

## 激光与光电子学进展

## 激光抛光 DC53 淬硬钢试验研究

尹杰<sup>1,2</sup>, 周后明<sup>1\*</sup>, 赵振宇<sup>2\*\*</sup>, 周浩<sup>1,2</sup>, 李凯<sup>1,2</sup>, 王超<sup>1,2</sup><sup>1</sup>湘潭大学机械工程学院, 湖南 湘潭 411105;<sup>2</sup>深圳信息技术学院智能制造与装备学院, 广东 深圳 518172

**摘要** 激光抛光是一种非接触式绿色自动化抛光技术,可以替代传统的抛光技术。为了研究激光抛光对 DC53 淬硬钢表面质量问题,采用波长为 1064 nm 的连续激光对 DC53 淬硬钢表面进行抛光处理,研究了激光抛光后材料的表面粗糙度、硬度、杨氏模量、耐腐蚀性能以及加工表面亚表层微观组织的变化。结果表明:在激光功率为 180 W、扫描速度为 20 mm/s、扫描间距为 0.06 mm 时平均粗糙度从 4.829  $\mu\text{m}$  降低到 0.505  $\mu\text{m}$ ,粗糙度降低约 90%,同时抛光后材料的表面硬度及耐腐蚀性能相较于初始样品均有所下降,熔融区硬度下降约 40%,自腐蚀电位下降约 4%。

**关键词** 激光技术; 激光抛光; 表面形貌; 功率谱密度分析; 淬硬钢; 显微组织

中图分类号 TN2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212714

## Experimental Research on Laser Polishing of DC53 Hardened Steel

Yin Jie<sup>1,2</sup>, Zhou Houming<sup>1\*</sup>, Zhao Zhenyu<sup>2\*\*</sup>, Zhou Hao<sup>1,2</sup>, Li Kai<sup>1,2</sup>, Wang Chao<sup>1,2</sup><sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China;<sup>2</sup>School of Intelligent Manufacturing and Equipment, Shenzhen Institute of Information Technology, Shenzhen 518172, Guangdong, China

**Abstract** Laser polishing, as a noncontact green processing technology, can replace the traditional polishing technology. In this paper, the surface of DC53 hardened steel is continuously polished by a laser with a 1064 nm wavelength to investigate the effect of laser polishing on the surface quality of DC53 hardened steel. Additionally, the surface roughness, hardness, Young's modulus, corrosion resistance of the material, and the changes in the subsurface microstructure of the processed surface after laser polishing are thoroughly investigated. The experimental results show that the average roughness is reduced from 4.829  $\mu\text{m}$  to 0.505  $\mu\text{m}$  at a rate as high as 90% when the laser power is 180 W, the laser scan speed is 20 mm/s, and the laser scan interval is 0.06 mm. Simultaneously, the surface hardness and corrosion resistance of the material after laser polishing are reduced compared with the initial sample, the hardness of the molten zone is reduced by 40%, and the self-corrosion potential is reduced by 4%.

**Key words** laser technique; laser polishing; surface morphology; power spectral density analysis; hardened steel; microstructure

## 1 引言

模具表面精加工是模具制造过程中的一道重要工序,但一直未能得到很好的解决,特别是对硬度较高的淬硬钢表面的精加工。模具的精抛光仍然需要手动抛光去完成,占整个模具总制造时间的 20% 以上<sup>[1]</sup>。激

光抛光是一种非接触式表面处理技术<sup>[2]</sup>,相对于铣削、磨削<sup>[3]</sup>、电化学抛光<sup>[4]</sup>等传统减材加工技术,激光抛光具有非接触、无环境污染、可选择区域等优点。其原理是激光能量作用在材料表面,使材料表面的温度迅速升高,当温度达到材料的熔点时,材料表层物质开始熔化。熔化后,熔融材料在重力的影响下由曲率高的地

收稿日期: 2021-10-12; 修回日期: 2021-11-26; 录用日期: 2021-12-13; 网络首发日期: 2021-12-25

基金项目: 湖南省自然科学基金(2020JJ4585)、国家自然科学基金(51775469, 51775470)、深圳市科技计划项目(JCYJ20170817112440533)、广东省高等职业院校珠江学者岗位计划资助项目 2018、广东省高校创新团队项目(2018GKCXTD001)、深圳信息职业技术学院科技创新平台项目(PT2020E002)、深圳信息职业技术学院校企合作项目(SZIIT2021KJ027, SZIIT2021KJ016)

通信作者: \*zhouhouming@xtu.edu.cn; \*\*zhaozy@sziiit.edu.cn

方向曲率低的地方流动,从而实现材料的再次分配并获得光滑表面。

随着近几年激光技术的飞速发展<sup>[5]</sup>,激光加工设备成本大幅降低。激光抛光技术是基于高能量激光束下材料表面薄层的微熔和固化。Ramos-Grez等<sup>[6]</sup>认为在激光抛光作用下的表面改性有两种状态:表面浅熔融(SSM)和表面过熔融(SOM)。未经处理的材料表面由许多大小不一的峰和谷组成,SSM是由于激光束作用在材料表面时间较短,在峰腰及其以上位置形成熔融区域,熔融区材料在自身的重力和表面张力以及其他形式力的影响下,由上至下填满谷底从而获得更低的表面粗糙度。而SOM是由于激光束作用在材料表面时间较长或能量密度过大,材料表面完全熔化,作用在熔池表面的力持续时间大于熔池本身的凝固时间,以至于熔融材料还未停止振荡就已经凝固,重新生成了不平整表面。Bhaduri等<sup>[7]</sup>研究了能量密度对三维(3D)打印316L不锈钢表面特征的影响,结果发现:当能量密度为18~20 J/cm<sup>2</sup>时,表面烧蚀严重,产生了表面过熔融现象;当能量密度低于13 J/cm<sup>2</sup>时,材料表面产生了闪亮的金属光泽,相比于高能量密度,此时的表面抛光效果更好。还研究了脉冲激光在X和Y方向的重叠率对表面粗糙度的影响,试验结果表明,无论是X方向还是Y方向,在重叠率82%~95%范围内,随着重叠率的增大表面粗糙度逐渐降低。黄加福等<sup>[8]</sup>研究了影响激光抛光效果各类因素,结果表明,激光能量密度与激光辐照时间对抛光效果影响最大。Mai等<sup>[9]</sup>通过改变焦距来改变光束照射到工件表面的光斑直径以及功率密度,试验结果表明,合理地改变离焦量可以获得更光滑的表面形貌。Chow等<sup>[10]</sup>对初始表面粗糙度分别为700 nm、300 nm、250 nm的AISI H13试样进

