文章编号:1001-5078(2022)02-0202-08

·激光应用技术 ·

# 宽带激光熔覆铁基涂层工艺参数及性能研究

石 皋 莲<sup>1,2</sup>, 丁 倩 倩<sup>1</sup>, 奚 朋<sup>1</sup>, 倪 玉 吉<sup>2</sup>, 石 世 宏<sup>2</sup> (1. 苏州工业职业技术学院, 江苏 苏州 215104; 2. 苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215000)

摘 要:27SiMn 钢液压支架在恶劣的工作条件下长期使用后,其表面容易形成腐蚀,磨损和疲劳损坏等缺陷。为提升其使用寿命,本文利用宽带激光熔覆技术在27SiMn 钢表面进行制备铁基涂层的实验研究。基于控制变量的方法来依次调整激光功率、送粉速度、载气流量及扫描速度开展单道单因素熔覆试验,并以表面粗糙度为熔覆层质量评价指标初选工艺参数。基于单因素试验进一步开展4因素3水平正交试验,终选显微硬度为熔覆层质量评价指标。利用极差分析考察数据发现扫描速度对熔覆层显微硬度影响最大,其后依次为激光功率、载气流量和 送粉速度,最优工艺参数为熔覆处在激光焦点位置且激光功率、送粉速度、在其流量和扫描速度分别为 4000 W、2.50 rpm、6.9 L/min 和 600 rpm。同时对熔覆层进行了摩擦磨损试验,分析了摩擦因素、磨损率及磨损形貌,验证了工艺参数优化的可行性。最终,熔覆层平均硬度较基体提升 2.2 倍,磨损率较基体提升 27 %。工艺参数优化能够实现铁基合金粉末熔覆层表面硬度及耐磨性的显著提升,对熔覆修复 27SiMn 液压支架大有帮助。

关键词:宽带熔覆;工艺参数;正交试验;摩擦磨损

中图分类号:TN249 文献标识码:A **DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2022.02.009

# Research on process parameters and performance of broadband laser cladding iron-based coatings

SHI Gao-lian<sup>1,2</sup>, DING Qian-qian<sup>1</sup>, XI Peng<sup>1</sup>, NI Yu-ji<sup>2</sup>, SHI Shi-hong<sup>2</sup>

(1. Suzhou Institute of Industrial Technology, Suzhou 215104, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Suzhou University, Suzhou 215000, China)

Abstract:27SiMn steel hydraulic support is prone to defects such as corrosion, abrasion and fatigue damage on their surface after long-time use under harsh working conditions. In order to improve its service life, broadband laser cladding technology is used on the surface of 27SiMn Steel for the preparation of iron-based coatings in this paper. Based on the method of control variables, the laser power, powder feeding speed, carrier gas flow rate and scanning speed were adjusted in sequence to carry out single-pass single-factor cladding test, and the surface roughness was used as the initial selection process parameter of the cladding layer quality evaluation index. The 4-factor 3-level orthogonal test was further conducted based on the single factor test, and the microhardness was finally selected as the quality e-

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 51805345);苏州市重点产业技术创新项目(No. SYG202015);苏州市重点实验室 基金(No. SZS201815);学院优秀科技创新团队(No. 2020kytd01);服务企业技术技能平台(No. 2020kyt01) 资助。

**作者简介:**石皋莲(1967-),女,教授,硕士研究生,主要研究方向为精密制造和摩擦学等;E-mail:shigaolian@163.com 通讯作者:石世宏(1956-),男,教授,博士生导师,研究方向为激光加工技术。E-mail:shishihong@suda.edu.cn 收稿日期:2021-03-08;修订日期:2021-04-07 valuation index of the cladding layer. It is found that the scanning speed has the greatest impact on the microhardness of the cladding layer followed by laser power gas flow and powder delivery speed through the range analysis of the re-

of the cladding layer, followed by laser power, gas flow and powder delivery speed through the range analysis of the research data. The optimal process parameters are cladding at the laser focal point and laser power, powder feeding speed, carrier gas flow and scanning speed are 4000W, 2. 50 rpm, 6. 9 L/min and 600 rpm, respectively. At the same time, a friction and wear test was carried out on the cladding layer, and the friction coefficient, wear rate and wear form were analyzed to verify the feasibility of optimization of process parameters. Finally, it is concluded that the average hardness of the cladding layer is 2. 2 times that of the matrix, and the wear rate is 27 % of that of the matrix. Through the optimization of the process parameters, the surface hardness and wear resistance of the iron-based alloy cladding layer can be significantly improved, which is very beneficial to the cladding repair of the 27SiMn hydraulic support. **Keywords**; Broadband cladding; Process parameters; orthogonal test; Frictional wear

