

陶瓷基复合材料多能场耦合激光加工综述

胡书珍, 田拥胜*, 张 洁, 李剑思, 郭圆圆

(工业和信息化部 产业发展促进中心, 北京 100846)

摘 要: 陶瓷基复合材料(CMC)因其卓越的高温稳定性、优异的机械强度及抗腐蚀性能,在航空器件领域展现出巨大的应用潜力。然而,由于其固有的高硬度、高脆性特征以及显著的各向异性,采用传统机械加工方式易产生崩边、分层和工具异常磨损等问题。激光加工作为一种非接触式高精度制造技术,已成为涡轮叶片气膜冷却孔和涡轮外环微槽加工的有效技术手段。CMC单一激光加工技术的核心原理在于通过精确调控激光波长、脉冲宽度、扫描策略等参数,实现对材料的选择性烧蚀或相变剥离。然而,单一激光加工中的瞬时高温会诱发多种热致缺陷。为此,总结了CMC多能场耦合激光加工技术,提出了多能场耦合激光加工未来的发展方向,以拓展CMC在航空发动机热端部件加工中的应用。

关键词: 陶瓷基复合材料;特种加工;激光微纳制造;能场复合加工;航空发动机;热端部件;缺陷控制

中图分类号: V263 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2620(2026)03-0045-14

DOI: 10.3724/j.GTER.20260019

Multi-energy field coupling laser processing of ceramic matrix composites

HU Shuzhen, TIAN Yongsheng*, ZHANG Jie, LI Jiansi, GUO Yuanyuan

(Industry Development and Promotion Center, Ministry of Industry and
Information Technology, Beijing 100846, China)

Abstract: Ceramic matrix composites (CMC) have great potential in the field of aeronautics due to their outstanding stability in high temperature, excellent mechanical strength and corrosion resistance. However, its inherent high hardness, high brittleness, and significant anisotropy lead to issues such as edge chipping, delamination and abnormal tool wear with traditional method. As a non-contact high-precision manufacturing technology, laser processing has become an effective method for the processing of turbine blade film cooling holes and turbine outer ring microgrooves. The core principle of CMC single laser processing technology is to achieve selective ablation or phase change stripping of materials by accurately regulating laser wavelength, pulse width, scanning strategy and other parameters. However, the instantaneous high temperature in single laser processing will lead to a variety of thermal defects. Therefore, the CMC multi-energy field coupling laser processing technology was summarized, and the future development direction of multi-energy field coupling laser processing was proposed to expand the application of CMC in the processing of aero-engine hot-end components.

Key words: ceramic matrix composites; special processing; laser micro-nano manufacturing; energy field composite processing; aero-engine; hot section component; defect control

0 引言

目前,提升航空发动机推重比的核心技术路径

聚焦于涡轮前温度跃升与轻量化结构设计两大方向。研究表明,当推重比突破12时,约70%的性能增

收稿日期:2025-06-17

作者简介:胡书珍(1985-),女,江西鄱阳人,高级工程师,博士,主要从事航空发动机气动、传热研究和技术管理工作。

通信作者:田拥胜(1983-),男,高级工程师,博士,主要从事航空发动机结构强度研究和技术管理工作。E-mail:tiangyongsheng@idpc.org.cn

引用格式:胡书珍,田拥胜,张 洁,等. 陶瓷基复合材料多能场耦合激光加工综述[J]. 燃气涡轮试验与研究,2026,39(3):45-58. HU Shuzhen, TIAN Yongsheng, ZHANG Jie, et al. Multi-energy field coupling laser processing of ceramic matrix composites[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2026, 39(3): 45-58.

益可归因于新型材料与先进制造工艺的协同创新。当前第5代战斗机发动机的涡轮前温度已攀升至2 000℃量级,远超镍基高温合金的熔点极限,亟需开发兼具低密度、高比强度、高比模量及超高温稳定性的先进复合材料。在此背景下,以碳纤维增强碳基复合材料(CMC-C/C)、碳化硅陶瓷基复合材料(CMC-SiC/SiC)为代表的陶瓷基复合材料(CMC),正逐步替代传统合金应用于航空发动机涡轮叶片等热端部件。美国及欧洲部分国家已将抗氧化CMC应用于航空发动机涡轮转子、涡轮外环、整体涡轮盘、加力燃烧室喷管、燃烧室喷嘴等热端部件,并进行了相关试车考核。例如,美国已对其研制的抗氧化CMC整体涡轮盘进行了1 760℃地面超转试验考核。这些材料的工程化应用显著提升了热力循环效率,为新一代航空发动机的性能突破奠定了材料学基础。

基于CMC在高温强度、抗热震性及耐腐蚀性方面的综合优势,该材料已在航空发动机密封环、高压涡轮机匣、尾喷管调节片等关键部位实现规模化应用。为满足航空领域对CMC零部件的量产需求,本文针对CMC零部件采用传统机械加工方式存在的崩边、分层等问题,概述了CMC的传统加工技术和特种加工技术;介绍了CMC激光加工机理;分析总结了多能场复合激光加工CMC的技术特点;阐述了CMC多能场耦合仿真模拟和机理研究进展。研讨所获结果以期为CMC在发动机热端部件中的工程应用提供技术参考。

1 CMC传统加工技术

从微观结构层面分析,CMC由4类功能单元协同构成:陶瓷基体形成基础承载网络;高模量增强纤维(如碳纤维或SiC纤维)通过裂纹桥联机制实现增韧;界面相通过调控纤维/基体结合强度优化应力传递效率;环境障涂层则提供高温氧化与燃气腐蚀防护。CMC的宏观性能呈现显著方向依赖性,其根源在于增强纤维的空间排布架构。根据纤维织构差异,材料可分为单向铺层、二维正交编织、2.5维层间穿刺及三维整体编织4大类型。不同织构导致材料在热传导路径、断裂韧性等关键参数上存在方向性差异。例如,三维编织结构的横向热导率较二维编织结构的可提升40%以上。值得注意的是,界面结合强度作为核心调控参数,直接决定载荷在基体与

纤维间的传递效率;过高的界面结合强度会引发脆性断裂,而过低的界面结合强度将削弱增韧效果。这种由纤维取向、界面特性及基体性能构成的复杂耦合机制,最终主导了CMC在热机械载荷作用下的非线性变形行为与失效模式。

CMC的规模化加工目前仍以传统机械加工技术为核心载体。其中,钻削^[1-2]、铣削^[3-4]与磨削^[5-6]构成主流工艺体系。CMC固有的高硬度特性、本征脆性、多相非均匀结构及强各向异性,导致加工过程中刀具急剧损耗,继而引发增强纤维断裂、基体微孔洞增生、界面相解离以及裂纹网络扩展等典型损伤。研究人员通过优化刀具几何结构、工艺手段和策略来抑制切削温升、降低加工抗力,但内部裂纹扩展行为的影响机制仍需深入探究。总体而言,传统机械加工作为接触式去除工艺,在刀具耐久性与加工表面完整性之间难以建立理想平衡,这促使非接触式特种加工技术逐渐成为前沿研究焦点。

2 CMC特种加工技术

水射流加工、电火花加工、超声波加工和激光加工等CMC特种加工技术已在实践中得到应用。这些非接触式加工技术能够有效克服传统机械加工的局限性。

水射流加工无热应力和热变形,但加工精度有待提高。电火花加工可用于高精度轮廓制备,但仅适用于导电材料。电火花加工的核心技术优势在于,加工过程完全不受材料硬度制约,且可通过电极形貌精确复刻,在工件表面实现微米级复杂轮廓成形。然而传统电火花加工对材料导电性有硬性要求,CMC的低电导特性导致其难以直接进行电火花放电加工。尽管可以向CMC基体引入导电第二相提升整体电导率,或构建电化学电解池环境通过界面反应激发放电,但放电间隙内反向热流分布引发电极异常损耗,同时局部过热引发的过烧蚀现象将严重损害表面完整性。该技术兼具设备成本低、三维成形精度高等优势,在处理大深径比微孔及曲面腔体时展现出独特潜力,未来需重点揭示其工艺参数与材料响应间的耦合机制。

超声波加工和激光加工在CMC微纳制造中应用广泛,避免了刀具磨损和机械应力等问题,但仍面临CMC加工损伤严重等诸多挑战。CMC加工损伤如图1所示^[7]。超声振动能量场辅助制造可使轴向/

