

TC11 钛合金表面微凹坑织构皮秒激光加工工艺

华希俊¹, 王成¹, 郝静文¹, 陈亚林², 解玄¹, 符永宏¹

(1.江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013; 2.江苏西希维轴承有限公司, 江苏 镇江 212013)

摘要: **目的** 研究皮秒激光加工工艺参数对微凹坑形貌的影响规律。**方法** 采用 FSLAB-50-05 激光器搭建的激光器平台对 TC11 钛合金工艺试样进行表面微加工, 通过 WYKO—NT1100 型表面三维形貌测试仪获得表面微凹坑织构形貌, 分别记录微加工后的二维与三维形貌图, 应用单因素法分析激光重复频率、激光持续时间和激光功率对微凹坑形貌的影响规律。**结果** 在激光功率为 10 W、激光持续时间为 0.12 ms 的前提下, 当激光重复频率由 50 kHz 增加到 250 kHz 时, 微凹坑的直径和深度均呈现出先增大后减小的趋势; 在激光功率为 10 W、激光重复频率为 300 kHz 的前提下, 当激光持续时间由 0.02 ms 增加到 0.10 ms 时, 微凹坑直径和深度均随着激光持续时间的增加而变大; 在激光重复频率为 300 kHz、激光持续时间为 0.12 ms 的前提下, 当激光功率由 4 W 提升至 12 W 时, 微凹坑的深度随着激光功率的增大而增大, 而宽度先增大后减小。**结论** 皮秒激光微凹坑织构较佳的工艺参数范围为: 激光重复频率 150~200 kHz, 激光持续时间 0.04~0.06 ms, 激光功率 8~10 W。

关键词: 皮秒激光; 激光表面织构; TC11 钛合金; 微凹坑; 工艺参数

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)03-0042-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.03.007

Picosecond Laser Processing Technology of Micro-dimple Texture on Surface of TC11 Titanium Alloy

HUA Xi-jun¹, WANG Cheng¹, HAO Jing-wen¹, CHEN Ya-lin², XIE Xuan¹, FU Yong-hong¹

(1.School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2.Jiangsu CCTY Bearing Co. Ltd, Zhenjiang 212013, China)

ABSTRACT: The work aims to study law of influence of picosecond laser processing parameters on micro-dimple morphology. Surface micromachining was performed to TC11 titanium alloy process sample on a laser platform consisting of FSLAB-50-05 laser. Morphology of surface micro-dimple texture was observed with WYKO-NT1100 surface 3D morphology tester. 2D and 3D morphology of the micromachined texture was recorded, respectively. Law of influence of laser repetition frequency, laser duration and laser power on micro-dimple morphology was analyzed in single factor method. Provided with laser power of 10 W and laser duration of 0.12 ms, diameter and depth of the micro-dimples tended to first increase and then decrease as laser repetition frequency increased from 50 kHz to 250 kHz; provided with laser power of 10 W and laser repetition frequency of 300 kHz, the diameter and depth of micro-dimples increased with the increase of laser duration as the laser duration increased from 0.02 ms to 0.10 ms; provided with laser repetition frequency of 300 kHz and laser duration of 0.12 ms, depth of micro-dimples increased with the increase of laser power while width first increased and then decreased as laser power increased from 4 W to 12

收稿日期: 2017-09-29; 修订日期: 2017-12-09

Received: 2017-09-29; Revised: 2017-12-09

基金项目: 国家自然科学基金 (51375211, 51375213); 江苏省产业前瞻与共性关键技术项目 (BE2017122, BE2016144)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51375211, 51375213), Key Technology Projects and Common Industry Outlook in Jiangsu Province (BE2017122, BE2016144)

作者简介: 华希俊 (1966—), 男, 工学博士, 教授, 主要研究方向为激光表面改性、摩擦学设计与固体润滑等。

Biography: HUA Xi-jun (1966—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: laser surface modification, tribology design and solid lubrication.

W. Optimum process parameters of picosecond laser micro-dimple texture are: repetition frequency of 150 kHz to 200 kHz, laser duration of 0.04 ms to 0.06 ms, and laser power of 8 W to 10 W.

