

单向碳纤维增强陶瓷基复合材料磨削表面质量研究

屈硕硕, 巩亚东, 杨玉莹, 蔡 明
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 为考察单向碳纤维增强陶瓷基复合材料(C_f/SiC)的磨削表面质量,使用树脂结合剂金刚石砂轮完成正交试验研究.通过极差分析获得砂轮线速度 v_s 、磨削深度 a_p 和进给速度 v_w 对表面质量影响的主次顺序.正交试验结果表明:磨削深度对磨削表面粗糙度影响最大;随着磨削深度 a_p 的增大,表面粗糙度显著增大;随着砂轮线速度 v_s 的增大,表面粗糙度不断减小;随着进给速度 v_w 的增大,表面粗糙度增大.最终根据试验结果及表面微观形貌对单向碳纤维增强陶瓷基复合材料的磨削机理进行深入的分析,对单向 C_f/SiC 磨削加工理论的机理揭示具有指导意义.

关 键 词: 单向碳纤维增强陶瓷基复合材料(C_f/SiC);磨削;表面质量;正交试验;磨削机理

中图分类号: TH 161 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2019)09-1310-06

Study on Grinding Surface Quality of Unidirection Carbon Fiber-Reinforced Ceramic Matrix Composites

QU Shuo-shuo, GONG Ya-dong, YANG Yu-ying, CAI Ming
(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: GONG Ya-dong, E-mail: gongyd@mail.neu.edu.cn)

Abstract: To investigate the grinding surface quality of unidirection carbon fiber-reinforced ceramic matrix composites(C_f/SiC), the orthogonal experiments were carried out by using resin-bonded diamond grinding wheel. In order to achieve the influence order of grinding wheel linear speed, grinding depth and feed speed on grinding surface quality, range analysis was adopted in this paper. The results indicate that: the grinding depth has maximum impact on the machining surface roughness; as the raises of grinding depth, the grinding surface roughness increases; as the raises of grinding wheel linear speed, the grinding surface roughness decreases; as the raises of feed speed, the grinding surface roughness increases. According to the result of orthogonal experiments, the best combination of grinding parameters was achieved. Based on the experiment results and surface topography, the grinding mechanisms of unidirection C_f/SiC were further analyzed, which supplies some useful technical reference for revaling the grinding mechanisms of unidirection C_f/SiC .

Key words: unidirection carbon fiber-reinforced ceramic matrix composites(C_f/SiC); grinding; surface quality; orthogonal experiment; grinding mechanism

陶瓷材料拥有良好的耐高温、耐腐蚀及低密度的性能,广泛应用于航空航天及交通等工业中.但由于高脆性及裂纹扩展性,在已加工表面极易出现的表面及亚表面损伤,降低了陶瓷材料的应用可靠性^[1-2].碳纤维增强陶瓷基复合材料(C_f/SiC)在保留陶瓷材料的各项优良性能的前提下,显著地提高了可加工性.相比于电火花、激光及水射流加工,磨削能够获得最好的表面质量. C_f/SiC 首先将直径约为 $5\sim 10\mu m$ 的碳纤维增强相顺序排列形成预制体,并通过气相沉积和气相渗透的方法制备而成^[3].因此,相比于陶瓷材料, C_f/SiC 材料具有显著的各向异性和非均质性,材料的磨削去除

机理发生显著的变化,需要进行深入的研究.

