

光斑及线重合度对飞秒激光环形刻蚀 SiC/SiC 复合材料的影响

方菊¹,刘壮¹,李元成²,张晓兵²

(1. 南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016; 2. 中国航空制造技术研究院,北京 100024)

摘要:采用飞秒激光对 SiC/SiC 复合材料进行环形扫描刻蚀去除试验,分析脉冲能量、光斑重合度及线重合度对加工区域材料残留及环形凹槽外轮廓的影响。结果表明:光斑重合度、线重合度和脉冲能量显著影响光束扫描面积内的能量密度,材料去除量随扫描能量密度的增大而增大。在较小光斑重合度和线重合度条件下,即能量密度较小时,刻蚀槽外轮廓呈现锯齿状,且扫描轨迹间有较多材料残留。随着光斑重合度和线重合度的增大,外轮廓及底面趋于光滑。

关键词:飞秒激光;环形刻蚀;SiC/SiC 复合材料;光斑重合度;线重合度

中图分类号: TB333;V261.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2023)03-0007-04

Effect of Spot and Line Overlap on Femtosecond Laser Ablation of SiC/SiC Composite

FANG Ju¹, LIU Zhuang¹, LI Yuancheng², ZHANG Xiaobing²

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

Abstract: Spiral scanning ablation was carried out on SiC/SiC composite using femtosecond laser to study the effects of pulse energy, spot overlap and line overlap on material residue in processing area and ablated profile. The results show that spot overlap, line overlap and pulse energy enormously influence the energy density of the beam scanning area, and the volume of material removal increases along with the increase of scanning energy density. Under the condition of smaller spot overlap and line overlap, namely in lower energy density, the ablated contour appears rougher with more material residue between the scanning tracks. As the spot overlap and line overlap increase, the outer contour and bottom tend to be smoother.

Keywords: femtosecond laser; spiral ablation; SiC/SiC composite; spot overlap; line overlap

0 引言

碳化硅纤维增强碳化硅复合材料(SiC/SiC)具有低密度和高温性能稳定等优点,是高性能航空发动机高温部件的理想结构材料^[1-2]。由于 SiC/SiC 复合材料的硬度极高,属于典型的难加工材料,采用机械加工、电火花加工、水射流加工、超声加工等方法加工时,在加工区域容易出现分层、微裂纹等缺陷,难以保证加工质量^[3-4]。飞秒激光具有极短脉宽和极高的峰值功率,与材料的相互作用时间极短,几乎可以使被加工材料瞬间气化,因而加工结构轮廓清晰,重铸层、微裂纹等缺陷较少^[5-6]。ZHAI Z Y 等^[7]使用高重复频率飞秒激光对 SiC/SiC 进行了直线划槽加工,分析了光斑重合度对热累积热效应的影响。LIU Y S 等^[8]开展了 C/SiC 皮秒激光微孔加工试验,讨论了工艺参数对微孔加工形貌的影响。本文采用飞秒激光开展了 SiC/SiC 复材环形刻蚀研究,探讨了光斑重合度与线重合度对刻蚀形貌的影响,以期今后 SiC/SiC 超快激光表面刻蚀加工提供参考。

1 试验方案

试验使用的飞秒激光器型号为 PharosPHI-20,输出光束波长为 1 026 nm,脉冲宽度 290 fs,最大输出功率 20 W,最大脉冲重复频率 100 kHz。光束通过焦距为 110 mm 的透镜聚焦后形成的光斑直径为 30 μm 。试验所使用的材料为 2.5 维编织、经由先驱体浸渍裂解工艺(PIP)制备而成的 SiC/SiC 复材厚板,试样尺寸为 30 mm \times 15 mm \times 4 mm,密度为 2.3 g/cm³。其中,单根 SiC 纤维直径 12 μm ,SiC 纤维的体积分数为 45%。

