

# 激光抛光 H13 模具钢自由表面演变的 数值模拟与验证

张伟康, 戴伟, 郑志镇\*, 李建军, 邓涪涪

华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074

**摘要** 采用数值模拟与实验相结合的方法,通过建立激光抛光的二维瞬态模型,模拟了激光抛光过程中材料表面形貌的演变过程。在模拟过程中,采用移动激光束作为热源,通过对实际材料自由表面进行频谱分析,构建了相似的模拟模型表面,耦合激光抛光过程中的流动场和温度场,综合考虑毛细力和热毛细力的共同作用。结果表明:在毛细力和热毛细力的作用下,在被抛光的材料表面,波峰材料流向波谷,填补轮廓凹陷处,使得材料表面达到抛光效果。激光功率和扫描速度会显著影响抛光效果,过小的热输入会导致熔池尺寸过小,没有足够的流动体积,抛光效果差;过大的热输入则会导致熔池持续时间长,增大抛光表面的粗糙度。模拟的表面粗糙度、熔池深度与实验结果相比,误差均在 8% 以内,具有较高的模拟精度。

**关键词** 激光技术; 激光抛光; 数值模拟; 频谱分析; 毛细力; 热毛细力

**中图分类号** TG456.7

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201946.0702002

## Numerical Simulation and Verification of Free-Surface Evolution in Laser Polishing of H13 Tool Steel

Zhang Weikang, Dai Wei, Zheng Zhizhen\*, Li Jianjun, Deng Tiantian

State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of  
Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

**Abstract** Via numerical simulation and experiment, a two-dimensional transient model of laser polishing (LP) is established to simulate the surface-morphological evolution of materials during LP. A moving laser-beam heat source with the combined effects of capillary and thermocapillary forces is adopted, and the flow and temperature fields are also coupled. The simulated-model surface and the actual examined material surface are constructed by performing spectrum analysis. The simulated results show that under the effects of capillary and thermocapillary forces, the peak material flows to the trough and fills the contour hollow on the polished material surface, achieving the polishing effect. The laser power and scanning speed significantly affect the polishing results. A low-heat input leads to a small molten pool, resulting in a poor polishing effect with insufficient flow time; excessive heat input results in a molten pool with a long duration of time, which increases the LP surface roughness. Compared with the experimental results, the simulated surface roughness and the depth of the molten pool have an error of less than 8%, reaching a high simulation accuracy.

**Key words** laser technique; laser polishing; numerical simulation; spectrum analysis; capillary force; thermocapillary force

**OCIS codes** 160.3900; 140.3390; 240.5450

## 1 引 言

激光抛光是一种新型的抛光技术,与传统的抛

光方法相比,其具有非接触、高效率、自动化、清洁环保等诸多优点<sup>[1-3]</sup>。目前,国内外学者针对工具钢<sup>[4-6]</sup>、模具钢<sup>[7-10]</sup>、不锈钢<sup>[11-12]</sup>、钛合金<sup>[13-14]</sup>、镍合

收稿日期: 2018-12-25; 修回日期: 2019-02-20; 录用日期: 2019-03-04

基金项目: 国家重大专项(2018YFB1106500)

\* E-mail: zzz@mail.hust.edu.cn

金<sup>[15-16]</sup>等金属材料,进行了大量的抛光实验,获得了较好的抛光效果。

激光抛光是通过材料浅表层的熔化实现的,熔池中材料的流动对激光抛光效果具有显著影响。然而,激光抛光过程中熔池材料的流动过程非常复杂,且难以观测。为了研究这一激光抛光过程的核心难题,国内外学者开展了激光抛光的数值模拟研究。如: Mai 等<sup>[11]</sup>建立了二维有限差分热传导模型,用以模拟快速熔化和凝固过程,解决固/液相变中非线性移动边界的问题,得到有效的二维(2D)熔池尺寸;Ukar 等<sup>[17]</sup>建立了三维温度场模型,该模型能用于计算激光抛光过程中不同能量密度下的温度及熔池尺寸。Momin 等<sup>[18]</sup>建立了移动激光下的激光抛光温度场模型,该模型考虑了 Marangoni 效应对温度场的影响,得到了激光功率和扫描速度对激光抛光温度场的影响。

上述模型仅考虑了激光抛光过程的温度场,能模拟激光抛光过程的温度变化及熔池尺寸的变化,但却忽视了熔池表面形貌的演变过程。Ma 等<sup>[19-20]</sup>建立了二维轴对称瞬态模型,该模型耦合了流动场和温度场,可以模拟激光抛光过程中自由平面在热毛细力下的形貌演变过程,解释脉冲抛光产生额外粗糙度的原因。Shen 等<sup>[21]</sup>建立了二维轴对称瞬态模型,采用该模型模拟了自由平面在激光辐射下产生凸起的过程,分析了毛细力和热毛细力影响表面形貌演变的机制。Zhang 等<sup>[22]</sup>模拟了激光辐射下熔池表面演变的过程,并分析了毛细力和热毛细力对自由表面平滑的作用。

目前,在激光抛光模拟方面的研究主要涉及固定激光束下熔池表面的演变过程,而在移动激光束热源下自由表面形貌的演变规律尚未完善。鉴于此,本文采用数值模拟的方法,研究了移动激光束条件下激光抛光自由表面的演变过程,分析了毛细力和热毛细力对熔池自由表面形貌演变的影响,并与实际抛光实验的熔池、表面粗糙度进行对比,以验证模型的准确性。

## 2 抛光实验

### 2.1 实验材料

实验材料为 H13 热作模具钢。激光抛光前先对样品进行线切割加工,得到表面粗糙度  $R_a$  为  $4.265 \mu\text{m}$  的初始表面,表面形貌如图 1 所示。

### 2.2 抛光设备及参数

抛光实验装置如图 2 所示。采用半导体激光

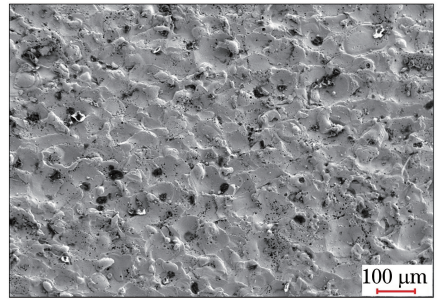


图 1 线切割加工 H13 模具钢的表面形貌

Fig. 1 Surface morphology of H13 tool steel after wire-electrode cutting machining

