

3A21 铝合金表面激光毛化坑点形貌演变规律

陈熾¹, 王菲^{1*}, 吴琼², 底才翔¹, 田明¹, 崔庆新²

¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

² 北京卫星制造厂, 北京 100094

摘要 为探究激光毛化火山口坑点形貌特征的演变过程, 搭建了 LD 泵浦窄脉冲 Nd: YAG 激光毛化实验装置。针对 3A21 铝合金试件, 选取激光单脉冲能量、脉冲宽度、脉冲数及离焦量作为待研究的工艺参数, 采用单因素法研究近平顶光束作用下毛化坑点形貌的演变规律。研究结果表明: 单脉冲能量增大时, 坑点形貌由倒梯形向倒三角形转变; 随着脉冲宽度变窄, 坑点周围形成相互竞争的金属熔渣及陨石坑; 随着作用于坑点的脉冲数增多, 坑点的形貌及其特征参数趋于稳定; 随离焦量增大, 坑点边缘的微凸体逐渐减小直至消失。研究结果为 3A21 铝合金材料表面高质量的激光毛化提供参考。

关键词 激光光学; 激光毛化; 3A21 铝合金; 坑点形貌; 脉冲 Nd: YAG 激光器

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.241404

Pit Morphology Evolution Law of 3A21 Aluminum Alloy Surface in Laser Texturing

Chen Xi¹, Wang Fei¹, Wu Qiong², Di Caixiang¹, Tian Ming¹, Cui Qingxin²

¹ College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,

Changchun, Jilin 130022, China;

² Beijing Spacecrafts, Beijing 100094, China

Abstract The LD pumped Nd:YAG laser texturing equipment exhibiting a short pulse is established to explore the evolution process of the crater pit morphology generated by laser texturing. The effects of the process parameters, including the single pulse energy, pulse width, number of pulses, and defocusing amount, are investigated using the single factor method. Further, the evolution law of the texturing pit morphology on the 3A21 aluminum alloy sample surface is analyzed using an almost flat-top laser beam. The results denote that the pit morphology changes from an inverted trapezoid to an inverted triangle with the increasing single pulse energy. The competing metal slag and meteorite crater are formed around the pit as the pulse width narrows; further, the pit morphology and its characteristic parameters are observed to become stable under the action of sufficient pulses, and the micro-protrusion gradually decreases until it vanishes with an increase in the defocusing amount. These results establish a solid technological foundation for the 3A21 aluminum alloy with high-quality and morphology-controllable laser texturing.

Key words laser optics; laser texturing; 3A21 aluminum alloy; pit morphology; pulsed Nd:YAG laser

OCIS codes 140.3390; 240.6700; 350.3850

1 引言

经毛化处理的金属薄板具有优良的表面涂镀性

能和摩擦性能^[1], 在航空航天、生物医学、装备制造与维护、消费电子产业^[2-5]等领域应用广泛。目前主要的毛化方式有喷丸毛化^[6]、电火花毛化^[7]和激光

收稿日期: 2019-04-02; 修回日期: 2019-05-31; 录用日期: 2019-06-11

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1107501)、吉林省科技发展计划(20190302095GX)、长春理工大学科技创新基金(XJJLG-2017-12)

* E-mail: feewang@163.com

毛化^[8]等。喷丸毛化主要存在噪声大、粉尘污染严重、功耗和设备成本较高等问题,并且加工时受材料硬度、喷丸尺寸和冲击速率等因素的影响,毛化坑点具有随机性。电火花毛化的形貌均匀性和重复性比喷丸毛化好,但也存在着耗电量大、维修成本高和污染严重的问题^[9]。为探索一种低能耗、清洁无污染的毛化方案,激光毛化技术引起了人们的关注^[10-12]。激光毛化技术是采用高能量密度、窄脉冲宽度的脉冲激光辐照材料表面,使材料出现熔化甚至气化等离子体现象^[13],在材料表面形成烧蚀坑点,从而改变材料表面形貌及性能的激光加工技术。激光毛化过程不会对环境造成污染,并且由于激光器的可控性好,可以精确控制工艺参数,保证了毛化坑点的一致性。

目前,激光毛化的研究主要集中在探索材料性能的改善和坑点形貌的演变规律这两方面。其中,坑点的典型形貌为球冠状^[14]、M状^[15]和火山口状^[16]。Chilamakuri等^[17]通过设计的算法得到火山口状坑点形貌的仿真结果。刘莹等^[18]使用YAG脉冲激光毛化装备制备出带有表面微凸体的火山口坑点。Vilhena等^[19]对比了不同激光模式下火山口毛化坑点的成形特征。符永宏等^[20]研究了激光参数对坑点形貌的作用规律,分析了火山口状坑点的形成机理。Ukar等^[21]使用连续激光毛化设备进行工艺实验,通过选取合适的工艺参数验证了连续激光器也可以应用于激光毛化的研究中。Hu等^[22]对比了水下和空气中火山口凹坑的形貌区别,得出了水蒸气的反冲压力可以有效增大凹坑尺寸的结论。虞宙等^[23]探讨了皮秒脉冲激光工艺参数对火山口微沟槽形貌的作用规律,探索了最优的工艺参数,并采用该工艺参数实现了钛合金微造型样件的制备。Nandakumar等^[5]采用激光毛化的方式在发动机活塞表面构建了火山口状微沟槽,达到了降低发动机油耗的目的。综上可知,国内外对火山口状激光毛化坑点的相关报道,通常以倒三角状表征坑点的形貌特征,而忽视了激光光场分布以

