

精密与超精密加工

# 基于 MOGWO 的 45<sup>#</sup>钢表面激光抛光 工艺参数多目标优化

梁强<sup>1,2\*</sup>, 徐永航<sup>1</sup>, 李永亮<sup>1,2</sup>, 王敬<sup>1,2</sup>, 杜彦斌<sup>1,2</sup>

(1.重庆工商大学 机械工程学院, 重庆 400067; 2.重庆工商大学 智能装备  
绿色设计与制造重庆市重点实验室, 重庆 400067)

**摘要:** **目的** 提高 45<sup>#</sup>钢表面激光抛光后的成形质量, 提出一种激光抛光工艺参数多目标优化方法。**方法** 构建基于功率、扫描速度、搭接距离的三因素三水平激光抛光试验, 并分别应用粗糙度测量仪、显微硬度计和超景深三维显微镜测试抛光层的粗糙度、显微硬度和抛光层深度。基于试验数据, 分别应用指数模型和二阶响应面模型构建抛光工艺参数与表面粗糙度、显微硬度、抛光深度的回归预测模型, 并对 2 种模型的预测精度进行对比分析。采用多目标灰狼优化算法 (MOGWO) 结合优劣解距离法 (TOPSIS) -CRITIC 综合评价决策体系对抛光工艺参数进行寻优和多属性决策。**结果** 二阶响应面模型具有更高的预测精度, 能够更好地反映激光抛光工艺参数与各响应目标之间的映射关系。当功率为 113 W、扫描速度为 3 m/min、搭接距离为 0.13 mm 时, 粗糙度值  $R_a$  从 11.563  $\mu\text{m}$  降至 5.713  $\mu\text{m}$ , 降幅为 50.59%, 显微硬度从 185.9HV0.5 升至 364.7HV0.5, 升幅为 96.18%, 此时的抛光深度为 0.051 mm, 最大相对误差为 7.84%。**结论** 此方法可以为其他金属材料表面激光抛光质量预测模型的构建及工艺参数寻优提供借鉴。

**关键词:** 激光抛光; 二阶响应面模型; MOGWO 算法; TOPSIS-CRITIC; 多目标优化

中图分类号: TN249; TG356.28 文献标志码: A 文章编号: 1001-3660(2024)10-0173-10

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.10.014

## Multi-objective Optimization of Laser Polishing Process Parameters for the Surface of 45<sup>#</sup> Steel Based on MOGWO

LIANG Qiang<sup>1,2\*</sup>, XU Yonghang<sup>1</sup>, LI Yongliang<sup>1,2</sup>, WANG Jing<sup>1,2</sup>, DU Yanbin<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanic Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China;

2. Chongqing Key Laboratory of Green Design and Manufacturing of Intelligent Equipment, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

**ABSTRACT:** To improve the forming quality of 45 steel surfaces after laser polishing, the work aims to propose a multi-objective optimization method of laser polishing process parameters. Laser power, scanning speed, and overlap distance

收稿日期: 2023-07-26; 修订日期: 2023-09-23

Received: 2023-07-26; Revised: 2023-09-23

**基金项目:** 重庆市自然科学基金面上项目 (CSTB2022NSCQ-MSX0473); 重庆市高校创新研究群体资助项目 (CXQT21024); 制造装备机构设计与控制重庆市重点实验室开放课题 (KFJJ2019078); 重庆工商大学研究生创新型科研资助项目 (YJSCXX2023-211-54)

**Fund:** General Project of Chongqing Natural Science Foundation (CSTB2022NSCQ-MSX0473); Innovative Research Group of Universities in Chongqing Municipality (CXQT21024); Open Subject of Chongqing Key Laboratory of Manufacturing Equipment Mechanism Design and Control (KFJJ2019078); Graduate Innovation Research Projects of CTBU (YJSCXX2023-211-54)

**引文格式:** 梁强, 徐永航, 李永亮, 等. 基于 MOGWO 的 45<sup>#</sup>钢表面激光抛光工艺参数多目标优化[J]. 表面技术, 2024, 53(10): 173-182.

LIANG Qiang, XU Yonghang, LI Yongliang, et al. Multi-objective Optimization of Laser Polishing Process Parameters for the Surface of 45<sup>#</sup> Steel Based on MOGWO[J]. Surface Technology, 2024, 53(10): 173-182.

\*通信作者 (Corresponding author)

were taken as process parameters, and surface roughness, microhardness, and polishing depth were taken as evaluation indexes to construct a 3-factor and 3-level laser polishing experiment. Before the experiment, the plate was ground flat and processed with a ball milling cutter to produce a texture and then ultrasonically cleaned with anhydrous ethanol and dried, and the zigzag scanning trajectory was used to carry out the laser polishing experiment. A roughness meter was used to measure the surface roughness of the polished surface before and after laser polishing, a microhardness tester was used to measure the microhardness of the polished layer of the material before and after laser polishing, and a super depth-of-field 3D microscope was used to measure the polishing depth after laser polishing. Based on the experimental data, the exponential model and the second-order response surface model were used to construct the regression prediction models of the laser polishing process parameters and the surface roughness, microhardness, and polishing depth regarding the construction method of the prediction model of the geometrical characteristics of the laser cladding layer. By comparing the correlation coefficient  $R$ , determination coefficient  $R^2$ , and determination adjustment coefficient  $R_{adj}^2$  with the significance test of the two models, as well as comparing the correlation between the experimental values and the predicted values of the two models, it was obtained that the second-order response surface model had a higher prediction accuracy, and it could better reflect the mapping relationship between the laser polishing process parameters and the response targets. The main effect analysis was used to study the effect law of each process parameter of laser polishing on the surface roughness, microhardness, and polishing depth of laser polishing. The multi-objective gray wolf optimization algorithm (MOGWO) was used to optimize the laser polishing process parameters so that the microhardness was as large as possible and the surface roughness and polishing depth were as small as possible. The 50 Pareto solution sets obtained were substituted into the comprehensive evaluation decision system constructed by the technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) method and CRITIC for decision making, and the best combination of laser polishing process parameters was obtained: laser power 114 W, scanning speed 3 m/min and lap distance 0.13 mm. The process test was carried out under the optimal combination of process parameters. The experimental results showed that the surface roughness of the material decreased from  $Ra$  11.563  $\mu\text{m}$  to  $Ra$  5.713  $\mu\text{m}$  under the combination of process parameters, with a decrease of 50.59%. The microhardness increased from 185.9HV0.5 to 364.7HV0.5, with an increase of 96.18%. At this time, the polishing depth was 0.051 mm, and the maximum relative error was 7.84%. It is proved that this method can provide a reference for the construction of a laser polishing quality prediction model and process parameter optimization for other metal materials.

