

单道次激光熔覆 304 不锈钢数值模拟与实验研究

郭卫, 张亚普, 柴蓉霞*

西安科技大学机械工程学院, 陕西 西安 710054

摘要 利用 ANSYS 有限元分析软件数值模拟激光熔覆过程, 得到了不同工艺参数下的温度场。在与数值模拟相同条件下, 在 27SiMn 钢表面进行激光熔覆 304 不锈钢实验, 利用光学显微镜观察熔覆层的显微组织。结果表明, 熔池内峰值温度随着激光功率的增大而增大, 随着激光扫描速度的增大而减小; 数值模拟与实验所得到的熔池几何尺寸基本一致; 当激光功率为 2500 W, 扫描速度为 13 mm/s 时, 熔覆层的晶粒细小, 组织致密, 熔覆层成形性最佳。

关键词 激光光学; 激光熔覆; 激光功率; 激光扫描速度; 温度场; 显微组织

中图分类号 TG174.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.091401

Numerical Simulation and Experimental Study of Single-Track Laser Cladding of 304 Stainless Steels

Guo Wei, Zhang Yapu, Chai Rongxia*

College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China

Abstract The ANSYS software was used to perform the numerical simulation of laser cladding. The temperature field was determined under different technological parameters. An experiment involving laser cladding of 304 stainless steel on 27SiMn steel surface was conducted under the same conditions as those in the numerical simulation. The microstructure of the cladding layer was observed using an optical microscope. The results show that the peak temperature in the molten pool increases as the laser power increases, and decreases as the scanning speed increases. The geometrical dimension of the molten pool obtained via numerical simulation is consistent with that obtained in the experiment under the same conditions. Under the laser power of 2500 W and scanning speed of 13 mm/s, the cladding layer has relatively small grains and compact structure, and shows optimal formability.

Key words laser optics; laser cladding; laser power; laser scanning speed; temperature field; microstructure

OCIS codes 140.3390; 140.3380

1 引言

煤矿开采综采三机之一的液压支架立柱典型材质是 27SiMn 钢, 长期工作于井下复杂环境, 该材料易产生磨损、腐蚀等失效形式, 严重影响综采工作面的安全性和生产效率^[1]。激光熔覆 304 不锈钢具有良好的抗晶间腐蚀能力和耐热性, 不仅能表面修复, 增强表面耐腐蚀性能, 还可以有效节约成本, 其在化学、农业、食品工业以及船舶部件等领域发挥着不可替代的作用^[2]。304 不锈钢与 27SiMn 钢熔点相近,

其润湿性较好, 可以实现牢固的冶金结合。通过激光熔覆技术在立柱表面熔覆具有抗腐蚀性能的 304 不锈钢, 可以形成一层与立柱具有不同成分和性能的合金层, 降低贵金属的消耗, 同时增强液压支架立柱的抗腐蚀性能, 以此延长立柱使用寿命^[3]。

激光熔覆是一个比较复杂的热力学过程, 熔覆过程会受到如激光功率、激光扫描速度、光斑直径和预置铺粉厚度等多参数的影响。为了选择合适的激光工艺参数, 从而得到具有良好成形性的熔覆层, 学者们围绕工艺参数优化问题开展了大量研究。柴蓉

收稿日期: 2018-09-28; 修回日期: 2018-11-23; 录用日期: 2018-11-26

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0804310)

* E-mail: joancra_030159@163.com

霞等^[4]在 27SiMn 钢表面预置 304 不锈钢粉末进行激光熔覆,并在熔覆层进行不同工艺参数的热处理过程,最终得到了晶粒均匀、细小且拉伸性能优异的 304 不锈钢熔覆层;杜学芸等^[5]在 27SiMn 钢表面预置 SNJG-160b 合金粉末,研究了熔覆功率对激光熔覆层耐腐蚀性能的影响,为实现大功率激光系统以及工艺稳定应用提供了实际参考;郭卫等^[6]在 27SiMn 钢表面预置铁基合金,研究了熔覆后试样的显微组织、磨损率和磨损形貌,为激光熔覆技术用于表面修复液压支架立柱提供了实际参考;邓居军等^[7]以激光熔覆铁基涂层为研究对象,分析了不同工艺参数下熔覆层形貌及熔覆涂层后磨损量的变化规律,熔覆层的形貌和质量的主要影响因素是扫描速度,激光功率次之,最终在合适工艺参数下得到了耐磨性最好的熔覆层。

