

引文格式: 许金凯, 黄筠瀚, 王佳琦, 等. 激光超声复合刻划C/SiC表面损伤特性研究[J]. 航空制造技术, 2025, 68(19): 14-23.

XU Jinkai, HUANG Junhan, WANG Jiaqi, et al. Research on surface damage characteristics of C/SiC composites under laser-ultrasonic hybrid scratching[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(19): 14-23.

# 激光超声复合刻划C/SiC表面损伤特性研究\*

许金凯<sup>1,2</sup>, 黄筠瀚<sup>1,2</sup>, 王佳琦<sup>1,2</sup>, 于占江<sup>1,2</sup>, 李 英<sup>1</sup>

(1. 长春理工大学跨尺度微纳制造教育部重点实验室, 长春 130022;

2. 长春理工大学机电工程学院, 长春 130022)

**[摘要]** 碳纤维增强碳化硅基体复合材料(C/SiC)作为典型的陶瓷基复合材料(Ceramic matrix composite, CMC), 具有高比强度、高比刚度、耐高温等优异性能, 广泛应用于航空、航天、汽车等领域。为了探究不同能场作用下C/SiC复合材料表面的损伤形式, 本文分别对3个典型纤维方向进行了常规刻划(Conventional scratching, CS)、激光辅助刻划(Laser-assisted scratching, LAS)以及激光超声复合刻划(Laser-ultrasonic hybrid scratching, L-UHS), 对比3种刻划方式下的刻划力、表面形貌等差异, 分析激光超声复合能场对材料表面损伤影响。结果表明, 相比于CS与LAS, L-UHS可有效降低刻划力, 提高材料可加工性。L-UHS在不同方向上呈现出不同的断裂方式转变: 在平行方向, 纤维弯曲断裂失效减少, 材料主要失效形式为层间断裂; 在倾斜方向和垂直方向, 纤维失效形式由弯曲断裂向剪切断裂转变。本文为C/SiC复合材料的激光超声复合加工提供理论指导。

**关键词:** C/SiC复合材料; 材料去除; 表面损伤; 激光超声复合刻划(Laser-ultrasonic hybrid scratching, L-UHS)

中图分类号: TB332

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.19.014



许金凯

教授, 博士, 博士研究生导师, 研究方向为激光复合微纳制造技术。

C/SiC复合材料是典型的陶瓷基复合材料(Ceramic matrix composite, CMC), 由高强度、高硬度的陶瓷和高韧性的碳纤维组成, 具有低密度、高比强度、高比刚度、优异耐磨性及良好的热稳定性<sup>[1-3]</sup>, 已成为航空发动机、火箭推进器、超声速飞行器等系统中热元器件的关键材料<sup>[4-6]</sup>。近年来, 研究者关注C/SiC等陶瓷基复合材料高效、高质量的加工研究, 但是C/SiC作为典型的难加工材料, 具有高强度和各向异性, 在加工过程中常会出现纤维脱粘、基体开裂、纤维拔出等表面与亚表面缺陷, 严重影响零件的使用性能和使役寿命<sup>[7-9]</sup>。因此, 探究C/SiC复合材料的材料去除机制对C/SiC复合材料的高效、高质量加工有重要意义。刻划测试被

广泛用于研究硬脆材料在微纳米尺度上的去除机制和损伤演化过程。Zhang等<sup>[10]</sup>沿C/SiC复合材料不同纤维取向进行不同刻划深度的纳米刻划试验, 阐明了纳米刻划试验微脆性断裂过程中裂纹成核和扩展原理, 模拟磨削过程中材料的去除过程, 从理论上阐明不同刻划深度下的损伤破坏机制。Liu等<sup>[11]</sup>在4种典型偏转角度(0°、15°、30°和45°)下对熔融石英进行线性增加轴向载荷的刻划试验, 探讨维氏压头的偏转角度对熔融二氧化硅在刮擦过程中的损伤演变及去除机制的影响。Li等<sup>[12]</sup>在C/SiC复合材料两个典型的纤维方向上开展了单个金刚石磨粒的刻划试验, 结果表明, 加工方向对刻划力有较大影响, 纵向刻划方向的切向

\* 基金项目: 国家重点研发计划(2024YFB4609202); 吉林省重大科技专项(20230301003GX)。

力和法向力均大于横向刻划方向,同时,在相同刻划深度下,切向力一般大于法向力。

已有研究表明,激光超声复合加工 C/SiC 复合材料能有效提高加工效率、表面质量,降低刀具磨损,并且能减少材料裂纹、毛刺等缺陷。李继成等<sup>[13]</sup>进行了激光超声复合微切削(Laser-ultrasonic hybrid micro-machining, L-UHM)试验研究,结果表明, L-UHM 可显著降低纤维断裂能、抑制纤维弯曲、缩小 SiC 基体破碎面积,大幅提升加工表面质量。吴东江等<sup>[14]</sup>进行了激光烧蚀 C/SiC 复合材料以及超声辅助振动磨削激光预处理 C/SiC 复合材料表面试验,结果表明, C/SiC 复合材料在激光作用下呈现出两种不同的状态,改性状态下,材料主要以氧化等热化学变化为主,材料内部出现热影响区和裂纹区,烧蚀状态下,材料以热物理和热机械变化为主,样件内出现凹坑、重铸层、热影响区及裂纹区;激光复合超声磨削的两个方向磨削力相较传统磨削分别减小了 51.4% 和 56.5%,同时表面粗糙度  $S_a$  降低至 4.228  $\mu\text{m}$ ,表明激光复合超声磨削可有效降低磨削力和加工表面粗糙度,从而提高加工质量,该方法在实现硬脆材料高质量低成本加工方面具有较大的潜能。Wang 等<sup>[15]</sup>进行了超声振动辅助铣削激光烧蚀预处理(Ultrasonic vibration-assisted milling with laser ablation pretreatment, UVAMLAP) SiC/SiC 试验,结果表明, UVAMLAP 能提高试样的表面质量,使试样的抗拉强度和残余抗拉强度分别提高 9.4% 和 13.5%,该工艺可避免失效初期损伤加剧,减弱基体断裂和界面脱粘速度,降低加工损伤引起的疲劳性能退化;该研究以拉伸试样加工为例,对加工策略进行了基于铣削质量、加工效率、刀具成本等多维指标的综合评价, UVAMLAP 工艺不仅能提高加工表面质量,还能

使加工时间缩短 31.3%,刀具成本降低 75%。

然而, C/SiC 复合材料在激光超声复合加工过程中的材料去除机制和损伤失效行为仍有待深入研究。本文重点研究材料在激光超声复合能场作用下沿不同纤维方向进行单点刻划试验,以此探究激光超声复合作用下材料损伤形式。选择平行、倾斜和垂直纤维方向进行常规刻划(Conventional scratching, CS)、激光辅助刻划(Laser assisted scratching, LAS)和激光超声复合刻划(Laser-ultrasonic hybrid scratching, L-UHS)试验。通过对比不同能场作用下刻划力和划痕表面形貌差异,探究刻划力、纤维方向和表面形貌之间的关系以及激光超声复合作用下材料去除机制,为实现 C/SiC 复合材料高效低损伤加工提供重要理论支撑。

