

基于长脉冲激光的 304L 不锈钢表面 微织构加工

王 玲, 王兴盛, 黎宁慧, 康 敏

南京农业大学工学院, 江苏 南京 210000

摘要 通过改变长脉冲激光输出功率和脉宽, 在 304L 不锈钢表面加工出凹坑、凸包微织构, 并观察了它们的形貌特征。研究表明, 利用小脉宽、大功率激光可加工得到外形较好的凹坑, 脉宽不变时, 凹坑深度和直径随功率的增加呈先上升后下降的趋势。然而, 大脉宽、小功率激光加工可得到外形较好的凸包, 功率对凸包形貌的影响比脉宽的影响大, 当功率达到一定值时, 凸包高度和直径达到饱和状态。

关键词 激光技术; 表面微织构; 长脉冲激光; 表面形貌

中图分类号 TG178 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.031402

Processing of Microstructures on 304L Stainless Steel Surface Based on Long Pulse Laser

Wang Ling, Wang Xingsheng, Li Ninghui, Kang Min

College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210000, China

Abstract The dimple and bump microstructures on 304L stainless steel surface are processed by modulating the power and pulse duration of a long pulsed laser, and their morphology features are observed. The research results show that dimples with good morphology can be obtained under short pulse duration and high power and the dimple depth and diameter increase first and then decrease with the increase of laser power when the pulse duration is fixed. In contrast, bumps with good morphology can be obtained under long pulse duration and low power, the influence of power on bumps is stronger than that of pulse duration, and when the power reaches a certain value, the bump height and diameter approach to saturation.

Key words laser technique; surface microstructures; long pulse laser; surface topography

OCIS codes 140.3380; 140.3390; 140.3510

1 引 言

激光表面微织构是利用激光束加工出具有某种几何特征的非光滑表面的技术^[1-2]。结合激光加工的优点及织构性能的优化, 激光表面微织构可以广泛应用于各个领域^[3-7]。

Su 等^[8]用光纤激光器在聚晶金刚石刀具表面加工出具有不同几何外形的凹槽和凹坑, 发现微织构的几何参数, 如槽宽、凹坑直径、深度, 随扫描速度和重复频率的增加而减小, 随激光输出功率的增大而增大, 并对工艺参数进行了优化。周树清等^[9]采用飞秒激光诱导钛合金表面, 改变能量密度和脉冲个数, 得出钛合金表面微织构的变化规律, 其中非经典条纹的周期随能量密度或脉冲个数的增加而增加。韩丰明等^[10]采用波长

收稿日期: 2016-11-22; 收到修改稿日期: 2016-11-25

基金项目: 江苏省自然科学基金青年基金(BK20150685)、中央高校基本科研业务费(KYZ201659)、南京农业大学工学院优秀青年人才科技基金(YQ201604)

作者简介: 王 玲(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事激光加工表面微织构方面的研究。E-mail: njau_wangling@126.com

导师简介: 康 敏(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事 CAD/CAM 在特种加工应用方面的研究。

E-mail: kangmin@njau.edu.cn(通信联系人)

为 1064 nm、脉宽为 8 ns 的基频激光分别对铝合金和不锈钢进行了烧蚀实验,发现铝合金的烧蚀深度随激光能量密度的增加而增加,不锈钢烧蚀深度先增加而后呈下降趋势,且铝合金的烧蚀深度明显高于不锈钢的。其他学者也对激光微结构的形成过程及工艺参数对微结构的影响进行了相应研究^[11-14]。

以上研究都是基于短脉冲或超短脉冲激光,对于长脉冲激光加工表面微结构的研究相对较少。短脉冲或超短脉冲激光虽然加工质量高,但加工效率较低、成本较高、且对控制系统和工作环境的要求较高。长脉冲激光在空气中传播能量损失较小,具有作用时间长、耦合效率高等优点,且可以在与材料相互作用过程中避免受等离子体屏蔽效应、冲击波伴生现象和自聚焦现象的影响^[15-16]。因此,运用长脉冲连续激光可以加工出具有较理想表面特性的微结构,具有一定的应用价值。大量文献对微结构形貌中凹坑的研究相对比较成熟,而对凸包的工艺研究比较浅显。

