

45号钢激光熔覆工艺及显微硬度增强研究

郑秀云 卢君宜

(武汉城市学院机电工程学部, 武汉 430000)

摘要 使用环形光斑激光对45号钢材表面进行激光熔覆,熔覆材料为304不锈钢丝材,研究了离焦量对熔覆层表面形貌的影响。结果表明,负离焦量是得到连续均匀熔覆层的基础条件。设定激光离焦量为 -3 mm ,然后对其他工艺参数进行正交试验。结果表明,当激光功率为 $2\ 400\text{ W}$,扫描速度为 6 mm/s ,送丝速度为 40 mm/s 时,45号钢熔覆层表面质量较好、无坍塌。对熔覆层截面进行显微硬度及微观组织分析,发现熔覆层的硬度值相对基体有明显提高,这是因为熔覆层微观组织晶粒更加细小且均匀。

关键词 45号钢;激光熔覆;显微硬度;工艺参数;微观组织

中图分类号 TG665;TG142.71

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20240482

Laser Cladding Technology and Microhardness Enhancement of 45 Steel

ZHENG Xiuyun, LU Junyi

(Department of Mechatronics Engineering, Wuhan City College, Wuhan 430000)

Abstract: The surface of 45 steel was cladded by laser cladding using ring spot laser with 304 stainless steel wire as cladding material, and effects of defocusing amounts on the surface morphology of cladding layer were investigated. The results indicate that negative defocusing amount is the fundamental condition for obtaining continuous cladding layer. Laser defocus amount was set as -3 mm , and orthogonal experiments on other process parameters were carried out. The results reveal that the surface quality of 45 steel cladding layer presents desirable in the absence of collapse with laser power of $2\ 400\text{ W}$, scanning speed of 6 mm/s , and wire feed speed of 40 mm/s . The microhardness and microstructure analysis of cross section of cladding layer demonstrates that the hardness value of cladding layer is obviously higher than that of the matrix, which is attributed to the finer and homogeneous microstructure.

Key Words: 45 Steel, Laser Cladding, Microhardness, Process Parameters, Microstructure

相比普通A3钢,45号钢具有更高的强度及抗变形能力,因此被广泛应用于机械制造中^[1-3]。激光熔覆是利用功率密度高的激光能量对添加到基材表面的材料以及基材进行辐照加热,使熔覆材料和基材表面发生快速熔化,并快速凝固,从而在基体表面形成与其冶金结合的添料熔覆层^[4-5]。

激光熔覆中,使用的材料可以是金属粉末或丝材^[6-8],许明三等^[9]选择合金粉料为原材料,利用正交试验方法在45号钢基体上进行熔覆研究,发现熔覆层与基体之间形成了良好的冶金结合,组织均匀,无微裂纹等缺陷,激光熔覆层的结合强度能满足再制造的要求;牛兴林等^[10]利用Fe基合金粉末在45号钢表面进行激光熔覆试验,通过对不同工艺参数下的熔覆层宏观形貌、表面硬度、金相组织和显微硬度进行对比分析,发现熔覆层及界面处无裂纹和气孔出现,基体

与熔覆层之间出现了较明显的白亮层,说明两者冶金结合较牢固,熔覆层显微硬度分布比较均匀并且与基体相比提高了100%。但是在实际生产中,采用粉末作为原材料时,材料的利用率较低,且需要非常严苛的生产环境,如真空环境等,不满足工业化生产要求。

与送粉熔覆制造技术相比,丝材熔覆制造技术主要优点是采用丝材为原料,材料利用率几乎可达100%,同时送料过程易控制,且精度高,非常适合自动化生产,同时制造过程无污染,因此送丝熔覆在近年来逐步得到发展^[11-15]。截至目前,采用丝材熔覆制造技术对45号钢进行熔覆的研究报道较少,因此对45号钢进行激光送丝熔覆工艺研究具有积极意义。

本研究以 $3\ 000\text{ W}$ 环形光斑激光器作为热源,采用同轴送丝系统对45号钢进行熔覆试验,通过优化熔覆工艺参数,分析工艺参数对熔覆层性能的影响规律,

收稿日期:2024-11-15;修订日期:2025-02-05

基金项目:湖北省教育厅科研计划资助项目(B2021415)

第一作者简介:郑秀云,女,1990年出生,讲师,E-mail:774972411@qq.com

引用格式:郑秀云,卢君宜. 45号钢激光熔覆工艺及显微硬度增强研究[J]. 特种铸造及有色合金,2025,45(11):1 689-1 693.