表1 LD泵浦Nd:YAG脉冲激光器的主要性能参数

Table 1 Main performance parameters of Nd:YAG pulsed laser pumped by LD

Single pulse energy / mJ	Pulse frequency / Hz	Wavelength / nm	Pulse width / μ s	Beam divergence angle / mrad	Instability / %
0-300	1-100	1064	50-250	≤ 2	-2-2

2.2 试验方案

为改善卫星热辐射器壳体表面的摩擦性能和涂层的附着力,以壳体用Al-Mn系3A21铝合金(主

及相关工艺参数对坑点形貌转变的影响。

本文采用近平顶光场分布的窄脉冲激光束对3A21铝合金表面进行毛化处理,研究毛化坑点及微凸体的形成机理,通过调整工艺参数揭示了坑点形貌由倒梯形向倒三角形演变的规律。形貌工艺试验可为激光毛化改性方面的研究提供参考,并有助于激光毛化板的规模化应用。

2 激光毛化试验

2.1 试验装置

激光毛化试验装置由LD泵浦窄脉冲激光器、扩束准直系统、扫描系统、侧吹装置、控制系统以及三维运动平台构成,如图1所示。激光器输出脉冲经过扩束准直系统、外部扫描振镜和场镜后聚焦于试件表面。将氩气作为辅助气体,使用侧吹装置以45°对准试件表面吹气,气体压强为0.5 MPa。利用控制系统精确控制激光器和三维运动平台,以保证激光参数、试件与聚焦镜之间的距离及坑点间距连续可调。

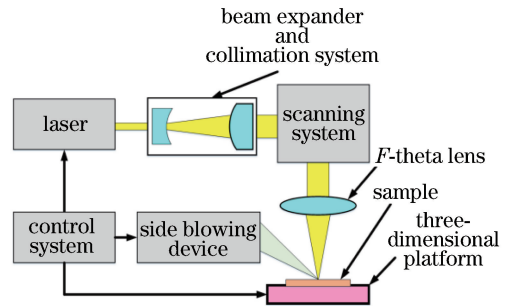


图1 激光毛化装备示意图

Fig. 1 Schematic of laser texturing equipment

用于毛化工艺试验的激光源为MOPA(master oscillator power amplifier)结构的LD泵浦窄脉冲Nd:YAG激光器,激光器输出的光场为近平顶分布,激光器性能参数如表1所示。在单脉冲能量满足试验要求的同时应保证输出能量的稳定性,以便于与激光毛化坑点的形貌、尺寸构建精确可靠的相关性。

要成分如表2所示)试件为研究对象,研究激光毛化表面处理工艺方法,探讨激光毛化过程中坑点形貌的演变规律。试验前,为保证试件表面的平整度,以

表2 3A21型铝合金的主要成分

Table 2 Main components of 3A21 aluminum alloy

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
Mass fraction /%	0.6	0.70	0.20	1.0-1.6	0.05	0.15	0.10-0.20	Bal.

防表面粗糙影响实验结果的可重复性,使用抛光设备对试件表面进行打磨抛光,保证表面粗糙度在 $0.5\ \mu\text{m}$ 附近。使用无水乙醇棉球擦拭试件后,将试件固定在工作台上,调整试件与场镜之间的距离,使试件表面位于场镜的焦平面处,测得焦平面处的光斑直径约为 $150\ \mu\text{m}$ 。

采用单因素分析法研究激光参数对毛化坑点形貌的影响规律,试验过程中脉冲激光器的工作频率固定为 $1\ \text{Hz}$,主要考虑以下4个参数:单脉冲能量(E)、脉冲宽度(τ)、脉冲个数(n)和离焦量(Δ)。每

表3 激光毛化工艺参数

Table 3 Parameters of laser texturing process

Experiment number	Single pulse energy E /mJ	Pulse width τ / μs	Number of pulses n	Defocus Δ /mm
A	100-250	200	1	0
B	150	50-250	1	0
C	150	200	1-20	0
D	150	200	1	-2-2