图 1 为飞秒激光在 SiC/SiC 复合材料上环形扫描刻蚀去除的路径示意图。光束扫描从最外圈轨迹开始,最外圈轨迹圆直径为 400 μm ,然后以相同的扫描速度扫描 4 圈,如此重复扫描 100 次。主要研究脉冲能量、光斑重合度和线重合度等因素对残留材料和凸台外径大小的影响。试验中脉冲光束重复频率固定为 10 kHz,脉冲能量选择 4 个水平:2 μJ 、20 μJ 、100 μJ 、200 μJ 。光斑扫描速度选择 4 个水平:100 mm/s、200 mm/s、300 mm/s、400 mm/s。填充

基金项目:国家科技重大专项(2017-VII-0015-0111)

第一作者简介:方菊(1995—),女,湖北襄阳人,硕士研究生,研究方向为激光加工技术。

间距选择 3 个水平:20 μm、30 μm、40 μm。

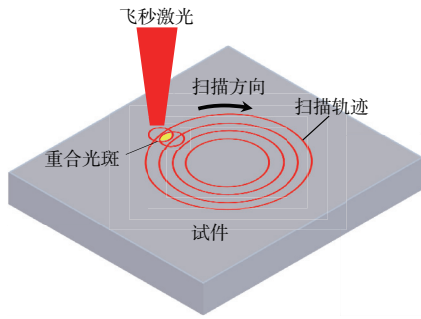


图 1 环形扫描去除路径示意图

在飞秒激光蚀除材料过程中,脉冲能量、扫描速度及填充间距均对光束输入能量密度有影响。填充间距的大小直接影响线重叠率,当脉冲能量、重复频率、扫描速度等参数一定时,线重叠率对加工结果有较大的影响。过小的线重叠率会导致材料残留;而过大的线重叠率会导致加工区域被过烧蚀,并产生较大的热影响区等副作用,因此在使用同心圆扫描时,扫描轨迹间填充间距的选择十分重要。线重叠率的计算公式如下:

$$\delta_L = \left(1 - \frac{L}{2r}\right) \times 100 \quad (1)$$

式中: δ_L 是线重叠率; L 是填充间距; r 是光斑半径。3 个填充间距对应的线重合度分别为-33%、0%、33%。

2 结果与分析

当进行环形扫描时,残留的材料受到光斑重合度和线

重合度的共同作用,因此导致残留材料有两种形式。图 2(a)为光斑重合度和线重合度对材料表面覆盖不完全时,理论残留面积为正的示意图;图 2(b)为光斑重合度和线重合度对材料表面过覆盖时,理论残留面积为负的示意图。

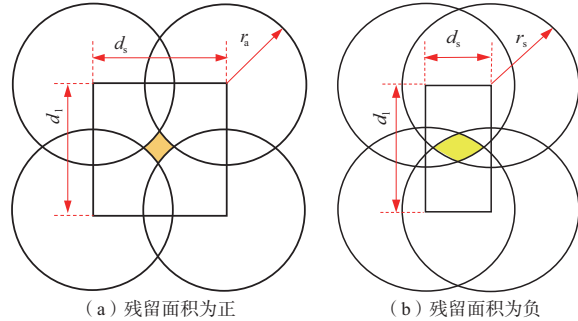


图 2 残留材料计算方法示意图

图 3—图 5 分别为脉冲能量 20 μJ、100 μJ、200 μJ 时,残留面积随光斑重合度和线重合度的变化图。从图中可以看出随着光斑重合度、线重合度及脉冲能量的增加,残留面积逐渐减少。例如,对于光斑直径 30 μm,线重合度-33%,当光斑重合度为-33%时,理论残留面积为 894 μm²,而 20 μJ、100 μJ、200 μJ 脉冲能量下实际残留面积分别为 344 μm²、14 μm²、-727 μm²。当光斑重合度为 0%时,理论残留面积为 494 μm²,20 μJ、100 μJ、200 μJ 脉冲能量下实际残留面积分别为 126 μm²、-31 μm²、-1 183 μm²。当光斑重合度为 67%时,理论残留面积为 118 μm²,20 μJ、100 μJ、200 μJ 脉冲能量下的实际残留面积分别为 12 μm²、-343 μm²、-2 128 μm²。