国内外的学者对 C_f/SiC 材料的磨削加工工艺进行了研究,如:池宪等^[4]探讨了磨削参数对内锥体 C_f/SiC 表面粗糙度的影响规律,优化出内锥体 C_f/SiC 加工的工艺参数组合;丁凯等^[5]对比分析了 SiC 和 C_f/SiC 平面磨削试验,考察了两种材料的磨削力与表面质量的变化趋势;Tashiro 等^[6]在无磨削液的条件下,采用不同类型的砂轮对 $C/C-SiC$ 材料进行磨削试验,结果表明金刚石砂轮的磨削效果要明显优于 K10 和 WA 砂轮;Tawakoli 等^[7]采用分段式和传统金刚石砂轮磨削陶瓷基复合材料(CMCs),对比分析了磨削力与表面粗糙度差异性的原因;Liu 等^[8]对 2D 编织 C_f/SiC 材料的磨削力及表面质量进行研究,得到磨削参数对不同结构的表面形貌、表面粗糙度及磨削力的影响规律;Cao 等^[9]探究了 2.5D 编织 SiO_2/SiO_2 材料中增强相纤维方向对磨削质量和磨削力的影响规律;Du 等^[10]采用电镀金刚石磨棒对 2D C_f/SiC 材料进行磨削试验,对磨削机理进行了初步探索.

本文针对 C_f/SiC 材料在高新领域越来越广泛的应用前景,对单向 C_f/SiC 材料的磨削表面质量、磨削机理进行了深入研究.首先利用正交试验的方法对单向 C_f/SiC 材料进行磨削加工,分析磨削参数对其表面质量的影响规律,优选出合理的磨削工艺方案,然后深入分析了砂轮线速度、磨削深度、进给速度对磨削表面质量的影响规律.

1 单向 C_f/SiC 材料磨削试验

1.1 试验条件

磨削加工试验机床为 M7120A 卧轴矩台平面磨床,加工示意图如图 1 所示.试验的检测设备采用 VHX-1000E 超景深显微镜、Micromeasure 三维轮廓仪,以及 Ultra Plus 场发射扫描电镜;试验的砂轮采用直径为 200 mm 的金刚石砂轮,其粒度为 120#,砂轮宽度为 5 mm;试验的材料为单向 C_f/SiC 材料,密度为 $2.3\text{ cm}^3/\text{g}$,纤维体积分数为 36%~39%,其微观组织形貌如图 2a、2b 所示.

1.2 试验方案

本文选取对磨削过程有重要影响的砂轮线速度 v_s 、磨削深度 a_p 和进给速度 v_w 三个因素五个水平在垂直纤维(束)平面上进行正交磨削试验 $L_{25}(5^3)$,分别探究其对单向 C_f/SiC 材料磨削表面质量的影响规律.正交试验设计方案如表 1 所

示.本文采用对特定大小的扫描区域进行逐次扫描并最终统计获得的面粗糙度 S_a 对磨削质量进行评价^[3,9],相比于评价参数线粗糙度 R_a 扫描范围由线转为面,更有参考意义.

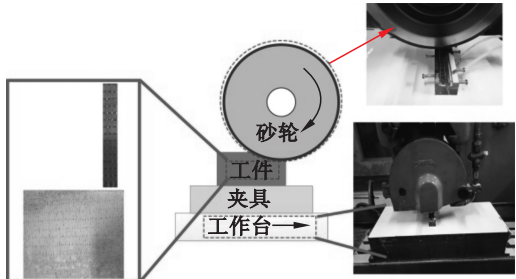


图1 磨削试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the grinding experiment setup

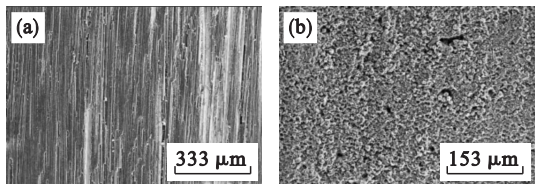


图2 C_f/SiC 的扫描电镜图片

Fig. 2 SEM images of the C_f/SiC composites

(a)—平行纤维;(b)—垂直纤维.