器,选择连续模式进行激光抛光。扫描振镜采用德国 SCANLAB 公司的 hurrySCAN 型振镜,通过振镜来控制激光的扫描速度。为了防止 H13 刚表面被氧化而导致表面质量降低,在抛光过程中,样品处于氩气体保护氛围内。激光作用到样品表面的光斑直径可以通过升降台调整振镜的高度进行调整。

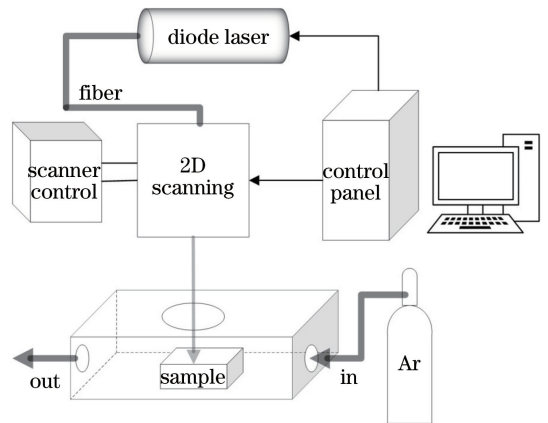


图 2 激光抛光设备示意图

Fig. 2 Schematic of laser-polishing setup

经过多次实验,最终确定了一组能达到较好抛光效果的抛光参数,如表 1 所示。

表 1 激光抛光参数

Table 1 Laser-polishing parameters

Parameter	Value
Laser power /W	250
Scanning speed /( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	300
Beam diameter / $\mu\text{m}$	600

### 2.3 抛光实验结果

抛光后 H13 钢的表面形貌如图 3 所示,可见,粗糙的原始表面经激光扫描后变得平整。采用基恩士公司的激光共聚焦显微镜(型号为 VK-X-200K)观察表面形貌,并得到表面粗糙度  $R_a$ 。抛光后样品的表面粗糙度  $R_a$  从  $4.265 \mu\text{m}$  降低到  $0.4 \mu\text{m}$ 。

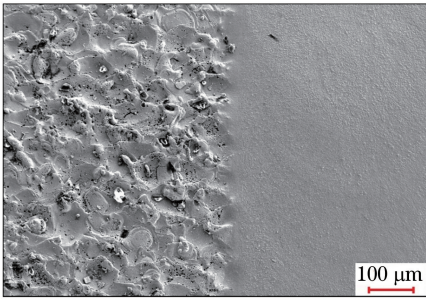


图 3 H13 模具钢抛光前(左)和抛光后(右)的表面形貌  
Fig. 3 Unpolished (left) and polished (right) surface morphologies of H13 tool steel

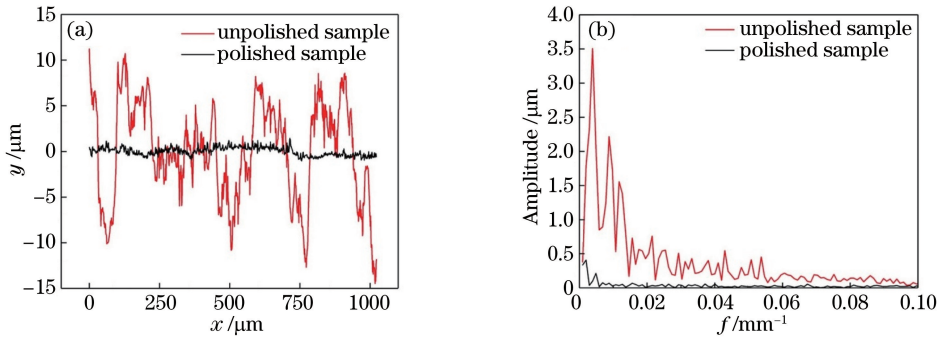


图 4 H13 模具钢抛光前后的表面轮廓和频谱图。(a)表面轮廓;(b)频谱图  
Fig. 4 Unpolished and polished surface profiles and frequency spectra of H13 tool steel.  
(a) Surface profiles; (b) frequency spectra

### 3 数值模型的建立

#### 3.1 模型假设

为了简化计算,结合实际激光抛光过程,对模型做出如下假设:1)材料模型为二维瞬态模型,激光光源在材料表面移动;2)不考虑激光束在金属表面离焦的影响;3)金属处于氩气保护氛围内,不考虑金属的表面氧化;4)金属视为各向同性,材料的热物性参数只与温度有关;5)激光抛光过程仅考虑材料表面的熔化,熔池的最高温度控制在沸点以下,不考虑产生的金属蒸气和等离子效应;6)抛光过程中金属熔体视为不可压缩层流。

#### 3.2 材料属性

本研究所采用的实验材料为 H13 模具钢。根据假设,模拟过程的热物性参数只与温度有关,其中主要与温度有关的参数为材料密度  $\rho$ 、热导率  $k$ 、动力黏度  $\mu$ 、定压比热容  $c_p$ 。H13 刚表面的最高温度低于其沸点,因此热物性参数仅考虑沸点以下的值<sup>[23]</sup>,如图 5 所示( $T$  为温度)。

在流动模拟中,固液相均使用图 5(c)所示的动力黏度,固相材料的动力黏度设置为  $10^5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,液相

测量激光抛光前后的 H13 模具钢,得到其表面轮廓图,如图 4(a)所示,其中  $x$  为表面轮廓的长度, $y$  为表面轮廓的高度。从图 4(a)中可以发现,抛光后的表面高度差大幅减小,表面由凹凸不平变得较为平整。

采用频谱分析方法对表面轮廓进行分析,得到激光抛光前后的功率谱密度曲线图,如图 4(b)所示,其中  $f$  为频率值。从图 4(b)中可以发现:抛光前,低频区域具有较大的幅值;经激光抛光后,高幅值的表面波被有效降低,最大幅值从  $3.5 \mu\text{m}$  降低至  $0.408 \mu\text{m}$ ,无论是高频幅值还是低频幅值,降低效果十分明显。

材料动力黏度设置为  $5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,相差了数个数量级,因此模拟流动过程中,液相金属发生移动而固相不移动。

抛光过程中,材料在激光辐射下存在固液相转变过程,H13 模具钢的熔化过程发生在固相线( $T_s$ )和液相线( $T_l$ )间,具体数值分别为  $1588 \text{ K}$  和  $1727 \text{ K}$ 。因熔化过程需要考虑潜热的影响,故采用等效比热容( $c_p^*$ )代替定压比热容( $c_p$ ):

$$c_p^* = c_p + L \frac{df_1}{dT}, \quad (1)$$

$$f_1 = \begin{cases} 0 & T \leq T_s \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & T_s \leq T \leq T_l \\ 1 & T \geq T_l \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $L$  为潜热; $T$  为温度; $f_1$  为液相分数。图 5(d)为考虑潜热后等效比热容。H13 钢其余的材料属性如表 2 所示。