## 1 引 言

E-mail:shishihong@ suda. edu. en 煤矿井下的工 况极为恶劣,液压支架在其中长期服役表面极易发 生点蚀、磨损等诸多破坏形式<sup>[1]</sup>。为修复磨损破坏 的支架内壁,目前常用的方法是在保证基体合金良 好综合力学性能的基础上,在其表面施加涂层。如 马宗彬等人利用 IJGR - 4 半导体激光器在液压支架 常用钢 27SiMn 钢表面激光熔覆制备 IGJ - 3 型合金 涂层并分析其性能,发现涂层耐磨性和耐蚀性较基 体分别提高了 3 及 4.5 倍,大大提高了液压直接的 工作性能及使用寿命<sup>[2]</sup>。菅含含等人为探究工艺 参数对熔覆涂层组织和性能的影响,其在 27SiMn 钢 表面激光熔覆制备单道单因素 JG - 3 铁基合金 涂层<sup>[3]</sup>。

目前,关于 27SiMn 钢表面熔覆铁基合金的研究 已有一些报道,但针对 27SiMn 钢表面宽带激光熔覆 铁基合金的工艺参数优化及其摩擦磨损性能研究却 鲜有耳闻。因此,本文采用宽带激光熔覆系统对 27SiMn 钢表面进行宽带激光熔覆,研究使用不同的 工艺参数对熔覆铁基合金粉末质量的影响,对比多种 试验参数下,得到 27SiMn 钢表面宽带激光熔覆铁基 合金粉末最佳参数组合。同时,对其摩擦磨损性能进 行分析,以期拓展宽带激光熔覆铁基合金粉末修复液 压支架的应用范围,为今后实际生产过程提供依据。

- 2 实验材料及内容
- 2.1 实验材料

试验基体材料为 27SiMn 钢板材,尺寸 250 mm ×250 mm×10 mm。将板材表面的氧化物用砂纸打 磨干净,之后一次用丙酮和无水乙醇去除其表面污 垢。此次试验选 Fe316L 球形粉末为熔覆试验粉末, 粒径为 48~106 μm<sup>[4]</sup>。基体材料和熔覆粉末材料 化学成分如表1 所示。

表 1 27SiMn 钢基体和 Fe316L 粉末的化学成分(wt.%)

Tab. 1 Chemical composition of 27SiMn steel matrix and Fe316L powder( wt. % )

成 分	С	Ni	Cu	Mu	s	Р	Si	Cr	Мо	Fe
27SiMn	0.38 ~ 0.45	≤0.030	≤0.030	0.50~0.80	≤0.035	≤0.035	0.17~0.37	0.9~1.20	0.15~0.25	余量
Fe316L	≤0.03	$10 \sim 14$	-	≤2	≤0.03	≤0.045	≤1	16 ~ 18	2~3	余量

2.2 实验设备

宽带激光熔覆试验由自行设计的宽带同轴送粉 激光成型系统完成,该系统由六轴 KUKA KR60 工 业机械手臂、IPG-YLS-6000-KC 型光纤激光器、 SLD6000WPA2X 工业水冷机、RC-PGF-D2 双筒式送 粉器、惰性气体输送装置(送粉器粉末载气及熔覆 保护气均为氩气,纯度≥99.9%)及自行研制的宽 带激光熔覆头(焦点处光斑大小为15 mm×3 mm, 焦距120 mm)等组成,如图1 所示。熔覆试验完成 后由 DK47 电火花线切割机沿熔覆路径线切割,之 后由 MP-2 型双盘双速金相试样磨抛机分别经过 300、500、800、1200、1500 目砂纸及 W3.5、W2.5、 W1 水溶性金刚石研磨膏磨抛处理。之后利用王 水对试样进行腐蚀处理完成制样。通过多种测试 设备如金相显微镜、ZEISS EVO18 型扫描电镜、 MH-5 型维氏显微硬度仪、室温摩擦磨损试验机 等对熔覆试样的显微组织、硬度及耐磨性能等进 行表征分析。



