

表面质量控制及检测

激光抛光表面形貌的误差复映规律

李健^a, 杨叶^a, 金卫凤^b, 曾子涵^a, 严思琴^a

(江苏大学 a.材料科学与工程学院 b.机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘 要: **目的** 探究激光抛光工艺中的表面形貌误差复映规律。**方法** 首先采用纳秒光纤激光对不锈钢表面进行标刻加工制备微结构, 再通过纳秒光纤激光对预制微结构的表面进行抛光加工, 通过超景深显微镜测量加工后的表面形貌, 分析表面形貌随加工参数的变化规律。其中纳秒光纤激光波长为 1064 nm, 脉宽约 200 ns, 最大激光功率为 20 W。进行标刻时, 激光功率设置为 18 W, 激光脉冲频率为 20 kHz, 扫描速度 500 mm/s, 通过多次重复标刻在不锈钢表面标刻出一定深度的凹槽。采用低功率 (6、4、2、1、0.2 W) 的纳秒激光对预制的局部微结构进行激光抛光处理, 抛光过程的扫描线间距设置为 10 μm , 扫描速度设置为 200 mm/s, 对包含凹槽的 2 mm \times 2 mm 的区域进行两次抛光处理。**结果** 经标刻加工的微凹槽周围存在较大的边缘凸起; 激光抛光能够有效降低凹槽边缘凸起高度, 选择合适的抛光参数可将凹槽边缘凸起高度降低到 2 μm 以下。对于高度大于 10 μm 的边缘凸起, 在激光功率大于 2 W 时, 抛光后的边缘凸起高度随激光功率的增大而线性减小; 在激光功率小于 2 W 时, 边缘凸起高度随激光功率变化不明显。对于高度小于 10 μm 的边缘凸起, 激光抛光存在抛光饱和的现象——凸起高度随激光功率密度变化不明显。**结论** 已有微结构的不锈钢表面经激光抛光会形成残留微结构, 从而表现出一定的形状复映规律。经抛光处理后的沟槽边缘凸起的高度随着所使用的激光能量密度的增大而减小, 基本服从线性变化规律。

关键词: 激光抛光; 复映; 表面微结构; 纳秒脉冲激光; 不锈钢; 激光能量密度

中图分类号: TG175 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)02-0309-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.02.039

Error Remapping of Surface Morphology by Laser Polishing

LI Jian^a, YANG Ye^a, JIN Wei-feng^b, ZENG Zi-han^a, YAN Si-qin^a

(a.School of Materials Science and Engineering,

b.School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

ABSTRACT: The work aims to explore error remapping of surface morphology during laser polishing. The stainless steel surface was firstly written by nanosecond pulsed fiber laser to fabricate microstructure and then the surface of the prefabricated microstructure was polished by the nanosecond pulsed fiber laser. The surface morphology after processing was measured by an ultra-depth microscope and the variation of the surface morphology with the polishing parameters was investigated. The parameters of the nanosecond pulsed fiber laser were as follows: 1064 nm in wavelength, ~200 ns in pulse duration and 20 W in

收稿日期: 2019-10-13; 修订日期: 2019-12-25

Received: 2019-10-13; **Revised:** 2019-12-25

基金项目: 国家自然科学基金 (51775248); 江苏省自然科学基金 (BK20150477); 江苏大学高级人才科研启动基金 (14JDG137)

Fund: Supported by the Natural National Science Foundation of China (51775248), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20150477) and the Research Initiation Fund for Senior Talents of Jiangsu University (14JDG137)

作者简介: 李健 (1983—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为表面工程。邮箱: lijian1949@163.com

Biography: LI Jian (1983—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: surface engineering. E-mail: lijian1949@163.com

引文格式: 李健, 杨叶, 金卫凤, 等. 激光抛光表面形貌的误差复映规律[J]. 表面技术, 2020, 49(2): 309-315.

LI Jian, YANG Ye, JIN Wei-feng, et al. Error remapping of surface morphology by laser polishing[J]. Surface technology, 2020, 49(2): 309-315.

laser power. In the direct writing by laser, grooves with different depths were marked several times on the surface of stainless steel by the laser beam with the energy density of 18 W, the pulse frequency of 20 kHz, and the scanning speed of 500 mm/s. The local microstructures were laser-polished by nanosecond laser with low energy density (6 W, 4 W, 2 W, 1 W, 0.2 W). The distance between the scanning lines was set as 10 microns, and the scanning speed was set to 200 mm/s. The 2 mm×2 mm area containing grooves and the bulges were polished twice. There were larger edge bulges around the grooves directly written. Laser polishing could effectively reduce the height of the bulge around the groove. The height of the bulge around the groove could be reduced to less than 2 microns through appropriate polishing parameters. For the initial height of the bulge around groove greater than 10 μm , the bulge height after polishing decreased linearly with the increase of laser power density when the laser power density was greater than 2 W. Oppositely, the bulge height around the groove did not change significantly with the laser power density when the laser power density was less than 2 W. For the initial height of the bulge around the groove less than 10 μm , a polishing saturation occurred for laser polishing at higher laser power, i.e. the change of the bulge height with laser power density was not obvious. After laser polishing, residual microstructure will be formed on the surface of the existing stainless steel, thus showing a certain law of shape duplication. After polishing, the raised height of the groove edge decreases with the increase of the laser energy density, which is basically changed in a manner of linear regularity.

