

面向盾构机主轴承外跑道再制造修复的激光熔覆工艺研究*

陈健^{①③}, 杨公标^{①③}, 李燕乐^②, 付春琿^②, 李方义^②

(①中铁十四局集团有限公司, 山东 济南 250101; ②山东大学机械工程学院高效洁净机械制造教育部重点实验室, 山东 济南 250061; ③中国铁建水下隧道工程实验室, 山东 济南 250101)

摘要: 为探究利用激光熔覆技术再制造修复盾构机主轴承外跑道的合适工艺, 用同步送粉式激光熔覆设备在 42CrMo 基体上熔覆 JG-11 铁基合金涂层, 基于三因素四水平正交试验, 探究了激光功率、扫描速度、送粉器转速等工艺参数对涂层稀释率、宽高比及孔隙率的影响, 并遴选出较好的四组工艺参数进行显微组织分析、硬度测试、摩擦磨损试验探究其对涂层性能的影响。结果表明, 涂层硬度相较于基体可以提升 2~3 倍; 合适的工艺参数降低摩擦因数效果明显, 磨损体积相比较差的工艺参数可以降低 45.7%, 磨粒磨损和疲劳磨损是摩擦磨损的主要原因。

关键词: 激光熔覆; 盾构机主轴承; 再制造修复; 正交试验; 耐磨性

中图分类号: TH162.1 **文献标识码:** A

DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2025.10.008



全文在线

Research on laser cladding technology for remanufacturing and repair of outer runway of shield machine main bearing

CHEN Jian^{①③}, YANG Gongbiao^{①③}, LI Yanle^②, FU Chunhui^②, LI Fangyi^②

(①China Railway 14th Bureau Group Co., Ltd., Jinan 250101, CHN; ②Key Laboratory of Efficient and Clean Machinery Manufacturing, Ministry of Education, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, CHN; ③China Railway Construction Underwater Tunnel Engineering Laboratory, Jinan 250101, CHN)

Abstract: To explore the suitable process for remanufacturing and repairing the outer raceway of the main bearing of shield tunneling machines using laser cladding technology, JG-11 iron-based alloy coating was deposited on a 42CrMo substrate using synchronous powder feeding laser cladding equipment. Based on a three-factor four-level orthogonal experiment, the effects of process parameters such as laser power, scanning speed, and powder feeder speed on the dilution rate, aspect ratio, and porosity of the coating were investigated. Four groups of good process parameters were selected for microstructure analysis, hardness testing, and friction and wear testing to explore the influence of process parameters on coating performance. The results indicate that the hardness of the coating can be increased by 2-3 times compared to the substrate. Appropriate process parameters have a significant effect on reducing the friction coefficient, and process parameters with relatively poor wear volume can reduce it by 45.7%. Abrasive wear and fatigue wear are the main causes of friction and wear.

Keywords: laser cladding; main bearings of shield tunneling machine; remanufacturing and repair; orthogonal experiment; wear resistance

盾构机作为地下交通建设的关键设备, 其核心部件主轴承外跑道在掘进过程中因承受周期性交变

载荷和磨粒侵入, 易产生裂纹并扩展, 导致设备失效及资源浪费。激光熔覆再制造技术可高效修复损

* 中国铁建股份有限公司科技研发计划项目 (2023-B04); 泰山产业创新领军人才工程项目 (tscx202306015); 国家自然科学基金资助项目 (52275495)



伤部位，恢复主轴承性能，提升设备利用率并减少碳排放，对推动绿色再制造和基建可持续发展具有重要意义^[1-3]。

激光熔覆铁基材料相较于其他合金材料具有更优的经济性和耐磨性，以铁基粉末为熔覆材料的熔覆层性能提高的研究中，蔡志海等^[4]在 42CrMo 钢表面熔覆了中锰铁基合金粉末，结果表明熔覆层显微硬度最大可达 739 HV，而基体硬度仅为 251 HV，熔覆层耐磨性能是基体的 2.94 倍。夏镇琪等^[5]在 42CrMo 钢表面激光熔覆 Fe45 合金涂层，利用正交实验得出最佳熔覆工艺参数，并分析工艺参数对单道熔覆层几何尺寸、稀释率和显微硬度影响程度的主次，实验制备的 Fe45 合金涂层的显微硬度是基体硬度的 2.3 倍。UR RAHMAN N 等^[6]在 42CrMo 钢表面制备了两种高速钢涂层，分析了涂层的力学性能和微观组织，结果表明，合金的显微硬度都 700 HV_{0.5} 以上，最大拉伸强度分别为 926 MPa 和 1 017 MPa。