图 1 YLS-6000-KC 型光纤激光熔覆设备 Fig. 1 YLS-6000-KC fiber laser cladding equipment

3 试验方法及结果分析

3.1 单道宽带激光熔覆的单因素试验研究

熔覆工艺参数的选取不同,形成的熔覆层质量 也不尽相同。本文对激光平均功率、送粉速度、扫描 速度及载气流量等工艺参数进行单道单因素熔覆试 验,选取粗糙度为熔覆层质量评价指标<sup>[5]</sup>,单因素 试验参数如表2所示。

表2 单因素试验参数

Tab. 2 Parameter for single-factor test

皮旦	激光功率	送粉速度	扫描速度	载气流量
厅写	/ W	∕ rpm	∕ rpm	∕ rpm
1 – 1	3000	2.5	500	6.3
1 - 2	3250	2.5	500	6.3
1 - 3	3500	2.5	500	6.3
1 - 4	3750	2.5	500	6.3
1 – 5	4000	2.5	500	6.3
1 - 6	4250	2.5	500	6.3
1 – 7	4500	2.5	500	6.3
1 - 8	4750	2.5	500	6.3
2 – 1	4250	1.0	500	6.3
2 - 2	4250	1.5	500	6.3
2 - 3	4250	2.0	500	6.3
2 - 4	4250	2.5	500	6.3
2 - 5	4250	3.0	500	6.3
2 - 6	4250	3.5	500	6.3
3 – 1	4250	2.0	500	5.1
3 - 2	4250	2.0	500	5.7
3 - 3	4250	2.0	500	6.3
3 - 4	4250	2.0	500	6.9
3 - 5	4250	2.0	500	7.5
3 - 6	4250	2.0	500	8.1
4 - 1	4250	2.0	400	7.5
4 - 2	4250	2.0	450	7.5
4 - 3	4250	2.0	500	7.5
4 - 4	4250	2.0	550	7.5
4 - 5	4250	2.0	600	7.5
4 - 6	4250	2.0	650	7.5

3.1.1 激光功率对单道熔覆层上表面粗糙度的影响 从图 2(a) 中分析可知, 当功率在 3000 W 时,

粉末熔化所需的能量不够,使得有一部分粉末未 能熔化,熔覆层表面凹凸不平,随着功率提高,粉 末熔化程度越来越高,熔覆层质量越来越高。直 到功率增加到 4250 W 时,熔覆层质量最高,随着 功率进一步提高,熔覆层质量逐渐下降。图2(b) 是不同激光功率下,送粉速度为2.5 rpm,扫描速 度为 500 rpm, 载气流量 6.3 L/min 且在激光焦点 出熔覆时,熔覆层上表面的粗糙度变化曲线。由 图中熔覆层上表面粗糙度折线整体变化先减小后 增大的趋势得知,原因是起初激光功率低,粉末不 能充分融化,单道熔覆层上表面粘粉较多,粗糙度 大<sup>[6]</sup>。随后激光功率增大时,熔池黏度和表面张 力减小,熔池能够充分对流,大部分粉末被熔池捕 获,粉末充分融化单道熔覆层上表面几乎没有粘 粉,单道饱满,表面粗糙度较好。直到激光功率过 大时,热量较多,会使合金粉中元素在内壁表面发生 烧蚀,也会导致飞溅的现象,会导致表面粗糙度小幅 度的上升。激光功率为4250 W时,上表面的粗糙 度 Ra 值为 1.07 μm, 相较于激光功率为 3000 W (7.40 µm)时下降了 85.54 %。