KEY WORDS: laser polishing; duplication; surface microstructure; nanosecond pulsed laser; stainless steel; laser energy density

激光抛光是通过激光对材料的热作用（如蒸发、熔化等）与光化学作用，来实现材料微量去除并最终达到材料表面平坦化的一种先进抛光方式^[1]。作为一种非接触式高能束抛光方法，激光抛光特别适用于难加工材料和复杂结构表面的抛光。此外，由于激光可局限于微米厚度的表层材料，激光抛光适用于各种金属和合金的精密和超精密抛光^[2-3]。

目前，国内外研究者已对激光抛光进行了大量研究，主要考察激光类型^[4-10]及参数^[11-17]、激光抛光机理^[18-22]以及工艺参数的优化^[23-29]等方面，很少涉及到表面初始状态的影响。在传统的机械加工领域，表面的初始状态是表面加工质量的重要影响因素：表面的初始形状误差反作用于加工系统，使得加工后的表面残留部分初始形状特征，该现象通常被称为误差复映^[30]。作为表面质量形成的一般规律，误差复映在激光抛光工艺中也会有所体现，但已有研究主要针对平直表面的宏观表面形状，而平直表面局部区域微观形状的微小变化难以通过实验手段衡量，所以目前鲜有对表面局部区域微观形状加工中的误差复映规律的研究。而在很多研究领域，如增材制造领域，待抛光的表面往往具有大量的微结构，这些微结构的尺寸显著大于材料熔融厚度，抛光时可能有部分残留而影响表面质量，即存在表面形貌误差复映，此时希望减小粗糙度的同时能够保证微结构的形状^[31]。因此，有必要对激光抛光中的表面形貌误差复映规律进行探索，以指导激光抛光在这些领域的应用。

本文以 304 奥氏体不锈钢为抛光对象，采用了与文献[32]类似的两步纳秒激光加工工艺，研究了激光抛光中的形状复映规律。在两步加工工艺中，第一步纳秒激光加工用以构建特定的初始表面微结构，第二步用以实现已有微结构表面的激光抛光。对加工后的

表面形貌进行测量分析，考察第一步加工产生的微结构边缘凸起的高度随抛光参数的变化规律。

1 实验

1.1 实验材料

考虑到激光抛光一般用于难加工材料，如工具钢、钛合金、不锈钢等材料的加工中，本文选用 304 奥氏体不锈钢作为实验材料，直接通过网络购买，未经进一步处理。实验材料的成分参见表 1。

表 1 304 不锈钢化学成分
Tab.1 Chemical composition of stainless steel 304

wt%					
Mn	S	P	Si	Cr	Ni
2.00	0.045	0.030	0.075	17.1	9.0

1.2 实验装置及方法

实验采用纳秒脉冲光纤激光（BLC-100，盛泰激光），激光波长为 1064 nm，脉宽约 200 ns，光束强度分布为高斯分布。加工过程主要是利用激光对材料的热效应，通过熔化、蒸发去除表面材料及改变表面形貌。首先，将待加工表面放置于激光焦点位置，设置激光能量密度为 18 W，激光脉冲频率为 20 kHz，扫描速度为 500 mm/s（即点间距为 25 μm ），沿如图 1 所示的设定路径（长度为 200 mm）标刻出一定深度的凹槽。通过预试验，加工的沟槽宽度约 75 μm ，搭接率为 66.67%。加工过程中熔融材料在凹槽边缘堆积，形成一定高度的边缘凸起^[33]。制备凹槽时，分别进行了 5、10、15、20 次标刻，以构建不同高度的边

缘凸起。采用低能量的纳秒激光对包含凹槽的局部表面区域进行激光抛光。激光抛光过程中激光束扫描路径如图 1 所示, 其中扫描线间距设置为 $10\ \mu\text{m}$, 扫描速度设置为 $200\ \text{mm/s}$ (即点间距为 $10\ \mu\text{m}$), 激光功率分别设置为 6、4、2、1、 $0.2\ \text{W}$ 。由于预加工的凹槽宽度约 $75\ \mu\text{m}$, 选取抛光区域的宽度大于预加工凹槽宽度的 20 倍, 为此, 在每组参数下, 对包含凹槽和边缘凸起的 $2\ \text{mm} \times 2\ \text{mm}$ 的区域进行抛光处理。为改善抛光效果, 每组参数下对同一个区域进行两次扫描抛光处理。激光加工和激光抛光的区域分布如图 2 所示, 每个小块区域即为一组参数下进行两次抛光得到的抛光区域。