行了试验,结果表明,离焦量的范围在1.3~1.8 mm时,700 nm的初始表面粗糙度工件获得的抛光效果最佳,而对于初始表面粗糙度为250 nm的工件没有产生明显的改善。不同的初始表面需要不同的激光参数进行抛光,将抛光高表面粗糙度的激光参数应用到低表面粗糙度工件上则效果不佳,甚至可能产生反效果。廖聪豪等<sup>[11]</sup>研究了激光抛光对增材制造TC4钛合金表面耐蚀性的影响,结果表明,抛光后钛合金表面粗糙度的降低会导致自腐蚀电位升高。激光抛光既能抛光非金属材料,例如玻璃<sup>[12]</sup>、陶瓷<sup>[13]</sup>、光学材料KDP晶体<sup>[14]</sup>等,又能抛光金属材料。国内外研究学者对模具钢<sup>[15-17]</sup>、不锈钢<sup>[18-19]</sup>、工具钢<sup>[20-22]</sup>、钛合金<sup>[23-25]</sup>等金属材料进行了大量抛光试验,取得了良好的抛光效果。但是很少有关于激光抛光淬硬钢的研究。

本文采用波长为1064 nm的连续激光对DC53淬硬钢表面进行抛光研究。通过控制变量法研究了激光功率、扫描速度、扫描间距等因素对表面粗糙度的影响,并研究了抛光后的DC53淬硬钢材料性能。

## 2 材料和方法

### 2.1 试验材料

本文采用初始粗糙度 $R_a=4.829 \mu\text{m}$ 的DC53模具钢进行试验,其基本化学成分见表1。在热处理淬火+回火后,硬度可达到10 GPa以上,且变形小,故模具精度较高,其耐磨性、切削性较好,模具寿命较长,同时节省了加工工时。较高的铬含量和少量的硅含量提高了DC53模具钢的硬度、耐磨性能和韧性,使其具有良好的抛光性能。在抛光试验前,对样品进行了淬火+回火处理,然后用线切割的方法切成100 mm×100 mm×5 mm的钢板。

表1 DC53模具钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of DC53 die steel

Element	C	Mn	Mo	Si	Cr	V
Mass fraction / %	0.95-1.05	0.30-0.35	2.00	0.90-0.95	7.55-8.50	0.25-0.30

### 2.2 试验设备和测试设备

抛光设备采用创鑫公司的波长为1064 nm的连续光纤激光器(MFSC-1000W),激光功率在150~1000 W范围内,所使用的激光振镜均是菲雷泰克生产的SDL-F20PR0-3,焦距为720 mm,激光器的可变焦范围为60 mm,激光光斑在焦点位置的直径为0.3 mm。本文所有抛光试验均在样品表面离振镜底部距离为720 mm处上进行,即不考虑离焦量。连续激光光束有两种能量分布形式,分别是高斯光束和平顶光束,试验中的连续激光器发射近平顶光束。

图1(a)、(b)分别为激光抛光试验装置和原理图。激光光源由激光器发出,扩束镜调整激光光束直径和发散角,镜片位于激光振镜内部,作用是调整激光光束位置,确保激光照射在工件表面上。为了防止工件表

面在抛光时发生氧化,采用不会与材料发生反应的氩气作为保护气体。采用白光干涉仪(BRUKER WYKO Contour GT-K)和金相显微镜观察表面形貌,测量表面粗糙度,并对抛光前后的表面形貌进行功率谱密度分析。然后使用X射线衍射仪(XRD, Advance d8)对抛光前后的表面形貌进行XRD图谱分析。抛光后的样品通过线切割切成10 mm×10 mm×5 mm的小方块。为了避免线切割所产生的热影响,用150#的砂纸将样品的横截面打磨掉1 mm,然后依次用400#、600#、800#、1000#、1200#、1500#、2000#水磨砂纸粗磨,最后在Mo<sup>®</sup>Pao2DE抛光机上采用转速300 r/min抛光至镜面,抛光液采用粒度为1.5的金刚石喷雾抛光剂。用纳米压痕仪(ContourGT)测量试样截面的压痕硬度(H)和杨氏模量。采用体积比为硝酸:盐酸:水=3:1:4

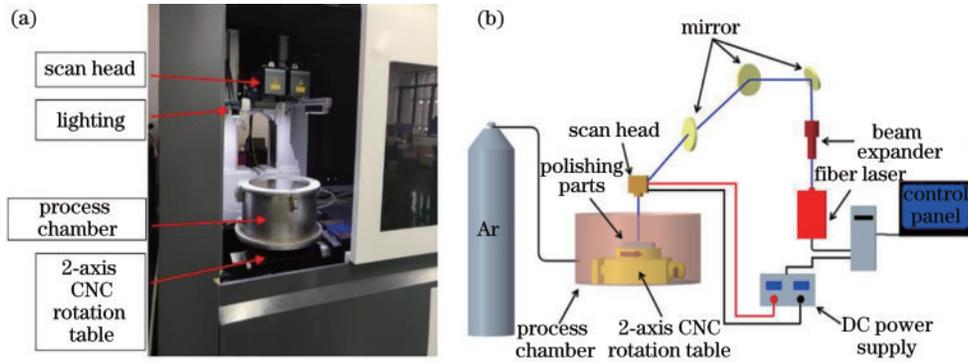


图 1 激光抛光试验。(a)装置图;(b)原理图

Fig. 1 Laser polishing test. (a) Device diagram; (b) principle diagram

的王水稀释液浸蚀 5 s,用扫描电镜(Gmini300)观察抛光截面的微观结构,并进行能谱分析。使用多通道多功能电化学工作站(PARSTATMC)测量抛光表面前后的极化曲线,为了控制粗糙度对腐蚀性能的影响,未抛光试件表面通过砂纸磨到同抛光后一致的粗糙度再进行测量。测量时选用铂片电极作为辅助电极,饱和甘汞电极为参比电极,工作电极即为待测样品,测量范围为  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 。电解池中选择质量分数为 3.5% NaCl 溶液作为电解液,通过比较自腐蚀电位和腐蚀速率来表征材料的耐腐蚀性能。