基于此,本文采用长脉冲激光加工表面微结构,分别确定了可以形成凹坑和凸包的脉宽和激光输出功率范围,研究了脉宽和输出功率对凹坑和凸包形貌的影响规律。

2 实验

2.1 实验设备

实验采用 IPG 公司生产的型号为 YLR-200-AC 的光纤激光器,额定功率为 200 W,波长为 1070 nm。工作在调制模式下,频率设为 2000 Hz,通过改变占空比来改变脉宽。激光微结构加工平台如图 1 所示,由大理石工作台、直线电机、光路系统和控制系统组成。激光通过焦距为 100 mm 的凸透镜聚焦成直径为 15 μm 的光斑垂直照射于材料表面。

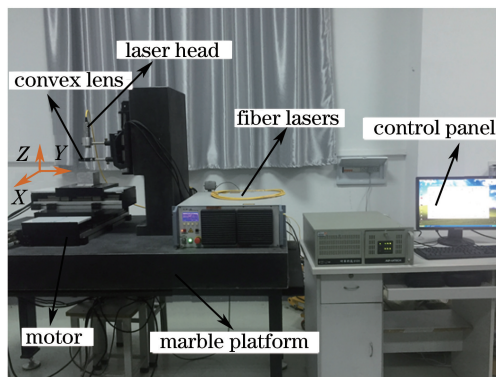


图 1 激光加工表面微结构工作平台

Fig. 1 Experimental platform for laser processing of surface microstructures

2.2 实验材料

加工材料选用表面经过抛光处理的 304L 不锈钢,规格为 30 mm \times 30 mm \times 1 mm,材料的化学成分见表 1。

表 1 304L 不锈钢化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 304L stainless steel (mass fraction, %)

Cr	Ni	Mn	Si	S	P	C	Mo
19.2	9.2	1.9	0.96	0.025	0.042	0.03	Bal.

2.3 实验方法

整个实验均在空气环境下进行。主要改变激光输出功率 P 和脉宽 τ ,在 y 方向进行直线扫描加工,频率 $f=2000$ Hz,速度 $V=160$ mm/s,加工出的结构间距为 80 μm 。通过前期实验,确定加工参数见表 2。凹坑加工实验分为 4 \times 7 组,凸包加工实验分为 5 \times 6 组。

经过超声波清洗后,用奥林巴斯公司生产的型号为 OLS4100 的激光共聚焦显微镜观察加工好的工件表面微结构形貌,测出凹坑的深度 h_1 、直径 d_1 、凹坑边缘残渣高 h_2 以及总直径 d_2 。同样测出凸包高度 H 、凸包直径 D 。每组实验测 6 次,取平均值。图 2 为表面微结构剖面轮廓示意图。

表 2 实验参数

Table 2 Parameters of experiments

$\tau / \mu\text{s}$		P / W	
Dimple	Bump	Dimple	Bump
10	50	130,140,150,160,170,180,190	50,60,70,80,90,100
15	60	85,92,99,106,113,120,127	50,60,70,80,90,100
20	70	65,70,75,80,85,90,95	50,60,70,80,90,100
25	80	52,55,58,61,64,67,70	50,60,70,80,90,100
—	90	—	50,60,70,80,90,100