#### 3.3 控制方程

基于模型的假设条件,在 COMSOL 软件中设置激光抛光过程的控制方程。

温度场控制方程可以表示为

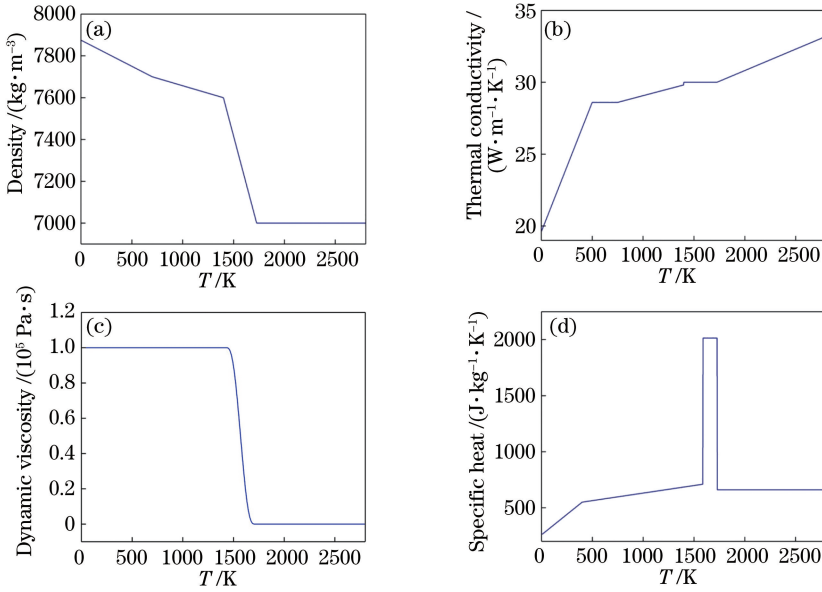


图 5 H13 模具钢的热物性参数。(a)密度;(b)热导率;(c)动力黏度;(d)等效比热容

Fig. 5 Thermophysical properties of H13 tool steel. (a) Density; (b) thermal conductivity; (c) dynamic viscosity; (d) equivalent specific heat capacity

表 2 H13 模具钢的材料属性<sup>[23-24]</sup>

Table 2 Material properties of H13 tool steel<sup>[23-24]</sup>

Parameter	Value
Surface tension coefficient $\gamma / (\text{mN} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$1909 - 0.52 \times (T - 1588)$
Absorptivity $\alpha$	0.3
Radiation emissivity $\epsilon$	0.5
Latent heat of melting $L / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$2.8 \times 10^5$
Convective coefficient $h / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$	10

$$\rho c_p^* \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p^* \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = q_0, \quad (3)$$

其中,

$$\mathbf{q} = -k \nabla T, \quad (4)$$

式中: $\rho$ 为 H13 模具钢的密度( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ); $c_p^*$ 为等效比热容( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ); $\mathbf{u}$ 为速度矢量( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ); $T$ 为温度(K); $t$ 为时间(s); $k$ 为热导率( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ); $\mathbf{q}$ 为传热量; $q_0$ 为边界热通量,由边界条件控制热通量大小。(4)式为傅里叶导热方程。

熔池为不可压缩的层流,考虑到重力的影响,流动场的控制方程可由(5)式所示的 N-S 方程以及(6)式所示的连续性方程表示:

$$\rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g}, \quad (5)$$

$$\rho \nabla \cdot (\mathbf{u}) = 0, \quad (6)$$

式中: $\mu$ 为动力黏度( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ), $\mathbf{g}$ 为重力加速度( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )。

为了模拟流动过程中自由表面的形变过程,模拟过程采用移动网格(ALE)方法,ALE方法是 Euler 方法与 Lagrange 方法的结合,既能处理畸变较大的流动,又能准确描述流体内部的运动。流动场自由变形的网格的控制方程<sup>[25]</sup>可表示为

$$\mathbf{u}_{\text{mesh}} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}, \quad (7)$$

式中: $\mathbf{u}_{\text{mesh}}$ 为模型网格速度矢量( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ); $\mathbf{n}$ 为法向单位向量。

### 3.4 模型初始表面的建立

初始表面的不同会导致抛光结果的不同,故初始表面在模拟中的定义十分重要,仅通过简单的  $R_a$  值定义模型的初始表面是不精确的<sup>[16,19]</sup>。因此,本模型基于对实际材料自由表面的频谱分析,提取实验样品表面的高幅值频率,如提取图 4(b)中的 0.004,0.005,0.009,0.015,0.012  $\text{mm}^{-1}$ ,使用这些频率及其幅值构建表面轮廓,结果如图 6(a)所示,并将此表面应用到模型中。

### 3.5 边界条件

模型的计算域如图 7 所示。激光热源以一定的速度在材料表面移动,考虑到激光抛光过程浅表层材料熔化,且熔深一般不超过 150  $\mu\text{m}$ ,故只取表面深度为 150  $\mu\text{m}$  的区域进行模拟分析。实验采用的是半导体激光器,其光源能量分布为平顶型。常温常压条件下进行加工,样品的初始温度和环境温度均设置为 293 K,环境初始绝对压力设置为  $1.013 \times 10^5$  Pa。



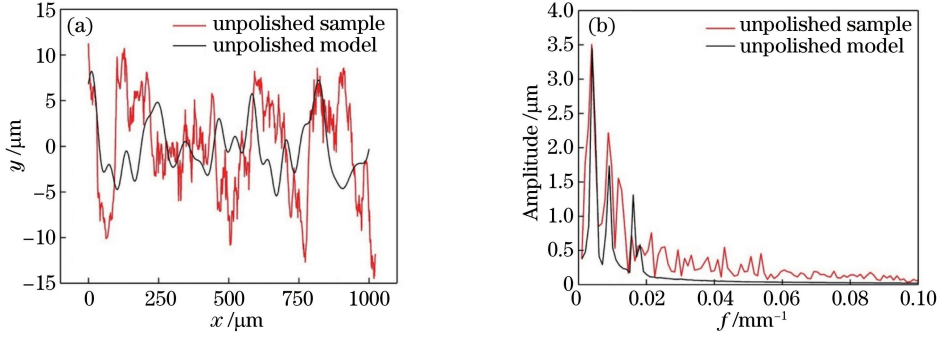


图 6 模型与样品抛光前的表面轮廓和频谱图。(a)表面轮廓;(b)频谱图

Fig. 6 Surface profiles and frequency spectra of unpolished sample and model. (a) Surface profiles; (b) frequency spectra

