

低粗糙度表面的连续激光抛光形貌演化机制研究

王梁^{1,2,3}, 姜柯^{1,2,3}, 范思远^{1,2,3}, 黄锦榜^{1,2,3}, 葛鸿浩^{1,2,3}, 吴国龙^{1,2,3}, 董刚^{1,2,3}, 姚建华^{1,2,3*}¹浙江工业大学激光先进制造研究院, 浙江 杭州 310023;²浙江工业大学机械工程学院, 浙江 杭州 310023;³高端激光制造装备省部共建协同创新中心, 浙江 杭州 310023

摘要 采用连续光纤激光器在氩气环境下对粗糙度为 $R_a=0.95\ \mu\text{m}$ 的低粗糙表面进行激光抛光实验, 通过光学显微镜和激光共聚焦显微镜对单道激光抛光熔池截面、抛光前后三维表面形貌及表面轮廓进行分析。研究结果显示: 在其他参数不变的条件下, 随着扫描速度的提升, 单道连续激光抛光熔池两侧的咬边现象逐渐加重。随着激光功率的提高, 由于单道抛光熔池不稳定, 熔池表面的起伏现象逐渐加剧。当扫描线间距为 $0.02\ \text{mm}$ 时, 连续激光多道搭接之间未重熔区域具有较低表面起伏值, 粗糙度可降低至 $R_a=0.45\ \mu\text{m}$ 。然而, 激光单向扫描抛光后表面产生的波纹起伏会阻止粗糙度的进一步降低, 采用正交扫描和未搭接区域回填扫描的策略, 可对激光单向扫描抛光产生的波纹起伏进行重熔正交补偿, 使粗糙度值由 $R_a=0.45\ \mu\text{m}$ 进一步降低至 $R_a=0.048\ \mu\text{m}$, 较原始粗糙度下降 95%。

关键词 激光技术; 连续激光抛光; 表面粗糙度; 表面形貌; 扫描策略

中图分类号 TG111.4; TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221081

1 引言

金属材料表面抛光一般是利用机械、化学及电化学等手段来达到降低材料表面粗糙度、提高零件尺寸形状精度和改善表面性能的目的^[1-3]。传统机械抛光是利用切削、变形等手段去除材料表面的起伏结构, 从而实现表面粗糙度的降低, 这种抛光方式的效率较低、工艺复杂、易出现应力变形^[4-5]; 化学抛光是利用化学溶液对材料表面的凸起结构进行溶解, 在化学抛光的过程中极易产生污染且抛光后的材料表面质量较差^[6-7]; 电化学抛光可获得优异的表面质量, 但存在耗能较高、对环境不友好等缺点^[8]。近年来, 激光抛光技术作为一种新型的表面处理技术发展迅速, 由于具有非接触、高精度、高效率和无污染等优点, 被广泛应用于航空航天、医疗器械、工业制造等领域^[9-11]。激光抛光是利用高强度激光束辐照材料表面, 材料表面吸收热量迅速升温, 熔化的材料在表面张力和重力的作用下由表面凸起部分(峰)流向下凹部分(谷), 实现表面粗糙度的降低^[12-14]。

激光抛光技术根据激光器类型的不同可以分为连续激光抛光与脉冲激光抛光。连续激光抛光是利用激光束对金属材料表面进行重熔, 熔化的材料在自身重力和表面张力的作用下填补金属表面凹陷处, 最终凝

固形成平整表面^[15], 其主要适用于宏观表面, 抛光对象的原始粗糙度通常为 $R_a=2\sim 16\ \mu\text{m}$ 。脉冲激光抛光是利用高频激光脉冲辐照金属材料表面, 材料表面温度迅速到达材料的熔化阈值或者气化阈值, 使得材料浅层表面发生熔化或者气化, 从而消除表面起伏, 达到抛光效果^[16-17], 其主要适用于微观表面, 抛光对象的原始粗糙度通常为 $R_a=0.2\sim 1.0\ \mu\text{m}$ ^[18]。抛光对象的粗糙度等级一般分为三个层次: 高粗糙度 ($R_a=2\sim 16\ \mu\text{m}$)、中等粗糙度 ($R_a=1\sim 2\ \mu\text{m}$)、低粗糙度 ($R_a< 1\ \mu\text{m}$)。目前, 针对低粗糙度表面, 国内外学者通常利用脉冲激光抛光来进一步降低粗糙度。Perry 等^[19]利用 Nd:YAG 脉冲激光器对微铣削获得的钛合金低粗糙度表面进行微抛光, 在合适的工艺参数下将线采样粗糙度 $R_a=0.206\ \mu\text{m}$ 降低为 $R_a=0.070\ \mu\text{m}$; Liu 等^[20]利用高频率脉冲激光器对 5A06 铝合金进行激光微抛光, 研究发现, 随着扫描速度的减小, 表面宏观形貌的平整度增大, 粗糙度降低至 $0.53\ \mu\text{m}$; 杨奇彪等^[21]研究了惰性气氛下纳秒脉冲激光抛光钛合金低粗糙表面 ($R_a=0.41\ \mu\text{m}$) 的机理与影响因素, 结果表明, 表面粗糙度随着激光平均功率、光斑重叠率和扫描次数的增大而先减小后增大, 随着脉冲宽度的增加而减小, 获得的最小表面粗糙度 $R_a=0.164\ \mu\text{m}$; Sassmannshausen 等^[22]利用超短脉冲激光束对 1.2738 工具钢表面进行激光抛光,

收稿日期: 2022-07-27; 修回日期: 2022-09-04; 录用日期: 2022-09-28; 网络首发日期: 2022-10-08

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52035014)、国家自然科学基金(U2130122)、浙江省公益技术应用研究项目(LGG20E050019)

通信作者: *laser@zjut.edu.cn

研究了超短脉冲激光抛光对其表面性能的影响,将面采样粗糙度 $S_a=0.6\ \mu\text{m}$ 降低到 $S_a=0.3\ \mu\text{m}$,抛光速率为 $12.15\ \text{cm}^2/\text{min}$ 。

目前,国内外学者主要利用连续激光对高粗糙度表面进行激光抛光研究。Lamikiz 等^[23]利用 CO_2 连续激光器对选择性激光烧结(SLS)的高粗糙度($R_a=7.5\ \mu\text{m}$)表面进行激光抛光,将粗糙度降到 $R_a=1.3\ \mu\text{m}$,降幅达到 84%。研究表明,连续激光抛光只影响表面粗糙度,不影响零件原始的形状误差和宏观的几何形状。Xu 等^[24]采用连续激光对激光沉积制造(LDM)的 TiAl 合金试样的高粗糙度($R_a=16.06\ \mu\text{m}$)表面进行初步抛光,抛光后表面粗糙度降低到 $R_a=1.76\ \mu\text{m}$,表面耐磨性和耐蚀性显著提升。Chen 等^[25]利用波长为 1070 nm 的光纤连续激光器对激光粉末床熔融(L-PBF)制造的 316L 不锈钢表面进行激光抛光研究,结果表明,激光抛光处理后初始表面粗糙度由 $R_a=4.84\ \mu\text{m}$ 降低到 $R_a=0.65\ \mu\text{m}$,平均晶粒直径减小,拉伸强度与延展性增加。El Hassanin 等^[26]利用 CO_2 连续激光器对激光粉末床熔融制造的 AlSi10Mg 合金高粗糙度表面进行激光抛光处理,研究了激光工艺参数对激光抛光效果的影响,将粗糙度 $S_a=21.5\ \mu\text{m}$ 降低到 $S_a=10.6\ \mu\text{m}$ 。

本文利用连续激光对低粗糙表面进行激光抛光研究,利用金相显微镜及激光共聚焦显微镜对抛光后的截面形貌及表面形貌进行观察,分析不同激光功率及

扫描速度对单道连续激光抛光截面形貌及三维形貌的影响规律,研究单道连续激光抛光机理。并在此基础上分析连续激光双道搭接时不同线间距下连续抛光表面三维形貌和轮廓的演变规律及连续激光扫描策略对抛光表面形貌的影响。最后研究了连续激光抛光对 316L 不锈钢组织、硬度及元素含量的影响。

2 实验准备及测试

连续激光抛光实验设备如图 1(a)所示。采用 1500 W 连续光纤激光器,其最大输出功率为 1500 W,激光波长为 1070 nm,焦距为 517 mm,激光通过 F-theta 场镜聚焦后的光斑直径达 $220\ \mu\text{m}$ 。为了防止连续激光抛光过程中工件抛光表面发生氧化,将工件放置在持续通入高纯氩气的气氛保护盒中,氩气流量为 15 L/min。工件待抛光区域放置在气氛保护箱透镜下方,激光透过气氛保护盒上方透镜照射在工件待抛光表面上。

实验材料为两种不同表面状态的 316L 不锈钢。一种为绒布抛光后的平整表面,粗糙度值为 $R_a=0.11\ \mu\text{m}$;另一种为经过脉冲激光预处理后的低粗糙度表面,低粗糙度表面的形貌如图 1(b)所示。在激光功率为 100 W、扫描速度为 1000 mm/s、脉宽为 400 ns、重复频率为 1000 kHz、光斑重叠率为 99% 的脉冲激光工艺参数下将原始粗糙度值为 $R_a=3.79\ \mu\text{m}$ 的线切割粗糙表面预处理至粗糙度值为 $R_a=0.95\ \mu\text{m}$ 的低粗糙度表面。

