

C/SiC 复合材料激光超声复合加工螺纹缺陷控制及拉伸性能分析

徐浩然^{1,2} 王佳琦^{1,2} 于占江^{1,2} 许金凯^{1,2*}

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: C/SiC 复合材料常用于制作高温复合材料紧固件,但在常规加工(CM)下,螺纹特征完整度低且表面存在纤维拔出、基体破碎等损伤微观缺陷,使其难以满足高性能连接的要求。采用激光超声复合切削技术(L-UHM)开展了 C/SiC 复合材料螺纹特征加工,研究了不同加工方式下螺纹特征表面微观缺陷的变化规律,揭示了 CM、激光辅助加工(LAM)以及 L-UHM 下的螺纹特征缺陷以及表面微观缺陷与其拉伸性能的关系,证明了 L-UHM 在 C/SiC 复合材料螺纹特征加工中对微观缺陷控制的优势。研究表明,相比于 CM 和 LAM,在 L-UHM 下,牙顶、牙壁和牙底的纤维拔出、纤维脱黏和基体破碎得到控制,螺纹特征表面微观缺陷减少,完整度提高。此外,在拉伸试验中,L-UHM 紧固体获得了最高的抗拉强度,较 CM 紧固体提高了 29%,较 LAM 紧固体提高了 10%。

关键词: C/SiC 复合材料;激光超声复合加工;螺纹特征;表面缺陷

中图分类号: TG62

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2025.04.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Thread Defects Control and Tensile Property Analysis of C/SiC Composites by L-UHM

XU Haoran^{1,2} WANG Jiaqi^{1,2} YU Zhanjiang^{1,2} XU Jinkai^{1,2*}

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

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, 130022

Abstract: C/SiC composites were often used to make high-temperature composite fasteners. However, in conventional machining(CM), the integrity of thread features was low, and there were micro-defects such as fiber pull-out and matrix broken on the surfaces, which made it difficult to meet the requirements of a high-performance connection. L-UHM was used to carry out C/SiC composites thread feature machining herein. The variation of micro-defects on the surfaces of thread features and tensile test results in different machining methods were studied. The defects of thread features in CM, LAM(laser-assisted machining) and L-UHM and the relationship between surface micro-defects and tensile properties were revealed. The advantages of L-UHM in C/SiC composites thread feature micro-defects controlling were proved. The results show that compared with CM and LAM, the fiber pull-out, fiber debonding and matrix broken of the teeth tops, teeth sidewalls and teeth bottoms are inhibited, the micro defects on the surfaces of thread features are reduced, and thread feature integrity is improved in L-UHM. In addition, in the tensile tests, L-UHM achieves the highest tensile strength, which is increased by 29% compare to CM and by 10% compare to LAM.

Key words: C/SiC composite; laser-ultrasonic hybrid machining(L-UHM); thread feature; surface defect

0 引言

C/SiC 复合材料因其优异的力学性能、耐高温性及低密度等优点,逐渐成为航空航天、汽车以

及能源等领域的重要材料^[1-5]。C/SiC 复合材料常用于高温复合材料紧固件,螺纹特征尺度小、加工难度大,在加工过程中面临着许多挑战。因螺纹特征复杂,故在常规加工(conventional machining, CM)后会产生较多微观缺陷(纤维拔出、纤维脱黏、基体破碎等),导致螺纹无法正常配合或

收稿日期:2024-10-29

基金项目:国家重点研发计划(2023YFB4605900);中国航空工业-慧眼行动项目(62502010307)

安装,影响零部件的性能^[6]。诸多学者对 C/SiC 复合材料螺纹特征加工进行了研究。柳思成等^[7]认为磨削和硬质合金攻丝分别是 C/SiC 紧固件外螺纹和内螺纹的优选加工方式。SUN 等^[8]研究了渗硅对合金显微组织和力学性能的影响,发现在拉应力作用下 C/C-SiC 螺栓为螺柱拉伸破坏,C/C 螺栓为螺纹拉脱破坏。常规加工方法加工出的螺纹特征表面微观缺陷较多,亟需引入一种新的加工技术以满足低损伤、低缺陷的要求,因此,探索合适的加工方法对实现高质量、高一致性的 C/SiC 螺纹连接件具有重要意义。

激光辅助加工 (laser-assisted machining, LAM) 和超声振动辅助加工作为 C/SiC 复合材料加工的有效手段,能显著提高材料的可加工性和表面质量。PARK 等^[9]使用 LAM 进行正交切削试验,比较了切削力。ZHOU 等^[10]提出了一种高效、低损伤、低磨粒磨损的激光诱导烧蚀辅助磨削方法并评价了磨削性能。ZHANG 等^[11]提出了考虑韧脆转变的磨削力解析模型和切削区域内有效磨粒数量的最终模型。XIONG 等^[12]对超声振动辅助铣削-磨削 SiC 纤维增强 SiC 基陶瓷基复合材料进行了研究。WANG 等^[13]总结了超声辅助磨削的经验公式。WANG 等^[14]认为超声振动可以显著减小磨削力和粗糙度。