### 2.3 试验方法

抛光前先用洗板水清洗样品表面,用乙醇清洁透光率为 99.8% 的石英玻璃,并用无尘布擦拭,以减少可控环境因素对试验的影响。为了研究连续光纤激光器的各种激光参数对 DC53 模具钢表面形貌的影响,本文分析了激光功率、扫描速度、扫描距离等因素对表面粗糙度的影响。首先采用不同激光功率、不同扫描速度的连续激光对样品进行抛光,抛光范围为  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  正方形区域。抛光后,分析各种激光因素对表面粗糙度的影响,找到最佳参数集。为了更大程度地降低表面粗糙度,在接下来的试验中引入可变的扫描距离。研究扫描间距(重叠率)对表面粗糙度的影响。

## 3 结果和讨论

### 3.1 工艺参数优化

为了研究不同激光功率、扫描速度对 DC53 模具钢表面粗糙度的影响,连续光纤激光器的试验参数如表 2 所示。在激光功率范围为 150~210 W、扫描速度范围为 10~70 mm/s、扫描间距为 0.05 mm 的条件下,共进行 98 次抛光试验,每次试验抛光区域大小为  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 。为了研究扫描速度对表面粗糙度的影响,在 150~210 W 的功率范围内进行了 7 组试验,图 2 显示了不同功率水平下扫描速度对表面粗糙度的影响。从图 2 可以看出,随着扫描速度的增加,  $R_a$  先减小后增大,大致呈 U 形曲线。在扫描速度为 20 mm/s 时,随着激光功率的增大,  $R_a$  并不是呈现单调关系。当

表 2 试验参数

Table 2 Experimental parameters

Experimental parameter	Value
Laser power /W	150-210
Scanning speed /( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	10-70
Defocus /mm	0
Spot size / $\mu\text{m}$	300
Scan interval / $\mu\text{m}$	50
Protective gas	Ar

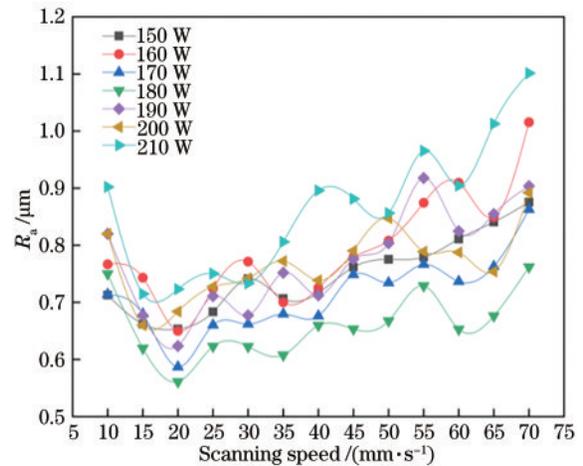


图 2 不同功率下扫描速度对表面粗糙度影响

Fig. 2 Effect of scanning speed on surface roughness under different powers

激光功率增大到 180 W 时,获得了最佳的表面粗糙度。抛光后的表面相比初始表面而言,粗糙度得到大幅下降。

图 3(a)是能量密度和表面粗糙度之间关系的散点图。连续激光的能量密度( $E_{ED}$ )代表每个表面单元的辐射能量,它本质上取决于三个参数:激光功率、辐射时间和光斑大小。

$$E_{ED} = \frac{6000 \cdot P}{V_f \cdot D}, \quad (1)$$

式中:  $P$  为功率(单位: W);  $V_f$  为激光扫描速度(单位: mm/s);  $D$  为光斑直径(单位: mm)。

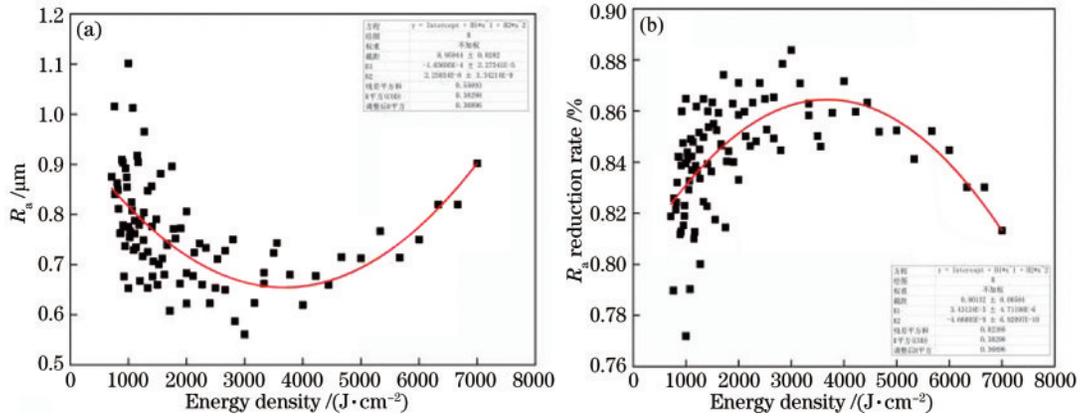


图 3 散点图。(a)能量密度和表面粗糙度；(b)能量密度和表面粗糙度降低率

Fig. 3 Scatter plot. (a) Energy density and surface roughness; (b) energy density and surface roughness reduction rate