KEY WORDS: picosecond laser; laser surface texture; TC11 titanium alloy; micro-dimples; process parameter

摩擦副之间的表面形貌是影响零件摩擦学特性的重要因素。有文献显示^[1-6]，摩擦副表面形态的优化是有技可施的，如织构技术就能够很好地对物件表面几何形貌进行优化，实现摩擦要素的改善，延长组件使用期限。在众多织构技术中，各类技术特性不一。其中激光织构技术优势突出，具有可控制性、高质量化的特点，对零件结构影响小。

目前，市场上面向工业应用的主流激光器是 CO₂ 激光器、光纤激光器、半导体激光器以及准分子激光器，其激光脉冲宽度多在微秒（ μs ）、纳秒级（ ns ）水平^[7]。当材料表面接触到长脉冲激光后，材料表面吸收激光能量，经晶格/电子热传导使材料辐射区域升温，导致材料融化至汽化，完成去除工作，属于“热加工”，因此会在材料加工区域形成热影响区，造成熔凝残渣及应变裂纹等缺陷。WEINGARTEN^[8]指出脉冲宽度减少的同时，会引起材料去除阈值的缩减。例如，在脉冲宽度为 10 ps 时，可实现“冷加工”，且无热效应出现，得到的成品质量依然满足规范标准。STEPHEN 等^[9-10]进行了皮秒与纳秒激光的对比实验，结果表明皮秒激光的加工效果优于纳秒。国内外大量研究表明^[11-14]，表面织构形貌的质量与不同激光加工参数有关且存在对应关系。

本文在前人研究基础上，采用皮秒激光器为激光源，对 TC11 钛合金进行表面织构，研究激光功率、重复频率以及激光持续时间对微凹坑几何形貌的影响。

1 试验

1.1 试样制备

试样材料为 TC11 钛合金，化学成分见表 1。将试样加工成圆盘形状，直径为 50 mm，厚度为 5 mm。试样表面先用砂纸进行打磨，再用抛光机抛光，保证表面粗糙度降至 0.05 μm 以下。

表 1 TC11 钛合金材料的化学成分
Tab.1 Chemical composition of TC11 titanium alloy

							wt%
Al	Mo	Zr	Si	Fe	C	O	Ti
6.38	3.34	1.56	0.28	0.13	0.009	0.10	Bal.

1.2 试验设备

试验在以 FSLAB-50-05 皮秒激光器搭建的试验平台上进行，表 2 展示了皮秒激光器的各性能参数及取值。利用 WYKO-NT1100 表面三维形态仪器对微凹

坑进行表面形态检测。试验前，选用 PG-2 抛光机对试样进行抛光处理。选择 KYX25-2400L 超声波清洗设备清洗材料表面。

表 2 皮秒激光器参数
Tab.2 Parameters of picosecond laser

主要性能参数	参数值范围
最大输出功率/W	50
最大单脉冲能量/ μJ	200
脉冲频率范围/kHz	0~1000
激光波长/nm	双波长1064+532
脉冲宽度/ps	9
光束质量 M^2	≤ 1.5

1.3 试验方案

在单因素分析法的指导下，研究微凹坑表面形貌在皮秒激光作用下发生的变化。试验操作过程为：

- 1) 做好前期处理工作。用 400[#]、600[#]、800[#]、1200[#]和 1500[#]砂纸打磨试样，再用抛光机抛光 15 min，并擦干试样面，擦干材料为无水乙醇棉球。
- 2) 加工环节。在工作台上紧固试样，调整好加工位置，根据试验方案设定激光加工工艺参数，采用单因素法进行工艺试验。
- 3) 试样处理及形貌检测。取出试样用抛光机先进行抛光，再放入超声波清洗机内清洗 20 min，取出试样，并进行擦干处理，擦干材料为无水乙醇棉球。检测材料表面微组织结构形态，分别记录微织构加工后的二维与三维形貌。
- 4) 对数据进行整理、分析和总结，得出皮秒加工参数对微凹坑形貌的影响规律。

