

激光与光电子学进展

45 钢表面激光熔覆 Fe35A 合金的工艺参数优化

王胜^{1*}, 郑舜³, 刘文军¹, 朱旭东², 周明安¹, 姜昊³¹衢州职业技术学院机电工程学院, 浙江 衢州 324000;²浙江工业大学激光制造研究院, 浙江 杭州 310027;³红五环机械股份有限公司, 浙江 衢州 324000

摘要 为了提高矿用液压立柱的使用寿命, 利用激光熔覆技术在立柱用 45 钢材料表面制备了 Fe35A 合金。利用数字化测试设备对不同激光功率、扫描速度和送粉速率下制备的熔覆层进行测试, 研究试样表面硬度、几何尺寸、显微组织、截面显微硬度的变化规律, 得出了激光熔覆的最佳工艺参数。结果表明: 在激光功率为 2100 W、扫描速度为 5 mm/s、送粉速率为 15 g/min 的最佳激光熔覆参数下制备的熔覆层的质量最佳, 熔覆层的显微组织较好, 晶粒细小均匀, 与基体结合良好, 熔覆层表面硬度可达 42 HRC, 熔覆层横截面显微硬度的均值为 643 HV。激光熔覆层的综合力学性能明显高于基体, 实现了在 45 钢基体表面高质量制备 Fe35A 合金涂层的目的。

关键词 激光技术; Fe35A 合金粉末; 45 钢; 激光熔覆; 硬度; 显微组织; 几何尺寸

中图分类号 TH16; TH14; TN12

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0914007

Optimization of Process Parameters for Laser Cladding Fe35A Alloy on 45 Steel Surface

Wang Sheng^{1*}, Zheng Shun³, Liu Wenjun¹, Zhu Xudong², Zhou Ming'an¹, Jiang Hao³¹Mechanical and Electrical Engineering, Quzhou College of Technology, Quzhou, Zhejiang 324000, China;²Institute of Laser Advanced Manufacturing, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310027;³Hongwuhuan Machinery Co., Ltd., Quzhou, Zhejiang 324000, China

Abstract To improve the service life of a mining hydraulic column, an Fe35A alloy layer was prepared on the surface of 45 steel material by laser cladding technology. The cladding layer, which was prepared using different laser powers, scanning speeds, and powder feeding rates, was tested using digital testing equipment to study the surface hardness, geometric size, microstructure, and sectional microhardness of the sample, and the optimal process parameters for laser cladding were obtained. Results show that under the optimal laser cladding parameters of 2100 W laser power, scanning speed of 5 mm/s, and powder feeding rate of 15 g/min, the quality of the cladding layer is the best, the microstructure of the cladding layer are good, the grain size is fine and uniform, and the fusion between the matrix structure and the cladding layer is satisfactory, the hardness of the cladding layer surface is 42 HRC, and the average microhardness of the cross-section of the cladding layer is 643 HV. The comprehensive mechanical properties of the laser cladding layer are higher than those of the matrix structure. The preparation of Fe35A alloy coating with high-quality on 45 steel substrate is realized.

Key words laser technique; Fe35A alloy powder; 45 steel; laser cladding; hardness; microstructure; geometry size

收稿日期: 2020-10-02; 修回日期: 2020-11-02; 录用日期: 2020-11-12

基金项目: 衢州市科技计划(2020K17)、浙江省基础公益研究计划(LGC21E050002)、浙江省教育厅一般科研项目(Y202044634)、国家自然科学基金(51605252)

*E-mail: 158942287@qq.com

1 引言

45 钢具有较高的强度和抗变形能力,其以良好的综合机械加工性能,被广泛应用于矿用液压立柱与液压支架的重要零部件上。由于矿用液压立柱的工作环境较为恶劣,存在液、气、化三重腐蚀,导致液压立柱基体会出现不同程度的腐蚀失效现象,如不能及时修复或更换,会影响相应矿用机械设备的正常使用寿命^[1],但更换液压立柱以及对其进行电镀修复是一项极为庞大工程。因此,研究人员尝试将激光熔覆再制造技术用于液压立柱腐蚀表面的修复,进而提高立柱表面的综合性能。