激光熔覆得到的涂层性能除了材料的影响之外还受激光熔覆工艺参数的影响，有众多学者对铁基粉末激光熔覆工艺参数进行了多方面的探究，NIE M H 等^[7]研究了不同激光功率下激光熔覆 17-4PH 不锈钢涂层的成形性、微观组织演变、织构表征、显微硬度和界面结合强度，结果表明当激光功率为 2 200 W 时，显微硬度和界面结合强度高于其他试件，分别为 450 HV_{0.2} 和 908 MPa。安相龙^[8]在 42CrMo 表面用不同搭接率熔覆铁基涂层，发现 50% 搭接率的熔覆层显微硬度最高，平均显微硬度在 660 HV_{0.2} 左右，同时 50% 搭接率下熔覆层的摩擦因数最小，为 0.4。罗亮斌^[9]在 42CrMo 钢表面针对激光功率、扫描速度和送粉速率进行单因素试验，设计 L₉(3⁴) 正交试验，以复合熔覆层显微硬度和稀释率的综合得分作为评价指标，获得单道熔覆的最优工艺参数组合：激光功率 700 W，扫描速度 180 mm/min，送粉速率 21 g/min。

盾构机主轴承跑道的材料为 42CrMo 钢，JG-11 铁基粉末热膨胀系数与 42CrMo 相近且用其制备的涂层硬度更加符合修复对象使用需求，因此本文

选用 JG-11 作为涂层制备的粉末材料。上述研究未涉及 JG-11 作为熔覆材料的情况，且对工艺参数影响性能的研究并不完全。为了探索 JG-11 作为熔覆层材料时盾构机主轴承外跑道再制造修复的效果，本文在 42CrMo 板材上用 JG-11 作为粉末材料进行单道熔覆，利用正交试验的方法分析探究了不同的激光功率、扫描速度和送粉速度等激光熔覆工艺参数对涂层的孔隙率、稀释率及宽高比等方面的影响和机理，根据正交试验分析结果选取 4 组表现较好的工艺参数制备涂层测试摩擦磨损性能并观察其微观组织，为激光熔覆 JG-11 涂层修复盾构机主轴承外跑道提供依据。

1 试验材料与方法

1.1 样件涂层制备

激光熔覆的基体选用盾构机主轴承外跑道的对应材料 42CrMo 钢，尺寸为 80 mm×50 mm×12 mm。在正式试验制备单道涂层之前，使用丙酮和无水乙醇擦拭 42CrMo 钢基体表面，以达到去污除锈的目的。制备涂层用的粉末材料为 JG-11 铁基合金粉末，具体元素成分见表 1，JG-11 的粉末粒度为 50~150 μm。采用三因素四水平 L₁₆(4³) 正交试验制备单道涂层，具体实验参数见表 2。采用同步送粉式激光熔覆系统（LOM2170，由 LATEC 提供）进行制备，该设备送粉器转速 1 r/min，送粉速度为 6.84 g/min，过程如图 1 所示，光斑直径为 2.4 mm，涂层制备过程中利用氩气气流防止试件氧化。在经过正交试验单道涂层制备并对其结果进行分析后，利用筛选出的工艺参数进行多层多道涂层（2 层 30 mm 宽）样件制备，选出表 2 中的第 5、9、10、13 组工艺参数制备多层多道涂层用于摩擦磨损试验，选用的基体板块与粉末材料及设备均与正交试验单道涂层制备相同，涂层搭接率选用 60%，抬升量为 0.38 mm。

1.2 表征与测试方法

对于正交试验单道涂层和摩擦磨损试验多层多道涂层均用线切割机切取 10 mm×3 mm×10 mm 的金相试样，然后切取尺寸为 20 mm×20 mm×5 mm 的摩

表 1 JG-11 粉末的化学成分(质量分数)

Tab. 1 Chemical composition of the JG-11 powder (mass fraction) (%)

C	O	B	Si	Cr	Ni	Mn	Mo	others	Fe
0.21	0.031 7	0.93	0.98	18.22	2.40	0.40	1.04	0.27	Bal

表2 正交试验工艺参数
Tab. 2 Orthogonal experimental parameters

序号	因素		
	激光功率 P/W	送粉器转速 $Q/(r/min)$	扫描速度 $V/(mm/s)$
1	700	0.6	5
2		1.0	10
3		1.4	15
4		1.8	20
5	900	0.6	10
6		1.0	15
7		1.4	20
8		1.8	5
9	1 100	0.6	15
10		1.0	20
11		1.4	5
12		1.8	10
13	1 300	0.6	20
14		1.0	5
15		1.4	10
16		1.8	15

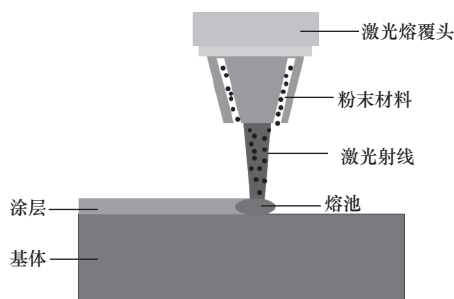


图1 激光熔覆过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser cladding process