本文在 27SiMn 钢表面单道次激光熔覆 304 不锈钢涂层,选取激光功率和扫描速度为待优化工艺参数,运用 ANSYS 有限元分析进行工艺参数单因素数值模拟,为激光熔覆提供了理论参考,通过实验验证,最终得到了制备良好成形性熔覆层的合适工艺参数。

2 激光熔覆的数值模拟

2.1 激光熔覆材料及模型建立

激光熔覆是一个十分复杂的材料快速熔化和凝固的变化过程,数值模拟可以优化工艺参数,从而节约实验成本,缩短研究周期。本次数值模拟仿真采取预置式单道激光熔覆,激光熔覆过程如图 1 所示,基体尺寸大小为 40 mm×20 mm×10 mm,预置粉末厚度为 40 mm×20 mm×2 mm,激光光斑照射到预先铺设在基体表面的金属粉末上,并以恒定速度 v 沿 Y 方向移动,在该过程中,被照射的熔覆材料温度急剧上升,然后快速熔化,之后又迅速凝固,形成熔覆层。

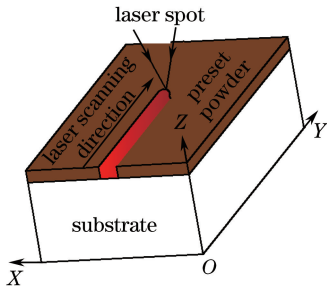


图 1 激光熔覆过程示意图

Fig. 1 Schematic of laser cladding process

2.2 数值模拟过程计算

为模拟真实光源的移动,采用有限元参数化设计语言 APDL,选择在 3 个方向具有热传导能力的 SOLID70 单元进行温度场仿真分析,该单元能实现匀速热流传递,表面效应单元选择 Surf152,并设置为只有热流流入。在求解之前还需要进行基体 27SiMn 钢和 304 不锈钢合金层材料的比热容、热导率、密度等的设定,材料的热物性参数随着温度的变化而变化。对模型进行网格划分,为了提高计算能力,基体材料选用较疏的网格划分,网格自由划分成 1 mm,对单道熔覆层附近进行 0.2 mm 的网格细化^[8]。在实际熔覆过程中将激光作为一外加热流连续输入,采用经典的热源模型—移动高斯热源输入^[9],即

$$q(r) = (2\eta P_0 / \pi R^2) \cdot \exp(-2r^2/R^2), \quad (1)$$

式中: $q(r)$ 为距离热源中心 r 处的热流密度; P_0 为激光功率; η 为 304 不锈钢粉末对激光热源的吸收率; R 为高斯热源分布外半径; $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 为激光光斑半径, x 、 y 分别为 X 和 Y 方向激光光斑辐射半径。

高斯热源在 Y 方向的移动过程可以表示为

$$y(t) = vt, \quad (2)$$

式中: v 为激光扫描速度; t 为单道熔覆过程的时间。

影响激光熔覆过程的因素有很多,为了方便计算,并尽可能准确地表达该过程,本文只考虑材料与空气的热对流和热辐射,忽略相变潜热等因素,材料连续且其热物理性能为各向同性,忽略熔池的流动作用,以及气化作用造成的材料损失,工件的初始温度为室温 20 °C^[10]。试样粉末呈深灰色,颜色越深对激光热量的吸收率越高,且颗粒之间存在间隙,激光在颗粒之间相互反射,使粉末可以更多回收利用激光能量,综合考虑,将对激光的吸收率取值为 0.7。

