

基于近似工况映射模型的盾构滚刀调质-激光表面 淬火复合工艺硬化预测*

吴剑钊¹ 任亚平² 郭洪飞² 张超勇¹ 程鸿武¹ 唐莉梅³

(1. 华中科技大学数字化制造装备与技术国家重点实验室 武汉 430074;

2. 暨南大学智能科学与工程学院 珠海 519070;

3. 武汉恒立工程钻具股份有限公司 武汉 430074)

摘要: 表面硬度是盾构滚刀的重要参数,直接影响到刀具的使用寿命、工程效率和施工成本,鲜有研究运用相似工况下的数据进行显微硬度的预测。以盾构滚刀特种钢为对象,分别对经锻造且球化退火处理的工件(普通工件)以及再经调质处理后的工件(调质工件)进行激光表面淬火,提出一种基于近似工况映射模型的硬化效果预测方法。首先,测量普通工件和调质工件在激光表面淬火后的显微硬度,分别确定其高硬度区的特征参数(深度、宽度)。然后,建立激光工艺参数与普通工件高硬度区特征参数之间的 Kriging 模型,并采用最小二乘法和残差拟合补偿,建立激光工艺参数关于调质工件高硬度区特征参数的映射模型。最后,采用留一法对该映射模型的预测精度进行验证。结果表明,该映射模型实现了显微硬度的有效预测,相比于单一工况数据的近似模型,具有较好的预测精度。所提出的映射模型可充分运用两种相似工况下的先验数据,从而进行有效的数据预测。

关键词: 映射模型; 激光表面淬火; 复合工艺; 硬化; 预测

中图分类号: TG174.44;

Hardening Prediction of Quenching and Tempering-laser Surface Quenching Hybrid Process on Shield Disc Cutter Using a Mapping Model for Similar Working Condition

WU Jianzhao¹ REN Yaping² GUO Hongfei² ZHANG Chaoyong¹

CHENG Hongwu¹ TANG Limei³

(1. State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. School of Intelligent Systems Science and Engineering, Jinan University, Zhuhai 519070, China;

3. Wuhan HL Engineering Tool Co., Ltd, Wuhan 430074, China)

Abstract: Surface hardness is an important parameter of shield disc cutter, which will directly affect the service life of the tool, engineering efficiency and construction cost. Few studies have used data from similar working conditions for microhardness prediction. Taking special steel for shield disc cutter as an example, laser surface quenching (LSQ) is performed on forged and spheroidized annealed workpiece (non-treated workpiece), quenched and tempered workpiece respectively. A hardening effect prediction method based on a mapping model for similar working condition is proposed. First, measure the micro-hardness of two types of workpieces after laser surface quenching to determine the characteristic parameters (depth, width) of the high-hardness

* 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流(51861165202)、国家自然科学基金(51575211)和吉林省自然科学基金(20180101058JC)资助项目。

Fund: Supported by Project of International Cooperation and Exchanges NSFC (51861165202), National Natural Science Foundation of China (51575211), and Science and Technology Development Project of Jilin Province (20180101058JC).

zone. The Kriging model between the laser process parameters and the high-hardness zone characteristic parameters of the non-treated workpiece is established. Then, the mapping model of the laser process parameters on the high-hardness zone characteristic parameters of quenched and tempered workpiece is established using the least squares method and residual error fitting compensation. Finally, the leave-one-out method is used to verify the prediction accuracy of the mapping model. The results show that the mapping model achieves effective prediction on micro-hardness and has better predictions compared with the approximate model based on single working condition data. The proposed mapping model can make full use of the prior data of two similar working conditions to achieve effective prediction.