**KEY WORDS:** laser polishing; second-order response surface model; MOGWO algorithm; TOPSIS-CRITIC; multi-objective optimization

激光抛光技术是近年来飞速发展的一种新兴表面加工技术<sup>[1-2]</sup>, 因具备非接触式的加工方式、易于自动控制、可实现复杂零件的表面抛光加工、抛光材料范围广、效率高、精度好、无污染、无废料的优势而备受研究者的关注<sup>[3-4]</sup>, 逐步在各类工业产品的表面加工中得到广泛应用。

激光抛光主要分为用于塑性材料加工的热抛光和用于脆性材料的光化学抛光 2 种<sup>[5]</sup>。金属材料的表面激光抛光属于热抛光的加工范畴, 其本质是将高功率、高能量密度的激光光斑以辐射的方式快速聚集在材料表面, 通过熔化、汽化、蒸发等一系列的物相变化, 去除材料, 实现抛光<sup>[6]</sup>。如何高效降低表面粗糙度值、有效调控抛光层硬度和深度是当下激光抛光研究的热点内容, 目前国内外学者对激光抛光工艺、工艺参数优化及激光抛光后表面形貌、微观组织及性能变化进行了相应研究。在激光抛光对表面形貌及组织性能影响方面, Li 等<sup>[7]</sup>研究了激光功率、扫描速率和扫描间距对激光抛光 316L 不锈钢表面形貌的演化规律, 并分析了抛光表面气孔缺陷的产生条件。Liu 等<sup>[8]</sup>

研究了不同工艺参数对纳秒激光抛光 S316 模具钢表面粗糙度的影响规律, 同时对比分析了抛光前后微观组织、抛光层硬度及化学成分变化情况。Xiao 等<sup>[9]</sup>对比了高强度马氏体时效钢激光抛光前后的力学性能, 并对其微观结构和相组成进行了分析。在激光抛光工艺方法方面, Liu 等<sup>[10]</sup>提出了一种大直径激光束的激光抛光方法, 与小直径激光抛光相比, 表面粗糙度降低了更多, 硬度也得到了提高。任英明等<sup>[11]</sup>提出了一种高低能量结合的双步激光抛光单晶硅的方法, 在该方法下材料原始表面粗糙度下降了 97.54%。Zhang 等<sup>[12]</sup>提出了一种采用超声振动辅助飞秒激光抛光 C/SiC 的方法, 在该方法下能够有效减少材料表面氧化, 提高表面质量, 获得无缺陷的光滑平整表面。Wu 等<sup>[13]</sup>采用了一种激光-化学复合抛光钛合金的试验方法, 试验后基体表面未发现重熔层与热影响区, 表面粗糙度下降了 80.59%, 基体的耐腐蚀性得到了显著提高。在激光抛光工艺参数优化方面, 李道齐等<sup>[14]</sup>以激光功率、扫描速度、离焦量和重复频率为因素, 以 AISI304 不锈钢表面粗糙度为评价指标, 通过极差

分析获得了最佳工艺参数组合,在最佳工艺参数组合下材料表面粗糙度降低了 67%。Solheid 等<sup>[15]</sup>以激光功率、扫描速度和离焦量等工艺参数作为因素,采用线性回归与人工神经网络预测了表面粗糙度与热影响区深度,并采用多目标遗传算法获得了最佳工艺参数组合。Meylan 等<sup>[16]</sup>以光斑尺寸、扫描速度、最大熔池温度和搭接率为变量,表面粗糙度和波纹度为输出进行了多目标优化,优化后表面粗糙度下降了 86.84%。周浩等<sup>[17]</sup>为降低 S136D 模具钢表面粗糙度,通过优化连续激光与脉冲激光的各类参数,使材料表面粗糙度  $Ra$  由  $7.973\text{ }\mu\text{m}$  降低至  $0.670\text{ }\mu\text{m}$ 。黄旭东等<sup>[18]</sup>基于响应面法构建了脉冲光纤激光抛光工艺参数与表面粗糙度的回归模型,通过寻优获得到了最佳工艺参数组合,使 TC4 合金表面粗糙度  $Ra$  由  $0.325\text{ }\mu\text{m}$  降低至  $0.111\text{ }\mu\text{m}$ 。

综上可知,金属激光抛光是多参数耦合相互作用的过程,其抛光效果及抛光层的性能取决于多项评价指标。目前关于激光抛光工艺参数的优化多以单目标为主,即降低表面粗糙度,但对抛光层的其他评价指标的研究较少。关于如何精确构建激光抛光工艺参数与不同指标间的映射关系并综合、客观对激光抛光工艺参数进行寻优的研究鲜有报道。本文以面向应用的数控铣削 45<sup>#</sup>钢为研究对象,设计相关试验,构建激光抛光工艺参数与各优化目标之间的指数模型和二阶响应面模型,对比 2 个模型的预测精度,采用 MOGWO 算法结合 TOPSIS-CRITIC 综合评价决策体系进行寻优及多属性决策,获得最佳工艺参数组合并通过试验进行验证。

## 1 激光抛光试验

### 1.1 设备与方法

采用的激光抛光试验设备为 ZT-J-55M 型连续光纤激光加工机床,光束为高斯光束,焦平面处激光光

斑直径为  $0.1\text{ mm}$ ,最大激光功率为  $500\text{ W}$ ,最大加工速度为  $30\text{ m/min}$ 。抛光过程中的辅助气体为氮气,气压为  $0.6\text{ MPa}$ ,考虑到实际抛光过程中火花飞溅会堵塞激光喷嘴进而影响正常的出光,因此离焦量选择  $+2\text{ mm}$ 。以热轧 45<sup>#</sup>钢板材作为基体材料,板材规格为  $180\text{ mm}\times 80\text{ mm}\times 11\text{ mm}$ ,试验前先利用平面磨床对上下平面进行磨平,然后在数控铣床上应用球头铣刀加工出纹理,抛光前对基体板材用无水乙醇进行超声清洗并进行干燥处理。激光轨迹为“弓”字形,每次抛光区域大小  $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ ,如图 1 所示。抛光后待其冷却至室温,使用电火花线切割加工成  $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 11\text{ mm}$  大小的试样,超声清洗并烘干备用。

应用 LEICA DVM6 超景深显微镜进行表面微观形貌观察,抛光前试验材料的表面形貌如图 2a 所示。应用触针式 TIME3221 表面粗糙度测量仪对加工表面进行粗糙度测量,其测量轮廓迹线如图 2b 所示,测量取样长度为  $2.5\text{ mm}$ ,重复测量 5 次后取均值,抛光前表面粗糙度  $Ra$  为  $11.563\text{ }\mu\text{m}$ 。应用 HV-1000B 显微硬度计对抛光前后平面进行显微硬度测量,加载条件如下:试验力为  $500\text{ N}$ ,加载时间为  $10\text{ s}$ ,每组测量 3 次后取均值,抛光前表面显微硬度为  $185.9\text{ HV}0.5$ 。

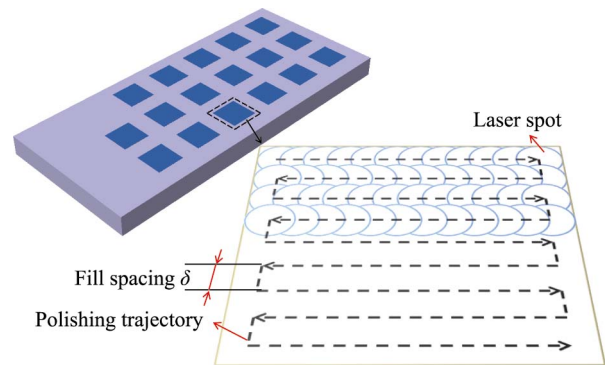


图 1 激光抛光试验方法示意图  
Fig.1 Schematic diagram of the experimental method of laser polishing