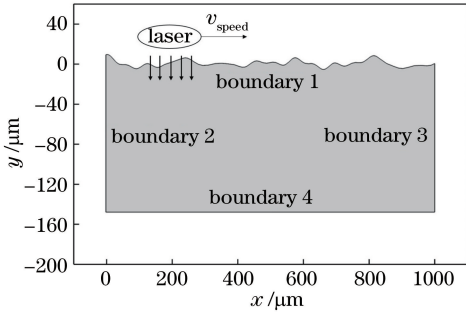


图 7 激光抛光数值模型的计算域

Fig. 7 Computational domain of laser-polishing numerical model

边界热源主要包括激光热源、对流换热、热辐射,它们表达式分别为

$$f(x^*)q_0 = f(x^*) \cdot \alpha \cdot \frac{P}{\pi r_0^2}, \quad (8)$$

$$q_0 = h(T_0 - T), \quad (9)$$

$$q_0 = \varepsilon\sigma(T_0^4 - T^4), \quad (10)$$

式中: $\alpha$ 为材料的吸收率; $P$ 为激光器功率(W); $r_0$ 为光斑直径(m); $h$ 为传热系数( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ); $\varepsilon$ 为表面辐射率; $\sigma$ 为玻尔兹曼常数; $T_0$ 为室温,取293 K; $x^*$ 为距离光斑圆心的长度(m),其与时间 $t$

的关系由(12)式确定; $f(x^*)$ 为激光作用范围,超出光斑直径范围的激光能量视为0,如(12)式表示。

$$f(x^*) = \begin{cases} 0 & |x^*| \geq x_0 \\ 1 & |x^*| \leq x_0 \end{cases}, \quad (11)$$

$$x^* = x - v_{\text{speed}} \cdot t, \quad (12)$$

式中, $v_{\text{speed}}$ 为激光的扫描速度。考虑连续激光作用到自由表面后主要受毛细力和热毛细力的控制,毛细力和热毛细力的控制方程分别为

$$\sigma_n = \kappa\gamma \cdot n, \quad (13)$$

$$\sigma_t = \frac{\partial\gamma}{\partial T} \nabla_t T, \quad (14)$$

式中: $\sigma_n$ 为毛细力; $\sigma_t$ 为热毛细力; $\nabla_t T$ 为切向温度梯度; $\kappa$ 为自由表面的曲率; $\gamma$ 为表面张力系数( $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ )。

ALE边界需要考虑不同的边界情况,对于自由表面需要指定法向网格速度,可表示为

$$\mathbf{u}_n = u_x \cdot \mathbf{n}_x + u_y \cdot \mathbf{n}_y, \quad (15)$$

式中, $u_x$ 为速度场 $x$ 方向分量大小, $u_y$ 为速度场 $y$ 方向分量大小, $\mathbf{n}_x$ 为法向单位向量的 $x$ 分量, $\mathbf{n}_y$ 为法向单位向量的 $y$ 分量。

具体各边界条件如表3所示。

表 3 边界条件

Table 3 Boundary conditions

Physics	Boundary condition	Boundary	Equation
Heat transfer	Laser irradiation	1	Equation (7)
	Natural convection	1,2,3	Equation (8)
	Radiation	1,2,3	Equation (9)
	Insulation	4	$q_0 = 0$
Fluid flow	Capillary forces	1	Equation (12)
	Thermocapillary forces	1	Equation (13)
Moving mesh	Prescribed mesh displacement	2,3	$dx = 0$
	Prescribed mesh displacement	4	$dx = 0, dy = 0$

### 3.6 网格划分

基于以上控制方程和边界条件,模型采用流动与传热耦合的非等温恒流。

模型的网格移动主要发生在自由表面区域,较深的区域不发生形变,综合考虑计算精度和计算速度,在 COMSOL 软件中,表层熔池网格划分时采用极细化,非熔化区域网格划分采用超细化,具体网格划分参数如表 4 所示。

表 4 网格尺寸  
Table 4 Element size

Parameter	Top layer	Rest
Maximum element size / $\mu\text{m}$	1.07	2.07
Minimum element size / $\mu\text{m}$	0.00318	0.0239
Maximum element growth rate	1.05	1.08
Curvature factor	0.2	0.25

## 4 模拟结果分析

### 4.1 模拟物理场结果

当激光以  $300 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  的速度在样品表面移动照射时,样品表面的温度处于动态变化中,图 8 为模拟过程中表面  $x = 500 \mu\text{m}$  处的时变特性图。当激光光斑的边缘到达  $500 \mu\text{m}$  处附近时,此处温度开始迅速升高,在激光光斑离开  $500 \mu\text{m}$  点前,温度持续上升,在  $4.5 \text{ ms}$  附近温度达到最大值  $2348 \text{ K}$ ;随后激光光斑离开此点,温度迅速下降。由于连续激光对表面持续性加热,热输入较大,在热传导作用下材料表面在短时间内的冷却速度较慢,直至激光光源离开整个材料表面,表面温度才逐步冷却至室温。

在图 8 中可以看到,在整个加热过程中,在  $3.6\sim 5.5 \text{ ms}$  之间, $x = 500 \mu\text{m}$  处的温度达到液相线温度 ( $1727 \text{ K}$ ) 以上,液相状态持续时间较长,反映出该处熔池的持续时间也较长,熔池表面有充足时间进行流动平滑。同时,加热过程中材料最高温度约  $2348 \text{ K}$ ,低于 H13 材料的沸点,抛光过程不会对