激光超声复合加工 (laser-ultrasonic hybrid machining, L-UHM) 是一种新兴的高效材料加工技术,结合了激光加工和超声加工的优点,利用激光的高能量密度和超声的振动特性,能够在提高表面质量和精度的同时提高加工效率并减小刀具磨损,实现对材料的精细加工。激光超声复合加工过程中,激光束聚焦到工件的表面,通过局部加热使材料软化,从而减小刀具磨损、延长刀具的使用寿命。通过对激光能量的精确控制,使加工过程中的热影响区最小化,避免对工件造成热损伤。超声振动被引入到刀具或工件中,通过高频振动产生微小的冲击力,有助于减小切削力^[15]。李继成等^[16]开展 C/SiC 材料损伤机理与表面质量研究,分析了激光超声双能场作用下 C/SiC 复合材料的失效机制。安庆龙等^[17]提出了激光烧蚀与超声振动辅助铣削的组合加工工艺,该工艺可以获得质量更好的已加工表面。

C/SiC 复合材料螺纹特征较为复杂、尺度较小,目前对螺纹特征表面微观缺陷研究不深入,且螺纹特征与力学性能的关系不明确,因此,本文通过 L-UHM 切削试验,研究不同加工方式下螺纹特征表面微观缺陷的变化规律和拉伸断口形貌,

揭示 CM、LAM 以及 L-UHM 下螺纹特征的断裂形式以及表面微观缺陷与其力学性能的关系。

1 C/SiC 复合材料螺纹连接件失效形式

螺纹连接因结构简单、拆卸方便、成本低等特点被广泛应用于各类工程结构中,尤其是在现代飞行器制造与应用中占有重要地位。C/SiC 复合材料连接结构包含铆钉连接、螺钉连接、螺栓连接多种形式,一般先通过过盈配合或螺纹接触的方式实现结构的连接,然后进行二次沉积,进而完成连接结构的制备^[18]。

螺纹连接存在着各种失效形式,主要有塑性变形失效、疲劳失效、腐蚀失效、热胀冷缩失效和过载失效。螺栓作为连接件结构在工作状态下的主要受载形式为轴向力和横向力,因此其拉伸性能是重要的考核指标。C/SiC 复合材料发生失效时,螺纹牙发生剪切失效而断齿,但螺柱未拉断,螺杆仅在螺牙根部的应力集中部位有少量损伤,表明螺栓连接强度取决于螺纹牙强度。螺纹特征表面缺陷越少,螺纹特征完整性越高,则螺纹牙强度越高,因此,保持螺纹特征完整性极其关键。

螺栓连接接触区易形成应力集中,是结构抵抗疲劳破坏的薄弱环节,因此,螺纹牙完整性及其可靠性是评估螺栓耐久性的关键。与金属螺栓不同,C/SiC 复合材料连接件由于板厚方向基体黏弹性的作用,往往更容易发生蠕变/松弛。接触表面越粗糙,接触刚度越小,则越容易发生接触蠕变,预紧力也越容易松弛,因此,提高 C/SiC 螺纹连接件接触表面质量具有重要意义。

螺纹牙表面积 $S(\text{mm}^2)$ 的表达式为

$$S = \left[\left(\frac{d}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_1}{2} \right)^2 \right] \times \frac{l}{P} \times 2 \times \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

式中: d 、 d_1 分别为螺栓的大径和小径, mm; l 为螺纹轴向长度, mm; P 为螺距, mm。

根据配合质量以及材料特性,C/SiC 螺栓的拉伸失效模式可分为螺柱拉断失效和螺牙断齿失效,如图 1 所示。相应的断裂、剪切强度通过下式计算:

$$\sigma_1 = \frac{F_1}{\pi P \left(d - \frac{7\sqrt{3}}{8} P \right)} \quad (2)$$

$$\sigma_2 = \frac{F_2}{\frac{\pi}{4} \left(\frac{d_2 + d_1 - P\sqrt{3}/12}{2} \right)^2} \quad (3)$$

$$\tau = \frac{F}{2\pi(d/2)^2} \quad (4)$$

式中: σ_1 、 σ_2 分别为单螺纹断裂强度和螺柱断裂强度, MPa; τ 为双头螺栓剪切强度, MPa; F_1 、 F_2 分别为平均故障负载和螺栓断裂失效载荷, N; d_2 为螺栓的中径, mm。



图 1 螺栓失效形式
Fig.1 Bolt failure form

2 试验设置

试验原材料为 2.5D-针刺 C/SiC 棒料。试验在友嘉国际数控机床有限公司 FTC-350L 数控车床的 L-UHM 车削系统上进行,工件通过主轴夹具定位并夹紧,通过顶针使工件稳定转动。超声振动施加在刀具上,沿切削速度方向振动。激光超声复合切削装置示意图见图 2。

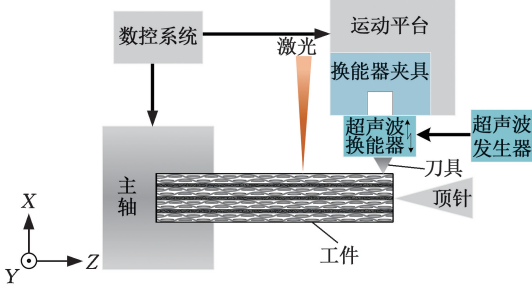


图 2 激光超声复合切削装置示意图
Fig.2 Device schematic diagram of thread features by L-UHM

L-UHM 模块由换能器夹具、超声波换能器和激光器等组成。其中,超声波换能器频率为 18.981 kHz,阻抗为 15 Ω,额定功率为 1.5 kW,振幅为 4 μm;光纤激光器型号为 YLR-300-MMWC-Y11,最高功率为 300 W;使用 PCD 螺纹车刀。加工装置如图 3 所示。