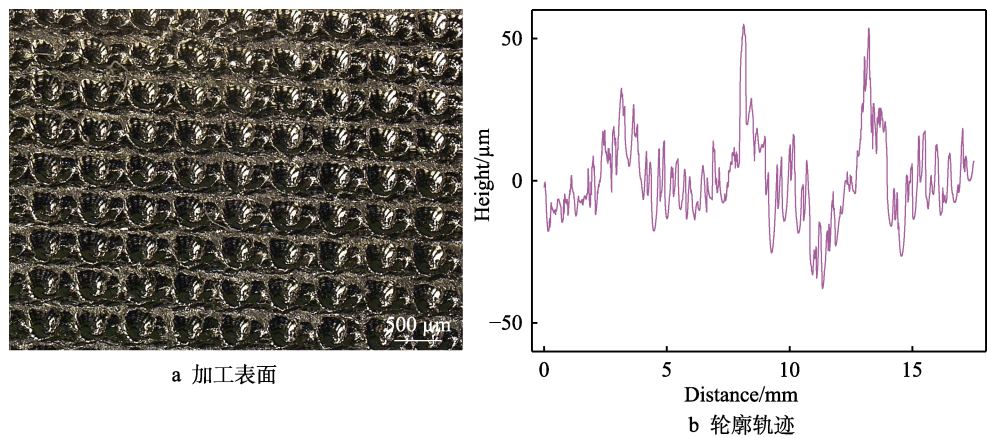


图 2 材料表面形貌及轮廓迹线  
Fig.2 Surface morphology and contour trace of material: a) machined surface; b) contour trace

1.2 方案设计

本次试验以功率  $P$ 、扫描速度  $v$ 、搭接距离  $\delta$  为变量,采用 Box-Behnken Design (BBD) 方法进行三因素三水平的试验设计,共 17 组试验,试验设计方案如表 1 所示。激光抛光层的表面质量、厚度及力学性能是评价抛光层性能的重要指标,因此,本文选择抛光表面粗糙度值、抛光层硬度和抛光深度作为响应目标。各响应目标的测量方法如图 3 所示,表面粗糙度的测量轨迹垂直于抛光路径,测量 5 次后取均值。显微硬度测量位置在抛光表面,选取 3 个点进行测量后取均值;抛光深度测量位置为垂直于抛光路径的截面,考虑到重熔区 (Remelt Zone, RZ) 和热影响区 (Heat Affected Zone, HAZ) 较薄,并且测量时会因 RZ 和 HAZ 区分度低而造成测量误差较大,因此抛光

深度选择测量 “RZ+HAZ” 层厚度。各响应目标的测量值见表 1。

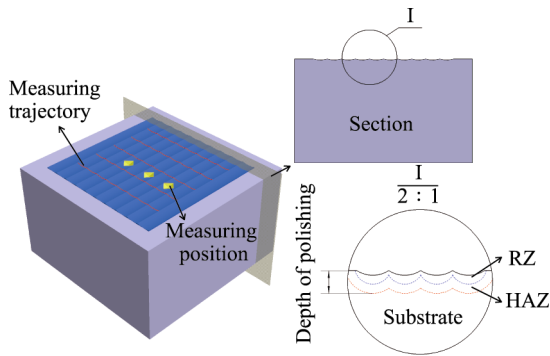


图 3 抛光后各响应目标测量方法示意图  
Fig.3 Schematic diagram of measurement methods for each response target after laser polishing

表 1 激光抛光试验分组  
Tab.1 Experiment groups of laser polishing

No.	Laser power $P/W$	Scanning speed $v/$ ( $m \cdot min^{-1}$ )	Fill spacing $\delta/mm$	Surface roughness/ $\mu m$	Microhardness (HV0.5)	Depth of polishing/ $mm$
1	100	3	0.15	6.304	363.9	0.051
2	200	3	0.15	6.978	402.5	0.086
3	100	9	0.15	11.469	235.9	0.044
4	200	9	0.15	5.510	381.6	0.075
5	100	6	0.1	10.429	274.7	0.044
6	200	6	0.1	6.392	395.6	0.083
7	100	6	0.2	9.035	309.3	0.048
8	200	6	0.2	6.616	403.7	0.084
9	150	3	0.1	5.699	394.9	0.070
10	150	9	0.1	7.995	329.2	0.065
11	150	3	0.2	5.705	397.8	0.074
12	150	9	0.2	6.797	343.5	0.068
13	150	6	0.15	6.477	373.8	0.071
14	150	6	0.15	6.508	378.7	0.067
15	150	6	0.15	6.709	359.2	0.072
16	150	6	0.15	6.322	366.2	0.074
17	150	6	0.15	6.484	359.4	0.072

2 激光抛光目标模型构建

2.1 模型构建

为了进一步对激光抛光工艺参数进行优化,需构建基于 3 个响应的目标模型。模型预测精度的高低决定了优化后结果的精准程度。因此,本文参考激光熔覆层几何特征预测模型的构建方法,分别采用指数模型<sup>[19-20]</sup>和二阶响应面模型<sup>[21]</sup>对 3 个响应目标进行模型构建,通过对比各模型的预测精度,选择预测精度最优的模型进行优化。指数模型和二阶响应面模型的表达形式分别如式 (1) 和式 (2) 所示。

$$Z = cP^\lambda v^\mu \delta^\tau + b \tag{1}$$

式中:  $Z$  为目标响应值;  $c$ 、 $b$  为拟合系数;  $\lambda$ 、 $\mu$ 、 $\tau$  分别为激光功率、扫描速度和搭接距离的影响指数。

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n (\beta_i x_i) + \sum_{i=1}^n \sum_{j \geq i}^n (\beta_{ij} x_i x_j) + \varepsilon \tag{2}$$

式中:  $Y$  为响应目标估计值;  $x_i$ 、 $x_j$  为  $n$  维自变量  $x$  的第  $i$ 、 $j$  个分量,  $n=3$ ;  $\beta_0$ 、 $\beta_i$ 、 $\beta_{ij}$  为回归系数;  $\varepsilon$  为误差。

构建指数模型时,以激光抛光工艺参数为自变量,分别以抛光表面粗糙度、抛光层硬度和抛光深度为目标响应值,运用 1stOpt 软件以麦夸特法 (Levenberg-Marquardt) 作为优化算法对 17 组试验数据进行拟合,



并获得相应指数模型, 见式 (3) ~ (5)。

$$Z_{sr} = 1879\,910.126\,34(P^{-3.838\,43}v^{1.551\,90}\delta^{-0.837\,51}) + 5.893\,69 \quad (3)$$
$$Z_{hv} = 31\,806.992\,79(P^{0.004\,55}v^{-0.001\,81}\delta^{0.000\,67}) - 32\,036.158\,70 \quad (4)$$
$$Z_{dp} = 2.343\,03(P^{0.020\,12}v^{-0.002\,32}\delta^{0.001\,636}) - 2.504\,23 \quad (5)$$

运用 Design-expert 软件拟合如式 (2) 所示的抛光工艺参数与各响应目标之间的二阶响应面模型, 其结果见式 (6) ~ (8)。

$$Y_{sr} = 15.451\,11 - 0.145\,31P + 2.590\,42v - 54.198\,23\delta - 0.011\,056Pv + 0.161\,72P\delta - 2.006\,28v\delta + 5.267\,93 \times 10^{-4}P^2 - 0.027\,988v^2 + 120.251\,68\delta^2 \quad (6)$$
$$Y_{hv} = 184.304\,17 + 2.841\,98P - 40.210\,83v + 508.066\,67\delta + 0.178\,44Pv - 2.643\,33P\delta + 19.055\,56v\delta - 8.391\,33 \times 10^{-3}P^2 - 0.051\,296v^2 - 254.666\,67\delta^2 \quad (7)$$
$$Y_{dp} = -0.055\,68 + 1.127 \times 10^{-3}P + 1.568\,75 \times 10^{-3}v + 0.166\,62\delta - 6.583\,33 \times 10^{-6}Pv - 2.75 \times 10^{-4}P\delta - 1.50 \times 10^{-3}v\delta - 2.310 \times 10^{-6}P^2 - 1.291\,67 \times 10^{-4}v^2 - 0.295\delta^2 \quad (8)$$