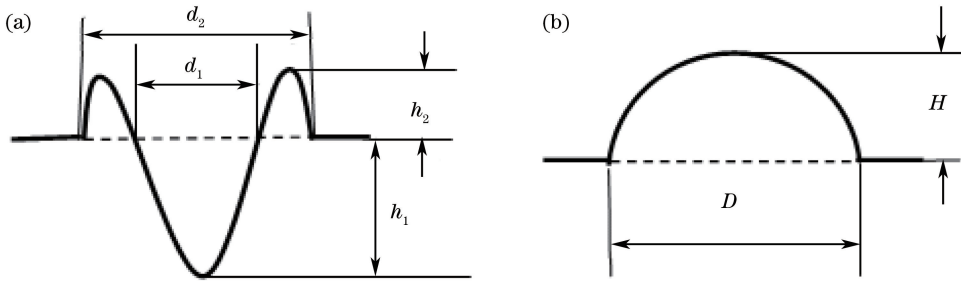


图 2 微结构剖面几何参数示意图。(a)凹坑;(b)凸包

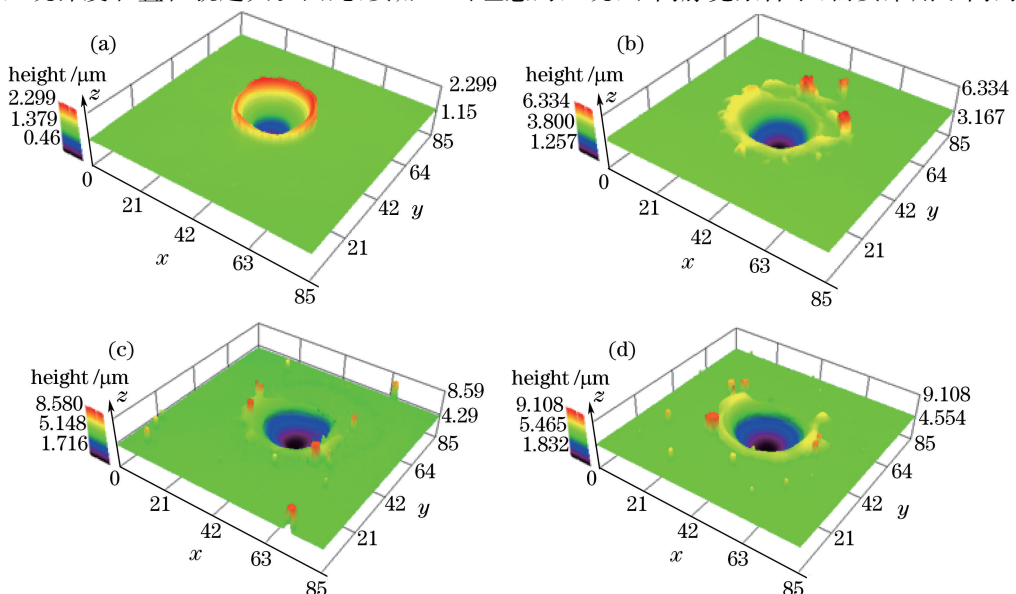
Fig. 2 Schematic diagram of geometrical parameters of microstructure profiles. (a) Dimple; (b) bump

3 实验结果与分析

3.1 凹坑实验及其规律分析

图 3 为脉宽 $\tau=10 \mu\text{s}$ 时,不同功率下单个激光脉冲加工的微结构三维形貌。可以看出,随着功率的增大,凹坑直径和深度也增大。当功率增大到一定值时,激光加工喷射出明显的熔渣,如图 3(b)~(d)所示,主要是因为功率越高,烧蚀越严重。

由共聚焦显微镜测出的凹坑轮廓几何参数得到凹坑剖面几何参数随功率变化关系,如图 4 所示。可以发现,脉宽越小,得到的理想凹坑深度和直径就越大。当 $\tau=10 \mu\text{s}$ 、 $P=190 \text{ W}$ 时,凹坑深度达到最大值 $5.6 \mu\text{m}$,宽度也达到最大值 $30.67 \mu\text{m}$ 。这主要是因为脉宽越小,功率越大,瞬间气化现象就越明显,进而反冲压力就越大,从而得到的凹坑深度和直径就越大。因此,要加工出理想的凹坑,不同脉宽条件下,需要采用不同的功率。

图 3 脉宽 $\tau=10 \mu\text{s}$ 时的凹坑微观形貌。(a) $P=140 \text{ W}$; (b) $P=150 \text{ W}$; (c) $P=160 \text{ W}$; (d) $P=170 \text{ W}$ Fig. 3 Microstructure of dimple when $\tau=10 \mu\text{s}$. (a) $P=140 \text{ W}$; (b) $P=150 \text{ W}$; (c) $P=160 \text{ W}$; (d) $P=170 \text{ W}$