Keywords: mapping model; laser surface quenching; hybrid process; hardening; prediction

0 前言

随着全球城市轨道交通、地下隧道等行业的快速发展,被视为地下工程最重要施工设备之一的盾构机得到了广泛应用。盾构滚刀作为盾构机的重要部件,将直接作用于岩土面,工作环境恶劣,载荷变化大,是掘进过程中最常更换的部件之一^[1-2]。盾构滚刀的表面硬度不足、使用寿命短的问题将直接影响工程效率与成本^[3],因此盾构滚刀表面硬度提升的相关研究具有重要的意义。

为了提高盾构滚刀的硬度和使用寿命,许多研究人员探索了相关的强化工艺技术^[3-5]。调质处理一般包括淬火和高温回火双重热处理^[6],可用于改善钢铁材料整体部件的综合力学性能^[7]。然而,在许多工况下,表面硬度的提高即可明显改善部件的性能^[7-9]。因此,激光表面淬火(LSQ)、等离子熔覆、表面热化学处理等表面强化技术方式近年来得到了日益关注^[10-11]。激光表面淬火是一种提高铁碳合金表面特性的有效方法,具有成本低,效率高,可控性良好等优点^[7,9]。LI等^[7]认为激光表面淬火可以用来代替淬火处理中使用的碳氮共渗的工艺。LIN等^[12]提出在激光表面重熔期间,采用水冷却钢合金可促进超细微观组织的形成,提高表面的硬度。然而,较少研究同时关注了盾构滚刀工件在未经调质处理、调质处理、调质-激光表面淬火复合处理三种状态下的硬度变化。

至今,已有许多研究对激光表面淬火的加工结果进行了建模。COLOMBINI等^[13]采用离子渗氮热化学处理和激光淬火来提高40CrMnMo7钢的表面性能,建立了响应曲面法(RSM)模型,研究了激光淬火工艺参数对材料力学性能的影响。ZHANG等^[14]采用Taylor系列的非线性函数来构建激光工艺参数与表面硬化效果(耐磨性,硬度,硬化深度,粗糙度)之间的关系,采用PSO算法进行多目标优化,并对优化效果进行试验验证,证明了优化模型的可靠性。然而,鲜有研究关注工况

(材料、工艺参数等)相似的情况下,对所建立的加工效果的模型进行调整和映射处理,充分运用相似工况下的数据,从而使其更新成为适合新工况的模型。

以盾构滚刀KDCMSV特种钢为例,分别对经过锻造后并进行球化退火处理的工件(金相组织主要为铁素体和渗碳体,下文简称普通工件)以及普通工件经调质处理后的工件(下文简称调质工件)进行激光表面淬火。探究了两种热处理工艺的硬度提升效果,研究了激光表面淬火的工艺参数对调质工件硬化效果的影响。根据试验结果,以激光表面淬火的工艺参数作为输入,以普通工件的高硬度区宽度和深度作为响应,建立了输入参数与输出结果的Kriging响应模型,并根据调质工件激光表面淬火的结果,对普通工件的Kriging模型进行了基于最小二乘法和残差拟合补偿的映射变换,构建近似工况的映射模型。最后,采用留一法对近似工况映射模型的预测精度和有效性进行了验证。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

试验工件采用武汉工程钻具公司生产并提供的盾构滚刀,材质为KDCMSV特种钢,主要组成成分如表1所示。对盾构滚刀刀具进行调质处理,具体工艺如图1所示,主要包含淬火和回火。首先,对滚刀加热至1 080℃,保温2 h后进行油淬,随后进行30 min的冷水清洗,再加热至550℃进行回火处理5 h,最后空冷至室温。采用线切割切取滚刀刀盘的一部分环形件用于激光

表 1 KDCMSV 特种钢的主要组成成分

Table 1 Main chemical components of KDCMSV special steel (wt. %)

Element	C	Si	Mn	P	Cr	Ti	V	Mo	Fe
Content	0.35~0.48	0.8~1.2	0.7~1.0	≤0.03	4.5~5.5	0.5~0.8	1.1~1.6	1.1~1.8	Bal.