个参数的变化范围如表3所示,每组试验重复三次,以保证试验结果的可重复性。

2.3 形貌表征

激光毛化坑点呈现出火山口形状,如图2所示,其中图2(a)是利用Leica DM6M型金相显微镜采集的毛化坑点二维形貌图。凹陷坑点周围存在一个由熔融金属重新凝固堆积而成的微凸体,坑点底部平坦。火山口状毛化坑点的形貌特征主要由微凸体高度(H_1)、烧蚀深度(D_{ep})、微凸体外径(D_1)、坑点直径(D_2)及坑底直径(D_3)共同表征。设备沿试件深度 Z 向逐层扫描(扫描间隔约为 $0.7\ \mu\text{m}$),沿侧吹装置吹气方向标定不同轴向位置的垂轴截面内坑点的几何尺寸(标定误差不大于 $2\ \mu\text{m}$),拟合得到了坑点的截面形貌,如图2(b)所示。图2(c)、(d)分别为倒梯形和倒三角形毛化坑点截面的金相图。

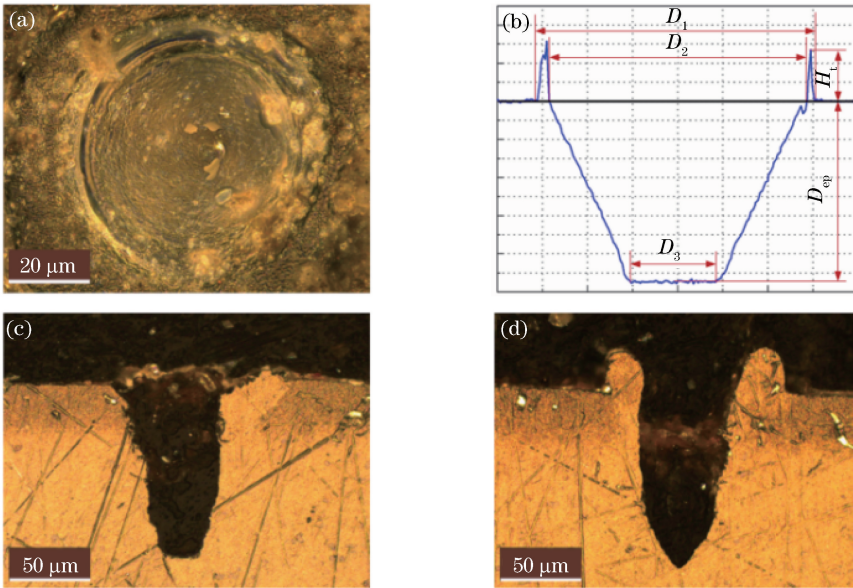


图2 毛化坑点的形貌。(a)二维金相图;(b)横截面示意图;(c)倒梯形截面金相图;(d)倒三角形截面金相图

Fig. 2 Morphologies of the texturing pits. (a) Two-dimensional metallographic diagram; (b) cross-section schematic; (c) inverted trapezoid metallographic diagram; (d) inverted triangle metallographic diagram

3 试验结果分析

3.1 单脉冲能量对特征参数的影响

在脉冲宽度为 $200\ \mu\text{s}$ 的条件下,单脉冲能量由 $100\ \text{mJ}$ 增大至 $250\ \text{mJ}$,间隔为 $25\ \text{mJ}$,坑点特征参数

的变化曲线如图3所示。随着单脉冲能量逐渐增大,烧蚀深度、微凸体高度、坑点直径以及微凸体外径逐渐增大,坑底直径逐渐减小。在低脉冲能量作用下,在铝合金表面上只能观察到微小的再铸层,微凸体外径和坑点直径近似相等且小于光斑直径。由于激光

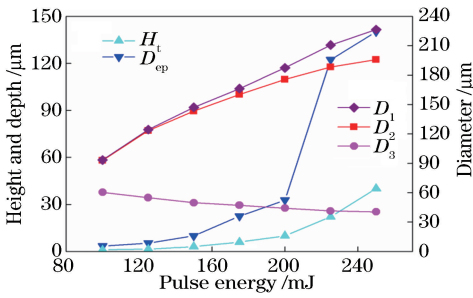


图3 坑点特征参数随脉冲能量变化的曲线图

Fig. 3 Characteristic parameters of pits versus pulse energy
 能量密度较低,光束边缘的强度无法达到材料的烧蚀阈值。当脉冲能量由 200 mJ 增大至225 mJ时,烧蚀的主要作用由熔化去除转变为气化去除,气化引起的反冲压力致使坑点深度明显增大。当脉冲能量高于 225 mJ 时,气化去除加剧,并在熔池上方出现等离子体现象,等离子体沿激光入射的反方向膨胀,屏蔽了

后续能量的进一步作用,坑点深度的增大速率逐渐减小。在气化去除过程中,材料表面附加的温度张力梯度作用加剧,根据 Marangoni 对流理论可知,温度梯度导致材料向冷端流动,即更多的熔融金属由熔池中心向冷端边缘扩散并堆积在凹坑周围。因此,微凸体外径和微凸体高度逐渐变大,微凸体外径与坑点直径的差值(即微凸体环宽)随之增大。

