

基于双向光斑重叠率调控的耦合激光抛光碳化硅陶瓷的表面质量研究

马桂英^{1,2}, 陈晓晓^{2,3*}, 陈涛^{2,4}, 张文武^{2,3}

¹宁波大学机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211;

²中国科学院宁波材料技术与工程研究所浙江省航空发动机极端制造技术研究重点实验室, 浙江 宁波 315201;

³中国科学院大学宁波材料工程学院, 浙江 宁波 315201;

⁴江西理工大学机电工程学院, 江西 赣州 341000

摘要 采用多光束耦合纳秒激光对 SiC 陶瓷进行抛光试验研究, 研究了耦合激光的双向光斑重叠率(δ)和能量密度(E_D)对抛光表面质量的影响。使用激光共聚焦显微镜、扫描电子显微镜(SEM)、X射线能谱仪以及拉曼光谱仪等仪器观测表征了 SiC 陶瓷抛光前后的表面形貌、表面粗糙度、元素分布以及物相变化等。结果表明:随着 δ 和 E_D 的增加, 激光抛光表面出现重铸层, 重铸层的拉曼光谱曲线含有 Si 的特征峰; 当耦合激光的 δ 为 75%、 E_D 为 4.254 J/cm²、扫描次数为 2 时, 抛光表面粗糙度(R_a)降至 0.73 μ m; 当 δ 和 E_D 过大时, 抛光表面易在孔隙附近出现微裂纹, 并向周围延伸。

关键词 激光技术; 激光抛光; 多光束耦合; 双向光斑重叠率; 重铸层; SiC 陶瓷

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221213

1 引言

碳化硅(SiC)陶瓷材料凭借其硬度高、密度低、耐腐蚀等优异性能而被广泛应用于机械电子、航空航天、空天探测等领域。在高温高压等恶劣工作环境中, 表面粗糙度的降低对于零件间配合精度、接触刚度、耐磨耐腐蚀及服役寿命等性能的提升具有重要作用。然而, SiC 陶瓷脆性大、韧性低等难加工性也制约了其工程应用^[1-3]。采用铣削、磨削等传统机械加工方法加工 SiC 陶瓷易发生崩碎、裂纹等现象, 影响表面加工质量^[4]; 特种加工方法如化学机械抛光、精细雾化加工等存在工序繁琐、耗时长以及成本高等问题^[5-8]。激光加工具有能量可控、无接触以及高效高精度等优点, 在 SiC 陶瓷等硬脆材料加工方面具有良好的应用前景^[9]。

激光对材料的去除机理因激光类型、材料的不同而不同, 国内外学者曾针对硬脆材料的激光加工机理、效率等开展了一系列研究。任英明等^[10]采用纳秒激光对单晶硅进行双步辐射抛光, 通过修复工件表面缺陷达到降低表面粗糙度的目的。Soltani等^[11]采用纳、皮秒两种激光对氮化硅陶瓷进行切割, 发现

皮秒激光切割的表面更加平整, 纳秒激光的切割效率较高, 但切割后的表面质量较差。Jia等^[12]通过调控时间和空间两个维度, 利用纳秒和毫秒激光共同对氧化铝陶瓷进行加工, 发现纳秒激光可辅助氧化铝陶瓷吸收毫秒激光能量, 提高激光加工效率。Zhang等^[13]也利用皮秒激光在氧化铝陶瓷表面诱导出纳米颗粒, 在表面形成新的致密层晶体结构。Fu等^[14]推测纳秒激光烧蚀 SiC 陶瓷时, 烧蚀区域中心能量密度(E_D)过高导致 O₂ 氛围的缺乏, SiO₂ 难以生成或因高温而消除或蒸发。柏锋等^[15]发现: 在特定的光斑重叠率范围内, 飞秒激光可在硅材料表面诱导出周期性纳米条纹结构, 进而对硅材料进行着色。Lin等^[16]发现: 飞秒激光抛光 SiC 陶瓷表面的氧化现象随光斑重叠率的降低而减少, 但抛光表面因残余应力的存在而出现少许微裂纹。Zheng等^[17-18]使用飞秒激光分别在空气中和水下对 SiC 陶瓷进行抛光, 其中水下抛光得到了无裂纹、凹坑和碎片堆积的抛光表面。综上所述, 前人虽从不同角度研究了激光对硬脆陶瓷材料的作用机理, 但基于光束调制的硬脆材料激光抛光研究鲜有报道。

本文采用新型光束耦合激光加工平台, 通过调控

收稿日期: 2022-09-05; 修回日期: 2022-12-06; 录用日期: 2022-12-20; 网络首发日期: 2023-01-07

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY20E050004)、宁波市自然科学基金重点项目(2022J291)、浙江省重点研发计划(2020C01036)

通信作者: *chenxiaoxiao@nimte.ac.cn

耦合激光的双向光斑重叠率和能量密度,对 SiC 陶瓷进行了抛光试验研究,系统地研究了耦合激光的能量密度和光斑重叠率对 SiC 陶瓷的表面形貌、粗糙度、物相变化及元素分布的影响规律,探究了 SiC 陶瓷激光加工的材料去除机理,为 SiC 陶瓷激光抛光工艺的优化提供了技术支撑。

2 试 验

试验光源为纳秒脉冲激光器,波长为 532 nm,最大输出功率为 20 W,频率可调范围为 1~100 kHz,脉

冲宽度为 78 ns,冷却方式为水冷。所用运动平台的 X、Y、Z 行程分别为 200、200、100 mm, A 轴转角范围为 180°, C 轴转角范围为 360°。激光器发射出单一的高斯光束后,利用反射镜使光束进入分光系统;在分光系统内部,单光束被分为一条主光束和若干条辅光束,且辅光束均匀地分布在主光束的周围;之后多光束进入扫描振镜并经场镜聚焦,焦平面的等效光斑直径为 63.8 μm 。SiC 陶瓷试件尺寸为 20 mm \times 20 mm \times 5 mm,加工区域为 20 mm \times 20 mm。加工系统示意图如图 1 所示,其中 CNC 表示数控。

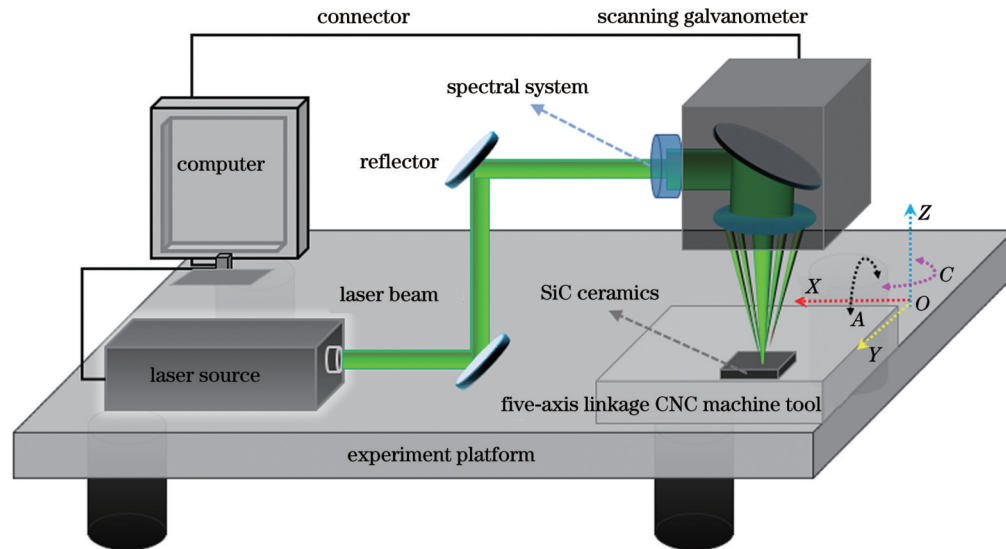


图 1 激光加工平台示意图

Fig. 1 Schematic of laser processing platform

传统高斯光束的能量在光斑中心集中,向外逐渐下降直至消失,通常将高斯光束周围强度较低的边缘部分称为“两翼”,两翼范围内的能量较低,产生的热量会作用于材料,形成热影响区。平顶光束能量在空间中的分布较为均匀,加工材料时形成的热影响区也相对较小,能量利用率高。在高斯光束向平顶光束转变的过程中^[19],由于能量匀化作用,平顶光束需要具有很大的能量才能实现材料的去除。另外,平顶光束在自由空间中传播时^[20],易发生形变,传播距离有限,而高斯光束在传播过程中则相对稳定。本文结合高斯光束在空间内传播稳定、平顶光束能量分布较为均匀等优点,先将纳秒激光分光再进行多光束耦合,使得耦合的激光能量在空间中呈“类高斯”分布,减轻了能量匀化时的衰减程度,提高了能量利用率。