3 实验材料及方法

实验中选用的基体材料为液压支架立柱母材—27SiMn 钢,其主要成分如表 1 所示。熔覆材料选用粒度为 100~400 μm 的 304 不锈钢粉末,其主要成分如表 2 所示^[11]。

激光器为 DLS-3000C 半导体激光器,输出最大功率为 3000 W,输出波长为 980 nm,预置铺粉,单层粉厚为 2 mm,激光光斑直径为 $\Phi 3$ mm,进行单因素实验。图 2(a)所示为单道熔覆完成后的激光熔覆结果示意图,沿垂直于激光扫描方向线切割

表 1 27SiMn 钢的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 27SiMn steel (mass fraction, %)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo
0.24-0.32	1.10-1.40	1.10-1.40	≤0.035	≤0.035	≤0.30	≤0.30	≤0.30	≤0.15

表 2 304 不锈钢粉末的化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical compositions of 304 stainless steel powder (mass fraction, %)

C	Si	Mn	Ni	Cr	O	S	Fe
0.15	0.8	0.2	8-12	17.5-18.5	<0.20	≤0.03	Bal.

成10 mm×10 mm×10 mm 大小的试样,打磨、抛光和清洗,并利用王水进行腐蚀。利用酒精擦拭腐蚀后的金相试样表面并干燥,使用光学显微镜观察其横截面宏观形貌,进行虚拟圆构造,测量形状尺寸;使用 Nikon 电子显微镜观察熔覆层的晶粒。图

2(b)所示为不同激光功率和不同速度下的激光熔覆完成结果,从左往右依次为 2100 W, 13 mm/s; 2300 W, 13 mm/s; 2500 W, 13 mm/s; 2700 W, 13 mm/s; 2500 W, 7 mm/s; 2500 W, 10 mm/s; 2500 W, 16 mm/s 的结果。

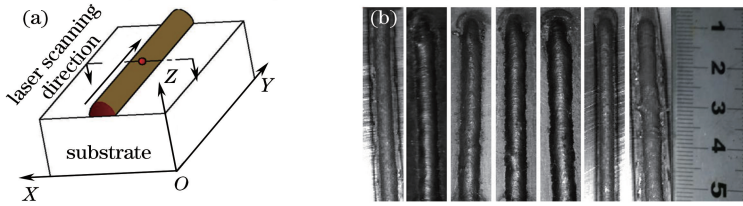


图 2 激光熔覆。(a)单道熔覆;(b)单道宏观形貌

Fig. 2 Laser cladding. (a) Schematic of single-track cladding; (b) single-track macro-morphologies

4 结果和讨论

4.1 数值模拟和实验结果分析

利用图 1 所示的模型进行单因素动态模拟,激光光斑直径为 3 mm,激光扫描速度为 13 mm/s,选用激光功率 2100、2300、2500、2700 W 进行单因素数值模拟,单道激光熔覆长度为 40 mm,选定在 Y 方向长度为 32 mm 位置上的温度 T 场分布

云图,结果如图 3 和图 4 所示。304 不锈钢粉末层的熔点约为 1430 °C,27SiMn 钢基体材料的熔点约为 1470 °C,为了便于表述和计算,将温度超过 1450 °C 的部分作为熔池,构造仿真结果的虚拟圆,测量计算虚拟圆半径 R',随着激光功率的不断增大和激光扫描速度的不断减小,熔池中心峰值温度逐渐升高,熔池的面积不断增大,仿真结果的虚拟圆半径也随之变大。