擦磨损试样，金相试样打磨、抛光后利用经无水乙醇稀释过的王水腐蚀液侵蚀，利用光镜采集激光熔覆涂层的截面图像，并用 ImageJ 软件分析涂层截面的孔隙率，采用扫描电子显微镜拍摄多层多道涂层的截面图像，观察涂层的微观组织形貌。采用 X 射线能谱仪（EDS）观察多层多道涂层的元素分布情况并进行微观形貌分析。在室温下采取圆周运动的摩擦方式进行摩擦磨损性能测试，摩擦副选用氧化铝球，直径为 10 mm，每个样件摩擦 60 min，所加载荷为 15 N，摩擦速率为 300 r/min，摩擦圆周轨迹直径为 16 mm。然后观察摩擦磨损试验过后样件

的表面形貌，利用五轴光学轮廓仪采集摩擦磨损体积和三维形貌信息。采用维氏显微硬度计对金相试样从涂层表面到基体区域每隔 50 μm 测量涂层截面上的显微硬度，其中法向载荷砝码 500 g，保压时间 10 s。根据同一水平上 5 个压痕的测量数据，确定各深度的平均显微硬度。

2 实验结果与讨论

2.1 涂层表面形貌分析

根据图 2 实验结果可以看出如第 1、8、11、14 等组试样道次较宽且涂层较厚，且这些工艺参数试样周围颜色较深，说明有较大的热影响区。这是由于这些工艺参数的激光能量密度较高，以送粉器转速同为 1.8 r/min 的第 4、8、12、16 组为例，根据激光能量密度公式 $E=P/VD^{[10]}$ （其中 D 为激光输入的光斑直径），第 8 组具有最高的激光能量密度。而激光能量密度大小与粉末材料熔解程度直接相关，在一定时间内，激光输入的能量越高，熔覆的过程就会越充分，所以第 8 组道次相较于其他 3 组最宽最厚，粉末利用率最高；且因其输入能量密度大，热影响区也会格外明显。同时，图 2 可以看出，700 W 功率的 4 组表面粗糙度越来越高，这是因为在较小激光功率下，随着扫描速度和送粉量的增加，激光能量密度越来越小，部分粉末材料未能完全熔融^[11]，从而增大表面粗糙度；1 600 W 功率的 4 组工艺参数因激光输入功率较大，表面粗糙度受扫描速度和送粉速度影响较小。



图2 不同试样 JG-11 单道熔覆涂层表面形貌

Fig. 2 Surface morphology of single-pass cladding coatings on different JG-11 specimens

2.2 涂层截面形貌分析

图 3 为选取的单道涂层试样和多层多道涂层试样（编号 5、9、10、13）。由图 3 可以看出熔覆层与基体之间有较为清楚的过渡区域，表明熔覆的铁基粉末与 42CrMo 基体之间形成冶金结合。以第 13 组试样为例，单道涂层高度为 497 μm ，两层的涂层

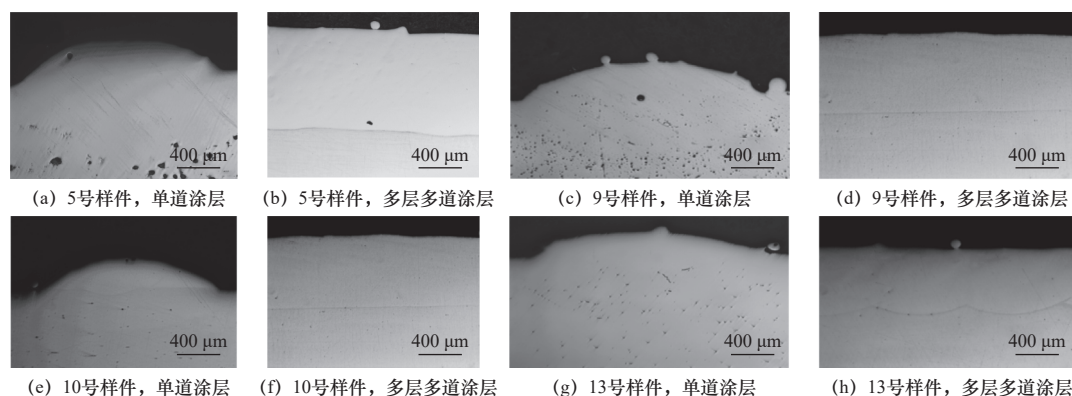


图3 不同试样 JG-11 熔覆涂层截面形貌

Fig. 3 Sectional morphology of JG-11 overlay coatings on different specimens

厚度为 836 μm , 说明在进行多层熔覆时, 涂层与涂层之间有一定的重叠融合, 这使得多层涂层之间具有一定的结合强度。

涂层材料与基体材料经熔覆过程后的结构形式如图 4 所示, 自下往上分为基体、热影响区 (heat-affected zone, HAZ)、基体熔化区域和熔覆层, 图 4 中 h_1 为熔覆层高度, h_2 为基体熔化区高度, w 为熔覆层宽度。稀释率直接反映出涂层与基体的结合情况, 宽高比反映出涂层与基体的横向搭接及平整度问题, 孔隙率直接反映涂层缺陷程度, 对于盾构机主轴承外跑道修复来讲, 涂层质量至关重要, 因此选用这 3 个指标作为评价标准。