ZHENG X Y, LU J Y. Laser cladding technology and microhardness enhancement of 45 steel[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45 (11): 1 689-1 693.

为实际生产提供参考。

1 熔覆试验材料及设备

1.1 试验材料与方案

采用 45 号钢为基材,试样尺寸选用为 100 mm×100 mm×6 mm。304 不锈钢丝材为熔覆丝材,直径为 1.2 mm。45 号钢基材和 304 不锈钢丝材的化学成分见表 1。所有基材表面在熔覆前均用丙酮清洗干净,熔覆过程中采用氩气进行保护,以防止材料氧化。

表 1 45 号钢与 304 不锈钢丝的化学成分

Tab.1 Chemical composition of 45 steel and 304 stainless

材料	steel wire						%
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mn	
45 号钢	0.42~0.50	0.17~0.37	0.5~0.8	0.25	0.30	0.5~0.8	余量
304 不锈钢	0.03	≤0.75	≤2.0	18.0~20.0	8.0~12.0	≤1.0	余量

取增材制造试样横截面,依次使用 600、800、1 000 和 1 200 号金刚砂纸研磨,使用硝酸乙醇试剂(3 mL HNO₃+97 mL 的 C₂H₅OH 中)蚀刻 60 s。使用 Leica DM4000M 金相显微镜观察试样的金相组织。采用 GeminiSEM 360 扫描电镜表征材料组织及化学成分。采用 HV-1000SPTA 显微硬度计测试试样硬度,测试载荷为 2 N,加载时间为 5 s,从基材到增材区每隔 0.5 mm 取一个测试点,并在垂直方向分别间隔 0.5 mm 取 3 个点测试,取 3 个点硬度的平均值为点的硬度值。

1.2 环形光斑激光同轴送丝熔覆增材制造系统

采用 RFL-C3000S 环形光束激光器,最大功率为 3 000 W。激光聚焦到 45 钢基材表面,同时 304 不锈钢丝沿激光束中心线方向输送,同步到达基材表面,形成焊丝与激光同轴效果,见图 1。激光头与送丝喷嘴为一

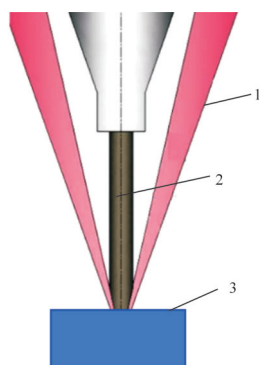


图 1 环形光斑激光同轴送丝熔覆头光路示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser coaxial wire feed cladding head with ring spot

1.激光 2.丝材 3.45 号钢基材

体式安装,保证二者联动,以提高生产过程的稳定性。

2 试验结果及讨论

2.1 单因素试验

离焦量是非常重要的工艺参数,在激光聚焦焦点,定义为正焦点,即离焦量为 0 mm;当激光的聚焦焦点位置在物料表面上方时,定义为正离焦;当激光的聚焦焦点位置在物料表面下方时,定义为负离焦。对离焦量进行试验,分析离焦量对熔覆效果的影响。

根据前期研究,选取激光平均功率为 2 400 W,送丝速度为 30 mm/s,扫描速度为 5 mm/s,进行不同离焦量的熔覆试验。图 2 为不同正离焦量的单层熔覆的表面形貌。可以看出,当离焦量分别为 +3、+1 和 0 mm 时,所形成的熔覆层表面不连续、不均匀,这是因为在正离焦时,激光能量主要作用在丝材上,少量能量作用在基材上,熔化的金属丝长大成熔滴,然后在重力作用下落在基材表面,没有和基材很好地熔合在一起,因此在熔覆层表面不能形成连续熔道。