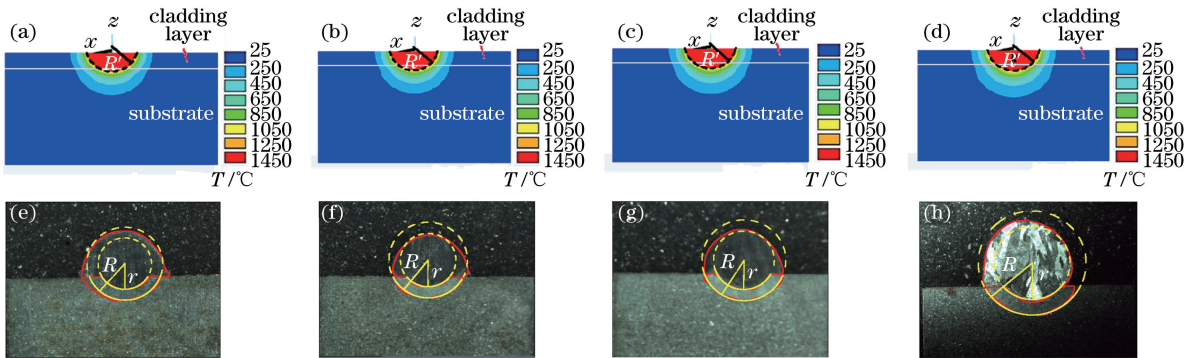


图 3 激光扫描速度为 13 mm/s 时不同激光功率下的温度场分布(上)和截面宏观图(下)。

(a)(e) 2100 W; (b)(f) 2300 W; (c)(g) 2500 W; (d)(h) 2700 W

Fig. 3 Temperature field distributions (up) and macroscopic cross-sectional diagrams (down) under different laser powers when laser scanning speed is 13 mm/s. (a)(e) 2100 W; (b)(f) 2300 W; (c)(g) 2500 W; (d)(h) 2700 W

在同等工艺参数条件下进行激光熔覆 304 不锈钢试验,使用光学显微镜观察其横截面宏观形貌。

图 3(e)~(h)所示分别为激光功率为 2100、2300、2500、2700 W 的横截面宏观形貌,对横截面轮廓进

行虚拟圆拟合构造,测量大圆半径 R 和熔覆层与基体冶金结合形成的小圆半径 r ,结果如表 3 所示,热影响区(HAZ)的宽度表示为

$$\Delta R = R - r. \quad (3)$$

表 3 激光扫描速度为 13 mm/s 时不同激光功率下虚拟圆尺寸

Table 3 Virtual circle sizes under different laser powers when laser scanning speed is 13 mm/s				
Laser power / W	Simulated radius R' / mm	Experimental radius R / mm	Experimental radius r / mm	HAZ $\Delta R / \text{mm}$
2100	1.867	1.767	1.245	0.522
2300	2.046	1.821	1.286	0.535
2500	2.281	2.047	1.409	0.638
2700	2.685	2.478	1.741	0.737

从图 3 可以看出,拟合的大圆在深度方向上与熔覆层差别较大,这是由于在激光束高能量的照射

下,预置粉末迅速融化为液滴状,受自身重力和液体表面张力等影响,熔化的颗粒在凝固过程中呈现扁平状,由于材料的润湿性,实际宽度也会略微大于构造大圆外轮廓^[12]。

由表 3 结果可知,随着激光功率从 2100 增加至 2700 W,热影响区的宽度逐渐增大;当激光功率为 2500 W 时,热影响区宽度适当,熔覆层高度相对较大,长宽尺寸方向也拟合良好,无较低功率情况下的包边现象。

在激光功率为 2500 W 的情况下,选用不同的激光扫描速度,分析激光扫描速度对温度场的影响。图 4(a)~(d)所示分别为激光扫描速度为 7、10、13、16 mm/s 时的平行面和横截面的温度云图。随着激光扫描速度的不断增大,熔池中心峰值温度逐渐降低,熔池面积不断减小,仿真结果的虚拟圆半径随之减小,减小趋势相对于激光功率较大。