采用激光共聚焦显微镜观测表面微观形貌,采用扫描电镜(SEM)观测 SiC 陶瓷表面的微观组织和损伤形貌,采用 X 射线能谱仪(EDS)检测表面元素分布情况,采用激光共聚焦显微拉曼光谱仪对 SiC 陶瓷进行物相分析,多角度分析激光对 SiC 陶瓷的作用机理。

3 结果与讨论

3.1 耦合激光的能量分布情况

激光辐照在工件表面,在极短的时间内,辐照区材料吸收激光能量后温度迅速达到熔化及气化阈值,进而脱离表面,材料表面呈特定的损伤状态,损伤形貌与激光光斑能量分布情况近似^[14]。利用常规高斯光束对材料进行多脉冲烧蚀时,烧蚀孔洞近似呈圆锥形[图 2(d)],在一定程度上反应了激光的能量分布情况。本文利用多脉冲烧蚀凹坑形貌判断耦合光束焦点处的能量分布情况,如图 2(a)所示。烧蚀凹坑整体的三维形状呈锥形,底部中心区域出现部分凸起,这说明当辅助光束聚焦至主光束的光斑内时,改变了主光斑内的能量分布情况,使得呈高斯分布的两翼能量增强,呈现类高斯分布状态,故耦合光束多脉冲烧蚀 SiC 陶瓷呈中间凸起、边缘凹陷的形貌。

在同等条件下,利用耦合光束和单光束分别对 SiC 陶瓷进行单道单层加工,微观形貌如图 3 所示。单光束加工微槽时[图 3(b)],微槽内部出现流动层,产生较多的飞溅残渣,产生的流动层对表层孔隙缺陷的填充和覆盖能力较弱;耦合激光加工微槽时[图 3(a)],

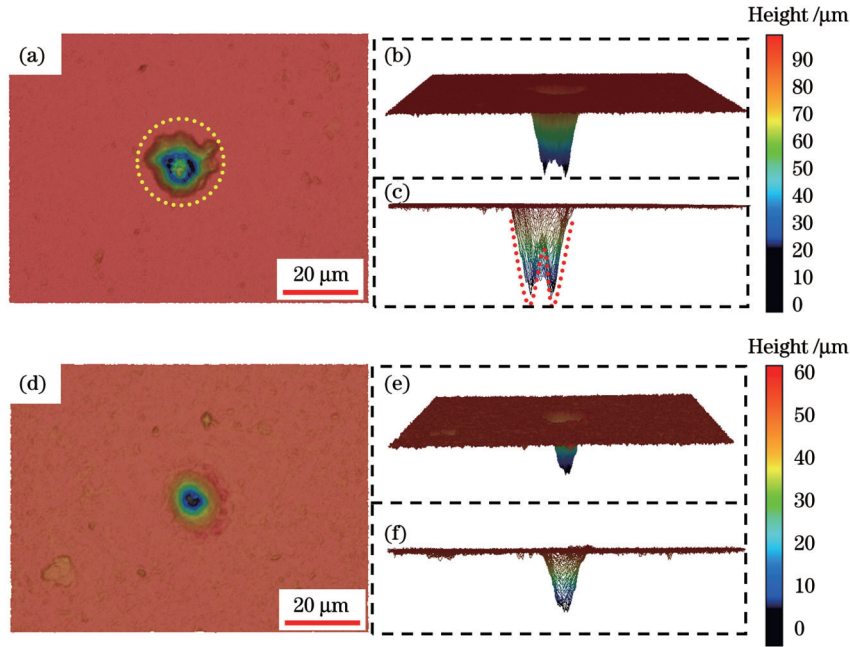


图 2 多光束与单光束烧蚀后的三维形貌。(a)多光束烧蚀形貌俯视图;(b)多光束烧蚀形貌侧视图;(c)多光束烧蚀形貌截面图;(d)单光束烧蚀形貌俯视图;(e)单光束烧蚀形貌侧视图;(f)单光束烧蚀形貌截面图

Fig. 2 Three-dimensional topographies after multi-beam and single-beam ablation. (a) Top view of morphology after multi-beam ablation; (b) side view of morphology after multi-beam ablation; (c) section view of morphology after multi-beam ablation; (d) top view of morphology after single-beam ablation; (e) side view of morphology after single-beam ablation; (f) section view of morphology after single-beam ablation

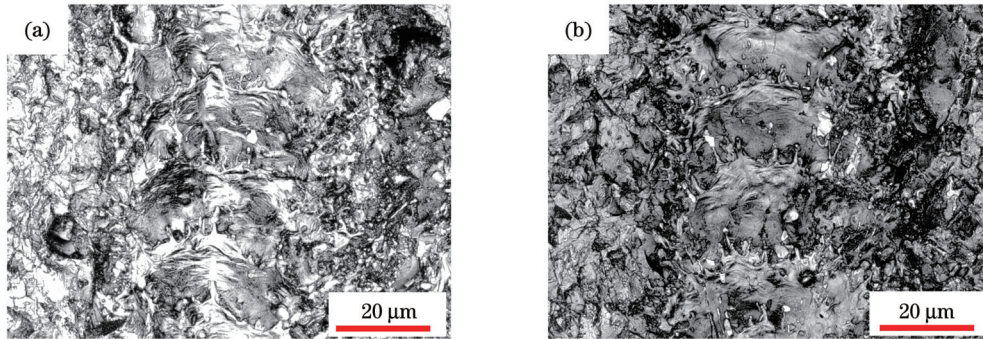


图 3 多光束与单光束单道扫描后的微观形貌。(a)多光束;(d)单光束

Fig. 3 Micro-morphologies after single-pass scanning by multibeam and single beam. (a) Multibeam; (d) single beam

微槽内部的流动层比较平坦,产生的飞溅物较少,产生的流动层对表层孔隙缺陷的覆盖能力强,形貌更平坦。

3.2 双向光斑重叠率和激光能量密度对抛光表面形貌的影响

利用常规高斯光束对 SiC 陶瓷材料进行面加工时,由于能量的局部集中,材料并非被均匀地去除,为减轻流动层带来的加工不均匀性,学者们通常采用较高的横向光斑重叠率 δ_x (与激光扫描速度方向平行)和纵向光斑重叠率 δ_y (与激光扫描速度方向垂直)^[21-22],以实现材料的稳定去除。本文所使用的耦合光束焦点处的光斑能量分布相对均匀,光斑内能量对材料的作用更广且更均匀。将 δ_x 和 δ_y 设为相等,通过控制两个方向的光斑重叠率相等,探究双向光斑重叠率对抛光效果的影响。

激光抛光 SiC 陶瓷实际光斑重叠率 δ'_x 为

$$\delta'_x = \left[1 - \frac{v}{d(f-1)} \right] \times 100\%, \quad (1)$$

式中: v 为扫描速度,单位为 mm/s; d 为等效光斑直径,单位为 μm ,本试验中 d 为 $63.8 \mu\text{m}$; f 为重复频率,单位为 kHz。重复频率过大时,可将 $f-1$ 近似为 f ,横向光斑重叠率 δ_x 为

$$\delta_x = \left(1 - \frac{v}{df} \right) \times 100\%。 \quad (2)$$

纵向光斑重叠率 δ_y 为

$$\delta_y = \left(\frac{d-\Delta}{d} \right) \times 100\%, \quad (3)$$

式中: Δ 为扫描间距,单位为 μm 。设双向光斑重叠率(δ)为

$$\delta = \delta_x = \delta_y, \quad (4)$$

可得式(2)、(3)中各自变量 v, Δ, f 之间的关系为

$$v = \Delta \cdot f \cdot \delta \quad (5)$$

激光能量密度 E_D (单位为 J/cm^2) 可表示为

$$E_D = \frac{4P}{\pi f d^2}, \quad (6)$$

式中: P 为激光功率, 单位为 W 。根据式(2)和式(6)之间的关系, 将重复频率 f 设为 15 kHz , 通过改变 v 和 Δ 来调控 δ , 通过改变 P 来调控 E_D 。

为探究 δ 及 E_D 对 SiC 陶瓷的影响, 在 E_D 不变的情况下, 使用不同的 δ (δ 在 $80\% \sim 50\%$ 区间变化) 进行单次抛光。根据式(2)、(3)计算出相应的 v 和 Δ , 使用激光功率计测出激光功率, 并代入式(6)计算 E_D , 工艺参数如表 1 所示。

SiC 陶瓷块尺寸为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, 设定单元区域尺寸为 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$, 相邻区域间隔为 1.0 mm , 采用“Zig-Zag”扫描方式, 可在 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的材料表面抛光 16 个 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 的单元。为预留部分区域与抛光表面进行对比, 设定 4 个单元区域为 $2 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 。抛光效果和区域划分如图 4(a) 所示。