表面进行烧蚀,不会产生金属蒸气,能保证更好的抛光效果,符合假设中不超过沸点的条件。

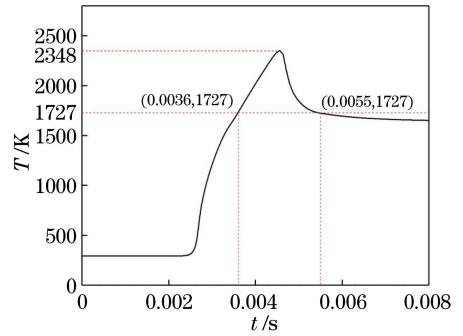


图 8 表面  $x = 500 \mu\text{m}$  处的温度曲线

Fig. 8 Temperature curve at  $x = 500 \mu\text{m}$  of surface

熔池的形成与演变是激光抛光的关键过程,影响液相材料的流动过程与效果,实际抛光过程中捕捉熔池较为困难,通过模拟能更好地观测和分析熔池的形成和演变。图 9(a)显示了实际抛光过程中垂直激光扫描方向的熔池形貌,熔池的宽度为  $600 \mu\text{m}$ ,深度为  $80 \mu\text{m}$ 。抛光过程采用的激光光源是平顶光源,光斑能量分布均匀,因此熔池的宽深比较大。

模型为二维模型,主要研究激光扫描方向的表面演变及熔池大小,图 9(b)展示了激光扫描方向的模拟熔池形状,图中 1 区域为液相区域,2 区域为固相区域,中间渐变色区域是固/液相变转换区,模拟熔池的深度为  $74 \mu\text{m}$ ,宽度接近  $800 \mu\text{m}$ 。对实验结果和模拟结果进行对比后可知,模拟的熔池深度与实验中的熔池深度之间的误差为  $7.5\%$ ,这可能是由于实际抛光过程的表面粗糙对激光的吸收具有促进作用,而模型采用的是固定吸收率,对激光能量的吸收效率更高,从而导致了更大的熔池深度。而熔池宽度的不同则是观测方向导致的,垂直于激光扫描方向的光斑边缘吸收能量小,而在平行于激光扫描方向上,由于热传导,即使激光离开该区域,还能保

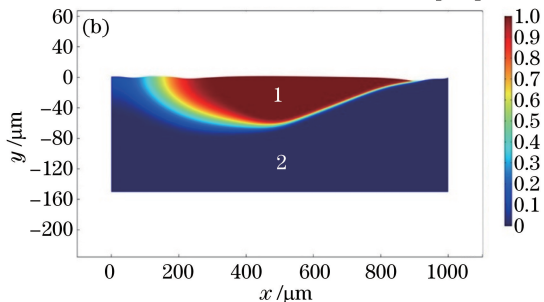
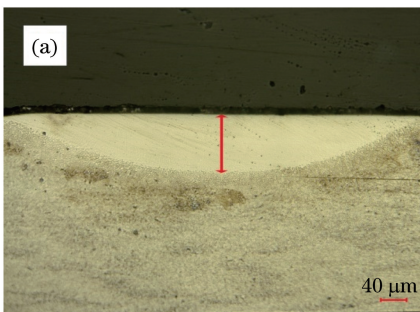


图 9 实验熔池和模拟熔池。(a)实验熔池;(b)模拟熔池

Fig. 9 Molten pools in experiment and simulation. (a) Molten pool in experiment; (b) molten pool in simulation

持一段时间的熔化状态,因此平行激光扫描方向的熔池宽度略大于垂直激光扫描方向的熔池宽度。

在激光抛光过程中,熔池形成后,液相材料的动力黏度变低,能在表面张力的作用下进行流动,流动的情况影响熔池形貌的演变。图 10 为局部放大的表面形貌演变的速度场,速度主要存在于液相熔池中。图 10(a)中熔池边缘平整,激光扫描过的区域比较平滑,表面曲率较小,熔池的流动由热毛细力主导,熔池中心的温度最高,由(14)式可

知,表面张力温度系数为负值,热毛细力方向与温度梯度方向相反,由熔池中心指向熔池边缘,因此速度方向也由熔池中心流向熔池边缘,速度分布如图 10(a)所示。

当激光继续扫描时, $x = 800 \mu\text{m}$  处的边缘表面开始熔化,此处表面曲率大,由(13)式可知,毛细力的大小正比于表面曲率,此时毛细力较大,占主导作用,材料以较快的速度向低处流动,材料流动后填平高度差。

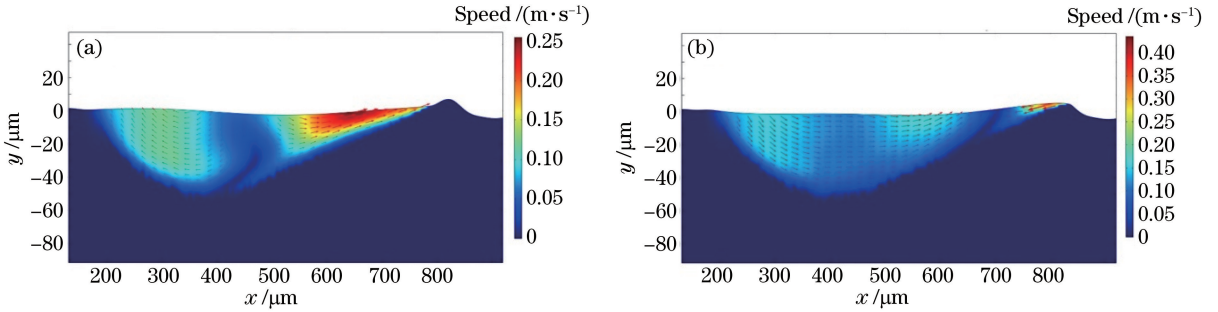


图 10 局部速度场。(a)热毛细力主导时的速度场分布;(b)毛细力主导时的速度场分布

Fig. 10 Local velocity fields. (a) Velocity field dominated by thermocapillary forces; (b) velocity field dominated by capillary force

#### 4.2 模型表面轮廓

图 11 给出抛光后实验和模拟的表面形貌。从图 11(a)可以发现,表面波峰、波谷的最大高度差由初始的  $20 \mu\text{m}$  降低至  $3 \mu\text{m}$ ,对凹凸不平的表面具有较好的平滑效果。根据表面粗糙度的计算公式可以得到模拟抛光后的表面粗糙度为  $0.4296 \mu\text{m}$ ,比实验的抛光结果( $0.4 \mu\text{m}$ )高  $7.4\%$ 。模拟与实验粗糙度之间误差的产生原因在于初始表面的误差,实际样品初始表面比较复杂(而模拟表面只采用主要频率),一些高频低幅值的表面波长可能会对抛光效果具有促进作用,故样品抛光后的粗糙度低于模拟值。