国内外学者对液压立柱用 45 钢表面的激光熔覆进行了较为系统的研究,并得到了激光熔覆工艺参数对熔覆层综合硬度(洛氏和显微硬度)、几何尺寸、显微组织、熔覆表面形貌等的影响规律^[2-3]。如:曹金龙等^[4]在油泵柱塞立柱 45 钢表面进行了激光熔覆 Ni60-TiC 材料的试验,然后对熔覆不同 TiC 含量的涂层进行了摩擦磨损试验及腐蚀试验,同时对涂层的微观形貌进行表征,最终得出了最佳的 TiC 含量;董冬梅等^[5]为了改善 45 钢的表面性能,利用激光熔覆技术在其表面进行了镍基陶瓷复合涂层的熔覆试验,然后通过分析熔覆层的表面形貌和稀释率,得出最优的熔覆工艺参数;陈菊芳等^[6]在 45 钢表面制备了 Fe901 激光熔覆层,并采用干摩擦工艺对成形试件进行了摩擦磨损试验,以此验证采用激光熔覆技术在 45 钢表面进行 Fe901 合金的熔覆再制造后,基体组织的整体耐磨性明显得到提高;唐翠勇等^[7]对 45 钢基体进行了 $Fe_{60}Nb_{13}Ti_{13}Ta_{13}$ 合金粉末的激光熔覆加工,研究了熔覆层的综合力学性能,结果发现,熔覆层的耐磨性明显优于基体材料;张德强等^[8]利用激光熔覆性能较好的碳化钨镍基粉末对 45 钢基体磨损区进行了修复,然后采用高端显微检测仪对熔覆区的显微形貌进行观察,结果发现,环状修复技术得到的熔覆层的宏观质量最高;Narva 等^[9]研究了混合粉末中碳化钛(TiC)含量对 45 钢基体表面激光熔覆层几何尺寸的影响,同时借助高精显微设备对熔覆层的组织形貌和综合硬度进行了详细研究,为 45 钢的表面激光熔覆技术提供了参考;Kusmoko 等^[10]在两种不同的钢基体上采用激光熔覆技术制备了钨铬钴合金涂层,然后采用数字化高端显微仪综合分析了熔覆层的结构和微观形貌特征。

综上所述,随着激光熔覆技术的不断发展,基于新型合金材料的激光熔覆工艺参数对熔覆基体与熔覆层力学性能与综合形貌的影响,成为了目前研究的热点方向^[11-12]。但在针对矿用液压立柱 45 钢基体的激光熔覆中,采用 Fe35A 铁基合金粉末对 45 钢基体表面进行修复,研究工艺参数变化对熔覆质量、熔覆层形状、显微硬度、显微组织等影响的报道并不多^[13-14]。因此,本文以液压立柱用 45 钢为基体,进行了 Fe35A 合金粉末的激光熔覆再制造试验,综合分析了激光熔覆工艺参数对熔覆层综合力学性能的影响规律。

2 试验

2.1 试验材料

采用某矿用液压立柱基体材料 45 钢作为试验材料,对其进行高温回火后,用砂纸进行打磨并去除其表面的氧化皮,同时用 WD40 清洁剂进行防锈清洗,并在试样表面涂覆相应的激光增收材料,最终基体的尺寸为 60 mm×60 mm×25 mm。熔覆材料选用 Fe35A 铁基合金粉末,常温状态下该粉末的硬度为 32 HRC,其化学成分如表 1 所示^[15]。试验前,将试样与铁基合金粉末在温度为(22±1)℃的环境下保存 24 h^[16]。

表 1 熔覆用 Fe35A 合金粉末的化学成分
Table 1 Chemical composition of Fe35A alloy powder for cladding

Element	Cr	Si	Mo	C	Ni	Mn	Fe
Mass fraction /%	18.31	3.50	5.0	0.6	28.0	0.55	Bal.

2.2 试验方法

采用六轴联动的 FANUC 工业机器人激光熔覆装置进行熔覆试验,该装置配备有 3 kW 激光强化修复系统,采用 PFTD-ID03 同步装盘式双筒送粉装置。进行熔覆试验时,光斑尺寸为 5 mm×3 mm,送粉气体(N₂)的压力为 0.35 MPa,负载气流量为 490 L/h,设置安全气压(N₂)为 0.2 MPa^[16]。激光熔覆工艺参数如表 2 所示。

结合表 2,研究不同工艺参数下 Fe35A 合金熔覆层的表面硬度、几何形貌、组织形貌、截面显微硬度等。熔覆完成后,利用显微硬度仪测试熔覆层表面的洛氏硬度^[17-18],并选取较高洛氏硬度值对应的熔覆参数进行延伸扩展试验。同时,将相应的扩展试验参数和测量数值以曲线图的形式进行表示,客观分析各工艺参数对激光熔覆层综合力学性能的

表 2 激光熔覆工艺参数
Table 2 Laser cladding parameters

No.	Laser power /W	Scanning speed / (mm·s ⁻¹)	Powder feeding rate / (g·min ⁻¹)
1#	2100	5	15
2#	2100	6	22.5
3#	2100	7	30
4#	2400	7	22.5
5#	2400	6	15
6#	2400	5	30
7#	2700	7	15
8#	2700	5	22.5
9#	2700	6	30

影响,并优选出激光熔覆 Fe35A 合金的最佳工艺参数。对于采用最佳工艺参数制备而成的试件,采用线切割装置将其平均分成 3 段,并选择较为均匀的中段试件,用标准砂纸及磨光机进行截面精抛处理,再采用质量分数为 5% 的硝酸酒精溶液腐蚀 25 s,然后利用 A-41X 高级倒置金相显微镜观察熔覆层的显微组织,同时测量熔覆层的几何尺寸(高度和