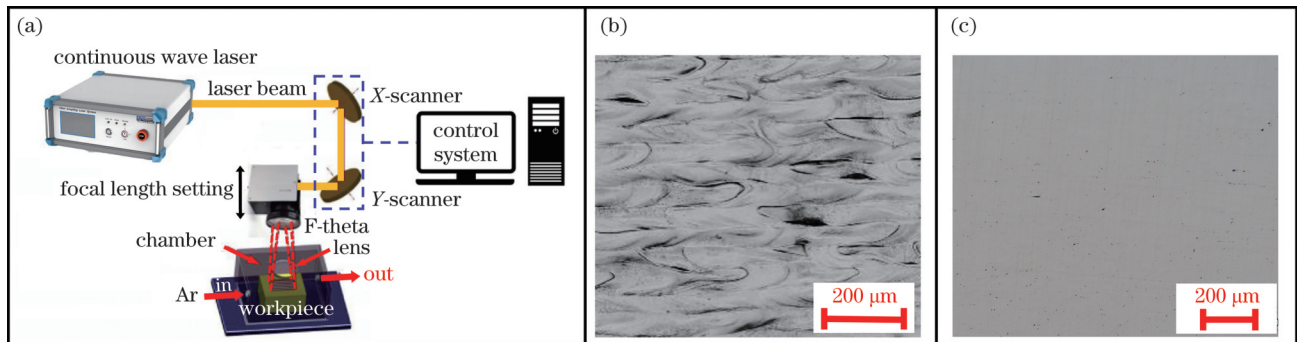


图 1 实验设备示意图及试样表面形貌。(a)实验设备示意图;(b)低粗糙度试样的表面形貌;(c)绒布抛光试样的表面形貌

Fig. 1 Schematic of experimental equipment and sample surface morphologies. (a) Schematic of experimental equipment; (b) surface topography of low-roughness sample; (c) surface morphology of flannelette polishing sample

采用光学显微镜分析连续激光抛光后的截面熔池形貌。采用超景深三维显微系统和激光共聚焦显微镜获得连续激光抛光前、后的表面微观三维形貌及轮廓曲线。

3 实验结果与分析

3.1 功率和扫描速度对单道抛光熔池表面形貌的影响

连续激光抛光区域的整体形貌由未搭接区域表面形貌决定。激光功率 P 和扫描速度 v 共同决定着连续激光单道抛光熔池的尺寸大小及表面形貌。通过前期

实验,初步确定激光功率范围为 200~700 W,扫描速度范围为 100~500 mm/s。由于粗糙表面凹凸不平,为了更好地观察单道抛光后熔池表面的微观起伏形貌,分析激光功率/扫描速度对单道抛光熔池尺寸及表面形貌的影响规律,将单道抛光实验对象表面选择为绒布抛光后的平整表面,设计 A、B 两组单因素实验,具体实验参数如表 1 所示。

图 2(a)为不同激光功率下的连续激光单道抛光熔池的截面图。根据熔池截面的表面形貌可以看出,随着激光功率的不断提高,单道抛光熔池的宽度与深度均逐渐增加。图 3(a)为不同激光功率下连续激光

表 1 单道抛光参数

Table 1 Single channel polishing parameters

No.	Number	Power / W	Scanning speed / (mm·s ⁻¹)	Energy density / (J·mm ⁻²)
A	1	250	300	3.79
	2	450	300	6.82
	3	650	300	9.85
B	4	400	100	18.18
	5	400	300	6.06
	6	400	500	3.64

单道抛光熔池的三维形貌图,当激光功率为 650 W 时,熔池表面形貌呈现为两边凹陷中间凸起,表面起伏明显。其原因是随着激光功率的提高,材料表面输入的能量也逐渐增大,高能量的输入增加了熔池内部

的流动速度,从而导致熔池表面起伏现象的产生^[27]。当激光功率为 250 W、扫描速度为 300 mm/s 时,单道抛光表面具有更浅的重熔深度,其表面形貌更为平整。

图 2(b)所示为不同扫描速度下的单道抛光熔池的截面图。当激光功率不变时,扫描速度的增加导致热量无法传导至材料内部深处,使得抛光熔池的宽度与深度逐渐降低。图 3(b)为不同扫描速度下的连续激光单道抛光熔池的三维形貌图,可以看出,随着扫描速度的增加,熔池表面的起伏高度逐渐减小,熔池两边的凹陷宽度亦逐渐减小。当扫描速度为 500 mm/s、激光功率为 400 W 时,连续激光单道抛光表面具有更浅的重熔深度,具有更佳表面形貌。

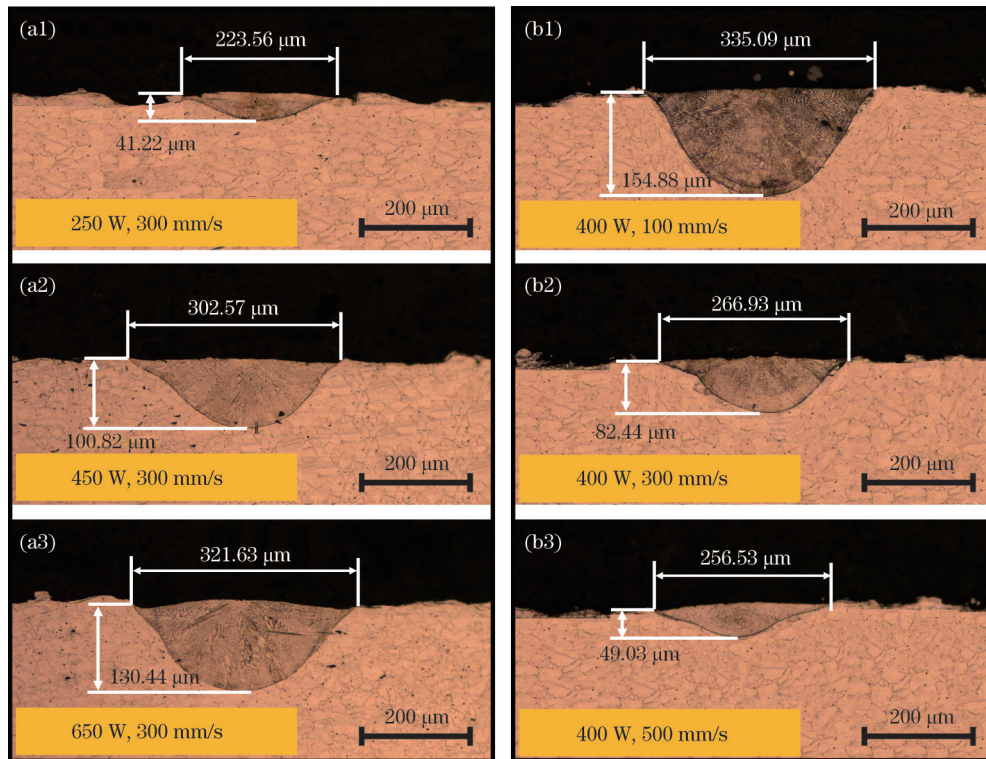


图 2 不同参数下的单道激光抛光熔池的截面图。(a1)~(a3)不同功率;(b1)~(b3)不同扫描速度

Fig. 2 Cross sections of single-channel laser polished pools under different parameters. (a1)–(a3) Different powers; (b1)–(b3) different scanning speeds

3.2 相同能量密度下单道抛光对表面形貌的影响

在连续激光抛光的过程中,激光功率与扫描速度的共同作用反映在能量密度(E_D)上,能量密度与激光功率、扫描速度的关系^[28]为

$$E_D = \frac{P}{D_1 \times v}, \quad (1)$$

式中: E_D 为能量密度(J/mm²); P 为激光功率(W); D_1 为光斑直径(mm); v 为扫描速度(mm/s)。通过研究激光功率和扫描速度对单道抛光熔池表面形貌的影响规律,确定获得最佳熔池大小和表面形貌的能量密度范围为 3.64~3.79 J/mm²。为了方便研究

激光功率和扫描速度的匹配关系,设定不同功率和扫描速度以固定能量密度为 3.79 J/mm²。通过前期实验发现,在能量密度为 3.79 J/mm²的条件下,当激光功率小于 250 W 时,由于激光功率较低,材料表面输入的能量较小,激光抛光后熔池表面形貌较差且熔池尺寸较小。故初步确定激光功率范围为 250~700 W,扫描速度范围为 300~800 mm/s。具体参数如表 2 所示。