对构建的各模型进行显著性检验, 其结果如表 2 和图 4 所示。由表 2 可知, 2 种模型的相关系数  $R$  均大于 0.8, 二阶响应面模型的  $R$  均大于指数模型的  $R$ , 说明二阶响应面模型的准确性和泛化能力优于指数模型的。除了  $R$  值外, 还可以通过计算确定系数  $R^2$  和调整确定系数  $R^2_{adj}$  这 2 个统计量来衡量模型的精确性, 通常  $R^2$  和  $R^2_{adj}$  越接近 1, 回归模型的拟合效果越优, 二阶响应面模型的  $R^2$  和  $R^2_{adj}$  值都与 1 接近, 并且均大于指数模型的, 可认为二阶响应面模型更加可

靠、预测精度更高。2 种模型关于 3 个响应目标试验值与预测值之间的相关程度如图 4 所示, 直线为预测结果与试验值最佳拟合线, 可以看出, 与指数模型相比, 二阶响应面模型的预测值更贴近该直线。综上, 本文构建的二阶响应面模型具有更高的预测精度, 能够更好地反映激光抛光工艺参数与各响应目标之间的映射关系。

2.2 影响规律

采用主效应法分析激光抛光各工艺参数对抛光表面粗糙度、抛光层硬度和抛光深度的影响规律, 结果如图 5 所示。抛光后表面形貌与抛光层深度分别如图 6 和图 7 所示。抛光表面粗糙度的主效应图如图 5a 所示, 可以看出, 功率  $P$  对表面粗糙度值的影响最大, 其次为扫描速度  $v$ , 该值与表面粗糙度值呈现正相关性, 而搭接距离  $\delta$  对表面粗糙度值的影响呈现先减小后增大的趋势。这是因为当功率  $P$  较小时, 激光能量在基体表面形成的熔池较小, 熔池表面张力不足以使熔体填入波谷, 如图 6a 所示, 激光抛光后的形貌与未抛光前的比较接近, “熔峰”现象不明显, 其表面粗糙度  $Ra$  为 11.469  $\mu\text{m}$ , 抛光效果较差。而随着功率  $P$  的增大, “熔峰填谷”现象更加明显, 在图 6b 中已看不到原始加工痕迹, 抛光后基体表面粗糙度  $Ra$  下降至 5.510  $\mu\text{m}$ , 下降了 52.35%, 抛光效果显著。扫描速度  $v$  增大, 单位时间内照射到基体表面的能量减少, 如图 6c 所示, 可明显观察到激光抛光后基体表面在熔凝作用下呈现的形貌, 有明显的“熔峰填谷”现象, 抛光后粗糙度  $Ra$  相较于原表面下降至 5.699  $\mu\text{m}$ , 而图 6d 的形貌表现出少许“熔峰”现象, 但熔体未能“填谷”。搭接距离  $\delta$  对金属表面抛光的影响较为复杂, 当搭接距离  $\delta$  较小时, 在激光抛光过程中, 下一道次的热熔会对上一道次已抛光区域产生“过熔”现象, 导致出现次生粗糙度的情况。随着搭接距离  $\delta$  增大, 表面粗糙度值有所下降, 而随着搭接距离  $\delta$  持续增大, 道次之间会由于无法结合而出现部分区域没有受到激光辐照作用的情况, 依然会在抛光表面出现次生粗糙度的情况。

表 2 模型预测精度对比						
Tab.2 Comparison of model prediction accuracy						
Prediction index	Exponential model			Quadratic response surface model		
	$R$	$R^2$	$R^2_{adj}$	$R$	$R^2$	$R^2_{adj}$
Surface roughness	0.958	0.919	0.899	0.997	0.994	0.987
Microhardness	0.929	0.864	0.833	0.991	0.983	0.960
Depth of polishing	0.982	0.964	0.956	0.993	0.986	0.969

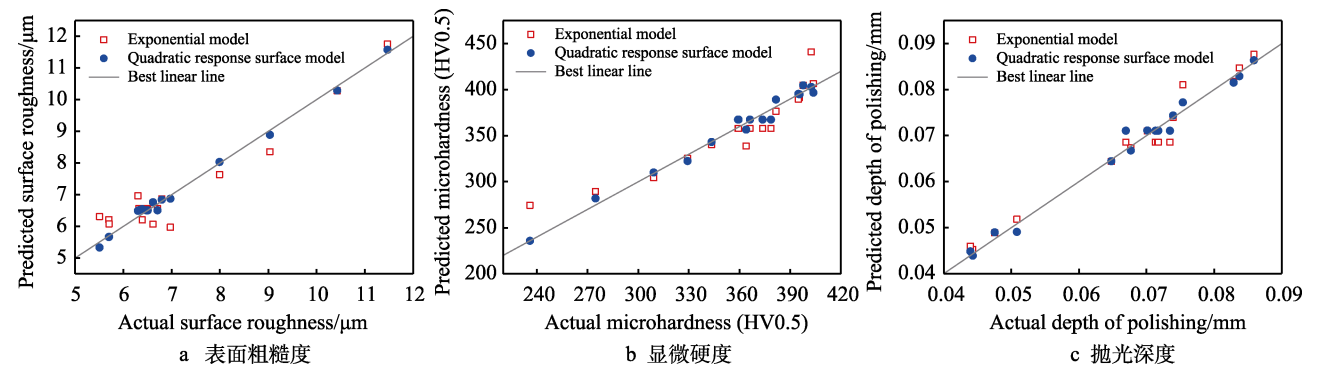


图 4 预测值与试验值相关性检验

Fig.4 Correlation between actual values and predicted value: a) surface roughness; b) microhardness; c) depth of polishing

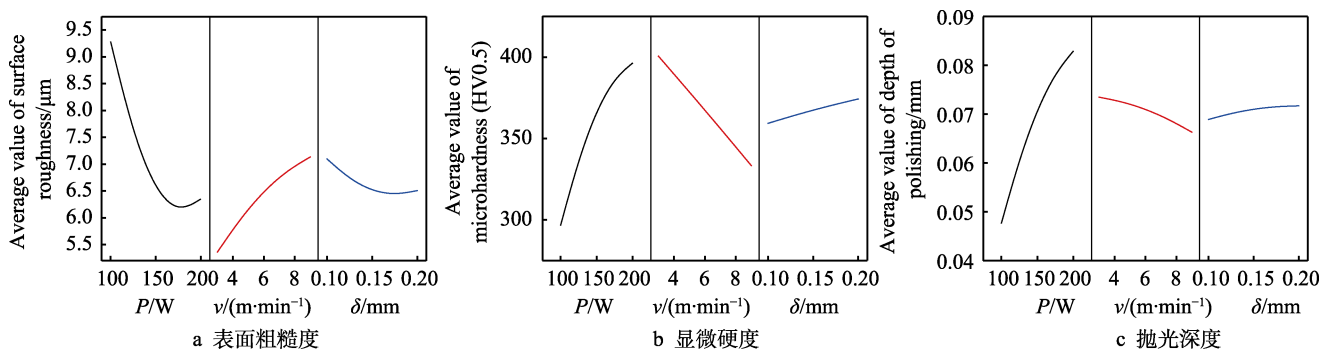


图 5 各设计变量的主效应分析  
Fig.5 Main effects plot of design variables: a) surface roughness; b) microhardness; c) depth of polishing