图 4 分别给出了不同单脉冲能量(150, 200, 250 mJ)下的坑点形貌,可以看到坑底直径、坑点直径均随能量增大而减小,各脉冲能量下得到的都是底部平坦的凹坑。近平顶分布的激光束作用于材料时,材料温度分布与入射光场分布一致,作用区域内材料吸收的能量分布均匀,致使毛化形貌趋于倒梯形。随着能量增加,光斑中心与边缘的强度差逐渐增大,作用深度加深,坑底直径随之减小,坑点形貌呈现出由倒梯形向倒三角形转变的趋势。

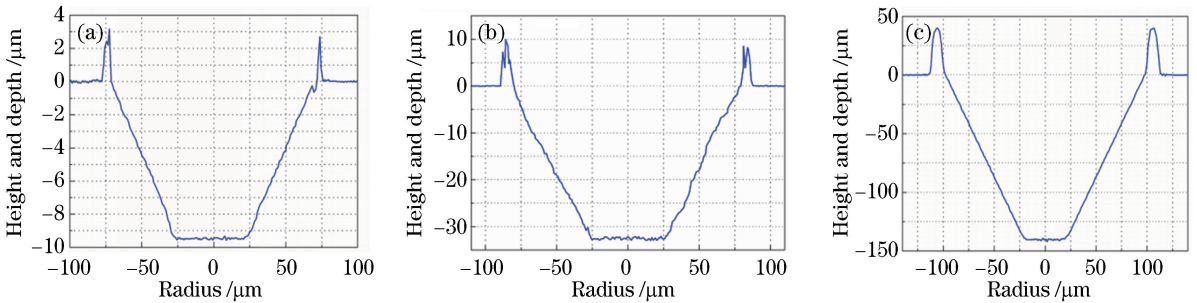


图4 不同脉冲能量下得到的典型坑点的形貌。(a) $E=150\text{ mJ}$; (b) $E=200\text{ mJ}$; (c) $E=250\text{ mJ}$

Fig. 4 Morphologies of typical pits obtained at different pulse energies. (a) $E=150\text{ mJ}$; (b) $E=200\text{ mJ}$; (c) $E=250\text{ mJ}$

3.2 脉冲宽度对特征参数的影响

在单脉冲能量为 150 mJ 的情况下,脉冲宽度由 50 μs 增大到 250 μs ,间隔为 25 μs ,坑点特征参数的变化曲线如图 5 所示。可以看出:随着脉冲宽度变窄,激光峰值功率逐渐变大,坑点烧蚀深度、微凸体高度和外径随之增大,坑底直径随之减小,脉冲宽度对坑点直径的影响不明显。随着脉冲宽度变窄,熔融金属的堆积作用加剧,致使微凸体高度和外径逐渐增大,微凸体环宽随之增大。当脉冲宽度由 150 μs 降至 125 μs 时,激光毛化的主要作用方式由金属熔融去除转变为气化蒸发,引起的气化反冲压力导致坑点烧蚀深度明显变大;当脉冲宽度低于 125 μs 时,出现了等离子体的屏蔽作用,坑点深度的增大速率逐渐减小。

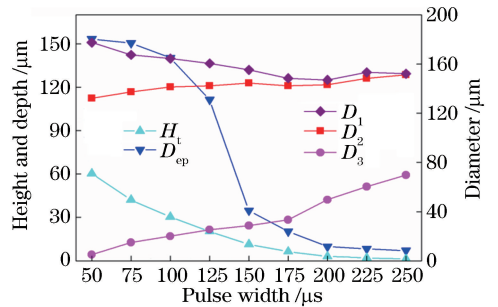


图5 坑点特征参数随脉冲宽度变化的曲线图

Fig. 5 Characteristic parameters of pits versus pulse width
 减小,在脉冲宽度为 50 μs 时底部直径消失,形成了倒三角形凹坑。在窄脉冲、高峰值功率激光脉冲的作用下,部分熔融金属温度超过了金属气化阈值。根据气化反冲压力理论可知,金属气化在坑点中心产生的梯度压力最大,压力沿四周急剧下降,迫使坑点中心的熔融金属作用于纵深方向,同时阻碍了熔池水平方向的热扩散。侧吹装置吹气导致了表面微凸体的不对称性,在脉冲相对较宽的情况下,气体侧

图 6 分别给出了脉冲宽度为 200, 100, 50 μs 时的坑点形貌。单脉冲能量一定时,脉冲宽度越宽,峰值功率就越低。从图 6 可以看出,坑点形貌均呈倒梯形;随脉冲宽度变窄,坑底直径、坑点直径均逐渐