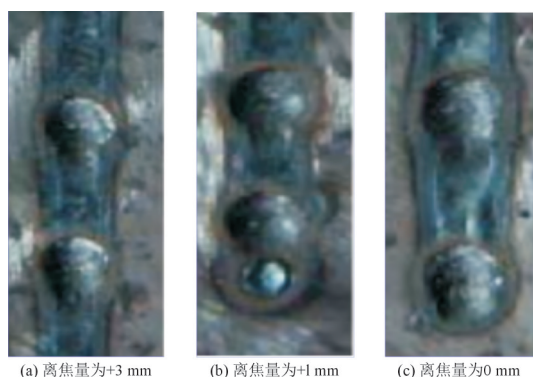


图 2 不同正离焦的熔覆层表面形貌

Fig.2 Surface morphologies of cladding layer with different positive defocusing

图 3 为不同负离焦量情况下的单层熔覆层表面形貌,设置离焦量分别为 -1、-3 和 -5 mm。可以看出,所形成的熔覆层表面连续且均匀。这是因为采用负离焦时,大部分激光能量作用在基材上,使得基材熔化形成熔池,作用在丝材表面的激光能量较少,丝材在送丝机的作用下,送进熔池中,熔池的热量将丝材熔化,形成熔滴。随着熔覆头带动激光头以及丝材向前推进,此时的基材熔池以及丝材形成的熔滴均匀向前推进,形成比较均匀的熔覆层。另外,当采用负离焦进行熔覆试验时,丝材的喷嘴与基材的距离相对于采用正离焦时要小,丝材从喷嘴出口处伸出后,距离基材表面的行程也较短,可以减少丝材发生弯曲或者偏移的概率,保证试验结果的一致性,在实际生产中可以保证生产的稳定性。在后续试验中,均采用负离焦的方式进行。

当离焦量从-1 mm到-5 mm时,熔覆层的宽度逐步变宽。这是因为随着离焦量增加,激光的聚焦光斑逐渐变大,使得在基材上产生的熔池宽度变大。但是进一步增加离焦量,熔覆层产生不连续的现象,这是因为离焦量变大后,激光的功率密度降低,丝材的熔化不完全,不能形成良好的熔覆效果,因此选择合适的负离焦量十分必要。根据单因素试验结果,优先选择离焦量为-3 mm,可以得到熔覆层表面形貌连续的效果。

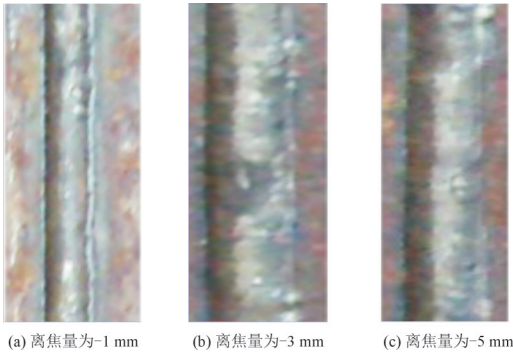


图3 不同负离焦的熔覆层表面形貌

Fig.3 Surface morphologies of cladding layers with different negative defocusing

2.2 正交优化试验

工艺参数对激光熔覆的成形效果影响较大,而多个工艺参数对熔覆效果的影响是相互的。为了实现良好的熔覆质量,采用正交试验对工艺参数进行优化。对激光功率、扫描速度、送丝速度3个因素进行正交试验设计,所取因素水平见表2。

表2 因素水平表

Tab.2 Factors and level table

水平	因素		
	激光功率(A)/W	扫描速度(B)/(mm·s ⁻¹)	送丝速度(C)/(mm·s ⁻¹)
1	2 200	4	20
2	2 400	6	30
3	2 600	8	40

对激光功率、扫描速度、送丝速度进行3因素3水平正交试验,用熔覆层外观的一致性评价激光熔覆质量。正交试验及结果见表3。可见5号方案得到的熔覆层外观形貌连续、均匀,对应的工艺参数组合:激光功率为2 400 W,扫描速度为6 mm/s,送丝速度为40 mm/s,即为优化的工艺参数。

试样1~3的熔覆层均有不连续的情况发生,这是因为当激光功率较低时,丝材熔化不充分,部分丝材未完全熔化,导致形成的熔覆层不连续。试样4的熔覆层连续,但是平整度较差,这是因为送丝速度较低,未及时填满熔池,导致表面凹凸不平。试样6的熔覆层不连续,这是因为送丝速度与扫描速度的比值较小,导致熔