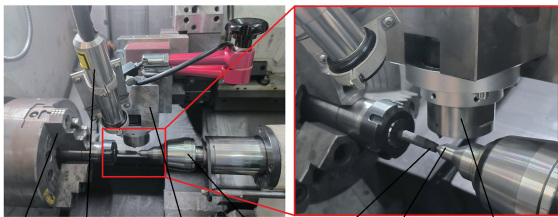


图 3 加工装置
Fig.3 Machining device

数控车床主轴最高转速为 4500 r/min,通过数控程序实现螺纹车削过程。所加工的样件尺寸如图 4 所示。

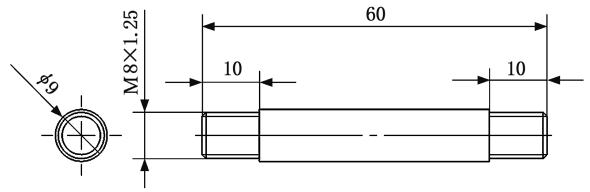
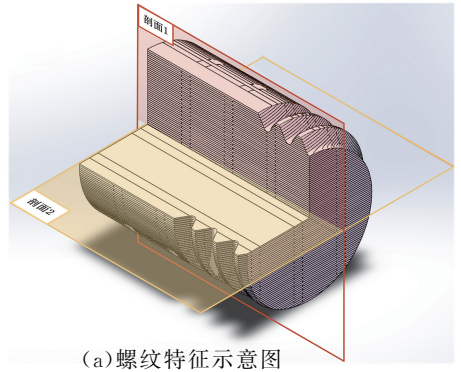
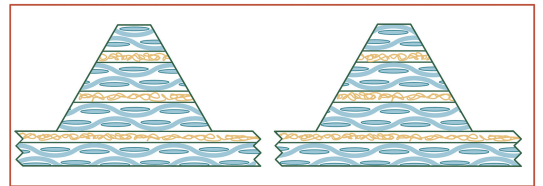


图 4 样件尺寸
Fig.4 Sample size

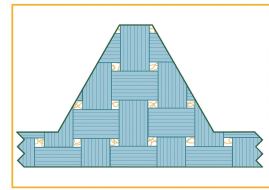
C/SiC 复合材料由碳纤维和陶瓷基体组成。当对 C/SiC 进行局部分析时,可以将其简化为单向结构。根据切削方向的不同,对于 C/SiC 复合材料螺纹特征,在如图 5a 所示的剖面 1 内定义螺纹特征的平行纤维方向(图 5b)和垂直纤维方向(图 5c),在剖面 2 内定义螺纹特征的纤维法向方向(图 5d)。



(a) 螺纹特征示意图



(b)剖面 1 内平行纤维方向 (c)剖面 1 内垂直纤维方向



(d)剖面 2 内纤维法向

图 5 不同方向切削示意图

Fig.5 Cutting diagram in different directions

为了研究 L-UHM 对 C/SiC 复合材料螺纹特征加工性能的影响,对 CM、LAM、L-UHM 下的双头螺柱表面微观缺陷进行了对比。刀具参数如表 1 所示,所制备的样件参数如表 2 所示,试验参数如表 3 所示。分别利用 CM、LAM、L-UHM 方法加工了 C/SiC 的 M8 双头螺柱试样,双头螺柱总长度为 60 mm,两端有效螺纹长度为 10 mm。将加工后的工件置于去离子水中利用超声波清洗机清洗 5 min,工件在 60 °C 下干燥后,使

用扫描电子显微镜(ZEISS EVOMA25)分别对样品的螺纹牙顶、牙壁和牙底进行微观缺陷分析,所观测螺纹特征位置如图 6 所示。

表 1 刀具参数

Tab.1 Tool parameters

刀具材料	刀具型号	刀尖角	前角	刃圆半径
PCD	11IRAG60	60°	10°	0.2 mm

表 2 样件参数

Tab.2 Sample parameters

紧固件类型	牙型角	螺栓规格	螺距	螺纹长度
双头螺柱	60°	M8	1.25 mm	10 mm

表 3 试验参数

Tab.3 Experimental parameters

参数	CM	LAM	L-UHM
单次进给量/mm	0.05	0.05	0.05
线速度/(m·min ⁻¹)	75	75	75
激光功率密度/(W·mm ⁻²)	0	80	80
超声振幅/μm	0	0	4