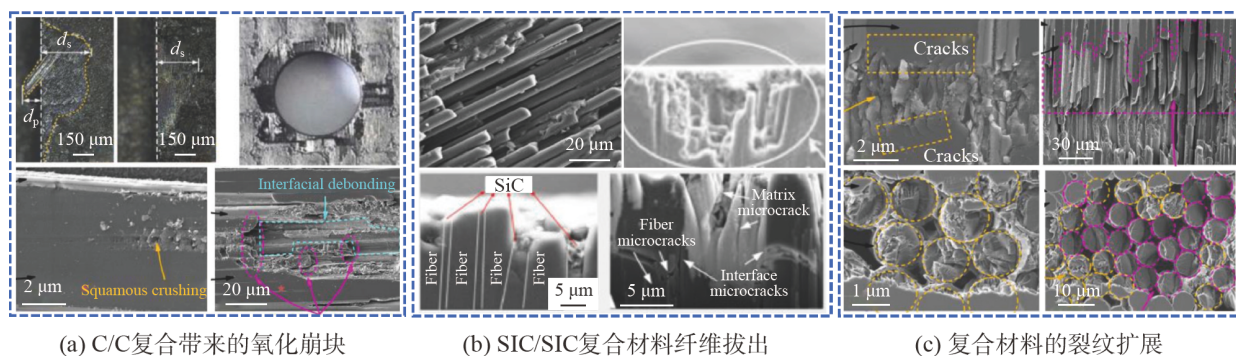


图1 陶瓷基复合材料加工损伤^[7]
Fig.1 Machining damage of ceramic matrix composites

法向切削力同步降低25%~30%,但工具-工件接触界面处振动能量诱导的裂纹亚临界扩展行为仍待阐明^[7]。激光预处理技术^[8-9]被用于在机械加工前实施局部相变软化,通过降低刀具作用区瞬时硬度来延长刀具寿命并阻滞应力波传播。然而,该技术因涉及光-热-力多物理场实时耦合,在工业化应用中仍存在控制时序协同难题。

此外,单一能场的CMC特种加工技术存在工艺不稳定、能场作用方式多样及加工机理不明晰等一系列问题。ZHANG等^[10]研究了水射流加工、电火花加工、超声波加工及激光加工等特种加工技术在CMC钻削领域的应用进展,提出的定量关联模型揭示了临界能量阈值对缺陷形成的调控规律。DU等^[11]重点对比了机械研磨、激光重熔与化学机械抛光对表面凹坑的修复效果,探明了不同能场施加方式对加工效果的不同影响。GAVALDA DIAZ等^[12]则通过截面显微分析发现旋转超声加工能降低亚表面裂纹深度,并系统总结了热-力耦合损伤的抑制方法。ZHANG等^[13]通过分子动力学仿真阐明了多能场辅助可降低界面能垒,促进位错滑移而非脆性断裂。这些研究均是针对不同能场下CMC特种加工机理的数学模型建立和加工机理的探索。

3 CMC激光加工机理

激光加工技术的核心在于利用高能量密度光束在材料表面实现局部能量沉积,其通过精密光学系统将辐射能聚焦于微观区域,从而完成对目标物的蚀除、改性或连接。该技术规避了传统机械加工过程中产生的刀具损耗与工件形变问题,通过精准调控激光的功率密度、脉宽及重复频率等核心参数,可

有效抑制加工区域的热影响范围。飞秒量级的极短脉宽使得能量在材料晶格热传导发生前即被吸收,极大降低了热损伤风险。

GAVALDA DIAZ等^[14]通过微拉曼光谱法表征了SiC/SiC复合材料的表面应力和化学组成,并讨论了不同阶段残留应力的来源以及材料的断裂行为与残留应力之间的关系。CHEN等^[15]进一步采用拉曼映射方法,并基于峰值移位将其转换为残留的应力分布图,测量并分析了C_f/SiC复合材料铣削中加工表面的残余应力。LIU等^[16]结合碳纤维脆性断裂和SiC矩阵破裂,证明了脆性去除是CMC主要的材料去除机制,并观察到弯曲和剥离碳纤维造成的撕裂损伤。LI等^[17]沿纵向纤维和沿横向纤维进行实验,发现脆性断裂是主要的材料去除机制,其会导致严重的内部损伤。此外,由基质压碎组成的脆性断裂、纤维-界面的脱键和纤维裂缝是公认的材料去除机制。为了评估纤维层间特性,微机械测试是有效的手段,如单光纤拉出测试,微纳力学测试等。ZHANG等^[18]测试了热解碳的界面剪切强度,并将剥离的碳纤维向后推获得了热解碳的界面摩擦系数,为界面力学的数值模拟和加工过程中的材料去除机制分析提供了理论基础。因此,研究CMC在微/纳米尺度下的断裂与材料去除行为,对于揭示加工过程中的缺陷形成机理、改善加工质量具有重要意义。CMC在多能场作用下的性能演化如图2所示。

超短脉冲激光的核心特征在于其皮秒至飞秒量级的极短持续时间。在此时间尺度下,能量传递机制主要表现为光子与材料内部电子的直接量子化交互过程。然而在CMC的激光加工过程中,能量吸收机制呈现特殊复杂性。材料内部增强相与基体的异

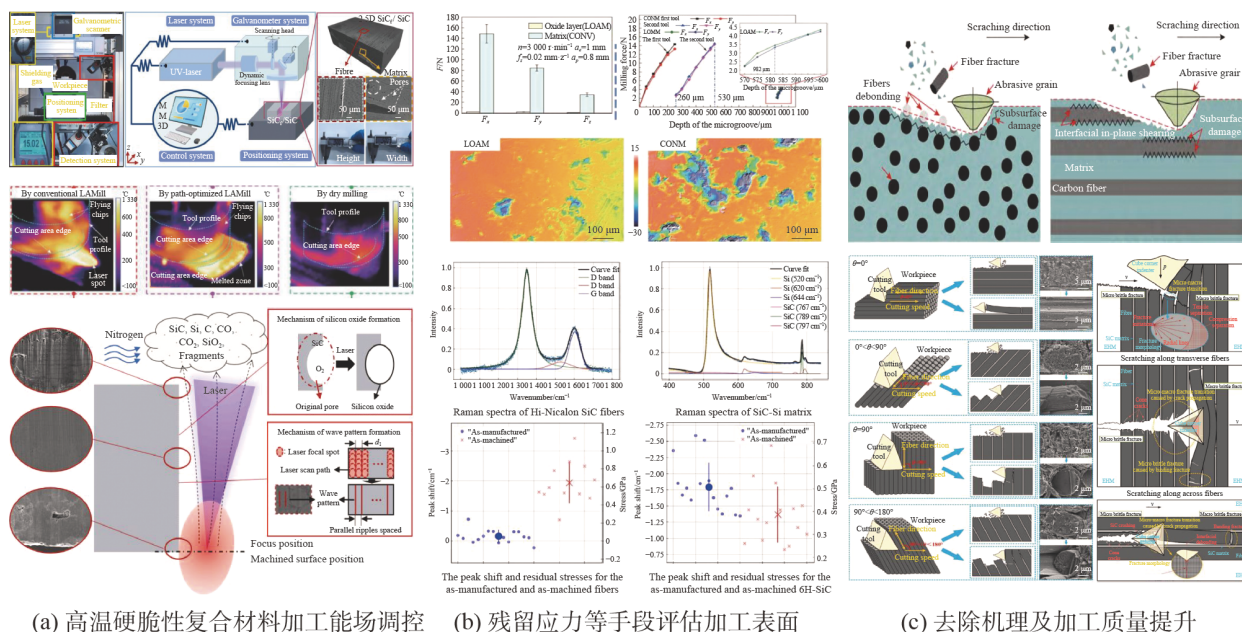


图2 陶瓷基复合材料在多能场作用下的性能演化

Fig.2 Performance evolution of ceramic matrix composites under multi-energy field