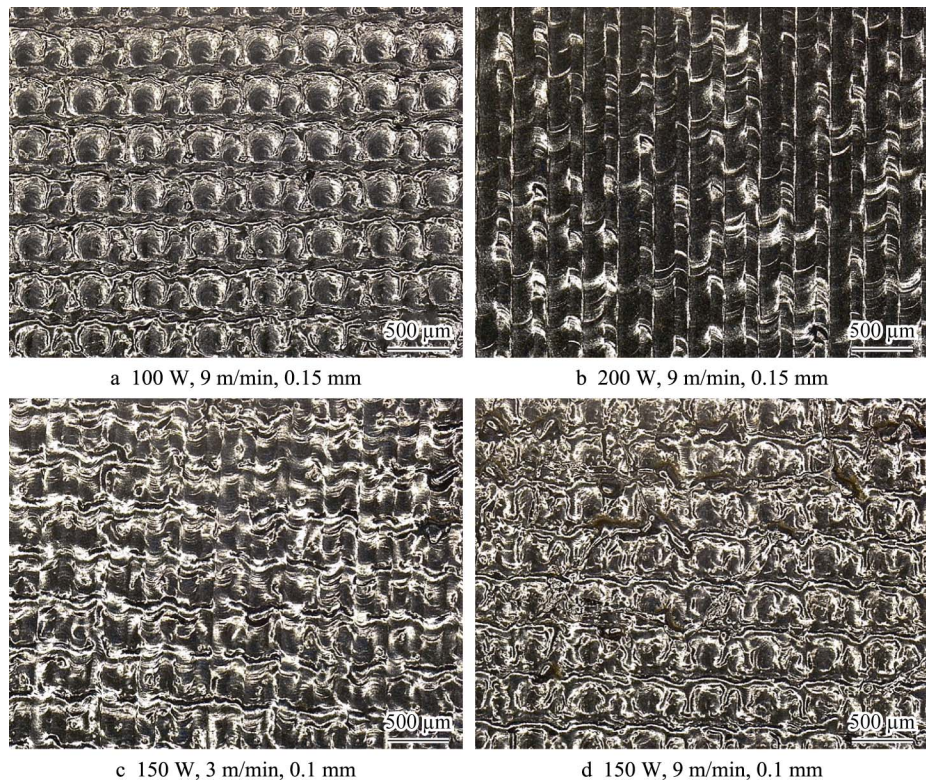


图 6 抛光表面形貌  
Fig.6 Morphology of polished surface

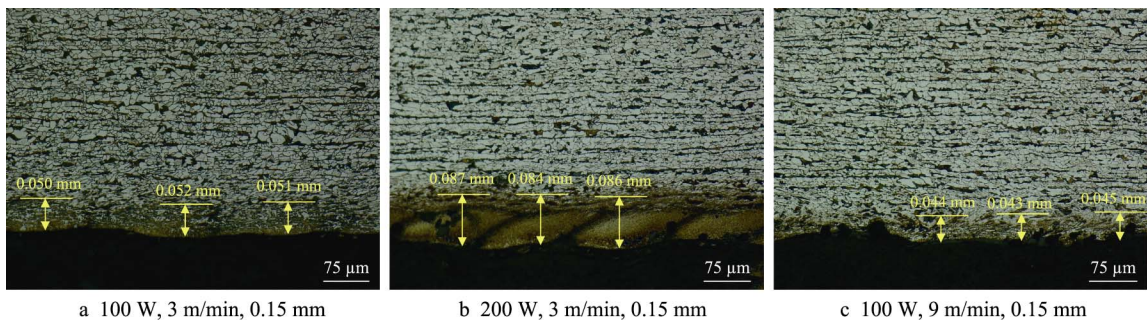


图 7 抛光层深度  
Fig.7 Depth of polishing layer

显微硬度的主效应图如图 5b 所示。可以看出，功率  $P$  对显微硬度的影响最大，其次为扫描速度  $v$ ，而搭接距离  $\delta$  的影响最小。随着功率  $P$  的增大，扫描速度  $v$  减小，基体表面显微硬度显著增大，这是因为基体材料为热轧 45# 钢，其组织为铁素体+珠光体，激

光抛光时表层金属快速升温而后快速冷却，抛光层组织发生马氏体转变，同时功率  $P$  增大、扫描速度  $v$  减小，使单位面积能量提高，马氏体转变更加充分，表面显微硬度升高。

抛光深度的主效应图如图 5c 所示。可以看出，



功率  $P$  对抛光深度的影响最大, 其次为扫描速度  $v$ , 搭接距离  $\delta$  的影响最小。增加功率  $P$ 、降低扫描速度  $v$  可以提高抛光时基体单位面积的能量, 使更大区域的基体发生马氏体转变, 进而增大抛光层厚度。应用 LEICA DVM6 超景深显微镜观测抛光深度, 如图 7a 和图 7b 所示, 随着功率  $P$  的增大, 抛光层厚度由 0.051 mm 增至 0.086 mm, 如图 7a 和图 7c 所示, 随着扫描速度  $v$  的增大, 抛光层厚度由 0.051 mm 降至 0.044 mm。

### 3 工艺参数优化与验证

#### 3.1 MOGWO 算法原理

MOGWO 是 2016 年由 Mirjalili 等<sup>[22]</sup>提出的一种通过模拟野生狼群的社会等级和集群捕食策略而设计的元启发式算法, 该算法在优化过程中引入了一定程度的随机性和探索性, 有助于摆脱局部最优状态, 同时还具有适用性广且收敛速度快的特点。该算法将要优化的参数看作灰狼种群, 狼群分为 4 个等级, 即  $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \gamma \rightarrow \omega$ ,  $\alpha$  等级最高,  $\omega$  等级最低。每只灰狼的位置为  $G = \{G_1, G_2, \dots, G_N\}$ , 其中  $N$  为空间维度, 寻优过程中每只灰狼按照式 (9) 寻找猎物目标。

$$\begin{cases} D = E \cdot G_p(t) - G(t) \\ G(t+1) = G_p(t) - A \cdot D \\ A = 2a \cdot r_1 - a \\ E = 2r_2 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $D$  为距离矢量;  $t$  为迭代次数;  $G_p(t)$  为猎物位置;  $A$ 、 $E$  为系数向量;  $r_1$ 、 $r_2$  为  $[0,1]$  之间的随机向量;  $a$  为收敛因子,  $a = 2 - 2(t/t_{\max})$ ,  $t_{\max}$  为最大迭代次数。

在每代更新结束后, 通过计算灰狼个体适应度值, 确定非支配最优解并更新 Archive 种群, 在更新 Archive 种群时需要判断 Archive 种群个体数是否超过存档最大个体数量的要求, 若超过则根据自适应网格规则, 重新安排目标空间的划分, 找到最拥挤的区域, 忽略掉其中一个解, 并将最新解插入最不拥挤的区域。同时, 根据轮盘赌策略从 Archive 种群中选择  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  3 只灰狼的位置, 并以此位置信息为基础, 通过式 (10) 计算其余灰狼位置。迭代至最大迭代次数后, Archive 种群中保存的解即为一组最优 Pareto 解集。MOGWO 算法的流程如图 8 所示。

$$\begin{aligned} G_1 &= G_\alpha(t) - A_1 \cdot |E_1 \cdot G_\alpha(t) - G(t)| \\ G_2 &= G_\beta(t) - A_2 \cdot |E_2 \cdot G_\beta(t) - G(t)| \\ G_3 &= G_\gamma(t) - A_3 \cdot |E_3 \cdot G_\gamma(t) - G(t)| \\ G(t+1) &= \frac{G_1 + G_2 + G_3}{3} \end{aligned} \quad (10)$$