表1 单向 C_f/SiC 材料平面磨削正交试验 $L_{25}(5^3)$ 方案设计

Table 1 Orthogonal plane $L_{25}(5^3)$ of unidirectional C_f/SiC grinding experiment

试验 编号	v_s $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	a_p μm	v_w $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	表面粗糙度 $S_a/\mu\text{m}$
1	20	10	1	0.46
2	20	20	2	0.60
3	20	30	3	0.79
4	20	40	4	0.95
5	20	50	5	1.18
6	23	10	2	0.48
7	23	20	3	0.60
8	23	30	4	0.82
9	23	40	5	0.89
10	23	50	1	0.99
11	26	10	3	0.50
12	26	20	4	0.62
13	26	30	5	0.79
14	26	40	1	0.80
15	26	50	2	0.92
16	29	10	4	0.49
17	29	20	5	0.53
18	29	30	1	0.72
19	29	40	2	0.79
20	29	50	3	0.93
21	32	10	5	0.44
22	32	20	1	0.47
23	32	30	2	0.70
24	32	40	3	0.81
25	32	50	4	0.91

2 试验结果与讨论

2.1 极差及方差结果分析

单向 C_f/SiC 材料表面粗糙度值极差及方差分析结果如表 2 所示。 K_{ij} 表示 i 因素在同一参数 j 水平下所对应的 S_a 之和; \bar{X}_{ij} 表示 i 因素在同一参数 j 水平下所对应的平均值; R 表示磨削参数在同一水平下的极差; V 表示磨削参数在同一水平下的方差。根据表 2 正交试验极差、方差结果绘制单向 C_f/SiC 材料在三磨削参数下的极差方差图,如图 3 所示。

表 2 单向 C_f/SiC 材料表面粗糙度正交试验结果
Table 2 Orthogonal experiment results of surface roughness for unidirectional C_f/SiC μm

试验结果	磨削表面粗糙度结果		
	v_s	a_p	v_w
K_{1j}	3.98	2.37	3.44
\bar{X}_{1j}	(0.796)	(0.474)	(0.688)
K_{2j}	3.78	2.82	3.49
\bar{X}_{2j}	(0.756)	(0.564)	(0.698)
K_{3j}	3.63	3.82	3.63
\bar{X}_{3j}	(0.726)	(0.764)	(0.726)
K_{4j}	3.46	4.24	3.79
\bar{X}_{4j}	(0.692)	(0.848)	(0.758)
K_{5j}	3.33	4.93	3.83
\bar{X}_{5j}	(0.666)	(0.986)	(0.766)
R	0.65	2.56	0.39
V	0.013	0.217	0.006

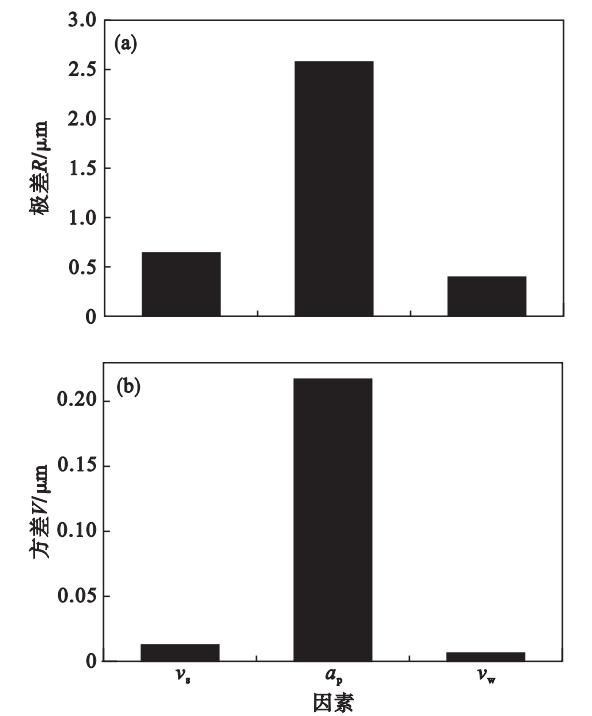


图 3 磨削参数正交试验的极差图和方差图
Fig. 3 Range and variance diagram of grinding parameters in the orthogonal experiment
(a)—极差图; (b)—方差图。