图 3(a)中实线为散点拟合曲线,可以看出,拟合曲线呈 U 形。能量密度过高或过低都不利于降低表面粗糙度,这也同样可以解释图 2 中扫描速度与表面粗糙度的关系呈现为 U 型。当扫描速度低于 15 mm/s 时,激光移动速度较慢,热量在样品表面停留时间增加,热积累过高导致材料表面熔融过深,以至于熔融材料还未停止振荡就已经凝固,材料表面再生不均匀轮廓,形成 SOM 现象,如图 4(c)所示。但当扫描速度在 25 mm/s 以上时,速度过快,导致热积累过少,材料还

未完全熔化,因此初始表面无法展平,如图 4(a)所示。当扫描速度为 15~25 mm/s 时,熔化区域为峰腰及以上,由于材料自身重力和表面张力等形式的作用力,材料的熔化部分自上而下填充峰谷,获得较低的表面粗糙度,形成 SSM 现象,如图 4(b)所示。图 3(b)是表面粗糙度降低率随能量密度变化的散点图,散点可以拟合成一条曲线,可以看出,在整个试验中,表面粗糙度的降低率分布在 77%~89% 之间,这表明初始凹凸表面得到有效平滑。

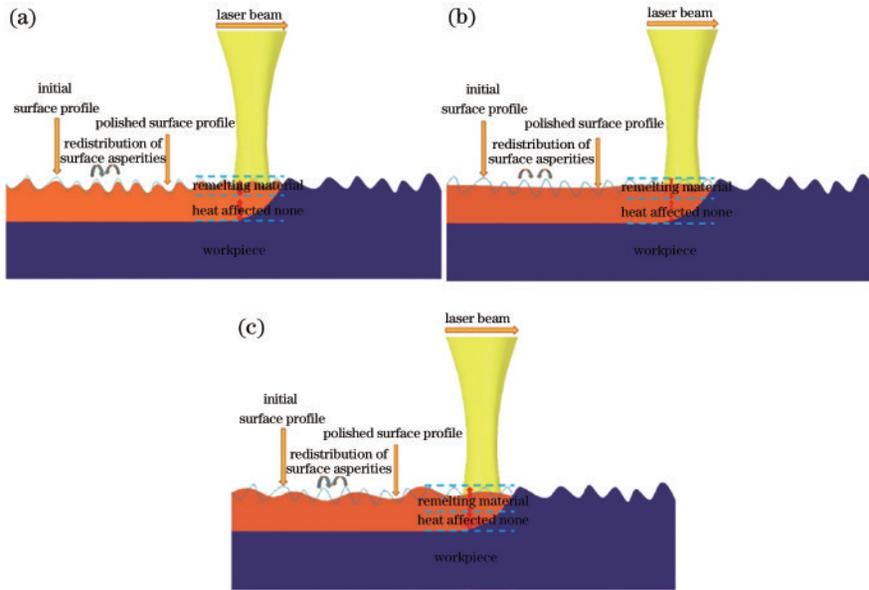


图 4 激光抛光的机理。(a)不完全熔化；(b)表面浅熔融；(c)表面过熔融

Fig. 4 Mechanism of laser polishing. (a) Incomplete melting; (b) shallow surface melting; (c) surface over melting

通过白光干涉仪观察激光抛光前后的表面形貌,如图 5 所示,初始表面粗糙度  $R_a=4.829 \mu\text{m}$ 。在激光功率为 180 W、扫描速度为 20 mm/s 时,抛光后的表面粗糙度  $R_a$  可达到  $0.561 \mu\text{m}$ ,表面粗糙度降低率高达 88.4%。但观察发现,轮廓峰值总高度  $R_z$  在抛光后反而增加了,预估是热积累过大,导致产生了次生粗糙度。

在前一次分析中观察到,虽然  $R_a$  得到了有效的降

低,但在最佳参数下的抛光表面最大轮廓波峰高度  $R_p$  却高于初始表面,这说明抛光表面产生了新的山峰。为了进一步研究激光抛光工艺参数对表面粗糙度的影响,减少表面次生粗糙度的产生,引入变量扫描间距,扫描距离是两条激光路径中心线之间的垂直距离,本试验中激光光斑直径为 0.3 mm。当扫描距离为 0 时,两条激光路径完全重叠,重叠率为 100%;当扫描距离大于或等于 0.3 mm 时,两条激光路径不重叠,重叠率