3.1.2 送粉速度对单道熔覆层上表面粗糙度的影响

从图 3(a)中分析可知,当送粉速度为 1.0 rpm, 在激光功率 4250 W 的作用下,熔覆层表面出现烧 蚀发黑的形貌,随着送粉速度的提高,熔覆层表面逐 渐变得平整。直到送粉速度 2.0 rpm 时,随着送粉 速度进一步提高,熔覆层表面出现"波纹"状形貌。 图 3(b)是不同送粉速度下,激光功率为 4250 W,扫 描速度为 500 rpm,载气流量 6.3 L/min 且在激光焦 点出熔覆时,熔覆层上表面的粗糙度变化曲线。



Fig. 3 The morphology and performance of the cladding layer affected by the powder feeding speed

由图所知,单道熔覆层上表面粗糙度随着送粉速 度的增加先减小而后增大。激光的功率是固定的,故 而激光的能量是固定的。此时,粉末吸收激光能量主 要取决于粉末量。当送粉速度较小时,送粉量较小, 此时单位体积粉末吸收的激光能量过多导致粉末存 在过烧及飞溅现象,因此涂层表面粗糙度较大。当送 粉速度增加时,送粉量增大,单位体积粉末吸收激光 能量的能力随之提高,光粉耦合效果愈来愈好,熔池 能充分对流,此时涂层表面粗糙度降低<sup>[7]</sup>。但是, 随着送粉速度进一步增大,送粉量过大导致合金粉 末不能充分的熔入熔池,熔覆层表面形成波浪状纹 路,涂层表面粗糙度因此增加。送粉速度为 2 rpm 时,上表面粗糙度 *Ra* 值为 0.93 μm,相较于送粉速 度为 1 rpm(9.70 μm)时下降了 90.41 %。 3.1.3 载气流量对单道熔覆层上表面粗糙度的影响

从图 4(a) 中分析可知, 当载气流量为 5.1 L/ min 时, 熔覆层表面有大量的浮粉, 表面较不平整, 随着载气流量提高至 6.3 L/min, 熔覆层表面浮粉逐 渐减少。进一步提高载气流量, 熔覆层表面质量几 乎不受影响。图 4(b) 是不同载气流量下, 激光功率 为 4250 W, 送粉速度 2.0 rpm, 扫描速度为 500 rpm 且在激光焦点出熔覆时, 熔覆层上表面的粗糙度变 化曲线。由图可以看出粗糙度随着载气流量的增大 先减小, 之后维持稳定。





当激光功率固定时,光斑的能量密度即是固定 的,而载气流量影响送粉喷嘴输送粉末的发散角。当 载气流量过小时,送粉喷嘴输送粉末的发散较过大, 粉末四处飞散导致不能形成良好的光粉耦合效果,单 道熔覆层上表会有大量浮粉,从而此时熔覆层的粗糙 度较大。当载气流量逐渐增大时,送粉喷嘴输送粉末 的发散角逐渐减小,光粉耦合效果越来越好,输送的 粉末能充分熔入熔池,从而熔覆层的粗糙度逐渐降 低。当载气流量增大到一定值时,输送的粉末全部熔 入熔池。此时如果继续增加载气流量值,便不会继续 改善光粉耦合效果,从而熔覆层上表面粗糙度不会有 较大的变化。载气流量为7.5 L/min 时,上表面粗糙 度 Ra 值为0.791 μm,相较与载气流量为5.1 L/min (3.86 μm)时下降了79.51%。 3.1.4 扫描速度对单道熔覆层上表面粗糙度的 影响

由图 5(a)分析可知,当扫描速度为 400 rpm 时,熔 覆层表面过烧而变得不平整。当扫描速度为 550 rpm 时,粉末充分熔化后得到了质量较好的熔覆层表面。 进一步提升扫描速度,粉末再一次出现未熔现象,熔覆 层表面质量下降。图 5(b)是不同激光扫描速度下,激 光功率为 4250 W,送粉速度 2.0 rpm,载气流量为 7.5 L/min 且在激光焦点出熔覆时,熔覆层上表面的粗糙 度变化曲线。激光功率固定保证了激光能量固定。此 时,激光作用时间决定了材料吸收能量的多少<sup>[8]</sup>。