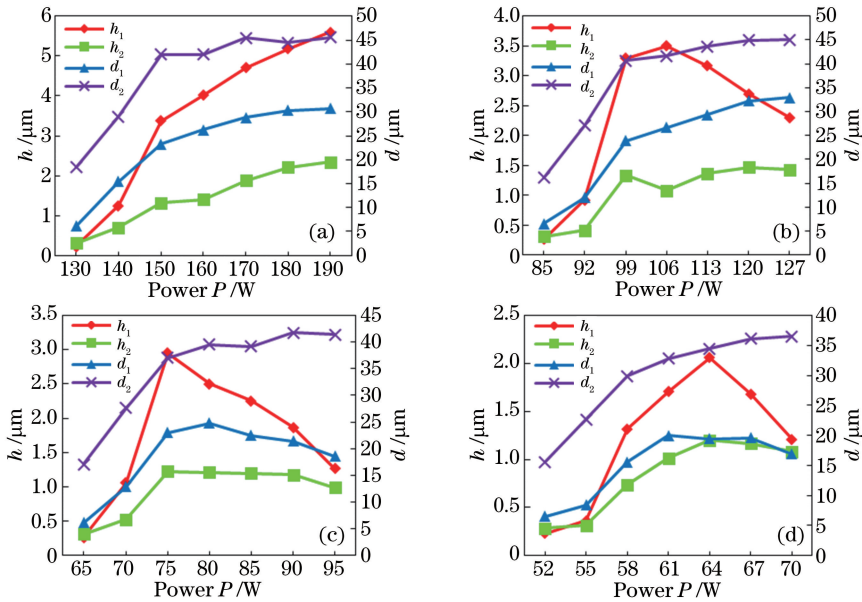


图 4 凹坑剖面几何参数随激光功率的变化关系。(a) $\tau=10\ \mu\text{s}$; (b) $\tau=15\ \mu\text{s}$; (c) $\tau=20\ \mu\text{s}$; (d) $\tau=25\ \mu\text{s}$

Fig. 4 Geometrical parameters of dimple profiles versus laser power. (a) $\tau=10\ \mu\text{s}$; (b) $\tau=15\ \mu\text{s}$; (c) $\tau=20\ \mu\text{s}$; (d) $\tau=25\ \mu\text{s}$

如图 4(a) 所示, 由于脉宽最小, 激光产生较高的瞬间能量, 材料发生较显著气化现象, 熔渣喷射现象相对严重而流入凹坑底部现象不明显, 因此凹坑深度和直径在相应功率范围内没有下降。观察图 4 中深度 h_1 和直径 d_1 曲线可见, 当脉宽一定时, 在其功率范围内, 凹坑深度和直径随功率的增加基本呈先上升后下降的趋势。这主要是因为激光功率密度较小时, 材料吸收的能量不足以使其发生气化, 凹坑深度较小; 随着功率密度的增大, 材料吸收能量增加, 熔化程度加剧, 导致凹坑深度增加; 当功率达到临界值时, 由于激光功率密度过大, 一部分材料来不及喷溅出微凹坑就会在凹坑内重铸, 导致深度不变甚至变小^[17]。随着激光功率的增加, 总直径 d_2 都呈先上升后逐渐平缓的趋势。残渣高度 h_2 随功率的增加先逐渐增大后保持基本不变甚至有下降趋势, 这可能是因为熔渣达到一定高度后, 部分熔渣由于重力作用沿凹坑壁面流入凹坑, 又因为部分残渣流动过程中会粘附在凹坑壁面上, 进而使凹坑深度和壁面直径减小, 这与图 4(b)~(d) 相吻合。

当功率 P 很低时, 残渣高 h_2 和凹坑深度 h_1 大小基本相等。随着功率 P 的增加, h_1 上升较快, h_2 上升平缓。达到一定功率时, 凹坑深度由于残渣的流入和重铸而减小。对于凹坑, 随着功率的增加, d_2 不断增大, 而 d_1 先增大后由于残渣的流入而缓慢增加甚至下降, 因此 d_1 与 d_2 的比例先增大后基本不变甚至下降。综上分析, 为了得到较好的几何外形且避免严重的熔渣现象, 当脉宽 τ 为 10, 15, 20, 25 μs 时, P 应分别取 170, 106, 75, 64 W, 且脉宽越小, 加工出来的凹坑几何外形越理想。

凹坑剖面几何参数随脉冲能量变化关系如图 5 所示。由图可知, 当脉宽 τ 分别取 15, 20, 25 μs 时, 脉冲能量在 1.55 mJ 左右得到的凹坑深度均为最大; 当深度达到最大值时, 脉冲能量继续增大, 凹坑深度逐渐变