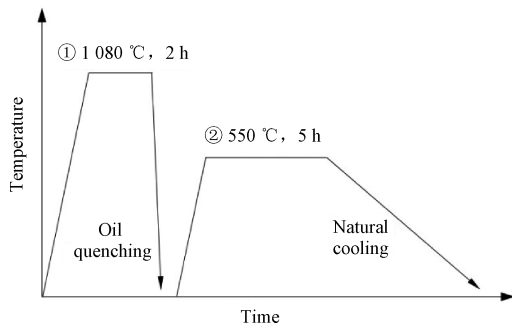


图 1 盾构滚刀调质处理的工艺过程

Fig. 1 Shield disc cutter quenching and tempering process

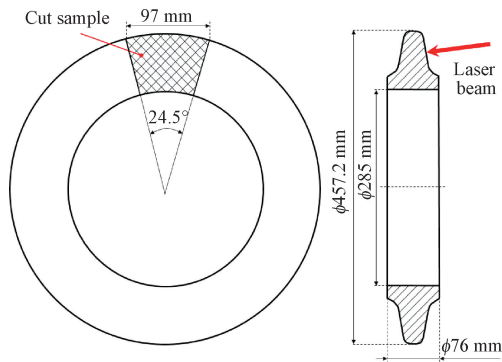


图 2 盾构滚刀刀盘及试验工件的尺寸

Fig. 2 Shield hob cutter head and experimental workpiece size

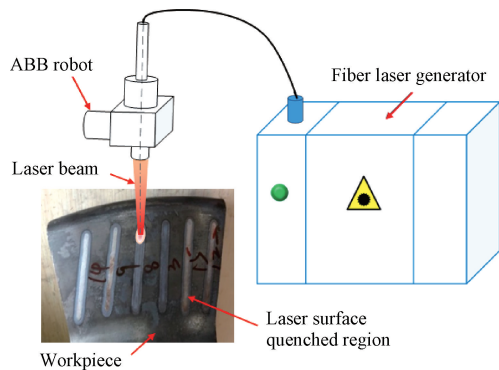


图 3 激光表面淬火的加工示意图

Fig. 3 Schematic diagram of laser surface quenching

1.2 试验设计

激光工艺参数对激光表面淬火硬化层截面轮廓有着显著的影响。根据预试验和相关文献^[13-14],硬化效果的影响工艺参数主要包括激光功率(P)、淬火速度(S)、离焦量(D)。为了研究工艺参数对硬化效果的影响,使用 MINITAB18 商业软件进行试验设计。考虑到这是一个 3 因素 4 水平的问题,采用 $L_{16}(4^3)$ 正交试验来减小试验系统误差。表 2 列出

了工艺参数的数值和水平。

表 2 正交试验工艺参数的水平与数值

Table 2 Level and value of process parameters in Taguchi experiment

Factor levels	Parameters		
	P/kW	$S/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	D/cm
1	1.4	45	3
2	1.8	50	4
3	2.2	55	5
4	2.6	60	6

2 评价指标与试验结果

激光表面淬火组织包括硬化层、过渡层、基体。采用

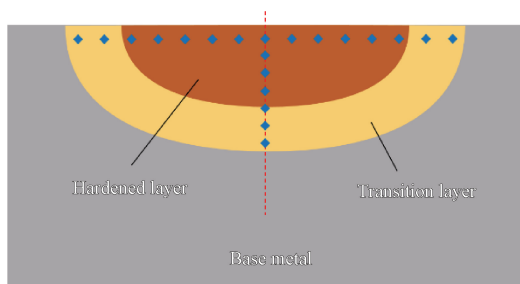


图5 激光表面淬火截面与硬度测试示意图

Fig. 5 Schematic diagram of laser surface quenching cross-section and micro-hardness test

微硬度大于判别标准的最后一个测试点与小于判别标准的第一个点之间。由于两个显微硬度测试点之间存在距离,不能准确地确定出高硬度区的边界。因此,采用插值法对高硬度区边界的位置进行计算,以便修正高硬度区的特征参数(深度、宽度),计算公式如下:

$$L = \frac{H_1 - H_c}{H_1 - H_2} \cdot S \quad (1)$$

式中, H_1 为硬度大于判别标准的最后一个测试点的显微硬度, H_2 为硬度小于判别标准的第一个测试点的显微硬度, H_c 为判别标准的显微硬度, S 为2个显微硬度测试点之间的距离, L 为 H_1 测试点位置与 H_c 测试点位置之间的长度。

激光表面淬火和常规淬火都需要先将工件加热,使得材料的温度高于奥氏体转变临界温度,从而获得奥氏体组织。常规淬火属于对部件整体淬火的技术,需要有一段保温的时间来使材料充分奥氏体化,并且使冷却速度大于马氏体相变临界速度,从而获得马氏体组织。激光表面淬火属于对部件表面的淬火技术,其快速加热和冷却这一特征十分显著,能够使金属表面形成精细的显微结构,从而改善材料表面硬度^[13],显微硬度的增大将使耐磨性得到有效的改善^[16]。激光表面淬火在工件表面产生迅速升温可促进奥氏体化,随后的快速冷却可促进工件表面由奥氏体向马氏体的转变^[7]。