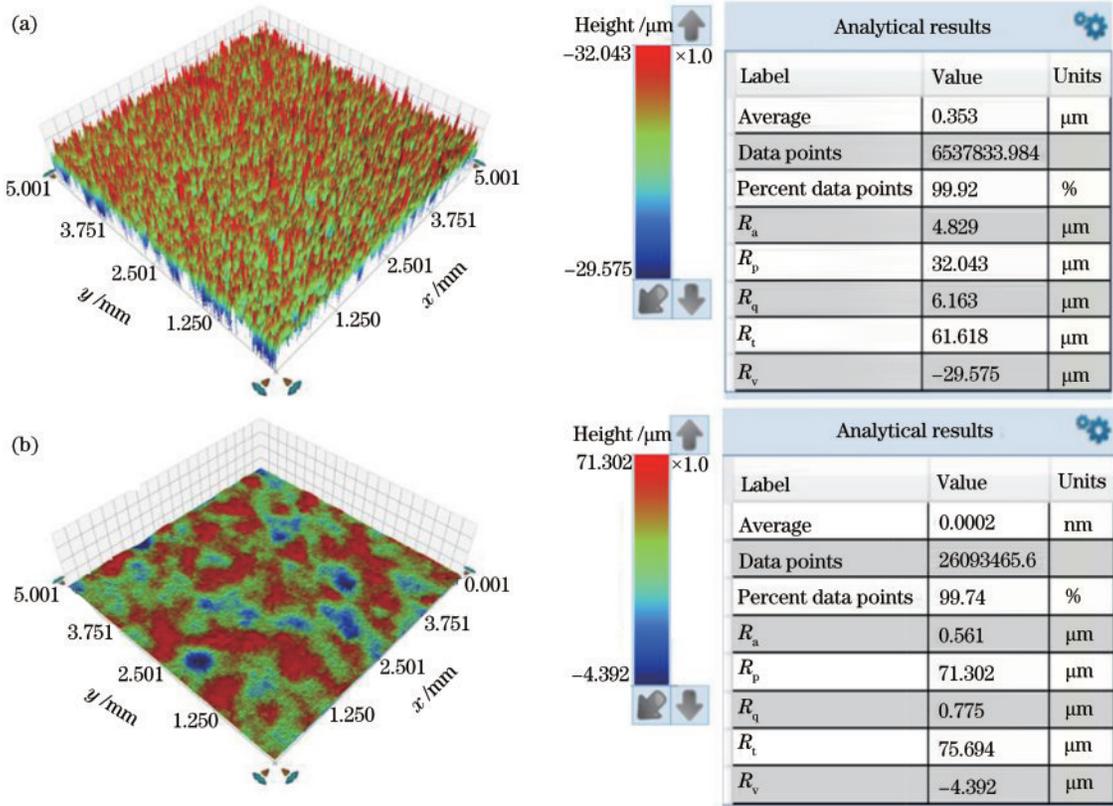


图 5 激光抛光前后的表面形貌对比。(a)激光抛光前;(b)激光抛光后

Fig. 5 Comparison of surface topography before and after laser polishing. (a) Before laser polishing; (b) after laser polishing

为 0%。因此扫描间距最高选 0.3 mm。在 180 W 的激光功率和 20 mm/s 的扫描速度下,通过改变扫描间距设计单因素试验,扫描间距变化范围为 0.01~0.3 mm。当引入扫描间距后,从图 6 可以看出,扫描间距和  $R_a$  并非呈现单调关系,而是随着扫描间距的增加大致呈 U 形分布。当扫描间距较小时,重叠率过高,材料表面发生过熔融现象;当扫描间距较大时,激光扫描范围内重叠率低,表面未能充分熔融,导致粗糙度较高。同时,从图 6 可以观察到,过熔融表面粗糙度远小于浅熔融表面粗糙度,当重叠率越接近 0% 时,粗

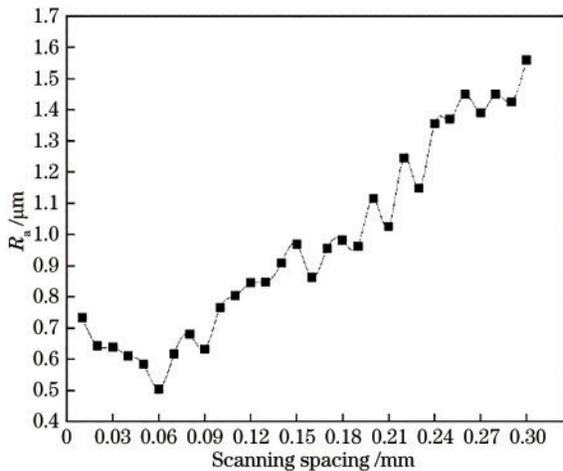


图 6 不同的扫描间距对表面粗糙度的影响

Fig. 6 Effect of different scanning spacings on surface roughness

糙度变化较小。

通过白光干涉仪观察激光抛光后的三维表面形貌,如图 7 所示,样品 2 在扫描间距为 0.06 mm 的最佳抛光工艺下,抛光后的表面粗糙度  $R_a$  可达到 0.505 μm,表面粗糙度降低率高达 89.54%,轮廓高度差得到大幅改善,粗糙表面得到进一步的有效平滑。然后,对激光抛光前后的 DC53 模具钢表面进行傅里叶滤波,得到其表面轮廓,如图 8(a) 所示,其中  $x$  为表面轮廓的长度, $y$  为表面轮廓的高度。凹凸不平的表面在激光热源的作用下,热量积累到材料熔点以上,将熔融表面微观高峰在重力、表面张力和热表面张力的共同作用下快速凝固达到熔峰填谷的效果,降低了表面粗糙度,获得了更平滑的表面形貌。上述表征只从轮廓高度方向上分析了表面轮廓,而忽略了横向空间上的频率分析,无法精确地描述激光抛光这种精密加工方法对微观表面形貌的影响。因此,本文引入了功率谱密度(PSD)对表面形貌进行了分析,如图 8(b) 所示,其中  $x$  表示空间频率, $y$  表示振幅。从图 8 可以看出:在空间频率大于  $30 \mu\text{m}^{-1}$  频段内,三条 PSD 曲线基本重合;在空间频率小于  $30 \mu\text{m}^{-1}$  时,PSD 有不同程度的衰减,抛光后的样品振幅显著降低。