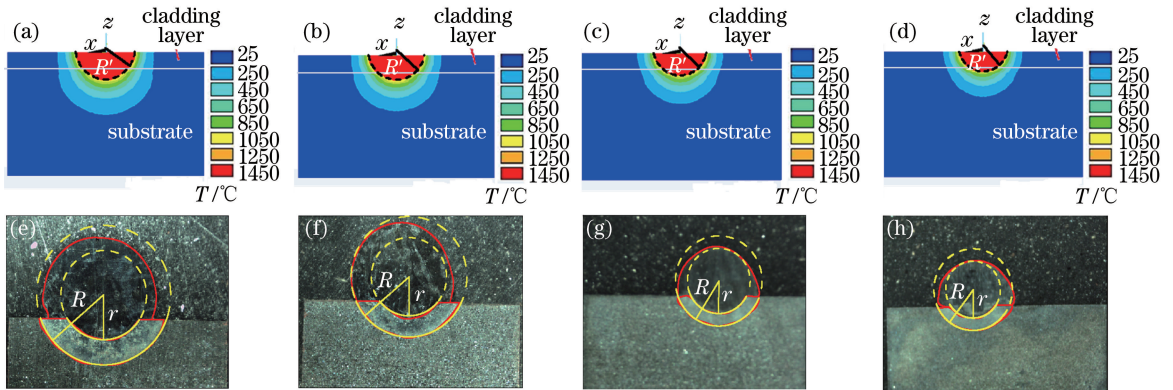


图 4 激光功率为 2500 W 时不同激光扫描速度下的温度场分布(上)和截面宏观图(下)。

(a)(e) 7 mm/s; (b)(f) 10 mm/s; (c)(g) 13 mm/s; (d)(h) 16 mm/s

Fig. 4 Temperature field distributions (up) and macroscopic cross-sectional diagrams (down) under different laser scanning speeds when laser power is 2500 W. (a)(e) 7 mm/s; (b)(f) 10 mm/s; (c)(g) 13 mm/s; (d)(h) 16 mm/s

由表 4 可知,随着激光扫描速度的不断增大,热影响区的宽度不断减小,并且减小的趋势相对于随激光功率减小的趋势更明显;激光扫描速度相对于

激光功率对熔覆层和热影响区的影响较大,激光扫描速度在 13 mm/s 时,粉层吸收的能量可以产生合适的熔池,形成稳定均匀的熔覆层^[13]。

表 3 和表 4 结果表明,仿真构建的熔覆层半径相对于实验所得的熔覆层构造圆半径较大,这是因为仿真在理想情况下进行,忽略了相变潜热等因素,而激光熔覆实际实验过程相对复杂。通过表 3 数据可知,仿真结果 R' 和 R 数值差别不大,因此可以为实验结果提供参考,从而减少实验次数,得到最优工艺参数。对比分析仿真及实验数据可知,相对于激光功率,激光扫描速度对 R' 和 R 的影响较大,因此,激光扫描速度相对于激光功率对熔覆层和热影响区的影响较大。

热影响区是基体与熔覆材料之间的过渡区域,

表 4 激光功率为 2500 W 时不同激光扫描速度下虚拟圆尺寸

Table 4 Virtual circle sizes under different laser scanning speeds when laser power is 2500 W				
Laser scanning speed / (mm · s ⁻¹)	Simulated radius R' / mm	Experimental radius R / mm	Experimental radius r / mm	HAZ $\Delta R / \text{mm}$
7	3.512	3.013	1.926	1.087
10	2.863	2.587	1.680	0.907
13	2.281	2.047	1.409	0.638
16	1.695	1.749	1.220	0.529

该区域的宽度对修复后的零件性能具有重要影响。热影响区的宽度过大,会造成基体材料变形过大,材料中会产生内应力,在激光熔覆过程中,工艺参数选择不当会造成该区域成为熔覆之后的薄弱环节,因此,找到合适的工艺参数从而得到适当的热影响区宽度尤为关键^[14]。综上考虑,在激光功率为 2500 W,激光扫描速度为 13 mm/s 的情况下,熔覆层轮廓与构造圆拟合情况良好,热影响区的宽度相对适中,无包边现象产生,熔覆层表面平整连续,无气孔、裂纹等缺陷,无明显起伏现象,成形性较好。