3 映射模型的构建方法

3.1 近似模型

3.1.1 克里金(Kriging)

地质学家最初将克里金法作为一种预测方法,利用插值贝叶斯方法来估计未知空间的矿产分布^[17]。式(2)中描述了测试点 x 处的近似函数。详细内容可参考文献^[18]。

$$\hat{f}(x) = \hat{\mu} + \mathbf{r}^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y} - \mathbf{1}\hat{\mu}) \quad (2)$$

式中, $\mathbf{y}$ 是包含响应的 m 个采样点的矢量。 $\hat{\mu}$ 是 $\mathbf{R}$ 的函数:

$$\hat{\mu} = \frac{\mathbf{1}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{y}}{\mathbf{1}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{1}} \quad (3)$$

式中, $\mathbf{R}$ 是相关矩阵,相关函数列在式(4)中,此处选择高斯函数。

$$R(x^i, x^j) = \exp \left(- \sum_{k=1}^K \theta_k |x_k^i - x_k^j|^2 \right) \quad (4)$$

式中, $R(x^i, x^j)$ 是 x^i 与 x^j 之间的相关函数, K 是设计空间的维数, θ_k 是相关参数, $|x_k^i - x_k^j|$ 是第 k 个设计变量的 x^i 和 x^j 之间的样本点之间的距离。

本点 x_i 处调质工件高硬度区的值, m 是样本点的个数。确定映射系数 α, β 的方法包括交叉验证、最小二乘法和最大似然估计等。考虑到计算的方便性, 采用最小二乘法。一旦解决了等式中的优化问题, 便可以获得式 (9) 中的最佳映射系数 α, β 。

3.3 建模流程

提出的映射模型可基于普通工件和调质工件激光表面淬火高硬度区结果的先验数据, 来预测设定工艺参数下的调质工件激光表面淬火高硬度区的试验结果。图 6 为所提出的映射模型构建方法的流

程图。

步骤 1: 确定激光表面淬火工艺参数与范围, 并设计正交试验。

步骤 2: 执行两种工件的激光表面淬火试验, 并测量显微硬度。分别确定出两种工件高硬度区的评判标准, 获取试验结果。

步骤 3: 基于普通工件激光表面淬火高硬度区的试验结果来构建 Kriging 模型。根据两种工件高硬度区的结果, 使用最小二乘法建立线性关系, 并求解最佳映射系数。使用 RBF 模型对残差进行拟合。至此, 所提出的近似工况映射模型构建完毕。

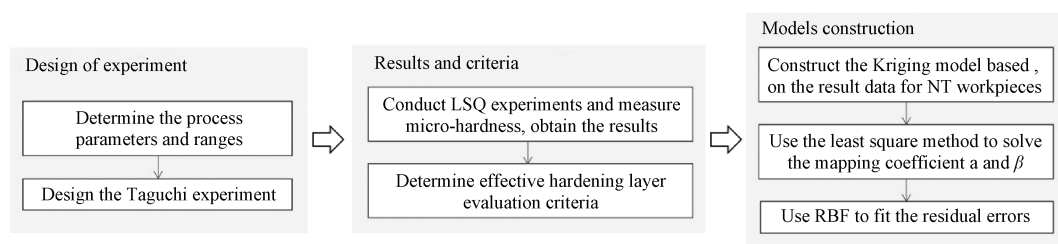


图 6 该映射模型构建方法流程图

Fig. 6 Flow chart of the mapping model construction method

4 结果与讨论

4.1 显微硬度

对于激光表面淬火而言, 可以通过增加加工次数来增大硬化面积 (宽度和长度), 然而高硬度区厚度难以通过多次激光淬火实现加深。因此, 显微硬度随深度方向上的分布与变化值得进一步分析。根据正交试验设计, 对普通工件和调制工件分别进行