### 3.2 激光抛光后材料的内部结构及性能变化

激光抛光后的材料内部显微组织、硬度和杨氏模量分别如图 9(a)~(c) 所示。如图 9(a) 所示,在合适工艺参数下,激光作用的材料横截面上可以观察到明显

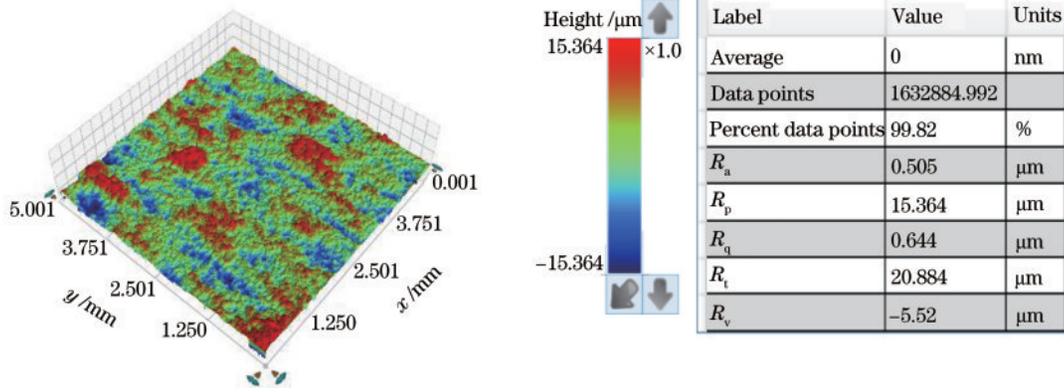


图 7 激光抛光后样品 2 表面形貌  
Fig. 7 Surface morphology of sample 2 after laser polishing

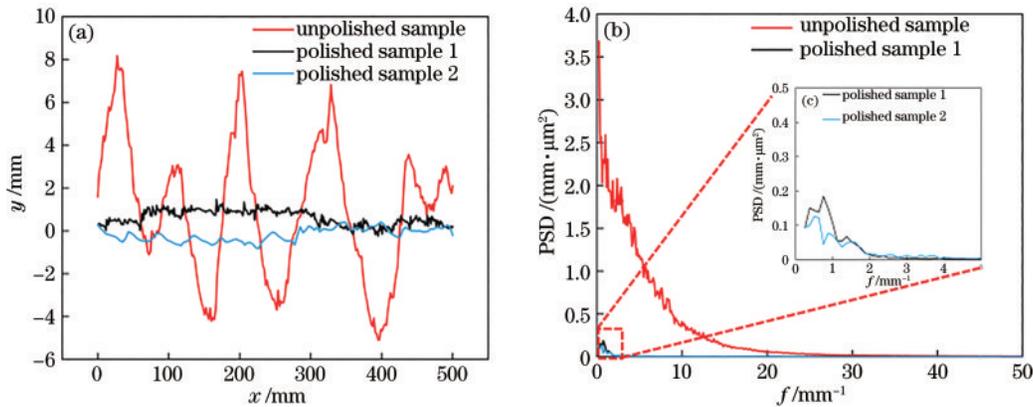


图 8 激光抛光结果对比分析。(a)抛光前后表面轮廓;(b)功率谱密度分析结果  
Fig. 8 Comparative analysis of laser polishing results. (a) Surface profiles before and after polishing;  
(b) power spectral density analysis results

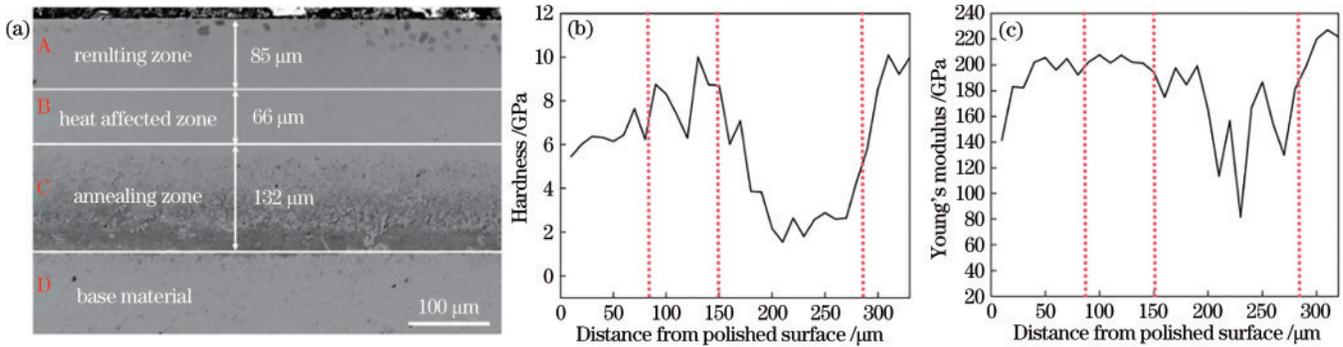


图 9 抛光后材料的内部结构及性能变化。(a)显微组织;(b)硬度;(c)杨氏模量

Fig. 9 Internal structure and properties of the material after polishing. (a) Microstructure; (b) hardness; (c) internal Young's modulus

的分层现象,依次为熔融区、热影响区、退火区和基体区。激光光源作用在材料表面上,表面温度逐渐升高产生熔融,随后在保护气体的环境下冷却,本质上是一次金属热处理过程。不同区域所受到的温度不同,导致各区域发生不同的热处理,从而出现了分层现象。图 10(a)为熔融区,在此区域发生了材料熔化和再固化的物理过程,熔融深度为  $85\ \mu\text{m}$ ,在 1000 倍的扫描电镜下可以明显观察到柱状晶结构。当过冷度大(冷却速度快)时,柱状晶小;当过冷度小时,柱状晶大。在表

面位置处,其与空气接触,冷却速度较快,形成了更细小的柱状晶结构。图 10(b)是热影响区,热影响区深度为  $66\ \mu\text{m}$ ,未达到熔化温度  $1575\ ^\circ\text{C}$ ,但温度达到了奥氏体转变温度  $723\ ^\circ\text{C}$ ,因此该区域存在冶金转变,从图 10 能明显观察到奥氏体的产生,其主要组织成分为奥氏体。图 10(c)是退火区,有较大的碳化物生成,其上椭圆状物体为碳化物,主要组织成分为奥氏体和碳化物,且材料由于熔融温度的不同导致碳化物分布不均匀。单个形状不规则和圆形的粗大碳化物增加了基