4.2 激光工艺参数对显微组织的影响

图 5 给出了不同激光功率下熔覆层中部的显微组织,从显微组织可以看出,当激光扫描速度为

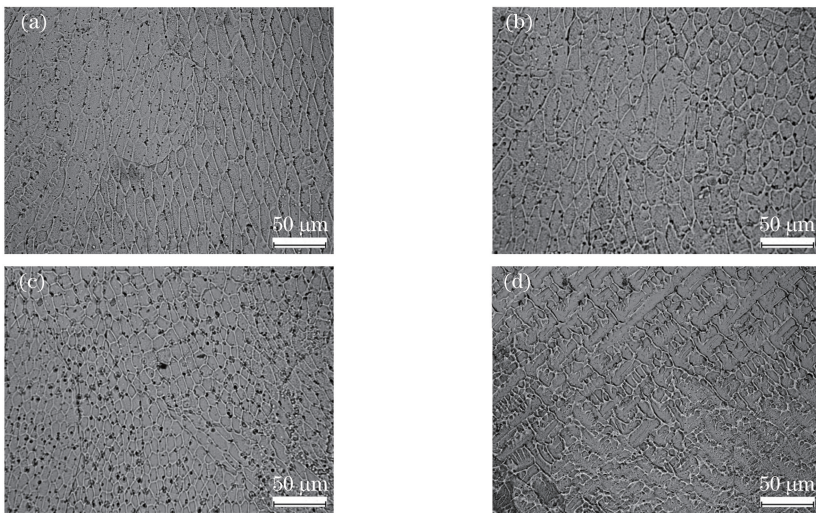


图 5 激光扫描速度为 13 mm/s 时不同激光功率下熔覆层中部的显微组织。(a) 2100 W;(b) 2300 W;(c) 2500 W;(d) 2700 W

Fig. 5 Microstructures in middle of cladding layers under different laser powers when laser scanning speed is 13 mm/s.

(a) 2100 W; (b) 2300 W; (c) 2500 W; (d) 2700 W

图 6 所示为不同激光扫描速度下熔覆层中部的显微组织,从显微组织可以看出,当激光功率为 2500 W 时,随着激光扫描速度的不断增大,晶粒边界越来越清晰明显,晶粒形状逐渐变为细长状。当激光扫描速度为 7 mm/s 时,由于扫描速度相对较小,单位扫描长度上激光束在粉末表面停留的时间相对较长,所形成的熔池较深,熔覆层中部晶粒生长趋势不规律,差异性相对较大,晶粒边界不明显,熔覆层吸收的热量较多,烧蚀现象严重;当激光扫描速度增大至 13 mm/s 时,晶粒长宽比接近 1:1,晶粒边界清晰明显,形成了致密均匀的等轴晶,如图 6 (c)所示;当激光扫描速度为 16 mm/s 时,由于激光扫描速度相对较快,预置粉末吸收的能量相对较少,熔池深度相对较浅,从熔池底部到熔覆层顶部各方向散热比较均匀致使凝固速率较快,形成了从熔池

13 mm/s 时,随着激光功率的不断增大,晶粒由细长柱状晶向等轴晶过渡,并且晶粒尺寸也逐渐减小。当激光功率为 2100 W 时,熔池所具有的热能量较小,从熔池底部到熔覆层表面晶粒呈细长状,晶粒的长宽比较大;随着激光功率的不断增大,当激光功率为 2500 W 时,所形成的熔池尺寸相对较大,熔池也比较深,从熔池底部到熔覆层表面凝固形成柱状晶的速度较慢,沿着激光扫描方向晶粒在宽度方向进一步被拉长,晶粒长宽比近似于 1:1,形成了致密均匀的等轴晶;当激光功率为 2700 W 时,对比图 5(a)~(c)可知,柱状晶相对粗大,晶粒尺寸差异较大,晶界不明显,这是由于激光功率过大,热能量较高,熔覆层材料出现烧蚀现象。

底部到熔覆层顶部生长趋势相对规律的细长等轴晶。综上分析考虑,当激光功率为 2500 W,激光扫描速度为 13 mm/s 时,形成的熔覆层显微组织相对较好^[15]。