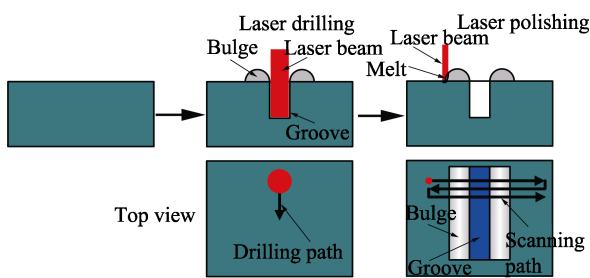


图 1 激光加工及激光抛光示意图
Fig.1 Schematic diagram of laser processing and laser polishing

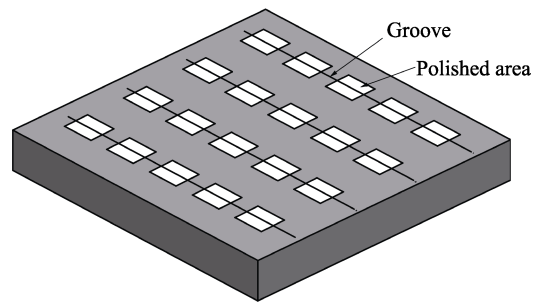


图 2 激光加工及激光抛光的区域分布
Fig.2 Distribution of laser processed and laser polished areas

采用超景深显微镜 (VHX-1000, Keyence) 对激光抛光后的表面形貌进行测量, 获取经过抛光的微凹槽及其附近微凸起的轮廓。考虑到该仪器在测量微结构深度上存在局限^[34], 难以精确测量凹槽深度, 后续的测试方案仅考虑微边缘凸起随抛光参数的变化。

2 抛光仿真方法

为分析激光抛光中微结构的误差复映规律, 考虑到激光抛光过程中的热毛细作用, 采用文献[35]的方法对序列激光脉冲对表面凸起的平滑效果进行了仿真, 仿真所用到的相关模型如图 3 所示。表面凸起及