质结构通过电子-光子非弹性散射高效吸收光能,并迅速将光子能量转化为晶格热能。在激光束聚焦中心区域,汽化产生的自由电子在振荡电磁场中被加速至高能态,通过与中性粒子的碰撞引发雪崩电离效应,最终形成高密度等离子体云。该等离子体在纳秒量级内发生剧烈膨胀,产生向材料内部传播的冲击波,其机械应力可辅助蚀除熔融层下方的未相变材料,构成第2种材料去除机制。CMC激光加工行为本质上由其多相异质结构决定,这种结构特性导致材料的热物理参数呈现显著各向异性。在高强度增强纤维与脆性陶瓷基体构成的双相体系中,纤维轴向与径向的热膨胀系数及热导率存在数量级差异,这种特性深刻影响着激光能量在材料内部的传递路径与相变动力学。纤维与基体间的热膨胀失配会引发复杂的界面应力响应,在界面区域形成局部应力集中。当界面结合强度不足以抵抗该热应力时,将诱发微裂纹沿界面扩展,甚至引发基体/纤维脱黏等层间损伤^[19]。这种损伤模式在连续纤维增强CMC中具有不可逆性,会显著削弱复合材料的层间剪切强度。值得注意的是,加工过程中的高温化学反应进一步增加了工艺复杂性。当激光使SiC基体升华时,气化物质与环境中的氧发生竞争性氧化反应,一部分SiC蒸气通过被动氧化生成气态SiO与CO,另一部分则经主动氧化路径形成微米级非晶

SiO粉尘^[20]。这些固态氧化产物会沉积于加工表面,形成低热导率覆盖层,阻碍后续激光能量向基体传递,从而显著降低有效能量吸收率。

4 多能场复合激光加工CMC技术

为进一步提高航空发动机中以C/C、SiC/SiC等为代表的CMC的加工尺寸精度和表面质量,解决传统机械加工过程中存在的碳化氧化和组织性能降低等问题,需依赖于特种能场加工技术。而单一的特种能场加工技术具有一定的局限性,其表面加工质量难以满足航空发动机热端部件在极端复杂恶劣环境下苛刻的服役要求。多维复合能场耦合飞秒激光加工技术作为一种新兴的先进制造技术,展现出高效、低损伤加工的潜力。从多物理场耦合机制模式到微观组织演化再到性能调控与逆向寻优的研究框架,有望解决新一代航空发动机制造技术瓶颈问题。遵循能场协同与性能的耦合物理本质,系统构建以CMC增效制造为目标的超声辅助激光技术、以变性诱导微细结构为目标的激光机械耦合改性技术及以硬脆材料提质加工为目标的流场辅助激光损伤抑制技术等三大系统。为面向特定应用场景的工艺创新提供更具启发性的理论指导,从理论、技术、工艺等角度进一步突破,解决CMC的精密低损伤加工难题,实现航空发动机热端部件的高质量、高效率、高

精度制造。

4.1 激光处理方法

根据激光输出的时间尺度,激光加工方式可分为连续波、准连续波、短脉冲和超短脉冲4类。连续激光器可实现能量持续输出,具备低峰值功率和高平均功率的特点,已被用于C/SiC材料的通孔制造。超短脉冲激光具有高峰值功率和超短脉冲持续时间属性,理论上可以实现无热影响的非热熔性加工,非常适用于微型制造和高精度CMC加工。目前已被应用于制造微孔^[21],微槽^[22],增强环境屏障涂层的SiC/SiC结合强度的微观互锁结构^[23],C/SiC的同心环结构^[24],超亲水性表面上的微阵列结构^[25]以及C/SiC表面上的周期性纳米聚合物^[26]。短脉冲激光能够在保证加工效率的同时,有望取代连续激光加工CMC的预制特性,将热冲击限制在可控范围内。但是连续激光的热积累效应明显高于脉冲激光,可以获得更大的烧蚀深度来匹配加工余量。

WANG等^[27]探索了利用皮秒激光和飞秒激光加工C/SiC材料的特性,证明了低功率飞秒激光加工能够减轻烧蚀缺陷和氧化,但低功率飞秒激光器易与低加工效率相关联。此外,脉冲宽度和脉冲能量的相互作用对实验结果的影响也不能排除。ZHAI等^[28]计算了不同激光波长下CMC的烧蚀阈值,发现长波长激光有利于提高材料的消融速率。ZHANG等^[29]在使用紫外纳秒激光钻孔时观察到类似的效果,并且通过光化学效应获得了高质量的通孔,但必须根据使用情况选择合适的激光波长。从长远看,传统的激光加工工艺已难以满足CMC日益复杂的加工需求。将激光加工与超声振动、流体、等离子体和化学腐蚀等其他加工技术结合,可实现加工工艺的优化和加工质量的提高,为复杂难加工任务提供了新的解决方案。

4.2 超声振动辅助激光加工

针对CMC的加工,研究人员最初沿用金属材料的传统机械加工方式,但受材料硬脆性、切削力过大等因素影响,容易产生材料损伤和刀具损耗等两类

加工缺陷,制约了CMC的应用。为此,超声振动辅助和激光热辅助分别被引入传统机械加工,用以解决切削力大、材料室温硬脆性引发的加工损伤,从而提升复合材料加工表面质量。研究表明,超声振动辅助激光加工通过促进排屑促流作用,可以实现脆性材料的增效制造;而激光辅助机械改性技术可通过变性诱导CMC微细结构,是提升其表面性能的有效技术手段。表1对比了不同超声辅助机械加工技术制备CMC的性能。

超声振动辅助机械切削将连续加工方式改变为间歇式加工,能够有效降低切削力。GAO等^[30]利用自行设计的超声系统实现了超声辅助铣削高频纵扭复合运动,证明了多能场耦合技术在CMC铣削力及织构加工形态方面的显著优势和应用潜力,但刀具磨损严重。WANG等^[31]通过实验分析了各种CMC微观结构,发现旋转超声波加工可有效提高C/SiC复合材料加工质量。但是超声波振动会对C/SiC工件的质量、材料和形状等产生不稳定影响,超声振动辅助对CMC的表面质量影响不确定性较大,在不同方向对纤维和表面完整性的影响效果不同,缺乏统一的、科学的定量描述。超声振动辅助机械加工CMC的典型形式如图3所示。

以CMC增效制造为目标的超声辅助激光技术利用超声高频振动来改变工具与工件的接触状态,从而有效抑制材料的间断性去除,促使定向断裂控制和层状剥离特征形成,实现从原始的纤维弯曲断裂和基体块状断裂,转变为一致的纤维剪切断裂和基体粉末化去除。该加工技术有效削弱了材料各向异性对加工效果的波动影响,促进碎屑排除以实现高效率加工,并利用分子波冲击壁面实现壁面致密化。激光对CMC中高硬度SiC基体进行预改性并形成烧蚀形貌和烧蚀沟槽,激光辐照会在材料表面形成沉积层,有效降低基体与纤维之间的结合强度,从而显著改善材料的可加工性。超声波发生器可以控制工件垂直方向的振动,借助振动效应改进激光加工。超声振动辅助激光加工利用超声振动的近场对

表1 不同超声辅助机械加工技术制备CMC的性能
Table 1 Performance comparison of CMC prepared by different ultrasonically assisted machining techniques

加工方式	加工粗糙度/ μm	碳化/氧化/损伤层厚度/ μm	裂纹缺陷扩展
超声振动辅助磨削	1.5~5.6	~30	脆性断裂
超声振动辅助铣削	1.2~8.4	—	纤维脆性断裂、纤维拔出—凹坑
超声振动辅助车削	2.0~12.0	~50	基体裂纹、界面脱离

流增强效应来改善烧蚀颗粒的冷却,减弱颗粒黏附在材料表面的趋势^[32],从而降低表面氧化和热损伤。此外,碳纤维和碳化硅基体在高频振动下均匀地吸收激光能量,大大减少了带状凹坑、断裂和纤维间空隙等缺陷,使表面平整;超声波的声流和空化效应降低了等离子体的屏蔽和散射效应,提高了CMC的材料去除率;激光加工产生的高压冲击波对工件施加残余压应力,超声振动也对碳纤维进行压缩和塑性变形,其近场对流提高了热消散效率^[33],从而抑制了残余压应力的释放,并提升了材料的性能。这使得超声振动辅助激光加工成为同时提高CMC加工效率和表面质量的有效方法。超声辅助机械加工的纤维/表面/孔形损伤如图4所示。

为进一步提高复合材料加工表面质量和降低刀具磨损,激光热辅助被引入传统机械加工,通过激光加热工件实现材料软化或改性,以减小切削力和延长刀具寿命。YOU等^[34]和WU等^[35]分别通过激光辅助切削和激光辅助氧化微细铣削提高了CMC的材料去除率,改善了TiAl复合材料工件表面质量。主要原因在于CMC在激光热作用下由脆性转变为韧性、改变局部材料的相/微观结构,提升了材料的可加工性,同时该方法还可减少刀具磨损,延长刀具