宽度),并进行综合分析^[8];最后利用 HV-1000Z 自动转塔显微维氏硬度计沿熔覆层表层垂直方向每间隔 0.1 mm 进行硬度的测量,各测试点的加载载荷均设为 1.96 N,保压时间均为 10 s^[17]。在上述测试中,均采用 3 次测量数据的平均值作为最终的测试值^[18-20]。

3 熔覆试验结果与分析

3.1 工艺参数对熔覆层表面硬度的影响

9 种不同工艺参数下制得的 Fe35A 熔覆层表面洛氏硬度的平均值如表 3 所示,洛氏硬度的测量误差如图 1 所示。在激光功率为 2100 W、扫描速度为 5 mm/s、送粉速率为 15 g/min 的 1#参数下,试验成形的熔覆层表面洛氏硬度值最高,为 42 HRC。结合此参数进行扩展试验,将扩展试验所得的数据与工艺参数在相应的曲线图中进行表示,深入分析各熔覆经验参数对 Fe35A 合金熔覆层综合硬度、熔覆形貌和几何形状特征的影响规律,以获得最佳的激光熔覆工艺参数。

表 3 不同激光工艺参数下制得的 Fe35A 熔覆层洛氏硬度的平均值

Table 3 Average Rockwell hardness of Fe35A cladding layer prepared with different laser parameters

No.	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#
Hardness /HRC	42.0	35.0	36.3	36.8	36.9	35.4	36.0	34.8	35.8

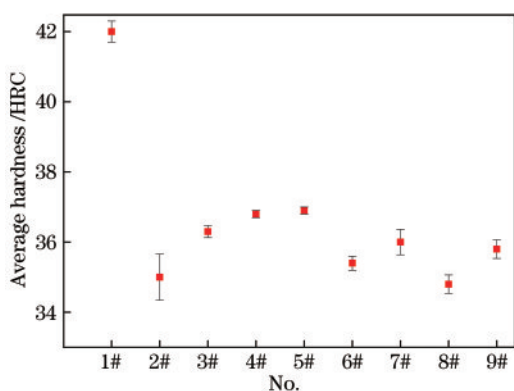


图 1 熔覆试样表面的洛氏硬度值及其测试误差

Fig. 1 Rockwell hardness of cladding sample surface and its testing error

3.1.1 激光功率对熔覆层表面硬度的影响

将送粉速率控制在 15 g/min,研究了不同扫描速度下激光功率对激光熔覆层硬度的影响,结果如图 2 所示。分析图 2 曲线的变化规律可知,随着激光功率由 2100 W 逐渐增大到 3000 W,熔覆层的表

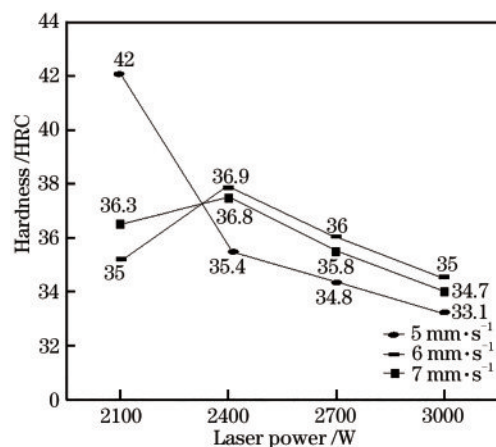


图 2 不同扫描速度下激光功率对熔覆层表面洛氏硬度的影响
Fig. 2 Effect of laser power on Rockwell hardness of cladding layer surface under different scanning speeds

面硬度整体呈现下降趋势。对扫描速度为 5 mm/s 的曲线进行分析,发现其洛氏硬度最高值出现在 2100 W 时,峰值可达 42 HRC,从而确定激光熔覆过程中 2100 W 为最佳的激光功率。

3.1.2 送粉速率对熔覆层表面硬度的影响

将激光功率控制在 2100 W,分析不同扫描速度下送粉速率对熔覆层表面硬度的影响规律,结果如图 3 所示。不难发现,随着激光熔覆过程中送粉速率的不断增加,三条曲线均呈现出整体下降的趋势。虽然当送粉速率在 22.5~30 g/min 区间时,硬度有阶段性上升过程,但随着送粉速率继续增大,硬度又呈降低的变化规律。当送粉速率为 15 g/min 时,在 5 mm/s 扫描速度下制备的熔覆层的表面硬度最大,为 42 HRC。观察 3 条曲线的变化规律可以发现,当送粉速率为 15 g/min 时,出现了最高的硬度值 (42 HRC),从而确定激光熔覆过程的最佳送粉速率为 15 g/min。

