

碳化硅陶瓷脉冲激光加工改性表面特征研究

刘伟 顾浩 唐都波 刘顺

(湖南科技大学机电工程学院难加工材料高效精密加工湖南省重点实验室, 湘潭 411201)

文 摘 采用脉冲激光对碳化硅陶瓷进行加工,通过单因素实验探究激光功率、扫描次数、光斑重叠率等激光工艺参数对工件改性表面特征的影响规律。实验结果表明,当激光功率较小时,工件表面形成周期性的起伏沟槽,且随机分布着破碎凹坑;当激光功率逐渐增大时,工件表面逐渐出现崩裂的热致裂纹;表面粗糙度随激光功率的增大先减小后增大。当扫描次数较少时,工件表面结构较为浅薄、稀松;随着扫描次数的增加,工件表面形成的结构凹凸不平;表面粗糙度随扫描次数的增大先减小后增大。在低光斑重叠率条件下,工件表面沟槽较浅、整体表面起伏较小;当光斑重叠率逐渐增大时,表面沟槽逐渐变深,工件表面出现孔洞;表面粗糙度随光斑重叠率增大而增大。

关键词 碳化硅陶瓷,脉冲激光,改性,表面形貌

中图分类号:TN249

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2024.04.018

Study on Modified Surface Characteristics of Silicon Carbide Ceramics Processed by Pulsed Laser

LIU Wei GU Hao TANG Dubo LIU Shun

(Hunan Provincial Key Laboratory of High Efficiency and Precision Machining of Difficult-to-cut Material, School of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)

Abstract The silicon carbide ceramics were processed by pulsed laser. The influence of laser process parameters such as laser power, scanning times and spot overlap rate on the modified surface characteristics of the workpiece was investigated by single factor experiment. The experimental results show that when the laser power is small, the workpiece surface forms periodic undulation groove and broken pits are randomly distributed. When the laser power gradually increases, the workpiece surface gradually appears thermal cracks. The surface roughness first decreases and then increases with the increase of laser power. When the scanning times are low, the structure formed on the workpiece surface is shallow and loose. With the increase of laser scanning times, the structure formed on the workpiece surface is uneven. The surface roughness first decreases and then increases with the increase of scanning times. At low spot overlap rate, the workpiece surface groove is shallow and the overall surface undulation is weak. When the spot overlap rate increases, the surface grooves become deeper and the holes appear. The surface roughness increases with the increase of spot overlap rate.

Key words Silicon carbide ceramics, Pulsed laser, Modification, Surface morphology

0 引言

碳化硅陶瓷因优异的机械力学性能,广泛应用于众多工业领域^[1-3]。由于其本身的硬脆性,碳化硅陶瓷的开发和应用受到限制。

目前,碳化硅陶瓷的加工方式以机械加工、激光

加工、复合加工为主^[4-5]。机械加工主要是通过脆性材料的延伸、断裂和脱落来实现材料的去除^[6],易导致表面/亚表面缺陷^[7],且效率较低。激光加工具有加工成本低^[8]、效率高、可控性好以及无刀具磨损的优势^[9]。复合加工则结合两种或两种以上的加工方

收稿日期:2022-03-08

基金项目:湖南省自然科学基金(2022JJ5178);湖南省教育厅科学研究(20A202);难加工材料高效精密加工湖南省重点实验室开放基金(E21853)