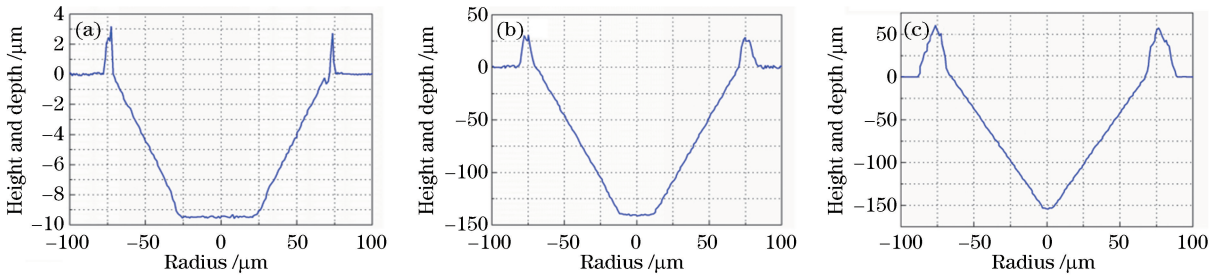


图 6 不同脉冲宽度下得到的坑点的形貌。(a) $\tau=200 \mu\text{s}$; (b) $\tau=100 \mu\text{s}$; (c) $\tau=50 \mu\text{s}$

Fig. 6 Morphologies of pits obtained at different pulse widths. (a) $\tau=200 \mu\text{s}$; (b) $\tau=100 \mu\text{s}$; (c) $\tau=50 \mu\text{s}$

吹对微凸体的影响比较明显;随着脉冲宽度逐渐变窄,反冲压力增大,侧吹对微凸体的影响逐渐变小。

在研究凹坑形貌变化的过程中发现,当脉冲宽度为 $100 \mu\text{s}$ 时,在材料表面开始出现围绕坑点的黑色熔渣。为探究黑色熔渣的形成原因及演变过程,本试验将脉冲宽度在 $50\sim 100 \mu\text{s}$ 范围内以 $10 \mu\text{s}$ 为间隔继续细分,分别在 $50, 60, 80, 90 \mu\text{s}$ 的脉冲宽度

下得到材料表面典型形貌变化,如图 7 所示。当脉冲宽度为 $90 \mu\text{s}$ 时,材料表面的黑色熔渣较多,并呈喷射状;当脉冲宽度降至 $80 \mu\text{s}$ 时,材料表面开始出现小陨石坑,黑色熔渣开始减少;随着脉冲宽度逐渐降低至 $60 \mu\text{s}$ 时,毛化坑点周围的陨石坑逐渐增多,黑色熔渣消失;随着脉冲宽度继续变窄,陨石坑更加密集。

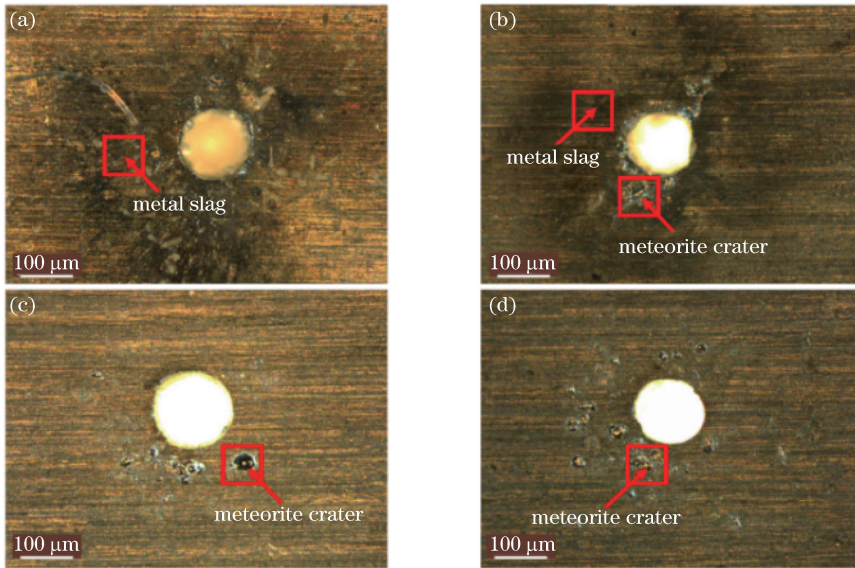


图 7 不同脉冲宽度下得到的毛化坑点的表面形貌。(a) $\tau=90 \mu\text{s}$; (b) $\tau=80 \mu\text{s}$; (c) $\tau=60 \mu\text{s}$; (d) $\tau=50 \mu\text{s}$

Fig. 7 Laser texturing pits' surface morphology obtained at different pulse widths. (a) $\tau=90 \mu\text{s}$; (b) $\tau=80 \mu\text{s}$; (c) $\tau=60 \mu\text{s}$; (d) $\tau=50 \mu\text{s}$