表3 正交试验及结果

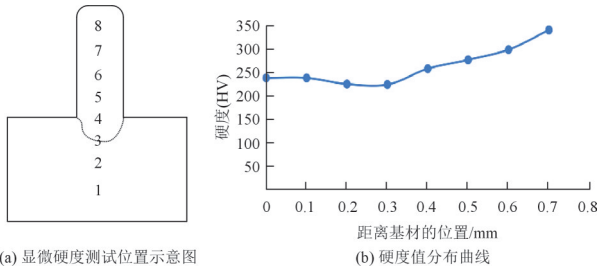
Tab.3 Results of orthogonal experiment

编号	A	B	C	熔覆层效果
1	2 200	4	20	熔覆层不连续,平整度较差
2	2 200	6	30	熔覆层不连续
3	2 200	8	40	熔覆层不连续
4	2 400	4	30	熔覆层连续,平整度较差
5	2 400	6	40	熔覆层连续、均匀
6	2 400	8	20	熔覆层不连续
7	2 600	4	40	熔覆层连续,高低不平
8	2 600	6	20	熔覆层连续,有凹坑
9	2 600	8	30	熔覆层不连续

丝量不够,产生不连续的熔覆层。试样7的熔覆层连续,但是高度不平整,这是因为当功率较高,且扫描速度较慢时,单位时间内输入的热量较大,会对丝材进行过烧,出现熔覆层表面不均匀的情况。试样8的熔覆层连续,但是有凹坑,这是因为送丝速度与扫描速度的比值越大,表明单位时间内送丝量大,形成的熔覆层高度较高,当比例过大,会产生丝材堆积,形成“焊瘤”,导致熔覆层表面平整度差。试样9的熔覆层不连续,这是因为扫描速度过快,导致丝材未充分熔化,导致不连续的熔覆层出现。

2.3 显微硬度分析

图4为试样5显微硬度测试位置以及显微硬度值,其中测试点位1距基材背面距离1.0 mm。可以看出,从母材到热影响区(熔覆层与基材接触部分)再到熔覆层显微硬度呈现先降低然后逐步增大的趋势,其中基材的显微硬度(HV)为238,热影响区的显微硬度(HV)为225,相对于基材的显微硬度有轻微的降低,这是因为热影响区的温度经历从低到高,然后又降低的过程,相当于进行了退火处理,使金相组织软化,导致显微硬度值稍微下降。熔覆层的显微硬度呈现逐渐增大的趋势,这是因为熔覆层的表面始终暴露在外部,相当于在空气中进行热处理(类似于正火处理),使熔覆层硬度值提高,同时越远离基材的熔覆层,其“正火”程度越高,其硬度值也越大^[16]。通过激光熔覆形成的熔覆层



(a) 显微硬度测试位置示意图

(b) 硬度值分布曲线

图4 显微硬度测试位置示意图和硬度值分布曲线

Fig.4 Location for microhardness test and hardness value distribution curve

在实际生产中非常符合金属零件的功能性要求,因为金属零件需要表面具有较高的硬度,具有足够的耐磨性,同时底部(靠近基材处)有足够的韧性(硬度值相对较低)。

2.4 显微组织分析

图5为不同区域的显微组织图。可以看出,所有区域内均无气孔、裂纹等缺陷。从图5b看出基材的显微组织尺寸比较粗大;从图5c看出,热影响区有明显的基

材与熔覆层分界线,从基材(分界线左侧)至热影响区(分界线右侧),组织尺寸呈现由大变小的趋势。从图5d可以看出,熔覆层的显微组织以枝状晶为主,与基材相比,晶粒尺寸明显减小,这是因为激光束熔覆过程中,激光的能量密度非常高,而且作用时间短,这样熔覆层组织在生长过程中,存在较大的过热和过冷度。当过冷度较大时,使形核率明显提高,因而熔覆层形成了细小、致密且大小均匀的显微组织,大幅提高材料的显微硬度,进而改善其耐磨性。