寿命。ATTIA等^[36]研究了激光辅助高速车削的加工特性,该工艺可显著降低切削力并改善表面光洁度,但存在热塑性不稳定等加工缺陷,证明了其在CMC加工中具有极大的应用潜力。XU等^[37]对激光辅助车削进行了全耦合热力模拟,证明了加工形性主要受激光加热引起的热塑性不稳定性影响。

以变性诱导微细结构为目标的激光机械耦合改性技术,通过激光热效应与机械载荷的协同作用,将工件局部升温预热后进行CMC机械加工。工件受热后其断裂韧性降低而延展性增加,呈现出脆性向塑性的转变。多能场耦合加工CMC的接触区域的塑性作用可以有效抑制脆性裂纹的萌生与扩展,提升加工表面质量。此外,通过激光能量密度诱导纤维界面氧化、SiC晶相转变乃至形成非晶态结构,再利用机械载荷实现材料的可控去除,诱导亚表层形成改性层,实现对加工表面完整性的主动设计与微纳尺度织构调控。

激光多能场复合加工技术通过改变工件材料的性质或变形行为、诱导相变或结构改变、改变刀具/工件相互作用以及改善切屑过程,以有效地利用每种非传统能量的独特优势,同时减轻单一特种能场加工的局限性,从而提高CMC的加工效率和加工质

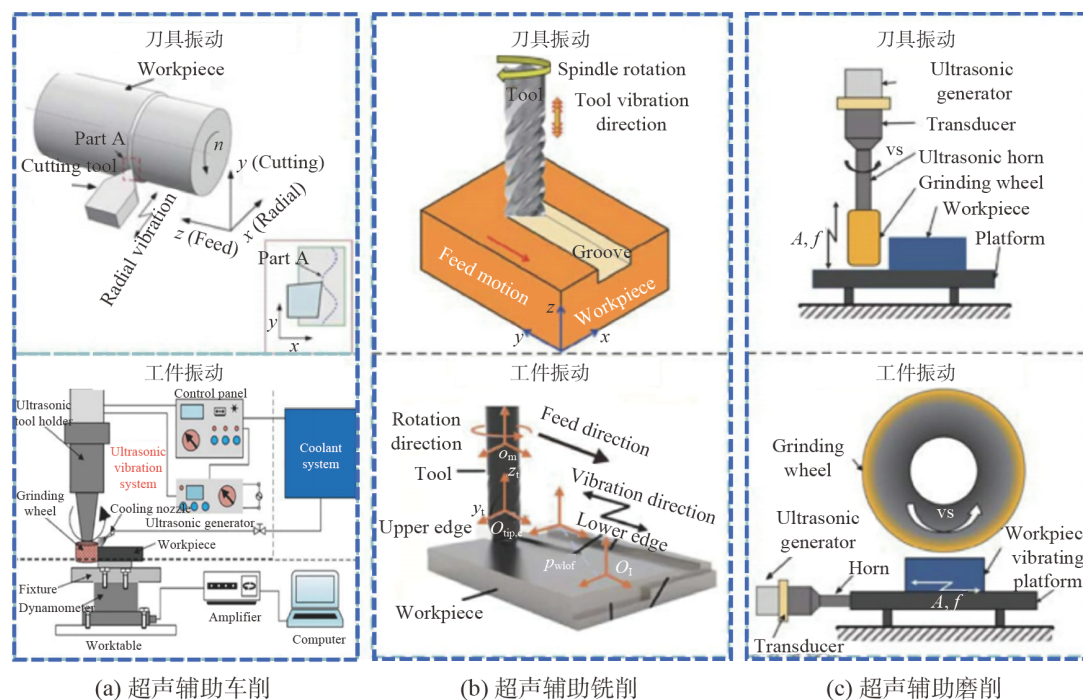


图3 超声辅助机械的典型形式

Fig.3 Typical forms of ultrasonically assisted machinery

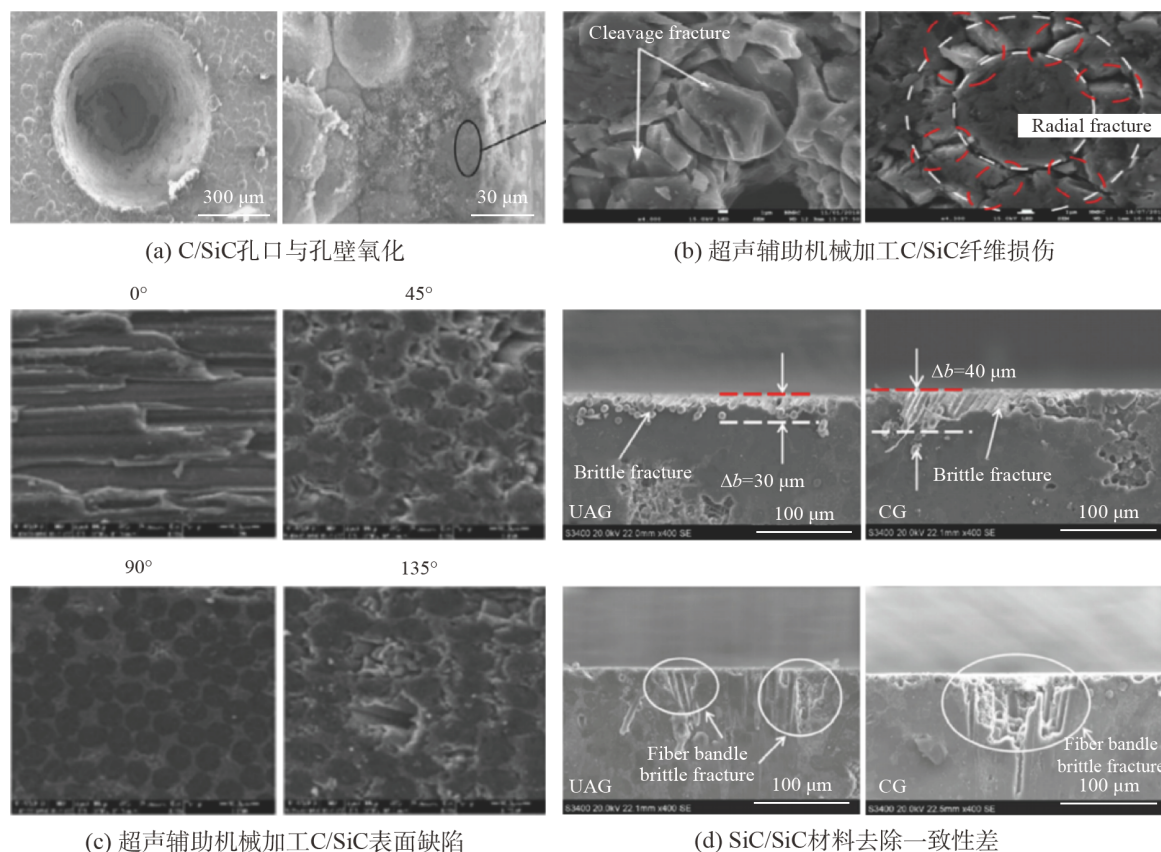


图4 超声辅助机械加工的纤维/表面/孔形损伤

Fig.4 Fiber/surface/hole damage in ultrasonically assisted machining

量。DOMINGUEZ-CABALLERO等^[38]进行了激光/超声/切削实验,发现加工表面的破碎颗粒和缺陷更少。目前,激光/超声/切削加工在高温复合材料中的应用研究仍然有限,缺少对复合场加工损伤演化机理的深入研究;同时,该加工工艺复杂多变,微小的误差也会对CMC工件表面质量产生显著影响。KIM等^[39]和LI等^[40]利用激光和超声波振动辅助加工提高了3种微晶复合材料的加工性能,其加工过程首先利用激光加热并软化材料,而后采用超声波振动切削刃去除软化的材料。为增强材料在车削过程中的可加工性,DESWAL和KANT^[41]使用了一种激光超声辅助铣削技术,显著降低了切向、径向和进给方向的切削力,有望突破CMC等难加工硬脆性材料的加工瓶颈。PENG等^[42]将超声椭圆振动与激光加热相结合,以辅助车削复合材料,有效降低了切削力,提高了材料去除能力,减少了表面损伤。但是目前CMC多能场工艺研究的工艺参数选取均为试错式,激光、超声、机械变量较多,影响CMC加工质量的因素较多,缺少多能场耦合机理系统性研究,