第一作者简介:刘伟,1986年出生,博士,副教授,主要从事难加工材料高效精密智能磨削研究工作。E-mail:lw1986tiger@163.com

式来提高加工效率和质量。其中,激光加工是碳化硅陶瓷加工工艺的重要补充方法。

GAO等^[10]利用脉冲激光对双陶瓷热障涂层进行激光改性,工件表面粗糙度降低,陶瓷层出现再熔化和再溶解,具有更好的界面结合性能。YILBAS等^[11]利用二氧化碳连续激光对碳化硅陶瓷进行处理,发现工件表面形成细小凹槽,使其表面疏水性增强,表面硬度增大、断裂韧性降低,表面形成残余压应力。NITSU等^[12]利用Nd/YAG纳秒脉冲激光加工单晶硅圆片来修复其因磨削加工而产生的亚表面损伤,脉冲激光加工后损伤区域被修复为具有纳米级表面粗糙度的单晶结构,表面硬度提高。BAUNACK等^[13]对无压烧结碳化硅陶瓷进行激光加工,发现工件表面存在明显的氧化层,其中的Si、C和O存在不同的键合状态。WANG等^[14-15]利用飞秒激光加工4H-SiC,发现在高重叠率下工件表面形成周期性波纹,在较低重叠率下工件表面会同形成粗波纹和细波纹;在接近阈值能量密度时,工件表面不连续区域被烧蚀,形成高空间频率波纹结构,并存在一定厚度的非晶层。ZHANG等^[16]通过飞秒激光加工碳化硅陶瓷,分析了激光能量密度、重叠率、扫描次数对凹槽深度与宽度、热影响区和材料去除率的影响程度,并建立了回归模型。

激光加工技术为碳化硅陶瓷加工提供了一种新的加工思路,其国内外研究主要集中在激光对碳化硅陶瓷的作用机理。目前激光工艺参数对于碳化硅陶瓷改性表面特征的影响规律还未被全面认识,即激光工艺参数对碳化硅陶瓷表面形貌与表面粗糙度的影响规律缺少系统全面的研究。本文通过纳秒脉冲激光加工碳化硅陶瓷,采用单因素的实验研究方法,探究激光工艺参数对改性表面特征的影响规律。

1 实验

1.1 材料与设备

采用广东某公司提供的碳化硅陶瓷,工件性能参数如表1所示。试样尺寸为50 mm×50 mm×10 mm,实物如图1所示。碳化硅陶瓷工件表面晶粒分明、微观结构致密均匀,晶粒满足正态分布。

表1 碳化硅陶瓷材料属性
Tab. 1 Properties of SiC ceramic

$\rho/g \cdot cm^{-3}$	E/GPa	$K_{IC}/MPa \cdot m^{1/2}$	ν
3.12	390	4.0	0.24

采用振镜式纳秒脉冲激光系统,主要包括控制软件、调焦刻度尺、激光头与工作台,如图2所示。其基本参数如下:激光脉宽 τ 为20 ns,波长 λ 为1 064 nm,光斑直径 d_0 为28 μm ,脉冲频率 f 为50 kHz。



图1 碳化硅陶瓷工件

Fig. 1 SiC ceramic workpiece

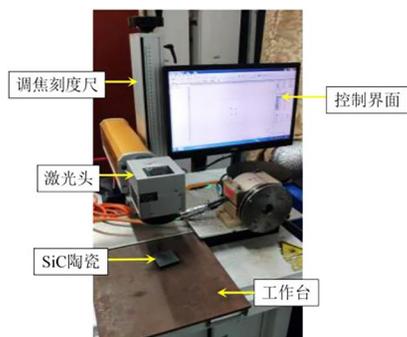


图2 纳秒脉冲激光设备

Fig. 2 Nanosecond pulsed laser equipment

1.2 脉冲激光加工实验方案

运用单因素法,使用纳秒脉冲激光系统对碳化硅陶瓷进行加工,工艺参数如表2所示。脉冲激光加工实验在工件50 mm×50 mm的表面上进行。

表2 激光加工工艺参数

Tab. 2 Laser processing parameters

P/W	$N/次$	$\eta/\%$
10, 20, 30, 40	1, 2, 3, 4	0, 25, 50, 75

脉冲激光加工完工件后,待工件冷却至室温,将其清洗烘干,采用超景深三维显微设备VHX-5000观察工件改性表面形貌,利用激光共聚焦显微设备LEXT-OLS500检测工件表面粗糙度,进而分析激光工艺参数对碳化硅陶瓷改性表面特征的影响规律。