从图中可知,磨削深度的极差、方差最大,进给速度最小。因此,单向 C_f/SiC 材料在磨削加工过程中,磨削参数对表面粗糙度的影响由大至小的顺序为:磨削深度 > 砂轮线速度 > 进给速度。在三因素五水平的正交试验中,合理地选择磨削深度能够显著地控制单向 C_f/SiC 材料磨削表面粗糙度。

2.2 磨削参数对表面质量的影响

为深入考察磨削参数对单向 C_f/SiC 材料表面质量的影响规律,根据表 2 正交试验的结果,绘制出磨削参数对表面粗糙度的影响曲线,如图 4 所示。

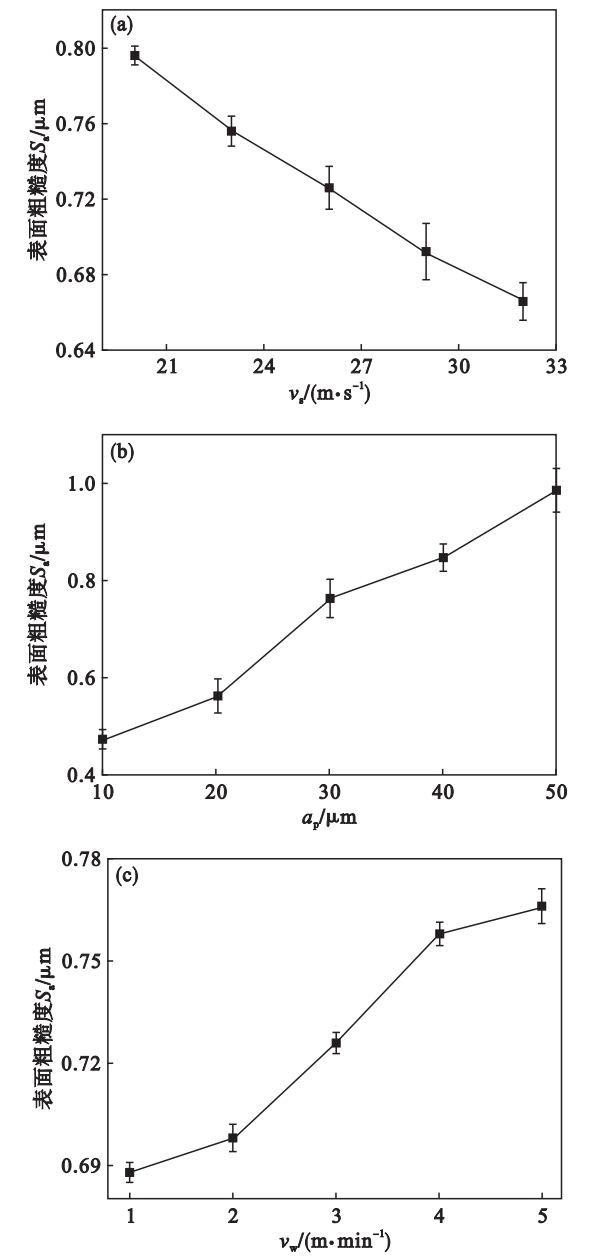


图 4 磨削参数对表面粗糙度 S_a 的影响
Fig. 4 Influence of grinding parameters on surface roughness
(a)— v_s ; (b)— a_p ; (c)— v_w 。