对抛光后表面轮廓进行频谱分析后可得到功率谱密度曲线,如图 11(b)所示。对比图 8(b)可以发现,功率谱密度曲线的最大幅值由初始的  $3.5 \mu\text{m}$  降低至  $0.408 \mu\text{m}$ ,也能说明激光抛光后达到了良好的抛光效果。模拟后的最大幅值  $0.58 \mu\text{m}$  对应  $0.003 \text{mm}^{-1}$  频率处,实验样品的最大幅值( $0.408 \mu\text{m}$ )也在  $0.003 \text{mm}^{-1}$  处。模拟与实验的幅值产生较大误差的原因主要在于在构建表面轮廓时,只考虑了主要的高幅值频率,抛光过程中高频表面波也会对熔池流动产生一定影响,因此会对主要频率造成较大的误差。

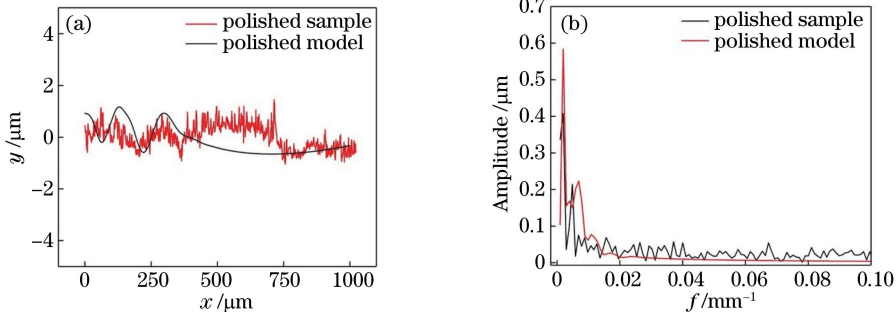


图 11 抛光后样品及模拟表面的轮廓图和频谱图。(a)表面轮廓;(b)频谱图

Fig. 11 Surface profiles and frequency spectra of polished sample and model. (a) Surface profile; (b) frequency spectra

#### 4.3 激光抛光参数的影响机理

激光抛光过程中的影响因素众多,其中激光功

率与激光扫描速度是重要的工艺参数。在模拟过程中改变功率和速度,对模拟结果也有较大影响。

图 12 为  $300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  扫描速度下和不同功率下表面  $x = 500 \mu\text{m}$  处的温度模拟结果。由图 12 可知:由于不同功率下的光斑直径和扫描速度相同,不同功率下  $x = 500 \mu\text{m}$  处的表面在相同时间下达到最高温度,最高温度和温度增加速度均随激光功率增加而增加;当光斑离开时,温度迅速降低,由于热传导的作用温度会稳定在某一数值。此外,还可以看出:功率越低,表面处于熔点以上的持续时间越短,液相材料没有足够时间进行流动;功率越大,表面处于熔点以上的时间越长,熔池持续时间也就越长,熔池内的液体有充足的时间进行流动。

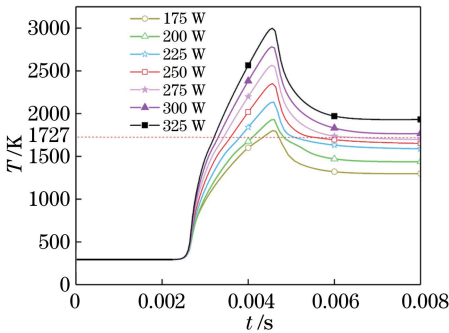


图 12 不同功率下表面  $x = 500 \mu\text{m}$  处的温度曲线

Fig. 12 Temperature curves at  $x = 500 \mu\text{m}$  of surface under different laser powers

改变模型的激光功率,可以得到不同功率下的熔池深度和表面粗糙度,统计结果如图 13 所示,可见:熔池深度随功率增加而增加,大致成正线性相关;激光功率为  $175 \text{ W}$  时,热输入较低,熔池的深度仅为  $15 \mu\text{m}$ ,随着功率增加,熔池深度也随之增加,当功率为  $325 \text{ W}$  时,热输入很大,熔池深度达到了  $140 \mu\text{m}$ ;表面粗糙度随功率增加而先减小后增大,表面粗糙度与功率成 U 型关系。

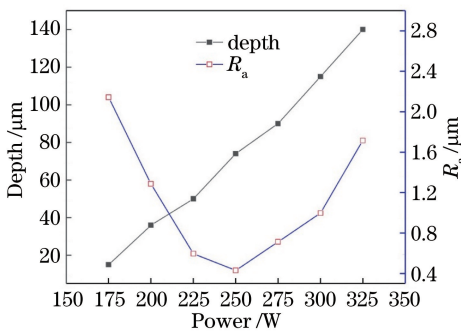


图 13 不同功率下的熔池深度和表面粗糙度

Fig. 13 Depth of molten pool and surface roughness under different laser powers

基于不同功率下的表面流动场分布来分析表面粗糙度与功率的关系。当功率为  $175 \text{ W}$  时,熔池深

度为  $15 \mu\text{m}$  左右。随着激光光源的移动,当时间为  $0.00312 \text{ s}$  时,如图 14(a)所示(图中曲线为样品表面的初始轮廓线), $700 \mu\text{m}$  附近已被填充平滑;当时间为  $0.00322 \text{ s}$  时,如图 14(b)所示, $700 \sim 800 \mu\text{m}$  处形成熔池,此时表面曲率大,高处的液相金属开始在毛细力作用下向低处流动,降低初始表面的高度差;随着激光继续移动,当时间为  $0.0033 \text{ s}$  时,如图 14(c)所示, $800 \mu\text{m}$  处附近的熔体以较大的速度向低处流动,同时由于功率较小,熔池持续时间短, $700 \mu\text{m}$  之前区域的熔体开始凝固,不再流动;当时间为  $0.00355 \text{ s}$  时,如图 14(d)所示,随着熔池的推移, $700 \sim 800 \mu\text{m}$  区域的熔体也已开始凝固,速度降低接近于 0, $800 \mu\text{m}$  附近的熔体开始向右侧低处流动。从图 14 可以看到,在整个过程中,由于较低的功率导致熔池的范围小和持续时间短,在毛细力作用下,没有充分的流动时间而提前凝固,导致样品表面的高度差未完全填平,得到较差的抛光效果。

当功率为  $300 \text{ W}$  时,熔池深度达到  $110 \mu\text{m}$ 。当时间为  $0.00226 \text{ s}$  时,初始粗糙表面在毛细力作用下已经变得平滑,如图 15(a)所示;随着激光继续向前移动(图中浅色箭头为  $x$  方向的速度场分布,深色箭头为速度场分布),此时已平滑区域的表面曲率小,毛细力小,热毛细力开始占据主导作用,材料的表面张力温度系数为负,根据(14)式,热毛细力方向与图中温度梯度箭头方向相反,熔池中的液相向两侧流动。经过一段时间的流动,当时间为  $0.00267 \text{ s}$  时,如图 15(b)所示, $200 \sim 500 \mu\text{m}$  处由于材料累积导致具有一定的凸起,产生了额外的表面形貌,增加了表面粗糙度。因此,在毛细力和热毛细力的共同作用下,表面粗糙度与功率成 U 型关系。