2 结果与分析

2.1 激光功率对改性表面特征的影响

光斑重叠率、扫描次数分别取50%、1次,以激光功率为单一变量,探究碳化硅陶瓷改性表面特征。

如图3所示,当激光功率为10 W时,工件表面经脉冲激光加工后形成了沟槽且深度较浅,大部分沟槽呈周期性分布,此时工件的表面呈高低起伏。此外,可以在工件表面观察到许多的破碎凹坑,这些凹坑随机分布在工件表面;这是因为激光能量未达到工件的熔化阈值,工件的原始缺陷表现出来。当激光功率为20 W时,工件表面的破碎凹坑逐渐减少;这是因为激光的能量增强,使得工件表面的材料去除量增加,进而使得工件的原始缺陷逐渐减少。当

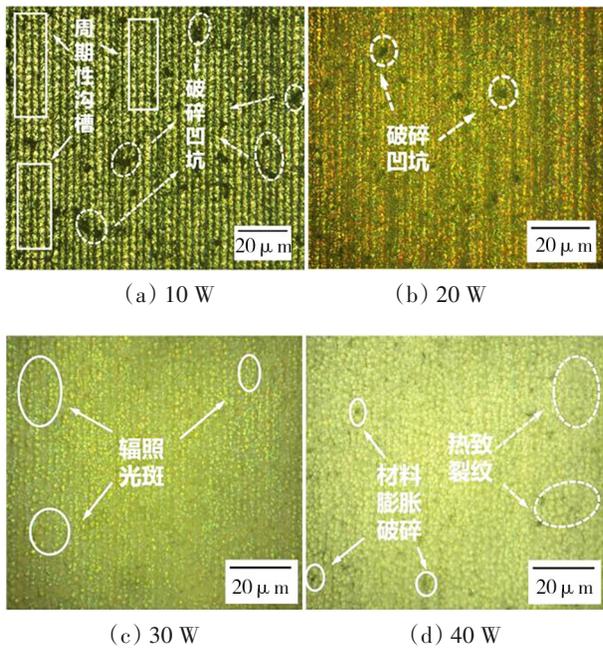


图3 不同激光功率时的表面形貌

Fig. 3 Surface morphology at different laser powers

激光功率为30 W时,工件表面出现轻微的脉冲激光加工残留痕迹、碎片以及少量裂纹;这是因为此时工件表面吸收的能量远大于碳化硅陶瓷的熔化阈值,工件发生热效应,使得表面层以及亚表面层产生热应力,工件原始缺陷在吸收了较多的激光能量后,在热应力的作用下材料发生膨胀破碎。当激光功率为40 W时,材料熔化;因为此时的激光能量足够,且其远大于材料的熔化阈值,材料出现汽化、等离子体化;工件表面的沟槽形貌不再明显;在这个过程中,汽化的材料和等离子体相互撞击、堆积,进而再回落到工件表面上。随着激光能量的不断增加,热效应对工件的影响增大,工件表层产生的热应力也越来越大,材料发生越发剧烈的破碎,进而生成越来越多的材料熔融物碎渣,部分碎渣掉回到工件表面,剩余部分飞溅至工作台上。随着能量不断增加,热应力的影响也越来越明显,使得工件表面逐渐出现崩裂的热致裂纹。

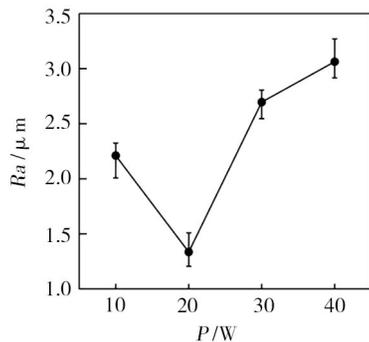


图4 激光功率对表面粗糙度的影响

Fig. 4 Effect of laser power on surface roughness

图4为激光功率对表面粗糙度的影响。随激光功率的增大,表面粗糙度先减小后增大。当激光功率为20 W时,工件表面粗糙度最小,工件表面质量较好。随着激光功率的进一步增加,激光束作用在材料表面的能量也增大,材料表面吸收越来越多的能量,进而发生过量去除,导致材料表面脉冲激光加工的痕迹越发明显、裂纹数量逐渐增加,使得工件表面粗糙度增加,工件表面质量变差。