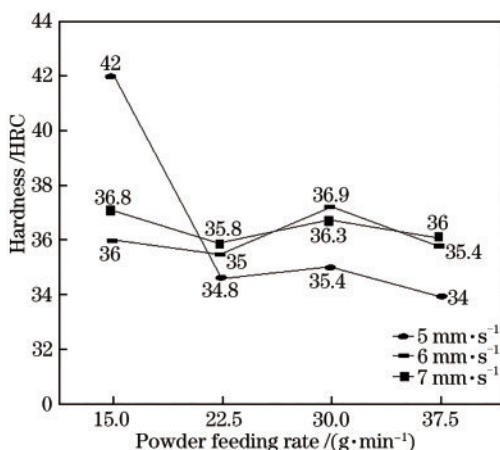


图 3 不同扫描速度下送粉速率对熔覆层表面洛氏硬度的影响
Fig. 3 Effect of powder feeding rate on Rockwell hardness of cladding layer surface under different scanning speeds

3.1.3 扫描速度对熔覆层表面硬度的影响

将激光功率控制在 2100 W,分析扫描速度与送粉速率对熔覆层表面硬度的影响规律。由图 4 可以看出:当送粉速率为 15 g/min 时,随着试验过程中扫描速度的不断增加,Fe35A 熔覆层的硬度呈下降趋势;当送粉速率为 22.5 g/min 和 30 g/min 时,熔覆层表面硬度在 6~7 mm/s 范围内出现了缓慢上升的趋势,但随扫描速度的再次增加,硬度值均出现下降,且三条曲线下下降的趋势相同。整体分析图 4 中曲线的变化规律不难看出,Fe35A 熔覆层表面洛氏硬度值最高出现在激光扫描速度为 5 mm/s 时,其洛氏硬度值达 42 HRC,从而确定激光熔覆过程中最佳的激光扫描速度为 5 mm/s。

综上所述,激光熔覆的最佳工艺参数如下:激光功率 2100 W,送粉速率 15 g/min,扫描速度 5 mm/s。

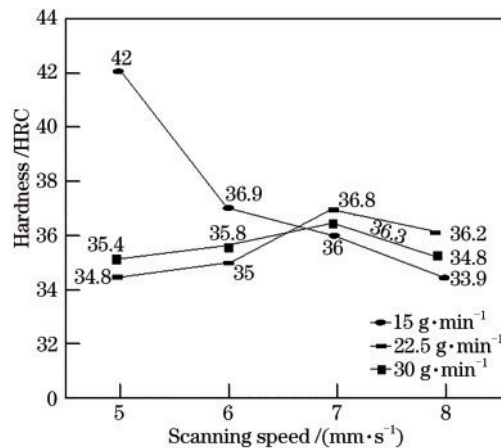


图 4 不同送粉速率下扫描速度对熔覆层表面洛氏硬度的影响
Fig. 4 Effect of scanning speed on Rockwell hardness of cladding layer surface under different power feeding rates

3.2 工艺参数对熔覆层几何尺寸的影响

图 5 和图 6 分别为不同工艺参数下激光熔覆 Fe35A 合金试样的表面宏观形貌和横截面几何尺寸。综合分析图 5 中 9 件试样的表面宏观形貌可知,熔覆层表面形貌最规整均匀的为 1#、2#、3# 试样。结合表 2 可知,它们对应的激光功率均为 2100 W。由图 5 还可以发现,随着激光功率不断增加,熔覆形貌逐渐失真,最差的熔覆形貌出现在 9# 试样上,此时的激光功率为 2700 W。

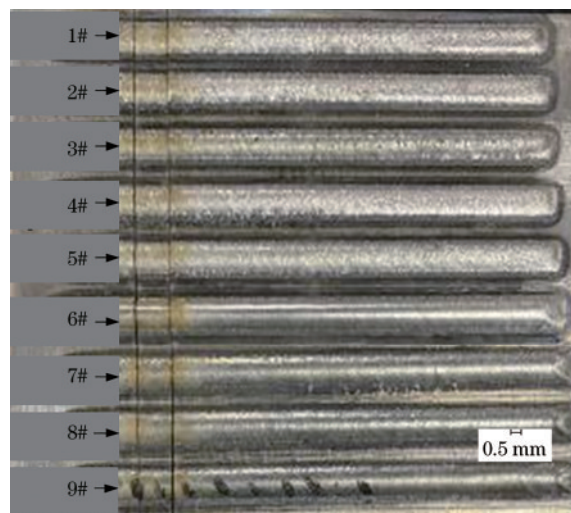


图 5 不同工艺参数下激光熔覆层的表面宏观形貌
Fig. 5 Surface macro appearance of laser cladding layer prepared at different process parameters

综合分析图 6 中 9 件试样熔覆层横截面的几何形貌不难发现,在不同的激光熔覆工艺参数下,各熔覆层横截面的几何宽度和几何厚度均存在不同程度的变化。采用高精度数显游标卡尺对图 6 中熔

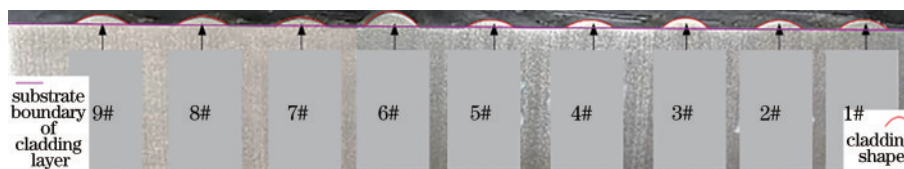


图 6 不同工艺参数下激光熔覆层横截面的几何形貌

Fig. 6 Geometric morphology of laser cladding layer prepared at different process parameters