导致多能场加工CMC效果提升有限。激光辅助机械加工的典型形式如图5所示。

在CMC多能场复合加工中,激光热无法精准控制,由此导致的裂纹、相变及热影响区不容忽视,材料去除量大、存在加工区域与非加工区域的缺陷过渡区,严重影响加工质量和服役性能。CHEN等^[20]实验研究了SiC/SiC复合材料的激光烧蚀,发现烧蚀产物形成了凝结层、再结晶层、热影响层等缺陷过渡区。XIE等^[43]发现激光烧蚀产物会堆积在沟槽表面,导致裂纹扩展,加工质量差。WANG等^[27]在CMC激光烧蚀研究中同样发现,氧化物可在热影响区重新固结并发生相变。同时,由于CMC组分复杂,各向异性和异质,加工过程中容易在纤维矩阵和界面上形成各种加工缺陷,并且加工区域热和力通过纤维/基体向非加工区域传播,进而造成材料内部损伤。此外,多能场耦合作用下温度场、化学场与应力场等的时空分布及非线性耦合机制研究仍处于空白,有待开展相应的研讨工作。激光热诱导的裂纹和相变及热影响区和缺陷过渡区如图6所示。

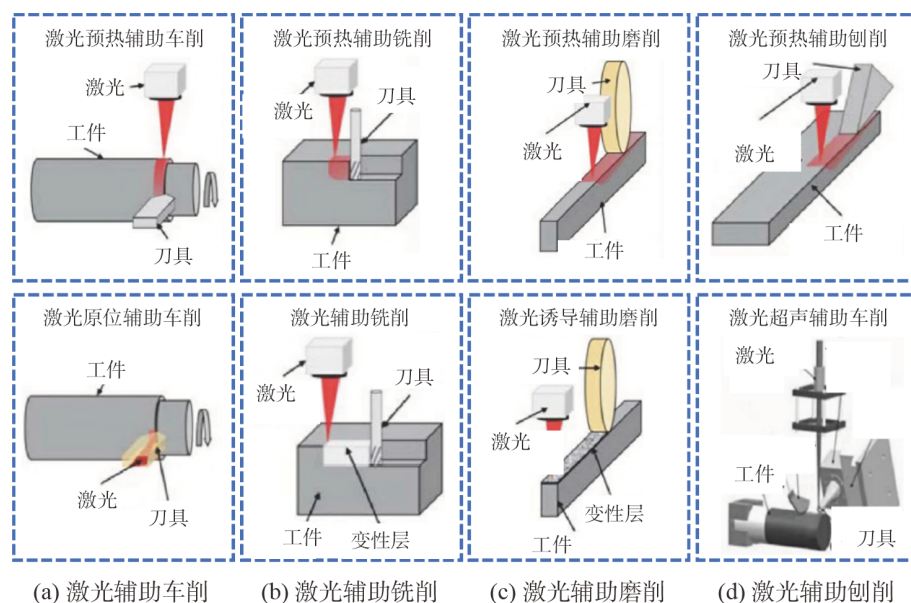


图5 激光辅助机械加工的典型形式
Fig.5 Typical forms of laser-assisted machining

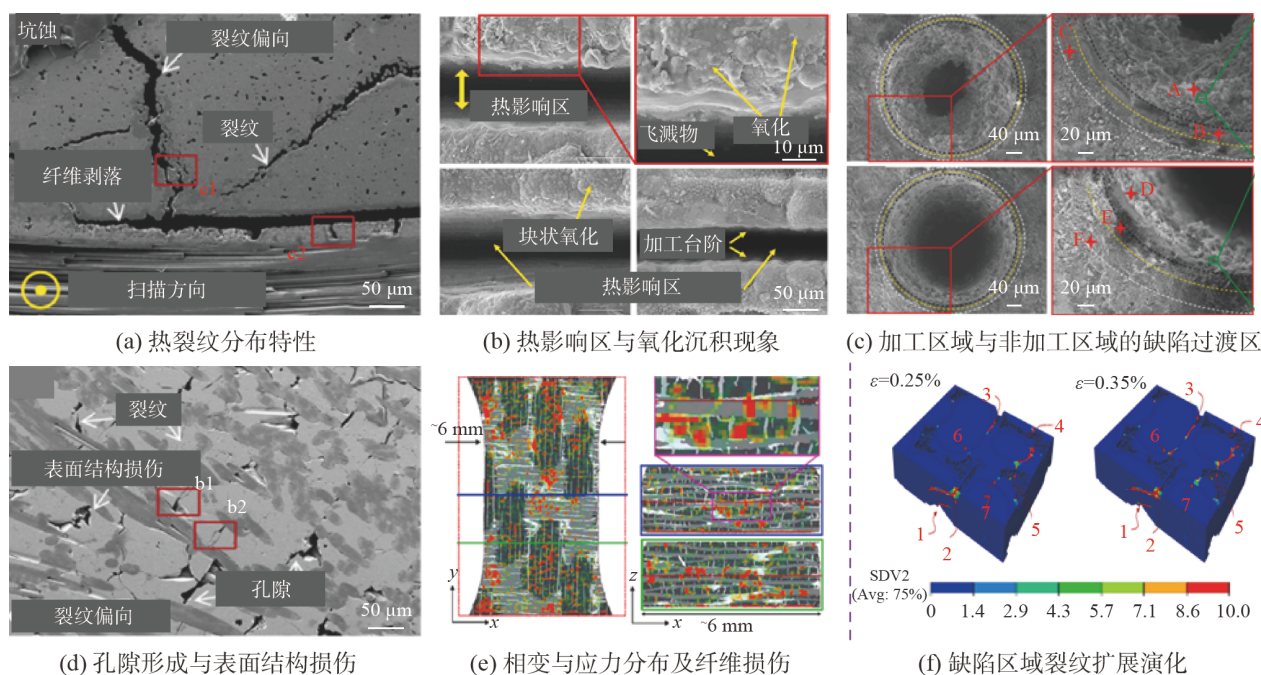


图6 激光热诱导的裂纹和相变及热影响区和缺陷过渡区
Fig.6 Laser thermally induced crack, phase transformation, heat affected zone, and defect transition zone

单一激光加工深孔存在排屑难、散热难等问题。为解决这些问题,ANCONA等^[44]研究了高功率和高重频下超短脉冲激光对微孔加工的影响,发现过高的重复频率(200~400 kHz)会造成等离子体对激光能量的屏蔽,进而引起加工效率的下降。而激光辅助超声气膜孔加工可以有效地解决上述问题。

ALAVI和HARIMKAR^[45]在连续激光微孔加工过程中加入超声振动辅助,提高了微孔的加工质量和效率。LAU^[46]、YUE^[47]等进行了超声辅助毫秒激光加工实验,发现超声辅助激光加工可减小热影响区和重铸层厚度,提高盲孔深度。KIM和JEONG^[48]在纳秒激光加工过程中辅助超声振动,发现超声振动

能够降低等离子加热的空气温度,提高传热效率和激光加工效率。PARK等^[49]在利用飞秒激光进行微孔加工时,采用500 Hz的超声振动透镜,显著减少了加工毛刺。DONG等^[50]实验研究了激光重叠率对飞秒激光加工微孔质量的影响,发现在飞秒激光脉冲重叠范围内可减少微孔重铸层和微裂纹的出现,减弱热效应。MORENO等^[51]使用飞秒脉冲激光对碳纤维增强复合材料进行了实验研究,发现短脉宽、高峰值功率密度的超短脉冲激光凭借其冷加工特性可以减小热应力和热损伤。由此可见,超快激光具备一定程度上的冷加工特性,加工过程中的热损伤和应力小,是CMC深孔加工的理想手段。