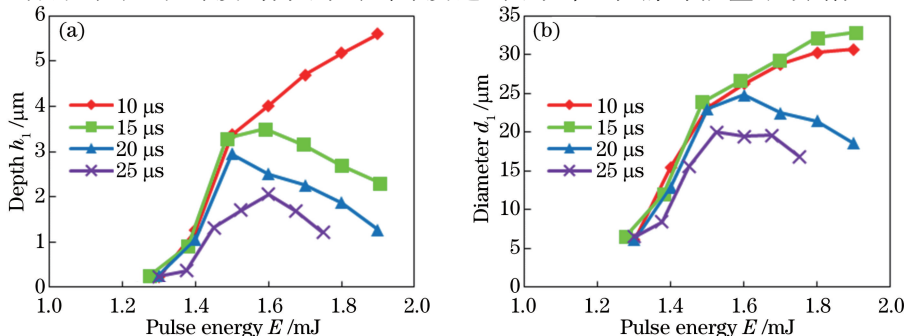


图 5 凹坑剖面几何参数随脉冲能量变化关系。(a) 深度; (b) 直径

Fig. 5 Geometrical parameters of dimple profiles versus pulse energy. (a) Depth; (b) diameter

小;当脉宽为 $10\ \mu\text{s}$ 时,凹坑深度和直径都呈上升趋势。

3.2 凸包实验及其规律分析

凹坑实验中,脉宽不变时,凹坑深度随功率的增加最终变小、甚至有可能被填埋,且凹坑的形成和脉冲能量有关。为了使熔渣不断填埋形成凸起而不出现熔渣喷射现象,激光功率应选取较小值,脉宽应选取较大值。根据凸包设计进行激光加工不锈钢表面微凸包实验,图 6 为脉宽 $\tau=70\ \mu\text{s}$ 时,不同功率情况下微凸包的三维形貌图。可以看出,凸包高度和直径随功率的增大而增大,当功率达到一定值时,如图 6(c)、(d) 所示,凸包轮廓周围烧蚀现象较严重。凸包中间有小的凹坑,主要是高斯分布的激光中间能量较高、反冲压力大造成的^[18]。

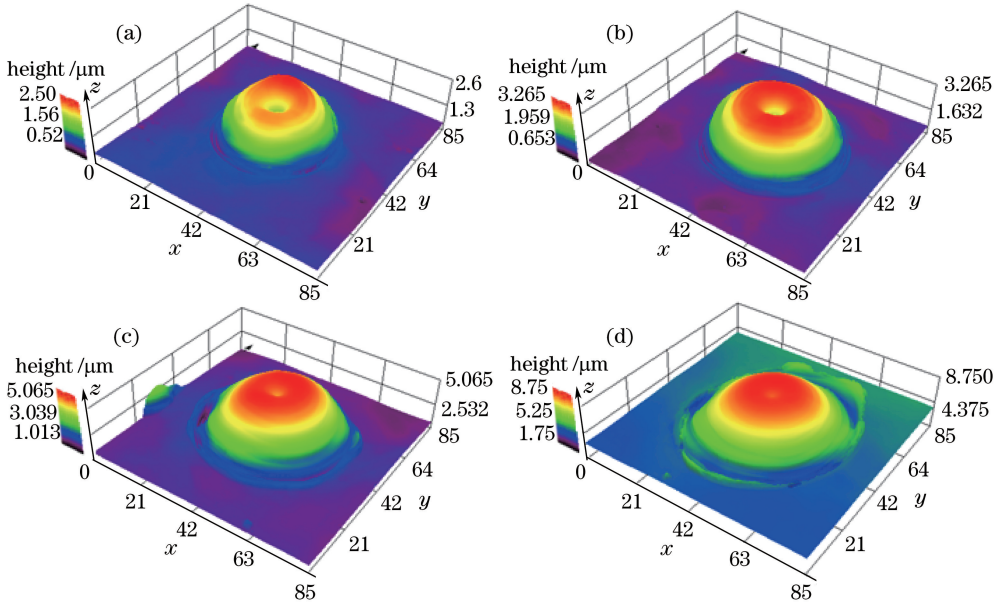


图 6 脉宽 $\tau=70\ \mu\text{s}$ 时的凸包显微形貌。(a) $P=50\ \text{W}$; (b) $P=60\ \text{W}$; (c) $P=70\ \text{W}$; (d) $P=80\ \text{W}$