采用光学显微镜观察不同参数激光抛光 SiC 陶瓷的表面, 如图 4(a) 所示。随着 δ 和 E_D 的增加, SiC 陶瓷激光抛光表面的着色效果增强, 由暗沉的灰色逐渐向明亮的类金属光泽转变。当 E_D 为 1.460 J/cm^2 、 δ 为 50% 时, 抛光区域的加工痕迹较浅, 仅表现为比未抛

表 1 激光抛光 SiC 陶瓷工艺参数

Table 1 Main process parameters of laser polishing silicon carbide ceramics

$E_D / (J \cdot cm^{-2})$	$\delta_x = \delta_y$	$\Delta / \mu m$	$v / (mm \cdot s^{-1})$
1.460	0.8	12.76	191.4
	0.7	19.14	287.1
	0.6	25.52	382.8
	0.5	31.90	478.5
1.877	0.8	12.76	191.4
	0.7	19.14	287.1
	0.6	25.52	382.8
	0.5	31.90	478.5
2.294	0.8	12.76	191.4
	0.7	19.14	287.1
	0.6	25.52	382.8
	0.5	31.90	478.5
2.711	0.8	12.76	191.4
	0.7	19.14	287.1
	0.6	25.52	382.8
	0.5	31.90	478.5

光表面颜色略深的灰色; 当 δ 达到 80% 时, 抛光后的表面呈明显的灰黑色; 当 E_D 为 1.877 J/cm^2 、 δ 为 80%

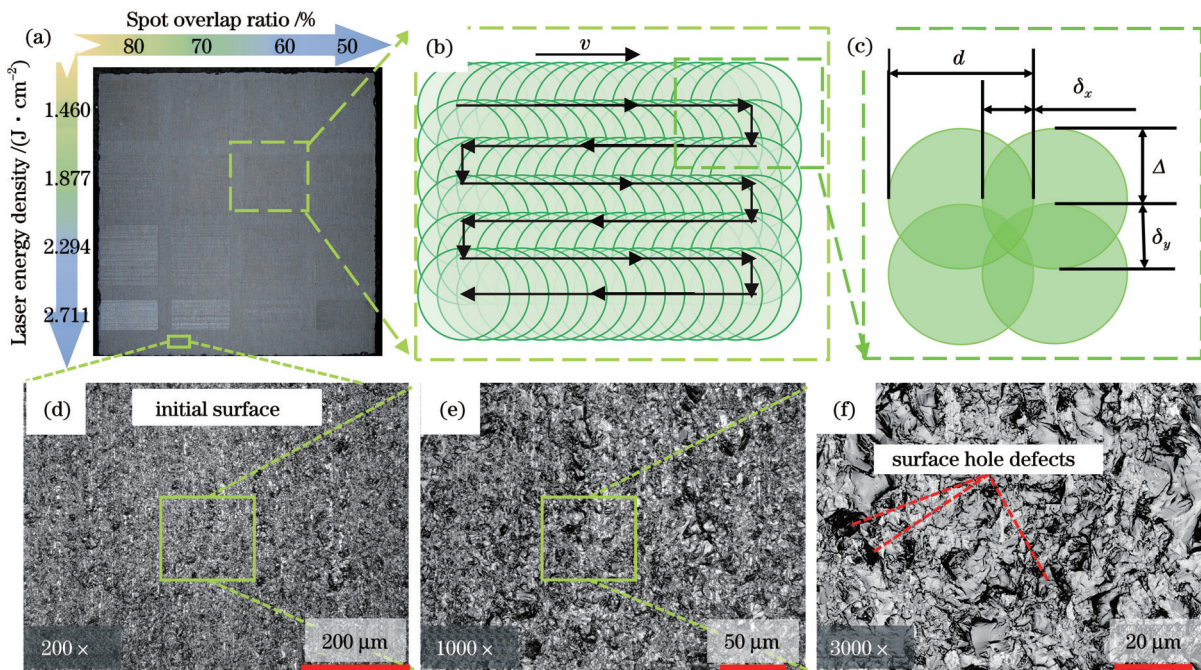


图 4 激光抛光 SiC 陶瓷区域划分、扫描方式及初始表面共聚焦观测形貌。(a) 激光加工区域的划分图; (b) 激光扫描轨迹示意图; (c) 光斑重叠率计算示意图; (d) SiC 陶瓷未加工区域形貌; (e) 图 4(d) 方框区域局部放大图; (f) 图 4(e) 方框区域局部放大图

Fig. 4 Area division of laser polished silicon carbide ceramics, scanning mode, and confocal observation morphologies of initial surface. (a) Division map of laser processing area; (b) diagram of laser scanning trajectory; (c) diagram of spot overlap ratio calculation; (d) morphology of unprocessed area of silicon carbide ceramics; (e) local enlargement of box area in Fig. 4 (d); (f) local enlargement of box area in Fig. 4 (e)

时,抛光表面显现出微弱的金属光泽;当 δ 和 E_D 最大时,金属着色感最强;当 E_D 小于 2.294 J/cm^2 时, δ 的变化对抛光区域的着色影响较小;当 E_D 为 2.294 J/cm^2 和 2.711 J/cm^2 时,抛光区域颜色随 δ 的变化较为明显。

采用共聚焦显微镜在3000放大倍率下观测加工表面,结果如图5所示。对比图4(b)中未加工区域的微观形貌,发现:激光抛光后SiC陶瓷表面的磨削痕迹

随 δ 和 E_D 的增加而减少;当 δ 和 E_D 较低时,抛光区域表面微观形貌与初始表面微观形貌相比变化并不显著;随着二者的持续增大,抛光后的SiC陶瓷表面逐渐出现重铸层。这可能是表层SiC吸收激光能量后,发生分解或与空气中的活性气体发生反应,形成的熔融态聚集物向周围流动,最终以重铸层的形式残留在工件表面,使表面轮廓变平坦。

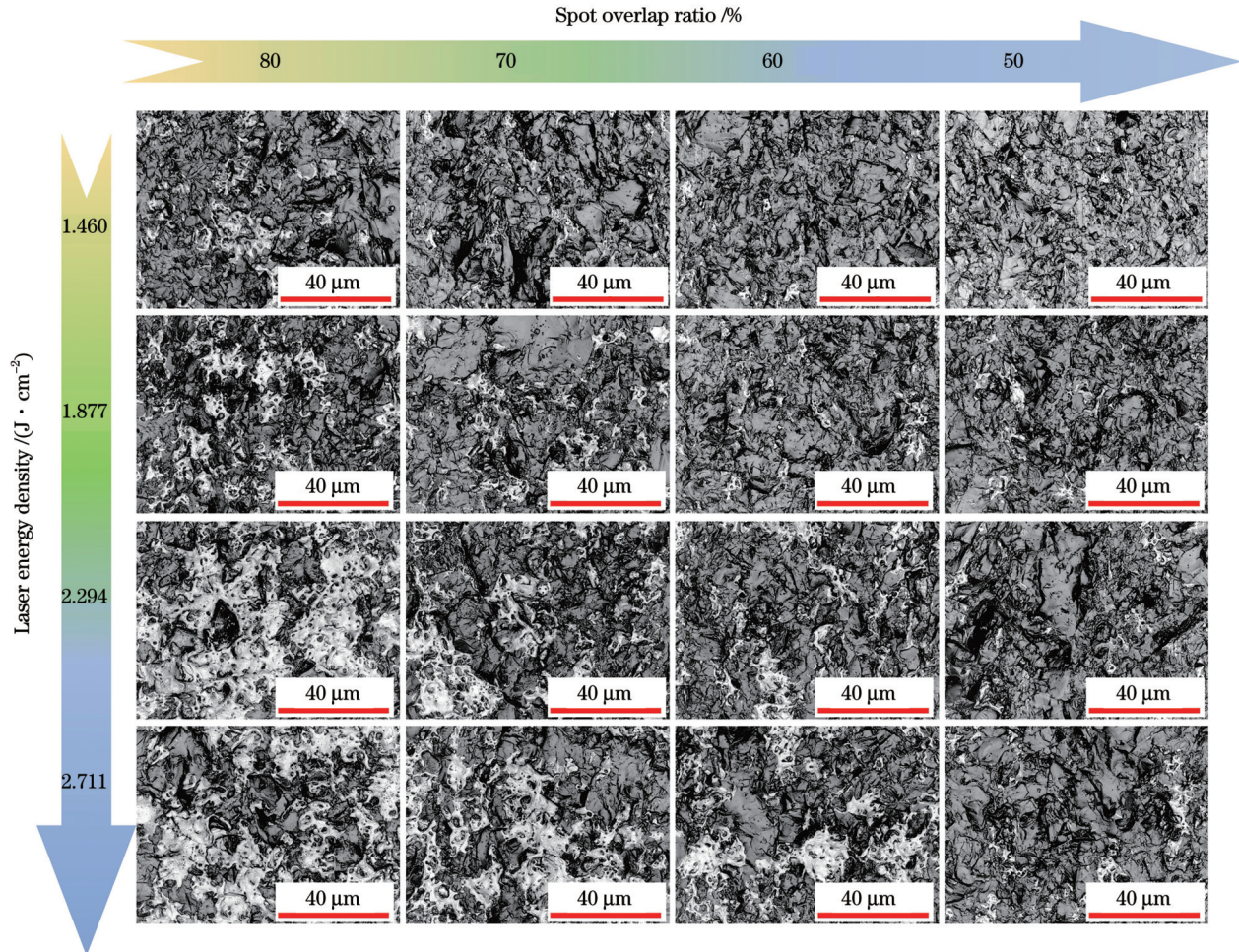


图5 不同 E_D 和 δ 激光抛光SiC陶瓷后的表面微观形貌

Fig. 5 Surface micro-morphologies of silicon carbide ceramics polished by laser with different E_D and δ