当能量密度为 3.79 J/mm²时,不同功率和扫描速度组合下的单道抛光表面形貌如图 4 所示。可以发现,在相同的能量密度下,随着激光功率和扫描速

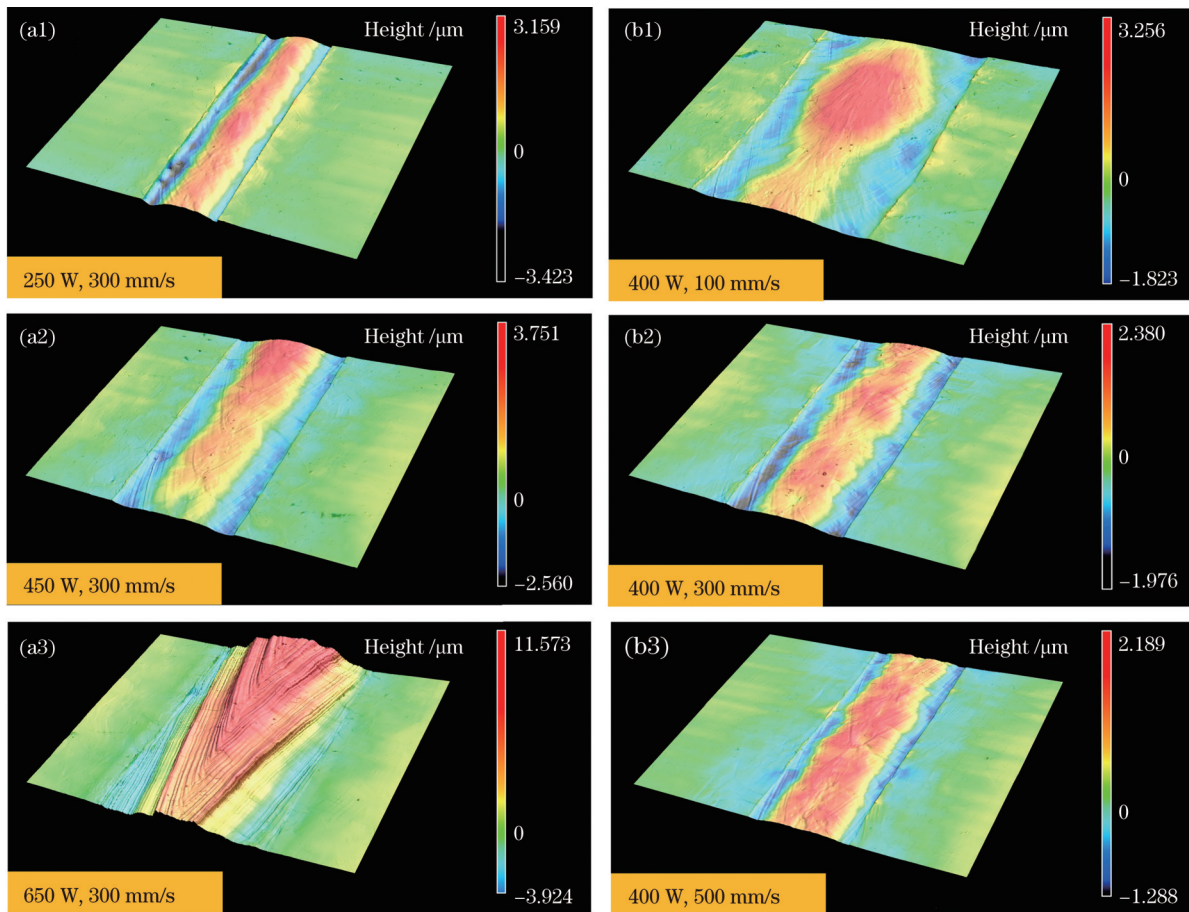


图3 不同参数下单道激光抛光熔池的三维形貌图。(a1)~(a3)不同功率;(b1)~(b3)不同扫描速度

Fig. 3 Three-dimensional morphologies of single-channel laser polished pools under different parameters. (a1)~(a3) Different powers; (b1)~(b3) different scanning speeds

表2 相同能量密度下单道激光抛光参数表

Table 2 Parameter table of single-channel laser polishing under same energy density

No.	Number	Power / W	Scanning speed / (mm·s ⁻¹)	Energy density / (J·mm ⁻²)
C	1	250	300	3.79
	2	375	450	3.79
	3	500	600	3.79
	4	625	750	3.79

度的提高,抛光表面的起伏逐渐加大,熔池边缘两侧的凹陷逐渐加深,而熔池中部区域逐渐凸起。图5为相同能量密度下单道抛光表面的轮廓线。 a 轮廓线取样位置如图4(a)所示,轮廓线深色区域为激光功率为250 W,扫描速度为300 mm/s时的激光单道抛光作用区域。通过 a 轮廓线可以看出,在该激光功率与扫描速度下,熔池两侧凹陷,中部略微凸起但轮廓较为平缓,表面起伏差值(Δy)为0.450 μm 。 b 轮廓线与 c 轮廓线的取样位置分别如图4(b)、(c)所示, b 、 c 两条轮廓线的熔池表面形貌皆呈现两侧凹陷,中间亦凹陷。与 a 轮廓线相比,由于激光束的中心部位

的激光能量最高,随着激光功率的进一步提升,熔池中部材料发生一定的气化现象,故熔池表面出现中间凹陷的现象。 d 轮廓线为激光功率为625 W、扫描速度为750 mm/s时的单道抛光表面轮廓线,对比其他三条轮廓线, d 轮廓线与 b 、 c 轮廓线相似,其熔池表面形貌均为两侧凹陷、中间亦凹陷, Δy 增加至10.436 μm 。

图6(a)为相同能量密度下单道抛光熔池的截面形貌,图6(b)为熔池表面轮廓的变化图。在相同能量密度下,随着激光功率与扫描速度的提升,单道抛光熔池的深度与宽度都有所增加,熔池表面的起伏逐渐明显,两侧凹陷逐渐加深。Nüsser等^[29]对两侧凹陷的现象进行分析,发现在熔池形成的过程中存在一个临界倾角,当熔池倾角小于临界倾角时,熔体在毛细力的作用下从边缘向熔池内部滑动,从而导致熔池两侧凹陷现象的产生。随着扫描速度的增加,能量无法传递到材料深处,导致熔池倾角较小,熔池两侧凹陷现象较为明显。通过对比图6所示的熔池表面形貌,可以发现,当激光功率为250 W、扫描速度为300 mm/s时,连续激光单道抛光后熔池表面起伏较小,表面形貌较为平整。

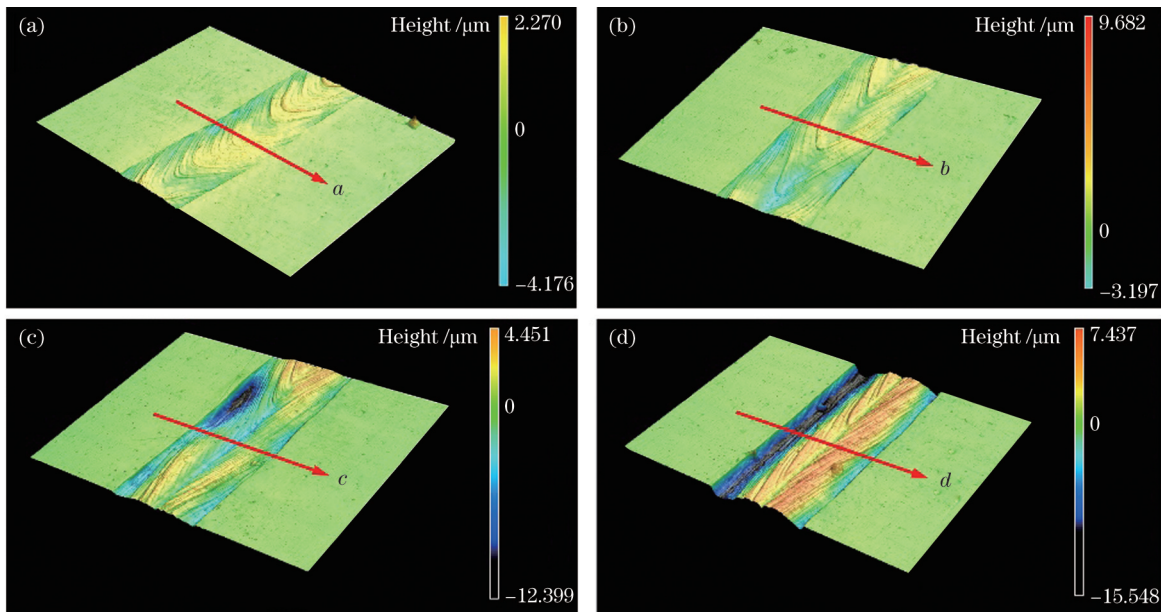


图 4 相同能量密度下单道抛光表面的三维形貌。(a)激光功率为 250 W,扫描速度为 300 mm/s;(b)激光功率为 375 W,扫描速度为 450 mm/s;(c)激光功率为 500 W,扫描速度为 600 mm/s;(d)激光功率为 625 W,扫描速度为 750 mm/s

Fig. 4 Three-dimensional morphologies of single-channel polished surfaces under same energy density. (a) Laser power of 250 W and scanning speed of 300 mm/s; (b) laser power of 375 W and scanning speed of 450 mm/s; (c) laser power of 500 W and scanning speed of 600 mm/s; (d) laser power of 625 W and scanning speed of 750 mm/s

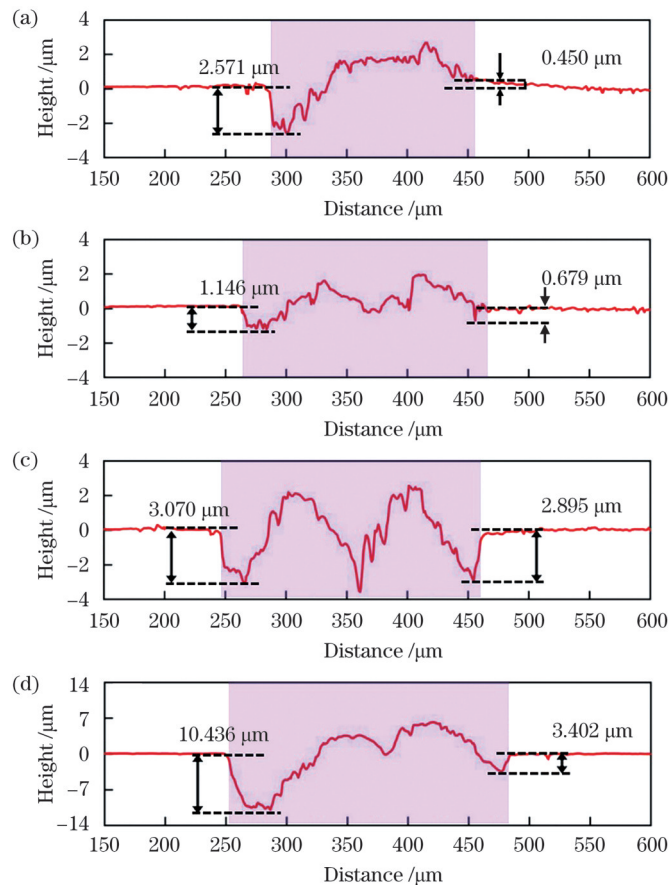


图 5 相同能量密度下单道抛光表面的轮廓线。(a)激光功率为 250 W,扫描速度为 300 mm/s;(b)激光功率为 375 W,扫描速度为 450 mm/s;(c)激光功率为 500 W,扫描速度为 600 mm/s;(d)激光功率为 625 W,扫描速度为 750 mm/s

Fig. 5 Profiles of single-channel polished surfaces under same energy density. (a) Laser power of 250 W and scanning speed of 300 mm/s; (b) laser power of 375 W and scanning speed of 450 mm/s; (c) laser power of 500 W and scanning speed of 600 mm/s; (d) laser power of 625 W and scanning speed of 750 mm/s