由图 5 可知,扫描速度越大,涂层表面粗糙度先 减小后增大。扫描速度较低时,熔覆层过烧,表面质 量过差,熔覆层粗糙度较大。随着扫描速度的增加, 熔覆粉末能充分的熔入熔池,从而熔覆层表面质量 改善,熔覆层粗糙度变小。当扫描速度增加到一定 值时,由于能量密度减小,同时送粉熔池粉末不稳 定,表面黏粉较多,粗糙度增大。扫描速度为 550 rpm 时,上表面粗糙度 *Ra* 值为 0.97 μm,相较与扫 描速度为 400 rpm(16.2μm)时下降了 95.86%。

为获得小,表面平整度好的熔覆层,根据上述单道 熔覆层单因素宽带激光熔覆试验表面粗糙度,初选熔 覆工艺参数为:激光功率4250 W,送粉速度2.0 rpm,载 气流量7.5 L/min,扫描速度550 rpm。

#### 3.2 正交优化试验

宽带激光熔覆工艺参数由多个因素构成且每个 因素都具备多个水平,不同的因素水平组合形成的 工艺参数得到的熔覆层质量不尽相同。为确定影响 熔覆层质量各个因素的主次关系,本文设计正交试 验以得到最佳因素组合。在单因素试验基础上,本 试验确定激光功率(A)、送粉速度(B)、载气流量 (C)以及扫描速度(D)这四个因素,各因素取三个 水平,以熔覆层显微硬度值为考察指标,进行4因素 3 水平正交试验,因素水平及正交试验结果分别如 表3、4 所示。

表3 因素水平

Tab. 3 Factors and levels

	因素						
水平	激光功率	送粉速度	扫描速度	载气流量			
	/ W	∕ rpm	∕ rpm	∕ rpm			
1	4000	1.5	6.9	500			
2	4250	2	7.5	550			
3	4500	2.5	8.1	600			

#### 表4 正交试验结果

Tab. 4 Orthogonal experimental results

序号	А	В	С	D	熔覆层显微 硬度(HV)
1	4000	1.5	6.9	500	506.3
2	4250	2.0	7.5	500	486.5
3	4500	2.5	8.1	500	416.5
4	4500	2.0	6.9	550	436.4
5	4250	1.5	8.1	550	368.6
6	4000	2.5	7.5	550	553.6
7	4000	2.0	8.1	600	577.0
8	4250	2.5	6.9	600	534.5
9	4500	1.5	7.5	600	543.2

利用极差法比较极差 R 的大小可以判断各个 因素对熔覆层容量影响的大小,极差分析如表 5 所 示。因素极差 R 越大,其对熔覆层质量的影响越 大<sup>[9]</sup>。因此,各个因素对熔覆层显微硬度的影响由 高到低依次为 D、A、C 和 B,即扫描速度的影响最 大,其后依次为激光功率、载气流量和送粉速度。根 据 k<sub>1</sub>、k<sub>2</sub>、k<sub>3</sub>值的大小来确定 A、B、C、D 各因子取哪 个水平好。对于熔覆层显微硬度而言,取各因子最 大的 k 值所对应的那个水平。要求熔覆层显微硬度 值越大越好,所以较优水平组合是:D<sub>3</sub>A<sub>1</sub>C<sub>2</sub> B<sub>3</sub>,即较 优工艺方案为激光功率 4000 W,送粉速度 2.5 rpm, 载气流量 7.5 L/min,扫描速度 600 rpm。

	因素						
熔覆层显微硬度	激光功率 /W	送粉速度 /rpm	送气流量 /(L・min <sup>-1</sup> )	扫描速度 /rpm			
$k_1$	546.3	472.7	492.4	469.8			
$k_2$	467.7	500.0	527.8	452.9			
$k_3$	465.4	501.5	454.0	551.6			
极差 R	80.9	28.8	73.8	98.7			
优方案	$D_3A_1C_2B_3$						
影响主次顺序	D > A > C > B						