4.3 流体辅助激光加工

流体辅助激光加工将激光和流体相结合,利用激光能量和流体的冷却或动量特性来实现CMC的高精度、低损伤加工。研究表明,流体辅助激光加工技术可以提高硬脆材料的加工质量并实现损伤抑制。流体辅助激光加工技术利用水束的强效冷却作用和冲击力,在激光脉冲间隙对加工区进行快速冷却,并同步冲刷掉熔融产物且增强散热效果。加工过程中的热影响区被严格控制在极小范围内,几乎不产生微裂纹和热应力损伤,可有效保证切边平行度和极窄的切缝宽度,特别适用于航空发动机热端部件等对表面完整性要求极高的关键构件极端制造。WANG等^[52]通过流动-热烧蚀耦合理论解释了烧蚀速率增加的机理,发现降低熔池局部压力和增加前侧压头可以增强升华和气热烧蚀效应。相比之下,碎片在水环境中迅速冷却和凝固,阻碍了碎片沿激光传输路径的溅射,提高了激光深加工CMC的能力。然而,静水环境也会带来不利的影响,其中槽边缘被清理,但碎片迅速凝固并留在槽内形成重铸层。水膜的存在也会增加材料烧蚀阈值^[53],水在高温下形成的蒸汽和气泡可以折射或反射激光^[54]。流体

使用减少了这种不利影响,并通过磁场的洛伦兹力改变了等离子体的分布,有效降低了碎片和等离子体对激光能量的吸收^[55]。

水射流的辅助作用增加了加工区内碎屑的清除速率,并有效地冷却了加工区域。此外,水射流的引导作用使激光束能够精确地沿着预定的路径运动,而不受焦距的影响。随着水射流速度的增加,切割面将被清理干净^[56]。然而,速度过高的水射流将沿着侧壁回流、喷射和飞溅,导致射流变形,从而影响激光传输并降低加工深度。此外,高动态黏度和高压辅助气体对射流边界层具有较强的黏性力,增强的“屏蔽效应”限制了射流流量的损失,使射流更加稳定。

在宏观尺度,研究人员通过红外热像仪实时监测加工区的温度分布,研究了激光辐照下CMC表面的热行为与温度场演化规律;在介观尺度,采用单颗粒划擦方法研究了硬脆性复合材料的去除机理与损伤失效行为;在微纳尺度,结合有限元分析、离散元方法与分子动力学模拟,从CMC缺陷形成及构型机理层面揭示了能场耦合对CMC微观结构和表面织构演化的影响机制。这些研究均推动了CMC航空构件高性能制造的完整技术谱系构建。

5 CMC多能场耦合仿真模拟和机理研究

尽管激光加工技术在CMC制造领域取得了显著进步,但其工业化应用仍面临巨大挑战。随着航空航天与电子装备对CMC构件性能要求的不断提升,现有多能场耦合激光加工体系亟需通过多学科融合创新实现技术跃迁。为此,需融合热应力耦合理论、激光诱导等离子体流体动力学和脉动光学原理,构建多能场耦合仿真模拟和机理研究全链条构型,精确揭示材料表面织构演化规律与加工过程中的瞬态稳态过程,为航空航天CMC部件加工提供理

表2 不同加工技术加工CMC的性能对比与适用范围
Table 2 Performance comparison and application scope of CMC processed by different processing technologies

加工方式	切削力	表面粗糙度/ μm	裂纹深度/ μm	工具寿命	适用目标
机械加工	基准	1.2~5.0	~12	磨损严重	粗加工、低效去除
激光加工	—	0.8~3.0	~5	能量衰减	对热影响区要求低
超声加工	降低30%~50%	0.8~4.0	~8	换能耗散	轮廓铣削
超声辅助激光	—	0.5~1.6	~4	—	高效加工气膜孔/提升排屑效率
激光辅助机械	降低50%以上	0.8~5.0	~7	延长30%	变性诱导CMC微细结构/复杂型面表面织构
流体辅助激光	—	0.2~1.0	~3	—	硬脆材料高质量加工/损伤抑制

论指导。

多能场耦合激光加工CMC所涉及的固-液-气多相转变,本质上是能量-物质相互作用下的非平衡相变过程,涵盖熔化汽化及冷却固化阶段。而多物理场非线性耦合过程中,控制方程组的闭合求解面临本构关系复杂与边界条件动态变化的双重挑战。熔池内部的驱动力体系由表面张力、反冲压力、剪切力及浮力构成,同时还受温度梯度、环境气压及保护气流的协同调制。此外,激光诱导等离子体与材料蒸气之间的相互作用存在显著的屏蔽效应,时空演化规律及能量衰减机制仍缺乏精确的定量描述。因此,研究多能场间的匹配关系与协同作用机制不仅一直是开展CMC多能场耦合激光加工仿真的理论前提,更是提高工艺稳定性的核心机理问题。

通过构建涵盖宏观热演化、介观形态演变及微纳尺度织构缺陷的多尺度模型,可显著提升材料设计与构件性能优化的精度与效率。WANG等^[57]针对TiC/Ti₆Al₄V复合材料的激光加工过程开展了温度场与热演化历程的仿真分析,研究了热累积效应对热循环特征的调制作用。顾冬冬等^[58]研究了激光加工CMC过程中剧烈的热循环与非平衡固态相变,发现其极易诱发热应力、显微组织应力与凝固收缩应力的多场耦合交互作用,形成局部应力集中区,进而引发构件变形甚至开裂失效。HUO等^[59]进一步对TiC/Ti₆Al₄V复合材料的压缩变形行为开展了数值模拟研究,通过提取应力集中区域的位置矢量分布与应变幅值演化特征,揭示了该材料在复杂热-力耦合条件下的压缩断裂机制,为工艺参数优化提供了理论依据。

目前数值仿真建模范式主要通过耦合固体热传导方程与变形几何模块,构建连续/纳秒激光辐照下CMC的瞬态温度场与时空分布模型。模型中网格变形速率以SiC熔点为阈值进行定义,进而实现对烧蚀区边界及热影响区演化特征的预测^[20]。WANG等^[60]基于纤维真实几何尺寸与编织拓扑结构构建了CMC的代表性体积元模型,采用高斯体积热源加载方式,建立了涵盖热传导、对流换热、热辐射以及材料氧化与升华所诱发相变潜热的多物理场热力学模型,并引入了水平集方法对熔池动态界面进行捕捉与重构。ZHAI等^[28]建立了纳秒激光辐照纤维编织结构的多尺度数值模型,证明了CMC在二者界面处呈现非均匀能场分布,并依据熔池的时空

演化行为揭示了激光-材料能量耦合机制。研究者还在脉冲结束后仍考虑热能在晶格中的持续扩散,通过耦合固态热传递与变形几何模块,模拟了飞秒激光扫描过程中的脉冲累积效应,系统分析了高重叠率下CMC的热积累机制。然而,CMC的导带载流子浓度较低,其对光子能量的吸收主要依赖电子-空穴对的产生与复合过程,因此基于自由电子吸收假设的双温度模型,在描述超短脉冲加工CMC时存在物理机制上的偏差。LIU等^[21]基于热传导理论构建了皮秒激光加工CMC的固-液-气多相流模型,拓展了对超短脉冲作用下熔池动态演化与材料去除机制的描述能力。CHENG等^[61]在建模过程中对CMC组织结构进行了合理简化,通常由正交纤维束、基体相及微米级PyC界面层构成,发现温度沿喷流环线呈梯度分布,纤维与基体之间表现出明显的低温梯度特征,并从数值模拟角度验证了水射流强制冷却对激光致热损伤具有显著的抑制效应。

在机理研究方面,主流思想认为激光与CMC的作用以热效应为主导。LIU等^[62]研究发现,激光脉宽决定了能量通过晶格振动弛豫过程向材料深层传递的充分性,材料通过非线性吸收机制将激光能量转化为内能,引发局部瞬时升温,温度一旦超越SiC的热解阈值,基体材料就会发生升华分解反应。而多能场耦合激光辐照区材料的高速喷射产生复杂反冲压力,对熔池流动动力学及材料去除效率形成调制作用,诱发的光-热-电效应在材料内部建立非均匀温度场,导致纤维与基体间因热膨胀系数失配而产生热应力。ROOSTAEI和MOVAHHEDY^[63]提出了一种三维有限元方法来模拟激光辅助下SCFS陶瓷表面的激光辐射传热,并对比验证了数值模型的正确性。BALBAA等^[64]使用DFLUX子程序模拟了激光预热的效果,然后使用ABAQUS/Standard进行了正交切割模拟,发现激光功率对表面残余应力具有非单调影响,并通过塑性应变和温度分布解释了残余应力的结果。CMC通过电子对光子的非弹性散射、电子-声子耦合产生高压致密的等离子体^[65],等离子体绝热膨胀产生冲击波,有利于材料的去除。同时,等离子体通过逆韧致辐射机制吸收后续激光能量并逐渐形成等离子体屏蔽效应。特别是在高温有氧环境下,CMC中SiC升华产生的气相部分经历被动氧化,生成SiO、CO₂、CO等气态产物并逸散;另一部分则发生主动氧化,形成无定形SiO₂凝聚