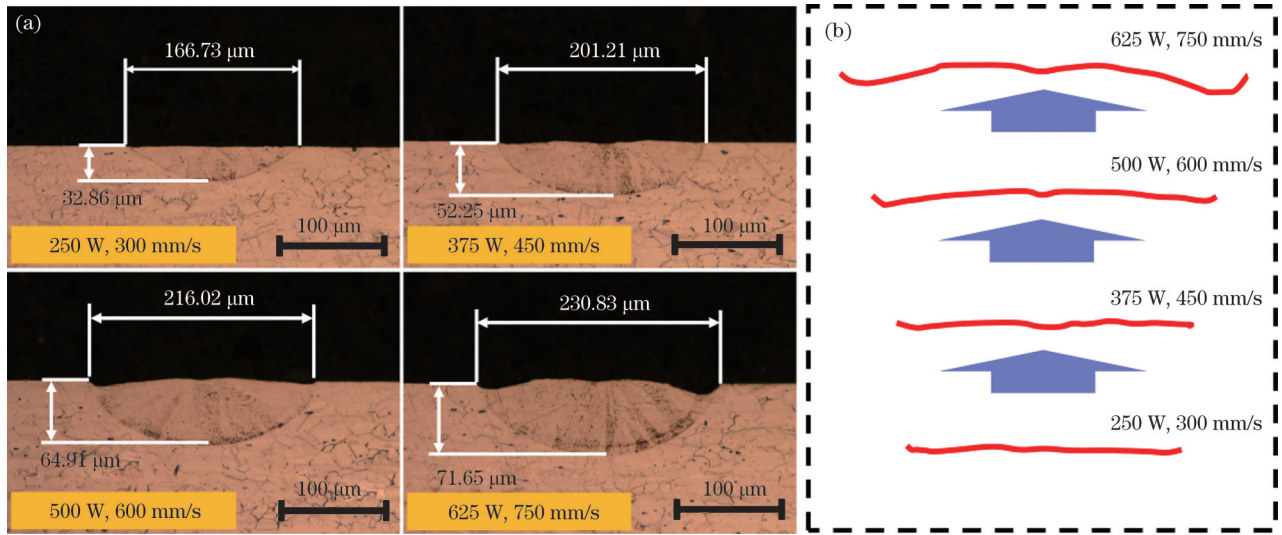


图 6 相同能量密度下的单道抛光熔池截面及其轮廓。(a)单道抛光熔池截面;(b)单道抛光熔池轮廓

Fig. 6 Cross sections and profiles of single-channel polished pools under same energy density. (a) Cross sections of single-channel polished pools; (b) profiles of single-channel polished pools

图 7 为连续激光单道抛光机理示意图。如图 7(a) 所示,连续激光辐照低粗糙表面,辐照区域表面吸收大量能量,产生图 7(b) 所示的熔池。如图 7(c) 所示,原始起

伏表面发生熔化,在自身重力及表面张力的共同作用下,熔化后的材料充分流动,使得原始起伏表面逐渐平缓,并且在熔池两边产生图 7(d) 所示的轻微咬边现象。

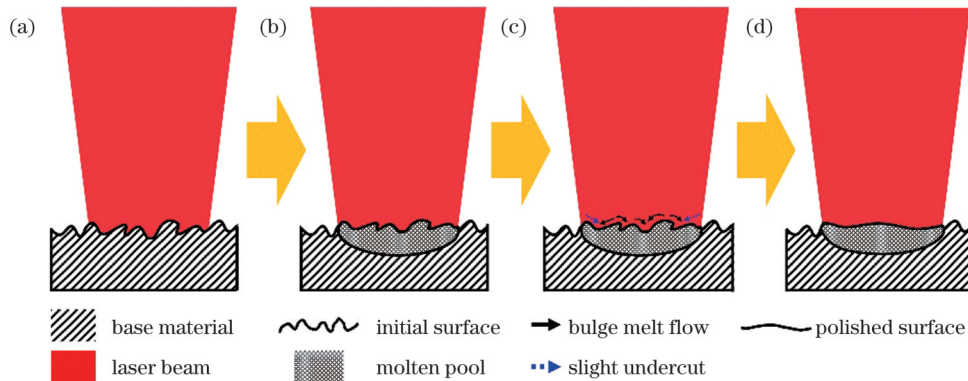


图 7 连续激光单道抛光机理示意图。(a)热输入;(b)形成熔池;(c)表面熔化流动;(d)凝固成型

Fig. 7 Schematics of continuous laser single-channel polishing mechanism. (a) Heat input; (b) formation of molten pool; (c) surface melting flow; (d) solidification molding

3.3 线间距对连续激光双道搭接抛光表面形貌的影响

整体区域的连续激光抛光表面是由多条单道抛光熔池表面通过搭接形成的。通过前面对连续激光单道抛光工艺的研究,确定了连续激光单道抛光的最佳工艺参数为激光功率 250 W、扫描速度 300 mm/s。在连续激光单道抛光最佳工艺参数基础上,研究了不同搭接率对双道激光抛光熔池表面形貌的影响。具体双道搭接抛光实验参数如表 3 所示。

不同填充线间距下双道搭接抛光表面的三维形貌及轮廓分别如图 8、9 所示。A'轮廓为图 8(a) 所示的线间距为 0.01 mm 时双道搭接抛光表面提取的轮廓线,可以看出,第二道激光抛光熔池表面形貌亦为两侧凹陷,中间突起。A'轮廓中的虚线框区域为激光双道搭接抛光未搭接区域,当线间距为 0.01 mm 时,

表 3 双道搭接抛光实验参数
Table 3 Experimental parameters of two-channel lap polishing

No.	Number	Power /W	Scanning speed / (mm·s ⁻¹)	Step size / mm
D	1	250	300	0.01
	2	250	300	0.02
	3	250	300	0.04
	4	250	300	0.06
	5	250	300	0.08

未搭接区域的横向跨度较小,未搭接区域的表面起伏差值 Δy 为 1.091 μm 。B'轮廓为图 8(b) 所示线间距为 0.02 mm 时双道搭接抛光表面提取的轮廓线,与 A'轮廓相比,当线间距增加到 0.02 mm 时,未搭接区域的表面起伏差值 Δy 变化不大,但激光抛光效率却增大。

C' 、 D' 、 E' 轮廓分别为图 8(c)、(d)、(e) 所示线间距为 0.04 mm、0.06 mm 与 0.08 mm 时双道搭接抛光表面的轮廓线, 通过与 A' 、 B' 轮廓对比发现, 随着线间距的增加, 未搭接区域的横向跨度亦增加, 进而在未搭接

处出现起伏形貌的概率增大, 未搭接区域的表面起伏差值 Δy 最大增加至 $3.201 \mu\text{m}$ 。故在较好的激光抛光效果的前提下, 当线间距为 0.02 mm 时, 激光抛光效率较高。

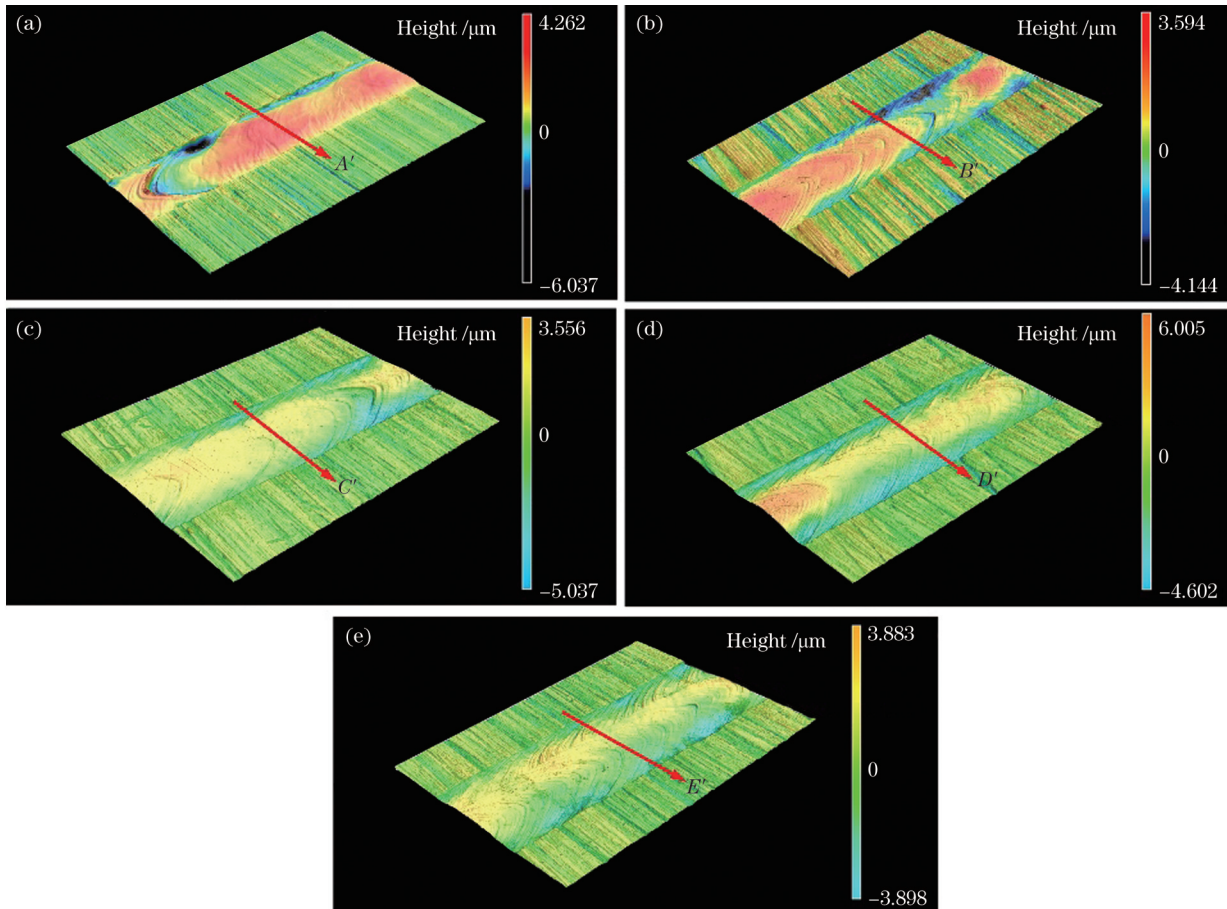


图 8 不同填充线间距下双道搭接抛光表面的三维形貌。(a) 0.01 mm; (b) 0.02 mm; (c) 0.04 mm; (d) 0.06 mm; (e) 0.08 mm