式中:  $G_\alpha$ 、 $G_\beta$ 、 $G_\gamma$  分别为头狼  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  当前的位置;  $G(t)$  为其余候选灰狼的当前位置;  $G(t+1)$  为其余候选灰狼的更新位置。

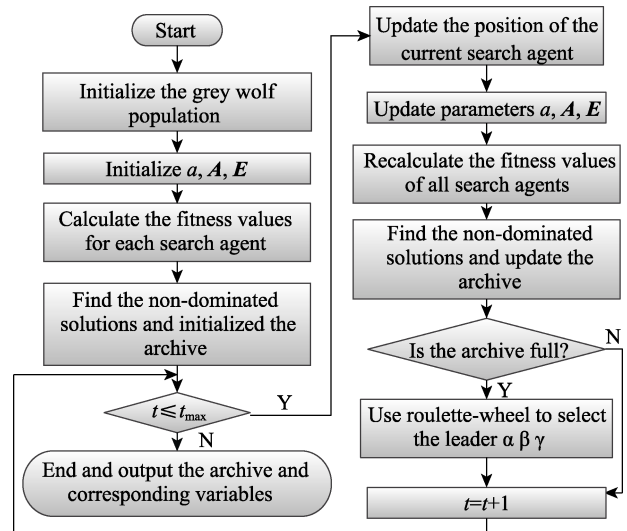


图 8 MOGWO 算法流程图

Fig.8 Flow chart of the MOGWO algorithm

#### 3.2 多目标优化模型

将抛光表面粗糙度值 ( $Ra$ )、抛光层硬度 ( $H$ ) 和抛光深度 ( $D$ ) 定义为 3 个优化目标, 其中表面粗糙度值越低, 抛光效果越好, 所以表面粗糙度值应尽可能小; 抛光层硬度越高, 表面耐磨性越好, 故期望硬度值尽可能大; 而抛光深度越小, 则对基体的影响越小。因此, 激光抛光工艺参数多目标优化模型如式 (11) 所示。

$$\begin{cases} Ra = f_{1\min}(P, v, \delta) \\ H = f_{2\max}(P, v, \delta) \\ D = f_{3\min}(P, v, \delta) \end{cases} \quad (11)$$

约束条件是激光抛光过程中各工艺参数水平的取值范围, 由实际试验条件和试验方案决定, 因此 3 个工艺参数的约束条件如式 (12) 所示。

$$\begin{cases} 100 \leq P \leq 200 \\ 3 \leq v \leq 9 \\ 0.1 \leq \delta \leq 0.2 \end{cases} \quad (12)$$

#### 3.3 优化结果评估与验证

基于 MOGWO 算法对激光抛光工艺参数进行优化。MOGWO 算法参数设置种群规模为 100, 它决定了在每次迭代中同时评估和演化候选解决方案的个数。设置迭代次数为 200, 它决定了终止迭代时算法的迭代次数。设置存档数为 50, 它影响了最终 Pareto 前沿解集的数目。所有参数的选取均由试错法获得。优化结果如图 9 所示, 其中 Pareto 前沿解集中包含 50 组解。

为减小主观因素对最优参数组合选取的影响, 综合考虑表面粗糙度、抛光层硬度和抛光层深度 3 个指标, 对 Pareto 前沿解集中的 50 组解进行评估, 本文采用 TOPSIS<sup>[23]</sup>与 CRITIC<sup>[24]</sup>相结合的方法构建综合评价决策体系, 将经 MOGWO 算法寻优得到的 Pareto 解集代入综合评价指标中进行计算与决策, 具体过程如图 10 所示。

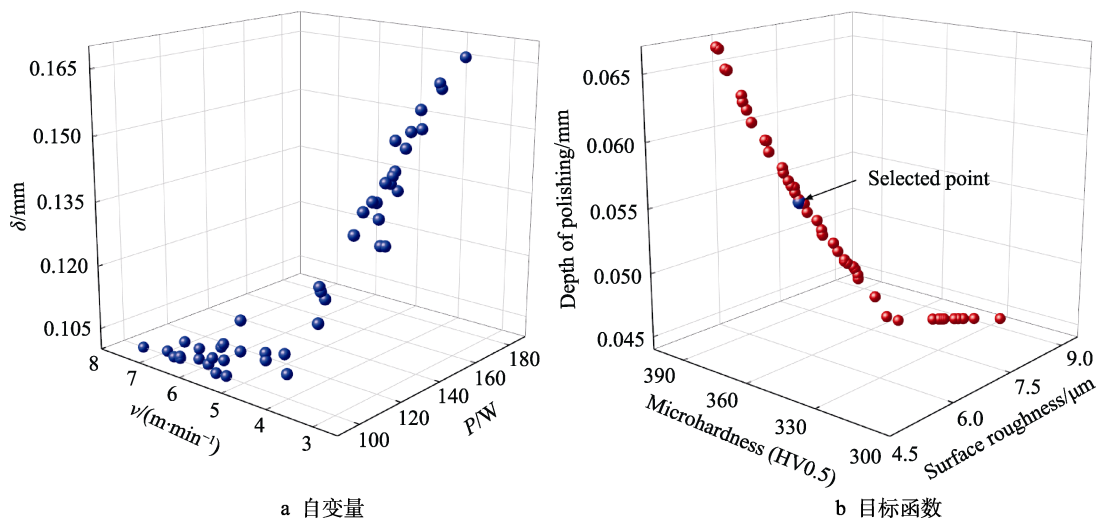


图 9 Pareto 前沿解集

Fig.9 Pareto front solution set: a) independent variable; b) objective function

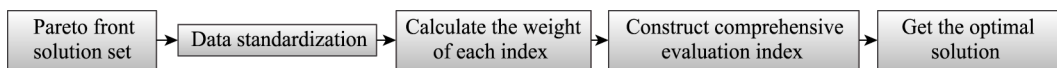


图 10 TOPSIS 和 CRITIC 决策流程图

Fig.10 Flowchart of TOPSIS and CRITIC

TOPSIS 法通过将各方案与最优方案的接近程度作为评价标准,计算出各个方案的贴近程度。在使用 TOPSIS 法度量样本差距之前需要对各指标数据进行正向化处理,以使数据符合分析和建模要求。本文研究的 3 个目标中表面粗糙度值和抛光层深度为越小越好,因此为极小型指标,采用式 (13) 进行标准化处理;抛光层硬度为越大越好,因此为极大型指标,采用式 (14) 进行标准化处理。

$$s_{ij} = \frac{q_{ij, \max} - q_{ij}}{q_{ij, \max} - q_{ij, \min}} \quad (13)$$

$$s_{ij} = \frac{q_{ij} - q_{ij, \min}}{q_{ij, \max} - q_{ij, \min}} \quad (14)$$

