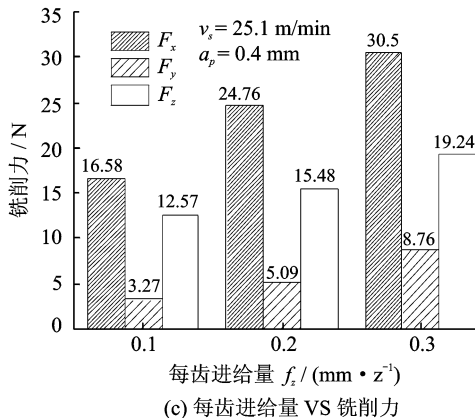
图 7 为不同轴向切深时加工表面放大 200 倍后的扫描电镜照片。可以看到,图 7(a)中碳纤维区域依然能看到明显的层状脆断特征,并伴有纤维拔出现象。图 7(b)中的碳纤维束整条断裂,断口位置不一。由于纤维束断裂严重,碳纤维区域减小



(a) 切削速度 VS 铣削力



(b) 轴向切深 VS 铣削力



(c) 每齿进给量 VS 铣削力

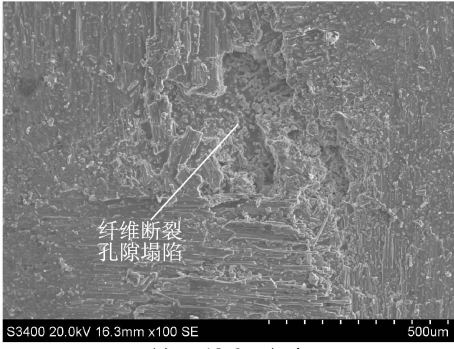
图 5 铣削参数对铣削力的影响

Fig. 5 Relationship between milling parameters and cutting force

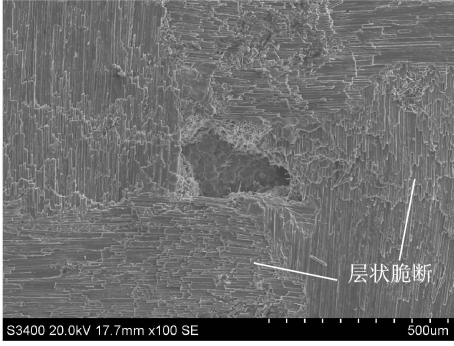
并且难以观察到纤维的层状脆断,说明此时加工表面的主要损伤形式为碳纤维束断裂。

图 8(a,b)分别为每齿进给量为 0.1 mm/z 和 0.3 mm/z 时加工表面放大 400 倍后的扫描电镜照片。可以看到在两种铣削参数下加工表面的主要损伤特征都是碳纤维层状脆断。在图 8(a)中可以观察到加工表面的裂纹,在图 8(b)中能观察到纤维拔出。

图 9 为亚表面损伤扫描电镜照片。由图 9(a)可以看出纤维束编织后的弯曲造成铣削表面纤维的脆性断裂呈现明显的层状特征。进一步观察轴向切深为 0.8 mm 时的亚表面损伤情况,可以看到



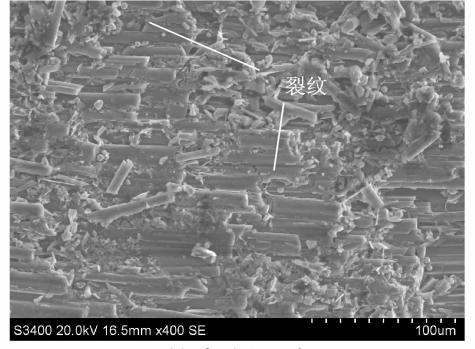
(a) $v_s=12.6$ m / min



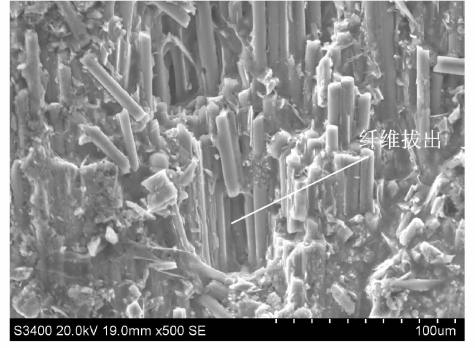
(b) $v_s=50.2$ m / min

图6 不同切削速度下的表面形貌

Fig. 6 Microtopography at different cutting speeds ($a_p=0.4$ mm, $f_z=0.2$ mm/z)