Fig. 8 Three-dimensional morphologies of two-channel lap polished surfaces under different filling line spacings. (a) 0.01 mm; (b) 0.02 mm; (c) 0.04 mm; (d) 0.06 mm; (e) 0.08 mm

图 10 为线间距对连续激光多道搭接抛光表面形貌的影响机理, 在连续激光多道搭接抛光的过程中, 后一道激光抛光熔池是在前一道激光抛光熔池的基础上重新熔凝形成的, 在经过多道搭接后, 激光抛光区域的整体形貌由未搭接区域表面形貌决定。因此, 最终抛光的表面形貌与未搭接区域的表面形貌相关。如图 10(a) 所示, 在合适的较低线间距下, 前一道大起伏形貌被后一道熔池覆盖, 未搭接区域具有较低的表面起伏, 最终使得整个抛光区域具有较低的表面粗糙度, 但随着线间距的进一步降低, 其激光抛光效率也降低。在较高线间距下, 如图 10(b) 所示, 由于线间距的增大, 未搭接区域的横向跨度增加, 在未搭接处出现起伏形貌的概率增大, 最终未搭接区域出现大起伏表面形貌, 进而产生具有较高表面粗糙度的抛光表面。

3.4 连续激光抛光扫描策略对表面形貌的影响

图 11(a)、(b) 所示为激光抛光一次后的表面形貌图及三维表面形貌图。如图 11(a) 所示, 连续激光一

次抛光后表面产生明显的重熔波纹, 该重熔波纹呈现一种被“斩断”的状态。这是由于后一道抛光熔池覆盖了前一道熔池表面的部分波纹, 未搭接区遗留的波纹呈现为被“斩断”的状态^[29]。图 11(b) 所示为一次激光抛光后的三维表面形貌图, 测量 A'' 、 B'' 、 C'' 三处划线部位的粗糙度。由于激光共聚焦设备视野的限制, 在抛光表面垂直方向上每隔 2 mm 取一个视野, 共取 5 个视野, 每个视野取三个划线部位的粗糙度求平均值。经测试, 表面粗糙度为 $R_a=0.450 \mu\text{m}$ 。

激光抛光一次后表面产生明显的重熔波纹, 导致表面粗糙度无法进一步降低, 研究者们通常采用多次扫描的方式来进一步消除表面波纹。多次扫描方式包含着同方向多次扫描和正交扫描策略。由于激光单道抛光后熔池表面不是理想的水平形貌, 故采用第二次正交扫描抛光的方式。第二次激光抛光的扫描方向与第一次激光抛光的扫描方向正交, 对激光抛光一次后产生的起伏进行正交补偿, 进一步消除表面波纹起伏。图 12(a)、(b) 所示为正交扫描下激光抛光两次后的表

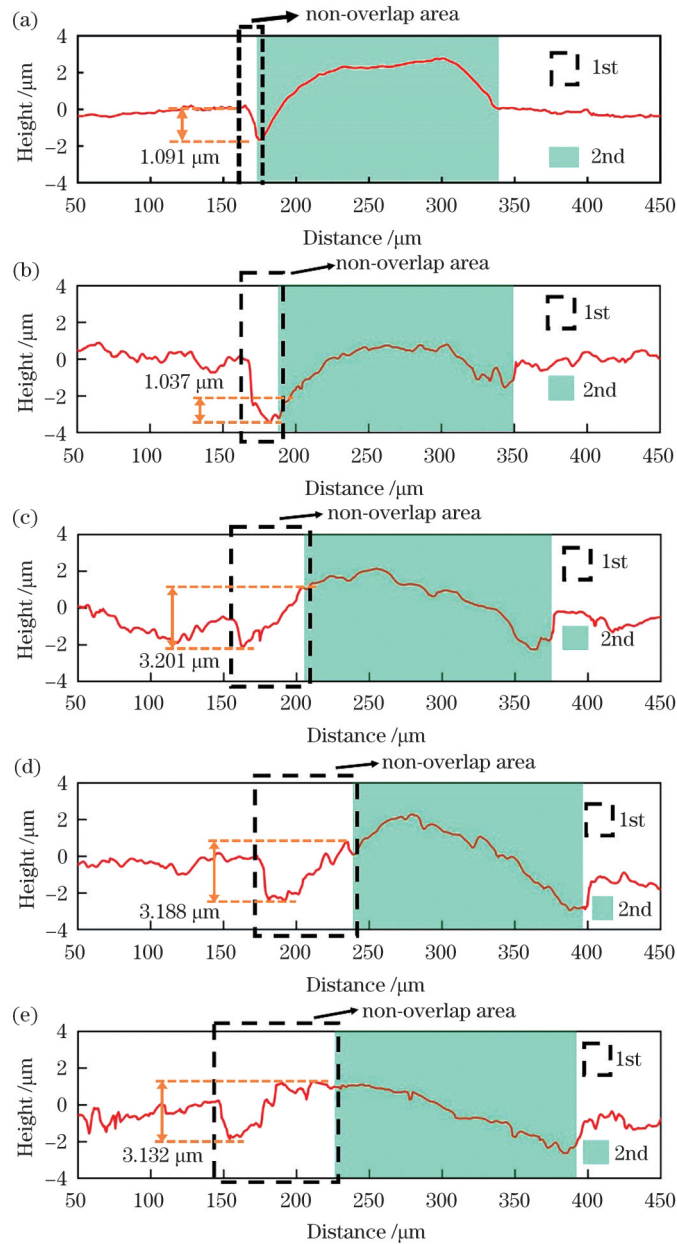


图 9 不同填充线间距下双道搭接抛光表面的轮廓线。(a) 0.01 mm; (b) 0.02 mm; (c) 0.04 mm; (d) 0.06 mm; (e) 0.08 mm
 Fig. 9 Profiles of two-channel lap polished surfaces under different filling line spacings. (a) 0.01 mm; (b) 0.02 mm; (c) 0.04 mm; (d) 0.06 mm; (e) 0.08 mm

面形貌图及三维表面形貌图。由图 12(a)可以看出, 原先激光抛光一次留下的重熔波纹经过正交扫描下的两次抛光后被大幅度消除, 表面不存在明显的重熔波纹, 表面形貌变得平整。图 12(b)是正交扫描下两次激光抛光后的三维表面形貌图, 相比激光抛光一次, 粗糙度进一步降低。

正交扫描下两次激光抛光后的表面依旧存在未搭接区域遗留的不平整形貌, 两次激光抛光依旧无法彻底消除未搭接区域残留的不平整形貌, 故采用未搭接区回填扫描的激光扫描策略来降低未搭接区域表面形貌的起伏程度。扫描策略示意图如图 13 所示。以线间距为 0.02 mm 为例, 同方向扫描的整个扫描区域平行移动 0.01 mm, 使激光束扫描发生在未搭接

区域。

图 14(a)、(b)所示为正交扫描+未搭接区回填扫描方式下四次激光抛光后的表面形貌图及三维表面形貌图。如图 14(a)所示, 先进行正交扫描下的激光抛光, 在此基础上再进行未搭接区的回填扫描, 未搭接区域残留的不平整形貌被进一步消除。图 14(b)所示为正交扫描+未搭接区回填扫描下四次激光抛光后的三维表面形貌, 表面粗糙度为 $R_a=0.048 \mu\text{m}$, 而正交扫描下激光抛光表面的粗糙度值 $R_a=0.211 \mu\text{m}$, 显然前者更小。

随着激光抛光扫描策略的优化, 抛光区域表面粗糙度值也发生变化, 如图 15 所示。通过正交+回填的激光抛光扫描策略, 将原始表面粗糙度 $R_a=0.95 \mu\text{m}$ 降低至 $R_a=0.048 \mu\text{m}$, 下降了 95%。

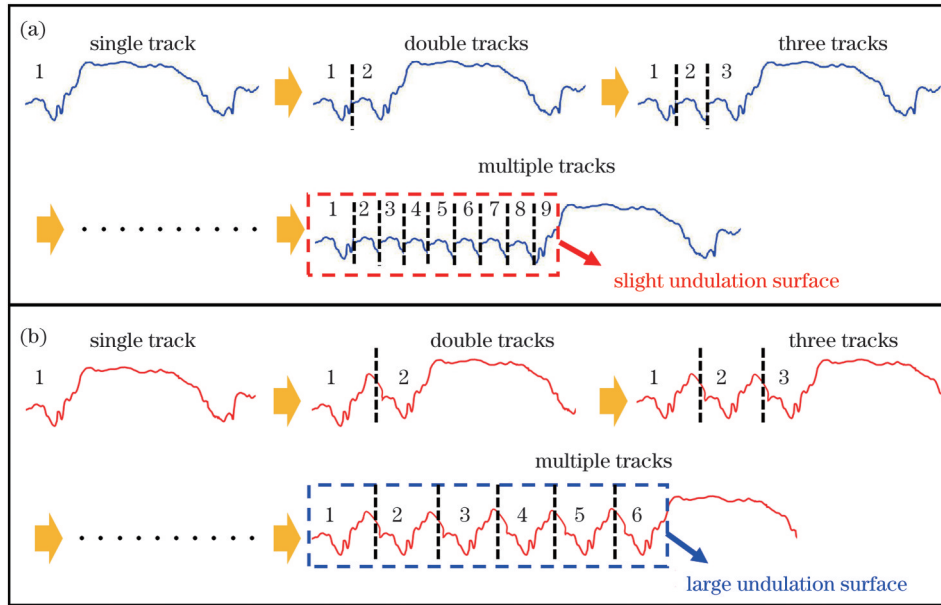


图 10 连续激光抛物线间距影响表面形貌的机理示意图。(a)低线间距;(b)高线间距

Fig. 10 Mechanism diagrams of continuous laser parabolic spacing affecting surface morphology. (a) Low line spacing; (b) high line spacing