Fig. 6 Microstructure of bump when $\tau=70\ \mu\text{s}$. (a) $P=50\ \text{W}$; (b) $P=60\ \text{W}$; (c) $P=70\ \text{W}$; (d) $P=80\ \text{W}$

根据共聚焦显微镜测出的凸包轮廓几何参数,得出凸包直径 D 随脉宽和功率变化的关系,如图 7 所示。

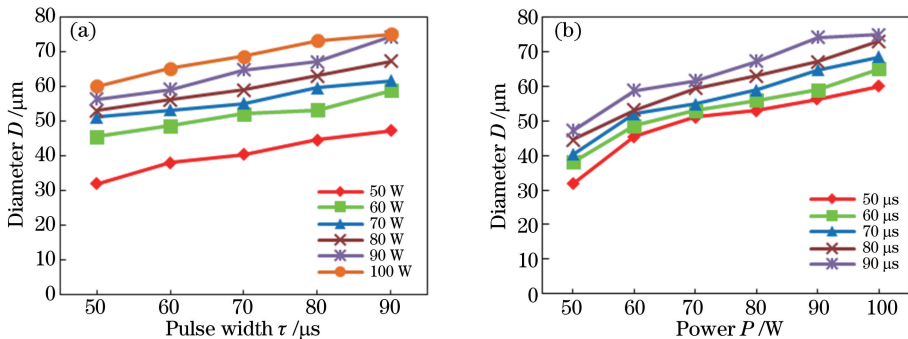


图 7 (a)不同功率情况下凸包直径随脉宽的变化;(b)不同脉宽情况下凸包直径随功率的变化

Fig. 7 (a) Change of diameter of bump with pulse width at different laser powers; (b) change of diameter of bump with laser power at different pulse widths

从图 7 可以看出,在实验参数范围内,凸包直径 D 随功率 P 和脉宽 τ 的增大呈平缓增大趋势,可认为是线性增长。对比图 7(a)、(b) 还可以看出,功率对 D 的影响比脉宽对 D 的影响更明显。

图 8 为凸包高度 H 随激光功率 P 和脉宽 τ 的变化规律。对比图 8(a)、(b) 发现,功率对 H 的影响比脉宽对 H 的影响更大,与图 7 相比,两者对 D 的影响程度差别更明显。如图 8(a) 所示,当 P 为 $50\ \text{W}$ 和 $60\ \text{W}$ 时, H 随脉宽的增加平缓增大。当功率 P 为 $70, 80, 90\ \text{W}$ 时, H 先增大后减小,且随功率的增大,对应的 H 最大点向脉宽小的方向移动,即对应最高点脉宽 τ 分别为 $80, 70, 60\ \mu\text{s}$, H 分别为 $4.6, 5.583, 5.388\ \mu\text{m}$ 。当功率 $P=100\ \text{W}$ 时, H 随脉宽增大缓慢下降。

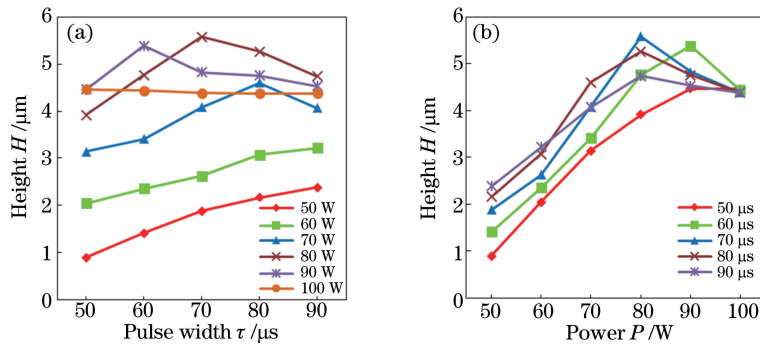


图 8 (a)不同功率情况下凸包高度随脉宽变化;(b)不同脉宽情况下凸包高度随功率变化

Fig. 8 (a) Change of height of bump with pulse width at different laser powers; (b) change of height of bump with laser power at different pulse widths