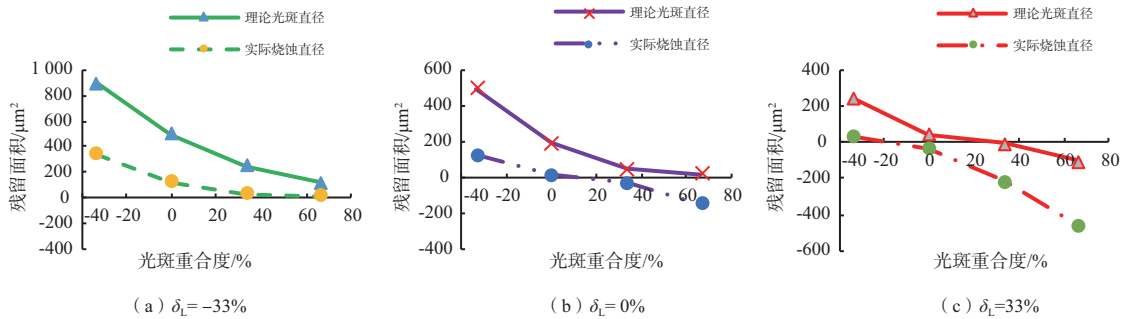


图 3 脉冲能量 20 μJ 下残留面积随光斑重合度和线重合度的变化

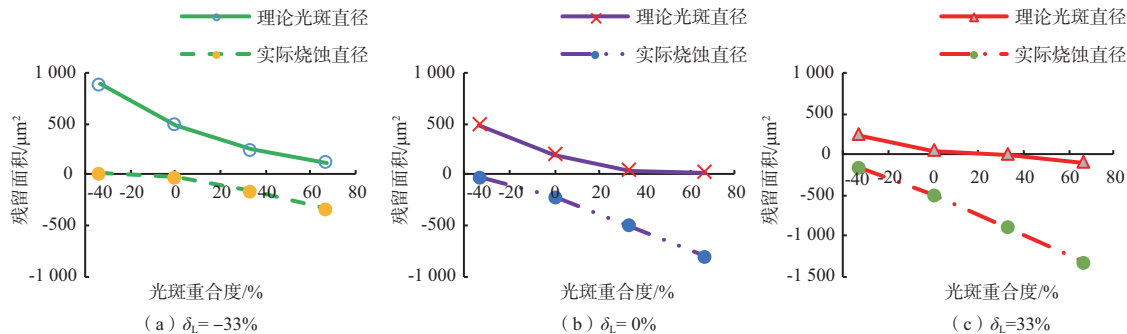


图 4 脉冲能量 100 μJ 下残留面积随光斑重合度和线重合度的变化

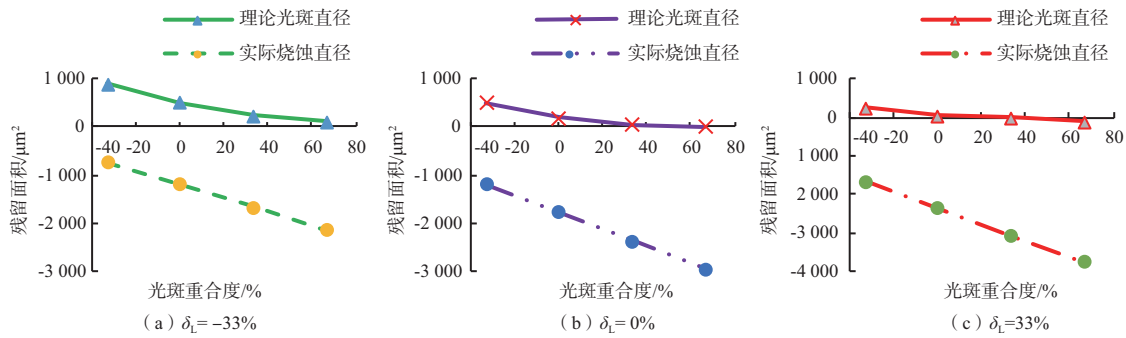
图5 脉冲能量 200 μJ 下残留面积随光斑重合度和线重合度的变化

图6展示了部分不同脉冲能量、光斑重合度及线重合度下的实际加工结果。从图中可以看到,基于光斑大小计算的理论残留面积均为正值,但实际加工结果均没有材料残留。在脉冲能量为 20 μJ 下,当线重合度 33%、光斑重合度-33%时,理论残留面积为 245.5 μm^2 ,加工区域应由一个个不连续的烧蚀坑组成。相同加工条件下,根据实际烧蚀坑大小推理出的残留面积为 34 μm^2 ,远小于理论值。从试验结果可以明显看到加工区域是一个个连续的小凹坑,凹坑之间有少量材料残留。当增大光斑重合度到 0% 时,理论残留面积为 45.5 μm^2 ,残留材料明显减少,而此时实际推理的材料残留面积为 -30 μm^2 ,说明没有材料残留,形成了底面光滑的环形槽。当增加脉冲能量到 100 μJ 、200 μJ 时,理论残留面积值在 193.5 $\mu\text{m}^2 \sim 893.5 \mu\text{m}^2$ 之间,而由实际烧蚀坑直径推理出的材料残留面积值在 -31 $\mu\text{m}^2 \sim -1183 \mu\text{m}^2$ 之间,说明采用 100 μJ 和 200 μJ 的脉冲能量,在较小的光斑重合度和线重合度下进行试验,能够得到没有材料残留、形成完整凹槽的加工结果。