## 1 材料及试验步骤

为了探究 C/SiC 复合材料在激光超声复合加工下的材料表面损伤形式,进行不同纤维方向下 CS、LAS 及 L-UHS 试验,对刻划力以及表面形貌进行表征,揭示材料去除机制。

### 1.1 材料及样件制备

试验使用 2D 编织 C/SiC 复合材料,该复合材料主要成分为 SiC 基体和 C 纤维,由相互垂直的纤维编织铺层组成,纤维表面附着 SiC 基体<sup>[16-17]</sup>,材料的相关参数如表 1 所示。从 C/SiC 板料中截取 10 mm × 15 mm × 2 mm

尺寸的样件,为了方便样件的装夹及刻划试验的开展,将工件镶嵌于树脂中,对工件表面进行磨抛,保证样件上、下平面相互平行的同时,将待加工表面磨抛光滑,得到表面缺陷较少且不同纤维方向的表面,然后再对样件进行超声清洗,去除表面杂质,最后将样件烘干。样件制备流程及样件实物图如图 1 所示。

### 1.2 试验及方法

C/SiC 复合材料具有各向异性,不同纤维方向下材料失效方式存在差异,因此,在制备样件时选取了平行、倾斜及垂直 3 个典型方向(进给方向与纤维轴向夹角为 0°、45°、90°),如图 2 所示。

图 3 为试验装置示意图,由进给系统、数据采集系统和激光超声装置组成。压头选用立方角压头,安装于超声换能器上,实现金刚石压头在进给方向上的往复运动,激光聚焦于压头在进给方向的前方,且压头与激光的相对位置保持不变。使用金刚石压头进行 CS、LAS、L-UHS 试验,并用测力计(奇石乐)、信号放大器和 A/D 转换器,实时记录金刚石压头所受的法向力( $F_n$ )和切向力( $F_t$ )。每组试验均重复 3 次,以避免试验的偶然性。试验结束后,对样件进行超声波清洗,去除表面残留碎屑并进行干燥处理。最后用扫描电子显微镜观测划痕表面损伤形貌。本试验采用单颗粒直线刻划方式,对 C/SiC 复合材料去除机制进行探究,刻划试验

表 1 C/SiC 复合材料参数  
Table 1 Parameters of C/SiC composites

参数	值	参数	值
纤维密度/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1760	纤维抗拉强度/GPa	3.5
纤维直径/ $\mu\text{m}$	7	纤维纵向杨氏模量/GPa	230
纤维横向杨氏模量/GPa	15	纤维纵向剪切模量/GPa	27
纤维横向剪切模量/GPa	7	SiC 基体密度/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1200
SiC 基体杨氏模量/GPa	3.5	SiC 基体泊松比	0.17
SiC 基体抗拉强度/MPa	70	SiC 基体抗压强度/MPa	150

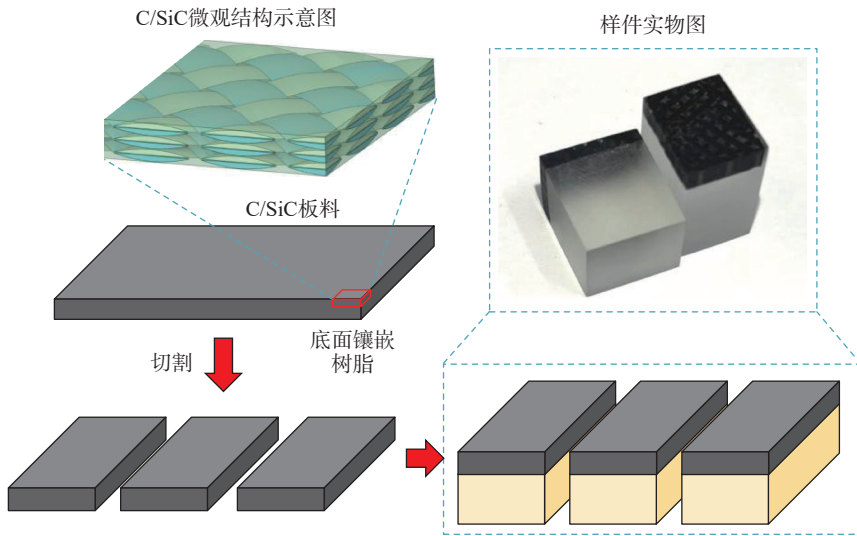


图1 样品制备流程及样品实物图  
Fig.1 Sample preparation process and physical images of samples

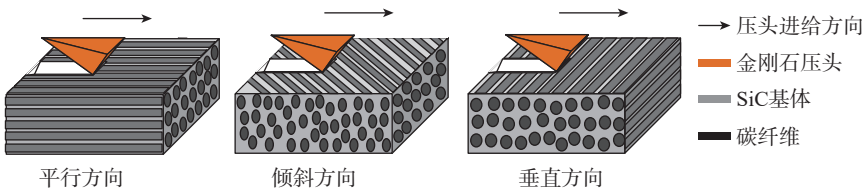


图2 刻划方向示意图  
Fig.2 Schematic diagram of scratching orientations

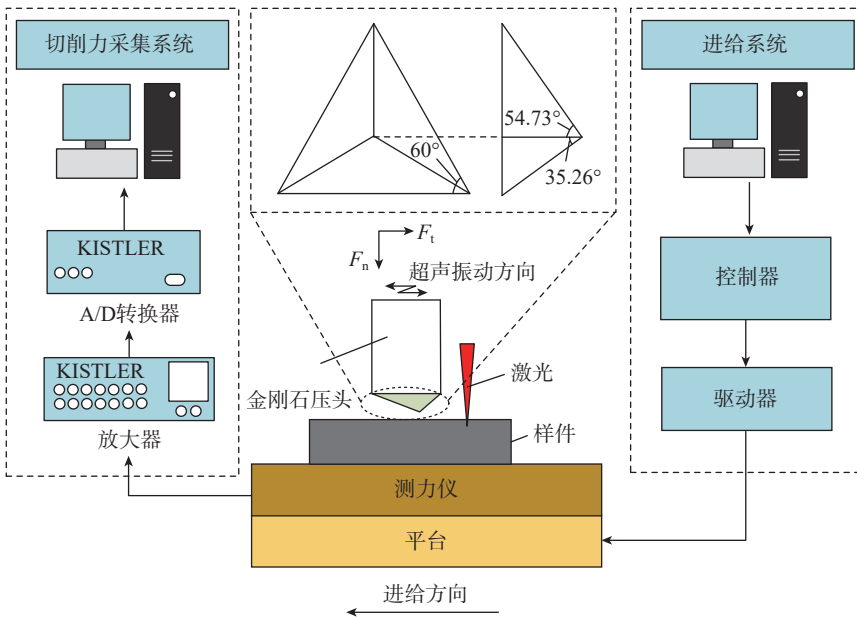


图3 试验装置整体结构示意图及压头角度参数

Fig.3 Schematic diagram of overall structure of experimental apparatus and indenter angle parameters

参数如表 2 所示,刻划深度均为 20  $\mu\text{m}$ 。

## 2 结果与讨论

通过评价 C/SiC 复合材料在不同加工方式下刻划力大小和划痕沟槽的表面形貌特征,研究分别在 CS、LAS 和 L-UHS 下的材料表面损伤。

### 2.1 刻划力

C/SiC 复合材料是典型的多相材料,由高脆性的 SiC 基体和高韧性 C 纤维组成,二者存在较大力学性能差异<sup>[18]</sup>。在刻划过程中,金刚石压头分别与纤维和基体发生作用,因此,相对于单相材料, C/SiC 复合材料的材料去除机制探究难度较大<sup>[19-20]</sup>。