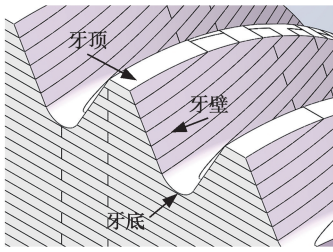


图 6 样品观测位置

Fig.6 Sample observation position

3 螺纹表面缺陷

3.1 螺纹牙顶表面微观缺陷

为了评价 CM、LAM、L-UHM 三种加工方法对工件表面微观缺陷的影响,利用扫描电子显微镜观察了螺纹特征的微观缺陷,结果如图 7 所示。

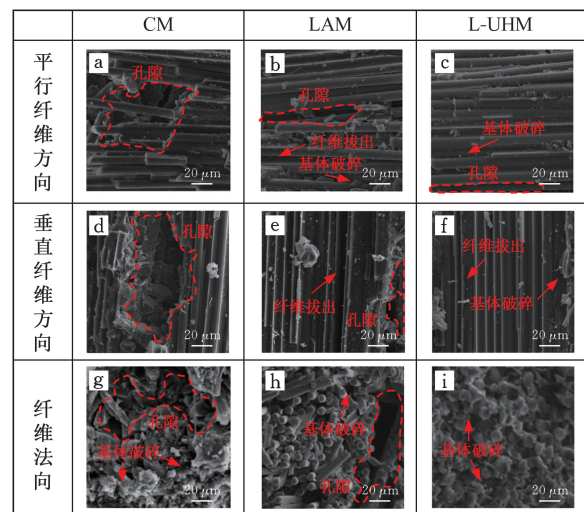


图 7 牙顶表面微观缺陷

Fig.7 Micro-defects on the surface of the teeth top

对于螺纹特征的牙顶表面微观缺陷,在平行纤维方向上,当采用 CM 时,大量纤维从基体中

拔出,在表面形成大面积孔隙。纤维在切削过程中发生脆性断裂,导致大部分与纤维结合的基体随切屑一同排出,进而单根纤维失去基体支撑,形成大面积的材料缺失。基体断裂、低强度层断裂、沿纤维断裂面使加工后表面形成清晰的孔隙和裂纹^[19],如图 7a 所示。当采用 LAM 时,与 CM 相比,纤维与基体脱黏的现象减少,基体破碎、断裂现象减少,材料缺失面积减小,如图 7b 所示。当采用 L-UHM 时,与 CM 和 LAM 相比,纤维周围的基体破碎减少,纤维拔出减少,纤维与基体间的裂缝减小,整个加工表面的孔隙和表面损伤均减少,如图 7c 所示。

在垂直纤维方向上,当采用 CM 时,基体脱落和挤压变形会导致材料产生孔隙和裂纹。由于纤维和基体之间的界面相固有的低抗压强度,当产生垂直方向的压力和剪力时,会导致缺乏基体支撑的纤维发生弯曲和脱落,从而形成大面积孔隙,如图 7d 所示。当采用 LAM 时,与 CM 相比,基体脱落得到改善,纤维弯曲变形和开裂得到抑制。由于激光加热,基体和纤维在热量的影响下都被软化,使得断裂强度降低,避免了过度应力集中,如图 7e 所示。当采用 L-UHM 时,与 CM 和 LAM 相比,由于激光加热和高频超声振动的作用,实现了刀具对工件的断续切削,有效地抑制了裂纹扩展,减少了对基体的损伤,基体破碎减少,如图 7f 所示。

在纤维法向上,当采用 CM 时,由于螺纹车刀的前刀面对材料的挤压作用,纤维与基体之间的界面层被破坏,纤维发生弯曲变形和开裂,从而发生纤维损伤,纤维与基体分离导致纤维脱黏,纤维从基体上被剥离去除,在纤维被剥离去除过程中发生应力集中和基体破碎,破碎后的基体随切屑排出,产生大面积孔隙,如图 7g 所示。当采用 LAM 时,与 CM 相比,基体破碎减少,材料的反复加热使基体熔化,进而使纤维裸露,产生损伤的纤维在切削过程中发生弯曲变形和折断,纤维失去基体的支撑,在纤维周围产生孔隙,如图 7h 所示。当采用 L-UHM 时,与 CM 和 LAM 相比,基体相对完好,在激光加热软化基础上,施加超声振动使纤维快速剥离,以微脆去除为主,进一步减小应力集中,基体破碎减少,有少量小面积孔隙,如图 7i 所示。

3.2 螺纹牙壁表面微观缺陷

螺纹特征的牙壁表面微观缺陷如图 8 所示。在平行纤维方向上,当采用 CM 中,由于牙壁是曲面,牙壁表面上的纤维不在同一平面内。纤维

受到挤压应力的作用,且纤维和基体的抗压强度大于界面相的抗压强度,在切削过程中纤维和基体之间的界面相更容易被破坏,因此有大量纤维脱黏、纤维拔出以及基体破碎,大量单根纤维裸露在外,如图 8a 所示。当采用 LAM 时,与 CM 相比,由于激光对纤维和基体施加热量,使其更容易被去除,纤维裸露现象减少但依旧存在,基体破碎和纤维拔出现象得到抑制,如图 8b 所示。当采用 L-UHM 时,与 CM 和 LAM 相比,加工后表面纤维断口趋于整齐,纤维周围的基体完整性提高,在加工表面上分布的空隙和基体破碎减少,纤维在激光作用下被软化,减小了弯曲变形的程度,进而在超声振动作用下被去除,纤维在达到极限强度之前以剪切和微脆断裂混合形式被去除,使界面相的损伤减小,同时减小了对基体的破坏,如图 8c 所示。