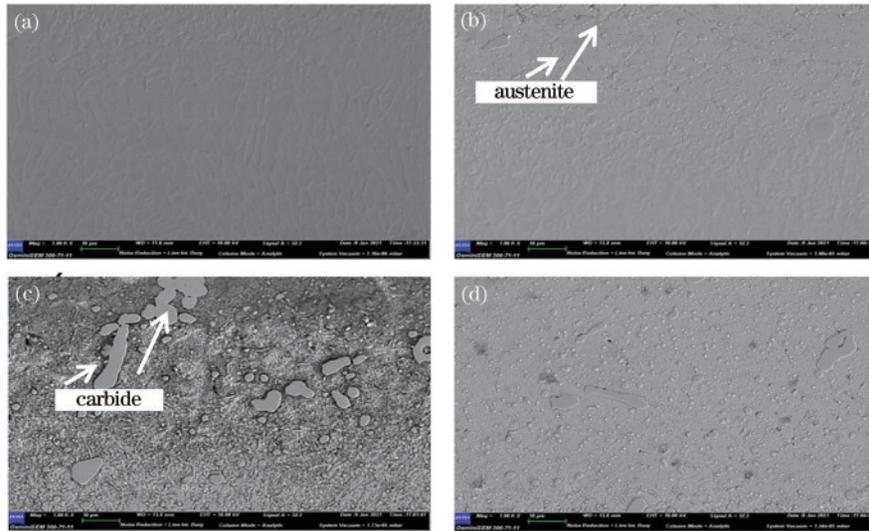


图 10 DC53 材料在 1000 倍的扫描电镜下各区域的微观组织。(a) 熔融区; (b) 热影响区; (c) 退火区; (d) 基体区

Fig. 10 Microstructure of each region of DC53 material under 1000× scanning electron microscope. (a) Melting zone; (b) heat affected zone; (c) annealing zone; (d) matrix zone

体/碳化物界面的应力集中。同时,奥氏体导致退火区硬度下降。为了提高韧性,必须通过提高凝固和冷却速度来降低元素偏析。图 10(d) 是基体区,可以观察到典型的马氏体结构,这是典型的 DC53 淬硬钢结构。基体区由马氏体和碳化铬组成,硬度较高。

图 9(b)、(c) 分别是采用纳米压痕仪测量得到的硬度和杨氏模量,可以明显观察到熔融区相对于基体硬度下降了 40%,杨氏模量下降了 35%。退火区下降得更为严重。

图 11 为样品的 Tafel 极化曲线图。表 3 为初始样品和抛光后试样的自腐蚀电位  $E$ 、自腐蚀电流密度  $I_{corr}$  和腐蚀速率 (1 mpy = 0.0254 mm/a)。从图 11 可以看出,未抛光前的自腐蚀电位要小于抛光后的自腐蚀电位,这表明经过抛光后的样品更易被腐蚀。对比抛光前后的腐蚀速率可知,抛光后腐蚀速率更快,这表明抛光后的样品若被腐蚀,则腐蚀速度将快于未抛光样

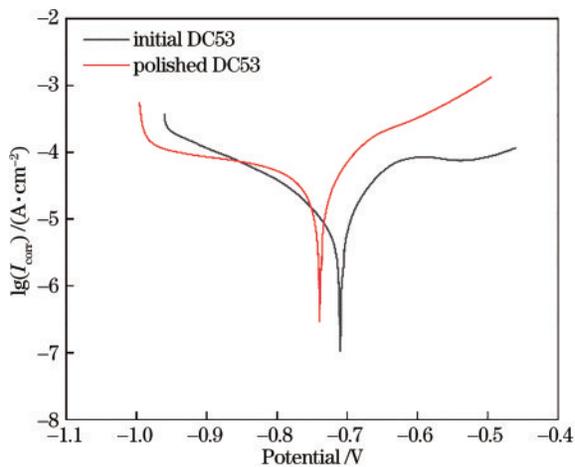


图 11 抛光前后的 Tafel 曲线

Fig. 11 Tafel curves before and after polishing

表 3 DC53 抛光前后自腐蚀电位、自腐蚀电流密度和腐蚀速率  
Table 3 Self-corrosion potential, self-corrosion current density, and corrosion rate of DC53 before and after polishing

Sample	$E$ / mV	$I_{corr}$ / ( $10^{-6} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ )	Corrosion rate / mpy
Initial sample	-710.484	10.647	0.67305
Laser polished	-739.049	131.314	8.30040

品。材料的耐腐蚀性能经抛光后变得更差,这可能是由于激光作用产生的残余应力加速了材料的腐蚀,导致材料的耐蚀性下降。

图 12 是激光抛光前后样品表面 XRD 图。图中的线条 a、b、c 分别为初始、抛光前未脉冲激光清洗、抛光前经脉冲激光清洗样品。 $\alpha$ -Fe 为铁素体,由于  $\gamma$ -Fe (PDF#89-4185) 和 Cr (PDF#88-2323) 都是面心立方晶格 (FCC) 结构,因此 DC53 淬硬钢中易形成 FCC 固溶体。从图 12 可以看出,DC53 淬硬钢抛光后主要物相为  $\alpha$ -Fe 和 FCC 固溶体,主要发生铁素体

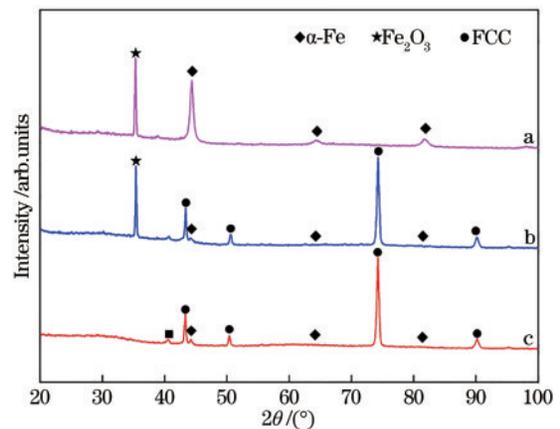


图 12 激光抛光前后 XRD 图

Fig. 12 XRD diagram before and after laser polishing

到奥氏体的转变。初始样品采用电火花切割而成,在表面生成了氧化物。但是在经脉冲清洗的样品抛光后的 XRD 图像中并没有发现  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  的存在,这是因为抛光前脉冲激光对样品表面进行了清洗,而在抛光前未使用脉冲激光清洗的样品表面仍然存在氧化物。同时,为了避免脉冲激光对材料造成热影响,扫描速度设置为 1000 mm/s,用于快速清洁样品表面的杂质。