图 4 分别展示了平行方向、倾斜方向和垂直方向在不同加工方式下的刻划力试验结果。由于 C/SiC 复合材料具有各向异性,因此将刻划力分解为切向力和法向力。试验表明,在不同刻划方向下,刻划力结果有较大差异。

不同刻划方式下的平均刻划力如图 5 所示。材料所受法向力在 CS、LAS 和 L-UHS 下,平行方向下分别为 9.297 N、7.062 N 和 6.279 N; 倾斜方向下分别为 10.111 N、7.467 N 和 6.897 N; 垂直方向下分别为 11.687 N、

表 2 刻划试验参数

Table 2 Scratching test parameters

试验组号	刻划方向	激光功率密度/ ( $\text{W}/\text{mm}^2$ )	超声振幅/ $\mu\text{m}$
1	平行方向	0	0
2	平行方向	80	0
3	平行方向	80	3
4	倾斜方向	0	0
5	倾斜方向	80	0
6	倾斜方向	80	3
7	垂直方向	0	0
8	垂直方向	80	0
9	垂直方向	80	3

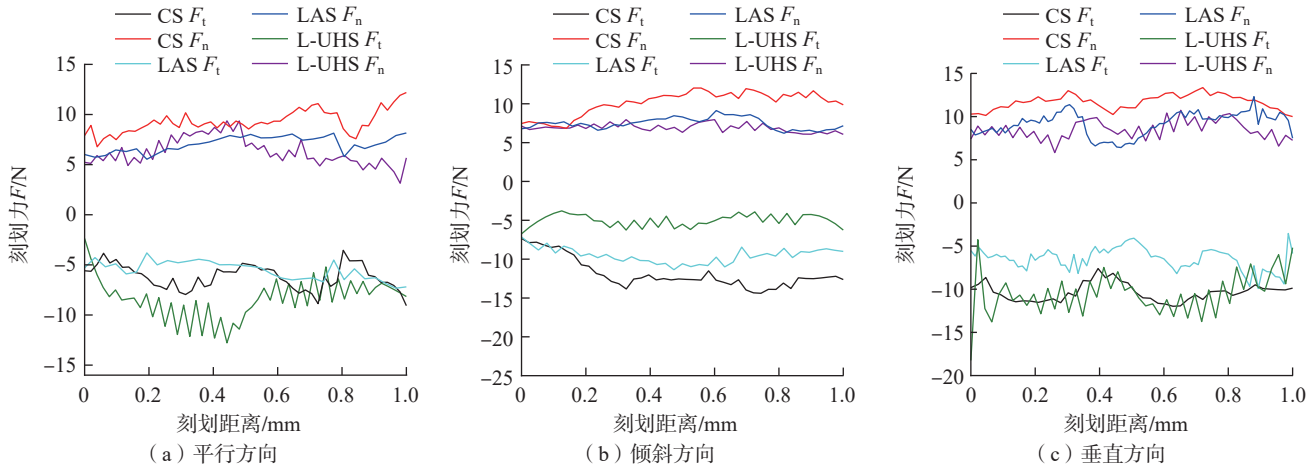


图4 不同刻划方式下刻划力曲线

Fig.4 Scratching force curves under different scratching methods

9.168 N, 8.47 N。可见,在同一方向下,受激光和超声振动作用,法向刻划力明显减小,且法向力大小为 L-UHS < LAS < CS。

材料所受切向力在 CS、LAS 和 L-UHS 下,平行方向下分别为 -6.203 N、-5.533 N 和 -8.354 N; 倾斜方向下分别为 -11.926 N、-9.541 N 和 -5.013 N; 垂直方向下分别为 -10.358 N、-6.478 N 和 -10.530 N。可见在 L-UHS 方式下,切向力有增大趋势,结合刻

划力曲线图(图4),可观察到 L-UHS 切向力出现周期性波动,这是由于在超声高频振动作用下,压头与材料发生瞬时冲击作用,使其切向力出现波动。

对比 CS 和 LAS 在法向和切向力的平均刻划力可以看出,激光作用可有效降低刻划力,这是因为激光加热软化材料表面,提高了材料可加工性; 对比 L-UHS 和 LAS 在法向和切向力的平均刻划力可以看出,超声振

动作用下,法向力显著降低,但是切向力因超声振动作用出现了增加趋势,并出现了周期性波动。

## 2.2 平行方向刻划表面损伤分析

采用 CS 工艺,沿平行方向的划痕形貌如图 6 所示,可以看出,划痕两侧边缘处轮廓模糊,且因纤维掀起而不平齐,存在材料缺失; 划痕底部纤维杂乱无章,有大量因材料缺失而产生的孔隙。从放大图可以看出,划痕底部及两侧存在大量因纤维断裂和基体破碎脱粘引起的孔隙。此外,划痕内部存在大量纤维断裂、纤维脱粘、基体裂纹和基体破碎等缺陷,说明在 CS 方式的平行方向下,材料去除形式主要以纤维和基体间界面层失效为主,同时伴随大量纤维和基体破碎现象,导致划痕表面质量差,划痕两侧边缘不平齐。

采用 LAS 工艺,沿平行方向的划痕形貌如图 7 所示,可以看出,划痕两侧较为整齐,划痕内孔隙减少,材料表面更为平整。从放大图可以看出,划痕内仍存在少量因纤维断裂和基体破碎而形成的孔隙。相较于 CS 工艺,纤维断裂和脱粘现象有所减少,但是仍存在大量纤维断裂和基体破碎。这是因为材料在激光作用下,材料表面温度升高,降低了材料强度,从而提高了材料可加工性<sup>[21]</sup>。

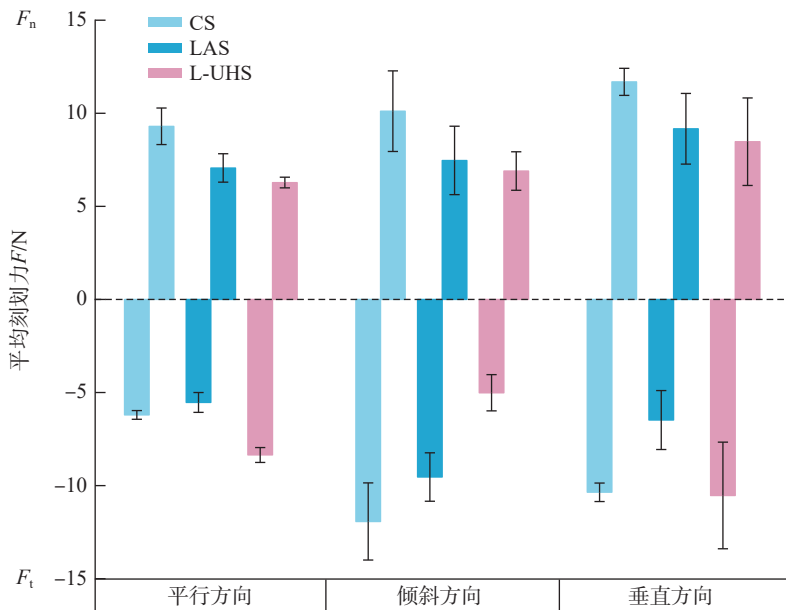
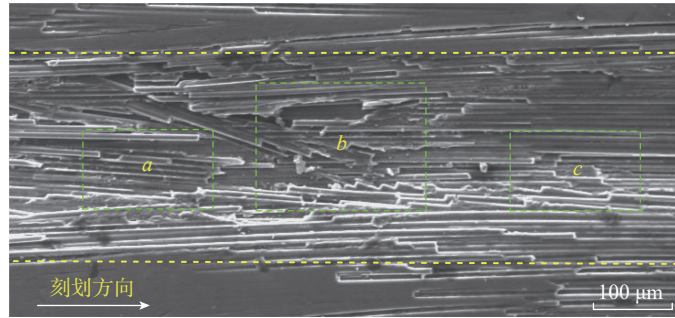
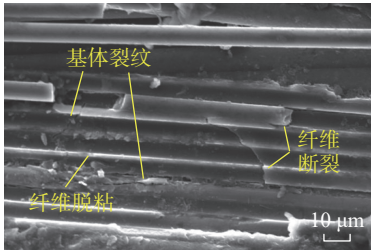