图 16 为  $250 \text{ W}$  功率和不同扫描速度下表面  $x = 500 \mu\text{m}$  处的温度随时间的变化,可知:当扫描速度由  $0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  增加至  $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  后,样品所能达到的最高温度由  $1900 \text{ K}$  升至  $3400 \text{ K}$ ,最高温度随速度的增加而降低。与图 12 相比,不同速度下表面温度的增加速度并不随速度的变化而变化,因为在相同的功率下,激光照射区域在单位时间内所能获取的热输入是相同的,其温度上升的速度也是相同的,直到激光光斑离开该区域,温度开始降低。速度较慢时会导致激光在同一处持续加热,造成热量累积,使温度甚至超过材料的沸点,激光光斑移动缓慢,温度处于熔点以上的时间较长,熔池的持续时间和范围随之增大。当速度较快时,激光照射区域的温度迅速升高,但激光光斑也迅速远离,表面温度只



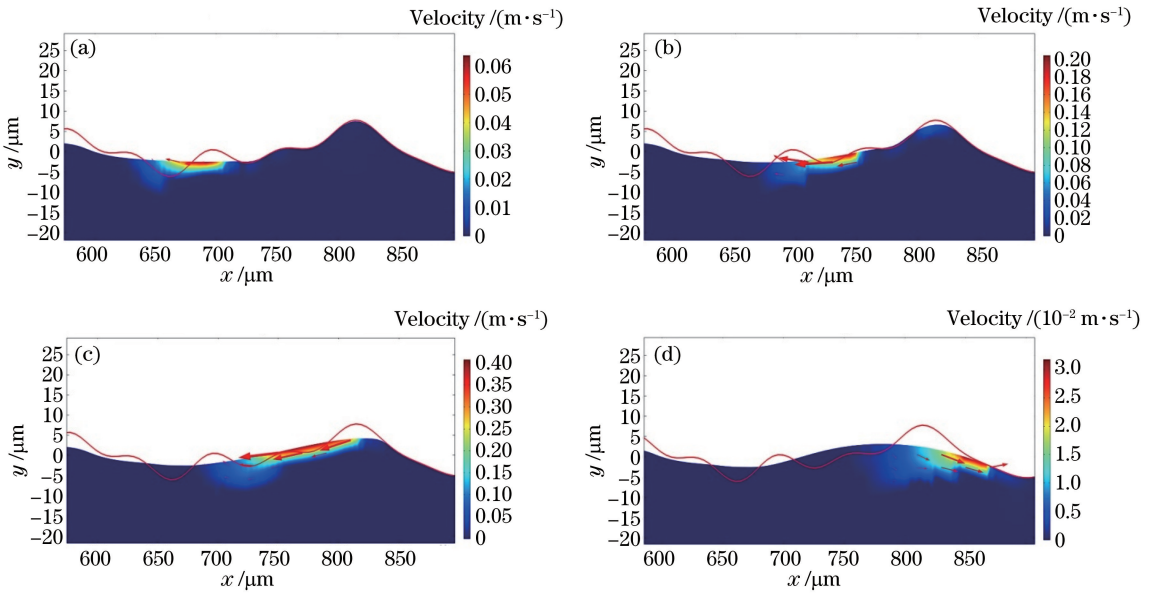


图 14 175 W 功率下不同时刻的局部速度场。(a)  $t=0.00312$  s; (b)  $t=0.00322$  s; (c)  $t=0.0033$  s; (d)  $t=0.00355$  s  
 Fig. 14 Local velocity fields at different moments under laser power of 175 W.  
 (a)  $t=0.00312$  s; (b)  $t=0.00322$  s; (c)  $t=0.0033$  s; (d)  $t=0.00355$  s

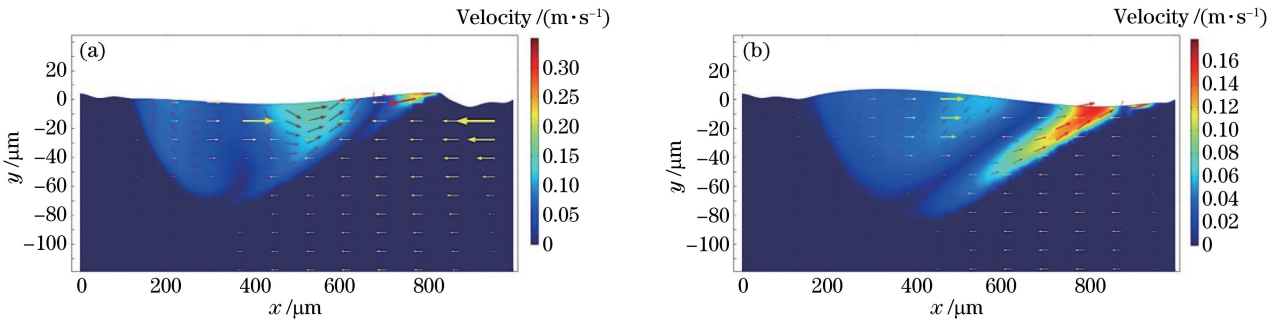


图 15 300 W 功率下不同时刻的局部速度场。(a)  $t=0.00226$  s; (b)  $t=0.00267$  s  
 Fig. 15 Local velocity fields at different moments under laser power of 300 W. (a)  $t=0.00226$  s; (b)  $t=0.00267$  s

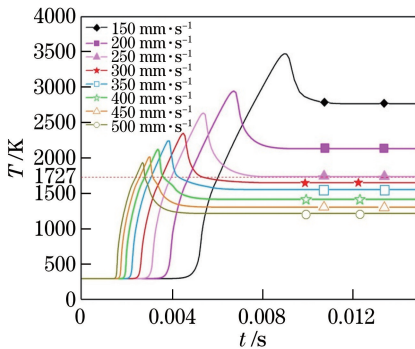


图 16 不同扫描速度下表面  $x=500 \mu\text{m}$  处的温度曲线  
 Fig. 16 Temperature curves at  $x=500 \mu\text{m}$  of surface under different scanning velocities