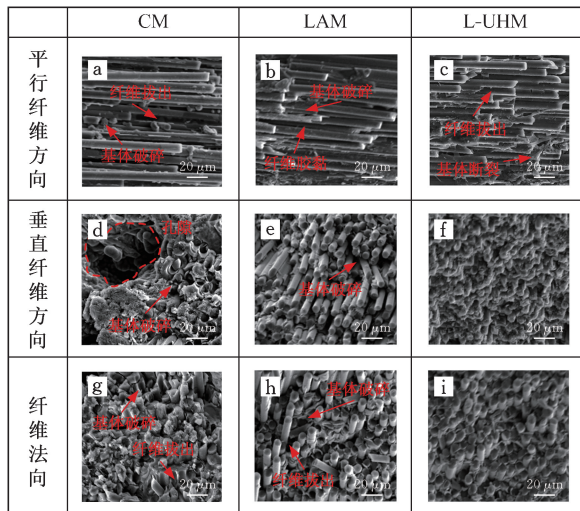


图 8 牙壁表面微观缺陷

Fig.8 Micro-defects on the surface of teeth sidewall

在纤维垂直方向上,当采用 CM 时,由于纤维与基体结合的界面相强度大小不一致,当结合强度低的界面相与纤维束分离时,纤维发生弯曲变形并折断,基体发生断裂,进而形成沿纤维束方向的孔隙,以及纤维束从基体拔出所形成的孔隙,如图 8d 所示。当采用 LAM 时,与 CM 相比,孔隙和基体脱落减少,这是因为激光对材料反复加热,使界面相强度降低,基体更容易与纤维分离而被去除,如图 8e 所示。当采用 L-UHM 时,与 CM 和 LAM 相比,纤维断口趋于平整,仅有少量由于纤维拔出以及界面脱黏而形成的孔隙,如图 8f 所示。

在纤维法向上,当采用 CM 时,已加工表面分布着因纤维拔出产生的空隙、基体破碎现象、因脆性和弯曲断裂产生的纤维断口形貌、挤压应力

作用引起的纤维弯曲和开裂,以及基体破碎后产生的孔隙,如图 8g 所示。当采用 LAM 时,与 CM 相比,可以看到大量纤维裸露以及纤维弯曲甚至折断,纤维拔出形成的孔隙减少但依旧存在,如图 8h 所示。当采用 L-UHM 时,与 CM 和 LAM 相比,纤维断口趋于平整,空隙和基体损伤进一步减小,如图 8i 所示。

3.3 螺纹牙底表面微观缺陷

螺纹特征的牙底表面微观缺陷如图 9 所示。在平行纤维方向上,当采用 CM 时,由于牙底为螺旋曲面,牙底表面上的纤维不在同一平面内,在加工过程中易出现大量纤维脱黏、纤维拔出和基体破碎的现象。加工过程中的轴向压缩导致纤维局部发生开裂,同时,由于纤维弯曲变形,应力过度集中,使切削过程中直接产生裂纹而不发生塑性变形,基体呈块状从纤维表面剥离,出现大量材料缺失,从而产生沿纤维方向的狭长的凹坑和裂缝,如图 9a 所示。当采用 LAM 时,与 CM 相比,纤维拔出以及基体破碎减少,但仍存在由于纤维脱黏和基体破碎产生的孔隙,如图 9b 所示。当采用 L-UHM 时,与 CM 和 LAM 相比,基体和纤维完整性提高,纤维以及基体破碎得到改善,可以观察到纤维呈规律的阶梯分布,如图 9c 所示。

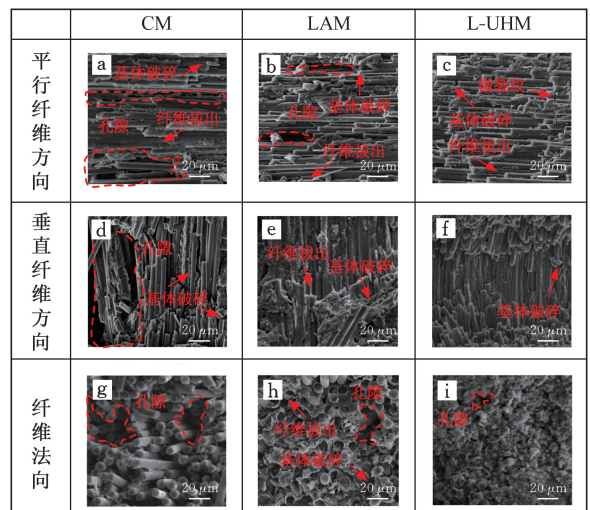


图 9 牙底表面微观缺陷

Fig.9 Micro-defects on the surface of thread teeth bottom

在纤维垂直方向上,当采用 CM 时,由于纤维与基体结合的界面相强度大小不一致,在切削过程中结合强度低的界面相与纤维束分离,形成沿纤维束方向的孔隙,以及大量纤维从基体拔出所形成的孔隙,纤维缺少基体的支撑,导致应力集中,纤维断裂位置参差不齐,如图 9d 所示。当采用 LAM 时,与 CM 相比,基体破碎减少,纤维脱黏减少,如图 9e 所示。当采用 L-UHM 时,与 CM 和 LAM 相比,牙底纤维断口整体呈横置的