从图 4 中可以看出,随着砂轮线速度的逐渐增加,表面粗糙度 S_a 显著降低. 线速度的增加会提高单位时间内参与磨削的有效磨刃数. 因此,单颗金刚石磨粒的未变形层厚度和磨削凹槽深度显著降低,表面质量获得提高,表面粗糙度 S_a 降低;当磨削深度不断增加时,表面粗糙度 S_a 增加. 逐渐增大的磨削深度会显著增加单颗磨粒切削厚度和磨削力. 作为一种脆性材料,较大的磨削力产生的正压力会加剧材料去除过程中裂纹的产生和延伸. 磨削深度的增加会显著降低磨削表面质量,增大表面粗糙度. 逐渐增大进给速度时,表面粗糙度 S_a 增加. 在实际磨削加工过程中,砂轮线速度远远大于进给速度,当砂轮线速度和磨削深度一致时,参与磨削的磨粒数变化不大. 但逐渐增大的进给速度会提高单颗磨粒切削厚度和磨削力,从而导致加工质量的降低,表面粗糙度的增加. 从图 4 也可得出,磨削深度对表面粗糙度影响最大,进给速度对表面粗糙度影响最小.

2.3 C_f/SiC 磨削表面形貌分析

C_f/SiC 材料不同磨削深度下垂直纤维(束)加工表面如图 5 所示,其中左侧为磨削表面形貌,右侧为对应的粗糙度云图. 从图中可以看出,较小的磨削深度可以获得较好的磨削表面质量.

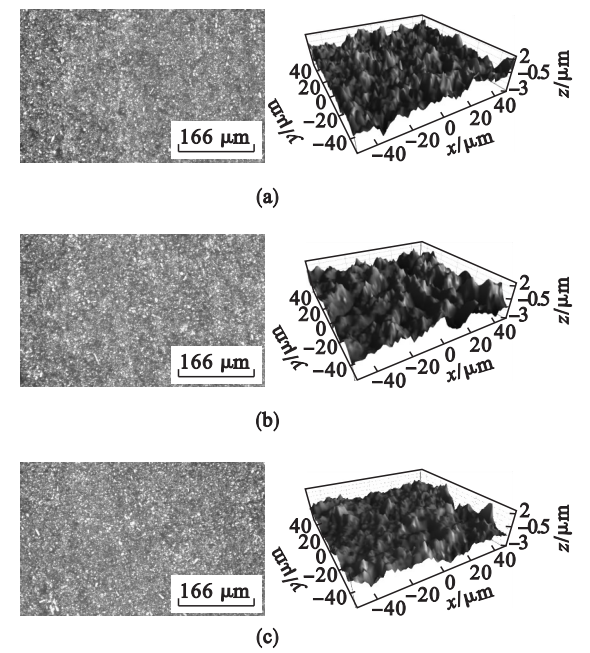


图 5 C_f/SiC 材料在不同磨削深度下的加工表面
Fig. 5 Surface of C_f/SiC with different grinding depth
(a)— $a_p = 10\text{ }\mu\text{m}$, $v_s = 26\text{ m/s}$, $v_w = 3\text{ m/min}$;
(b)— $a_p = 30\text{ }\mu\text{m}$, $v_s = 26\text{ m/s}$, $v_w = 3\text{ m/min}$;
(c)— $a_p = 50\text{ }\mu\text{m}$, $v_s = 26\text{ m/s}$, $v_w = 3\text{ m/min}$.

为进一步考察磨削表面形貌,分析单向 C_f/SiC 材料的磨削机理,磨削深度为 10 μm 和

50 μm 垂直纤维(束)的磨削表面扫描电镜图片如图 6 所示. 纤维露头、纤维拔除和基体裂纹是 C_f/SiC 材料磨削加工的基本缺陷,同时在纤维与基体结合界面处易出现界面脱粘. 磨削深度为 10 μm 的表面裂纹较短,纤维露头、拔除现象比较均匀,能够获得良好的表面质量;但随着磨削深度的逐渐增加,表面缺陷显著增加,磨削深度为 50 μm 的表面裂纹长且宽,纤维露头的长度及纤维拔除的深度较大,表面质量明显恶化. 因此,在单向 C_f/SiC 材料磨削加工中,为获得较好的表面质量,须严格控制磨削深度的大小.