3.3 双向光斑重叠率和激光能量密度对抛光表面粗糙度的影响

具有一定轮廓特征的材料表面具有连续的轮廓峰值和谷值,最高峰值和最低谷值之和定义为表面检测区域的轮廓最大峰谷值(R_z),检测区域内检测点高度绝对值的算术平均值定义为 R_a 。图6为表面粗糙度 R_a 、 R_z 随 δ 和 E_D 的变化情况。由图6(a)可知:当 δ 和 E_D 较低时,表面粗糙度出现了不同程度的增大;当 δ 为70%、 E_D 为 2.294 J/cm^2 时,SiC陶瓷抛光后 R_a 降低到 $1.016 \mu\text{m}$ 、 R_z 降低到 $16.103 \mu\text{m}$, R_z 降低了30.45%,抛光效果如图7所示;当 δ 为70%时,不同 E_D 对SiC陶瓷抛光后的表面粗糙度的影响相对较低。相对于初始表面,SiC陶瓷激光抛光后的表面轮廓更加平整,图7(e)

为未抛光表面与抛光表面的线轮廓对比。抛光前线轮廓峰顶与峰谷之间的高度差较大,呈陡峭的山峰状;抛光后线轮廓峰顶与峰谷之间的高度差减小,曲线仍呈一定的波动状,但整体更加平缓。

使用耦合激光对SiC陶瓷进行单次抛光,当 E_D 和 δ 较低时,激光对材料的抛光能力较弱,表面粗糙度的降低并不明显。当 δ 为75%、 E_D 增加至 4.254 J/cm^2 、抛光次数(n)为1时[图8(a)],产生的流动层向周围扩散,覆盖了较多的孔隙缺陷, R_a 的降低幅度较大;当抛光次数增加至2时[图8(b)],流动层的扩散能力增强,在工件表面形成较规律的波纹形貌,使表面轮廓更加平坦,抛光表面的粗糙度降低,但重铸层边缘区域的堆叠现象明显,不利于 R_a 的进一步降低。

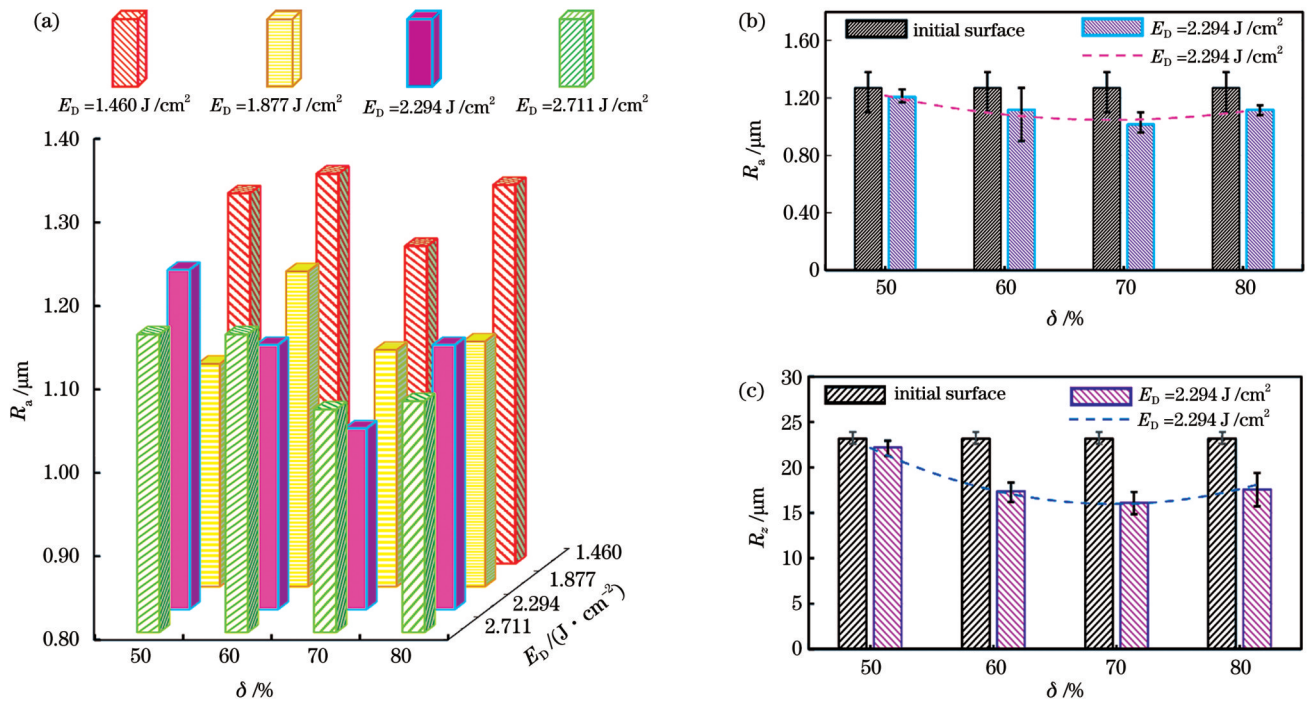


图 6 激光抛光后 SiC 表面粗糙度与 E_D 和 δ 的关系。(a) 三维柱状图；(b) R_a 随 δ 的变化趋势；(c) R_z 随 δ 的变化趋势

Fig. 6 Relationships between surface roughness of laser polished SiC and E_D (δ). (a) Three-dimensional histogram; (b) R_a versus δ ; (c) R_z versus δ

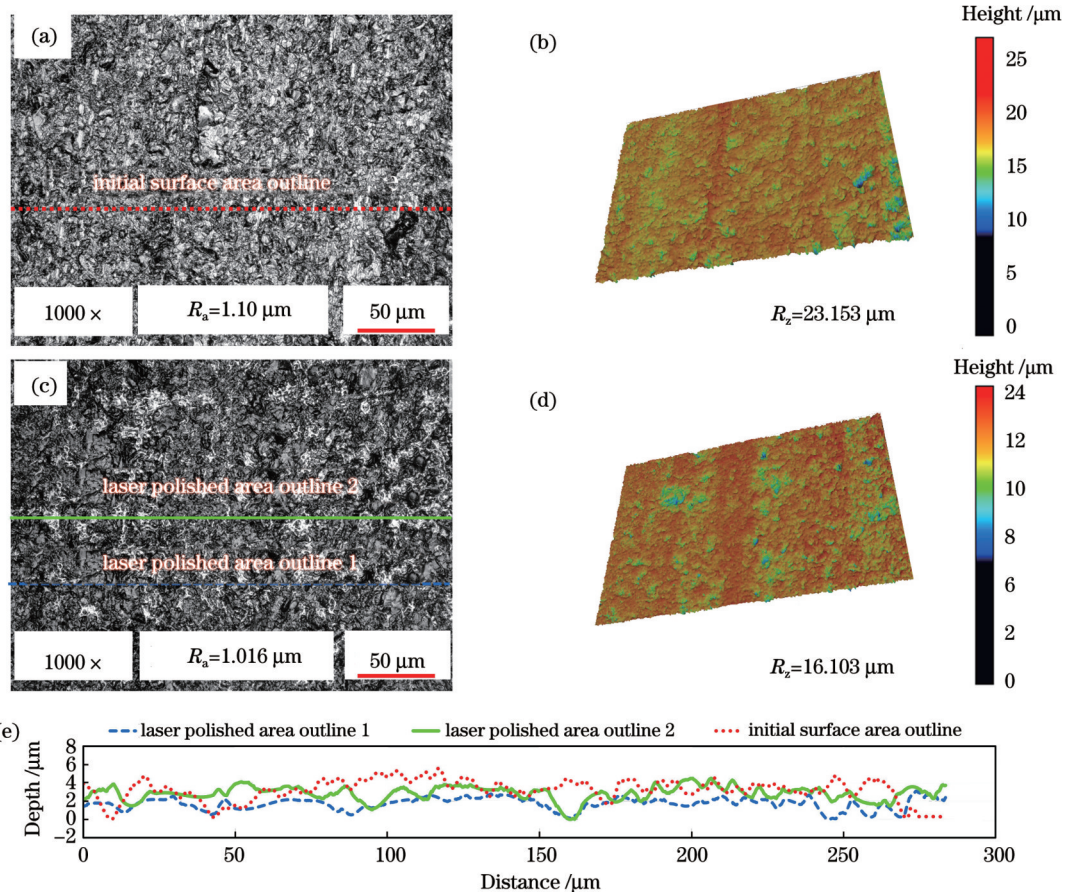


图 7 初始表面与激光抛光表面的二维与三维形貌。初始表面 (a) 二维和 (b) 三维形貌；当 δ 为 70%、 E_D 为 2.294 J/cm^2 时表面的 (c) 二维和 (d) 三维形貌；(e) 初始表面与抛光后表面线轮廓