图5 不同刻划方式平均刻划力

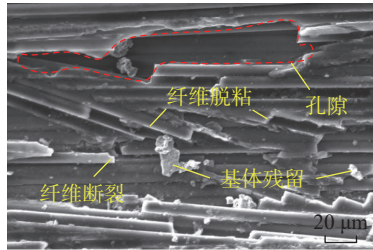
Fig.5 Average scratching force under different scratching methods



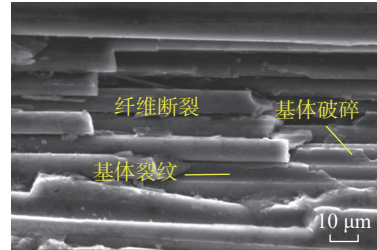
(a) 表面形貌



(b) 图6 (a) 中a区域放大图



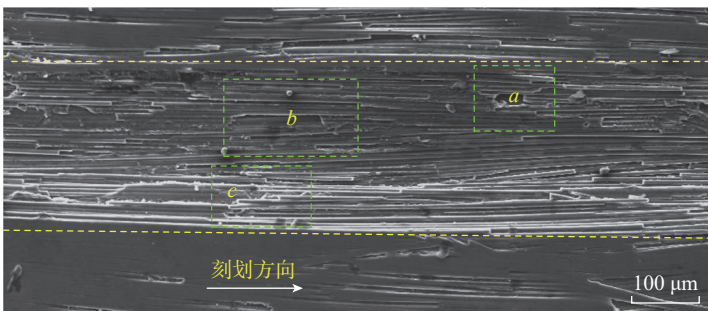
(c) 图6 (a) 中b区域放大图



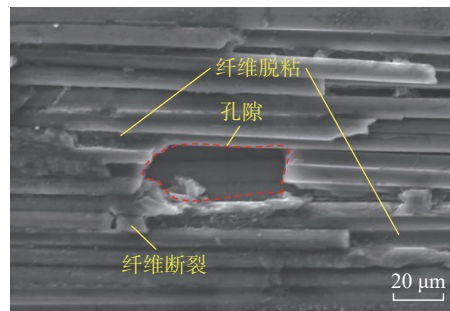
(d) 图6 (a) 中c区域放大图

图 6 平行方向 CS 工艺下的材料表面形貌

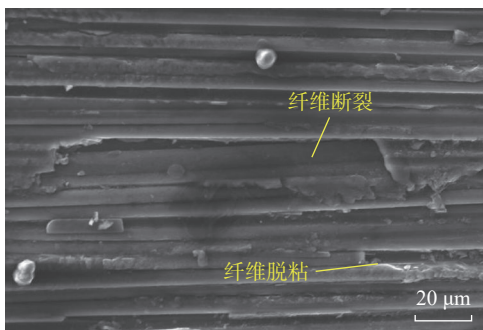
Fig.6 Surface morphology of samples with parallel fiber orientation under CS process



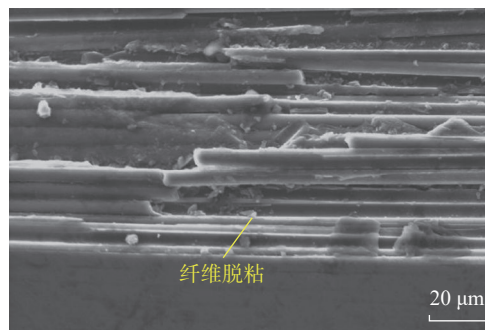
(a) 表面形貌



(b) 图7 (a) 中a区域放大图



(c) 图7 (a) 中b区域放大图



(d) 图7 (a) 中c区域放大图

图 7 平行方向 LAS 工艺下的材料表面形貌

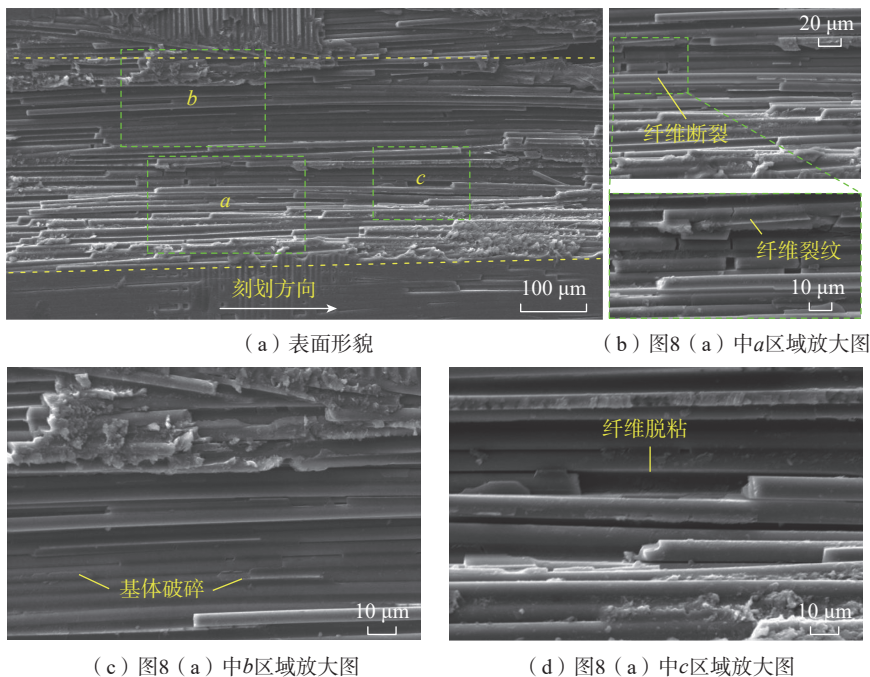
Fig.7 Surface morphology of samples with parallel fiber orientation under LAS process