如图 8(b)所示, H 随功率的增加都呈先增大后减小的趋势, 随脉宽的增加最高点也向功率低的方向移动。综合图 8(a)、(b)可知, 凸包外形也与脉冲能量有关, 当脉冲能量为 5.6 mJ 时, 凸包高度最大, 本实验中 $\tau=70 \mu\text{s}$ 、 $P=80 \text{ W}$ 时, 凸包外形最理想。

图 9 展示了脉冲能量对凸包形貌的影响规律。进一步分析可知, 若脉冲能量 E 相同, 功率大则凸包直径和高度较大, 如 $E=4.5 \text{ mJ}$ 时, $P=90 \text{ W}$ 比 $P=50 \text{ W}$ 条件下加工出的凸包直径和高度值要大; 但当脉冲能量增加到 7.2 mJ 时, 凸包高度和直径趋于稳定。

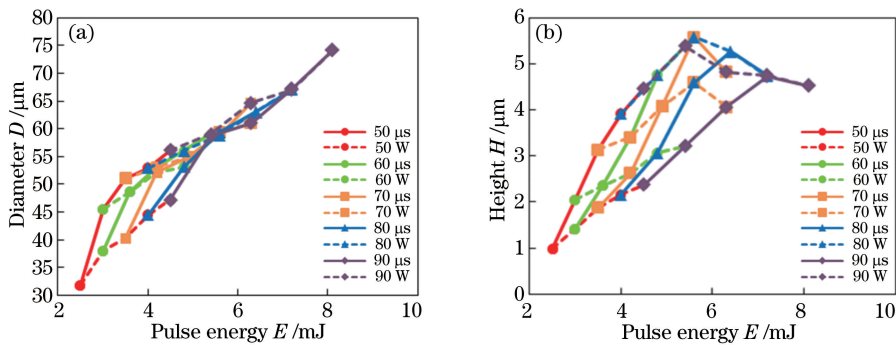


图 9 凸包剖面几何参数随脉冲能量变化关系。(a)直径;(b)高度

Fig. 9 Geometrical parameters of bump profiles versus pulse energy. (a) Diameter; (b) height

4 结 论

使用长脉冲激光加工 304L 不锈钢表面微织构, 研究了工艺参数(脉宽、激光输出功率)对单个微织构(凹坑、凸包)的形成和显微形貌的影响规律, 得到以下结论:

1) 对比凹凸两种织构, 小脉宽、大功率激光适合加工凹坑; 大脉宽、较小功率激光适合加工凸包。加工凸包的脉冲能量远大于加工凹坑的, 凸包由熔融流堆积而成;

2) 加工凹坑时, 要求不同脉宽对应不同功率范围。当脉冲能量 E 在 1.55 mJ 附近时, 凹坑形貌相对较好, 且脉宽越小, 加工出的理想凹坑深度和直径越大;

3) 加工凸包时, 凸包直径随功率呈线性平缓增大趋势, 而高度基本呈先增大后减小趋势, 且功率比脉宽对凸包形貌的影响更明显。当脉冲能量 $E=5.6 \text{ mJ}$ 时, 本实验中取 $\tau=70 \mu\text{s}$ 、 $P=80 \text{ W}$, 得到的凸包高度最大, 外形最理想;

4) 若脉冲能量 E 相同, 对于凹坑, 脉宽越小, 加工出的凹坑深度和直径就越大; 对于凸包, 功率越大, 加工出的凸包直径和高度就越大, 但当脉冲能量达到 7.2 mJ 左右时, 凸包形貌趋于稳定。