对照加工结果,凹槽底部光滑,没有多余材料,试验结果与推理计算相符。同时,当采用 20 μJ 的脉冲能量、-33% 的光斑重合度加工时,环形凹槽的外切边的残齿高度约为 13 μm 。同样脉冲能量下,增大光斑重合度到 0% 时,得到的外切边残齿高度降低到 9 μm ,切边残齿高度随着光斑重合度的增大而降低,当增加光斑重合度足够大时,可以得到切边光滑的环形槽。当采用脉冲能量 100 μJ 、200 μJ 进行飞秒激光加工试验时,在光斑重合度为-33% 下能够获得很小的残齿,其值在 0 $\mu\text{m} \sim 10 \mu\text{m}$ 之间,说明增大脉冲能量在较小的光斑重合度情况下也可以获得较好的切边形状。

表1为光斑重合度-33%时,不同线重合度和脉冲能量下测得的凹槽外径。从表中可以看出,线重合度为-33%、0%时,凹槽外径随脉冲能量的增大而增大,且均小于理论外径 430 μm ;线重合度为 33% 时,得到的凹槽外径与理论外径值相当,且随着脉冲能量的增大,其值没有明显变化。这是由于飞秒激光的能量呈高斯分布,光斑按照扫描轨迹扫描时,辐照在加工区域能量密度分布也呈现中间高两边低趋势,而材料的去除又与烧蚀阈值有关。当线重合度较小时,相邻同心圆环间距较大,光斑重叠区域较少,则覆盖区域输入能量密度较小,因此材料去除较少,使得实际去除的区域直径小于理论去除区域直径;而随着脉冲能量的增大,能量密度增大,使得材料去除量增大,凹槽外径与理论值接近。当线重合度较大时,

能量密度增大,达到烧蚀阈值的区域增大,材料去除范围与理论外径值相当;由于环形扫描时采取逐层去除,同一位置的材料不会被重复加工,所以 δ_L 为 33% 时,凹槽外径随脉冲能量的增大没有明显增大。