当脉冲宽度小于 $100 \mu\text{s}$ 时,激光毛化过程大部分依靠气化去除材料,在反冲压力和辅助气体压力的共同作用下,凹坑内的熔融金属被驱至材料表面。起初反冲压力较小,并且激光与材料作用的时间相对较长,热扩散时间也相对较长,扩散至材料表面的熔融金属冷却后形成了黑色的金属熔渣;随着脉冲宽度变窄,材料气化现象明显,致使反冲压力作用加剧,一部分熔融金属携带大量热量以迸溅的形式溅出熔池,然后回落至材料表面并释放热量,形成烧蚀陨石坑,这种情况下金属

熔渣和陨石坑同时存在;随着脉冲宽度继续变窄,材料内部的热扩散速率增大,表面冷却随之加快,金属熔渣无法存留在材料表面,更多的熔融金属以冲击形式被驱至材料表面,材料表面呈现为完全的陨石坑形貌。在激光毛化过程中,辅助气体以 45° 吹射试件表面改变了熔融金属的流动,在辅助气体压力作用下,各脉冲宽度下得到的黑色熔渣及陨石坑均存在向吹气方向聚集的趋势。在实际应用中,毛化坑点周围呈陨石坑形貌的材料可以作为摩擦副,进一步改善材料的摩擦学性能。

3.3 脉冲数对特征参数的影响

在单脉冲能量为 150 mJ、脉冲宽度为 200 μs 的情况下,采用不同的脉冲数(1、2、3、5、10、15、20)进行试验,得到了坑点特征参数随脉冲数的变化曲线,如图 8 所示。可见:坑点微凸体高度、烧蚀深度、坑点直径和微凸体外径与脉冲个数呈单调递增的关系,坑底直径与脉冲个数呈单调递减的关系;脉冲个数增加至 10 个以上时各参数趋于稳定。作用于坑点的脉冲数增加具有累计能量的效果,可以增加坑点的去除体积,熔池内金属多次熔融并随 Marangoni 对流向边缘冷端扩散,使坑点边缘凸起环宽增大,微凸体体积随之增大。由于脉冲间的时间间隔使材料得以充分冷却,多脉冲作用下坑点温度相较于单脉冲作用没有显著升高,熔融金属只能留在坑点内,蒸发量有限,因此脉冲数累计到一定程度时凹坑形貌趋于稳定。

图 9 分别给出了脉冲数为 1、10 和 20 时的坑点

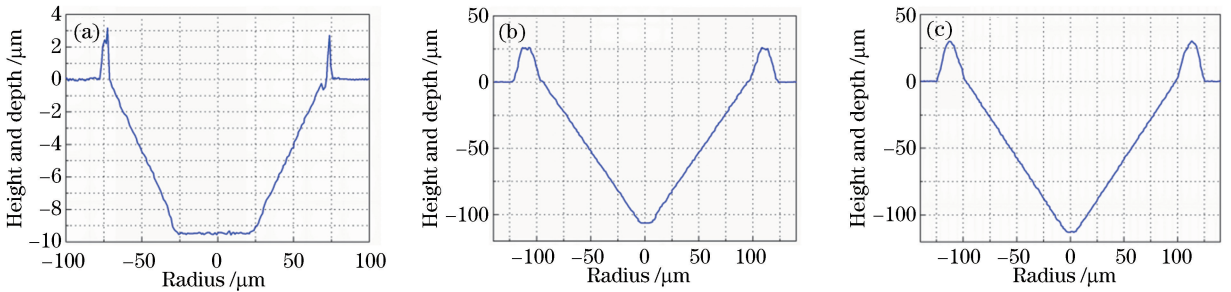


图 9 不同脉冲数下得到的坑点形貌。(a) $n=1$; (b) $n=10$; (c) $n=20$

Fig. 9 Morphologies of pits obtained at different number of laser pulses. (a) $n=1$; (b) $n=10$; (c) $n=20$

3.4 离焦量对特征参数的影响

在单脉冲能量为 150 mJ、脉冲宽度为 200 μs 的条件下,采用不同的离焦量(± 2 mm、 ± 1 mm、 ± 0.5 mm 和 0 mm)进行试验,得到了坑点特征参数随离焦量变化的曲线,如图 10 所示。可以看到,底部直径、坑点直径和微凸体外径与离焦量均呈单调递增的关系,微凸体高度和烧蚀深度与离焦量均呈单调递减的关系。随着离焦量增大,辐照在材料表面的光斑直径相应增大,对应的能量密度降低,从而导致坑点直径增大和烧蚀深度减小。在相同的正、负离焦情况下,毛化坑点的尺寸基本一致,这是由于相同离焦下的辐照光斑面积近似,因此对应的功率密度相同,作用效果等效。

图 11 分别给出离焦量分别为 ± 2 mm、 ± 1 mm 和 0 mm 的坑点形貌,可以看到,相较于焦平面处获得的坑点形貌,离焦情况下坑底直径明显增大,坑点直径也较大,并且在离焦量为 ± 2 mm 的情况下无