2 结果与分析

2.1 皮秒激光重复频率对微凹坑形貌的影响

激光重复频率是指单位时间内激光所产生的脉冲个数，通过改变重复频率，可以改变单位时间作用在加工表面上的激光脉冲个数，从而可以加工出预想的微凹坑深度和直径，因此重复频率对凹坑形貌有重大影响。本次试验的激光功率恒定 10 W，作用于单个微凹坑的激光持续时间为 0.12 ms，脉冲宽度为 9 ps，激光重复频率依次选取 50、100、150、200、250 kHz，对试样进行表面微织构处理。不同重复频率对微凹坑形貌的影响如图 1 所示，可看出在重复频率不断增加的同时，微凹坑宽度、深度不断提高，之后再减小。

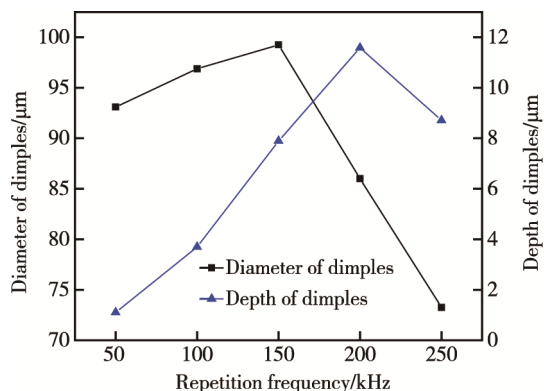


图1 微凹坑直径和深度随重复频率变化曲线

Fig.1 Variation curves of micro-dimple diameter and depth as a function of repetition frequency

当激光功率和持续时间保持不变时,激光重复频率越高,材料表面吸收的能量越多,凹坑的宽度和深度逐渐变大。第二阶段,根据 $E=P/f$ (E 为单脉冲能量, P 为平均功率, f 为重复频率) 可知,当激光功率 P 恒定时,提高重复频率会降低单脉冲能量,同时随着重复频率的提高,光斑重合度随之提高,凹坑内产生的熔渣随之增多,凹坑的宽度和深度随之减小。

图2为不同重复频率下微凹坑织构的三维和二维截面几何形貌,可以看出,微凹坑形貌近似为圆形,但是都带有一个小圆形的“尾巴”,这是因为激光器中的光栅没有完美地遮挡住激光束,使激光束无法聚焦成完美的圆形光斑,而随着重复频率的增加,曲线断断续续程度增加,说明熔渣随着重复频率的增加而逐