根据单向 C_f/SiC 材料关于表面质量的正交试验 $L_{25}(5^3)$ 结果,优化出单向 C_f/SiC 材料在正交试验参数表中的最佳参数组合:砂轮线速度为 32 m/s,磨削深度为 10 μm ,进给速度为 5 m/min. 经试验验证,此时的磨削表面质量最好.

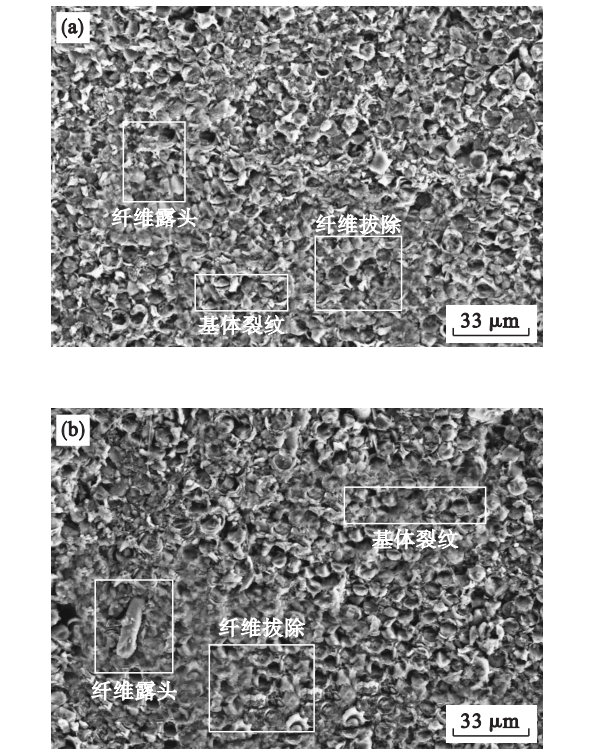


图 6 单向 C_f/SiC 材料在 $v_s = 26\text{ m/s}$, $v_w = 3\text{ m/min}$ 下的扫描电镜形貌
Fig. 6 SEM images of unidirection C_f/SiC with different grinding depth at $v_s = 26\text{ m/s}$, $v_w = 3\text{ m/min}$
(a)—10 μm ; (b)—50 μm .

3 单向 C_f/SiC 材料磨屑形态分析

为进一步分析不同磨削深度时单向 C_f/SiC 材料的磨屑形态,将磨削深度为 10,30,50 μm 的磨屑收集并观测,如图 7 所示. 纤维增强相和 SiC

基体的磨屑形式完全不同:在磨粒的剪切和挤压作用下,纤维受力模式类似于刚性地基悬臂梁类型. 当其拉伸应力大于纤维拉伸强度时,纤维出现断裂现象,但不同纤维断裂面之间很难在同一平面,因此在磨削表面反映出纤维露头及纤维拔除现象;同时,纤维也可能在磨粒的挤压作用下,碎裂为短而小的磨屑,但仍会保留部分纤维结构;包裹在纤维外侧的 SiC 属于典型的脆性材料,根据压痕断裂力学,裂纹的萌生及延伸是其破坏的主要原因. 裂纹在纤维的作用下发生偏转、暂停或桥连等现象,由崩碎形成的磨屑极为细小,形状无规则.

当磨削深度为 10 μm 时,由 SiC 和纤维形成的磨屑长度及体积最小,多数纤维破碎为短小且不规则的棒状磨屑;当磨削深度为 50 μm 时,大量的长棒状磨屑出现,很难看到短小棒状磨屑,同时由 SiC 形成的不规则块状磨屑体积也显著增大. 均匀分布的磨屑侧面反映了较高的磨削加工表面质量,见图 7a;长且大磨屑出现比例越高,反映 C_f/SiC 材料断裂表面极不均匀,磨削加工表面质量较差,见图 7b. 因此,随着磨削深度的逐渐增加,磨削加工表面质量逐渐降低.