V形,纤维和基体完整性显著提高,纤维断口趋于平整,基体破碎显著减少,如图9f所示。

在纤维法向上,当采用CM时,已加工表面存在由于纤维拔出和基体破碎产生的空隙,存在基体破碎现象,从而出现大量纤维裸露,如图9g所示。当采用LAM时,与CM相比,纤维拔出形成的孔隙减少,基体破碎现象减少,如图9h所示。当采用L-UHM时,与CM和LAM相比,在激光加热和超声振动的作用下,应力集中减小,基体破碎减少,纤维断口趋于平整,基体损伤减少,产生的空隙减小,如图9i所示。

4 螺栓的拉伸性能

4.1 位移-抗拉强度曲线

将C/SiC复合材料加工成M8双头螺柱,螺纹长度为10 mm,进行拉伸试验,螺纹拉伸强度测试拉伸速度为0.5 mm/min。

当采用CM时,螺纹牙表面有大量纤维拔出和基体缺失,导致螺纹牙表面材料缺失,在拉伸过程中导致螺纹牙应力集中,纤维更容易断裂,螺纹特征表面缺陷多,导致C/SiC螺纹牙承载能力下降。与CM相比,采用L-UHM时的螺纹牙表面完整度提高,纤维和基体更加完整,使得C/SiC螺柱螺牙与螺母螺牙接触面积增大,螺牙受力更加均匀,所以L-UHM下的抗拉强度比CM下的高。

拉伸强度的计算公式为

$$\sigma_b = F/s \quad (5)$$

式中: σ_b 为材料的抗拉强度,MPa; F 为材料试件受到的最大轴向拉力值,N; s 为材料试件受拉截面的面积,即以螺柱中径计算出的面积, mm^2 。

采用CM、LAM以及L-UHM时,抗拉强度分别为16.42 MPa、19.13 MPa和21.22 MPa,如表4所示。

表4 拉伸测试结果

Tab.4 Tensile test results

加工方法	最大试验力/N	抗拉强度/MPa
CM	665.79	16.42
LAM	775.80	19.13
L-UHM	861.01	21.22

位移-抗拉强度曲线如图10所示。对比三组试验的位移-抗拉强度的斜率,从大到小的顺序为LAM、L-UHM、CM。这是因为采用L-UHM和LAM时,C/SiC经过激光加热,使得切削温度升高,基体熔化后填补了材料内部的孔隙^[20]。如图7~图9所示,采用LAM和L-UHM时,C/SiC表面孔隙数量减少且面积减小,使材料弹性模量增大,进而使得其抗拉强度增大^[21],故LAM和L-UHM的斜率大于CM的斜率。

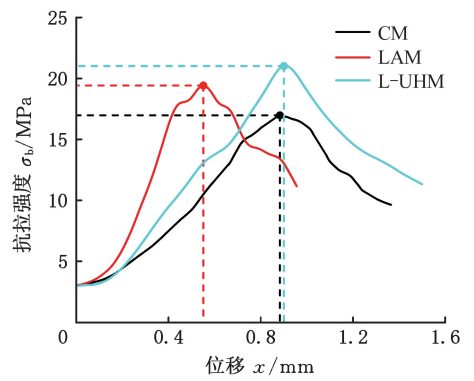


图10 位移-抗拉强度曲线

Fig.10 Displacement-tensile strength curve

在拉伸初始阶段,LAM和L-UHM与CM相比,双头螺柱在被拉伸单位长度时能承受更大的力,说明它具有更高的弹性模量,能够较为有效地抵抗形变。孔隙的大小和疏密程度不同导致不同的斜率。在拉伸中间阶段,三种方式下加工的螺纹特征分别达到其最大抗拉强度,随后由于螺纹牙不同时断裂而呈现逐渐下降的趋势。在拉伸结束阶段,三种加工方式下的位移-抗拉强度斜率趋于一致,说明加载的拉力主要由纤维承担,且纤维的抗拉强度基本一致。由于L-UHM刀具在超声振动的作用下实现断续切削,缩短了刀具和工件的接触时间,从而降低了切削温度^[16],基体熔化程度较LAM小,材料弹性模量较LAM小,所以LAM的斜率大于L-UHM的斜率。

牙顶表面若有明显的缺陷或不平整区域,会导致局部应力集中,从而加速材料疲劳或引发断裂。牙壁将外部载荷传递到螺纹接触面,如果牙壁表面存在较多缺陷,会导致接触不均匀,负载传递不连贯,从而影响螺纹特征的整体强度。牙底通常不会直接承受较大的外力,但在受力过程中仍然受到压缩和剪切作用,如果牙底表面存在较多缺陷,容易导致应力集中,从而加速断裂或疲劳破坏^[22]。如图7~图9所示,与LAM和CM相比,当采用L-UHM时,螺纹特征在牙顶、牙壁和牙底表面上的孔隙减少,纤维拔出、纤维脱黏和基体破碎现象得到抑制,有更少的表面缺陷。

采用L-UHM时的最大抗拉强度大于采用CM和LAM时的最大抗拉强度,最大抗拉强度较CM提高了29%,较LAM提高了10%,说明L-UHM提高了螺牙的最大承载能力。

4.2 螺牙剥离断面形貌

螺牙剥离断面形貌如图11所示。由于C/SiC复合材料C纤维束层间的间隙以及C纤维束与短纤维层间的间隙较大,因此C纤维束层间界面结合较弱。C/SiC复合材料的抗拉性能依赖于