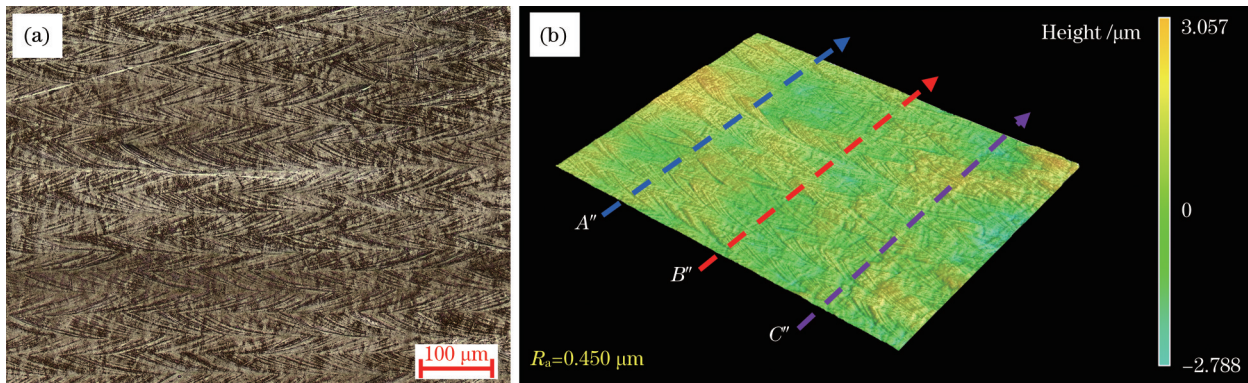


图 11 激光抛光一次后的表面形貌图及三维表面形貌图。(a)表面形貌;(b)三维表面形貌图

Fig. 11 Surface topography and 3D surface topography after one laser polishing. (a) Surface topography; (b) three-dimensional surface topography

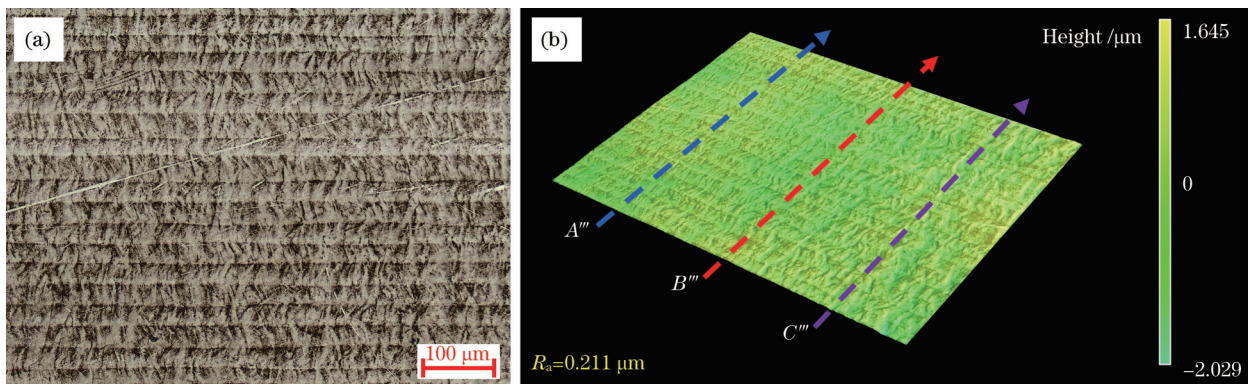


图 12 正交扫描下两次激光抛光后的表面形貌图及三维表面形貌图。(a)表面形貌;(b)三维表面形貌图

Fig. 12 Surface topography and 3D surface topography after two laser polishings under orthogonal scanning. (a) Surface topography; (b) three-dimensional surface topography

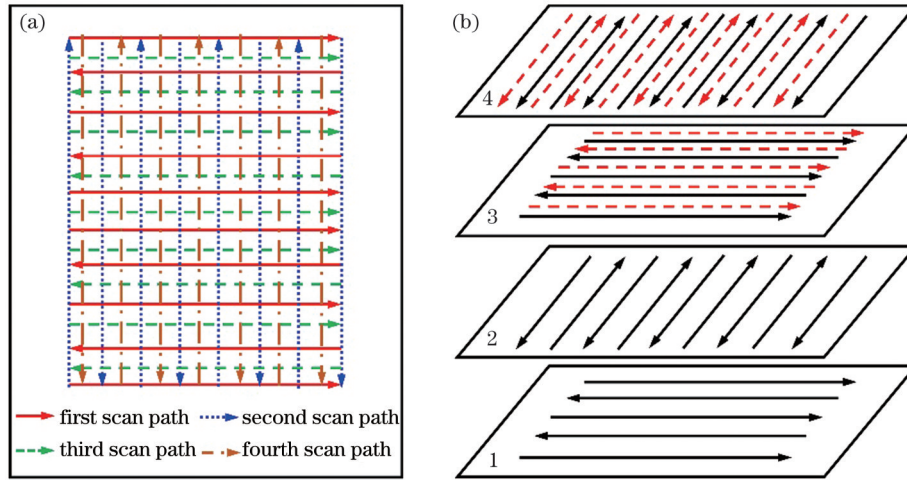


图 13 扫描策略示意图。(a)最终形成的区域;(b)扫描路径示意图
Fig. 13 Schematics of scanning strategy. (a) Final formed region; (b) schematic of scanning path

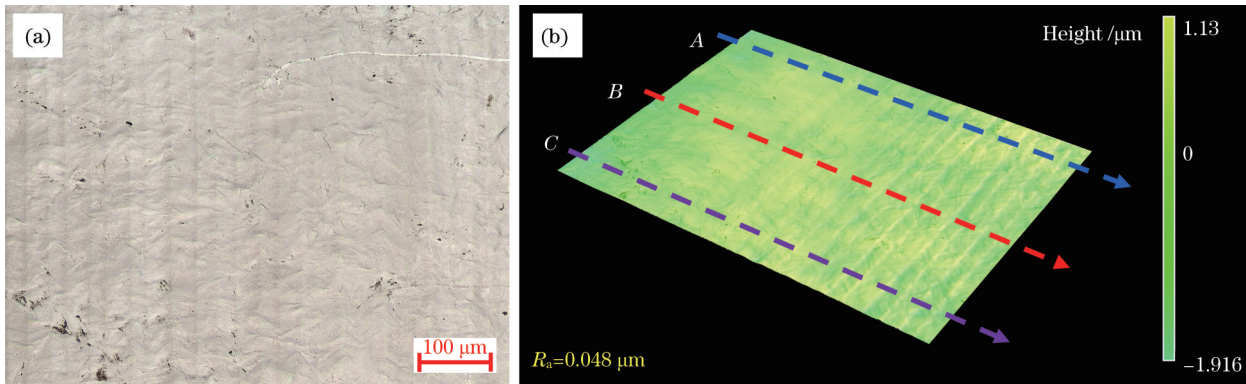


图 14 正交扫描+未搭接区域回填扫描方式下四次激光抛光后的表面形貌图及三维表面形貌图。(a)表面形貌;(b)三维表面形貌图
Fig. 14 Surface topography and 3D surface topography after four laser polishings under orthogonal scanning + unlappped area backfill scanning. (a) Surface topography; (b) three-dimensional surface topography

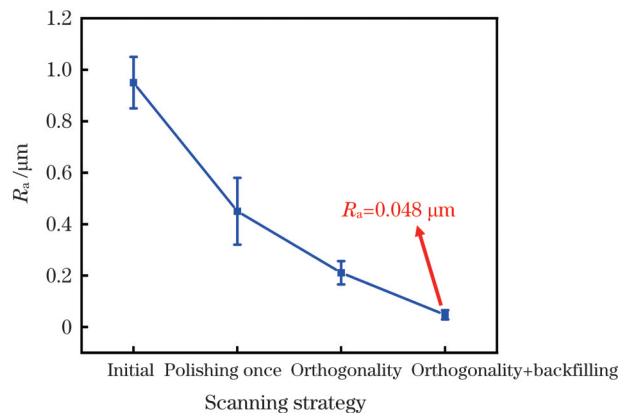


图 15 不同扫描策略下的表面粗糙度
Fig. 15 Surface roughnesses under different scanning strategies

3.5 激光抛光对表面性能的影响

图 16(a)所示为最佳工艺参数下激光抛光后的截面金相组织图。可以看出,由于 316L 不锈钢组织为稳定的奥氏体组织,故激光抛光后 316L 不锈钢的截面组织并未发生变化,激光抛光后的组织依旧为稳定的奥氏体组织。从重熔层到基体,以距离表面 0.02 mm 的

位置为初始点,间隔 0.05 mm 进行一次硬度测试,硬度取点如图 16(a)所示。

图 16(b)所示为激光抛光后截面的显微硬度测试结果。由结果可知,从重熔层到基体,硬度值逐渐升高,基体的显微硬度平均值为 297.4 HV,基体的显微硬度值处于加工硬化的 316L 奥氏体不锈钢的硬度范