采用 L-UHS 工艺,沿平行方向的划痕形貌如图 8 所示,可以看出,划痕两侧边缘轮廓平齐。从放大图可以看出,划痕内有极少数孔隙,孔

隙尺寸减小,且纤维断裂、脱粘和基体裂纹、破碎现象减少。这是由于在超声振动作用下,压头与材料之间产生瞬间冲击效应,使局部应力集中,直

接促使材料发生断裂并释放应力,从而有效抑制了裂纹的进一步扩展<sup>[22]</sup>。

在平行方向下,刻划方向与纤维轴向平行,纤维主要受轴向挤压和拉



(a) 表面形貌 (b) 图8 (a) 中a区域放大图 (c) 图8 (a) 中b区域放大图 (d) 图8 (a) 中c区域放大图

图8 平行方向 L-UHS 工艺下的材料表面形貌

Fig.8 Surface morphology of samples with parallel fiber orientation under L-UHS process

伸作用。由于 C 纤维的轴向强度远大于界面层粘结强度,因此,在该方向下,材料以基体和纤维间的界面层失效为主,其中纤维主要失效形式表现为弯曲断裂和拉伸断裂。在纤维断裂与界面层失效的共同作用下,材料发生层间断裂,如图 9 所示。在 LAS 方式下,材料温度上升,强度下降,尤其是界面层强度降低,纤维与基体之间结合力降低,因此材料层间断裂现象更为明显;而在 L-UHS 方式下,激光软化作用与超声振动共同作用,纤维断裂现象减少,材料失效

主要是层间断裂失效。

### 2.3 倾斜方向刻划表面损伤分析

采用 CS 工艺,倾斜方向的划痕表面形貌如图 10 所示,划痕两侧断口形貌有明显区别,在上侧划痕边缘较为平齐,而下侧划痕边缘呈现“锯齿”状。由于划痕两侧材料受力方

式不同,上侧压头与材料直接作用,纤维主要承受剪切力,而下侧材料主要受挤压和弯曲作用,纤维主要以剪切和弯曲断裂混合方式去除,且基体主要依附于纤维表面,与纤维一同被去除。划痕下侧纤维断口呈“锯齿”状的原因,是因为下侧纤维的主要断裂方式为弯曲断裂。在划痕底部存在大量基体破碎和纤维脱粘现象,可以推断出纤维主要的失效形式为弯曲断裂。

LAS 工艺倾斜方向的划痕表面形貌如图 11 所示,划痕上侧轮廓较清晰,断面较为平整,位于一个平面内。但是,划痕下侧材料缺失,划痕上、下两侧不对称,这是由于激光作用使纤维和基体之间结合力减弱,纤维弯曲时被“掀起”导致的。划痕底部有一条明显的划痕,呈现出一种塑性去除趋势,但是底部出现了大面积的孔洞。划痕上侧纤维断口平齐,位于同一平面,并且,纤维断口与纤维轴向垂直。

采用 L-UHS 工艺,倾斜方向的划痕表面形貌如图 12 所示,与采用 CS 工艺的表面形貌(图 10)相同,划痕上、下边缘轮廓差异较大,上侧边

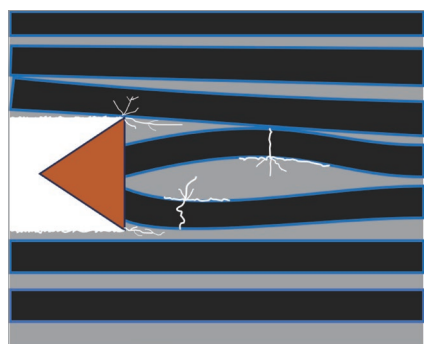
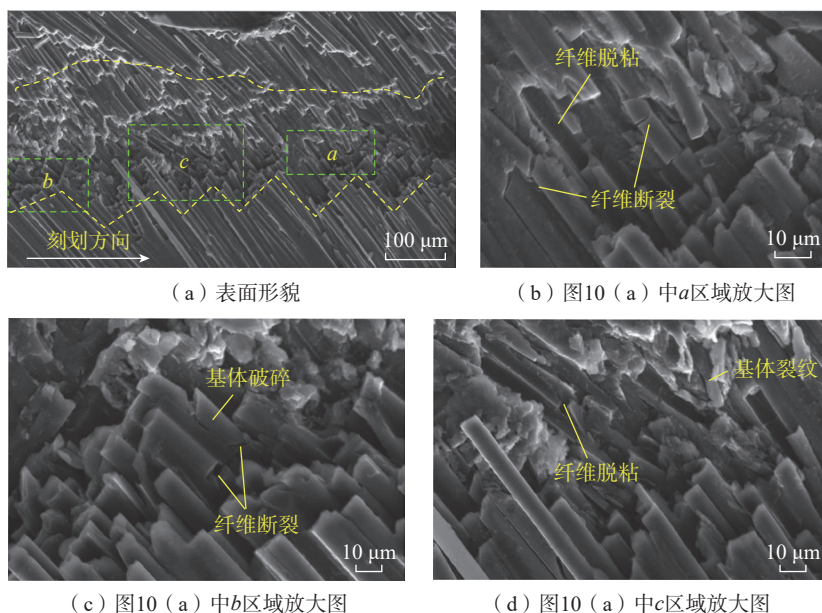


图9 平行方向材料去除机制示意图

Fig.9 Schematic diagram of material removal mechanism in parallel fiber orientation



(a) 表面形貌 (b) 图10 (a) 中a区域放大图 (c) 图10 (a) 中b区域放大图 (d) 图10 (a) 中c区域放大图

图10 倾斜方向 CS 下的材料表面形貌

Fig.10 Surface morphology of samples with inclined fiber orientation under CS process

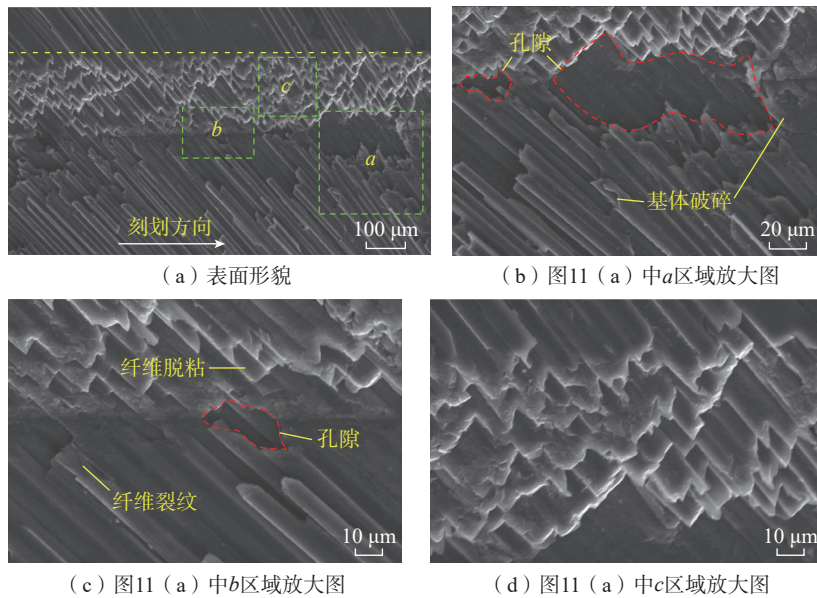


图 11 倾斜方向 LAS 工艺下的材料表面形貌

Fig.11 Surface morphology of samples with inclined fiber orientation under LAS process