2.2 扫描次数对改性表面特征的影响

激光功率、光斑重叠率分别取30 W、50%,以激光扫描次数为单一变量,探究碳化硅陶瓷改性表面特征。

如图5所示,当扫描次数不断增加,工件表面沟槽的宽度变化很小,沟槽的沟深不断增加;这是因为宽度主要与激光光斑直径相关;而深度增加是因为当扫描次数不断增加,之前加工出的表面沟槽发生多次加工,工件材料进一步被去除。当扫描次数为1次时,形成的结构较为浅薄、疏松;增加扫描次数,工件表面会发生进一步的烧蚀,破坏已形成的微结构。当扫描次数为4次时,沟槽区域的热影响区面积较大,沟槽的边缘区域生成了大量重铸结构;这是因为随着沟槽的深度不断增加,经激光烧蚀后汽化或熔融的材料难以从较深的沟槽内溅射出来,此外,熔融的材料在工件表面遇冷重凝之后又会被脉冲激光重新加工,使得表面形成的结构凹凸不平,工件表面质量恶化。

图6为扫描次数对表面粗糙度的影响。随扫描

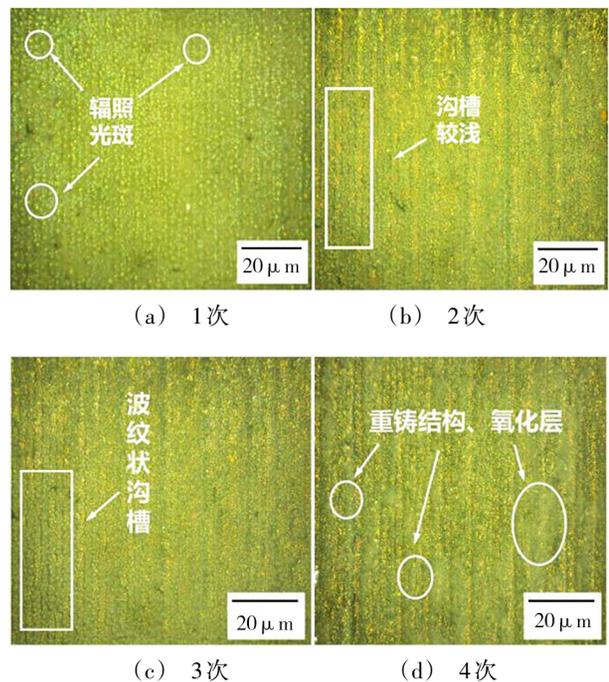


图5 不同扫描次数时表面形貌

Fig. 5 Surface morphology at different scanning times

次数的增大,表面粗糙度先减小后增大。当扫描次数为3次时,工件表面粗糙度最小。当扫描次数较少时,工件表面是比较均匀平整的;过多的扫描次数,导致过高的能量吸收,其表面形成大波纹结构,使表面质量恶化。因此,合适的扫描次数有利于实现工件表面改性,获得较好的加工质量。

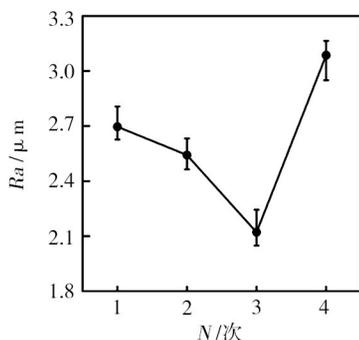


图6 扫描次数对表面粗糙度的影响

Fig. 6 Effect of scanning times on surface roughness

2.3 光斑重叠率对改性表面特征的影响

激光功率、扫描次数分别取30 W、1次,以光斑重叠率为单一变量,探究碳化硅陶瓷改性表面特征。

如图7所示,当光斑重叠率较小时,脉冲激光加工作用在工件表面的单位面积能量较小,经脉冲激光加工扫描后工件表面形成的沟槽较浅,工件整体表面的沟槽起伏高度较低;当光斑重叠率不断增大,脉冲激光加工作用在工件表面的能量增大,能量累积效应越发明显,激光作用于材料表面的影响逐渐加强,工件改性表面的沟槽逐渐变深,工件表面因过度烧蚀出现孔洞,严重降低了工件表面质量。