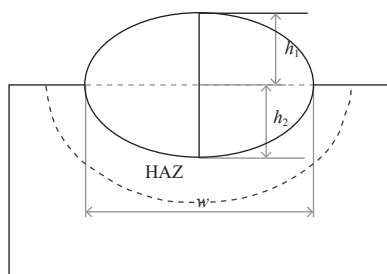


图4 熔覆涂层试样示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the clad coating

首先, 稀释率是表征基体对涂层材料稀释程度的一个重要参量, 对熔覆涂层的结合强度及熔覆质量起着关键作用^[12]。涂层与基体之间是冶金结合, 稀释率越大说明结合性越好, 结合强度就越高; 反之稀释率越小, 涂层与基体之间结合越差, 涂层越容易脱落。但是稀释率并不是越大越好, 因为结合程度过高说明涂层熔于基体之中, 会弱化所熔覆涂层的性能, 不能保证涂层质量达到预期的目标。因此, 需要在涂层与基体能达到一定结合强度的前提下, 使稀释率尽可能地减小一些, 涂层的稀释率 η 可由式 (1)^[13] 进行计算, 即

$$\eta = \frac{h_2}{h_1 + h_2} \quad (1)$$

表 3 为稀释率的极差分析结果, 表 3 中的 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 分别为工艺参数在第 1、2、3、4 个水平下的稀释率平均值。可以看出: 随着激光熔覆功率的增加, 稀释率也在上升, 提高率为 231.1%、93.2%、22.1%; 送粉器转速增加, 稀释率会降低, 下降率为 63.8%、36.7%、17.8%; 伴随扫描速度上升而提高, 提高率为 106.0%、35.0%、30.7%。稀释率极差分析结果表明送粉器转速对稀释率影响最大 (极差 23.54), 其次是激光功率, 最后是扫描速度。

表3 稀释率极差分析结果

Tab. 3 Results of dilution ratio range analysis (%)

稀释率 η	因素		
	激光功率 P/W	送粉器转速 $Q/(r/min)$	扫描速度 $V/(mm/s)$
D_1	2.80	29.00	5.47
D_2	9.27	10.49	11.27
D_3	17.91	6.64	15.22
D_4	21.86	5.46	19.90
极差	19.06	23.54	14.43

宽高比是激光熔覆工艺中关键的质量控制参数, 直接影响涂层的力学性能、缺陷形成及界面结合强度。宽高比过低 (高而窄的熔覆层) 会增加热输入集中度, 导致基体过度熔化, 稀释率升高 (高于 30%), 可能削弱涂层与基体的冶金结合。宽高比增大时, 熔池冷却速率降低, 晶粒粗化, 导致硬度下降。因此在具体工况中要选择合适的宽高比。涂层宽高比 AR 计算公式^[14] 为

$$AR = \frac{w}{h_1} \quad (2)$$

表4为涂层宽高比极差分析结果,表4中的 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 分别为工艺参数在第1、2、3、4个水平下的宽高比平均值。可以看出:随输入功率提高,宽高比先上升后下降,变化率为33.5%、24%、4.4%;随送粉器转速提升,宽高比下降,下降率为40.7%、28.3%、23.1%;随扫描速度提升而提高,提高率为109.1%、36.0%、24.7%。根据宽高比极差分析结果显示,送粉器转速对宽高比影响最大,其次是扫描速度,最后是激光功率。

表4 宽高比极差分析结果
Tab. 4 Analysis results of aspect ratio range

宽高比AR	因素		
	激光功率 P/W	送粉器转速 Q/(r/min)	扫描速度 V/(mm/s)
T_1	2.06	4.89	1.21
T_2	2.75	2.90	2.53
T_3	3.41	2.08	3.44
T_4	3.26	1.60	4.29
极差	1.35	3.29	3.08

孔隙率是激光熔覆涂层质量控制的关键指标,直接影响涂层的力学性能、耐腐蚀性及服役寿命^[15]。一般来说孔隙率越低,涂层性能越好。表5为孔隙率极差分析结果,表5中的 N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 分别为工艺参数在第1、第2、第3、第4个水平下的孔隙率平均值。可以看出:随激光功率提高,孔隙率降低,下降率为86.3%、50.6%、56.4%;随送粉速率提高,孔隙率先降低后大幅提高,变化率为17.1%、626.5%、57.1%;随扫描速度提高先降低后大幅提高,变化率为55.1%、719.4%、40.6%。根据孔隙率极差分析结果可知激光功率对孔隙率影响最大,其次是送粉器转速,最后是扫描速度。