相^[66],导致表面光学特性演变及激光吸收率下降。因此,光-电-热效应主导地位的动态演化规律是多能场耦合激光加工CMC的本质机理所在。

6 未来研究展望

当前,激光加工技术在CMC制造领域取得了长足进步,但其工业化应用仍面临多个技术瓶颈,亟需开展多学科融合研究以实现激光加工体系的创新性技术跃迁。未来CMC激光加工技术应重点开展以下3个方面的研究:

(1) 深入研究激光与CMC的相互作用机理。目前,材料性能参数的非线性演变(如热导率随温度的指数级衰减)未被准确表征,以及多物理场耦合机制的建模缺失。为突破这些瓶颈,亟需融合热应力双向耦合理论精准解析从光子能量沉积到晶格结构演化的完整链条,重点揭示材料表面微坑形核动力学、熔池湍流输运行为与非平衡态相变机制。特别是要探明高温等离子体羽流与瞬态热应力场的协同作用原理,系统阐释加工区域内电子-声子能量弛豫、化学键断裂阈值跃迁等固有复杂物理现象的本质。

(2) 人工智能辅助工艺数据库改进和优化。为构建精准可控的CMC激光加工体系,亟需发展基于大数据驱动的工艺智能决策系统。该系统的核心在于建立材料本构参数、激光加工参数与加工质量目标之间的非线性映射模型,创建面向典型工程特征的知识库,如叶片气膜孔、密封边缘、热端构件型面及冷却流道微槽等关键结构的工艺解决方案矩阵,推动工艺优化从经验试错向预测驱动的范式转型,形成可量化验证的闭环控制框架。

(3) 能场耦合技术的发展和應用。为实现CMC构件的高效精密制造,亟需发展基于多激光耦合的跨尺度集成制造范式。该技术通过多光束时空协同控制机制,将激光能与电场、机械能、磁能、化学能等形成能量场耦合拓扑,在材料去除过程中实现多能量场的时空匹配与强度调制。重点探讨脉冲激光耦合多能场技术的动力学效应。

参考文献:

- [1] CHEN Jie, AN Qinglong, MING Weiwei, et al. Hole exit quality and machined surface integrity of 2D C_f/SiC composites drilled by PCD tools[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2019, 39(14): 4000-4010.
- [2] XING Youqiang, DENG Jianxin, ZHANG Guodong, et al. Assessment in drilling of C/C-SiC composites using brazed diamond drills[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 26: 31-43.
- [3] ZHANG Bin, DU Yanan, LIU Hanliang, et al. Experimental study on high-speed milling of SiC_f/SiC composites with PCD and CVD diamond tools[J]. Materials, 2021, 14(13): 3470.
- [4] HU Meng, MING Weiwei, AN Qinglong, et al. Experimental study on milling performance of 2D C/SiC composites using polycrystalline diamond tools[J]. Ceramics International, 2019, 45(8): 10581-10588.
- [5] DU Jinguang, MING Wuyi, MA Jun, 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.
- [6] LIU Qiong, HUANG Guoqin, XU Xipeng, et al. A study on the surface grinding of 2D C/SiC composites[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93(5-8): 1595-1603.
- [7] RAN Yichuan, SUN Jiansong, KANG Renke, et al. Towards understanding the machining process in grinding of ceramic matrix composites: a review[J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 284: 111657.
- [8] 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(13): 2061.
- [9] HOURMAND M, SARHAN A A D, NOORDIN M Y. Development of new fabrication and measurement techniques of micro-electrodes with high aspect ratio for micro EDM using typical EDM machine[J]. Measurement, 2017, 97: 64-78.
- [10] ZHANG Pengfei, FENG Qiang, PEI Z J, et al. Non-traditional drilling of SiC based ceramic matrix composites: a literature review[J]. International Journal of Machining and Machinability of Materials, 2011, 10(3): 235.
- [11] DU Jinguang, ZHANG Haizhen, GENG Yongmiao, et al. A review on machining of carbon fiber reinforced ceramic matrix composites[J]. Ceramics International, 2019, 45(15): 18155-18166.
- [12] GAVALDA DIAZ O, GARCIA LUNA G, LIAO Z R, et al. The new challenges of machining Ceramic Matrix Composites (CMCs): review of surface integrity[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 139: 24-36.
- [13] ZHANG Huiyun, ZHAO Zhigang, LI Jiaojiao, et al. Review on abrasive machining technology of SiC ceramic composites[J]. Micromachines, 2024, 15(1): 106.

- [14] GAVALDA DIAZ O, AXINTE D A, BUTLER-SMITH P, et al. On understanding the microstructure of SiC/SiC ceramic matrix composites (CMCs) after a material removal process[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 743: 1–11.
- [15] CHEN Jie, MING Weiwei, AN Qinglong, et al. Mechanism and feasibility of ultrasonic-assisted milling to improve the machined surface quality of 2D C_f/SiC composites[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(10): 15122–15136.
- [16] LIU Qiong, HUANG Guoqin, XU Xipeng, et al. Influence of grinding fiber angles on grinding of the 2D-C_f/C-SiC composites[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(11): 12774–12782.
- [17] LI Yuanchen, GE Xiang, WANG Hui, 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.
- [18] ZHANG Lifeng, REN Chengzu, ZHOU Changling, et al. Single fiber push-out characterization of interfacial mechanical properties in unidirectional CVI-C/SiC composites by the nano-indentation technique[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 357: 1427–1433.
- [19] WHITLOW T, PITZ J, PIERCE J, et al. Thermal-mechanical behavior of a SiC/SiC CMC subjected to laser heating[J]. *Composite Structures*, 2019, 210: 179–188.
- [20] CHEN Jie, AN Qinglong, MING Weiwei, et al. Investigations on continuous-wave laser and pulsed laser induced controllable ablation of SiC_f/SiC composites [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, 41(12): 5835–5849.
- [21] LIU Chang, LI Cheng, GAO Lei, et al. Micro-hole drilling of 2.5D C/SiC composite with picosecond laser: numerical modeling and experimental validation on hole shape evolution[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 81: 852–864.
- [22] HU Tianrui, YUAN Songmei, WEI Jiayong, et al. Micro-grooves machining and optimizing on SiC/SiC composites by femtosecond laser-based on response surface methodology[J]. *Ceramics International*, 2024, 50(1): 1665–1682.
- [23] ZHAI Zhaoyang, WANG Wenjun, MEI Xuesong, et al. Effect of the surface microstructure ablated by femtosecond laser on the bonding strength of EBCs for SiC/SiC composites[J]. *Optics Communications*, 2018, 424: 137–144.
- [24] ZHAI Zhaoyang, ZHANG Ruihua, TANG Aofei, et al. Fabrication of microstructure on C/SiC surface via femtosecond laser diffraction[J]. *Materials Letters*, 2021, 293: 129711.
- [25] ZHOU Kun, XIAO Guijian, HUANG Yun. Fabricating physicochemical microstructures with super hydrophilicity on C_f/SiC composites surface via picosecond-laser induced ablation[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(21): 34291–34302.
- [26] YUAN Chenhua, WANG Bin, WANG Jiajia, et al. Effects of incidence angle and optimization in femtosecond laser polishing of C/SiC composites[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(21): 32290–32304.
- [27] Wang J, Liu Y, Wang C, et al. Character and mechanism of surface micromachining for C/SiC composites by ultrashort plus laser[J]. *Advances in Applied Ceramics*, 2017, 116(2): 99–107.
- [28] ZHAI Zhaoyang, FAN Qu Yuan, QU Yajing, et al. Heat transfer mechanism of fiber reinforced composites processed by pulsed laser[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 163: 107473.
- [29] ZHANG Fengyun, SUN Shufeng, WANG Xi, et al. Research on the ablation mechanism and feasibility of UV laser drilling to improve the machining quality of 2.5D SiC/SiC composites[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 181: 111754.
- [30] GAO Guofu, XIA Ziwen, SU Tingting, et al. Cutting force model of longitudinal-torsional ultrasonic-assisted milling Ti-6Al-4V based on tool flank wear[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 291: 117042.
- [31] WANG Jianjian, ZHANG Jianfu, FENG Pingfa. Effects of tool vibration on fiber fracture in rotary ultrasonic machining of C/SiC ceramic matrix composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 129: 233–242.
- [32] LEGAY M, GONDREXON N, LE PERSON S, et al. Enhancement of heat transfer by ultrasound: review and recent advances[J]. *International Journal of Chemical Engineering*, 2011, 2011: 670108.
- [33] LIU Zuguo, JIN Xiangzhong, LI Junhao, et al. Numerical simulation and experimental analysis on the deformation and residual stress in trailing ultrasonic vibration assisted laser welding[J]. *Advances in Engineering Software*, 2022, 172: 103200.
- [34] YOU Kaiyuan, FANG Fengzhou, YAN Guangpeng. Surface generation of tungsten carbide in laser-assisted diamond turning[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2021, 168: 103770.
- [35] WU Xian, LI Liang, HE Ning, et al. Laser induced oxidation of cemented carbide during micro milling[J]. *Ceramics International*, 2019, 45(12): 15156–15163.
- [36] ATTIA H, TAVAKOLI S, VARGAS R, et al. Laser-