4 单向 C_f/SiC 材料磨削机理

由于单向 C_f/SiC 材料的复合性,其材料去除方式与传统陶瓷脆性材料具有较大差异,目前单向 C_f/SiC 材料磨削机理的研究仍存在较大空白. 本文对单向 C_f/SiC 材料磨削机理进行详细讨论.

单向 C_f/SiC 材料磨削示意图如图 8 所示,纤维露头、纤维拔除、界面脱粘以及基体裂纹是 C_f/SiC 材料去除过程中基本的破坏方式. 在磨削过程中,磨粒首先接触典型脆性材料 SiC 基体;随着磨粒的前进,基体材料在未发生变形前就发生裂纹破坏,遵循压痕断裂力学准则;磨粒进一步前进,开始接触碳纤维增强相,此时可认为是一种特殊的刚性地基下的悬臂梁结构,脆性基体正常的裂纹延伸方向此时发生偏转、暂停或桥连等现象. 纤维在磨粒的剪切和挤压作用下,纤维首先在结合面处发生脱离,即产生界面脱粘现象;磨粒进一步前进,纤维发生断裂,但由于纤维与基体的性能差异很大,纤维断裂区域很难保证与基体加工面持平,因此在磨削平面存在着大量的纤维拔除、纤维露头等现象.

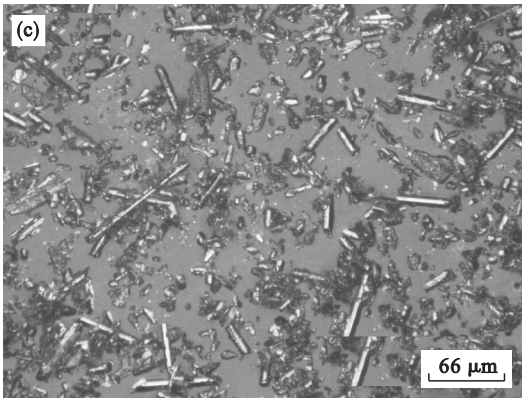
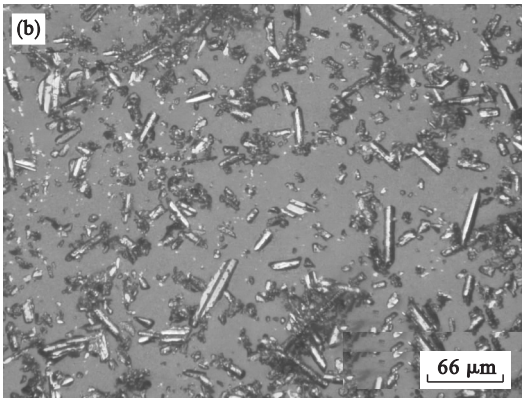
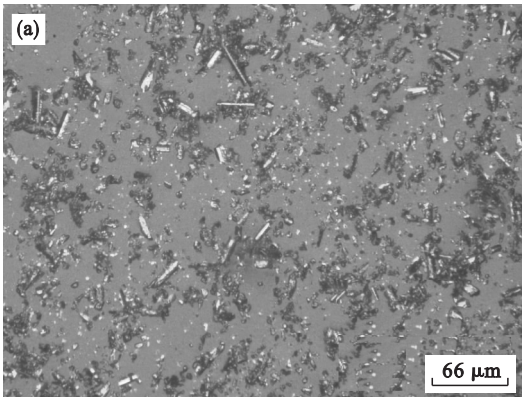


图 7 单向 C_f/SiC 材料在 $v_s = 26 \text{ m/s}$, $v_w = 3 \text{ m/min}$ 下磨屑形态
Fig. 7 Debris of C_f/SiC with different grinding depth at $v_s = 26 \text{ m/s}$, $v_w = 3 \text{ m/min}$
(a)— $a_p = 10 \text{ μm}$; (b)— $a_p = 30 \text{ μm}$; (c)— $a_p = 50 \text{ μm}$.