16 组工艺参数的激光表面淬火后, 并测量两种工件在各组参数下显微硬度沿着深度方向上的分布, 如图 7 所示。从图 7a 可以观察到, 随着深度增加, 普通工件显微硬度逐渐下降, 直至低于高硬度区的判别标准 400 HV (图 7a 中灰色平面)。如图 7b 所示, 区别于普通工件, 随着深度增加, 显微硬度先进行上下波动, 而后逐渐下降至 762 HV (图 7b 中灰色平面)。

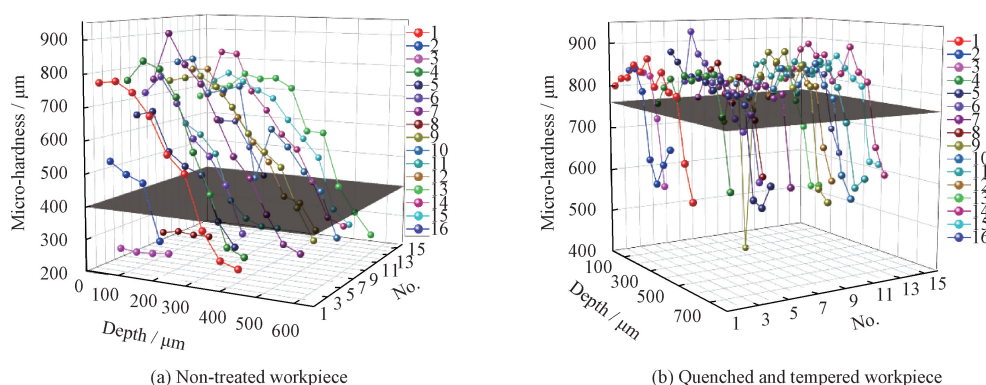


图 7 两种工件沿深度方向的显微硬度分布

Fig. 7 Micro-hardness distribution of two types of workpieces along the depth direction

激光表面淬火与调质处理需要满足两个阶段的条件来达到晶粒细化的效果:

图8分别为普通工件(NT)、调质工件(QT)、普通工件激光表面淬火(NT+LSQ)、调质工件激光表面淬火(QT+LSQ)四种样品的XRD衍射图谱。三个明显的衍射峰均来自 α -Fe。对QT+LSQ、NT+LSQ、QT、NT四种样品的半峰全宽进行计算,FWHM值分别为0.76、0.60、0.55、0.46。根据Scherrer公式^[20]可以推测出,激光表面淬火与调质处理均具有晶粒细化的作用。因此,普通工件采用调质处理或激光表面淬火,均能使工件的显微硬度得到显著提高;调质工件经过激光表面淬火后,工件表面的显微硬度可得到进一步的提高。

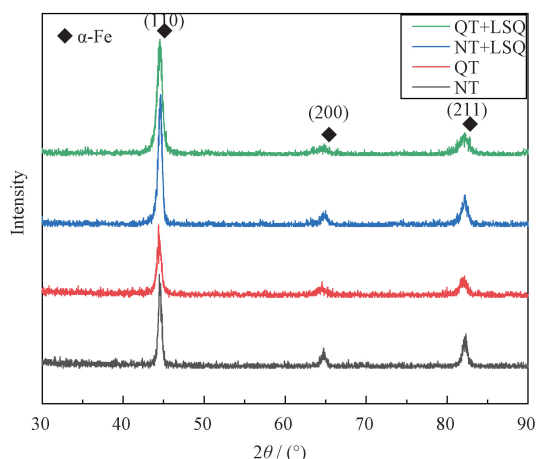


图8 不同工艺处理后工件的XRD衍射图谱

Fig. 8 XRD diffraction patterns of workpieces with different process

4.2 模型的构建

根据普通工件激光表面淬火的试验结果,构建激光工艺参数与高硬度区特征参数的关系模型,基于Kriging模型的三维图如图9所示,可直观地表示

出输入参数(P,S,D)和输出响应(D,W)之间的关系。可以观察到,随着激光表面淬火工艺参数的变化时输出结果相应发生的变化。

基于建立的Kriging模型 $\hat{f}_{NTd}(x)$ 和 $\hat{f}_{NTw}(x)$,采用式(8),构建激光工艺参数与调质工件高硬度区参数的模型 $\hat{f}_{QT}(x)$ 。然后,采用式(9),求解得到最佳映射系数 α 和 β 。此外,采用RBF对残差 $\varepsilon(x)$ 进行拟合。即所提出的近似工况映射模型可表达为:

$$\begin{aligned}\hat{f}_{QTd}(x) &= 0.5943 \cdot \hat{f}_{NTd}(x) + 252.7223 + \varepsilon_d(x); \\ \hat{f}_{QTW}(x) &= 0.4442 \cdot \hat{f}_{NTW}(x) + 1953.9944 + \varepsilon_w(x)\end{aligned}\quad (10)$$