Fig. 7 2D and 3D morphologies of initial surface and laser polished surface. (a) 2D and (b) 3D morphologies of initial surface; (c) 2D and (d) 3D morphologies of surface when δ is 70% and E_D is 2.294 J/cm^2 ; (e) line profiles of initial surface and polished surface

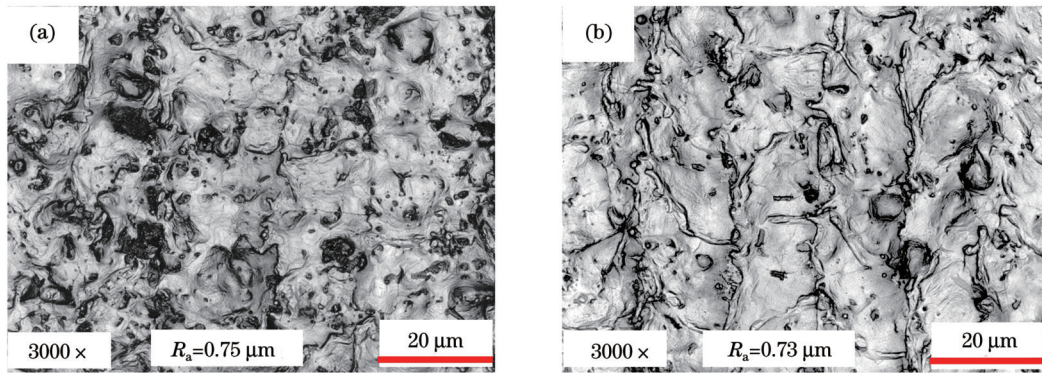


图8 不同扫描次数下抛光表面的微观形貌。(a)1;(b)2

Fig. 8 Micro-morphologies of polished surfaces under different n . (a) 1; (b) 2

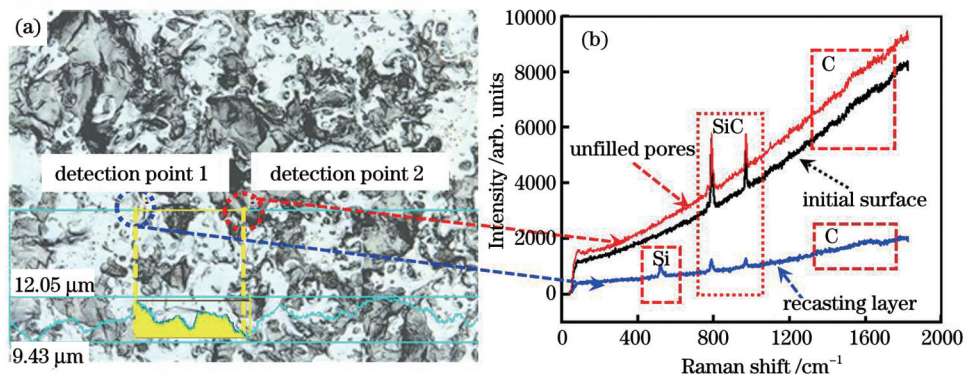
3.4 双向光斑重叠率和激光能量密度对抛光表面元素分布的影响

为确定抛光后表面层材料的物质组成,采用拉曼光谱仪检测 SiC 陶瓷表面的物相变化,采用扫描电镜检测表征抛光区域的微观形貌并进行元素分析。

3.4.1 拉曼光谱分析

对 δ 为 80%、 E_D 为 2.711 J/cm^2 时的抛光区域表面进行拉曼光谱测试,并与初始表面进行对比,检测结果如图 9 所示。图 9 中初始表面拉曼光谱曲线包含 786 cm^{-1} 和 967 cm^{-1} 两个 SiC 的特征峰^[23-24]以及 $1300\sim 1600 \text{ cm}^{-1}$ 范围内的特征带,该特征带对应 SiC 陶瓷表层的游离碳(FC)^[25-26]。抛光区域的流动层表面拉曼光谱曲线增加了一个 519 cm^{-1} 的硅(Si)

单质特征峰^[27-28],这表明使用较高的 E_D 对 SiC 陶瓷进行抛光时,出现了碳硅键的断裂,新生成了 Si 单质;抛光表面区域未检测到 SiO_2 的特征峰,可能是生成的 SiO_2 过少而难以被检测到或生成了其他硅氧化合物^[10]。如图 9(b)所示,孔隙内检测点的拉曼光谱的 SiC 特征峰强度高于重铸层和初始表面的 SiC 特征峰强度。这可能是激光作用在孔隙内时,表层的 FC 在激光的作用下先与空气中的活性气体发生反应,生成碳氧化物进入到空气中;SiC 的化学键因吸收能量不足而难以断裂,在孔隙内不易生成 Si 或硅氧化合物而是形成了重铸层,故孔隙内的拉曼光谱曲线未出现 Si 的特征峰,且 SiC 的特征峰强度增加。

图9 当 E_D 为 2.711 J/cm^2 、 δ 为 80% 时 SiC 表面峰顶与峰谷的拉曼光谱。(a)检测位置;(b)拉曼光谱对比Fig. 9 Raman spectra of peak top and peak valley on surface of silicon carbide when $E_D=2.711 \text{ J/cm}^2$ and $\delta=80\%$. (a) Detection position; (b) comparison of Raman spectra

3.4.2 SEM 和 EDS 分析

SiC 陶瓷未加工区域的 SEM 和 EDS 检测结果如图 10 所示。由图 10(a)可知, SiC 陶瓷初始表面存在大小不一的孔洞缺陷。由图 10(b)中的元素分布情况可知,初始表面所含元素主要为 Si(质量分数为 61.26%)和 C(质量分数为 38.41%)及微量 O(质量分数为 0.33%),而初始表面部分 C 元素富集的情况则与图 9(b)中拉曼光谱出现 FC 特征带的现象一致。

当 E_D 分别为 2.294 J/cm^2 和 2.711 J/cm^2 时,抛光后

的宏、微观形貌及粗糙度随 δ 的增加而发生较为明显的变化,故选取这两种 E_D 下的抛光区域进行扫描电镜检测(分别使用 3000 和 6000 的放大倍数),结果如图 11 所示。随着 E_D 和 δ 的增大, SiC 陶瓷抛光表面较大的孔隙缺陷逐渐减少,整体轮廓由尖锐向平缓转变,但平缓区域仍有较小的孔隙和孔洞存在,且出现了少量由孔隙边缘向周围扩散的微裂纹[图 11(d2)、(g2)、(h2)]。在工件表层的孔隙内部,吸收的激光能量不足而使表面产生较大的温度梯度,当材料表面应力过大时出现断裂,形成微裂纹。

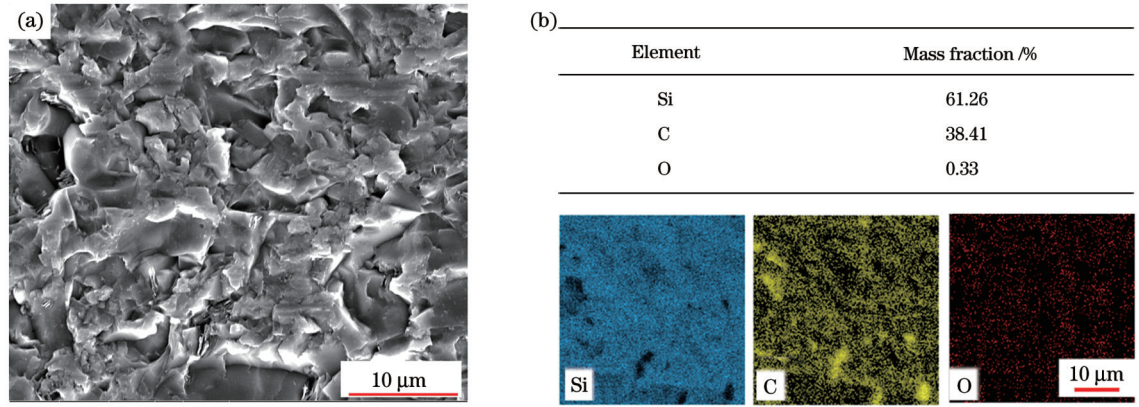


图 10 初始表面的 SEM 和 EDS 检测结果。(a) SEM; (b) EDS
Fig. 10 SEM and EDS detection results for initial surface. (a) SEM; (b) EDS