覆层横截面的几何尺寸进行测量,以深入研究激光熔覆参数对熔覆层几何尺寸(高度和宽度)的影响规律。

3.2.1 对熔覆层几何宽度的影响

试样熔覆层几何宽度的测量结果如图 7 所示,其测量误差如图 8 所示。分析图 7 和图 8 可知:在 9 件试样中,几何宽度最大值出现在 6# 试样上,为 5.42 mm;3# 试样的几何宽度最小,为 4.62 mm,该试样对应的扫描速度与 6# 试样的(5 mm/s)相差最

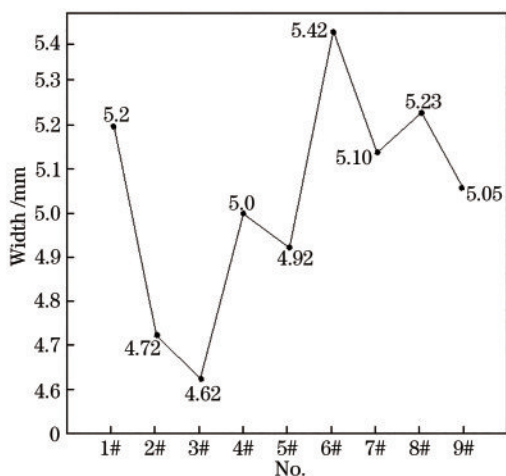


图 7 工艺参数对熔覆层几何宽度的影响

Fig. 7 Effect of process parameters on geometric width of cladding layer

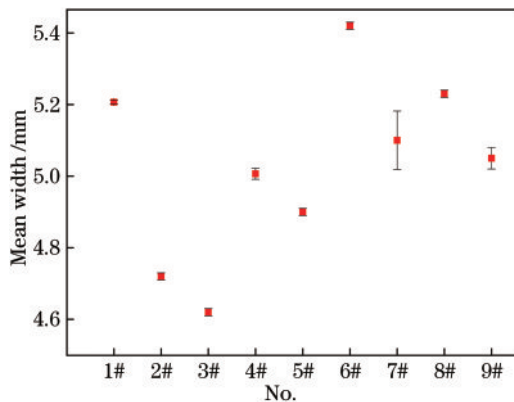


图 8 熔覆层几何宽度的平均值及测量误差

Fig. 8 Average geometric width of cladding layer and its testing error

大,其扫描速度为 7 mm/s。同时,深入分析 1#~3#、4#~6#和 7#~9#试样可以发现,这三组试样对应的激光功率相同但扫描速度不同。可以看出,随着扫描速度增大,三组试样的熔覆层几何宽度均基本表现为逐渐减小的变化规律。因此,本研究认为激光熔覆工艺参数中的扫描速度对熔覆层几何宽度的影响较大,在激光功率一定的情况下,熔覆层几何宽度随扫描速度的增大而减小。

3.2.2 对熔覆层几何高度的影响

试样熔覆层高度的测量结果如图 9 所示,其测量误差如图 10 所示。分析图 9 和图 10 可知:9 件试

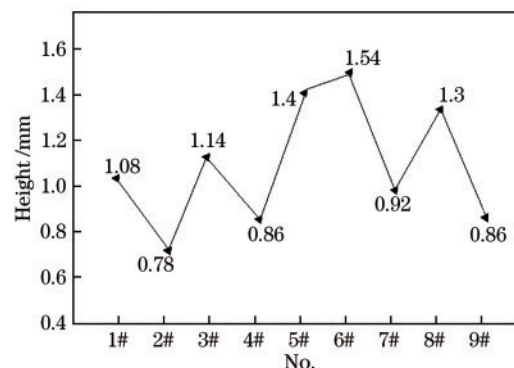


图 9 工艺参数对熔覆层几何高度的影响

Fig. 9 Effect of process parameters on geometric height of cladding layer

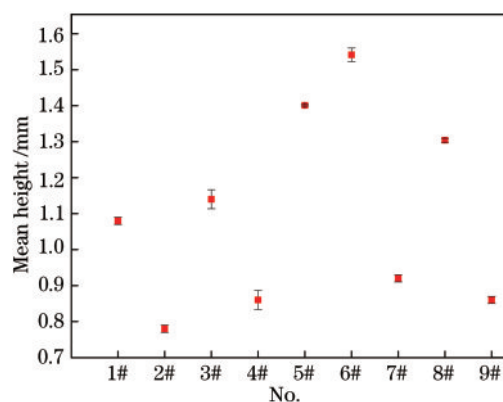


图 10 熔覆层几何高度的平均值及测量误差

Fig. 9 Average geometric height of cladding layer and its testing error

样中熔覆层几何高度的最大值出现在 6# 试样上, 为 1.54 mm; 2# 试样熔覆层的几何高度最小, 为 0.78 mm, 该试样对应的送粉速率为 22.5 g/min, 与 6# 试样的 (30 g/min) 相差较大。同时, 深入分析 3#、6#、9# 试样可以发现, 它们的熔覆层几何高度均较大, 且均具有送粉速率相同且扫描速度变化不大, 但激光功率呈规律性增大的特点。因此, 本研究认为激光熔覆工艺参数中的送粉速率和激光功率对熔覆层几何高度的影响较大。