式中, $\hat{f}_{QTd}(x)$ 和 $\hat{f}_{QTW}(x)$ 分别为调质工件激光表面淬火后高硬度区的深度和宽度模型, $\hat{f}_{NTd}(x)$ 和 $\hat{f}_{NTW}(x)$ 分别为普通工件激光表面淬火后高硬度区的深度和宽度模型, $\varepsilon_d(x)$ 和 $\varepsilon_w(x)$ 均为采用RBF拟合的残差函数。

4.3 预测精度的验证

根据表3中16组正交试验的结果,采用Randi函数随机选择5组试验(2、6、10、11、15组),采用留一法,将这5组试验依次作为验证集,也即每次将5组试验中的一组试验从训练集中去除并作为验证集,将剩余的15组试验作为训练集来构建模型。分别对调质工件高硬度区的深度和宽度进行预测,并与实际测量结果进行对比,结果如图10所示,其中EV为试验测量的数值,MP为提出的近似工况映射模型所预测的数值,SK为仅使用调质-激光表面淬火的试验数据建立的Kriging模型进行预测的数值。

表3 激光表面淬火正交试验工艺参数及结果

Table 3 Process parameters and results of Taguchi experiment of laser surface quenching

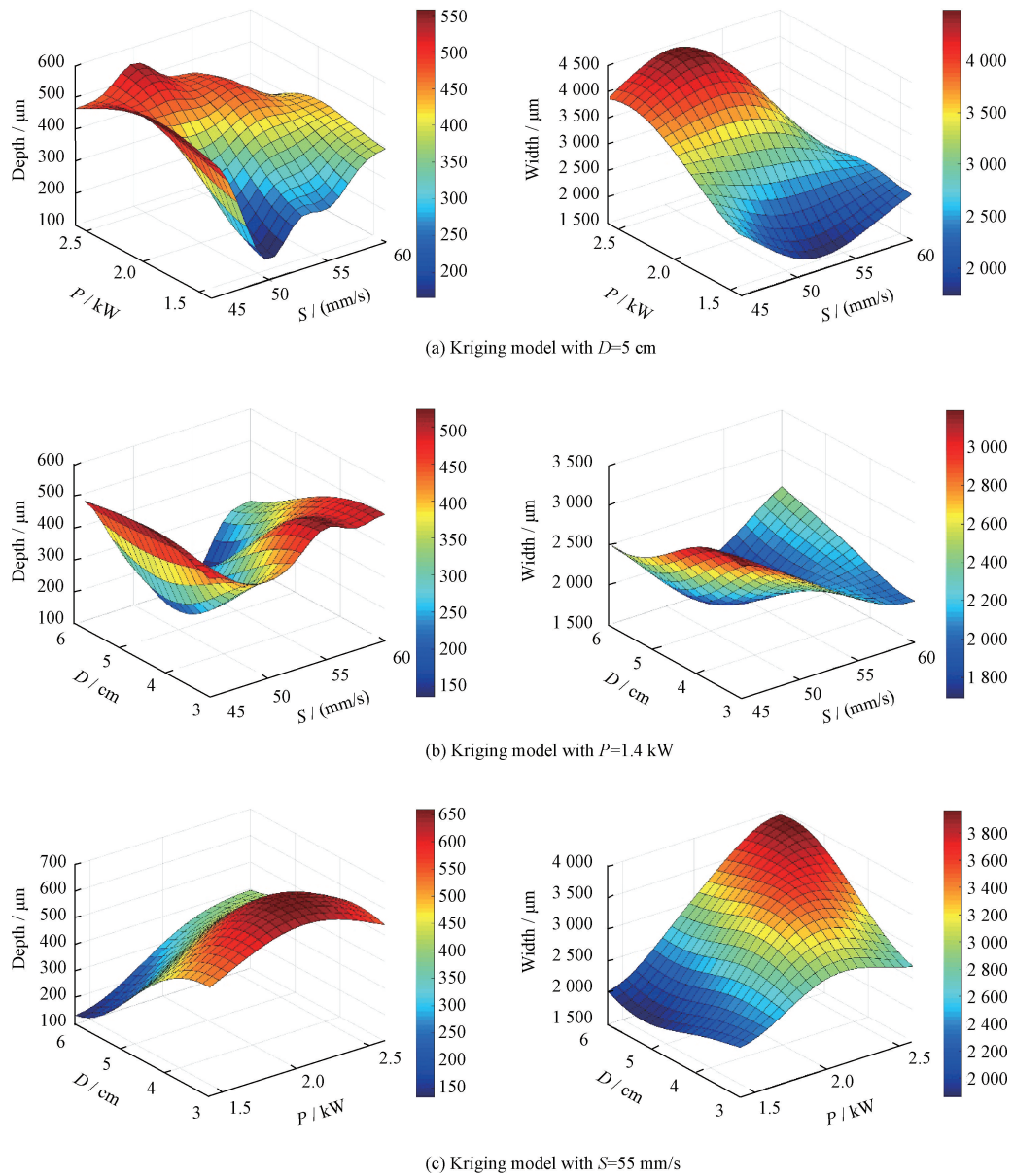


图9 普通工件激光表面淬火 Kriging 模型的三维曲面

Fig.9 3D surfaces of Kriging model of non-treated workpiece after LSQ