围内,未加工硬化的 316L 奥氏体不锈钢的显微硬度值为 200 HV,其硬度值与重熔层的硬度值接近,故激光

抛光消除了 316L 奥氏体不锈钢的加工硬化现象,使硬度降低至 200 HV。

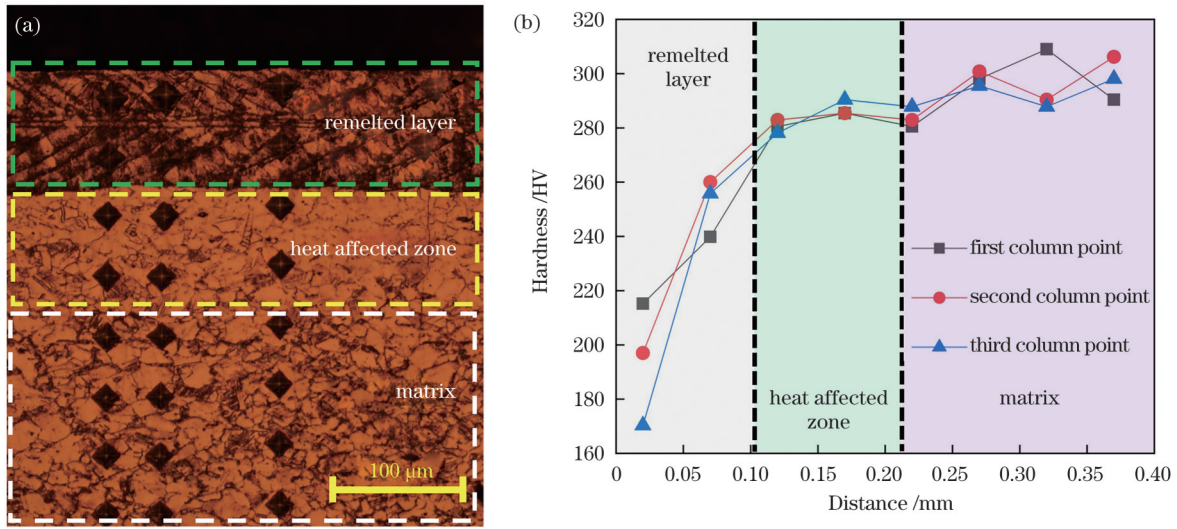


图 16 激光抛光后的截面及硬度。(a)截面金相组织图;(b)硬度分布

Fig. 16 Cross section and hardness after laser polishing. (a) Metallographic structure diagram of cross section; (b) hardness distribution

图 17 所示为激光抛光后截面的能谱仪(EDS)线扫描示意图。利用扫描电镜(SEM)对激光抛光后的 316L 不锈钢截面进行观察,从重熔层至基体进行 EDS

线扫描测试,分析激光抛光后表面元素 Fe、Ni、Mo、Cr、Mn 的含量变化。

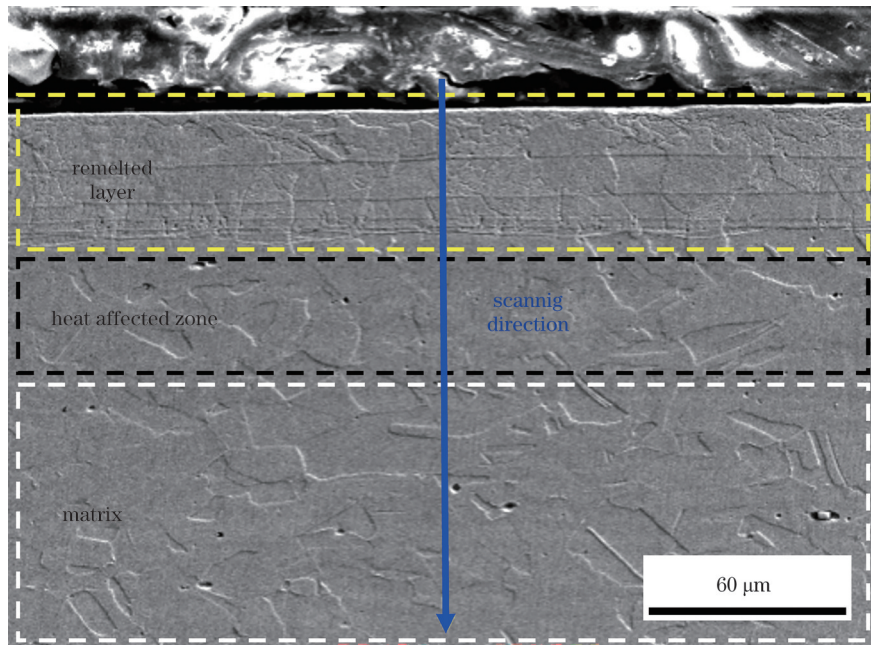


图 17 激光抛光截面的 EDS 线扫描示意图

Fig. 17 Schematic of EDS line scanning of laser polished section

图 18 所示为激光抛光后截面的元素分布结果。由结果可得,激光抛光后重熔层中关键元素 Fe、Ni、Mo、Cr、Mn 的含量与热影响区和基体中的关键元素含量相同,因此激光抛光不会对 316L 奥氏体不锈钢截面的关键元素产生明显影响。

通过对激光抛光区域截面碳元素含量进行分析发现,激光抛光亦不会对 316L 不锈钢表面碳元素含量产生影响。原因是 316L 奥氏体不锈钢中的碳元素含量较低,且实验在气氛保护装置中进行,激光抛光 316L 不锈钢不会产生脱碳现象。

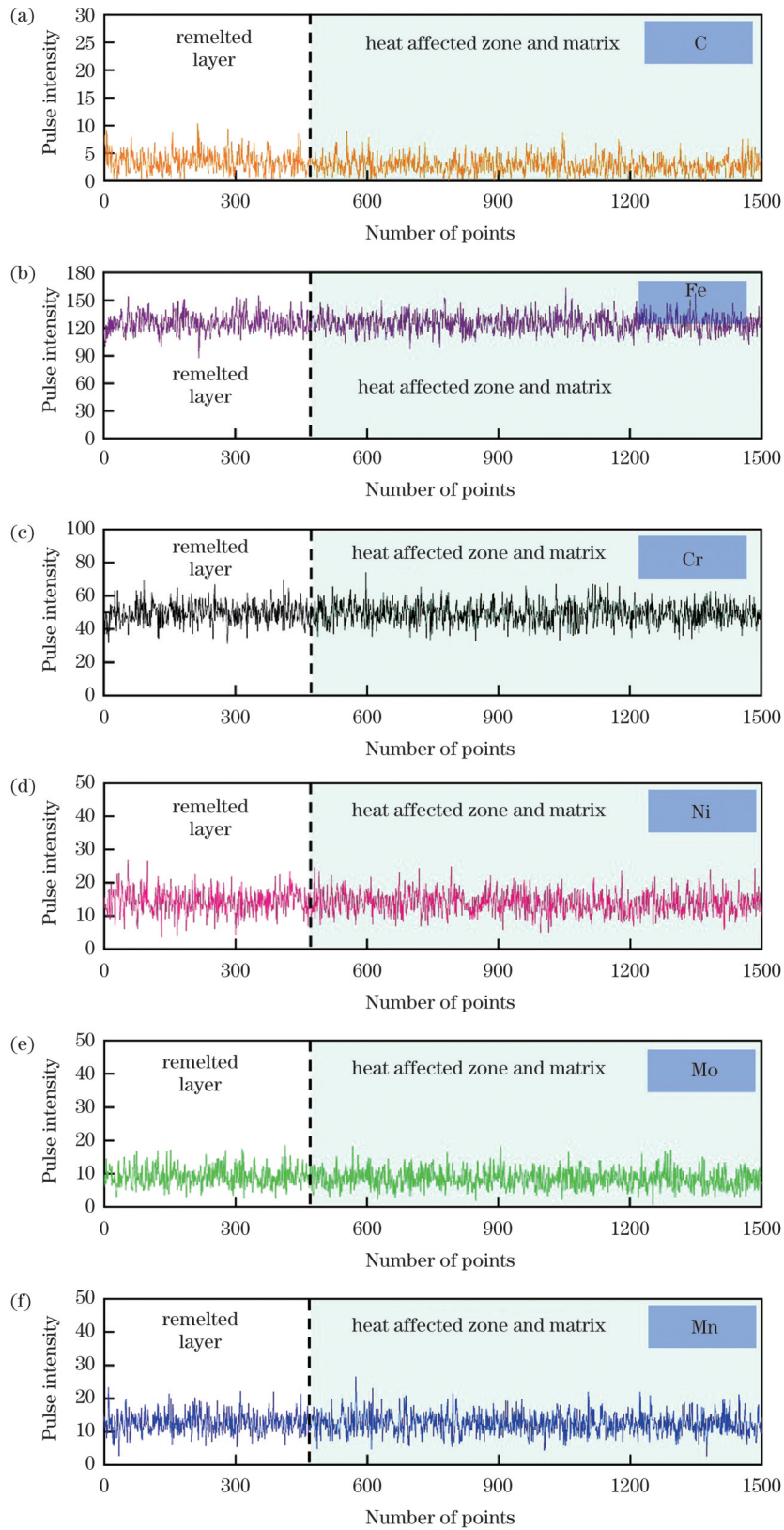


图 18 激光抛光截面的元素分布

Fig. 18 Element distribution of Laser polished section

4 结 论

采用连续激光对低粗糙度表面进行高质精抛光,分析了激光功率与扫描速度对激光单道抛光表面形貌

和熔池尺寸的影响规律,研究了不同线间距下双道搭接抛光表面形貌和划线轮廓的演变规律及激光抛光对不锈钢表面性能的影响,进一步优化了连续激光抛光扫描策略,得出以下结论。

随着激光功率的提升,高能量的输入导致熔池不稳定,表面易产生起伏现象。随着扫描速度的提高,单道抛光熔池两侧的凹陷逐渐加深。当激光功率为 250 W、扫描速度为 300 mm/s 时,单道抛光熔池具有最佳的表面形貌。

线间距对连续激光抛光区域的整体形貌有显著影响,随着填充线间距的增大,激光双道搭接抛光表面上未搭接区的横向跨度加大,这使得在未搭接处出现起伏形貌的概率加大,当线间距为 0.02 mm 时,连续激光抛光区域的整体起伏较小,具有较佳的平整形貌。

在激光功率为 250 W、扫描速度为 300 mm/s、填充线间距为 0.02 mm 的最佳连续激光抛光参数的基础上,通过优化扫描策略,采用正交扫描+未搭接区域回填扫描的方式,进一步消除了激光单向扫描抛光产生的单向波纹起伏和未重熔搭接区域遗留的波纹起伏,最终粗糙度值 $R_a=0.950\ \mu\text{m}$ 降低到最低值 $R_a=0.048\ \mu\text{m}$ 。