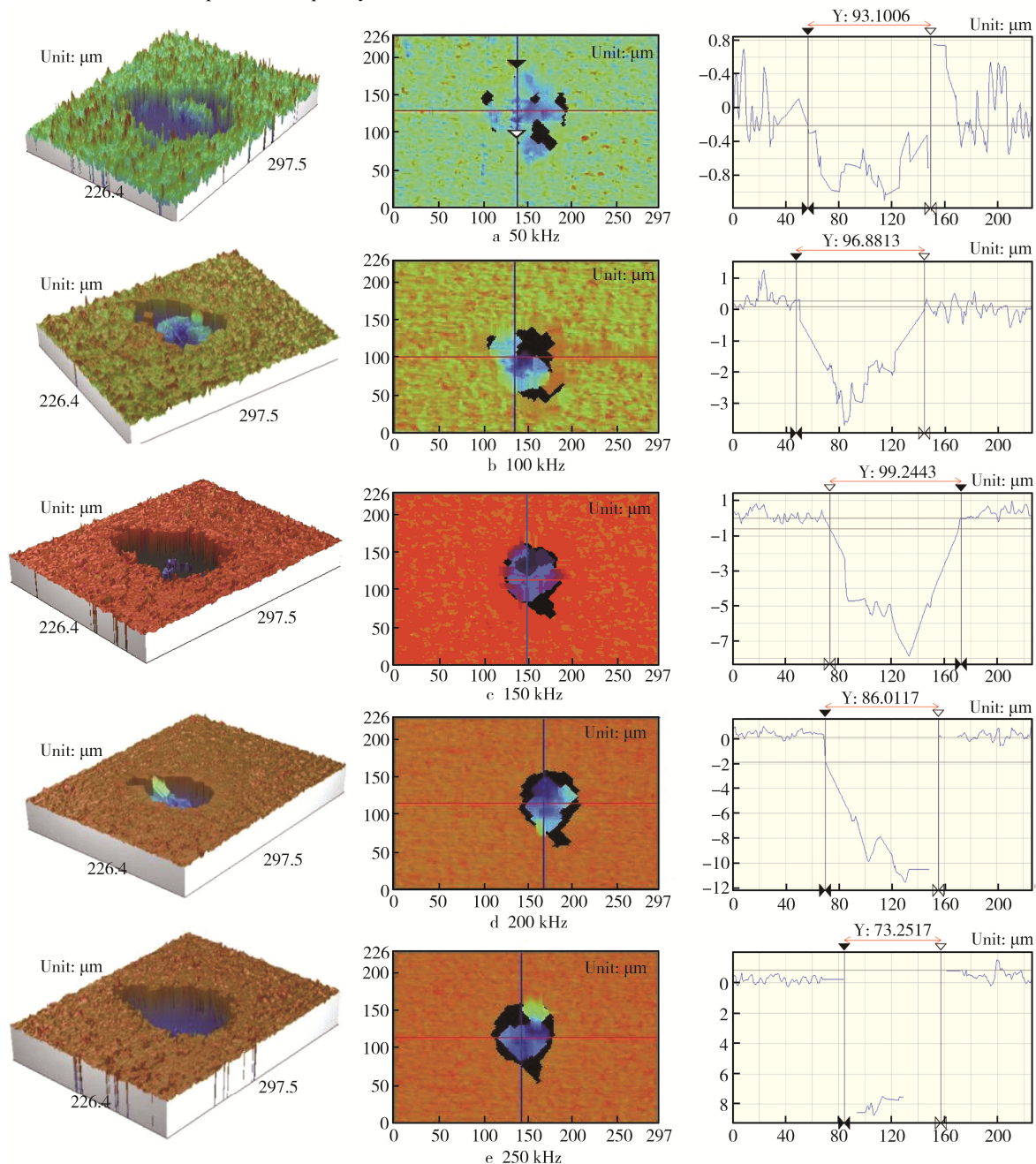


图2 不同重复频率下的微凹坑形貌

Fig.2 Micro-dimple morphology at different repetition frequency

渐变多,同时也导致了微凹坑的宽度与深度减小。分析可以得出皮秒激光表面微凹坑的较佳脉冲重复频率为 150~200 kHz。

2.2 皮秒激光持续时间对微凹坑形貌的影响

脉冲激光作用于材料表面时,若持续时间过短,会导致无法加工出理想的凹坑尺寸;若持续时间过长,会形成热积累现象,影响加工精度。因此激光持续时间直接影响微凹坑形貌。在激光功率为 10 W,重复频率为 300 kHz,持续时间分别为 0.02、0.04、0.06、0.08、0.10 ms 的工况下,持续时间对微凹坑形貌的影响如图 3 所示。图 4 给出了持续时间为 0.02、0.04、0.06、

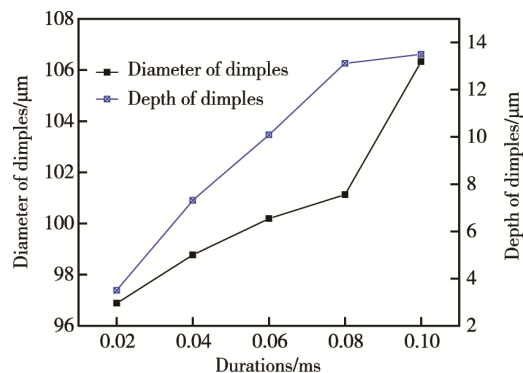


图 3 微凹坑直径和深度随持续时间变化曲线
Fig.3 Variation curves of micro-dimple diameter and depth as a function of duration