5 结 论

利用 ANSYS 有限元分析软件进行单因素(激光功率和扫描速度)动态模拟,进行了相同条件下的激光熔覆实验,得到了良好成形性和晶粒细小致密的熔覆层。

数值模拟和实验结果表明,激光光斑中心的温度最高,虚拟圆半径随激光功率的增大而增大,随激光扫描速度的增大而不断减小。实验与仿真构造的大圆半径数值基本一致;随着激光功率的增大,构造的大圆半径逐渐增大,两圆半径之差

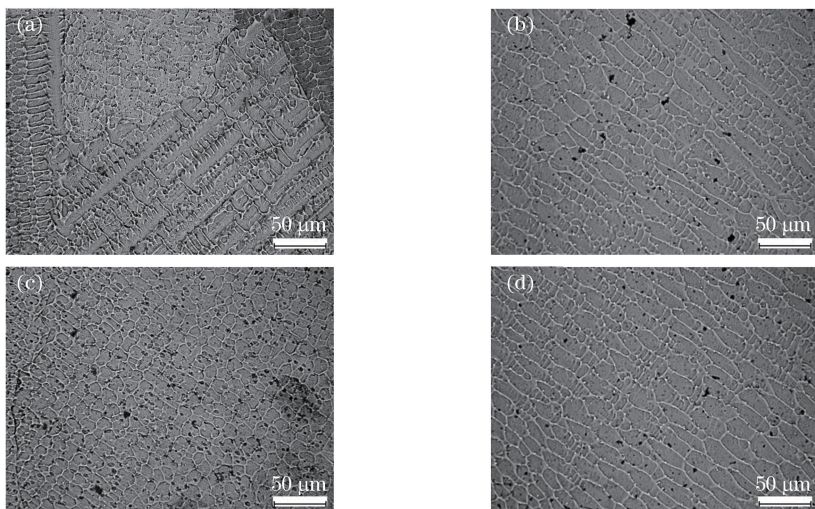


图6 激光功率为2500 W时不同激光扫描速度下熔覆层中部的显微组织。

(a) 7 mm/s; (b) 10 mm/s; (c) 13 mm/s; (d) 16 mm/s

Fig. 6 Microstructures in middle of cladding layers under different laser scanning speeds when laser power is 2500 W.

(a) 7 mm/s; (b) 10 mm/s; (c) 13 mm/s; (d) 16 mm/s

(即热影响区的宽度)也随之增大;随着激光扫描速度的增加,构造的大圆半径逐渐减小,热影响区的宽度也逐渐减小;激光功率2500 W,扫描速度13 mm/s为最优工艺参数,此时熔覆层的晶粒细小、致密,无烧蚀现象产生,熔覆层成形性良好。

参 考 文 献

- [1] Yang D J, Liu Y Z, Zhou L Y, *et al.* Effect of heat treatment on the mechanical properties of 27SiMn steel [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2012, 34(S1): 34-38.
杨栋杰, 刘雅政, 周乐育, 等. 热处理工艺对27SiMn钢力学性能的影响[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(S1): 34-38.
- [2] Xu P, Dong L, Ju H, *et al.* Microstructure and corrosion resistance of 304 stainless steel coating by laser cladding[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(S1): 221-225.
徐鹏, 董梁, 鞠恒, 等. 激光熔覆304不锈钢涂层的组织及耐蚀性[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(S1): 221-225.
- [3] Wang J, Liu J G, Luo X J. Research status of surface repairing for column cylinder of hydraulic support[J]. Mining & Processing Equipment, 2015, 43(10): 6-10.
王军, 刘晶歌, 罗小杰. 液压支架立柱缸体表面修复研究现状[J]. 矿山机械, 2015, 43(10): 6-10.
- [4] Chai R X, Li K K, Guo W, *et al.* Effect of heat treatment process on microstructures and properties

of 304 stainless steel cladding layers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(5): 051405.