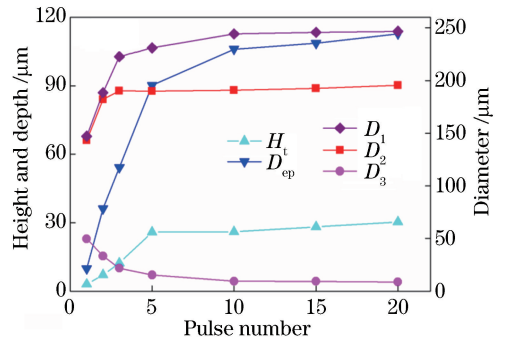


图 8 坑点特征参数随脉冲个数变化的曲线

Fig. 8 Characteristic parameters of pits versus number of laser pulses

形貌,可以看出:当脉冲数大于 10 时,坑点形貌趋于稳定;随着脉冲个数增加,坑底直径、坑点直径均逐渐减小,这是因为多脉冲作用下能量积累效应使底部直径逐渐减小,即足够的激光能量也可以获得倒三角状的凹坑。

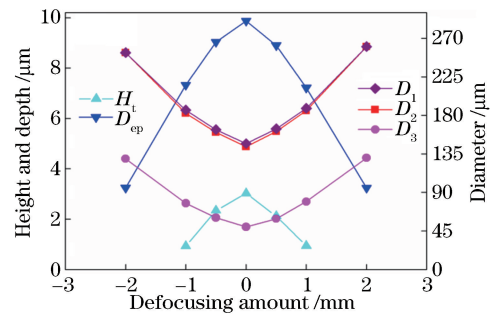


图 10 坑点特征参数随离焦量变化的曲线图

Fig. 10 Characteristic parameters of pits versus defocusing amount

法观察到明显的表面微凸体,此时得到的是倒梯形凹坑。根据热传导理论可知,在低功率密度、大面积近平顶脉冲激光的辐照下,激光作用区域内的温度场相对均匀,而且内部的温度梯度并不显著,材料的纵向热传导只发生在内部较小的范围内,因此烧蚀深度较浅。在离焦情况下获得的倒梯形形貌相较于

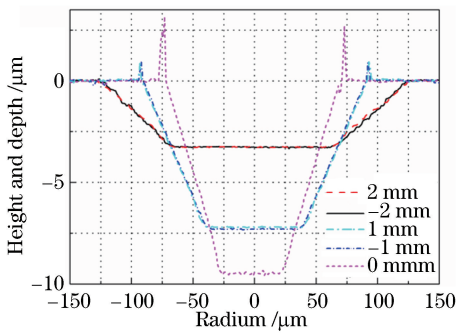


图 11 不同离焦量 Δ 下得到的典型坑点的形貌

Fig. 11 Morphologies of typical pits obtained at different defocusing amount Δ

倒三角形形貌可以获得更大的去除体积,有利于材料存储润滑油,改善金属材料的润滑性能。

4 结 论

通过激光毛化试验探索了单脉冲能量、脉冲宽度、脉冲数以及离焦量对毛化坑点火山口形貌的影响,经过分析总结得出了以下结论。

1)在能量逐渐增大及脉冲宽度逐渐减小的过程中,熔融金属的堆积作用增大了表面微凸体的体积,激光对试件的烧蚀作用由熔凝去除向气化去除转变,坑点形貌由倒梯形向倒三角形转变;但随之出现的等离子体现象屏蔽了能量的进一步作用。因此,合理选取激光参数可以在避免等离子屏蔽作用的前提下,获取较深的坑点尺寸。

2)激光毛化过程大部分依靠气化去除材料,其试件表面出现了存在竞争关系的金属熔渣和陨石坑。在脉冲宽度相对较宽时,试件表面出现了黑色的金属熔渣;随着脉冲宽度减小,脉冲峰值功率增大,试件表面呈金属熔渣和陨石坑共存的形貌,最终转变为陨石坑形貌。

3)在离焦情况下可以获得较大的坑点尺寸以及去除体积,随着离焦量的数值增大,在试件表面几乎无法观察到明显的微凸体,坑点呈完全的倒梯形形貌。

通过试验建立了工艺参数与毛化形貌及尺寸的联系,说明可以通过控制激光光场及相关工艺参数精确控制毛化坑点的形貌。在此基础上还可以进一步研究激光毛化形貌对材料性能的改进,以构建材料性能与表面形貌特征之间的联系。

参 考 文 献

[1] Bathe R, Sai Krishna V, Nikumb S K, *et al.* Laser

surface texturing of gray cast iron for improving tribological behavior[J]. Applied Physics A, 2014, 117(1): 117-123.