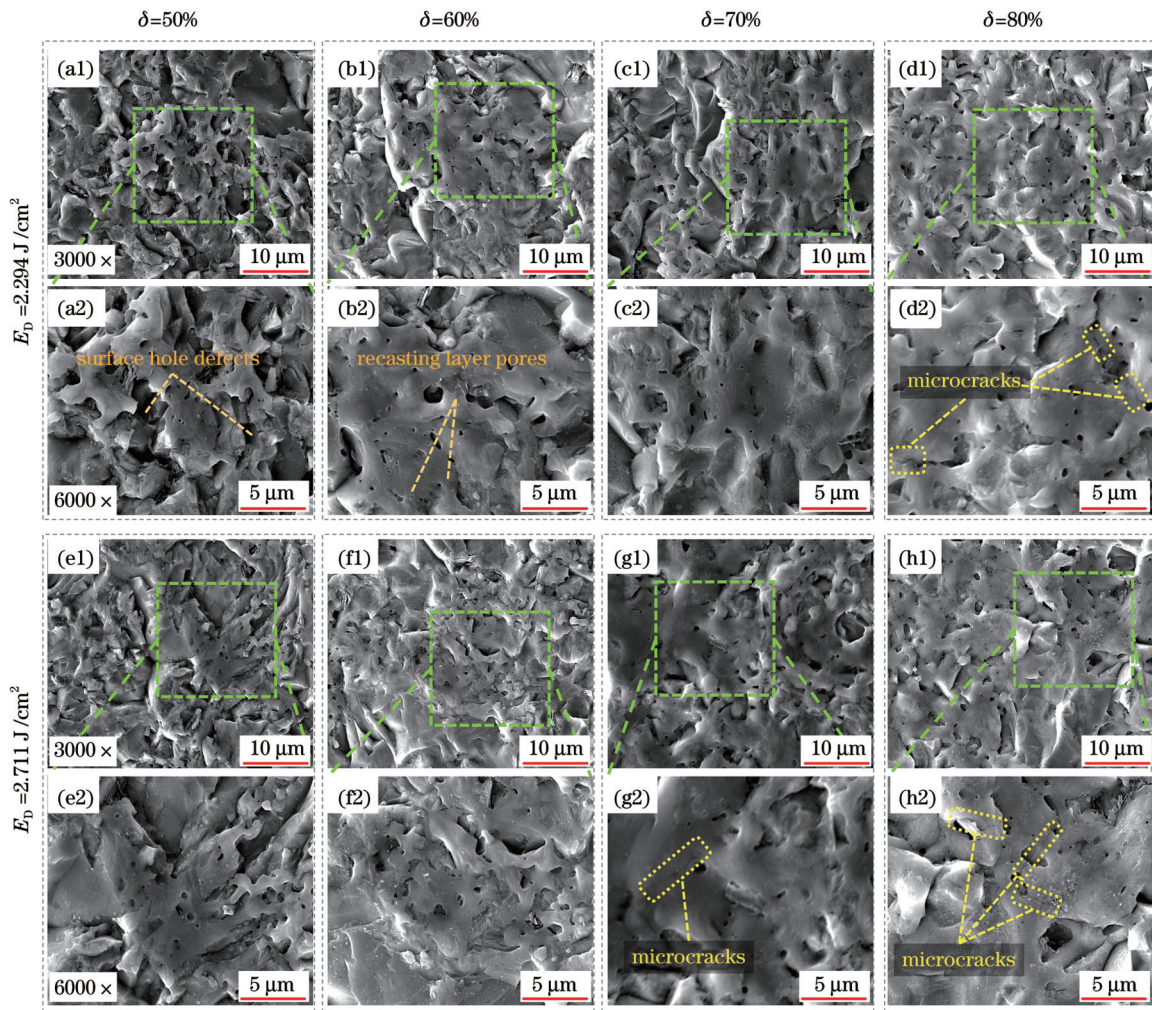


图 11 不同参数下抛光表面的 SEM 图。(a1)(a2) $E_D=2.294 \text{ J/cm}^2, \delta=50\%$; (b1)(b2) $E_D=2.294 \text{ J/cm}^2, \delta=60\%$; (c1)(c2) $E_D=2.294 \text{ J/cm}^2, \delta=70\%$; (d1)(d2) $E_D=2.294 \text{ J/cm}^2, \delta=80\%$; (e1)(e2) $E_D=2.711 \text{ J/cm}^2, \delta=50\%$; (f1)(f2) $E_D=2.711 \text{ J/cm}^2, \delta=60\%$; (g1)(g2) $E_D=2.711 \text{ J/cm}^2, \delta=70\%$; (h1)(h2) $E_D=2.711 \text{ J/cm}^2, \delta=80\%$

Fig. 11 SEM images of polished surface under different parameters. (a1)(a2) $E_D=2.294 \text{ J/cm}^2, \delta=50\%$; (b1)(b2) $E_D=2.294 \text{ J/cm}^2, \delta=60\%$; (c1)(c2) $E_D=2.294 \text{ J/cm}^2, \delta=70\%$; (d1)(d2) $E_D=2.294 \text{ J/cm}^2, \delta=80\%$; (e1)(e2) $E_D=2.711 \text{ J/cm}^2, \delta=50\%$; (f1)(f2) $E_D=2.711 \text{ J/cm}^2, \delta=60\%$; (g1)(g2) $E_D=2.711 \text{ J/cm}^2, \delta=70\%$; (h1)(h2) $E_D=2.711 \text{ J/cm}^2, \delta=80\%$

图 12 为 δ 为 80%、 E_D 不同时抛光区域的 EDS 分析结果,与图 10 相比,抛光区域 C 元素聚集区域相对减小,O 元素有微量的增加。可能是激光作用于 SiC