纤维与基体之间的结合。韧性断裂通常表现为界面处的破坏,即纤维与基体之间的结合失效,从采用 CM 时的拉伸断口处可以观察到纤维束之间存在较大孔隙,而采用 LAM 时的拉伸断口处孔隙较小,因此 CM 试样更容易发生应力集中,从而导致界面相被破坏。

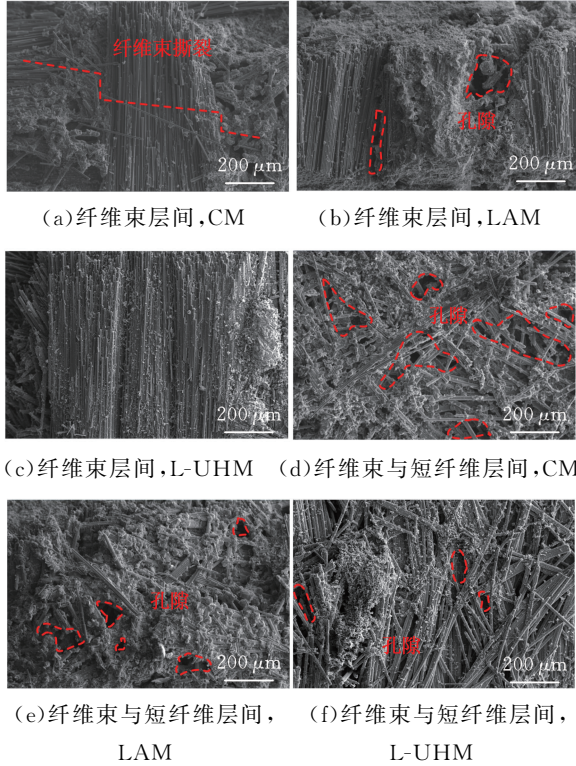


图 11 螺牙剥离断口形貌

Fig.11 Fracture morphology of screw tooth stripping

采用 CM 时,拉伸断口出现由纤维束和基体组成的台阶以及纤维束撕裂的现象,观察到以脆性断裂为主、韧性断裂为辅的混合断裂特征。采用 LAM 和 L-UHM 时, C/SiC 复合材料经激光加热后,可以一定程度上提高螺纹牙的抗拉强度。相比于采用 CM 时的断口形貌,采用 LAM 和 L-UHM 时的拉伸断口中无解离台阶,表现出韧性断裂特征,即界面剥离和脱层具有更好的拉伸性能,如图 11a~图 11c 所示。同时,纤维束与短纤维层之间存在较多孔隙,导致在拉伸试验中螺牙易在纤维束与短纤维层交界处被破坏,如图 11d~图 11f 所示。

加工后表面涂覆如图 12 所示,可以看出,采用 LAM 和 L-UHM 时,激光辐照在 SiC 基体表面时,激光能量被 SiC 吸收,导致 SiC 基体局部区域温度升高至其熔点以上, SiC 基体被加热熔化,熔融的 SiC 物质能够渗透到这些孔隙中,填补 C/SiC 复合材料中的孔隙,使纤维与基体的结合更加紧密,增加了 C/SiC 复合材料的致密度,提高

了应力传递效率,螺牙在受力时的应力分布更加均匀,减小了由于内部微观缺陷引起的局部应力集中。

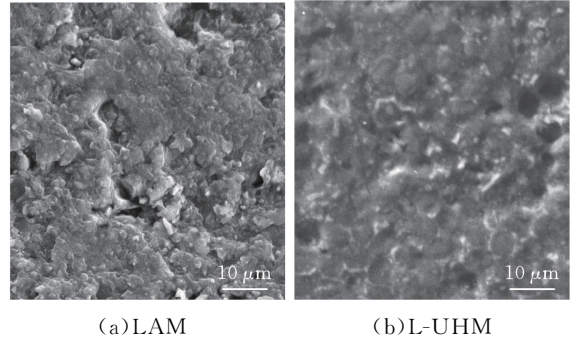


图 12 加工后表面涂覆

Fig.12 Surface coating after processing

5 结论

1) 激光超声复合加工(L-UHM)试验中,在牙顶、牙壁和牙底表面上,孔隙减少,纤维拔出、纤维脱黏和基体破碎现象得到抑制。此外,在牙壁和牙底的平行纤维方向上,纤维呈规律的阶梯状分布。

2) 双头螺柱拉伸试验中,采用 L-UHM 时的最大抗拉强度高于常规加工(CM)和激光辅助加工(LAM)时的最大抗拉强度,较 CM 提高了 29%,较 LAM 提高了 10%。

3) 相较于 CM、LAM,采用 L-UHM 时的螺纹特征微观缺陷减少,完整性更好,加强了纤维与基体之间的黏结性,不易产生应力集中,使得力学性能更优。

参考文献:

- [1] 马雪寒,王守财,陈旭,等.陶瓷基复合材料紧固件制造技术及其连接性能研究进展[J].复合材料学报,2023(40):3075-3089.
MA Xuehan, WANG Shoucai, CHEN Xu, et al. Review of Preparation Processes and Joining Performance of Ceramic Matrix Composite Fasteners [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023(40): 3075-3089.
- [2] ERDENECHIMEG K, JEONG H I, LEE C M. A Study on the Laser-assisted Machining of Carbon Fiber Reinforced Silicon Carbide [J]. Materials, 2019(12):2061.
- [3] WANG Jing, CHEN Xu, CHENG Laifei, et al. Effects of Channel Modification on Microstructure and Mechanical Properties of C/SiC Composites Prepared by LA-CVI Process [J]. Ceramics International, 2018,44:16414-16420.