表5 极差分析

Tab. 5 Range analysis

3.3 熔覆层组织分析

用最优工艺参数在 27SiMn 钢表面制备 Fe316L 熔覆层,图6所示分别为50倍熔覆层宏观形貌以及 1000 倍下熔覆层底部、中部及顶部显微组织。由图 6(a)可知,熔覆层内未看到气孔、裂纹等缺陷,熔覆 层与基体之间的结合线平直,说明熔覆工艺参数选 择恰当,熔覆层质量较高。由图6(b)可知,熔覆层 和基体结合线以上附近区域晶体以平面晶生长,这 是由于激光熔覆凝固过程中熔覆层底部温度梯度 大,凝固速度小,晶粒的形核速度小,生长速度大,因 此熔覆层底部晶粒以粗大的平面晶为主<sup>[10]</sup>。由图 6(c)可知,熔覆层中部晶体组织的生长几乎不受基 体的影响,此时凝固速度逐渐增大,温度梯度逐渐减 小,晶体生长组织以柱状晶为主,生长方向由底部指 向顶部。由图 6(d) 可知, 熔覆层顶部温度梯度最 小,凝固速率,晶粒的形核速度大,生长速度小,因此 此区域晶粒以体积小数量多的等轴晶为主。



Fig. 6 Metallographic diagram of the cladding layer

由图 7 可知,在熔覆层与基体结合线附近区域 EDS 线扫描能谱测试图中,Ni、Cr 元素含量没有出 现明显的阶梯分布,即 Ni、Cr 元素在结合线附近均 匀分布。从表 1 中可知,本身 27SiMn 钢中 Ni、Cr 元 素的含量远低于熔覆粉末 Fe316L 中 Ni、Cr 元素的 含量。由此推断,在激光熔覆涂层"快速熔覆快速 冷却"的过程中,由于对流传质的作用,粉末中的 Ni、Cr 元素扩散至基体中,说明熔覆层和基体之间 结合良好<sup>[11]</sup>。



图 7 熔覆层与基体结合线附近区域 EDS 线扫描能谱图 Fig. 7 EDS line scan energy spectrum near the junction line between the cladding layer and the substrate

3.4 熔覆层显微硬度分布及摩擦磨损性能

图 8 为熔覆层横截面不同深度处显微硬度曲 线图。其中熔覆层最高硬度平均硬度分别为 560.2HV0.5、527.2HV0.5。热影响区最高硬度平 均硬度分别为482.1HV0.5、463.1HV0.5。基体 平均硬度为237.1HV0.5。熔覆层最高硬度、热影 响区最高硬度分别为基体平均硬度的 2.4、2.0 倍,熔覆层平均硬度、热影响区平均硬度分别为基 体平均硬度的 2.2、1.9 倍。所以该铁基合金熔覆 层与基体相比,其硬度提升明显。熔覆层初始部 分硬度曲线有下降的趋势是因为熔覆层表面受到 细晶强化作用硬度较高,之后晶粒尺寸逐渐变大, 硬度有下降的趋势<sup>[12]</sup>。热影响区域硬度曲线先升 高后降低,一方面可能是是因为热影响区域不同 位置受热温度不均,不同位置淬火条件不同,导致 热影响区不同位置组织硬度有差异;另一方面,热 影响区与熔覆层之间由于对流传质的作用,各个 位置的元素分布不均,导致不同位置的组织硬度 有差异<sup>[13]</sup>。





线切割尺寸规格为 10 mm×10 mm×2 mm 的摩擦 磨损实验块,将表面氧化层打磨清洗干净后吹干备用。 对熔覆层和基体分别进行摩擦磨损实验。选择直径 4 mm的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>陶瓷球,加载载荷为 1000 g,电机转速为 1440 r/min,摩擦磨损时间为 45 min,基体和熔覆层的 摩擦系数曲线图及磨损率柱状图如图 9 所示。