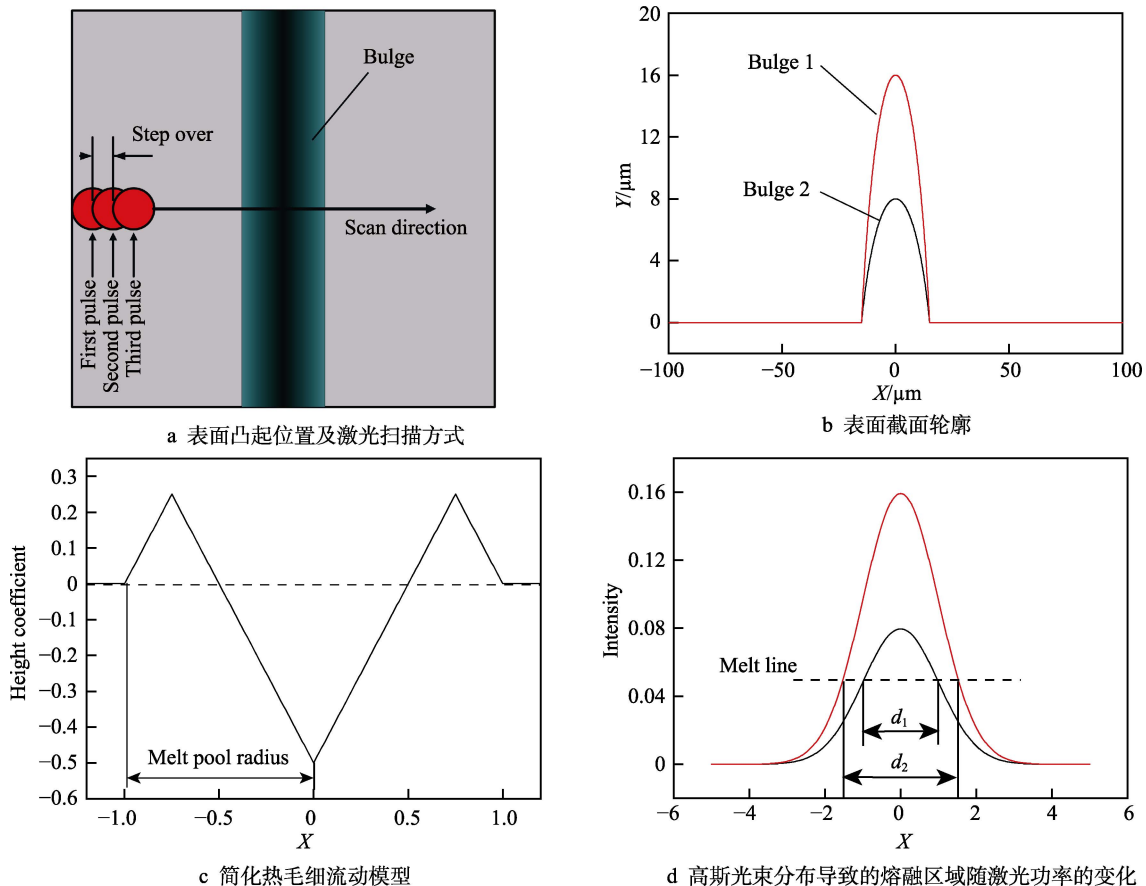


图 3 仿真模拟模型

Fig.3 Simulation model: a) position of the bulge and the scanning parameters of the laser; b) cross-section profile of the simulated surface; c) simplified thermocapillary model; d) variation of melt area induced by laser power for Gaussian beam

激光扫描方式如图 3a 所示, 凸起宽度设置为 $30\text{ }\mu\text{m}$, 激光脉冲间距设置为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 。表面的截面轮廓如图 3b 所示, 仿真了凸起高度分别为 $8\text{ }\mu\text{m}$ 和 $16\text{ }\mu\text{m}$ 的两种表面。根据图 3a 和图 3b 所描述的模型, 仿真过程中将二维粗糙度的变化简化为一维轮廓的变化。在激光抛光过程中, 材料受到激光的作用后会产生热毛细流动, 使熔融表面偏离理想的光滑形状, 该热毛细流动行为较为复杂, 所以一般文献^[21,22]只对单脉冲作用后的表面形貌变化进行模拟研究。对序列脉冲作用下表面形貌变化的模拟, 只能通过对热毛细流动过程近似处理来实现^[35], 即将热毛细流动导致的表面轮廓变化符合图 3c 所示的规律: 在熔融区域半径处, 轮廓高度无变化; 靠近边界的熔融区域出现材料堆积; 而在熔融区域中心部位则产生凹陷。该规律可通过以下公式进行描述:

$$\Delta h(x) = H \left(0.25 - \left| \frac{x - x_0}{R} - 0.75 \right| \right) \quad (1)$$

式(1)中, $\Delta h(x)$ 为 x 处轮廓的变化, H 为高度系数, x_0 为光斑中心位置, R 为熔融区域半径。根据已有的文献^[36], 激光的热毛细流动强度与激光功率正相关, 为此, 采用公式(2)描述高度系数 H 。

$$H = 2P \quad (2)$$

式(2)中, P 为无量纲化激光功率, 系数 2 为假设无量纲激光功率 $P=1$ 时高度系数为 $2\text{ }\mu\text{m}$, 这一数值与文献^[36]的数据在同一量级。考虑到激光束具有如下形式的高斯分布^[31], 不同激光功率的光束强度分布将导致不同的熔融区域宽度, 如图 3d 所示。

$$I(r) = \frac{2P}{D^2\pi} \exp\left(-\frac{2r^2}{D^2}\right) \quad (3)$$

式(3)中, D 为激光光束直径。不同激光功率的光束强度分布如图 3d 所示。可以看出, 较大的激光功率将产生较大的熔融区域, 为此, 将公式(1)中的熔融区域半径 R 简化表达为:

$$R = 20P \quad (4)$$

即无量纲激光功率 $P=1$ 时, 熔融区域的半径为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 。基于以上模型顺序考虑各脉冲作用后表面形貌的变化。

3 结果及分析

激光加工和激光抛光后的样品表面照片如图 4 所示, 图中加工的凹槽从左至右分别是标刻 5 次、10 次、15 次和 20 次的凹槽。可以看出, 随着标刻次数的增加, 凹槽越来越明显。一方面, 标刻次数增加后, 凹槽内被去除的材料增多, 凹槽深度变大; 另一方面, 由于凹槽内溅出的材料体积增大, 附着在凹槽边缘的边缘凸起宽度和高度增大, 所以凹槽图片变得明显。在图 4 中, 所抛光的每个微区域大小为 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$, 从上到下分别是采用 6、4、2、1、0.2 W 的激光进行抛

光的区域。随着激光功率的减小, 抛光区域的颜色逐渐变深, 抛光区域的表观质地与未加工区域有明显差别。此外, 通过对样品的直观观察可以发现, 经过抛光以后的凹槽表观线宽明显小于未经过抛光的凹槽, 这主要由于对凹槽边缘凸起实现抛光所致。