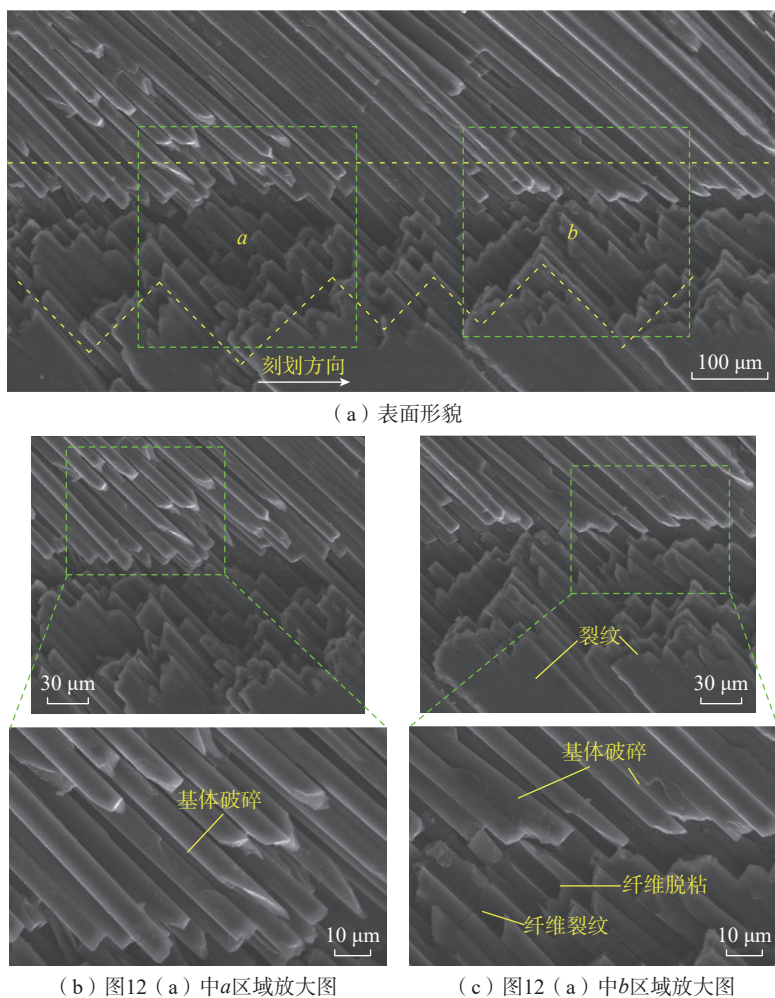


图 12 倾斜方向 L-UHS 工艺下的材料表面形貌

Fig.12 Surface morphology of samples with inclined fiber orientation under L-UHS process

缘较为平齐,而下侧边缘呈现“锯齿”状。从放大图可以看出,相较于 CS 和 LAS, L-UHS 划痕内裂纹、基体破碎、纤维脱粘等损伤现象减少,纤维的主要失效形式由弯曲断裂向剪切和弯曲混合断裂转变。

如图 13 所示,在倾斜方向下,划痕上、下侧纤维材料失效形式不同,上侧主要为剪切断裂失效,而下侧主要为弯曲断裂失效。在 LAS 工艺下,材料在激光作用下发生软化,纤维强度降低,上侧纤维在压头作用下以剪切断裂为主,且纤维断口趋于同一平面,而下侧由于纤维与基体间结合强度降低,发生了层间失效;在 L-UHS 工艺下,在激光和超声振动共同作用下,在软化材料同时压头与材料间冲击作用,使材料所受应力集中,纤维断口更为平齐,主要失效形式为剪切断裂。

#### 2.4 垂直方向刻划表面损伤分析

采用 CS 工艺,垂直方向的划痕表面形貌如图 14 所示,可见划痕边缘轮廓不平整,划痕宽度不均匀,划痕底部能看到微小孔隙,并存在大量纤维断裂现象。划痕两侧存在大面积材料缺失,这是由于基体与纤维同时破碎脱落造成的。观测两侧纤维断口形貌,可以发现纤维断口多为倾斜形状,倾斜角度(纤维断口与进给方向夹角)较大,并且倾斜方向一致,这与压头进给方向相关。

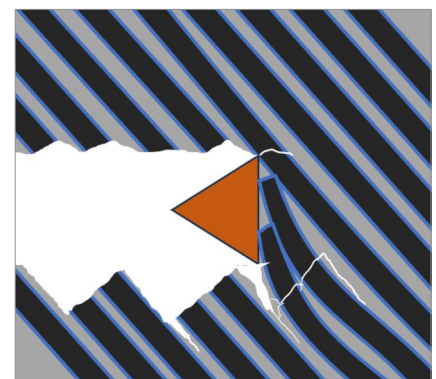


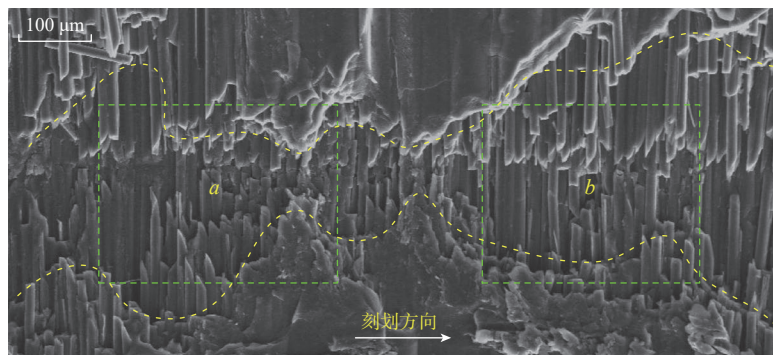
图 13 倾斜方向材料去除机制分析示意图

Fig.13 Schematic diagram of material removal mechanism in inclined fiber orientation

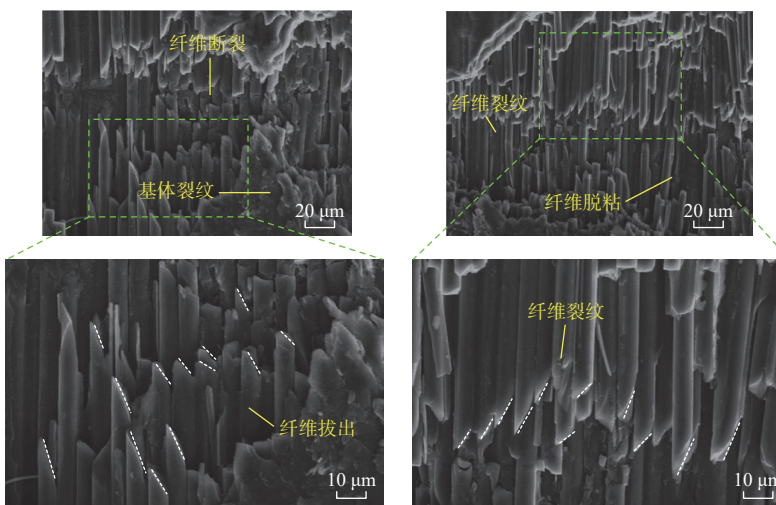
采用 LAS,垂直方向的划痕表面形貌如图 15 所示,相较于 CS 工艺下的材料表面形貌(图 14),划痕边缘起轮廓伏较小,并且划痕底部孔隙减少。划痕两侧纤维断口依旧存在倾斜现象,但是断口倾斜角度减小,并且倾斜断口纤维所占比例降低。划痕底部仍然不平整,存在大量孔隙、纤维断裂、纤维拔出和基体破碎等缺陷。