柴蓉霞, 李凯凯, 郭卫, 等. 热处理工艺对304不锈钢熔覆层组织和性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 051405.

- [5] Du X Y, He J Q, Wang W, *et al.* Influence of laser power on corrosion resistance performance of cladding layer on 27SiMn stainless steel column[J]. Mining & Processing Equipment, 2018, 46(1): 59-64.
杜学芸, 何建群, 王伟, 等. 激光功率对27SiMn不锈钢立柱熔覆层耐蚀性能的影响[J]. 矿山机械, 2018, 46(1): 59-64.
- [6] Guo W, Li K K, Chai R X, *et al.* Analysis of microstructure and wear resistance of Fe-based alloy on 27SiMn steel surface by laser cladding[J]. Applied Laser, 2018, 38(3): 351-357.
郭卫, 李凯凯, 柴蓉霞, 等. 27SiMn钢表面激光熔覆铁基合金组织和耐磨性分析[J]. 应用激光, 2018, 38(3): 351-357.
- [7] Deng J J, Liu Z, Zhu T. Process parameters of laser cladding iron-based coating [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2015, 6(3): 51-55, 60.
邓居军, 刘政, 朱涛. 激光熔覆铁基涂层工艺参数的研究[J]. 有色金属科学与工程, 2015, 6(3): 51-55, 60.
- [8] Gong X Y, Gao S Y, Xian S Y, *et al.* Warp deformation in single-track laser cladding based on temperature characteristics [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 101410.

- 宫新勇, 高士友, 咸士玉, 等. 基于温度特征的单道激光熔覆翘曲变形[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 101410.
- [9] Yong Y W, Fu W, Deng Q L, *et al.* A comparative study of vision detection and numerical simulation for laser cladding of nickel-based alloy[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 28: 364-372.
- [10] Bao Y M, Gao H M, Zhang D M, *et al.* Laser cladding bio-ceramic coating process parameters selection based on simulation of temperature field[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(11): 111601.
鲍雨梅, 高海明, 张冬明, 等. 基于温度场模拟的激光熔覆生物陶瓷涂层工艺参数选择[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(11): 111601.
- [11] Xu P, Lin C X, Zhou C Y, *et al.* Preparation and microstructure of 304 stainless steel layer by laser cladding[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2013, 34(7): 142-146.
徐鹏, 林成新, 周超玉, 等. 激光熔覆 304 不锈钢涂层的工艺及组织[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(7): 142-146.
- [12] Gu S N, Wang G Y, Qin Y, *et al.* Correlation between process parameters and microstructure morphologies of W-cu composites fabricated by laser cladding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(4): 0402005.
顾赛男, 王广原, 秦渊, 等. 激光熔覆 W-Cu 复合材料的组织形貌与工艺参数的相关性[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0402005.
- [13] Zhi X, Zhao J F, Cai J. Effect of process parameters on forming quality of fusion zone in laser cladding[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(10): 101403.
智翔, 赵剑峰, 蔡军. 激光熔覆修复工艺参数对熔合区成形质量的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(10): 101403.
- [14] Xu Q D, Lin X, Song M H, *et al.* Microstructure of heat-affected zone of laser forming repaired 2Cr13 stainless steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2013, 49(5): 605-613.
徐庆东, 林鑫, 宋梦华, 等. 激光成形修复 2Cr13 不锈钢热影响区的组织研究[J]. 金属学报, 2013, 49(5): 605-613.
- [15] Yang D, Ning Y H, Zhao Y G, *et al.* Influence of processing parameter on microstructure, wear-resistance and corrosion-resistance of laser cladding Ni-based alloy on the surface of 304 stainless steel[J]. *Materials Review*, 2017, 31(24): 133-140.
杨丹, 宁玉恒, 赵宇光, 等. 工艺参数对 304 不锈钢表面激光熔覆 Ni 基金属涂层的组织、耐磨性及耐腐蚀性的影响[J]. 材料导报, 2017, 31(24): 133-140.