表5 孔隙率极差分析结果
Tab. 5 Results of porosity range analysis (%)

孔隙率 φ	因素		
	激光功率 P	送粉器转速 Q/(r/min)	扫描速度 V/(mm/s)
N_1	5.76	0.41	0.69
N_2	0.79	0.34	0.31
N_3	0.39	2.47	2.54
N_4	0.17	3.88	3.57
极差	5.59	3.54	3.26

由上述极差分析结果可以看出,单看某一项工艺参数对涂层质量的影响并不是一直正相关或负相关的,要选取合适的工艺参数并调整为最优组合才能提高涂层质量。因此对正交试验结果进行归一化处理,将三项指标赋予均重(每项标准的权重是1/3)后进行综合加权平均值(F_i)计算,并对每一个因素的每一个水平进行综合加权评分的平均值极差分析作为优化工艺参数的依据。首先根据综合加权评分法则对每一个指标进行对应转化,公式为

$$Y_{ij} = \begin{cases} X_{j\max} - X_{ij}, j \in I_1 \\ X_{ij}, j \in I_2 \\ -|X_{ij} - X_j^*|, j \in I_3 \end{cases} \quad (3)$$

式中: j 为指标(稀释率为1,宽高比为2,孔隙率为3); i 为实验序号(1~16); I_1 为越小越好的指标; I_2 为越大越好的指标; I_3 为稳定在恰当值的指标; $X_{j\max}$ 为指标 j 中的最大值; X_j^* 为指标 j 的恰当值; Y_{ij} 为根据指标特性计算后的转化值。

对每一转化值进行标准化处理,具体为

$$Z_{ij} = \frac{Y_{ij} - Y_{j\min}}{Y_{j\max} - Y_{j\min}} \quad (4)$$

计算每一组实验结果的综合加权值,即

$$F_i = \sum_{j=1}^3 \omega_j Z_{ij} \quad (5)$$

式中: $X_{j\min}$ 为指标 j 中最小值; ω_j 为每项标准的权重; Z_{ij} 为标准化后的值。

表6所示为正交试验综合加权评价结果,送粉器转速的综合影响最大,其次是激光功率,最后是扫描速度。正交试验结果可以分析出工艺参数对熔覆表面质量的影响,但不能反映涂层的性能,而涂层表面质量与涂层的性能大致呈现正相关,因此选出综合评价最好的4组试样,即第5、9、10、13组进行多层多道涂层制备,观察其微观组织并测试其硬度和摩擦磨损性能。

2.3 显微组织分析

图5为第13组试样从涂层顶部到基体整个涂层的显微组织,由图中可以看出,涂层与涂层之间的分界并不明显,因此激光熔覆制备铁基涂层间结合情况良好。在靠近基体的结合区域,熔覆层组织形貌以柱状晶为主,在涂层的顶部,组织形貌以枝状晶、胞状晶为主,且易观察到如图5a所示涂层越靠近顶部晶粒尺寸越小。易观察到图5b中基体在熔覆过程中部分受到输入热源影响,形成冶金结合,使其有较好的结合强度。在熔覆过程中,基

表 6 正交试验综合加权评价结果

Tab. 6 Comprehensive weighted evaluation results of orthogonal experiment

序号	因素			指标			综合加权平均值 F_i
	激光功率 P/W	送粉器转速 $Q/(r/min)$	扫描速度 $V/(mm/s)$	稀释率 $\eta/(\%)$	宽高比 AR	孔隙率 $\phi/(\%)$	
1	700	0.6	5	2.41	1.61	0.43	2.068
2		1.0	10	2.57	1.55	0.26	2.18
3		1.4	15	2.78	2.71	8.97	2.16
4		1.8	20	3.45	2.35	13.36	2.50
5	900	0.6	10	25.81	5.05	0.59	18.54
6		1.0	15	3.81	3.22	0.47	3.12
7		1.4	20	7.45	2.27	0.33	5.61
8		1.8	5	0	0.46	1.77	0.29
9	1 100	0.6	15	40.97	5.67	0.51	29.13
10		1.0	20	20.85	5.29	0.46	15.09
11		1.4	5	4.73	1.23	0.39	3.66
12		1.8	10	5.09	1.43	0.20	3.93
13	1 300	0.6	20	47.83	7.23	0.11	34.00
14		1.0	5	14.73	1.53	0.16	10.65
15		1.4	10	11.59	2.10	0.20	8.49
16		1.8	15	13.30	2.17	0.19	9.69
K1	2.22	20.93	4.17	综合权重： ω_1 、 ω_2 、 ω_3 均为1/3 因素主次： $Q>P>V$ 最优组合：P4Q1V4			
K2	6.89	7.76	8.28				
K3	12.95	4.98	11.02				
K4	15.71	4.10	14.30				
极差	13.48	16.83	10.13				