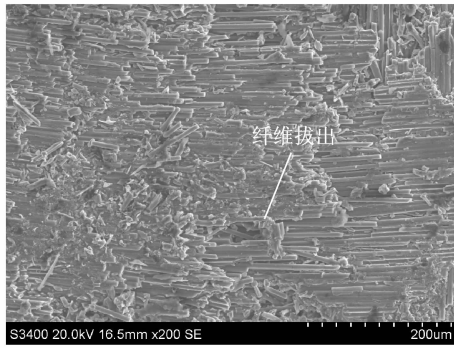
(a) $f_z=0.1$ mm/z



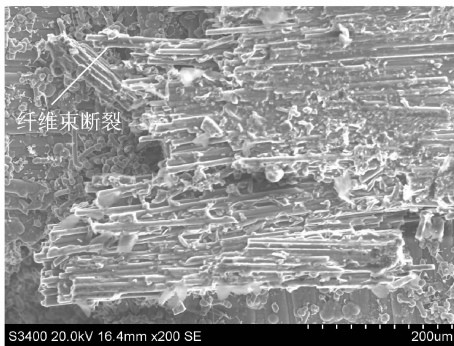
(b) $f_z=0.3$ mm/z

图8 不同每齿进给量下的表面形貌

Fig. 8 Microtopography in different feed per tooth ($v_s=25.1$ m/min, $a_p=0.4$ mm)



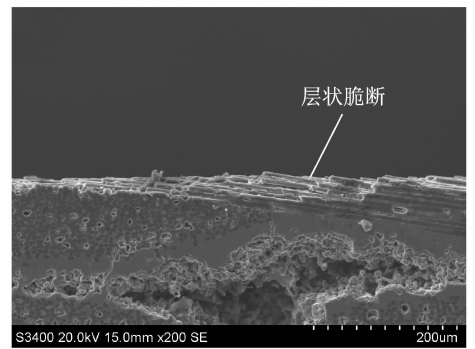
(a) $a_p=0.4$ mm



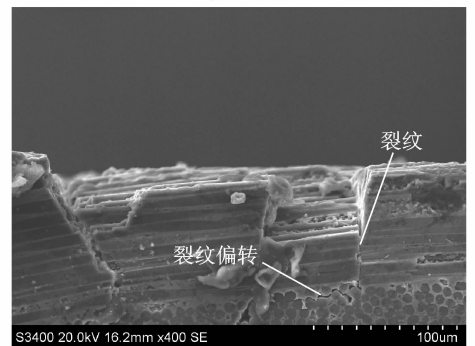
(b) $a_p=0.8$ mm

图7 不同轴向切深下的表面形貌

Fig. 7 Microtopography in different axial depths of cut ($v_s=25.1$ m/min, $f_z=0.25$ mm/z)



(a) $a_p=0.4$ mm



(b) $a_p=0.8$ mm

图9 铣削亚表面损伤

Fig. 9 Milling subsurface damage ($v_s=25.1$ m/min, $f_z=0.25$ mm/z)

不止一条裂纹在厚度方向贯穿整条纤维束,其扩展深度接近 0.1 mm,并在到达另一个编织方向的纤

维束后发生偏转,同时在裂纹处出现纤维束的大块脱落(图 9(b)).可见纤维束的断裂与裂纹在厚度

方向的扩展密切相关。

2.1.3 表面粗糙度

图 10 为 C/SiC 复合材料铣削加工表面碳纤维区域随切削速度、切削深度、每齿进给量变化而变化的规律。可以看到, C/SiC 复合材料铣削加工表面粗糙度随切削速度的增大而减小, 随轴向切深的增大而增大, 而每齿进给量对粗糙度的影响不明显。实验参数范围内铣削加工表面粗糙度 S_a 在 $7.88 \sim 9.16 \mu\text{m}$ 之间, 粗糙度较大是因为材料以脆性方式去除使得碳纤维加工表面存在大量以纤维层状脆断剥落和纤维拔出为主的损伤。

对比表面形貌观察结果和粗糙度测量结果, 可以发现碳纤维粗糙度的变化规律与表面形貌相一致。但不同参数下加工表面形貌之间的差异要大于碳纤维区域粗糙度的差异, 这是因为纤维束断裂主要发生在孔隙周围和纤维束边缘, 而粗糙度的测量点大多取在纤维束中心。这说明评价 C/SiC 复合材料的铣削加工表面质量需要对表面形貌和粗糙度进行综合考虑。