定摩擦磨损阶段。基体摩擦磨损曲线图的波动性明显比熔覆层摩擦磨损曲线图低,这是因为在摩擦磨损过程中,对磨球与摩擦实验块之间的接触状态由点接触逐渐转为面接触,由于基体组织较熔覆层组织更均匀,整个摩擦过程中摩擦球摩擦状态变化不大而使其摩擦系数稳定<sup>[14]</sup>。而熔覆层组织内由于C、Cr等硬质元素的存在,导致组织内部硬度有起伏,在摩擦磨损过程中,摩擦球摩擦状态不稳定使得摩擦系数不稳定。熔覆层平均摩擦系数(0.251)远低于基体平均摩擦系数(0.429),这是因为熔覆层硬度较大,不容易产生磨屑。磨屑与对磨球的相互作用极大地影响摩擦系数。由磨损率柱状图9(b)可知,熔覆层磨损率为199.4 mm<sup>3</sup>·N<sup>-1</sup>·m<sup>-1</sup>,基体磨损率为273.5 mm<sup>3</sup>·N<sup>-1</sup>·m<sup>-1</sup>,熔覆层磨损率

如图 10 所示分别为熔覆层和基体摩擦磨损试 验后 200 倍电镜下磨痕形貌图。由图 10(a)可知, 熔覆层表面磨痕存在少量磨屑脱落留下的凹坑和少 量凸起的磨屑以及少量平行于摩擦磨损方向的犁 沟,这是典型的以磨粒磨损为主伴随着粘着磨损的 特征。由图 10(b)可知,基体表面磨痕存在着大量 磨屑脱落留下的凹坑,这是典型的黏着磨损的特征。 由于熔覆层硬度远高于基体,所以对磨球分别与熔 覆层和基体摩擦时,基体较熔覆层更容易产生磨屑 脱落。综上所述,试验得到的熔覆层的抗磨损能力 较基体更强。



(a)200电镜下熔覆层磨痕形貌图

(b) 200电镜下基体磨痕形貌图

# 图 10 磨痕形貌图

Fig. 10 The topography of the wear scar

#### 4 结 论

本文基于控制变量法依次对激光功率、送粉速 度、载气流量及扫描速度开展单道单因素熔覆 Fe316L粉末试验,基于单因素试验进一步开展4因 素3水平正交试验。利用极差分析考察得到4因素 对熔覆层显微硬度影响的顺序依次为扫描速度>激 光功率>载气流量>送粉速度,最优工艺参数为熔 覆处在激光焦点位置且激光功率、送粉速度、在其流 量和扫描速度分别为4000 W、2.50 rpm、6.9 L/min 和 600 rpm。并对熔覆层和基体进行了磨损试验,分析了摩擦系数、磨损率及磨损形貌,验证了工艺参数优化的可行性。最终,熔覆层平均硬度较基体提升 2.2倍,磨损率较基体提升 27%。工艺参数优化能够实现铁基合金粉末熔覆层表面硬度及耐磨性的显 著提升,对熔覆修复 27SiMn 液压支架大有帮助。

## 参考文献:

- [1] Wang Sheng, Zhou Mingan, Yu Wenli, et al. Experimental method design of hydraulic column repair based on laser cladding technology [J]. Southern Agricultural Machinery, 2020, 51(23):15-22. (in Chinese) 王胜,周明安,余文利,等. 基于激光熔覆技术的液压 立柱修复实验方法设计[J]. 南方农机, 2020, 51(23): 15-22.
- [2] Ma Zongbin, Chen Ming, Ding Ziyang. Application research of laser cladding corrosion resistance strengthening technology on hydraulic supports [J]. Shandong Coal Science and Technology, 2016(2):102 - 103, 106. (in Chinese)

马宗彬,陈铭,丁紫阳.激光熔覆耐蚀强化技术在液压 支架上的应用研究[J].山东煤炭科技,2016(2):102 -103,106.

 [3] Jian Hanhan. Experimental study on laser cladding of 27SiMn steel surface of hydraulic support column material [D]. Xi'an:Xi'an University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
 菅含含. 液压支架立柱材料 27SiMn 钢表面激光熔覆

官含含. 液压文架立任材料 2/5mm 钢表面激尤熔视 实验研究[D]. 西安:西安科技大学,2017.