## 4 结 论

本文通过改变连续激光器的激光功率、扫描速度和扫描间距等参数,将初始表面粗糙度为  $4.829\ \mu\text{m}$  的 DC53 淬硬钢降低至  $0.505\ \mu\text{m}$ ,表面粗糙度降低率达 89.54%,而且当能量密度为  $3000\ \text{J}/\text{cm}^2$  时,表面能更好地被平滑。

激光抛光后,受温度的影响,材料亚表层分为四个区域,从上至下依次是熔融区、热影响区、退火区、基体。相对于基体部分,热影响区、熔融区以及退火区的硬度和杨氏模量均有所降低。

激光抛光后,材料表面的腐蚀电位从  $-710.484\ \text{mV}$  降至  $-739.049\ \text{mV}$ ,腐蚀速率由  $0.67305\ \text{mpy}$  上升至  $8.3004\ \text{mpy}$ ,因此相对于初始表面,激光抛光后材料表面耐腐蚀性能有所下降。

## 参 考 文 献

- [1] Ukur E, Lamikiz A, López de Lacalle L N, et al. Laser polishing of tool steel with  $\text{CO}_2$  laser and high-power diode laser[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(1): 115-125.
- [2] 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): 110001.
- [3] Dai W, Zheng Z Z, Li J J, et al. Research progress of laser polishing on the metal surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(11): 110001.
- [3] 魏晓丽. 探索模具制造中模具表面精加工技术[J]. 科技创新导报, 2019, 16(25): 64, 66.
- [4] Wei X L. Exploring the finishing Technology of Mould Surface in Mould Manufacturing[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2019, 16(25): 64, 66.
- [4] Gomez-Gallegos A A, Mill F, Mount A R. Surface finish control by electrochemical polishing in stainless steel 316 pipes[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 23: 83-89.
- [5] 陈滋鑫, 周后明, 徐采星. 激光熔覆裂纹研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(7): 0700006.
- [5] Chen Z X, Zhou H M, Xu C X. Cladding crack in laser cladding: a review[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(7): 0700006.
- [6] Ramos-Grez J A, Bourell D L. Reducing surface roughness of metallic freeform-fabricated parts using non-tactile finishing methods[J]. International Journal of Materials and Product Technology, 2004, 21(4): 297-316.
- [7] Bhaduri D, Penchev P, Batal A, et al. Laser polishing of 3D printed mesoscale components[J]. Applied Surface Science, 2017, 405: 29-46.
- [8] 黄加福, 魏昕, 谢小柱, 等. 影响激光抛光效果的因素分析[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(12): 20-24.
- [8] Huang J F, Wei X, Xie X Z, et al. Research on influences of condition parameters on laser polishing process[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(12): 20-24.
- [9] 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.
- [10] 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(9/10/11/12): 2607-2617.
- [11] 廖聪豪, 周静, 沈洪. 增材制造 TC4 钛合金在激光抛光前后的电化学腐蚀性能[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0102003.
- [11] Liao C H, Zhou J, Shen H. Electrochemical corrosion behaviors before and after laser polishing of additive manufactured TC4 titanium alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0102003.
- [12] Weingarten C, Heidrich S, Wu Y C, et al. Laser polishing of glass[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9633: 963303.
- [13] 孔令瑞. 陶瓷材料的激光微加工技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [13] Kong L R. A study on laser micro-machining of ceramics material[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [14] 吕可鑫, 韩雪松. 超快激光抛光硬脆光学材料工艺数值模拟研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 0532001.
- [14] Lü K X, Han X S. Research on numerical simulation of ultrafast laser polishing brittle optical materials[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0532001.
- [15] Jia Z X, Liu Y W, Li J Q, et al. Crack growth behavior at thermal fatigue of H13 tool steel processed by laser surface melting[J]. International Journal of Fatigue, 2015, 78: 61-71.
- [16] Zhou Y Q, Zhao Z Y, Zhang W, et al. Experiment study of rapid laser polishing of freeform steel surface by dual-beam[J]. Coatings, 2019, 9(5): 324.
- [17] 张伟康, 戴伟, 郑志镇, 等. 激光抛光 H13 模具钢自由表面演变的数值模拟与验证[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0702002.
- [17] Zhang W K, Dai W, Zheng Z Z, et al. Numerical simulation and verification of free-surface evolution in laser polishing of H13 tool steel[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0702002.
- [18] Chik N, Wan Md Zain W S, Mohamad A J, et al. Bacterial adhesion on the titanium and stainless-steel surfaces undergone two different treatment methods:

- polishing and ultrafast laser treatment[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 358: 012034.
- [19] Obeidi M A, McCarthy E, O'Connell B, et al. Laser polishing of additive manufactured 316L stainless steel synthesized by selective laser melting[J]. Materials, 2019, 12(6): 991.
- [20] Chang C S, Yang K S, Chung C K, et al. Surface quality, microstructure, and mechanical properties of the SKD 61 tool steel with prior heat treatment affected by single- and double-pass continuous wave laser polishing [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(5/6/7/8): 1643-1658.
- [21] Chen Y D, Tsai W J, Liu S H, et al. Picosecond laser pulse polishing of ASP23 steel[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 107: 180-185.
- [22] 那冉, 陈涛. 38CrMoAl 表面 YAG 激光抛光技术研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(1): 011402.
- Na R, Chen T. Research of YAG laser polishing of 38CrMoAl surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(1): 011402.
- [23] Li K, Zhao Z Y, Zhou H M, et al. Numerical analyses of molten pool evolution in laser polishing  $Ti_6Al_4V$ [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 58: 574-584.
- [24] Zhang C, Zhou J, Shen H. Role of capillary and thermocapillary forces in laser polishing of metals[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2017, 139(4): 041019.
- [25] 周宇羚, 单等玉, 王争飞, 等. 激光抛光 3D 打印钛合金板的机理及工艺研究 [J]. 应用激光, 2019, 39(4): 621-627.
- Zhou Y L, Shan D Y, Wang Z F, et al. Study on mechanism and process of laser polished 3D printing titanium alloy sheet[J]. Applied Laser, 2019, 39(4): 621-627.