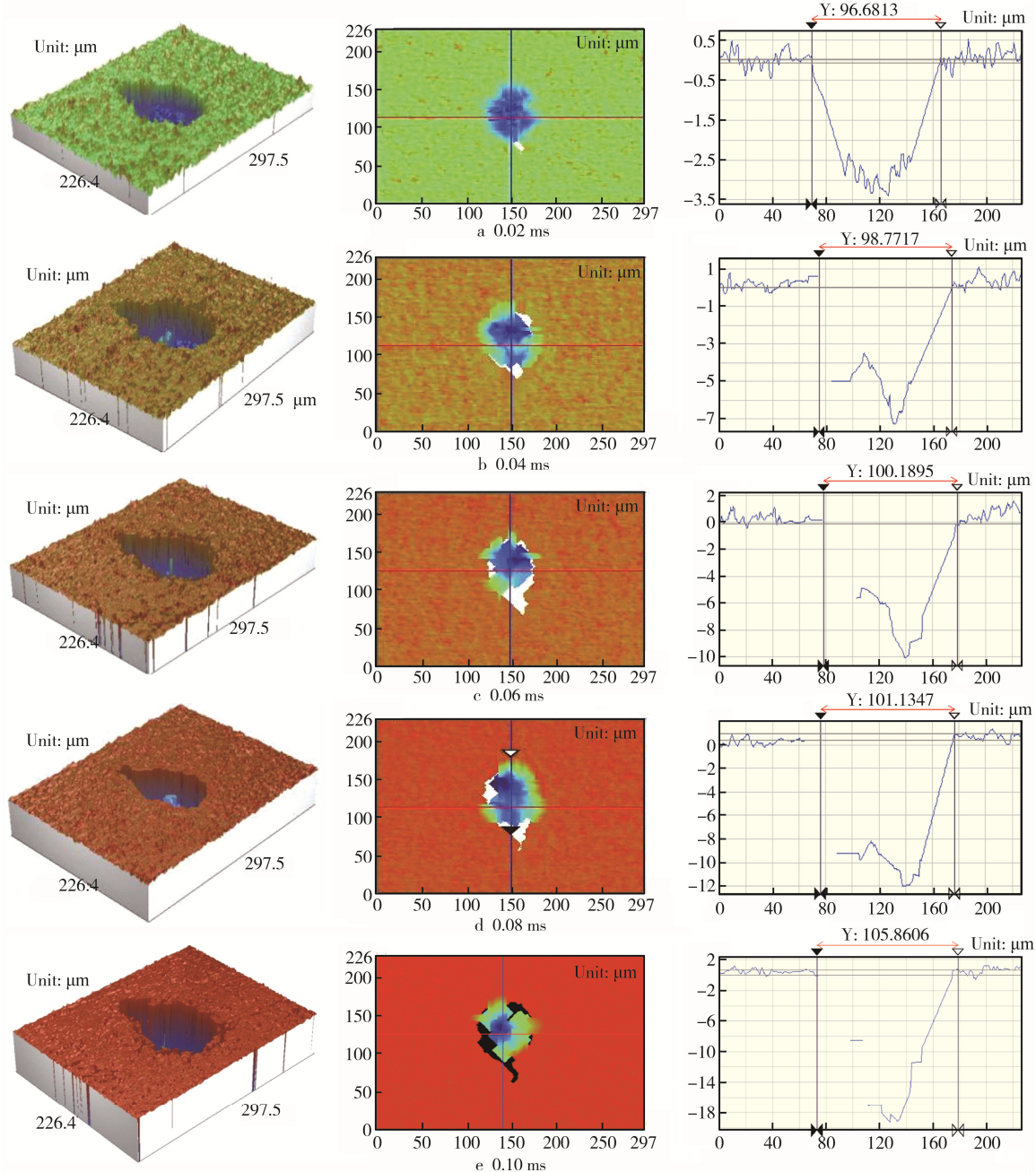


图 4 不同持续时间下微凹坑形貌

Fig.4 Variation curves of micro-dimple diameter and depth as a function of duration

0.08、0.10 ms 工况下微凹坑的三维和二维形貌轮廓。

由图 3 可见,微凹坑宽度和深度随持续时间的增加而增加,且近似线性增加。在功率和重复频率不变时,根据 $E=P/f$ 可知,单脉冲能量保持不变,所以持续时间越长,材料表面吸收能量越多,因此随着持续时间增加,凹坑的宽度和深度大致呈线性增加。