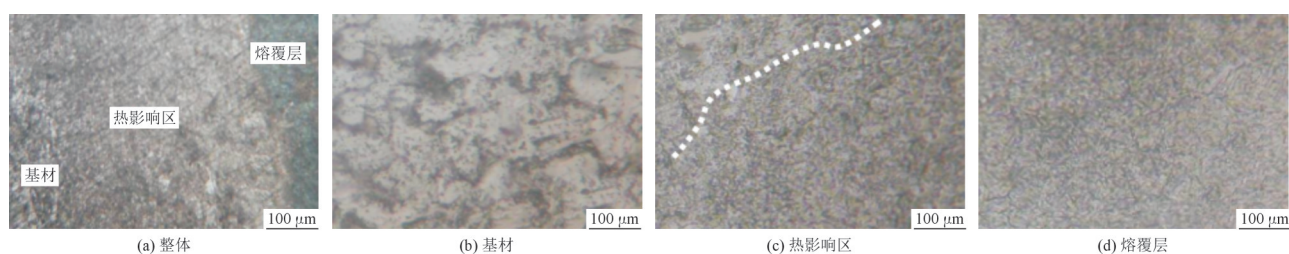


图5 试样不同区域的显微组织图

Fig.5 Microstructure of the specimens at different regions

2.5 熔覆层的元素成分分析

图6为熔覆层的扫描电镜EDS能谱分析,结果见表4。可以看出,熔覆层中不含O元素,说明熔覆层未被氧化。相对于熔覆前的304不锈钢丝材,熔覆层中元素含量有明显变化,这是因为在熔化过程中,基材45号钢部分熔化,基材中的合金元素进入到熔覆层中,这也表明基材45号钢与304不锈钢熔覆层很好地熔接在一起,有利于提高熔覆层与基材连接处的强度。

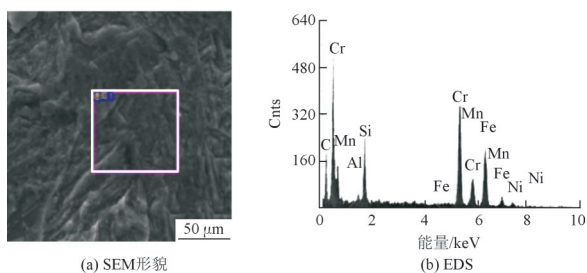


图6 熔覆层的扫描电镜形貌及EDS能谱分析

Fig.6 SEM morphologies and EDS analysis of cladding layer

表4 熔覆层与基材连接处的元素含量

Tab.4 Element content at the interface between cladding layer and substrate %

w_B					x_B				
Fe	Mn	Cr	Si	Ni	Fe	Mn	Cr	Si	Ni
72.8	2.2	15.0	1.0	9.0	70.8	2.4	16.2	1.1	9.5

3 结 论

(1)采用环形光斑激光,配合同轴送丝对45号钢进行激光熔覆,首先对离焦量进行单因素试验,结果表

明,当采用负离焦-3 mm时,覆表层表面连续且均匀,这是因为大部分激光能量作用在基材上,使得基材熔化形成熔池,丝材直接伸入到熔池中,熔池的热量将丝材熔化,形成熔滴。

(2)对激光功率、送丝速度、扫描速度进行3因素3水平正交试验,激光功率为2 400 W,扫描速度为6 m/s,送丝速度为40 m/s时得到连续且表面平整的熔覆层。对试样进行显微硬度测试,激光熔覆层相对于母材具有细小、致密的组织,可提高材料的显微硬度。

参 考 文 献

- [1] 刘艳,冀杰. 45#钢表面Ni-W/ZnO超疏水复合涂层的制备及性能研究[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(5):26-33.
- [2] 章奇,李忠文,于治水. 45#钢激光熔覆FeNiMoCoCrTi高熵合金涂层工艺参数优化[J]. 机械强度, 2021, 43(2):308-312.
- [3] 朱有坤,范彦宏,王远刚,等. 45钢表面激光熔覆Stellite6/ZrO₂复合涂层的结构与性能[J]. 自动化与仪器仪表, 2025(1): 138-142.
- [4] 杨超敏,刘秀波,刘一帆,等. 激光熔覆FeCoCrNiCu_x高熵合金涂层的显微组织和摩擦性能[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(5): 1 514-1 530.
- [5] 杨文斌,李仕宇,肖乾,等. ER9车轮材料激光熔覆涂层微观组织及性能研究[J]. 中国激光, 2023, 50(8):77-89.
- [6] 郭一蒙,彭勇,江俊龙. 4043铝合金激光熔丝增材制造工艺研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(5):245-247.
- [7] BAUFELD B, BRANDL E, VANDE B O. Wire based additive layer manufacturing: Comparison of microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V components fabricated by laser-beam deposition and shaped metal deposition[J]. J. Mater. Process Technol., 2011(211):1 146-1 158.