体温度较低且熔池尺寸较小，因此在熔覆层靠近基体处具有较高的温度梯度（ G_L ），但是在熔覆过程中，此处的瞬时凝固速率（ R ）近乎为零，因此 G_L/R 比值趋近于无穷大，因此在此处易生成沿温度梯度方向生长的柱状晶；沿此区域向上，温度由底部的柱状晶传递给涂层中部和顶部，温度梯度降低，且凝固速率在增加， G_L/R 比值逐渐减小，因此易形成尺寸较小的胞状晶^[16]。

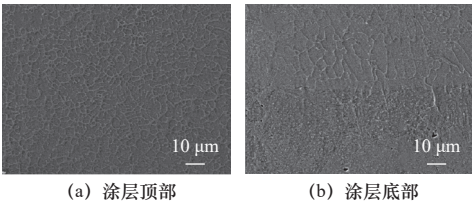


图 5 第 13 组试样涂层的显微组织
Fig. 5 Microstructure of coating on sample group 13

图 6 为第 10 组试样多层多道涂层的 EDS 分析图像，包括对涂层中的 Fe、Cr、Si、Ni 进行观察分析，42CrMo 基体与 JG-11 粉末的主体材料都是 Fe，因此在熔覆之后 Fe 元素含量依旧相近；通过 Cr 元素与 Ni 元素可以清楚的找到熔覆层与基体的分界；各种元素又有不同程度的扩散现象证明熔覆的涂层与基体结合性较好^[17]。

图 7 为 4 组试样的涂层中部微观组织，利用 ImageJ 测量晶粒直径^[18]，其晶粒尺寸的平均大小分别为 5.5、6.6、4.7、5.9 μm ，对比 42CrMo 的晶粒度（20 μm ）晶粒细化约为基体的 1/4，起到细晶强化的效果。对比 4 组试样的激光能量密度，第 10 组试样激光能量密度大于第 9 组，原因在于过低的能量输入会导致熔化不充分，因此在一定范围内提高能量输入可以起到细化晶粒的作用^[19]；第 5 组和

第13组试样激光能量密度远高于第10组试样,原因在于过高的能量输入延缓了凝固时间,提高了熔池温度,出现了过度熔融、晶粒粗化的现象。

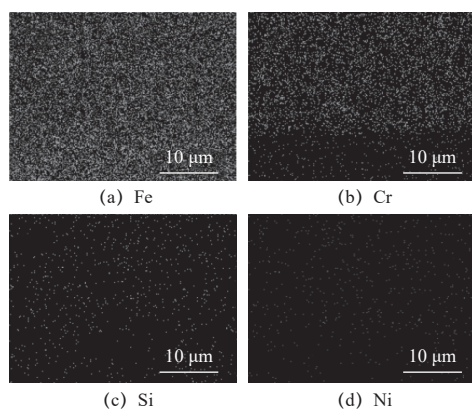


图6 第10组样品底部的EDS分析

Fig. 6 EDS analysis of the bottom of the 10th sample

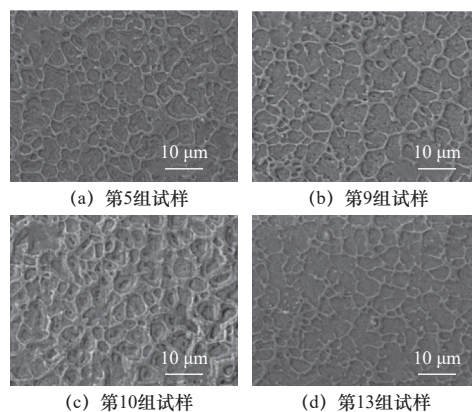


图7 不同试样的涂层中部显微组织

Fig. 7 Microstructure of the coating in the middle of different samples

2.4 涂层显微硬度

图8为多层多道熔覆涂层的显微硬度,测量硬度时均为从熔覆层顶部至底部每隔50 μm测量一次,由图8可知第13组试样硬度最大,平均硬度为615.93 HV_{0.5},而42CrMo钢的硬度约为230 HV_{0.5},试样对比基体材料硬度均提高1.5倍以上,最高提高2.7倍。涂层硬度由顶部到底部逐渐下降,由图8可知硬度最高处均位于涂层顶部,由上述显微组织分析可知,涂层晶粒尺寸由顶部往下逐渐增加,而晶粒尺寸越小,涂层硬度越高。

2.5 涂层摩擦磨损性能分析

图9为不同试样摩擦磨损三维形貌图,经测量4组试样的摩擦磨损体积分别为0.094、0.075、0.051、0.057 mm³,此结果表明第10组试样的磨损体积最小,摩擦磨损性能最好,比性能最差的一组磨损体积下降45.7%。对应图10不同试样的摩擦因