[2] Romoli L, Moroni F, Khan M M A. A study on the influence of surface laser texturing on the adhesive strength of bonded joints in aluminium alloys [J]. CIRP Annals, 2017, 66(1): 237-240.

[3] Razi S, Madanipour K, Mollabashi M. Laser surface texturing of 316L stainless steel in air and water: a method for increasing hydrophilicity via direct creation of microstructures [J]. Optics & Laser Technology, 2016, 80: 237-246.

[4] Fang H M, Bai S L, Wong C P. Microstructure engineering of graphene towards highly thermal conductive composites [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018, 112: 216-238.

[5] Nandakumar M B, Sudhakar K G, Natu H, *et al.* Experimental investigation of the effect of laser texturing on the used IC engine piston skirt [J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(1): 2773-2780.

[6] Yao Q T, Sun J, Shen D P, *et al.* Large-scale synthesis of nanostructured nitride layer on Ti plate using mechanical shot peening and low-temperature nitriding[J]. Advanced Engineering Materials, 2017, 19(11): 1700157.

[7] Puri Y M, Gohil V. Experimental study of material removal rate in electrical discharge turning of titanium alloy (Ti-6Al-4V) [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 187(1): 012036.

[8] Zheng X H, Tan J, Zhang Q, *et al.* Effect of laser surface texturing depth on the adhesion of electroless plated nickel coating on alumina [J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 311: 151-156.

[9] Li Z Y, Yang M J, Liu W J, *et al.* Investigation on crater morphology by high repetitive rate YAG laser-induced discharge texturing[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 200(14/15): 4493-4499.

[10] Bonse J, Kirner S V, Griepentrog M, *et al.* Femtosecond laser texturing of surfaces for tribological applications[J]. Materials, 2018, 11(5): 801.

[11] Guo J D, Li Y, Lu H L, *et al.* An effective method of edge deburring for laser surface texturing of Co-Cr-Mo alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94: 1491-1503.

- [12] Kümmel J, Braun D, Gibmeier J, *et al.* Study on micro texturing of uncoated cemented carbide cutting tools for wear improvement and built-up edge stabilisation [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 215: 62-70.
- [13] Cai S, Chen G Y, Zhou C, *et al.* Research of plasma physical model for single pulsed laser ablation of bronze-bond grinding wheel[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0414001.
蔡颂, 陈根余, 周聪, 等. 单脉冲激光烧蚀青铜砂轮等离子体物理模型研究 [J]. *光学学报*, 2017, 37(4): 0414001.
- [14] Li X L, Yue W, Huang F, *et al.* Tribological behaviour of textured titanium under abrasive wear [J]. *Surface Engineering*, 2019, 35(4): 378-386.
- [15] Ye Y X, Jia Z Y, Fu H, *et al.* Study on evaluation law of manufacturing micro-convex points on 45 # steel surface by pulse-width laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(3): 031408.
叶云霞, 贾子扬, 符昊, 等. 脉冲激光作用下 45 # 钢表面微凸起形貌演变规律的研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(3): 031408.
- [16] Pardal G, Meco S, Dunn A, *et al.* Laser spot welding of laser textured steel to aluminium [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 241: 24-35.
- [17] Chilamakuri S, Bhushan B. Effect of peak radius on design of W-type donut shaped laser textured surfaces [J]. *Wear*, 1999, 230(2): 118-123.
- [18] Liu Y, Chen D R, Yang W Y. Experimental investigation of laser-textured on roller with micro-convex topography[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 39(7): 107-110.
刘莹, 陈大融, 杨文言. 轧辊表面微凸体形貌激光毛化技术的试验研究 [J]. *机械工程学报*, 2003, 39(7): 107-110.
- [19] Vilhena L M, Sedlaček M, Podgornik B, *et al.* Surface texturing by pulsed Nd : YAG laser [J]. *Tribology International*, 2009, 42(10): 1496-1504.
- [20] Fu Y H, Wang H, Yang Y G, *et al.* Experiment research on fiber laser texturing of stainless steel and its friction properties[J]. *Surface Technology*, 2015, 44(1): 96-101.
符永宏, 王浩, 杨焯刚, 等. 不锈钢光纤激光毛化及其摩擦性能 [J]. *表面技术*, 2015, 44(1): 96-101.
- [21] Ukar E, Lamikiz A, Martínez S, *et al.* Laser texturing with conventional fiber laser [J]. *Procedia Engineering*, 2015, 132: 663-670.
- [22] Hu J, Xu H B. Friction and wear behavior analysis of the stainless steel surface fabricated by laser texturing underwater[J]. *Tribology International*, 2016, 102: 371-377.
- [23] Yu Z, Zhang W J, Hu J. Micromachining of titanium alloy implant by picosecond laser surface texturing and alloy biocompatibility [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0102014.
虞宙, 张文杰, 胡俊. 皮秒激光对医用钛合金植入物表面微加工及生物相容性的研究 [J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 0102014.