激光抛光能消除 316L 不锈钢的加工硬化现象,使基体恢复至初始硬度值 200 HV。在气氛保护装置中,激光抛光对 316L 不锈钢表面关键元素 Fe、Ni、Mo、Cr、Mn 的含量无明显影响。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 陈博文, 孙树峰, 王茜, 等. 材料表面激光抛光技术研究进展[J]. *中国表面工程*, 2021, 34(6): 74-89.
Chen B W, Sun S F, Wang X, et al. Research progress of laser polishing technology for material surface[J]. *China Surface Engineering*, 2021, 34(6): 74-89.
- [3] 李卫权. 镜面抛光技术的进展[J]. *电镀与精饰*, 2013, 35(12): 18-22.
Li W Q. The progress of mirror polishing technology[J]. *Plating & Finishing*, 2013, 35(12): 18-22.
- [4] An L C, Wang D Y, Zhu D. Combined electrochemical and mechanical polishing of interior channels in parts made by additive manufacturing[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 51: 102638.
- [5] 赵兴科, 王中, 郑玉峰, 等. 抛光技术的现状[J]. *表面技术*, 2000, 29(2): 6-7.
Zhao X K, Wang Z, Zheng Y F, et al. Present situation of polishing technology[J]. *Surface Technology*, 2000, 29(2): 6-7.
- [6] Latifi A, Imani M, Khorasani M T, et al. Electrochemical and chemical methods for improving surface characteristics of 316L stainless steel for biomedical applications[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2013, 221: 1-12.
- [7] 翁慧燕, 李振华. 抛光的几种工艺对比[J]. *机械工程师*, 2010(6): 28-29.
Weng H Y, Li Z H. Several techniques comparison of polishing[J]. *Mechanical Engineer*, 2010(6): 28-29.
- [8] Tang L, Fan Z J, Zhao G G, et al. High aspect ratio deep spiral tube electrochemical machining technology[J]. *Procedia CIRP*, 2016, 42: 407-411.
- [9] Deng T T, Li J J, Zheng Z Z. Fundamental aspects and recent developments in metal surface polishing with energy beam irradiation[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2020, 148: 103472.
- [10] Li T, Guo Y, Mizutani M, et al. Surface smoothing of bulk metallic glasses by femtosecond laser double-pulse irradiation[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 408: 126803.
- [11] 徐一帆, 邵景珍, 林颖, 等. 硬脆材料的激光表面抛光研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(13): 1300003.
Xu Y F, Shao J Z, Lin Y, et al. Research progress in laser surface polishing of hard and brittle materials[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(13): 1300003.
- [12] Temmler A, Küpper M, Walochnik M A, et al. Surface structuring by laser remelting of metals[J]. *Journal of Laser Applications*, 2017, 29(1): 012015.
- [13] Xu J L, Zou P, Kang D, et al. Research on the formation mechanism of the surface structure in transition regime of laser polishing 304 stainless steel[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 149: 107906.
- [14] 黄旭东, 王涛, 胡少武, 等. 基于正交试验和响应面法的激光抛光参数优化[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(11): 1114004.
Huang X D, Wang T, Hu S W, et al. Parameter optimization of laser polishing based on orthogonal experiment and response surface method[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(11): 1114004.
- [15] Bordatchev E V, Hafiz A M K, Tutunea-Fatan O R. Performance of laser polishing in finishing of metallic surfaces[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 73(1): 35-52.
- [16] 孙志强. 模具表面短脉冲激光抛光理论及仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020: 3-6.
Sun Z Q. Research on theory and simulation of short-pulse laser polishing on mold surface[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020: 3-6.
- [17] 姚建华, 黄锦榜, 王光浩, 等. 线切割高粗糙度表面的脉冲激光抛光机制研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(14): 1402003.
Yao J H, Huang J B, Wang G H, et al. Pulsed laser polishing mechanism on high roughness surface cut by wire electrical discharge machining[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(14): 1402003.
- [18] Krishnan A, Fang F Z. Review on mechanism and process of surface polishing using lasers[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2019, 14(3): 299-319.
- [19] Perry T L, Werschmoeller D, Li X C, et al. Pulsed laser polishing of micro-milled Ti6Al4V samples[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2009, 11(2): 74-81.
- [20] Liu B W, Mi G Y, Wang C M. Study on the morphology and microstructure of 5A06 alloy by high-pulse-frequency pulsed laser micro polishing[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2020, 255: 123500.
- [21] 杨奇彪, 袁文兵, 汪于涛, 等. 氩气氛围下 Ti6Al4V 纳秒激光抛光机理及显微硬度研究[J]. *应用激光*, 2021, 41(5): 997-1003.
Yang Q B, Yuan W B, Wang Y T, et al. Study on the mechanism and microhardness of Ti6Al4V nanosecond laser polishing in argon atmosphere[J]. *Applied Laser*, 2021, 41(5): 997-1003.
- [22] Sassmannshausen A, Brenner A, Finger J. Ultrashort pulse laser polishing by continuous surface melting[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 293: 117058.
- [23] Lamikiz A, Sánchez J A, López de Lacalle L N, et al. Laser polishing of parts built up by selective laser sintering[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47(12/13): 2040-2050.
- [24] Xu Z F, Ouyang W T, Liu Y F, et al. Effects of laser polishing on surface morphology and mechanical properties of additive manufactured TiAl components[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 65: 51-59.
- [25] Chen L, Richter B, Zhang X Z, et al. Effect of laser polishing on the microstructure and mechanical properties of stainless steel 316L fabricated by laser powder bed fusion[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 802: 140579.
- [26] El Hassanin A, Obeidi M A, Scherillo F, et al. CO₂ laser polishing of laser-powder bed fusion produced AlSi10Mg parts[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 419: 127291.
- [27] Chen C, Tsai H L. Fundamental study of the bulge structure

- generated in laser polishing process[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 107: 54-61.
- [28] Richter B, Blanke N, Werner C, et al. Effect of initial surface features on laser polishing of Co-Cr-Mo alloy made by powder-bed fusion[J]. JOM, 2019, 71(3): 912-919.
- [29] Nüsser C, Kumstel J, Kiedrowski T, et al. Process- and material-induced surface structures during laser polishing[J]. Advanced Engineering Materials, 2015, 17(3): 268-277.

Morphology Evolution Mechanism of Low-Roughness Surface Polished by Continuous Laser

Wang Liang^{1,2,3}, Jiang Ke^{1,2,3}, Fan Siyuan^{1,2,3}, Huang Jinbang^{1,2,3}, Ge Honghao^{1,2,3},
Wu Guolong^{1,2,3}, Dong Gang^{1,2,3}, Yao Jianhua^{1,2,3*}

¹*Institute of Laser Advanced Manufacturing, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China;*

²*College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China;*

³*Collaborative Innovation Center of High-End Laser Manufacturing Equipment Co-Sponsored by Ministry and Province, Hangzhou 310023, Zhejiang, China*

Abstract

Objective Laser polishing, as a new type of surface treatment technology, offers the advantages of non-contact, high precision, high efficiency, and minimal pollution. Continuous laser polishing is usually referred to as laser macro polishing. The object to be polished possesses a high-roughness surface with undulations in the range of 10–80 μm . In contrast, a pulse laser is normally used for polishing low-roughness surfaces. However, the surface morphology and formation mechanism of the molten pool after continuous laser polishing of low-roughness surfaces have not been studied in detail. In this paper, samples with a low-roughness surface are polished by a continuous laser. The surface morphology of the molten pool after continuous laser polishing, as well as the mechanisms of single-pass and multi-pass overlapping polishing, are studied, which provide an optimized laser scanning strategy for continuous laser polishing technology.

Methods Low-roughness austenitic stainless steel samples with an original surface roughness of $R_a=0.95 \mu\text{m}$ are used in this study. First, a metallographic microscope and a laser confocal microscope are used to analyze the size of the molten pool and the three-dimensional morphology of the molten pool surface after continuous laser polishing using different laser process parameters to identify the optimal continuous laser single-pass polishing process parameters. Second, on the basis of single-pass polishing, the effects of line spacing and multi-pass overlapping polishing on the surface morphology are studied, and an optimized continuous laser polishing scanning strategy is determined. Finally, the hardness and element content of the cross section after continuous laser polishing are analyzed to determine the influence of continuous laser polishing on the surface properties.

Results and Discussions In this paper, continuous laser polishing of a low-roughness surface is studied (Fig. 1). Under the same laser energy density, with increasing laser power and scanning speed, the surface fluctuations of the molten pool gradually increase, and the surface fluctuation difference increases from 0.450 μm to 10.436 μm . The morphology of the molten pool exhibits a middle bulge on both sides of the depression (Fig. 6). As the line spacing increases from 0.01 mm to 0.08 mm, the probability of fluctuations in the non-overlapped area increases, and the surface fluctuation difference increases from 1.037 μm to 3.201 μm (Fig. 9). The method of “orthogonal scanning + non-overlapped area backfill scanning” is therefore proposed. First, the orthogonal scanning method is used to compensate for the fluctuations caused by the first laser polishing. Then, after the orthogonal scanning laser polishing, non-overlapped area backfill scanning is carried out. Using this method, the roughness can be reduced to $R_a=0.048 \mu\text{m}$ (Figs. 11, 12, and 14). In addition, laser polishing can improve the work hardening of 316L stainless steel (Fig. 16) and restore the hardness value to 200 HV. There is no obvious influence on the surface element content after laser polishing (Fig. 18).

Conclusions In this paper, a continuous laser is used to further polish low-roughness surfaces with high quality and precision. The influence of laser power and scanning speed on the surface morphology and size of single-pass laser polished molten pool is analyzed. The influence mechanism of the surface morphology and profile using double-pass lap polishing under different line spacings is analyzed. The scanning strategy using continuous laser polishing is then further optimized, and the influence of laser polishing on the surface properties of stainless steel is studied. The results demonstrate that with increasing laser power and scanning speed, the surface is prone to undulations, and the depth of the depressions on both sides of the single-pass laser polished surface is increased. The overall surface topography caused by continuous laser polishing is significantly influenced by the line spacing. When the line spacing is 0.02 mm, surface undulations after laser polishing are minimal. By optimizing the scanning strategy, the surface roughness is reduced to $R_a=0.048 \mu\text{m}$ by orthogonal scanning and non-overlapped area backfilling scanning. This polishing strategy restores the surface hardness to 200 HV with no significant change in surface element content.

Key words laser technique; continuous laser polishing; surface roughness; surface morphology; scanning strategy