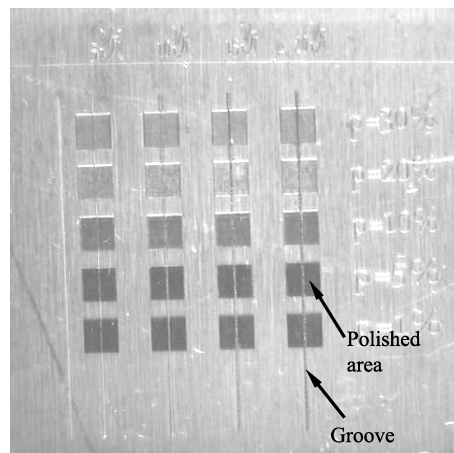


图 4 抛光后样品表面照片
Fig.4 Photography of the polished samples

超景深显微镜下加工样品测量的表面形貌如图 5 所示, 其中图 5a 和图 5c 为仅经过纳秒激光刻蚀出的凹槽区域附近的表面形貌及其轮廓情况(选取的位置为图 5a 中两小圆点标出的直线位置), 图 5b 和图 5d 为经过激光抛光以后的凹槽附近表面形貌及其轮廓(选取的位置为图 5b 中两小圆点标出的直线位置)。比较图 5a 和图 5b 可以看出, 经过抛光以后, 原表面具有方向性的划痕被清除掉, 残留的凹槽宽度明显小于未抛光的凹槽宽度。测量凹槽边缘凸起的高度发现(在超景深显微图片上选取测量位置, 高度值取凹槽两侧凸起相对于表面其他位置的高度的平均值), 经过抛光, 凹槽边缘凸起的平均高度(左边凸起与右边凸起的平均值)从抛光前的 $7.8055\text{ }\mu\text{m}$ 变为 $1.8795\text{ }\mu\text{m}$, 如图 5b 和图 5d 所示。

在超景深显微镜所测量的激光抛光表面形貌的基础上, 分析了抛光参数对抛光效果的影响。为了考虑抛光效果, 对凹槽两边边缘凸起的平均值进行了测量计算, 计算结果如图 6a 所示。从图中可以看出, 随着标刻次数的增大, 边缘凸起的高度逐渐增大, 这是由标刻过程中凹槽内溅出的材料堆积所致。但是, 当标刻次数增大到 15 次以后, 凸起高度的变化并不明显。

激光抛光过程中, 表面存在的微结构对最终的表面形貌会产生影响, 即存在所谓的形状误差复映。对于标刻 10 次、15 次和 20 次的沟槽, 凹槽边缘凸起的高度变化具有一定的规律性: 在激光功率大于 2 W 时, 边缘凸起高度随功率的变化基本服从线性变化规律; 在激光能量密度小于 2 W 时, 边缘凸起高度随功率的变化很小, 这是由小功率激光只能引起薄熔融层决定的^[37]。由此可见, 由于表面微观结构的存在, 激

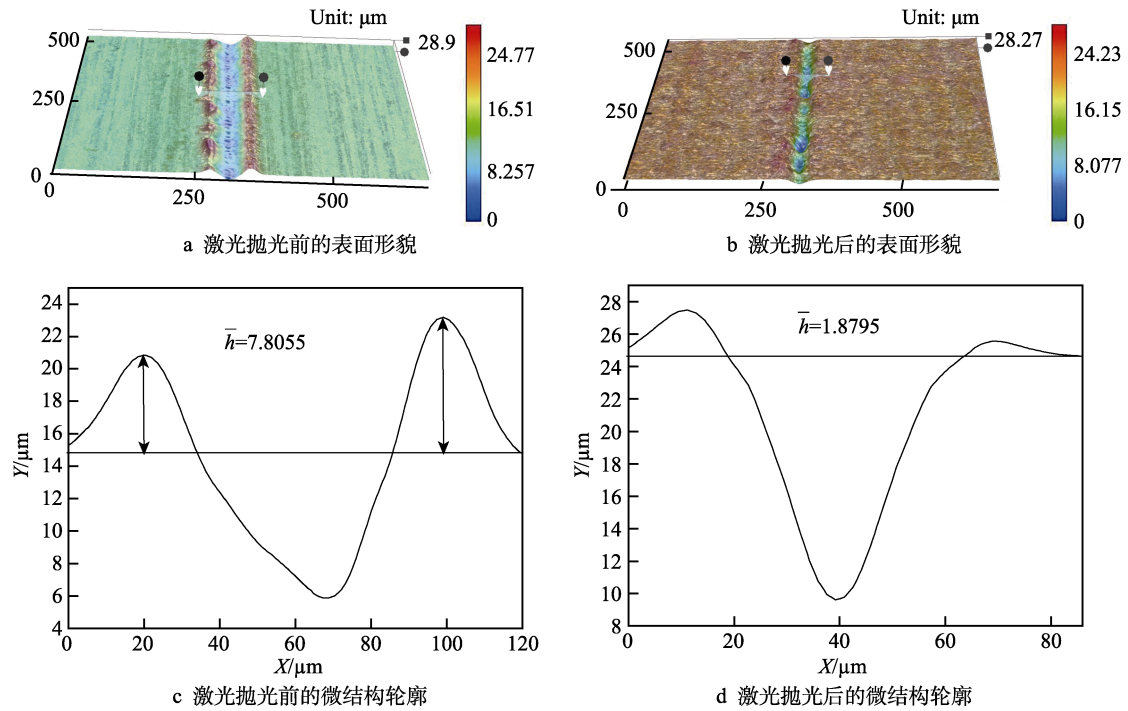


图 5 304 不锈钢抛光前后的表面形貌

Fig.5 Surface morphology of 304 stainless steel before and after laser polishing:

- a) surface morphology before laser polishing; b) surface morphology after laser polishing;
c) cross-section profile before laser polishing; d) cross-section profile after laser polishing

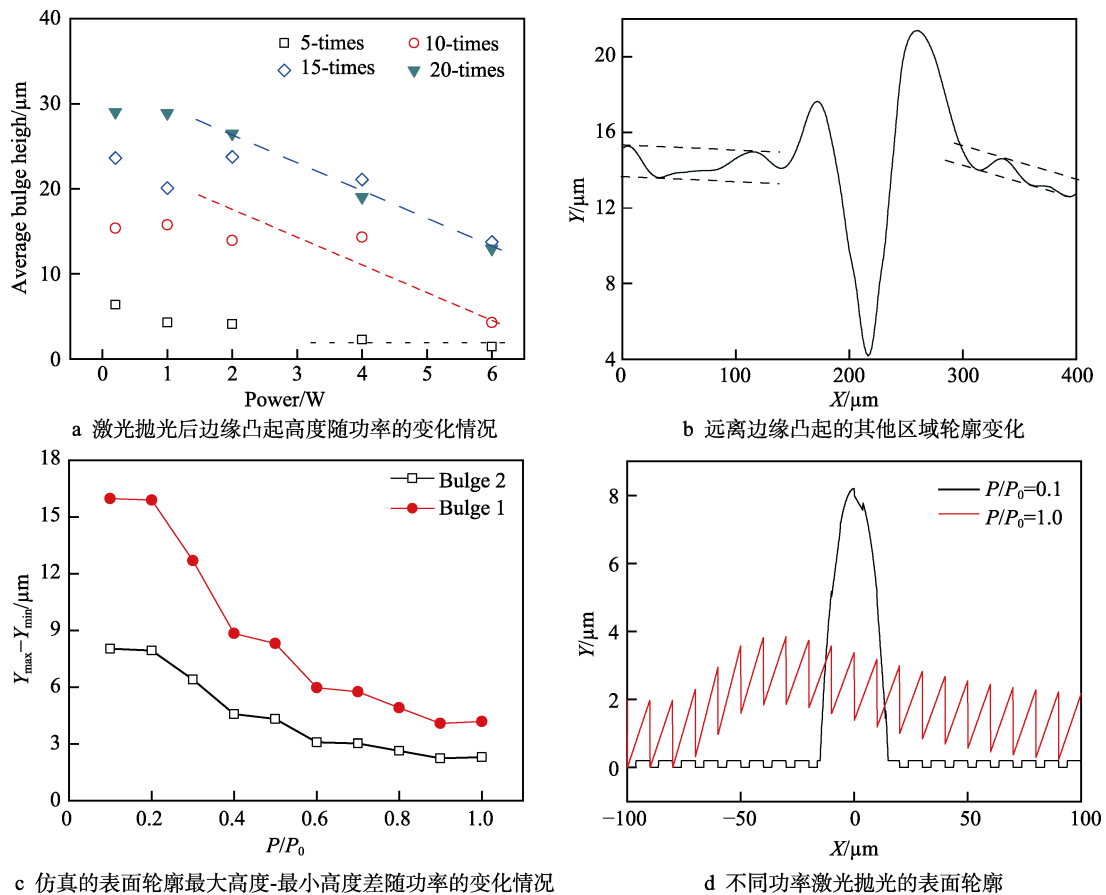


图 6 抛光参数对抛光效果的影响规律

Fig.6 Influence of polishing parameters on polishing effect: a) change of the bulge height with laser power after laser polishing; b) change of the areas far from the bulge; c) change of the difference between the maximum height and minimum height with laser power; d) surface profiles after laser polishing

光抛光后会有一定高度的边缘凸起残留下来,即存在所谓的形状误差复映。初始的微结构高度越大,抛光后的微结构高度也越大。增大抛光的激光功率能够有效地减小形状误差复映,实现表面的均匀化抛光。对于标刻次数只有5次的凹槽边缘,激光功率对边缘凸起高度变化的影响很小。这主要由该抛光工艺的性能饱和决定,由于仅经过5次标刻获取的边缘凸起高度仅有 $7\text{ }\mu\text{m}$ 左右,经过功率为4 W和6 W的激光抛光以后的边缘凸起高度都为 $2\text{ }\mu\text{m}$ 左右,即实现抛光的饱和,继续增大抛光能量难以降低边缘凸起的高度。实际上,采用该纳秒激光进行抛光后,在远离边缘凸起的其他区域也会产生约 $2\text{ }\mu\text{m}$ 左右的起伏,如图6b所示,这验证了前述的抛光能量密度饱和的猜测。通过模拟也发现,激光抛光后表面轮廓随激光功率的变化规律与实验规律相似,如图6c。从图6d的模拟结果还发现,在激光功率较小时,激光束对表面凸起的平滑作用不明显,所以凸起高度变化较小;而在激光功率较大时,虽然凸起高度有较大变化,但激光导致的较强的热毛细流动使得表面具有锯齿结构,表面粗糙度难以降低,这与图6b中的实验结果吻合得较好。