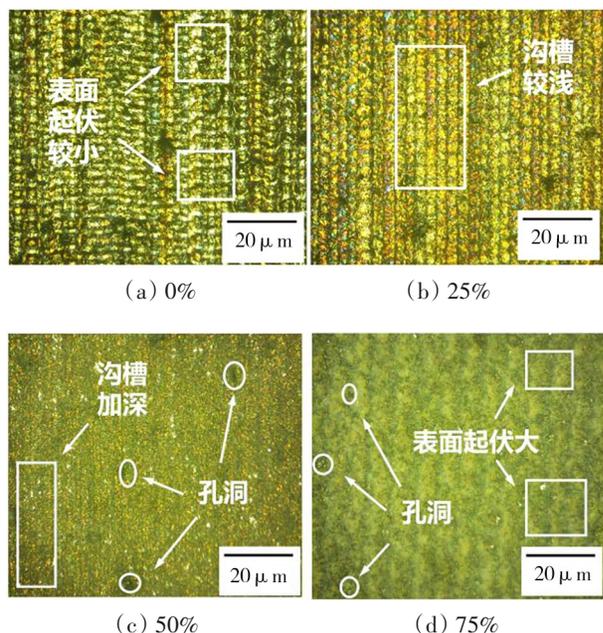


图7 不同光斑重叠率时表面形貌

Fig. 7 Surface morphology at different spot overlap rates

图8为光斑重叠率对表面粗糙度的影响。随光斑重叠率的增大,表面粗糙度增大。当光斑重叠率较小时,改性层较浅,表面粗糙度也较低;当光斑重叠率增大,作用在材料表面的激光能量增大,工件表面发生剧烈的熔化和汽化,其表面形成深度较大的沟槽使得表面结构逐渐加深,表面粗糙度也增大;并且由于脉冲激光加工区域脉冲数的叠加,工件表面沟槽发生进一步烧蚀而产生孔洞结构,工件表面的起伏性增加。可知,脉冲激光加工碳化硅陶瓷时,较大的光斑重叠率将会引起脉冲激光加工表面的严重烧蚀,形成较差的表面质量。

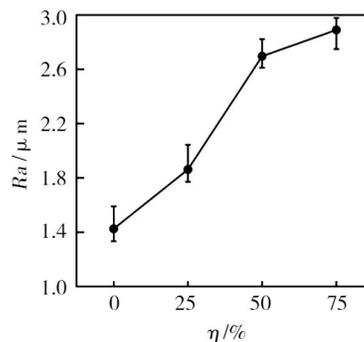


图8 光斑重叠率对表面粗糙度的影响

Fig. 8 Effect of spot overlap rates on surface roughness

3 结论

(1)随激光功率的增大,碳化硅工件表面粗糙度先减小后增大。当激光功率较小时,工件表面形成周期性的沟槽起伏表面,并存在大量随机分布的破碎凹坑;当激光功率增大,激光能量密度远大于工件熔化阈值,工件表面出现熔化、汽化以及等离子体化等现象,形成不规则表面,且在热应力的影响下,工件表面出现热致裂纹。

(2)随扫描次数的增大,碳化硅工件表面粗糙度先减小后增大。当扫描次数较低时,工件表面形成的结构较为浅薄、疏松;随着激光扫描次数的增加,工件表面沟槽深度不断增加,沟槽边缘产生大量重铸结构,表面形成的结构凹凸不平。

(3)随光斑重叠率的增大,碳化硅工件表面粗糙度增大。当光斑重叠率小时,工件表面最大起伏高度较小,改性层较浅;当光斑重叠率大时,脉冲激光加工区域激光能量大,材料表面形成较深的沟槽,表面结构加深。

参考文献

[1] 曹建国,张勤俭. 碳化硅陶瓷超声振动辅助磨削材料去除特性研究[J]. 机械工程学报,2019,55(13):205-211.