式中:  $q_{ij}$  为第  $i$  组解对应的第  $j$  个评价指标,  $i=1, 2, \dots, k$ ,  $k$  为待评价的解个数,  $k=50$ ,  $j=1, 2, \dots, m$ ,  $m$  为优化目标个数,  $m=3$ ;  $q_{ij, \max}$  和  $q_{ij, \min}$  分别为第  $i$  组解对应的第  $j$  个评价指标的最大值与最小值;  $Q=[q_{ij}]_{k \times m}$  为经 MOGWO 算法得到的 Pareto 解集组成的矩阵。标准化处理好的数据构成  $S$  矩阵。

在综合评价决策体系中,3 个优化目标的重要程度不同,因此本文采用 CRITIC 法计算衡量 3 个目标的权重值。该方法通过计算优化目标的对比强度和目标之间的冲突性来综合计算各优化目标的客观权重<sup>[25]</sup>。其中目标对比强度常用优化目标的标准差  $\sigma_j$  来表征,而指标间的冲突性  $\zeta_j$  则用式 (15) 进行计算。

$$\zeta_j = \sum_{i=1}^k (1 - \rho_{ij}) \quad (15)$$

式中:  $\rho_{ij}$  为评价指标之间的 Pearson 相关系数。

结合评价指标的对比强度和冲突性计算各优化目标的权重值,计算方法如式 (16) 所示,计算结果

见表 3。

$$W_j = \frac{\sigma_j \times \zeta_j}{\sum_{j=1}^m (\sigma_j \times \zeta_j)} \quad (16)$$

表 3 各指标的权重  
Tab.3 Weight of each index

Objective	$\sigma_j$	$\zeta_j$	$W_j$
Surface roughness	0.273	2.050	0.249
Microhardness	0.282	3.863	0.486
Depth of polishing	0.307	1.938	0.265

$s_j^+$  为  $S$  矩阵中第  $j$  列元素的最大值,  $s_j^-$  为  $S$  矩阵中第  $j$  列元素的最小值。分别由式 (17) 和式 (18) 计算矩阵  $S$  中各个解与  $s_j^+$ 、 $s_j^-$  之间的距离  $D_{si}^+$  和  $D_{si}^-$ , 并由式 (19) 计算各个解的贴近程度  $S_{ti}$ , 得出各个解的排序,  $S_{ti}$  值越大,说明该解越优,排序越高。排名前 10 组的解如表 4 所示,选择排名第 1 的工艺参数组合作为最佳工艺参数进行后续的工艺试验验证。

$$D_{si}^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m W_j (s_j^+ - s_{ij})^2} \quad (17)$$

$$D_{si}^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m W_j (s_j^- - s_{ij})^2} \quad (18)$$

$$S_{ti} = \frac{D_{si}^-}{D_{si}^+ + D_{si}^-} \quad (19)$$

选用表 4 中  $S_{ti}$  得分排名第 1 的解进行适量圆整,得到最佳工艺参数组合如下:  $P=113$  W,  $v=3$  m/min,  $\delta=0.13$  mm。为了验证优化工艺参数的准确性,采用排名第 1 即最佳工艺参数组合与排名第 25 和第 50 的

表 4 前 10 组解  
Tab.4 Top 10 solutions

No.	Laser power <i>P</i> /W	Scanning speed <i>v</i> /(m·min <sup>-1</sup> )	Fill spacing $\delta$ /mm	<i>S</i> <sub>ti</sub>
1	113.002	3.000	0.127	0.819
2	114.469	3.000	0.126	0.817
3	113.528	3.000	0.126	0.816
4	115.319	3.006	0.126	0.816
5	116.010	3.006	0.127	0.815
6	116.879	3.018	0.129	0.814
7	119.407	3.000	0.134	0.813
8	111.939	3.001	0.124	0.811
9	115.319	3.024	0.125	0.809
10	117.852	3.024	0.127	0.808

参数组合进行工艺试验。排名第 25 和第 50 的工艺参数组合适量圆整后分别为  $P=106\text{ W}$ ,  $v=3\text{ m/min}$ ,  $\delta=0.11\text{ mm}$  和  $P=100\text{ W}$ ,  $v=4\text{ m/min}$ ,  $\delta=0.10\text{ mm}$ 。抛光面粗糙度值、抛光层硬度和抛光层深度预测结果及试验结果见表 5, 试验值与预测值基本吻合, 最大相

对误差为 7.84%。采用最佳工艺参数组合进行激光抛光后抛光面形貌、轮廓迹线和抛光层深度如图 11 所示。激光抛光后表面粗糙度  $Ra$  由  $11.563\text{ }\mu\text{m}$  降至  $5.713\text{ }\mu\text{m}$ , 降幅为 50.59%; 激光抛光后表面显微硬度由  $185.9\text{ HV}0.5$  升至  $364.7\text{ HV}0.5$ , 升幅为 96.18%。

表 5 优化预测结果与试验结果对比  
Tab.5 Comparison of optimized prediction results and experimental results

No.	Index	Surface roughness/ $\mu\text{m}$	Microhardness (HV0.5)	Depth of polishing/ mm
1	Predict	6.13	367.6	0.055
	Experimental	5.713	364.7	0.051
	Error/%	7.30	0.79	7.84
25	Predict	6.614	356.4	0.051
	Experimental	6.223	363.8	0.049
	Error/%	6.28	2.03	4.08
50	Predict	8.512	319.1	0.046
	Experimental	8.054	323.7	0.048
	Error/%	5.69	1.42	4.17

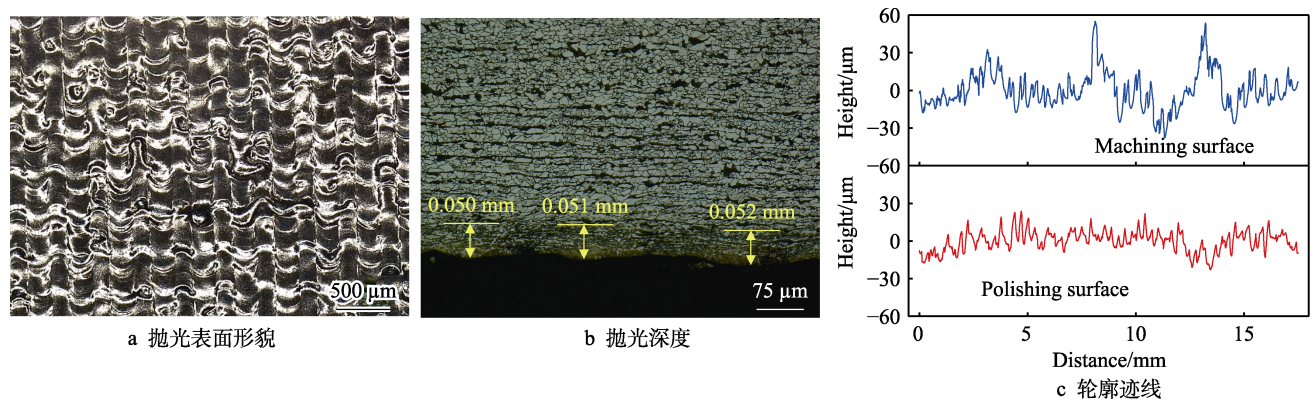


图 11 试验验证结果  
Fig.11 Experimental verification results: a) morphology of polished surface; b) depth of polishing; c) contour trace

4 结论

1)提出了一种 45<sup>#</sup>钢表面激光抛光工艺参数优化设计方法。以功率  $P$ 、扫描速度  $v$  和搭接距离  $\delta$  为变量, 采用 BBD 法进行试验设计, 以表面粗糙度值、抛光层硬度和抛光层深度作为优化目标, 构建激光抛光工艺参数与激光抛光多目标之间的指数模型和二阶响应面模型, 并对比 2 个模型的预测精度, 结果表明, 二阶响应面模型具有更高的预测精度, 能够更好地反映激光抛光工艺参数与各响应目标之间的映射关系。