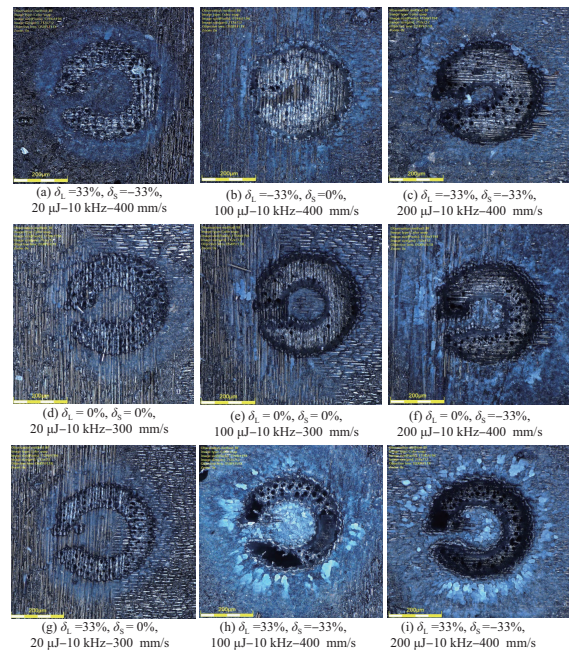


图6 不同光斑重合度及线重合度的刻蚀结果

表1 不同脉冲能量下理论凹槽外径与实际值的对比

线重合度/%	理论外径/ μm	实际外径/ μm		
		20 μJ	100 μJ	200 μJ
-33	430	388	404	426
0	430	392	416	428
33	430	430	434	437

3 结语

本文开展了 SiC/SiC 飞秒激光环形扫描刻蚀试验,通过对比以光斑大小计算的理论残留面积与实际加工结果,研究了不同脉冲能量、线重合度、光斑重合度对材料去除结果的影响。光斑重合度、线重合度和脉冲能量会显著影响光束扫描面积内的能量密度,加工区域材料的去除量随能量密度的增大而增大,具体结论如下。

1)当脉冲能量较小时,在较小的光斑重合度和线重合度下,刻蚀槽外轮廓及扫描轨迹间均会出现较多的材料残留,随着光斑重合度和线重合度的增大,材料去除率增大,逐渐形成底面及外轮廓光滑的凹槽;同时,通过提高脉冲能量也可以明显减缓这种现象,增大材料去除率。

2)线重合度为-33%、0%时,凹槽外径随脉冲能量的增大而增大,且均小于理论外径 430 μm 。增大线重合度为 33%时,得到的凹槽外径与理论外径值相当,且随着脉冲能量的增大,其值没有明显变化。因此,对于 100 μm ~200 μm 深度的表面刻蚀加工,采用较低光斑重合度及线重合度与较大脉冲能量配合加工对于提高加工效率有利。

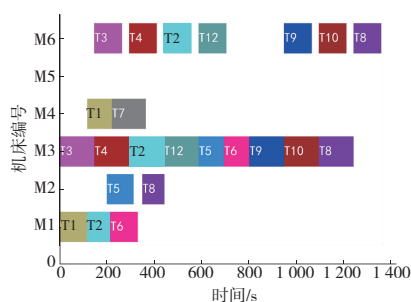
参考文献:

- [1] 邱海鹏,陈明伟,谢巍杰. SiC/SiC 陶瓷基复合材料研究及应用[J]. 航空制造技术,2015,58(14):94-97.
[2] 刘巧沐,黄顺洲,何爱杰. 碳化硅陶瓷基复合材料在航空发动机上的应用需求及挑战[J]. 材料工程,2019,47(2):1-10.