以上结论对长脉冲激光加工表面微织构具有一定的指导作用, 为后期加工微织构区域的参数选择提供了参考。

参 考 文 献

- [1] Liu Zhiyong. Experimental study on the processing of fiber laser on titanium-surface texture[D]. Changsha: Central South University, 2012: 4-9.
刘志勇. 钛合金表面织构的光纤激光加工实验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012: 4-9.
- [2] Yi Bin. Study on friction and wear characteristics of laser micro-textured surface on cemented carbides tool materials [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2014: 2-8.
易斌. 硬质合金刀具材料激光微织构摩擦磨损特性研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2014: 2-8.
- [3] Ma C, Bai S, Peng X, *et al.* Improving hydrophobicity of laser textured SiC surface with micro-square convexes[J]. Applied Surface Science, 2013, 266: 51-56.
- [4] Wang X, Giovannini M, Xing Y, *et al.* Fabrication and tribological behaviors of corner-cube-like dimple arrays produced by laser surface texturing on medical needles[J]. Tribology International, 2015, 92: 553-558.
- [5] Wang X, Han P, Kang M, *et al.* Surface-blended texturing of medical needles for friction reduction using a picosecond laser[J]. Applied Physics A: Materials Science & Processing, 2016, 122: 286.
- [6] Wang Bowen, Yin Bifeng, Lu Zhentao, *et al.* Experimental study on laser surface texturing technique in ductile iron cam surface[J]. Journal of Yanshan University, 2014, 38(4): 306-311.
汪博文, 尹必峰, 卢振涛, 等. 激光表面织构技术在球墨铸铁凸轮表面的应用试验研究[J]. 燕山大学学报, 2014, 38(4): 306-311.
- [7] Xiong Qiyu. Wettability of laser textured solid surfaces[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015: 35-58.
熊其玉. 激光微织构固体表面润湿性能研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015: 35-58.
- [8] Su Y, Li L, He N, *et al.* Experimental study of fiber laser surface texturing of polycrystalline diamond tools[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2014, 45: 117-124.
- [9] Zhou Shuqing, Ma Guojia, Wang Chunhua, *et al.* Research about variation rule of morphology on Ti alloy surface induced by femtosecond laser[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(9): 0902003.
周树清, 马国佳, 王春华, 等. 飞秒激光诱导钛合金表面形貌变化规律研究[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0902003.
- [10] Han Fengming, Xu Shizhen, Song Wenliang, *et al.* Study of nanosecond laser ablation on aluminum and stainless steel targets[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(2): 0203005.
韩丰明, 徐世珍, 宋文亮, 等. 纳秒激光对铝合金和不锈钢的烧蚀特性研究[J]. 中国激光, 2016, 43(2): 0203005.
- [11] Li Y, Cui Z, Wang W, *et al.* Formation of linked nanostructure-textured mound-shaped microstructures on stainless steel surface via femtosecond laser ablation[J]. Applied Surface Science, 2015, 324: 775-783.
- [12] Zhu Liang, Yang Run, Pei Shaohu, *et al.* Optimum parameters of nanosecond laser for micro-textured carbide surface [J]. Hot Working Technology, 2014, 43(8): 169-170, 174.
朱亮, 杨润, 裴绍虎, 等. 硬质合金表面纳秒激光微织构工艺参数优化[J]. 热加工工艺, 2014, 43(8): 169-170, 174.
- [13] Li Yingqi. Study on femtosecond laser micro/nanostructuring on 443 ferritic stainless steel surface[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015: 15-26.
黎颖奇. 443 铁素体不锈钢表面飞秒激光微/纳米结构化的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015: 15-26.
- [14] Pan Huaihai, Wang Zhuo, Fan Wenzhong, *et al.* Superhydrophobic titanium surface micro/nanostructures induced by femtosecond laser pulses[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(8): 0802004.
泮怀海, 王卓, 范文中, 等. 飞秒激光诱导钛表面超疏水微纳结构[J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0802004.
- [15] Bi Juan, Jin Guangyong, Ni Xiaowu, *et al.* Analysis of 532 nm long pulse laser-induced thermal decomposition damage to GaAs by semi-analytical method[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(24): 303-309.
毕娟, 金光勇, 倪晓武, 等. 532 nm 长脉冲激光致 GaAs 热分解损伤的半解析法分析[J]. 物理学报, 2012, 61(24): 303-309.
- [16] Li Hongjing. Temperature field analysis of single-layer HfO₂ film induced by long-pulse laser[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(5): 912-916.
李洪敬. 长脉冲激光辐照下单层 HfO₂ 薄膜的温度场分析[J]. 应用光学, 2014, 35(5): 912-916.
- [17] Zhou Jianzhong, Zhong Hui, Huang Shu, *et al.* Surface micro-dimple effect and electrochemical corrosion behaviors of

AZ31B magnesium alloy treated by laser[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0303007.

周建忠, 钟 辉, 黄 舒, 等. AZ31B 镁合金激光表面微凹坑效应及其电化学腐蚀行为[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0303007.

- [18] Zhou J, Shen H, Pan Y, *et al.* Experimental study on laser microstructures using long pulse[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 78: 113-120.