由图 4 可以看出,当持续时间增加到 0.08 ms 时,微凹坑二维形貌轮廓的断续程度增加,这是因为激光加工产生了热积累现象,使熔融材料在凹坑内重铸形成熔渣,导致测量出的轮廓不连续。由此可以看出,随着持续时间的增加,皮秒激光的“冷加工”效果受到抑制,逐渐产生热积累现象,因此需要控制好激光持续时间。从试验结果分析可看出,脉冲激光的持续时间低于 0.08 ms 时,加工出的微凹坑效果较好。

2.3 皮秒激光功率对微凹坑形貌的影响

在激光表面织构技术应用过程中,作用在工件表面的激光束具有密度高、能量高的特点,通过对表层材料进行汽化、融化处理,完成材料的织构化。因此,

若激光功率过小,激光束功率密度无法达到材料汽化阈值,从而无法完成材料的去除;而激光功率过大,加工时会破坏试样表面,影响加工质量。因此激光功率对微凹坑的形貌有重大影响。

本次试验在激光重复频率为 300 kHz、持续时间为 0.12 ms 的工况下加工试样。图 5 为激光功率与微凹坑形貌变化的关系。图 6 给出了激光功率为 4、8、

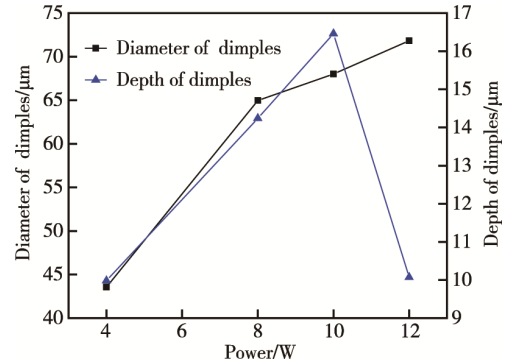


图 5 微凹坑尺寸随激光功率的变化

Fig.5 Variation curves of micro-dimple diameter and depth as a function of laser power