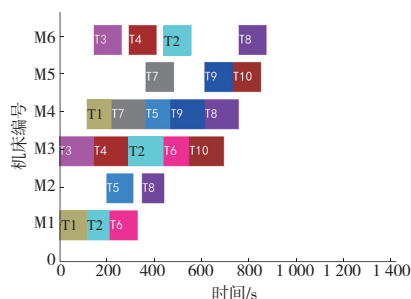
- [3] 焦健,王宇,邱海鹏,等. 陶瓷基复合材料不同加工工艺的表面形貌分析研究[J]. 航空制造技术,2014,57(6):89-92.
[4] 张灿祥,张卫锋,刘致君,等. 旋转超声钻削加工的研究现状及发展趋势[J]. 机械制造与自动化,2021,50(1):1-5.
[5] 夏博. 飞秒激光高质量高深径比微孔加工机理及其在线观测[D]. 北京:北京理工大学,2016:14-42.
[6] 邱一,刘壮,李元成,等. 飞秒激光扫描去除 CFRP 复合材料的热累积分析[J]. 应用激光,2021,41(5):1004-1010.
[7] ZHAI Z Y, WEI C, ZHANG Y C, et al. Investigations on the oxidation phenomenon of SiC/SiC fabricated by high repetition frequency femtosecond laser[J]. Applied Surface Science,2020,502:144131.
[8] LIU Y S, WANG C H, LI W N, et al. Effect of energy density and feeding speed on micro-hole drilling in C/SiC composites by picosecond laser[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014,214(12):3131-3140.

收稿日期:2022-01-05

(上接第 3 页)



(a) 训练前调度甘特图



(b) 训练后调度甘特图

图 5 智能体训练效果图

4 结语

随着工业 4.0 时代的到来,多品种小批量的生产模式、快速变化的客户需求需要制造系统具有高灵活性和高可重构性。针对当前动态车间调度算法存在的不足,本文提出了一个应用于柔性作业车间调度模型,并设计了其关键要素;在该模型的基础上,又设计了其对应的训练方法;最后仿真结果表明,本文训练的调度智能体有效地提高了制造车间的生产效率。

由于时间的限制,所做的研究还存在着以下不足。

1)本文提出的调度智能体模型是基于全局调度的,但是当制造系统的规模变大和扰动事件频发时,全局调度的性

能很差,后续可以考虑以车间的每个设备作为一个自主的调度智能体,设计多智能体强化学习模型。2)本文设计的调度模型目标函数只考虑了最短机床空闲时间,后续可以考虑设备负载、加工率等其他优化目标。

参考文献:

- [1] CHEN F, DENG P, WAN J F, et al. Data mining for the internet of things: literature review and challenges [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks,2015,11(8):431047.
[2] XU X. From cloud computing to cloud manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,2012,28(1):75-86.
[3] TING D S W, PASQUALE L R, PENG L, et al. Artificial intelligence and deep learning in ophthalmology[J]. The British Journal of Ophthalmology,2019,103(2):167-175.
[4] ZHANG Y F, GUO Z G, LYU J X, et al. A framework for smart production-logistics systems based on CPS and industrial IoT[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics,2018,14(9):4019-4032.
[5] ZEADALLY S, SANISLAV T, MOIS G D. Self-adaptation techniques in cyber-physical systems (CPSs) [J]. IEEE Access,2019,7:171126-171139.
[6] 董蓉,何卫平. 求解 FJSP 的混合遗传-蚁群算法[J]. 计算机集成制造系统,2012,18(11):2492-2501.
[7] SHA D Y, LIN H H. A multi-objective PSO for job-shop scheduling problems [J]. Expert Systems With Applications, 2010,37(2):1065-1070.
[8] 周刚. 基于人工蜂群算法的柔性调度问题研究[D]. 北京:清华大学,2012.
[9] AISSANI N, BEKRAR A, TRENTESAUX D, et al. Dynamic scheduling for multi-site companies:a decisional approach based on reinforcement multi-agent learning[J]. Journal of Intelligent Manufacturing,2012,23(6):2513-2529.
[10] 陈鸣. 面向混线生产的多 Agent 智能调度方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2020.
[11] 蒋静静. 基于深度强化学习的离散型制造企业车间动态调度研究[D]. 西安:西安理工大学,2020.

收稿日期:2021-12-03