数曲线中第10组试样的摩擦因数最小。其中第10组试样曲线中的突变可能因实验过程中仪器加载突变等试验条件突变的外部原因产生,在此不做探究。由图9可以看出经过与Al₂O₃磨球往复摩擦,在基体和涂层表面磨出截面为弧形的磨痕,在摩擦方向上分布较多连续细长犁沟^[20-22],这是典型的磨粒磨损特征。且在摩擦磨损试验过程中产生片状碎片脱落,这是疲劳磨损的典型特征。

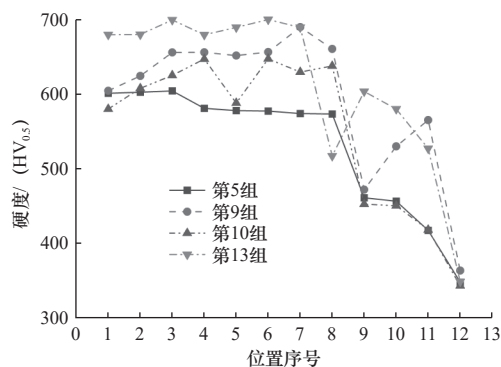


图8 不同试样多层多道熔覆涂层的显微硬度 (HV_{0.5})

Fig. 8 Microhardness (HV_{0.5}) of multi-layer and multi pass cladding coatings on different specimens

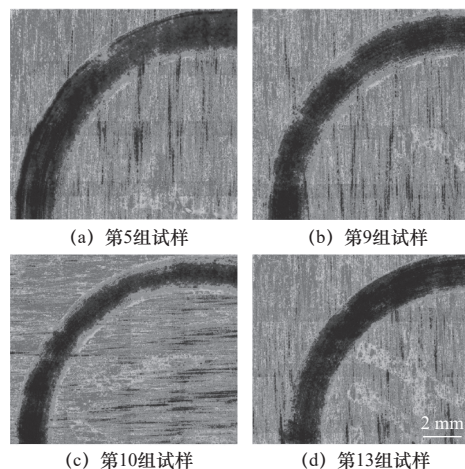


图9 不同试样摩擦磨损三维形貌图

Fig. 9 Three dimensional morphology of friction and wear of different specimens

3 结语

基于L₁₆(4³)正交试验,利用激光熔覆技术在盾构机主轴外跑道使用的42CrMo钢基体上熔覆铁基(JG-11)粉末涂层,分析了激光功率、扫描速度、送粉器转速等工艺参数对熔覆层质量的影响,在此基础上选取较好的工艺参数做出的样件进行了摩擦磨损试验、硬度测试及显微组织分析,得出结论:

(1) 送粉器转速对涂层稀释率和宽高比影响最大, 随送粉器转速提升稀释率和宽高比下降; 激光功率对涂层孔隙率影响最大, 随激光功率增加孔隙率降低; 其中送粉器转速对评价工艺参数的3个指标影响最大。

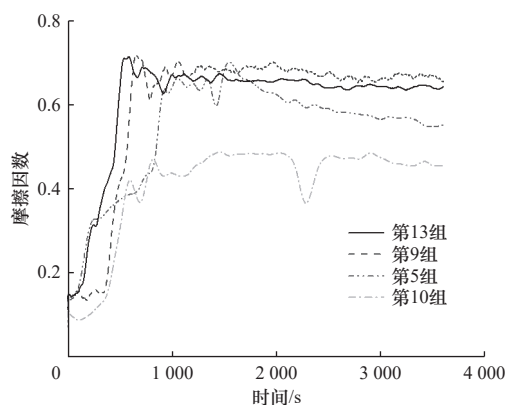


图 10 不同试样的摩擦因数曲线

Fig. 10 Friction coefficient curves of different specimens

(2) JG-11 涂层与 42CrMo 基体之间形成冶金结合, 且涂层底部晶粒尺寸较大顶部较小, 显微组织以胞状晶、柱状晶及枝状晶为主, 晶粒尺寸受激光能量密度影响。根据正交试验综合加权评价方法优选出稀释率、孔隙率等对应的工艺参数结合摩擦磨损性能选出的最佳参数为激光功率 1100 W、送粉器转速 1.0 r/min 和扫描速度为 20 mm/s。

(3) 选取工艺参数激光功率 1300 W、扫描速度 0.6 mm/s、送粉器转速 20 r/min 使 JG-11 涂层硬度最高可以达到 42CrMo 基体的 2.7 倍; 合适的工艺参数可以使涂层摩擦磨损性能提升, 磨损体积相比较差性能的涂层可以下降 45.7%; 摩擦磨损的主要机制是磨粒磨损和疲劳磨损。