CAO J G, ZHANG Q J. Material removal behavior in ultrasonic assisted grinding of SiC ceramics [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(13): 205-211.

- [2] ISHIHARA M, BABA S, TAKAHASHI T, et al. Fundamental thermo mechanical properties of SiC-based structural ceramics subjected to high energy particle irradiations [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2000, 51-52: 117-121.
- [3] SAMANT A N, DAHOTRE N B. Laser machining of structural ceramics—A review [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2009, 29(6): 969-993.
- [4] 李晓东, 赵英民, 张晓峰, 等. 加工工艺对 C/SiC 复合材料性能的影响 [J]. *宇航材料工艺*, 2015, 45(4): 104-107.
- LI X D, ZHAO Y M, ZHANG X F, et al. Influence of machining process parameters on property of C/SiC composites [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2015, 45(4): 104-107.
- [5] LIU W, DENG Z H, SHANG Y Y, et al. Effects of grinding parameters on surface quality in silicon nitride grinding [J]. *Ceramics International*, 2017, 43(1): 1571-1577.
- [6] 刘民慧. 碳化硅陶瓷精密磨削亚表面损伤及预测研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- LIU M H. Research on Subsurface Damage and Prediction of Silicon Carbide Ceramics in Precision Grinding [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [7] AGARWALL S. Optimizing machining parameters to combine high productivity with high surface integrity in grinding silicon carbide ceramics [J]. *Ceramics International*, 2016, 42(5): 6244-6262.
- [8] 苏飞, 李文毅, 李纯杰. 纤维增强复合材料激光加工研究进展 [J]. *宇航材料工艺*, 2021, 51(6): 1-9.
- SU F, LI W Y, LI C J. Research on laser processing of fiber reinforced plastics [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2021, 51(6): 1-9.
- [9] 潘永成. 碳化硅菲涅尔微结构的激光—超精密磨削工艺技术基础 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- PAN Y C. Processing Technology Basics of Silicon Carbide Fresnel Microstructure Based on Laser Machine—ultraprecision Grinding [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [10] GAO L, LI Y H. A toughening method of the interface in double-ceramic-layer thermal barrier coating based on selected laser modification [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(1): 179-186.
- [11] YILBAS B S, BHUSHAN B. Laser treatment of sintered silicon carbide surface for enhanced hydrophobicity [J]. *JOM*, 2014, 66(1): 87-94.
- [12] NIITSU K, TAYAMA Y, KATO T, et al. Laser recovery of grinding-induced subsurface damage in the edge and notch of a single-crystal silicon wafer [J]. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2019, 7(1): 15013.
- [13] BAUNACK S, OSWALD S, TÖNSHOFF H K, et al. Surface characterisation of laser irradiated SiC ceramics by AES and XPS [J]. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, 1999, 365(1): 173-177.
- [14] WANG C W, KUROKAWA S, DOI T, et al. SEM, AFM and TEM studies for repeated irradiation effect of femtosecond laser on 4H-SiC surface morphology at near threshold fluence [J]. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2018, 7(2): 29-34.
- [15] WANG C W, KUROKAWA S, DOI T, et al. Surface morphology evolution induced by multiple femtosecond laser ablation on 4H-SiC substrate and its application to CMP [J]. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2017, 6(12): 853-861.
- [16] ZHANG R, HUANG C Z, WANG J, et al. Experimental investigation and optimization of femtosecond laser processing parameters of silicon carbide—based on response surface methodology [J]. *Ceramics International*, 2022, 48(10): 14507-14517.