2) 基于 MOGWO 算法和 TOPSIS-CRITIC 综合评价决策体系, 获得 45<sup>#</sup>钢表面激光抛光最佳工艺参数组合, 通过实际验证表明, 激光抛光后表面粗糙度值  $Ra$  由  $11.563\text{ }\mu\text{m}$  降至  $5.713\text{ }\mu\text{m}$ , 降幅为 50.59%; 激光抛光后表面显微硬度由  $185.9\text{ HV}0.5$  升至  $364.7\text{ HV}0.5$ ,

升幅为 96.18%。此时的抛光深度为  $0.051\text{ mm}$ 。模型预测值与实际测量值的最大相对误差为 7.84%。

3) 研究方法可为其他金属表面激光抛光工艺参数优化提供借鉴, 但对复杂多样化形貌表面进行激光抛光及激光抛光后微观组织与性能的精确化调控等问题仍须进一步探索。

参考文献:

[1] 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 Q, et al. Research Progress of Laser Polishing Technology for Material Surface[J]. China Surface Engineering, 2021, 34(6): 74-89.

[2] XU J L, ZOU P, WANG W J, et al. Study on the Mechanism of Surface Topography Evolution in Melting and Transition Regimes of Laser Polishing[J]. Optics & Laser



- Technology, 2021, 139(6): 106947.
- [3] XU J L, ZOU P, WANG X, et al. Investigation into the Laser Polishing of an Austenitic Stainless Steel[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 163(8): 109378.
- [4] 姚燕生, 周瑞根, 张成林, 等. 增材制造复杂金属构件表面抛光技术[J]. 航空学报, 2022, 43(4): 237-249.  
YAO Y S, ZHOU R G, ZHANG C L, et al. Surface Polishing Technology for Additive Manufacturing of Complex Metal Components[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(4): 237-249.
- [5] 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.
- [6] ZHOU J, LIAO C H, SHEN H, et al. Surface and Property Characterization of Laser Polished Ti6Al4V[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 380(1): 125016.
- [7] LI C J, LI D P, LIU G D, et al. Surface Characteristics Enhancement and Morphology Evolution of Selective-laser-melting (SLM) Fabricated Stainless Steel 316L by Laser Polishing[J]. Optics and Laser Technology, 2023, 162(7): 109246.
- [8] LIU E J, CHEN X, JIN Y, et al. Surface Morphology Evolution and Tribological Behavior in Nanosecond Pulsed Laser Polishing of S136 Mold Steel[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 22(1/2): 3230-3244.
- [9] XIAO H B, CHEN Y Z, LIU M J, et al. Influence of Laser Additive Manufacturing and Laser Polishing on Microstructures and Mechanical Properties of High-strength Maraging Steel Metal Materials[J]. Applied Sciences, 2022, 12(20): 10340.
- [10] LIU Z F, ZHOU J, WANG H, et al. A Comparative Study on Surface Topography and Microhardness of Laser Polished-Hardened AISI D2 Tool Steel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 122(1): 499-512.
- [11] 任英明, 张志宇. 双步激光辐射提升纳秒激光抛光单晶硅的表面[J]. 光学学报, 2022, 42(7): 0714004.  
REN Y M, ZHANG Z Y. Surface of Nanosecond Laser Polished Single-Crystal Silicon Improved by Two-Step Laser Irradiation[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(7): 0714004.
- [12] ZHANG Q Z, MEI X S, JIANG G D, et al. Investigation on Ultrasonic Vibration-assisted Femtosecond Laser Polishing of C/SiC Composites[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2023, 43(11): 4656-4672.
- [13] WU G L, FU G Q, WANG M, et al. Process and Corrosion Property of Laser-chemical Hybrid Polishing of TC4 Alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 101(8): 1374-1382.
- [14] 李道齐, 王涛, 杨紫璠, 等. 304 不锈钢激光抛光的参数优化及抛光层性能分析[J]. 中国激光, 2023, 50(4): 219-228.  
LI D Q, WANG T, YANG Z F, et al. Optimization of Laser Polishing Parameters of 304 Stainless Steel and Performance Analysis of Polishing Layer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(4): 219-228.
- [15] SOLHEID J S, ELKASEER A, WUNSCH T, et al. Multi-objective Optimization of Laser Polishing of Additively Manufactured Ti-6Al-4V Parts for Minimum Surface Roughness and Heat-Affected Zone[J]. Materials, 2022, 15(9): 3323.
- [16] MEYLAN B, CALDERON I, WASMER K. Optimization of Process Parameters for the Laser Polishing of Hardened Tool Steel[J]. Materials, 2022, 15(21): 7746.
- [17] 周浩, 赵振宇, 周后明, 等. S136D 模具钢表面双激光抛光技术研究[J]. 表面技术, 2021, 50(11): 111-120.  
ZHOU H, ZHAO Z Y, ZHOU H M, et al. Study on Dual-Beam Laser Polishing of Surface of S136D Die Steel[J]. Surface Technology, 2021, 50(11): 111-120.
- [18] 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.
- [19] ANSARI M, RAZAVI R S, BAREKAT M. An Empirical-statistical Model for Coaxial Laser Cladding of NiCrAlY Powder on Inconel 738 Superalloy[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 86: 136-144.
- [20] 郭星星, 帅美荣, 王建梅, 等. 基于 NSGA-II 算法的激光熔覆单道成形工艺参数多目标优化[J]. 中国表面工程, 2023, 36(3): 87-100.  
GUO X X, SHUAI M R, WANG J M, et al. Multi-Objective Optimization of Laser Cladding Single-Pass Forming Process Parameters Based on NSGA-II Algorithm[J]. China Surface Engineering, 2023, 36(3): 87-100.
- [21] MENG G R, ZHU L D, ZHANG J D, et al. Statistical Analysis and Multi-objective Process Optimization of Laser Cladding TiC-Inconel718 Composite Coating[J]. Optik, 2021, 240: 166828.
- [22] MIRJALILI S, SAREMI S, MIRJALILI S M, et al. Multi-objective Grey Wolf Optimizer: A Novel Algorithm for Multi-criterion Optimization[J]. Expert Systems with Applications, 2016, 47: 106-119.
- [23] 蒋荣超, 刘大维, 王登峰. 基于熵权 TOPSIS 方法的整车动力学性能多目标优化[J]. 机械工程学报, 2018, 54(2): 150-158.  
JIANG R C, LIU D W, WANG D F. Multi-Objective Optimization of Vehicle Dynamics Performance Based on Entropy Weighted TOPSIS Method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(2): 150-158.
- [24] 戴宁, 万林林. 基于组合赋权 TOPSIS 模型的工艺参数决策方法[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(4): 107-112.  
DAI N, WAN L L. Decision Making Method of Process Parameters Based on TOPSIS Model with Combination Weight[J]. Machine Building & Automation, 2022, 51(4): 107-112.
- [25] 周沅楨, 和小娟, 王泽宇, 等. 基于 CRITIC 赋权法的细支烟物理指标综合质量评价研究[J]. 包装工程, 2022, 43(9): 176-183.  
ZHOU Y Z, HE X J, WANG Z Y, et al. Comprehensive Quality Assessment for Physical Indexes of Slim Cigarette Based on CRITIC Weighting Approach[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(9): 176-183.