的深度随速度增加而减小,当速度为  $0.15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时,由于持续的热量输入,熔池的深度接近  $180 \mu\text{m}$ ;随着速度逐渐增加,单位区域的热输入减少,熔池深度逐渐减小,当速度为  $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时熔池深度减小至  $20 \mu\text{m}$ 。

表面粗糙度与扫描速度的关系也成 U 型关系。其原理与功率对表面粗糙度的影响机理类似。当扫描速度较小时,单位区域的热输入较大,形成的熔池的持续时间长,粗糙表面在表面张力作用下平滑后熔池仍然存在,此时熔池内温度梯度占据主导,熔池中心的熔体流向边缘,导致边缘材料累积,凝固后形成新的不平整表面,导致额外粗糙度的产生。当扫描速度较大时,样品表面的熔池持续时间短,凸起的材料没有充分的时间进行流动而凝固,造成不理想的抛光效果。

在短暂的时间下处于熔点之上,熔池持续时间缩短,熔池范围变小。

改变激光扫描速度,统计不同速度下熔池的深度和抛光后的表面粗糙度,结果如图 17 所示。熔池

综合上述激光功率、扫描速度对抛光结果的影

响可知,在抛光过程中,需要合理控制热输入,过低的热输入导致熔池持续时间短,粗糙的表面流动时间不充足,抛光效果不理想;而过大的热输入导致熔池持续时间长,已平滑的熔池表面在热毛细力作用下形成新的不平整表面,导致额外粗糙度的产生。

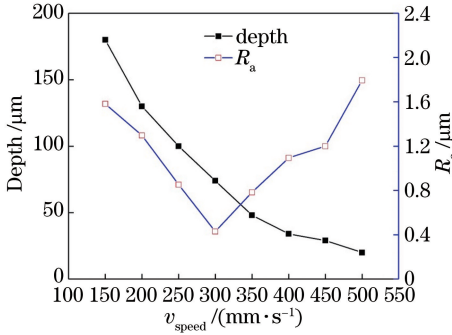


图 17 不同扫描速度下的熔池深度和表面粗糙度  
Fig. 17 Depth of molten pool and surface roughness under different scanning velocities

## 5 结 论

在多物理场耦合软件 COMSOL 中,以移动激光束为热源,利用实际自由表面频谱构建模拟表面,耦合激光抛光过程中的流动场和温度场,综合考虑毛细力和热毛细力的共同作用,建立了激光抛光的二维瞬态模型,模拟了激光抛光过程材料表面形貌的演变过程。主要得到以下结论:1)通过合成构建了模型的初始表面,该表面可以有效地呈现实际的表面轮廓。2)当熔池的表面曲率较大时,毛细力占主导作用,波峰材料流向波谷,当熔池平滑后,温度差导致的热毛细力占主导作用,熔池中心的材料流向边缘。3)过小的激光功率或过大的速度会导致热输入不足,粗糙的材料表面没有足够的时间流动,会产生较差的抛光效果;而过大的激光功率或过小的速度则会导致热输入过量,熔池持续时间过长,材料流向熔池边缘,产生额外的粗糙度。4)表面粗糙度的模拟结果与实验结果之间的误差为 7.4%,熔池深度误差为 7.5%,误差都小于 8%,表明建立的模型具有较高的精度。

所建模型为二维模型,下一步将建立三维模型,以便能够模拟出激光光斑直径等参数的影响,并将其用于实际抛光工艺的选取,提高抛光的效率和精度。

## 参 考 文 献

[1] 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.

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.

[2] 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: 35-52.

[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.

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.

[4] Lamikiz A, Sánchez J A, López de Lacalle L N, *et al.* Surface roughness improvement using laser-polishing techniques [J]. *Materials Science Forum*, 2006, 526: 217-222.

[5] Ukar E, Lamikiz A, López de Lacalle L N, *et al.* Laser polishing of tool steel with CO<sub>2</sub> laser and high-power diode laser [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, 50(1): 115-125.

[6] 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*, 2014, 63(1): 237-240.

[7] Brinksmeier E, Riemer O, Gessenharter A, *et al.* Polishing of structured molds [J]. *CIRP Annals*, 2004, 53(1): 247-250.

[8] 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.

[9] 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: 2607-2617.

[10] Miller J D, Tutunea-Fatan O R, Bordatchev E V. Experimental analysis of laser and scanner control parameters during laser polishing of H13 steel [J]. *Procedia Manufacturing*, 2017, 10: 720-729.

[11] 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.

[12] Rosa B, Hascoët J Y, Mognol P. Topography modeling of laser polishing on AISI 316L milled

- surfaces[J]. *Mechanics & Industry*, 2014, 15(1): 51-61.
- [13] 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.
- [14] Nüsser C, Sändker H, Willenborg E. Pulsed laser micro polishing of metals using dual-beam technology [J]. *Physics Procedia*, 2013, 41: 346-355.
- [15] Lambarri J, Leunda J, Soriano C, *et al.* Laser surface smoothing of nickel-based superalloys [J]. *Physics Procedia*, 2013, 41: 255-265.
- [16] 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.
- [17] Ukar E, Lamikiz A, López de Lacalle L N, *et al.* Thermal model with phase change for process parameter determination in laser surface processing [J]. *Physics Procedia*, 2010, 5: 395-403.
- [18] Momin O, Shuja S Z, Yilbas B S. CO<sub>2</sub> laser heating of surfaces: melt pool formation at surface [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(2): 463-470.
- [19] Vadali M, Ma C, Duffie N A, *et al.* Pulsed laser micro polishing: surface prediction model[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2012, 14(3): 307-315.
- [20] 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.
- [21] Shen H, Pan Y Q, Zhou J, *et al.* Forming mechanism of bump shape in pulsed laser melting of stainless steel [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2017, 139(6): 062301.
- [22] 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.
- [23] Mohajerani S, Miller J D, Tutunea-Fatan O R, *et al.* Thermo-physical modelling of track width during laser polishing of H13 tool steel [J]. *Procedia Manufacturing*, 2017, 10: 708-719.
- [24] Yuan Z F, Ke J J, Li J. Surface tension of metals and alloys[M]. Beijing: Science Press, 2006: 22-23. 袁章福, 柯家骏, 李晶. 金属及合金的表面张力 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 22-23.
- [25] Carin M. Square drop oscillation under surface tension 2D axisymmetric model[EB/OL]. (2014-05-27) [2018-12-01]. <https://www.comsol.fr/community/exchange/121/>.