2.2 表面形成机制及影响机理

图 11 为表层材料层状脆断剥落和纤维拔出形成过程的示意图, 其中图 11(a) 为初始状态。在铣削时, 刀尖处的材料处于以拉伸为主的复杂应力状态。当刀具切入工件时, 接触处材料首先产生弹性变形。由于在 C/SiC 复合材料中, SiC 基体的脆性大于碳纤维且抗拉强度较低, 因此在拉应力作用下, 刀尖附近的 SiC 基体首先出现裂纹, 并随着刀具继续运动, 裂纹向不同方向扩展, 当到达碳纤维/基体界面时, 裂纹暂时被阻止(图 11(b))。在材料内部孔隙等缺陷处, 纤维和基体的结合较弱, 在拉应力的作用下, 这些地方的裂纹首先开始扩展。当裂纹在加工平面内重新扩展时, 部分碳纤维在抗拉强度较低处开始断裂(图 11(c))。最终在刀具的继续作用下导致更多碳纤维断裂, 同时部分纤维克服界面摩擦阻力从基体中拔出(图 11(d))。

纤维束断裂过程可结合图 9(b) 进行解释, 当刀尖处产生的裂纹向刀具下方扩展到基体和碳纤维界面结合性能较弱处, 裂纹发生偏转使得基体和纤维脱离, 造成纤维束的断裂。而在孔隙周围纤维束缺少支撑, 裂纹向下扩展后无需偏转, 直接使纤维束断裂, 导致了孔隙周围的纤维束容易出现断裂现象。

从 C/SiC 复合材料铣削加工表面形成机制来看, 裂纹的产生与扩展对表面质量有很大的影响。在实验参数范围内, 当切削速度降低或轴向切深增

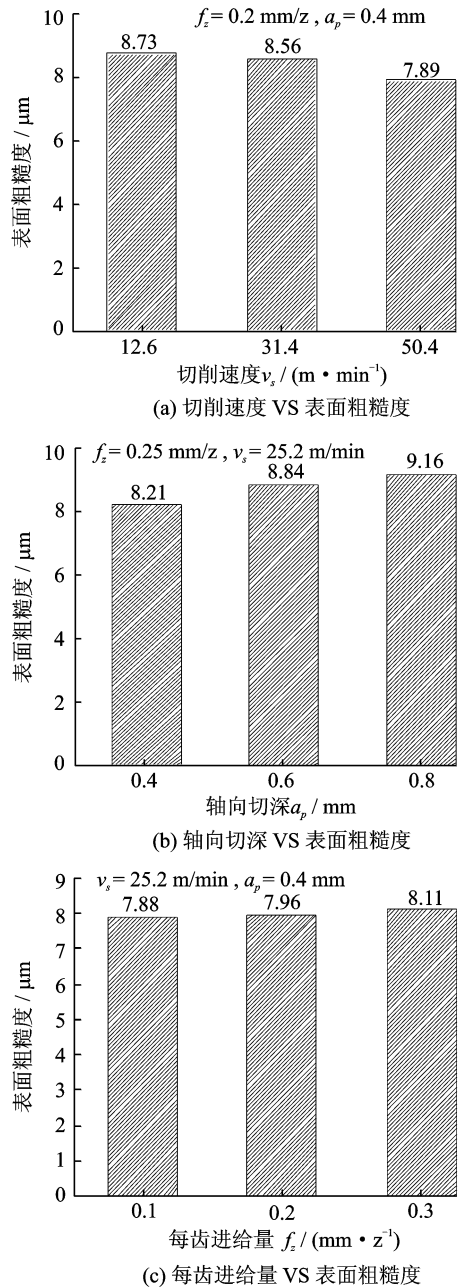


图 10 铣削参数对加工表面粗糙度的影响

Fig. 10 Relationship between milling parameters and surface roughness

加时, 切削力增大并使得切削过程中刀具下方产生更多裂纹且扩展深度也更大, 导致了纤维束更容易出现断裂。因此在切削速度为 12.6 m/min 时, 能观察到孔隙周围纤维束明显断裂, 甚至在轴向切深为 0.8 mm 时出现纤维束整条断开。纤维束断裂也使得加工表面碳纤维区域的粗糙度变差。

虽然切削力随着每齿进给量的增加而增大, 但由于每齿进给量的增加使得每次切削时的切削厚度也增加。如果考虑单位切削厚度上的切削力, 该值并没有上升, 反而略有下降。切削过程中, 刀具下方的裂纹在整个切削厚度内产生, 所以在切削过