- [4] Xu Yulan, Chen Xiaoshan, Liu Yuan, et al. Robot fiber laser 45 ~ # steel surface iron-based powder cladding process[J]. Applied Laser, 2014, 34(1):21 27. (in Chinese)
  徐宇蓝,陈孝山,刘源,等. 机器人光纤激光 45 ~ #钢面 铁基粉末熔覆工艺研究[J]. 应用激光, 2014, 34(1):
- [5] Xu Zifa, Jiao Junke, Zhang Zheng, et al. Research on laser repair technology of nickel-based superalloy[J]. Materials Review, 2019, 33(19): 3196 3202. (in Chinese) 徐子法, 焦俊科, 张正, 等. 镍基高温合金激光修复工艺研究[J]. 材料导报, 2019, 33(19): 3196 3202.

21 - 27.

 [6] Zhu Gangxian, Zhang Anfeng, Li Dichen. The influence of laser cladding process parameters on the surface flatness of the cladding layer[J]. China Laser, 2010, 37(1):296 - 301. (in Chinese)
 朱刚贤,张安峰,李涤尘. 激光熔覆工艺参数对熔覆层表

面平整度的影响[J].中国激光,2010,37(1):296-301.

[7] Guo Qiang. Research on laser cladding Fe-based alloy technology and performance [D]. Zhengzhou: Zhongyuan Institute of Technology, 2019. (in Chinese) 郭强.激光熔覆 Fe 基合金工艺与性能研究[D].郑州: 中原工学院,2019.

- [8] Yu Plan. Experimental study on laser cladding technology and performance of mining picks [D]. Zhengzhou: Zhongyuan Institute of Technology,2020. (in Chinese) 于计划. 矿用截齿激光熔覆工艺与性能实验研究[D]. 郑州:中原工学院,2020.
- [9] Zhang Wenjie, Wang Mingdi, Pan Yu, et al. Experimental research on laser deburring process of 6 series aluminum alloy parts[J]. Applied Laser, 2019, 39(4):647-651. (in Chinese)
  张文杰,王明娣,潘煜,等.6系列铝合金零件激光去毛刺工艺实验研究[J].应用激光, 2019, 39(4):
- 647 651.
  [10] Wu Pengfei. Research on laser cladding technology for repairing the cutter head of garbage shredder [D]. Guang-zhou: Guangdong University of Technology, 2019. (in Chinese)

吴鹏飞.激光熔覆修复垃圾粉碎机刀盘工艺研究[D]. 广州:广东工业大学,2019.

- [11] Zhu Jixiang, Lei Sheng, Li Shuai, et al. Research on the influence of WC content on the microstructure and wear properties of Iron-based composite coatings[J/OL]. Journal of Nanjing Normal University: Natural Science Edition, 2014, 44(1):7. (in Chinese) 朱继祥, 雷声, 李帅, 等. WC 含量对铁基复合涂层组织 与磨损性能的研究[J/OL]. 南京师大学报:自然科学 版,2014,44(1):7.
- [12] Han Jitai, Wu Meiping, Cui Chen. The effect of laser power on the structure and friction and wear properties of 42CrMo steel laser cladding layer[J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45(11): 214 - 217. (in Chinese) 韩基泰,武美萍,崔宸.激光功率对 42CrMo 钢激光熔 覆层组织和摩擦磨损性能的影响[J]. 金属热处理, 2020, 45(11): 214 - 217.
- [13] Chen Yonggang. Study on the wear resistance of laser cladding WC particles reinforced Ni-based alloy coating [J/OL]. Heat Processing Technology, 2022, (2):106 109. (in Chinese)
  陈永刚.激光熔覆 WC 颗粒增强 Ni 基合金涂层耐磨性 能的研究[J/OL]. 热加工工艺, 2022, (2):106 109.
- [14] Liu Yuping, Xie Jinlei, Jiang Guoye. Study on the performance of laser cladding nickel-based WC alloy coating on vermicular graphite cast iron [J/OL]. Hot Working Technology, 2021(6):93-97,101. (in Chinese) 刘宇平,谢金蕾,江国业. 蠕墨铸铁激光熔覆镍基 WC 合金涂层的性能研究[J/OL]. 热加工工艺,2021(6):93-97,101.