3.3 工艺参数对熔覆层显微组织的影响

选取最佳工艺参数下成形的 1# 试样和硬度最低的 8# 试样, 对其熔覆层的显微组织进行观察, 结果如图 11(a)、(b) 所示。由图 11(a) 可以看出, 1# 试样熔覆层的晶粒细小, 分布得较为均匀, 中层区域的硬度值较高。冷却过程的过冷度较大^[8], 晶粒在熔覆过程不断细化, 因此中层区域的硬度值较高。对比 8# 试样和 1# 试样熔覆层的显微组织可以发现, 图 11(b) 所示的 8# 试样熔覆层的晶粒较为粗大, 且分布得不均, 因此 8# 试样的硬度值较低。

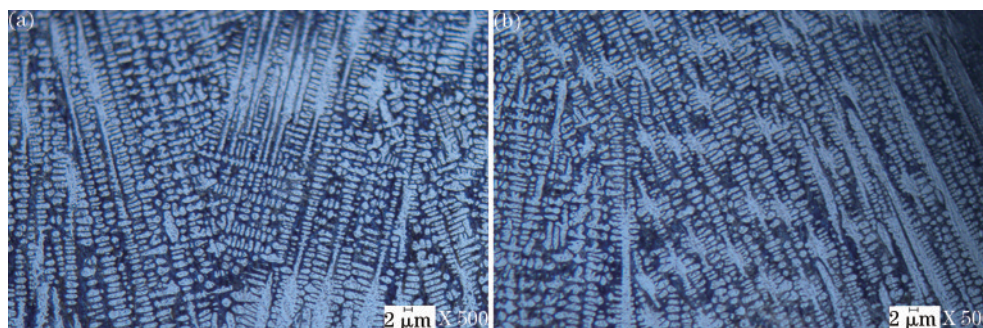


图 11 1# 试样和 8# 试样熔覆层的显微组织。(a) 1# 试样; (b) 8# 试样

3.4 工艺参数对熔覆层显微硬度的影响

选取最佳工艺参数成形的 1# 试样, 利用金相显微镜对其横截面的三维形貌进行观察, 结果如图 12 所示。根据横截面的三维形貌, 可将试样横截面分为熔覆层区、热影响区、结合区和基体区。结合

图 12 所示的最佳工艺参数下成形熔覆层横截面的三维形貌, 在横截面中选取距熔覆层表层距离为 0.1 mm 的位置, 分别对熔覆层区的显微硬度进行测量, 每隔 0.1 mm 深度对应的显微硬度值及显微硬度误差如图 13、14 所示。

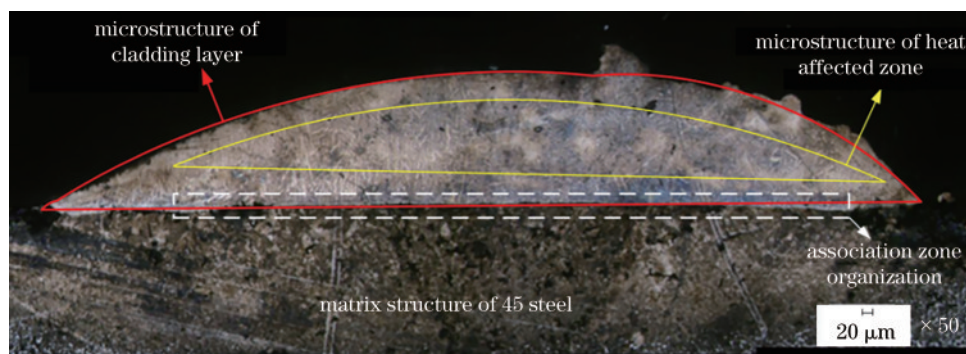


图 12 最佳工艺参数下成形熔覆层横截面的三维形貌

Fig. 12 Three-dimensional morphology of cross-section of cladding layer prepared at optimal process parameters

观察图 13 所示的最佳工艺参数下成形熔覆层的显微硬度分布可以发现, 热影响区和熔覆层区的显微硬度较高, 平均值在 643 HV 左右, 最大值可达 675 HV, 远高于 45 钢基体区组织的显微硬度。熔覆层表层的显微硬度值随测量深度的增大而逐渐增大, 这是因为熔覆表层的冷却速率较快, 导致过冷度降低, 形成了如图 11(b) 所示的粗大晶体颗粒,