采用 L-UHS 工艺,垂直方向的划痕表面形貌如图 16 所示,相较于 CS 和 LAS 工艺下的材料表面形貌(图 14 和 15),划痕边缘轮廓平齐,但是材料出现了分层现象,表面材料缺失现象明显减少。划痕两侧纤维断口更平齐,虽然纤维断口仍然存在倾斜,但是倾斜断口纤维数量减少,多数纤维断口与压头进给方向平行。这主要是因为激光软化材料的同时,超声振动动态冲击作用使纤维所受应力集中,纤维在瞬时达到断裂阈值,纤维发生剪切断裂。相较于 CS 工艺,划痕底部更加平整,纤维断裂和基体破碎现象减少,材料完整性更好。L-UHS 工艺能综合激光与超声振动的优势,在激光加热软化材料的同时,压头与材料接触区域借助超声振动产生动态冲击,使应力集中区域实现瞬时剪切,这一过程可显著抑制裂纹扩展,从而有效提高材料表面质量。

如图 17 所示,在垂直方向下,刻划方向与纤维轴向垂直,纤维主要受径向剪切力和径向压力的作用。由于 C 纤维径向强度远小于纤维轴向强度,因此,在垂直方向下,材料失效形式主要是纤维剪切断裂、弯曲断裂和基体破碎,随着裂纹扩展,形成材料脱落,实现材料去除。在 LAS 工艺下,纤维断口角度减小,趋于剪切断裂方式;在 L-UHS 工艺下,纤维断口角度进一步减小,且倾斜断口纤维数量减少,纤维失效形式为弯曲和剪切断裂混合。



(a) 表面形貌

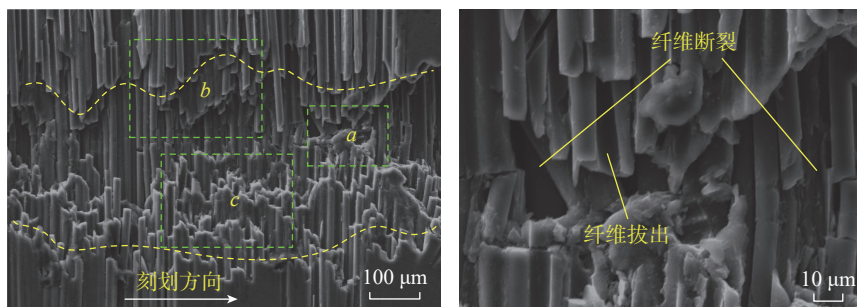


(b) 图 14 (a) 中 a 区域放大图

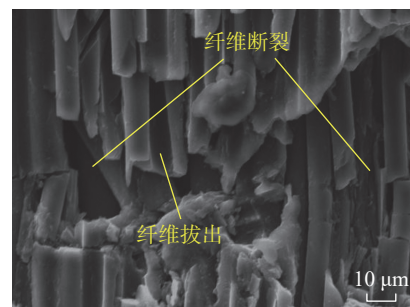
(c) 图 14 (a) 中 b 区域放大图

图 14 垂直方向 CS 工艺下的材料表面形貌

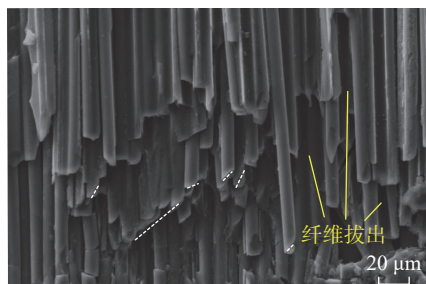
Fig.14 Surface morphology of samples with perpendicular fiber orientation under CS process



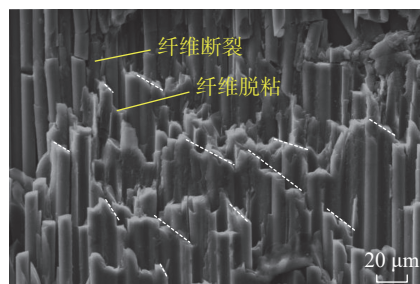
(a) 表面形貌



(b) 图 15 (a) 中 a 区域放大图



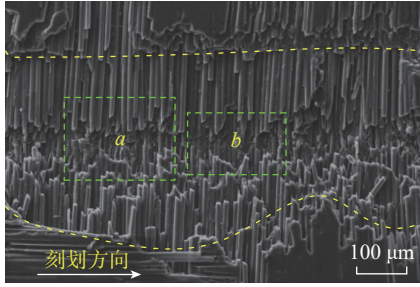
(c) 图 15 (a) 中 b 区域放大图



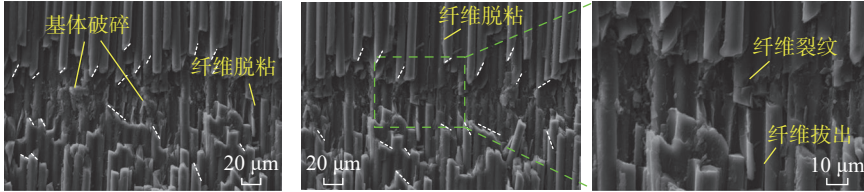
(d) 图 15 (a) 中 c 区域放大图

图 15 垂直方向 LAS 工艺下的材料表面形貌

Fig.15 Surface morphology of samples with perpendicular fiber orientation under LAS process



(a) 表面形貌



(b) 图16 (a) 中a区域放大图

(c) 图16 (a) 中b区域放大图

图16 垂直方向在L-UHS工艺下的材料表面形貌

Fig.16 Surface morphology of samples with perpendicular fiber orientation under L-UHS process

### 3 结论

(1) 通过对比不同纤维方向下采用CS和LAS工艺的材料表面形貌可以看出,激光辅助作用能降低切向和法向刻划力;对比LAS与L-UHS工艺可以看出,在超声振动作用下,法向刻划力有所下降,但是切向力出现了周期性波动。

(2) 通过试验对比CS、LAS和L-UHS工艺,结果表明,LAS和L-UHS能提高C/SiC复合材料加工性能,有效抑制材料表面缺陷产生。L-UHS工艺下的划痕边缘轮廓更加平齐,材料缺失现象减少,划痕内表面纤维断裂、纤维拔出和基体破碎等缺陷少于LAS和CS工艺。

(3) 在平行方向进行刻划时,CS工艺中材料失效主要以纤维弯曲断裂为主,LAS和L-UHS中材料失效主要以层间断裂为主;在倾斜方向刻划时,上、下两侧纤维断口有明显区别,上侧纤维主要受剪切力,纤维以剪切断裂方式去除,下侧纤维主要以弯曲断裂方式去除;在垂直方向刻划时,CS和LAS中纤维主要断裂方式为弯曲断裂,L-UHS中纤维断裂方

式为弯曲断裂和剪切断裂复合模式。

### 参考文献

[1] 王秋野,韩琳,赵洽宇. C/SiC复合材料制备技术及应用现状[J]. 纤维复合材料, 2023, 40(1): 115-119.  
WANG Qiuye, HAN Lin, ZHAO Hanyu. Fabrication and application of C/SiC composites[J]. Fiber Composites, 2023, 40(1): 115-119.