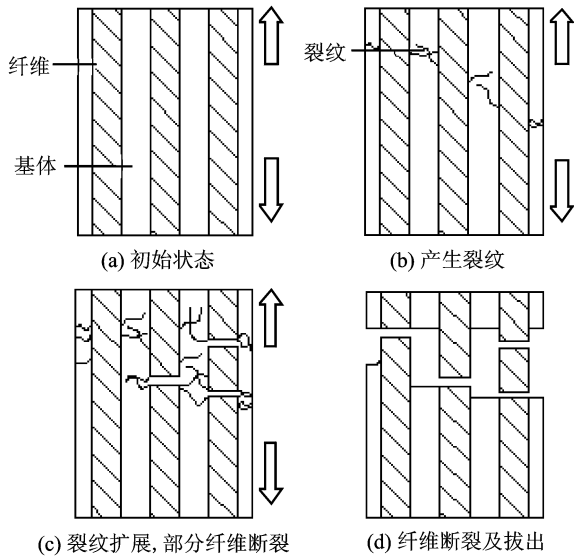


图 11 C/SiC 材料表层去除过程

Fig. 11 Removal process of surface layer of C/SiC composite

程中,不同每齿进给量下刀具下方裂纹生成和扩展的程度相似,因此每齿进给量对加工表面纤维束的断裂程度和碳纤维区域的粗糙度没有明显影响。

3 结 论

(1) C/SiC 复合材料在铣削过程中以脆性断裂方式去除,加工表面/亚表面主要的损伤形式为碳纤维层状脆断剥落、纤维拔出和纤维束断裂。

(2) 加工表面碳纤维区域的粗糙度 S_a 在 $7.88 \sim 9.16 \mu\text{m}$ 之间。粗糙度随工艺参数的变化规律与表面形貌相一致,即在实验参数范围内,提高切削速度有利于改善表面质量,增大切深会使表面质量严重恶化,每齿进给量对表面质量的影响较小。

(3) C/SiC 复合材料的铣削表面质量与切削力密切相关,切削力增大使得切削过程中裂纹增多且扩展深度变大,纤维束更容易断裂,导致表面质量恶化。

(4) 综合考虑加工表面质量和加工效率, C/SiC 复合材料铣削加工时合适的用量范围为:切削速度不低于 50.2 m/min ,轴向切深不超过 0.4 mm ,每齿进给量在 $0.2 \sim 0.3 \text{ mm/z}$ 。

参考文献:

[1] 范尚武,徐永东,张立同,等. C/SiC 摩擦材料的制备及摩擦磨损性能[J]. 无机材料学报, 2006, 21(4): 927-934.
Fan Shangwu, Xu Yongdong, Zhang Litong, et al. Preparation and tribological properties of C/SiC fric-

tion materials[J]. Journal of Inorganic Materials, 2006, 21(4): 927-934.

- [2] 张立同, 成来飞. 连续纤维增韧陶瓷基复合材料可持续发展战略探讨[J]. 复合材料学报, 2007, 24(2): 1-6.
Zhang Litong, Cheng Laifei. Discussion on strategies of sustainable development of continuous fiber reinforced ceramic matrix composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(2): 1-6.
- [3] Li Z C, Jiao Y, Deines T W, et al. Rotary ultrasonic machining of ceramic matrix composites: Feasibility study and designed experiments[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(12): 1402-1411.
- [4] Weinert K, Jansen T. Ceramic matrix composites: Fiber reinforced ceramics and their applications[M]. Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, 2008: 287-301.
- [5] Tawakoli T, Azarhoushang B. Intermittent grinding of ceramic matrix composites (CMCs) utilizing a developed segmented wheel[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(2): 112-119.
- [6] Tashiro T, Fujiwara J, Takenaka Y. Grinding of C/C-SiC composite in dry method [M]. London: Springer, 2007: 351-352.
- [7] Tashiro T, Fujiwara J, Ochiai K. Endmill cutting for C/C-SiC composite[C]// Proceedings of JSPE Semestrial Meeting. Japan: The Japan Society for Precision Engineering, 2008: 47-48.
- [8] 王平, 张权明, 李良. C_f /SiC 陶瓷基复合材料车削加工工艺研究[J]. 火箭推进, 2011, 37(2): 67-70.
Wang Ping, Zhang Quanming, Li Liang. Research on turning technology of C_f /SiC ceramic matrix composites[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2011, 37(2): 67-70.
- [9] 毕铭智. C/SiC 复合材料钻, 铣加工技术的实验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2013.
Bi Mingzhi. Experimental research on drilling and milling of C/SiC composites[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [10] 刘杰, 李海滨, 张小彦, 等. 2D-C/SiC 高速深磨磨削特性及去除机制[J]. 复合材料学报, 2012, 29(4): 113-118.
Liu Jie, Li Haibin, Zhang Xiaoyan, et al. Investigation of grinding characteristics and removal mechanisms of 2D-C/SiC in high speed deep grinding[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2012, 29(4): 113-118.