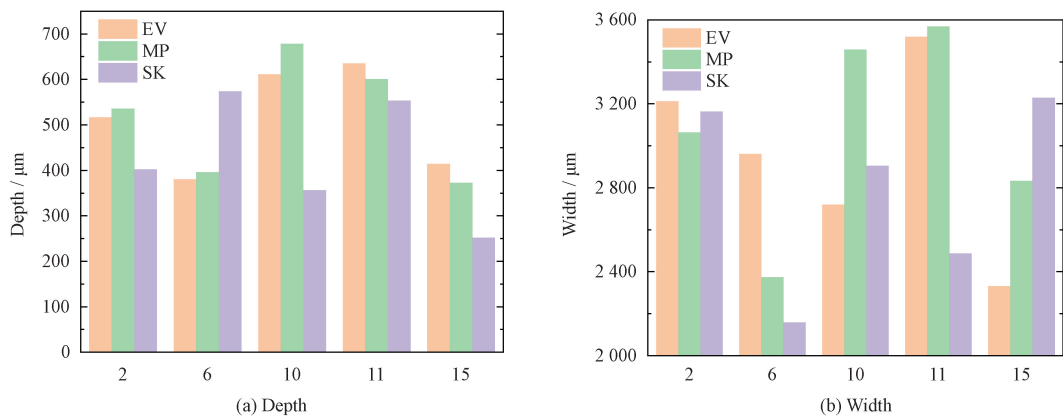


图10 预测值与试验值对比图

Fig.10 Comparison of predicted value and experimental value

此外,采用式(11)对相对误差 $RE(\%)$ 进行计算,式中 EV 为试验值, PV 为预测值。表4展示了近似工况映射模型与 SK 模型的相对误差对比。5 组留一法验证中,近似工况映射模型在深度上和宽度上最大相对预测误差分别为 10.96% 和 27.16%,而仅使用 SK 模型 $\hat{f}_{NT}(x)$ 的最大相对预测误差分别为 50.75% 和 38.46%。结果表明,提出的近似工况映射模型有良好的预测能力。相比于其他激光加工截面轮廓特征预测的最大误差 29.13%^[21] 和 60.35%^[22],基于该映射模型的高硬度区预测精度可以被接受。因此,提出的基于近似工况映射模型的硬化预测方法在工程应用中是可靠的。

$$RE(\%) = \frac{|EV - PV| \times 100\%}{EV} \quad (11)$$

表4 近似工况映射模型与单 Kriging 模型的相对误差对比

Table 4 Comparison of the relative error between the similar working condition mapping model and the single Kriging model