[2] 关洪达,张涛,何新波. C/SiC陶瓷基复合材料研究与应用现状[J]. 材料导报, 2023, 37(16): 70-79.  
GUAN Hongda, ZHANG Tao, HE Xinbo. Current status of the research and applications of C/SiC ceramic matrix composites[J]. Materials Reports, 2023, 37(16): 70-79.

[3] 张俊敏,蔡飞燕,靳喜海,等. 连续纤维增强陶瓷基复合材料研究与应用进展[J]. 陶瓷学报, 2023, 44(2): 195-207.  
ZHANG Junmin, CAI Feiyan, JIN Xihai, et al. Progress in research and application of continuous fiber reinforced ceramic matrix composites[J]. Journal of Ceramics, 2023, 44(2): 195-207.

[4] 曾青华,陈炫午,曾琦,等. 燃烧室陶瓷复合材料火焰筒应用与技术分析[J]. 航空动力学报, 2024, 39(9): 223-233.  
ZENG Qinghua, CHEN Xuanwu, ZENG Qi, et al. Application and technical analysis of ceramic composite combustor liner[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(9): 223-233.



图17 垂直方向材料去除机制分析示意图

Fig.17 Schematic diagram of material removal mechanism in perpendicular fiber orientation

[5] 杜昆,陈麒好,孟宪龙,等. 陶瓷基复合材料在航空发动机热端部件应用及热分析研究进展[J]. 推进技术, 2022, 43(2): 113-131.

DU Kun, CHEN Qihao, MENG Xianlong, et al. Advancement in application and thermal analysis of ceramic matrix composites in aeroengine hot components[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(2): 113-131.

[6] 潘真,阿拉腾沙嘎. 超高温陶瓷基复合材料的制备与性能研究[J]. 造纸装备及材料, 2022, 51(10): 55-57.

PAN Zhen, ALATENG Shaga. Preparation and properties of ultra-high temperature ceramic matrix composites[J]. Papermaking Equipment & Materials, 2022, 51(10): 55-57.

[7] RAYAT M S, GILL S S, SINGH R, et al. Fabrication and machining of ceramic composites—A review on current scenario[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2017, 32(13): 1451-1474.

[8] HU N S, ZHANG L C. Some observations in grinding unidirectional carbon fibre-reinforced plastics[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 152(3): 333-338.

[9] 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.

[10] ZHANG M H, SHAN C W, XIA Z W, et al. Scratch-induced surface formation mechanism in C/SiC composites[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2024, 265: 108885.

[11] LIU Y X, WU H X, ZHANG H Y, et

al. Effects of the deflection angle of the indenter on the material removal and damage evolution of fused silica during scratching[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 119: 109–117.

[12] LI Y C, GE X, WANG H, et al. Study of material removal mechanisms in grinding of C/SiC composites via single-abrasive scratch tests[J]. *Ceramics International*, 2019, 45(4): 4729–4738.

[13] 李继成, 陈广俊, 许金凯, 等. C/SiC 复合材料激光超声复合微切削材料损伤机理与表面质量研究[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(9): 189–205.

LI Jicheng, CHEN Guangjun, XU Jinkai, et al. Study on material damage mechanism and surface quality of C/SiC composites by laser-ultrasonic hybrid micromachining[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(9): 189–205.

[14] 吴东江, 蔡昕彤, 李正, 等. C<sub>f</sub>/C–SiC 烧蚀行为及激光复合超声磨削可行性研究[J]. *表面技术*, 2024, 53(4): 162–174.

WU Dongjiang, CAI Xintong, LI Zheng, et al. C<sub>f</sub>/C–SiC ablative behavior and feasibility

of laser assisted ultrasonic grinding[J]. *Surface Technology*, 2024, 53(4): 162–174.

[15] WANG C G, CHEN J, ZHANG X X, et al. Effects of ultrasonic vibration assisted milling with laser ablation pretreatment on fatigue performance and machining efficiency of SiC<sub>f</sub>/SiC composites[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2023, 43(14): 5925–5939.

[16] CHEN X H, SUN Z G, SUN J F, et al. Simulation of degraded properties of 2D plain woven C/SiC composites under preloading oxidation atmosphere[J]. *Applied Composite Materials*, 2017, 24(6): 1287–1307.

[17] YANG Y, XU F, GAO X Y, et al. Impact resistance of 2D plain-woven C/SiC composites at high temperature[J]. *Materials & Design*, 2016, 90: 635–641.

[18] YE Z Y, WANG Y L, XIONG X, et al. Microstructure, interfacial and mechanical properties of SiC interphase modified C/C–SiC composites prepared by reactive melt infiltration[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2024, 44(15): 116785.

[19] BERGS T, GANSER P, FRUH D, et al. Investigation of cutting mechanisms in the machining of ceramic matrix composites (CMCs) [J]. *Procedia CIRP*, 2021, 101: 330–333.

[20] GAVALDA DIAZ O, AXINTE D A. Towards understanding the cutting and fracture mechanism in Ceramic Matrix Composites[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, 118: 12–25.

[21] ZHAI C T, XU J K, HOU Y G, et al. Effect of fiber orientation on surface characteristics of C/SiC composites by laser-assisted machining[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(5): 6402–6413.

[22] LIN H, ZHOU M. Fracture mechanism of ultrasound-assisted scratching 2D-SiC<sub>f</sub>/SiC composite fibers with different fiber orientations[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 30: 9048–9060.

通信作者: 王佳琦, 博士, 讲师, 研究方向为难加工材料激光复合制造。

## Research on Surface Damage Characteristics of C/SiC Composites Under Laser-Ultrasonic Hybrid Scratching

XU Jinkai<sup>1,2</sup>, HUANG Junhan<sup>1,2</sup>, WANG Jiaqi<sup>1,2</sup>, YU Zhanjiang<sup>1,2</sup>, LI Ying<sup>1</sup>

(1. Ministry of Education Key Laboratory for Cross-Scale Micro and Nano Manufacturing, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. College of Mechanical and Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**[ABSTRACT]** As a typical ceramic matrix composite (CMC), carbon fiber-reinforced silicon carbide matrix composites (C/SiC) exhibit outstanding properties, including high specific strength, high specific stiffness, and high-temperature resistance, making them widely applicable in aviation, aerospace, automotive, and other advanced engineering fields. To investigate the surface damage forms of C/SiC composites under different energy fields, this study conducted conventional scratching (CS), laser-assisted scratching (LAS), and laser-ultrasonic hybrid scratching (L-UHS) on three typical fiber orientations. The scratching forces and surface morphologies under these three scratching methods were systematically compared to analyze the influence of laser-ultrasonic hybrid energy fields on surface damage of the material. The results show that, compared with CS and LAS, L-UHS can effectively reduce scratching forces and improve machinability. L-UHS demonstrates distinct fracture mode transitions across different fiber orientations: In the parallel orientation, fiber bending fracture is significantly reduced, and the primary failure mode is interlaminar fracture; In the inclined and perpendicular orientations, the fiber failure mode transitions from bending fracture to shear fracture. This study provides theoretical guidance for laser-ultrasonic hybrid machining of C/SiC composites.

**Keywords:** C/SiC composites; Material removal; Surface damage; Laser-ultrasonic hybrid scratching (L-UHS)

(责编 七七)