陶瓷表面,表层材料吸收一定的能量后,一方面表层的 FC 与空气中的活性气体发生反应,生成碳氧化物进入到空气中,造成大量的 C 元素流失,另一方面 SiC 在

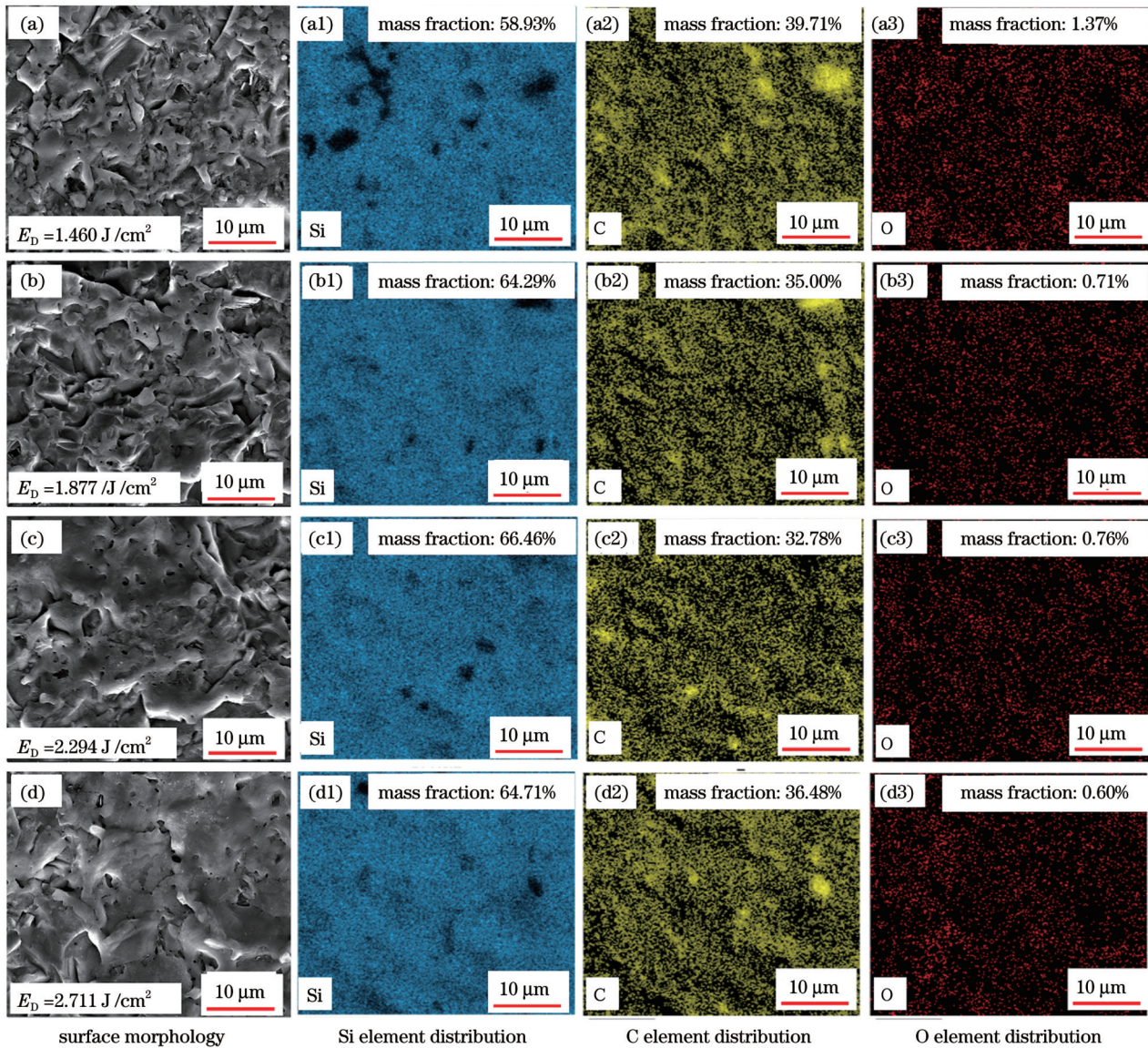


图 12 当 δ 为 80% 时不同 E_D 下抛光 SiC 陶瓷的 SEM 和 EDS 检测结果

Fig. 12 SEM and EDS detection results of SiC ceramics polished with different E_D when δ is 80%

高温的诱导下发生分解反应, 并与周围流动的空气发生反应, 形成一系列碳氧化物或硅氧化物。在 SiC 表层的 C 元素流失而 Si 元素未流失或流失较少的情况下, Si、C 元素的质量分数必然发生变化, 且二者的变化趋势整体相反, 故元素检测结果中的 Si 元素和

C 元素呈此消彼长的变化趋势 [图 13(a)]。当 O 元素和 C 元素同时与 Si 元素发生反应时, 形成的碳氧化物进入到空气中, 形成的硅氧化物沉积在工件表面, 故表面 O 元素增多, 且随 E_D 的增大呈先下降后上升再下降的变化趋势。

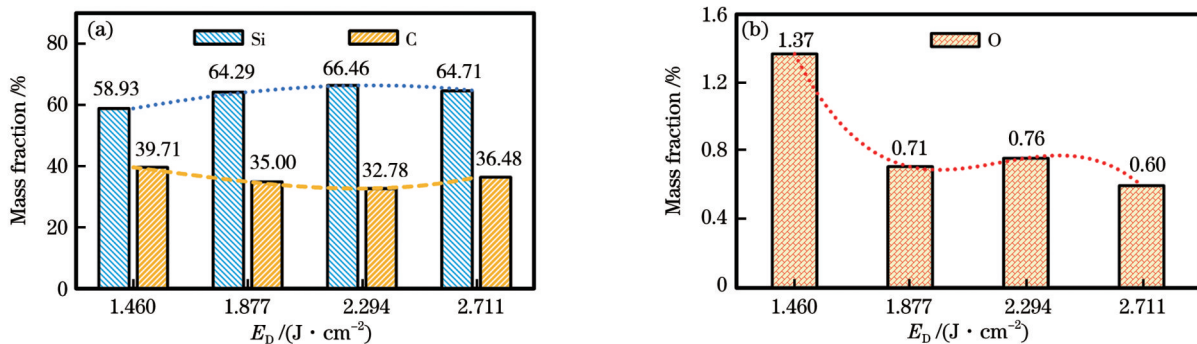


图 13 δ 为 80% 时各元素质量分数随 E_D 的变化。(a) Si、C 元素; (b) O 元素

Fig. 13 Mass fraction of each element versus E_D when δ is 80%. (a) Si and C elements; (b) O element

当 E_D 为 2.711 J/cm^2 时, 抛光表面形成的弧状凹坑边缘有明显的 O 元素聚集现象, 而内部 O 元素则随机分布。这可能是表层 SiC 在激光辐照产生的热作用下自身发生分解或与空气中的活性气体发生反应, 生成气态或液态的碳氧化物、硅氧化物、Si 等物质, 其中气态物质进入到空气中, 部分液态物质因重力和表面张力等作用而以流动层的形式向周围扩散; 当激光源移开时, 流动层因失去能量而停止流动, 从而形成重铸层, 但仍有部分能量可使表层物质与空气中的活性气体发生化学反应, O 元素被捕捉至工件表面, 故抛光表面 C 元素含量下降, Si 元素含量上升, O 元素含量因 E_D 改变而呈一定的变化。当 E_D 过大时, 材料的热影响区增大, 使得 SiC 陶瓷表面吸收的热量增加, 形成的流动层与孔隙缺陷的温度梯度相差过大, 导致重铸层和微裂纹增多, 且多出现在孔隙附近。

4 结 论

采用新型多光束耦合激光加工平台抛光 SiC 陶瓷, 研究了激光双向光斑重叠率和能量密度变化对抛光表面宏/微观形貌、粗糙度、物相及元素演化的影响机制, 主要结论如下:

1) 随着 δ 和 E_D 的增加, 抛光后的表面形貌由初始的凹凸不平逐渐向平缓转变, 当表面出现重铸层且逐渐增多时, R_a 显著减小, 但重铸层过多而产生的边缘堆叠则不利于表面质量的进一步提升。

2) 当 δ 和 E_D 较高时, 抛光表面重铸层的拉曼光谱曲线出现 Si 单质的特征峰, 且 SiC 特征峰强度较弱, 而抛光区域孔隙缺陷内 SiC 的拉曼特征峰强度较大, 说明抛光过程中的去除机制主要为热去除, 存在化学键的断裂重组。当抛光表面温度梯度跨度较大时, 在表面孔隙附近出现由孔隙边缘向周围扩散的微裂纹。

3) 激光作用于 SiC 陶瓷表面, 改善了工件表面 FC 集中域较多的现象, 降低了表面 C 元素的质量分数, 增加了 Si、O 元素的质量分数。当激光 δ 为 80%、 E_D 为 2.294 J/cm^2 时, 抛光表面 C 元素的质量分数最低, Si 元素的质量分数最高。

尚未综合考虑各工艺参数的交互作用对耦合激光抛光碳化硅陶瓷的影响, 未来将研究激光多参数交互作用对抛光质量的影响机制, 探明优化工艺窗口, 进一步改善表面质量。此外, 结合激光抛光与其他工艺的复合加工有望进一步提升工艺效果, 推进硬脆材料的高性能应用。