No.	RE of MP/%		RE of SK/%	
	Depth	Width	Depth	Width
2	3.64	4.62	27.65	1.54
6	3.92	19.82	50.75	27.14
10	10.96	27.16	41.73	6.77
11	5.39	1.39	12.83	29.32
15	10.11	21.45	39.15	38.46

5 结论

(1) 提出一种基于近似工况映射模型的调质-激光表面淬火复合工艺硬化效果的有效预测方法。该映射模型可充分运用两种相似工况下的全部先验数据,并进行预测。相比基于单一工况数据的近似模型,该映射模型在预测精度上具有相对的优越性。

(2) 调质处理后的盾构滚刀 KDCMSV 特种钢工件经过激光表面淬火后,可在工件表面形成显微硬度进一步提高的高硬度区。测量了高硬度区的特征参数,分析了工件的显微硬度随深度的变化。

(3) 在构建模型时并未考虑影响高硬度区的不确定性,比如工艺参数的波动和测量不精确等因素。由于不确定性会引起硬化效果的变化,因此可以考虑采用一些不确定性信息量化方法,比如概率分布函数聚合方法^[23]等。在未来的研究中,将对硬化效果的不确定性展开进一步的研究。

参 考 文 献

[1] FU J, XIA Y M, ZHANG L, et al. Failure analysis on the

fracture of disc cutter in EPB shield machine[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 108: 104341.

[2] 蒋建敏,赵学彬,贺定勇,等. 北京地区盾构机刀具失效分析及再制造研究[J]. 中国表面工程, 2006, 19(3): 44-46.

JIANG Jianmin, ZHAO Xuebin, HE Dingyong, et al. Failure analysis and reproducing of shield machine's cutter in Beijing region[J]. China Surface Engineering, 2006, 19(3): 44-46. (in Chinese)</

- [13] COLOMBINI E, SOLA R, PARIGI G, et al. Laser quenching of ionic nitrided steel: Effect of process parameters on microstructure and optimization[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2014, 45(12): 5562-5573.
- [14] ZHANG T H, LI L X, LIANG F J, et al. Parameter optimization of laser die-surface hardening using the particle swarm optimization technique [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 36 (11-12): 1104-1112.
- [15] 巴发海, 鄢国强, 吴炜, 等. 球铁点阵分布激光表面强化的微硬度分布[J]. 中国激光, 2005, 32(2): 287-291.
BA Fahai, YAN Guoqiang, WU Wei, et al. Microhardness distribution of ductile iron modified by laser with space array[J]. Chinese Journal of Laser, 2005, 32 (2): 287-291. (in Chinese)
- [16] WU J Z, YU A B, CHEN Q J, et al. Tribological properties of bronze surface with dimple textures fabricated by the indentation method [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2020, 234(10): 1680-1694.
- [17] ZHANG J, TAFLANIDIS A A, MEDINA J C. Sequential approximate optimization for design under uncertainty problems utilizing Kriging metamodeling in augmented input space [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2017, 315: 369-395.
- [18] DONG H C, SONG B W, WANG P, et al. Multi-fidelity information fusion based on prediction of kriging[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2014, 51(6): 1267-1280.
- [19] FORRESTER A I J, KEANE A J. Recent advances in surrogate-based optimization[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2009, 45(1-3): 50-79.
- [20] KAI H, CHEN N, WANG C, et al. Method for determining crystal grain size by X-Ray diffraction[J]. Crystal Research and Technology, 2018, 53(2): 1700157.
- [21] MANIKYA K, SRINIVASA R P. Prediction of bead geometry in pulsed GMA welding using back propagation neural network[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 200(1-3): 300-305.
- [22] RONG Y M, ZHANG Z, ZHANG G J, et al. Parameters optimization of laser brazing in crimping butt using Taguchi and BPNN-GA[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 67: 94-104.
- [23] CAI M Y, LIN Y Z, HAN B, et al. On a simple and efficient approach to probability distribution function aggregation [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017, 47(9): 2444-2453.
-
- 作者简介:** 吴剑钊,男,1992 年出生,博士。主要研究方向为激光加工与绿色制造、智能优化算法。
E-mail:jianzhaowu@foxmail.com
- 张超勇(通信作者),男,1972 年出生,博士,教授,博士生导师。主要研究方向为激光加工与绿色制造、智能优化算法。
E-mail:zcyhust@hust.edu.cn