- assisted high-speed finish turning of superalloy Inconel 718 under dry conditions[J]. *CIRP Annals*, 2010, 59(1): 83–88.
- [37] XU Binbin, ZHANG Jun, LIU Xin, et al. Fully coupled thermomechanical simulation of laser-assisted machining Ti₆Al₄V reveals the mechanism of morphological evolution during serrated chip formation[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2023, 315: 117925.
- [38] DOMINGUEZ-CABALLERO J, AYVAR-SOBERANIS S, KIM J, et al. Hybrid simultaneous laser- and ultrasonic-assisted machining of Ti-6Al-4V alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 125(3/4): 1903–1916.
- [39] KIM J, ZANI L, ABDUL-KADIR A, et al. Hybrid-hybrid turning of micro-SiCp/AA2124 composites: a comparative study of laser-and-ultrasonic vibration-assisted machining[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 86: 109–125.
- [40] LI Bo, XIANG Daohui, PENG Peicheng, et al. Experimental and FEM study of surface formation and deformation mechanism of SiCp/Al composites in laser-ultrasonic vibration assisted turning[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(9): 13510–13519.
- [41] DESWAL N, KANT R. Hybrid turning process by interacting ultrasonic vibration and laser energies[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2023, 38(5): 570–576.
- [42] PENG Peicheng, XIANG Daohui, LI Yanqin, et al. Experimental study on laser assisted ultrasonic elliptical vibration turning (LA-UEVT) of 70% SiCp/Al composites [J]. *Ceramics International*, 2022, 48(22): 33538–33552.
- [43] XIE Bingbing, YUAN Genfu, ZHANG Daming. Experimental study of laser etching on Al₂O₃-SiC composite ceramics[J]. *Procedia CIRP*, 2016, 42: 444–447.
- [44] ANCONA A, DÖRING S, JAUREGUI C, et al. Femtosecond and picosecond laser drilling of metals at high repetition rates and average powers[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(21): 3304–3306.
- [45] ALAVI S H, HARIMKAR S P. Effect of vibration frequency and displacement on melt expulsion characteristics and geometric parameters for ultrasonic vibration-assisted laser drilling of steel[J]. *Ultrasonics*, 2019, 94: 305–313.
- [46] LAU W S, YUE T M, WANG M. Ultrasonic-aided laser drilling of aluminium-based metal matrix composites [J]. *CIRP Annals*, 1994, 43(1): 177–180.
- [47] YUE T M, CHAN T W, MAN H C, et al. Analysis of ultrasonic-aided laser drilling using finite element method[J]. *CIRP Annals*, 1996, 45(1): 169–172.
- [48] KIM H J, JEONG J H. Numerical analysis of experimental observations for heat transfer augmentation by ultrasonic vibration[J]. *Heat Transfer Engineering*, 2006, 27(2): 14–22.
- [49] PARK J K, YOON J W, KANG M C, et al. Surface effects of hybrid vibration-assisted femtosecond laser system for micro-hole drilling of copper substrate[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22: s801–s807.
- [50] DONG Yiwei, SHAO Pengfei, GUO Xiang, et al. Experimental study on the effect of laser overlap rate on the quality of femtosecond laser machining of micro-holes[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 177: 111205.
- [51] MORENO P, MÉNDEZ C, GARCÍA A, et al. Femtosecond laser ablation of carbon reinforced polymers[J]. *Applied Surface Science*, 2006, 252(12): 4110–4119.
- [52] WANG Zhe, WANG Ruixing, SONG Hongwei, et al. Decoupling mechanisms of “avalanche” phenomenon for laser ablation of C/SiC composites in hypersonic airflow environment[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2022, 173: 107414.
- [53] STARINSKIY S V, SHUKHOV Y G, BULGAKOV A V. Laser-induced damage thresholds of gold, silver and their alloys in air and water[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 396: 1765–1774.
- [54] TANGWARODOMNUKUN V, WANG Jun, MATHEW P. A comparison of dry and underwater laser micro-machining of silicon substrates[J]. *Key Engineering Materials*, 2010, 443: 693–698.
- [55] GAO Lei, LIU Chang, LIU Junjie, et al. Femtosecond laser drilling of SiC/SiC composites in longitudinal magnetic field and semi-water immersion assistance[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 181: 111955.
- [56] BAO Binying, ZHANG Guangyi, CHEN Zhongan, et al. Experimental investigation of water jet-guided laser micro-hole drilling of C_p/SiC composites[J]. *Materials*, 2024, 17(9): 1975.
- [57] WANG Jiandong, ZENG Yuzhou, QI Xiaopeng, et al. Graded microstructure and properties of TiCp/Ti₆Al₄V composites manufactured by laser melting deposition [J]. *Ceramics International*, 2022, 48(5): 6985–6997.
- [58] 顾冬冬, 戴冬华, 夏木建, 等. 金属构件选区激光熔化增材制造控形与控性的跨尺度物理学机制[J]. *南京航空航天大学学报*, 2017, 49(5): 645–652.
- GU Dongdong, DAI Donghua, XIA Mujian, et al. Cross-scale physical mechanisms for structure and performance control of metal components cross-scale physical mechanisms for structure and performance

- control of metal components[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 49(5): 645–652. (in Chinese)
- [59] HUO Pengcheng, ZHAO Zhanyong, DU Wenbo, et al. Deformation and fracture mechanisms of *in situ* synthesized TiC reinforced TC4 matrix composites produced by selective laser melting[J]. Ceramics International, 2021, 47(14): 19546–19555.
- [60] WANG Junru, XIE Weihua, YAN Huai, et al. Study on multi-scale ablation behavior of C/SiC composites under high-energy CW laser irradiation[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2024, 44(7): 4524–4535.
- [61] CHENG Bai, DING Ye, LI Yuan, et al. Theoretical and experimental investigation on SiC/SiC ceramic matrix composites machining with laser water jet[J]. Applied Sciences, 2022, 12(3): 1214.
- [62] LIU Rongjun, LIU Xingyu, WANG Yanfei, et al. Laser ablation behavior and mechanism of C_f/SiC–ZrC ultra-high temperature ceramic matrix composite prepared by PIP method[J]. Ceramics International, 2021, 47(16): 23610–23619.
- [63] ROOSTAEI H, MOVAHHEDI M R. Analysis of heat transfer in laser assisted machining of slip cast fused silica ceramics[J]. Procedia CIRP, 2016, 46: 571–574.
- [64] BALBAA M, NASR M N A, ELGAMAL H. A sensitivity analysis on the effect of laser power on residual stresses when laser-assisted machining AISI 4340[J]. Procedia CIRP, 2017, 58: 31–36.
- [65] ZHANG Shengsheng, CHEN Xiaoxiao, ZHANG Wenwu, et al. Current status and development trend of laser processing of ceramic matrix composites[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2025, 342: 118940.
- [66] ZENG Yuzhou, WANG Jiandong, LIU Xuanrui, et al. Laser additive manufacturing of ceramic reinforced titanium matrix composites: a review of microstructure, properties, auxiliary processes, and simulations[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2024, 177: 107941.