参 考 文 献

- 王晓波, 王峰, 贺智勇, 等. 高导热碳化硅陶瓷的研究进展[J]. 机械工程材料, 2021, 45(9): 8-12.
Wang X B, Wang F, He Z Y, et al. Research progress on high thermal conductivity SiC ceramics[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2021, 45(9): 8-12.
- 李辰冉, 谢志鹏, 康国兴, 等. 国内外碳化硅陶瓷材料研究与应用进展[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(5): 1353-1370.
Li C R, Xie Z P, Kang G X, et al. Research and application progress of SiC ceramics: a review[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(5): 1353-1370.
- 李旺辉, 奉兰西, 张晓晴, 等. 极端条件下碳化硅的变形、损伤与破坏研究进展[J]. 高压物理学报, 2021, 35(4): 35-75.
Li W H, Feng L X, Zhang X Q, et al. Brief review of research progress on the deformation, damage and failure of silicon carbide under extreme conditions[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2021, 35(4): 35-75.
- Chen Y R, Su H H, Qian N, et al. Ultrasonic vibration-assisted grinding of silicon carbide ceramics based on actual amplitude measurement: grinding force and surface quality[J]. Ceramics International, 2021, 47(11): 15433-15441.
- Wu C, Fang X D, Liu F, et al. High speed and low roughness micromachining of silicon carbide by plasma etching aided femtosecond laser processing[J]. Ceramics International, 2020, 46(11): 17896-17902.
- Meng X S, Wu W L, Liao B K, et al. Atomic simulation of textured silicon carbide surface ultra-precision polishing[J]. Ceramics International, 2022, 48(12): 17034-17045.
- 庞龙飞, 李晓波, 李婷婷, 等. SiC 晶片超精密化学机械抛光技术[J]. 微纳电子技术, 2021, 58(11): 1035-1040.
Pang L F, Li X B, Li T T, et al. Ultra precision chemical mechanical polishing technology for SiC wafer[J]. Micronanoelectronic Technology, 2021, 58(11): 1035-1040.
- 孙强, 许竞翔, 卢康, 等. 碳化硅化学机械抛光中金刚石磨粒与二氧化硅磨粒作用的微观模拟分析[J]. 电镀与涂饰, 2021, 40(16): 1254-1261.
Sun Q, Xu J X, Lu K, et al. Microscopic simulation analysis on function of diamond and silica particles during chemical mechanical polishing of silicon carbide[J]. Electroplating & Finishing, 2021, 40(16): 1254-1261.
- 徐一帆, 邵景珍, 林颖, 等. 硬脆材料的激光表面抛光研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(13): 1300003.
Xu Y F, Shao J Z, Lin Y, et al. Research progress in laser surface polishing of hard and brittle materials[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(13): 1300003.
- 任英明, 张志宇. 双步激光辐射提升纳秒激光抛光单晶硅的表面[J]. 光学学报, 2022, 42(7): 0714004.
Ren Y M, Zhang Z Y. Surface of nanosecond laser polished single-crystal silicon improved by two-step laser irradiation[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(7): 0714004.
- Soltani B, Azarhoushang B, Zahedi A. Laser ablation mechanism of silicon nitride with nanosecond and picosecond lasers[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 119: 105644.
- Jia X S, Zhu G Z, Zhang Y D, et al. Laser processing of alumina ceramic by spatially and temporally superposing the millisecond pulse and nanosecond pulse train[J]. Optics Express, 2020, 28(1): 676-684.
- Zhang X M, Ji L F, Zhang L T, et al. Polishing of alumina ceramic to submicrometer surface roughness by picosecond laser[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 397: 125962.
- Fu C L, Yang Y, Huang Z R, et al. Investigation on the laser ablation of SiC ceramics using micro-Raman mapping technique[J]. Journal of Advanced Ceramics, 2016, 5(3): 253-261.
- 柏锋, 范文中, 李阳博, 等. 光斑重叠率对飞秒激光硅材料表面着色的影响[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0703001.
Bai F, Fan W Z, Li Y B, et al. Influence of overlapping rate of focused femtosecond laser spot on the silicon surfaces colorization[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(7): 0703001.
- Lin Q Y, Fan Z J, Wang W J, et al. The effect of spot overlap ratio on femtosecond laser planarization processing of SiC ceramics[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 129: 106270.
- Zheng Q Z, Cui J L, Fan Z J, et al. Investigation on the underwater femtosecond laser polishing SiC ceramic[J].

- Ferroelectrics, 2020, 564(1): 28-36.
- [18] Zheng Q Z, Jiang G D, Cui J L, et al. Influence of pulse energy and scanning speed of femtosecond laser on surface roughness of SiC ceramics[J]. Integrated Ferroelectrics, 2021, 219(1): 20-27.
- [19] Zheng Y P, Tan W J, Han D D, et al. Propagation of high-power optical flat-topped beams in strongly nonlinear media[J]. Results in Physics, 2021, 31: 105016.
- [20] 姜其畅, 张存, 苏艳丽, 等. 平顶光束在不同系统中的传输特性比较[J]. 量子电子学报, 2022, 39(3): 334-342.
Jiang Q C, Zhang C, Su Y L, et al. Comparison of propagation properties of flat-top beams in different systems[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2022, 39(3): 334-342.
- [21] Jasim H A, Demir A G, Previtali B, et al. Process development and monitoring in stripping of a highly transparent polymeric paint with ns-pulsed fiber laser[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 93: 60-66.
- [22] 黄旭东, 王涛, 胡少武, 等. 基于正交试验和响应面法的激光抛光参数优化[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(11): 1114004.
Huang X D, Wang T, Hu S W, et al. Parameter optimization of laser polishing based on orthogonal experiment and response surface method[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(11): 1114004.
- [23] Kunc J, Rejhon M, Dedič V, et al. Thickness of sublimation grown SiC layers measured by scanning Raman spectroscopy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 789: 607-612.
- [24] Madito M J, Hlatshwayo T T, Mtshali C B. Chemical disorder of a-SiC layer induced in 6H-SiC by Cs and I ions co-implantation: Raman spectroscopy analysis[J]. Applied Surface Science, 2021, 538: 148099.
- [25] Feoktistov D V, Kuznetsov G V, Sivkov A A, et al. Expanding the scope of SiC ceramics through its surface modification by different methods[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 435: 128263.
- [26] 韦新宇, 温秋玲, 陆静, 等. 紫外纳秒激光加工金刚石微槽工艺参数优化研究[J]. 中国激光, 2022, 49(10): 1002406.
Wei X Y, Wen Q L, Lu J, et al. Research on parameters optimization of diamond microgrooves processed by ultraviolet nanosecond laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(10): 1002406.
- [27] Kadlečíková M, Breza J, Vančo L, et al. Raman spectroscopy of porous silicon substrates[J]. Optik, 2018, 174: 347-353.
- [28] Aguilar-Hernández J R, Sastré-Hernández J, Monroy-Rodríguez G, et al. Photoluminescence and Raman spectroscopy of silicon thin films grown by laser ablation[J]. Optical Materials, 2020, 102: 109813.

Surface Quality of Silicon Carbide Ceramics Polished by Coupled Laser Based on Bidirectional Spot Overlap Ratio Regulation

Ma Guiying^{1,2}, Chen Xiaoxiao^{2,3*}, Chen Tao^{2,4}, Zhang Wenwu^{2,3}

¹School of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China;

²Zhejiang Key Laboratory of Aero-Engine Extreme Manufacturing Technology Research, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, Zhejiang, China;

³Ningbo College of Materials Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, Zhejiang, China;

⁴School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China

Abstract

Objective Laser processing has the advantages of controllable energy, no contact, high efficiency, and high precision. It has good application prospects in the processing of hard and brittle materials, such as SiC ceramics. In this study, a new multi-beam coupled laser processing platform was used to polish SiC ceramics by adjusting the bidirectional spot overlap rate (δ) and energy density (E_D) of the multicoupled laser. The effects of the multibeam coupled laser energy density and bidirectional spot overlap rate on the surface morphology, roughness, phase change, and element distribution of SiC ceramics were systematically investigated. The material removal mechanism of SiC ceramic laser processing was revealed. This study can provide a technical support for optimizing the laser polishing process of SiC ceramics.

Methods First, a multibeam coupled nanosecond laser was used to polish SiC ceramics under different process parameters. Then, laser confocal microscopy, Raman spectroscopy, scanning electron microscopy, and other test methods were used to analyze the microstructure, phase change, and element distribution of SiC ceramics. The removal mechanism of SiC ceramic materials using the coupled laser and the effects of various parameters on surface quality were analyzed from multiple perspectives.

Results and Discussions The multibeam coupled laser focal point shows a Gaussian-like energy distribution [Fig. 2(a)], with a broader and more uniform effective action surface on the material within the spot and a smaller heat-affected zone (Fig. 3). The polished surface shows a more pronounced color shift at the macroscopic level [Fig. 4(a)] when δ and E_D are low. The polished area is dull gray-black and gradually changes to a slightly brighter metallic color as δ and E_D increase. The polished surface microstructure (Fig. 5) appears relatively flat compared with the original surface microstructure [Fig. 4(b)], and the polished surface roughness decreases to $0.73 \mu\text{m}$ when E_D is $4.254 \text{ J}/\text{cm}^2$, δ is 75%, and the number of scans is two [Fig. 8(b)]. However, the occurrence of edge stacking attributed to many recast layers is not conducive to further improvement of the surface quality. The characteristic peak of the Si singlet appears in the Raman spectral curve of the polished surface recast layer (Fig. 9), indicating that a violent photochemical reaction accompanies polishing. Chemical bond breaking and reorganization occur, alleviating the problem of excess free carbon on the surface (Figs. 10 and 12) and introducing oxygen elements when δ and E_D are extremely high. This is owing to the extended

temperature span of the laser action region, leading to thermal stress inside the surface material, which in turn, generates microcracks from the pore edge to the surrounding area (Fig. 11).

Conclusions In this study, a new multi-beam coupled nanosecond laser was used to polish SiC ceramics. The effects of the laser bidirectional spot overlap rate and energy density on the macroscopic and microscopic morphologies, roughness, phase, and element evolution of the polished surface were investigated. The results show that the violent photochemical reaction significantly alleviates the problem of excessive surface free carbon when δ and E_D are high, the surface morphology of the material becomes smooth, and the surface roughness decreases. However, this results in the formation of many recast layers on the surface when E_D is very high, which is not conducive to further reduction of surface roughness.

Key words laser technique; laser polishing; multi-beam coupling; bidirectional spot overlap rate; recast layer; silicon carbide ceramics