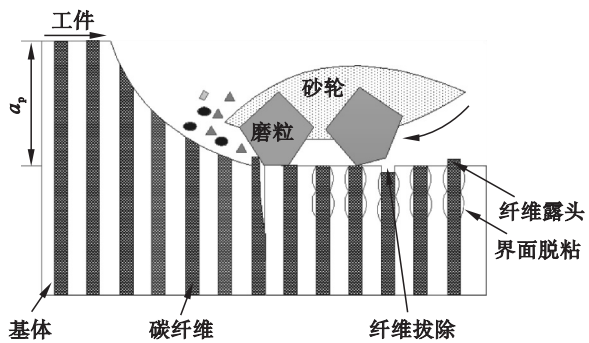


图 8 单向 C_f/SiC 材料磨削结构示意图
Fig. 8 Diagram of grinding unidirectional C_f/SiC composites

5 结 论

- 1) 磨削深度对磨削表面粗糙度影响最大,随着磨削深度的增大,表面粗糙度不断增大;随着砂轮线速度的增大,表面粗糙度不断减小;随着进给速度的增大,表面粗糙度不断增大,但影响程度最小.
- 2) 在本文的正交试验参数范围内,砂轮线速度为 32 m/s,磨削深度为 10 μm,进给速度为 1 m/min的磨削参数组合能够获得最好的表面质量.
- 3) 对单向 C_f/SiC 材料的磨削表面进行观察,纤维露头、纤维拔除、界面脱粘以及基体裂纹是 C_f/SiC 材料去除过程中基本的破坏方式.
- 4) 在 C_f/SiC 材料加工过程中,基体裂纹在增强相纤维的作用下发生偏转、暂停或桥连等现象,提高了 C_f/SiC 材料的可加工性.

参考文献:

[1] Liu W,Deng Z H,Shang Y Y, et al. Effects of grinding parameters on surface quality in silicon nitride grinding[J]. *Ceramics International*,2011,43(1):1571 – 1577.

[2] Sanjay A,Rao P V. Grinding characteristics,material removal and damage formation mechanisms in high removal rate grinding of silicon carbide [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, 50 (12): 1077 – 1087.

[3] Qu S S,Gong Y D,Yang Y Y,et al. Surface topography and

roughness of silicon carbide ceramic matrix composites[J]. *Ceramics International*,2018,44(12):14742 – 14753.

[4] 池宪,吴凡,锁小红. C – SiC 陶瓷基复合材料磨削参数优化研究[J]. *航空精密制造技术*,2012,48(1):41 – 43.
(Chi Xian, Wu Fan, Suo Xiao-hong. Research of grinding parameters about C-SiC ceramic matrix composite [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*,2012,48(1): 41 – 43.)

[5] 丁凯,傅玉灿,苏宏华,等. C/SiC 复合材料组织对磨削力与加工表面质量的影响[J]. *中国机械工程*,2013,24(14):1886 – 1890.
(Ding Kai,Fu Yu-can,Su Hong-hua,et al. Effect of C/SiC composites material structure on grinding forces and machined surface quality [J]. *China Mechanical Engineering*,2013,24(14):1886 – 1890.)

[6] Tashiro T,Fujiwara J S,Takenaka Y. Grinding of C/C-SiC composite in dry method [C]//The 11th International Conference on Precision Engineering. London, 2007: 351 – 356.

[7] 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.

[8] Liu Q, Huang G Q, Fang C F, et al. Experimental investigations on grinding characteristics and removal mechanisms of 2D-C_f/C-SiC composites based on reinforced fiber orientations[J]. *Ceramics International*,2018,43(17): 15266 – 15274.

[9] Cao X Y, Lin B, Zhang X F. Investigations on grinding process of woven ceramic matrix composite based on reinforced fiber orientations[J]. *Composite Part B*,2015,71: 184 – 192.

[10] Du J G,Ming W Y,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.