4 结论

1) 激光抛光能够有效降低凹槽边缘凸起高度,选择合适的抛光参数可将凹槽边缘凸起高度降低到 $2\text{ }\mu\text{m}$ 以下。

2) 激光抛光中,表面已有结构具有一定形状误差复映规律。对于初始凹槽边缘凸起高度大于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的情况,激光抛光后在激光功率大于2 W的情况下,抛光后的凹槽边缘凸起高度随激光功率密度的增大而线性减小。在激光功率小于2 W的情况下,凹槽边缘凸起高度随激光功率变化不明显。

3) 对于初始凹槽边缘凸起高度小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的情况,激光抛光在较高功率下存在抛光饱和的现象——凸起高度随激光功率变化不明显。

参考文献:

- [1] 周敏,魏昕,谢小柱,等. 355 nm 紫外激光抛光 Al_2O_3 陶瓷工艺的研究[J]. 激光技术, 2014, 38(4): 556-560.
ZHOU Min, WEI Xin, XIE Xiao-zhu, et al. Study on polishing process of Al_2O_3 ceramic with 355 nm ultraviolet laser[J]. Laser technology, 2014, 38(4): 556-560.
- [2] 陈林,杨永强. 激光抛光[J]. 激光与光电子学进展, 2003, 40(8): 57-59.
CHEN Lin, YANG Yong-qiang. Laser polishing[J]. Laser & optoelectronics progress, 2003, 40(8): 57-59.
- [3] 戴伟,郑志镇,李建军,等. 金属材料表面的激光抛光研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 1-14.
DAI Wei, ZHENG Zhi-zhen, LI Jian-jun, et al. Research progress of laser polishing on the metal surface [J]. Laser & optoelectronics progress, 2015, 52(11): 1-14.
- [4] HUA M, SHAO T, TAM H Y. Surface transformation of DF-2 steel after continuous mode laser irradiation[J]. Journal of materials processing technology, 2007, 192: 89-96.
- [5] GISARIO A, BOSCHETTO A, VENIALI F. Surface transformation of AISI 304 stainless steel by high power diode laser[J]. Optics and lasers in engineering, 2011, 49(1): 41-51.
- [6] UKAR E, LAMIKIZ A, LÓPEZ DE LACALLE L N, et al. Laser polishing of tool steel with CO_2 laser and high-power diode laser[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2010, 50(1): 115-125.
- [7] YERMACHENKO V M, VDOVIN Y A, MIRONOV V D, et al. Technology of polishing of titanium surface using the fiber-laser radiation[J]. Laser physics, 2010, 20(6): 1537-1544.
- [8] CONRAD D, RICHTER L. Ultra-short pulse laser structuring of molding tools[J]. Physics procedia, 2014, 56: 1041-1046.
- [9] JANG P R, JANG T S, JI K H, et al. A method of laser micro-polishing for metallic surface using UV nano-second pulse and CW lasers[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2016, 85(9-12): 2367-2375.
- [10] HAFIZ A M K, BORDATCHEV E V, TUTUNEA-FATAN R O. Experimental analysis of applicability of a picosecond laser for micro-polishing of micromilled Inconel 718 superalloy[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2014, 70(9-12): 1963-1978.
- [11] HUA M, SHAO T, HONG Y T, et al. Influence of pulse duration on the surface morphology of ASSAB DF-2 (AISI-01) cold work steel treated by YAG laser[J]. Surface and coatings technology, 2004, 185(2): 127-136.
- [12] PERRY T L, WERSCHMOELLER D, LI X, et al. The effect of laser pulse duration and feed rate on pulsed laser polishing of microfabricated nickel samples[J]. Journal of manufacturing science and engineering, 2009, 131(3): 031002.
- [13] NÜSSER C, WEHRMANN I, WILLENBORG E. Influence of intensity distribution and pulse duration on laser micro polishing[J]. Physics procedia, 2011, 12: 462-471.
- [14] VADALI Madhu, MA Chao, DUFFIE N A, et al. Effects of pulse duration on laser micro polishing[J]. Journal of micro and nano-manufacturing, 2013, 1(1): 011006.
- [15] PFEFFERKORN F E, DUFFIE N A, MORROW J D, et al. Effect of beam diameter on pulsed laser polishing of S7 tool steel[J]. Cirp annals-manufacturing technology, 2014, 63(1): 237-240.
- [16] CHOW M T C, BORDATCHEV E V, KNOPF G K. Experimental study on the effect of varying focal offset distance on laser micropolished surfaces[J]. The international