参 考 文 献

- [1] 杨伦磊. 盾构机再制造技术研究及应用 [J]. 建设机械技术与管理, 2024, 37(6): 15-17.
- [2] 李方义, 戚小霞, 李燕乐, 等. 盾构机关键零部件再制造修复技术综述 [J]. 中国机械工程, 2021, 32(7): 820-831.
- [3] 李方义, 李振, 王黎明, 等. 内燃机增材再制造修复技术综述 [J]. 中国机械工程, 2019, 30(9): 1119-1127, 1133.
- [4] 蔡志海, 秦航, 柳建, 等. 中锰铁基合金激光熔覆层组织性能研究 [J]. 应用激光, 2018, 38(5): 726-729.
- [5] 夏镇琪, 李菊英, 董仕节. 激光熔覆工艺参数对铁基合金单道涂层成形质量的影响 [J]. 武汉轻工大学学报, 2024, 43(5): 96-105.
- [6] UR RAHMAN N, CAPUANO L, CABEZAS S, et al. Directed energy deposition and characterization of high-carbon high speed steels [J].

Additive manufacturing, 2019, 30: 100838.

- [7] NIE M H, ZHANG S, WANG Z Y, et al. Effect of laser power on microstructure and interfacial bonding strength of laser cladding 17-4PH stainless steel coatings [J]. Materials chemistry and physics, 2022, 275: 125236.
- [8] 安相龙. 面向少量加工多道激光熔覆 42CrMo 钢工艺分析与优化 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021.
- [9] 罗亮斌. 42CrMo 钢截齿激光熔覆耐磨层组织及性能 [D]. 太原: 太原理工大学, 2023.
- [10] 赵大可, 吴东江, 牛方勇, 等. 激光能量输入对直接激光沉积莫来石陶瓷组织性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(3): 1007-1015.
- [11] 效益, 孙文磊, 肖猛, 等. 激光熔覆镍基 WC 复合涂层工艺优化及组织性能研究 [J/OL]. 热加工工艺, 1-8. [2025-04-21]. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20230819>.
- [12] 张庆茂, 刘喜明, 孙宁, 等. 送粉式宽带激光熔覆——搭接基础理论的研究 [J]. 金属热处理, 2001, 26(2): 25-28.
- [13] 杨玉林, 孙文磊, 秦明军, 等. 40Cr 钢表面激光熔覆制备镍基涂层工艺优化 [J]. 应用激光, 2025, 45(1): 46-57.
- [14] 彭云川, 杜彦斌, 毛恺奕, 等. 基于 GS-SABO-BPNN 和 MOPSOD 的激光熔覆工艺参数优化方法 [J/OL]. 计算机集成制造系统, 1-23. [2025-04-21]. <https://doi.org/10.13196/j.cims.2024.0326>.
- [15] 夏朋朋, 章子乐, 郑伊诺, 等. 辅助技术在激光熔覆中对缺陷的作用 [J]. 金属加工: 热加工, 2024(12): 8-17.
- [16] 李艳, 王晨旭, 江怡蔚, 等. 65Mn 钢表面激光熔覆 Fe60-WC 复合涂层组织及性能研究 [J]. 应用激光, 2024, 44(10): 31-39.
- [17] 王海林, 王金凤. 激光熔覆铁基和镍基合金涂层组织与性能研究 [J/OL]. 特种铸造及有色合金, 1-6 [2025-05-06]. <https://doi.org/10.15980/j.tzzz.T20240367>.
- [18] 范伟光, 李燕乐, 牛家亭, 等. 超声振动方向对激光定向能沉积 Inconel 718 性能影响研究 [J]. 表面技术, 2024, 53(13): 44-54.
- [19] 卢庆亮, 王静, 戚小霞, 等. 面向盾构机密封跑道修复的激光熔覆 Fe 基涂层制备工艺 [J]. 金属热处理, 2022, 47(1): 202-211.
- [20] 蒋龙, 朱嘉祺, 张海涛, 等. 电磁辅助激光熔覆钴基合金涂层的显微组织及摩擦磨损性能研究 [J/OL]. 热加工工艺, 1-7 [2025-05-06]. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20241299>.
- [21] 赵昌龙, 杨俊宝, 李明, 等. 轴类零件表面激光熔覆再制造技术的研究进展 [J]. 制造技术与机床, 2023(7): 32-37.
- [22] 郭秀珍, 龚青山, 刘敏, 等. 基于相对熵-TOPSIS 的机床可再制造性方案评价系统开发 [J]. 制造技术与机床, 2024(6): 147-152.

第一作者: 陈健, 男, 1973 年生, 博士, 正高级工程师, 研究方向为隧道与地下工程。E-mail: chenjian1018@163.com

通信作者: 李燕乐, 男, 1989 年生, 博士, 教授, 研究方向为柔性复合成形技术、绿色制造与再制造/增材制造、智能制造。E-mail: yanle.li@sdu.edu.cn

(编辑 高扬)

(收修改稿日期: 2025-07-12)