- [4] QI Yuchao, FANG Guodong, WANG Zhangwen, et al. An Improved Analytical Method for Calculating Stiffness of 3D Needled Composites with Different Needle-punched Processes[J]. *Composite Structures*, 2020, 237:111938.
- [5] ZHANG Yunhai, LIU Yongsheng, CAO Liyang, et al. Preparation and Analysis of Micro-holes in C/SiC Composites and Ablation with a Continuous Wave Laser[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, 41:176-184.
- [6] GAVALDA D O, LUNA G G, LIAO Z, et al. The New Challenges of Machining Ceramic Matrix Composites(CMCs):Review of Surface Integrity[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, 2019, 139:24-36.
- [7] 柳思成, 李文生, 侯安印, 等. 小规格 C/SiC 复合材料紧固件加工及力学性能研究[J]. *机电产品开发与创新*, 2021(6):134-137.
- LIU Sicheng, LI Wensheng, HOU Anyin, et al. Study on the Processing Method and Mechanical Properties of the Small-size C/SiC Composite Fasteners[J]. *Development & Innovation of Machinery & Electrical Products*, 2021(6):134-137.
- [8] SUN Guodong, TAN Zhiqiang, ZHANG Qing, et al. Influence of Si and SiC Coating on the Microstructures and Mechanical Properties of C/C Bolts[J]. *Materials*, 2023(16):1785.
- [9] PARK C I, WEI Y, HASSANI M, et al. Low Power Direct Laser-assisted Machining of Carbon Fibre-reinforced Polymer [J]. *Manufacturing Letters*, 2019(22):19-24.
- [10] ZHOU Kun, XU Jiayu, XIAO Guijian, et al. A Novel Low-damage and Low-abrasive Wear Processing Method of Cf/SiC Ceramic Matrix Composites: Laser-induced Ablation-assisted Grinding [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, 302:117503.
- [11] ZHANG Menghua, XIA Ziwen, SHAN Chenwei, et al. Analytical Model of Grinding Force for Ultrasonic-assisted Grinding of Cf/SiC Composites [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 126:2037-2052.
- [12] XIONG Yifeng, LIU Cong, WANG Wenhui, et al. Assessment of Machined Surface for SiCf/SiC Ceramic Matrix Composite during Ultrasonic Vibration-assisted Milling-grinding[J]. *Ceramics International*, 2023, 49:5345-5356.
- [13] WANG Dongpo, FAN Hongjie, XU Dong, et al. Research on Grinding Force of Ultrasonic Vibration-assisted Grinding of C/SiC Composite Materials [J]. *Applied Sciences*, 2022(12):10352.
- [14] WANG Yashuai, LI Jiangtao. Experimental Study of the Removal Characteristics of C/SiC with Different Fiber Structure Arrangements for Two-dimensional Ultrasound-assisted Grinding[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 131:3467-3485.
- [15] CHEN Guangjun, XU Jinkai, WANG Jingdong, et al. Numerical and Experimental Study on the Amplitude Effect of Ultrasonic Vibration-assisted Milling of 3D Needle-punched Cf/SiC Composite [J]. *Ceramics International*, 2022, 48(12):17893-17914.
- [16] 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]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(9):189-205.
- [17] 安庆龙, 李晗, 陈杰, 等. 陶瓷基复合材料多能场辅助高效低损伤铣削加工工艺[J]. *航空制造技术*, 2023, 66(14):40-51.
- AN Qinglong, LI Han, CHEN Jie, et al. Multi-energy Field Assisted High-efficiency and Low Damage Milling Process of Ceramic Matrix Composites[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2023, 66(14):40-51.
- [18] 胡祥龙, 谭时雨, 潘成, 等. 细编穿刺 C/C-SiC 复合材料螺栓连接件的制备和力学性能研究[J]. *炭素*, 2023(3):1-7.
- HU Xianglong, TAN Shiyu, PAN Cheng, et al. Preparation and Mechanical Properties of Finely Braided and Punctured C/C-SiC Composite Bolted Joints[J]. *Carbon*, 2023(3):1-7.
- [19] CHEN Guangjun, WANG Jiaqi, XU Jinkai, et al. Effect of Forward and Reverse Cutting on Tool Wear Behavior in Ultrasonic Vibration-assisted Milling of 3D Needle-punched C/SiC Composites [J]. *Wear*, 2024, 552:205454.
- [20] 房金铭, 袁泽帅, 王俊山, 等. 碳纤维增强陶瓷基复合材料高温拉伸性能研究[J]. *导弹与航天运载技术*, 2022(4):77-79.
- FANG Jinming, YUAN Zeshuai, WANG Junshan, et al. Comparison of Tensile Behavior of Plain-woven Carbon/Silicon Carbide Composites at Room Temperature and High Temperature [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2022(4):77-79.
- [21] LI Lihua, ZHANG Chengyu, ZHANG Chen, et al. Compressive Strength and Damage Mechanisms of 2D-C/SiC Composites at High Temperatures [J]. *Ceramics International*, 2018, 44(12):14026-14031.