因此熔覆区表层的显微硬度值稍低。另外, 随着熔覆区逐渐加深, 内部凝固时产生的过冷度较大^[8], 组织的形貌以图 11(a) 所示的细小晶粒为主, 使得熔覆区中层的显微硬度值高于表层。热影响区由于受到激光的淬火处理而出现了较多的回火马氏体^[15-20], 因此该区域的显微硬度值大幅高于 45 钢基体的硬度。

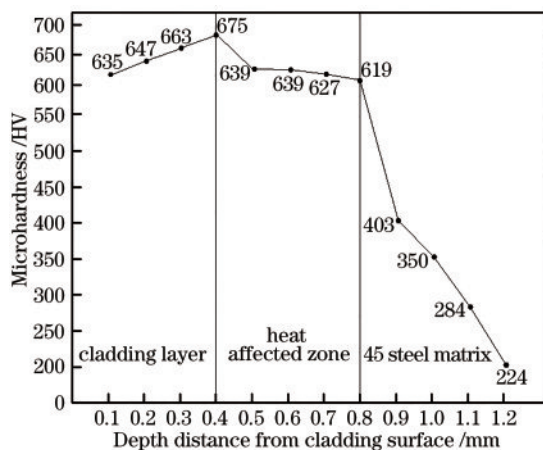


图 13 最佳工艺参数下成形熔覆层的显微硬度分布
Fig. 13 Microhardness distribution of laser cladding prepared at optimal process parameters

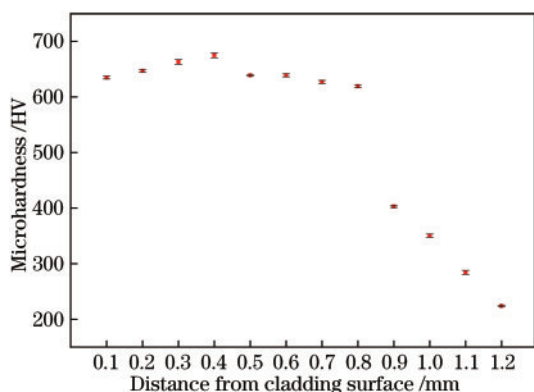


图 14 最佳工艺参数下成形熔覆层的显微硬度及其测量误差
Fig. 14 Microhardness of cladding layer prepared at optimal process parameters and its testing error

4 结 论

在液压立柱用 45 钢基体表面激光熔覆 Fe35A 铁基合金粉末试验中,当送粉速率和扫描速度一定时,随着激光功率增大,熔覆层的表面硬度呈下降趋势;当激光功率和扫描速度一定时,随送粉速率增大,熔覆层的表面硬度整体呈现下降的规律。

在激光熔覆工艺参数中,扫描速度对熔覆层几何宽度的影响较大,在激光功率一定的条件下,熔覆层几何宽度随扫描速度的增大而减小;送粉速率和激光功率对熔覆层几何高度的影响较大。

在激光熔覆试验过程中,当工艺参数控制在激光功率为 2100 W,扫描速度为 5 mm/s,送粉速率为 15 g/min 时,得到的熔覆层质量最佳,其表面及内部无裂纹和气泡,表面洛氏硬度可达 42 HRC。

在 45 钢基体表面采用激光熔覆 Fe35A 铁基合

金粉末制备熔覆涂层,熔覆层和基体结合良好,且熔覆层的显微硬度均值约为 643 HV,最大值可达到 675 HV。熔覆层的晶粒细化,排列紧凑,表明激光熔覆技术在液压立柱用 45 钢基体修复和熔覆加工领域具有广阔的前景。

参 考 文 献

- [1] Shi Y S. Analysis of influencing factors on gear drive performance of mining equipment for life assessment[J]. China Mine Engineering, 2019, 48(4): 52-54,58.
石永森. 面向寿命评价的矿用设备齿轮传动性能影响因素分析[J]. 中国矿山工程, 2019, 48(4): 52-54,58.
- [2] Wang T, Liu J Q, Qin L C. Effects of laser power on microstructure and hardness of CoNiCrAlY cladding coatings[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(24): 142-145,151.
王涛, 刘佳奇, 秦令超. 激光功率对 CoNiCrAlY 熔覆涂层显微组织及硬度的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(24): 142-145,151.
- [3] Chen L, Xie P L. Theory and experimental research on controlling crack in double-scanning laser cladding process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(2): 65-68,116.
陈列, 谢沛霖. 双向扫描激光熔覆止裂机理及试验分析[J]. 焊接学报, 2011, 32(2): 65-68,116.
- [4] Cao J L, Yang X F, Wang S R, et al. Wear and corrosion resistance of laser cladding Ni60-TiC ceramic coating on 45 steel surface[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(2): 611-617.
曹金龙, 杨学锋, 王守仁, 等. 45 钢表面激光熔覆 Ni60-TiC 陶瓷涂层的耐磨耐蚀性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(2): 611-617.
- [5] Dong D M, Chen J F, Lei W N. Investigation on forming effect and dilution rate of laser cladded coating on 45 steel surface[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(4): 163-166,169.
董冬梅, 陈菊芳, 雷卫宁. 45 钢表面激光熔覆层成形效果及稀释率研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(4): 163-166,169.
- [6] Chen J F, Li X P, Xue Y P. Friction and wear properties of laser cladding Fe901 alloy coating on 45 steel surface[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0502001.
陈菊芳, 李小平, 薛亚平. 45 钢表面激光熔覆 Fe901 合金的摩擦磨损性能[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0502001.