- journal of advanced manufacturing technology, 2013, 67(9-12): 2607-2617.
- [17] HAFIZ A M K, BORDATCHEV E V, TUTUNEA-FATAN R O. Influence of overlap between the laser beam tracks on surface quality in laser polishing of AISI H13 tool steel[J]. Journal of manufacturing processes, 2012, 14(4): 425-434.
- [18] MAI T A, LIM G C. Micromelting and its effects on surface topography and properties in laser polishing of stainless steel[J]. Journal of laser applications, 2004, 16(4): 221-228.
- [19] TEMMLER A, WILLENBORG E, WISSENBACH K. Design surfaces by laser remelting[J]. Physics procedia, 2011, 12: 419-430.
- [20] PFEFFERKORN F E, DUFFIE N A, LI X, et al. Improving surface finish in pulsed laser micro polishing using thermocapillary flow[J]. Cirp annals-manufacturing technology, 2013, 62(1): 203-206.
- [21] MA C, VADALI M, DUFFIE N A, et al. Melt pool flow and surface evolution during pulsed laser micro polishing of Ti6Al4V[J]. Journal of manufacturing science and engineering, 2013, 135(6): 061023.
- [22] MA C, VADALI M, LI X, et al. Analytical and experimental investigation of thermocapillary flow in pulsed laser micropolishing[J]. Journal of micro and nano-manufacturing, 2014, 2(2): 020010.
- [23] UKAR E, LAMIKIZ A, MARTÍNEZ S, et al. Roughness prediction on laser polished surfaces[J]. Journal of materials processing technology, 2012, 212(6): 1305-1313.
- [24] SHAO T M, HUA M, TAM H Y, et al. An approach to modelling of laser polishing of metals[J]. Surface and coatings technology, 2005, 197(1): 77-84.
- [25] ROSA B, HASCOËT J, MOGNOL P. Topography modeling of laser polishing on AISI 316L milled surfaces[J]. Mechanics & industry, 2014: 51-61.
- [26] PERRY T L, WERSCHMOELLER D, DUFFIE N A, et al. Examination of selective pulsed laser micropolishing on microfabricated nickel samples using spatial frequency analysis[J]. Journal of manufacturing science and engineering, 2009, 131(2): 021002.
- [27] ZHANG Zhi-hui, REN Lu-quan, ZHOU Ti, et al. Optimization of laser processing parameters and their effect on penetration depth and surface roughness of biomimetic units on the surface of 3Cr2W8V steel[J]. Journal of bionic engineering, 2010, 7: S67-S76.
- [28] GUO W, HUA M, TSE P, et al. Process parameters selection for laser polishing DF2 (AISI O1) by Nd:YAG pulsed laser using orthogonal design[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2012, 59(9-12): 1009-1023.
- [29] CAMPANELLI S L, CASALINO G, CONTUZZI N, et al. Taguchi optimization of the surface finish obtained by laser ablation on selective laser molten steel parts[J]. Procedia CIRP, 2013, 12: 462-467.
- [30] 王先逵. 机械制造工艺学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- WANG Xian-kui. Mechanical manufacturing technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [31] CHAI Y, LI R W, PERRIMAN D M, et al. Laser polishing of thermoplastics fabricated using fused deposition modeling[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2018, 96: 4295-4302.
- [32] GAO Y, WU Ben-xin, ZHOU Yun, et al. A two-step nano-second laser surface texturing process with smooth surface finish[J]. Applied surface science, 2011, 257(23): 9960-9967.
- [33] LI Jian, WANG Xiao. Numerical simulation of the influence of the bulges around laser surface textures on the tribological performance[J]. Tribology transactions, 2013, 56(6): 1011-1018.
- [34] LI Jian, ZOU Zhen-qiang, HU Lu-yao, et al. Discussion of the paper: Surface texturing by pulsed Nd:YAG laser[J]. Tribology international, 2017, 115: 1-2.
- [35] RICHTER B, CHEN S X, MORROW J D, et al. Pulsed laser remelting of A384 aluminum, part II: modeling of surface homogenization and topographical effects[J]. Journal of manufacturing processes, 2018, 32: 230-240.
- [36] CHEN Chen, TSAI Hai-lung. Fundamental study of the bulge structure generated in laser polishing process[J]. Optics and lasers in engineering, 2018, 107: 54-61.
- [37] 胡璐瑶, 金卫凤, 黎建麟, 等. 纳秒激光加工中脉冲能量对熔体体积的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(8): 48-53.
- HU Lu-yao, JIN Wei-feng, LI Jian-lin, et al. Effects of pulse energy on melt volume in nanosecond pulsed laser processing[J]. Surface technology, 2019, 48(8): 48-53.