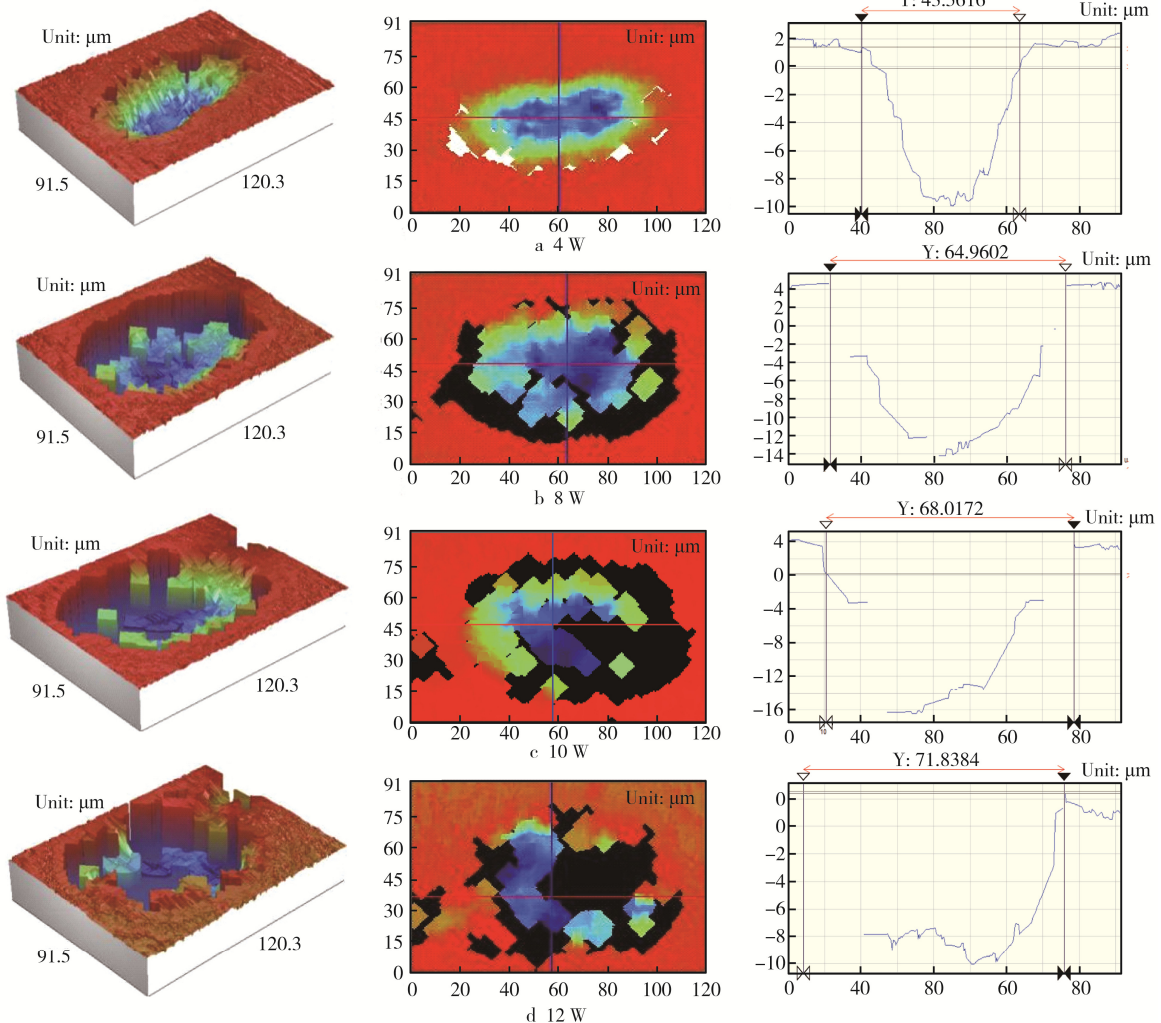


图 6 不同激光功率下的微凹坑形貌

Fig.6 Micro-dimple morphology at different laser power

10、12 W 时, 微凹坑的二维和三维截面几何形貌。

从图 5 可见, 在调大激光功率时, 微凹坑宽度会不断增加, 深度呈现先增再减的趋势。由于光斑中心激光束的能量较大, 可以大幅度地烧蚀材料, 所以凹坑截面表现出类似抛物线形态。当功率较小时, 光斑边缘能量未达到去除阈值而无法去除材料; 当功率逐渐增大时, 光斑边缘功率密度随之增大, 达到材料去除阈值时, 宽度和深度也随之变大, 而光斑腰束直径一定, 因此宽度增大的趋势逐渐变缓。随着功率的变大, 逐渐出现热积累现象, 熔渣逐渐变多, 因此深度呈现出先增大后减小的趋势。

从图 6 可以看出, 激光功率为 8~10 W 时, 加工出的微凹坑形貌较好。

3 结论

1) 随着重复频率的增大, 微凹坑的宽度和深度呈现出先增大后减小的趋势。当重复频率为 150~200 kHz 时, 微凹坑织构的加工质量较好。

2) 随着持续时间的延长, 微凹坑的宽度和深度都变大, 热积累现象逐渐严重。当持续时间为 0.06~0.08 ms 时, 可获得较好的微凹坑加工质量。

3) 随着激光功率的增大, 微凹坑的宽度增大, 深度先增大后减小, 较佳的工艺参数范围为 8~10 W。

参考文献:

- [1] 符永宏, 王祖权, 纪敬虎, 等. SiC 机械密封环表面微织构激光加工工艺[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(2): 209-213.
FU Yong-hong, WANG Zu-quan, JI Jing-hu, et al. Processing of Laser Surface Micro-texturing on Surface of SiC Mechanical Seal[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(2): 209-213.
- [2] 刘明朗, 黄仲佳. 激光表面织构在摩擦学中的应用[J]. 材料保护, 2012, 45(5): 48-50.
LIU Ming-lang, HUANG Zhong-jia. Application of Laser Surface Texture in Tribology[J]. Material Protection, 2012, 45(5): 48-50.
- [3] 纪敬虎, 符永宏, 符昊, 等. 表面织构主动设计制造及其在机械工程领域的应用[C]//江苏: 中国机械工程学会表面工程, 2012.
JI Jing-hu, FU Yong-hong, FU Hao, et al. Active Design and Manufacture of Surface Texture and Its Application in Mechanical Engineering[C]//Jiangsu: Surface Engineering Branch of China Mechanical Engineering Society, 2012.
- [4] 万轶, 熊党生. 激光表面织构化改善摩擦学性能的研究进展[J]. 摩擦学学报, 2006(6): 603-607.
WAN Yi, XIONG Dang-sheng. The Research Progress on the Improvement of Tribological Properties of Laser Surface Texture[J]. Journal of Tribology, 2006(6): 603-607.
- [5] 王占和, 朱永伟, 范仲俊. 摩擦副表面圆形微凹坑特种加工工艺设计与试验[J]. 制造技术与机床, 2009(4): 87-90.
WANG Zhan-he, ZHU Yong-wei, FAN Zhong-jun. Design and Test of Special Processing Technology for the Surface Circular Micro-crater of Friction Surface[J]. Manufacturing Technology and Machine Tools, 2009(4): 87-90.
- [6] 范仲俊, 王占和, 赵旸, 等. 摩擦副表面微凹坑的精细加工工艺研究[J]. 电加工与模具, 2008(6): 65-68.
FAN Zhong-jun, WANG Zhan-he, ZHAO Yang, et al. Study on Micro Machining Technology of Micro Dimples on Friction Pairs[J]. Electrical Processing and Mould, 2008(6): 65-68.
- [7] 季凌飞, 凌晨, 李秋瑞, 等. 皮秒激光工程应用研究现状与发展分析[J]. 机械工程学报, 2014, 50(5): 115-126.
JI ling-fei, LING Cheng, LI Qiu-rui, et al. Research Status and Development Analysis of the Application of Picosecond Laser Engineering[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(5): 115-126.
- [8] WEINGARTEN K. High Energy Picosecond Lasers: Ready for Prime Time[J]. Laser Technik Journal, 2009(3): 51-54.
- [9] STEPHEN L, ALLAN A, LENNY M. Comparison of ns and ps Pulses for Si and Glass Micro-machining Applications[J]. Proc of SPIE, 2009, 7193: 719322.
- [10] HERRMANN T, KLIMT B, SIEGEL F. Micro-machining with Picosecond Laser Pulses[2004-10-01]. <http://www.industrial-lasers.com/articles/2004/10/micromachining-with-picosecond-laser-pulses.html>.
- [11] 占剑, 杨明江, 王红才. 脉冲 YAG 激光波形对缸套内壁激光刻蚀微坑形貌的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 261-266.
ZHAN Jian, YANG Ming-jiang, WANG Hong-cai. The Effect of Pulse YAG Laser Waveform on the Morphology of the Inner Wall of the Cylinder Liner[J]. China Laser, 2011, 38(6): 261-266.
- [12] 符永宏, 纪敬虎, 杨超君, 等. 新型零泄漏非接触式机械密封及其激光表面微造型跨尺度加工工艺研究[J]. 润滑与密封, 2008(1): 27-32.
FU Yong-hong, JI Jing-hu, YANG Chao-jun, et al. Research on New Zero Leakage Non-contact Mechanical Seal and Laser Surface Micro Modeling Cross Scale Machining Process[J]. Lubrication and Seal, 2008(1): 27-32.
- [13] DU D, HE Y F, SUI B, et al. Laser Texturing of Rollers by Pulsed Nd: YAG Laser[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 161(3): 456-461.
- [14] 刘洪龙, 王文中, 赵自强, 等. 表面微织构影响点接触润滑摩擦性能的实验研究[J]. 润滑与密封, 2014, 39(1): 9-16.
LIU Hong-long, WANG Wen-zhong, ZHAO Zi-qiang, et al. Experimental Study of the Effect of Surface Texturing on the Lubrication Performance in Point Contacts[J]. Lubrication Engineering, 2014, 39(1): 9-16.