- [7] Tang C Y, Wang B H, Kang J M, et al. Microstructure and properties of $\text{Fe}_{60}\text{Nb}_{13}\text{Ti}_{13}\text{Ta}_{13}$ amorphous alloy powder on 45 steel by laser cladding [J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45(10): 178-181,186.
唐翠勇, 王冰华, 康剑鸣, 等. 45 钢表面激光熔覆 $\text{Fe}_{60}\text{Nb}_{13}\text{Ti}_{13}\text{Ta}_{13}$ 非晶合金粉末及组织性能研究 [J]. *热加工工艺*, 2016, 45(10): 178-181,186.
- [8] Zhang D Q, Zhang J Q, Guo Z J. Research of microstructure and properties of repairing 45# steel mold on laser cladding [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2017(2): 118-120.
张德强, 张吉庆, 郭忠娟. 激光熔覆修复 45# 钢模具的组织及性能研究 [J]. *机械设计与制造*, 2017(2): 118-120.
- [9] Narva V K, Marants A V, Sentyurina Z A. Investigation into laser cladding of steel-titanium carbide powder mixtures on a steel substrate [J]. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2014, 55(3): 282-288.
- [10] Kasmoko A, Li H J. Surface morphology and wear analysis of Stellite 6 deposited on 9Cr-1Mo steel substrate by laser cladding [J]. *Advanced Materials Research*, 2015, 1119: 640-644.
- [11] Zhang D Q, Hao Y J, Li J H. Effects of laser cladding laser parameters on Ni60A performance of cladding layer [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2017(1): 115-118.
张德强, 郝延杰, 李金华. 激光熔覆工艺参数对 Ni60A 熔覆层性能影响 [J]. *机械设计与制造*, 2017(1): 115-118.
- [12] Zhong C L, Gasser A, Kittel J, et al. Study of process window development for high deposition-rate laser material deposition by using mixed processing parameters [J]. *Journal of Laser Applications*, 2015, 27(3): 032008.
- [13] Cui Z Q, Wang W X, Cao G G, et al. Microstructure and properties of Fe-based alloy and B_4C ceramics composite coating on low carbon steel by laser cladding [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2011, 32(3): 134-138.
崔泽琴, 王文先, 曹国光, 等. 碳钢表面激光熔覆铁基 B_4C 陶瓷涂层的组织与性能 [J]. *材料热处理学报*, 2011, 32(3): 134-138.
- [14] Bui E T, Anderson N K, Kassem L, et al. Do participants in genome sequencing studies of psychiatric disorders wish to be informed of their results? A survey study [J]. *PLoS One*, 2014, 9(7): e101111.
- [15] Zhang D Q, Kao X J, Li J H. Research on the process of laser cladding iron-based alloy powder on H13 steel surface [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2016(10): 41-43,48.
张德强, 考锡俊, 李金华. H13 钢表面激光熔覆铁基合金粉末的工艺研究 [J]. *机械设计与制造*, 2016(10): 41-43,48.
- [16] Xu N J, Liu C S, Feng X Y, et al. Effects of laser cladding parameters on microstructure and properties of gradient clad coating on 45# steel [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2019, 40(4): 495-499.
许妮君, 刘常升, 冯欣侯, 等. 激光工艺对 45 钢表面梯度熔覆层组织性能的影响 [J]. *东北大学学报 (自然科学版)*, 2019, 40(4): 495-499.
- [17] Wang S, Liu W J, Zhou M A, et al. Optimization of process parameters for high speed milling TC4 titanium alloy with PCD tool [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2020, 40(4): 47-52.
王胜, 刘文军, 周明安, 等. PCD 刀具高速铣削 TC4 钛合金的工艺参数优化 [J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2020, 40(4): 47-52.
- [18] Zhang L, Chen X M, Liu W. Formation mechanism and sensitivity of cracks in laser-clad Ni-based-alloy coatings [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(11): 111401.
张磊, 陈小明, 刘伟. 激光熔覆 Ni 基合金裂纹的形成机理及敏感性 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56: 111401.
- [19] Guo W, Zhang Y P, Chai R X. Numerical simulation and experimental study of single-track laser cladding of 304 stainless steels [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(9): 091401.
郭卫, 张亚普, 柴蓉霞. 单次激光熔覆 304 不锈钢数值模拟与实验研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(9): 091401.
- [20] Yang J, Liu Y D, Shi W T, et al. Process optimization and performance investigation in selective laser melting of large layer-thickness 316L powder [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(1): 011401.
杨锦, 刘玉德, 石文天, 等. 大层厚 316L 选区激光熔化工艺优化及性能研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(1): 011401.