

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.02.10

45 钢表面激光熔覆 CX 不锈钢组织性能研究

王 璠

江苏远方动力科技有限公司, 江苏 常州 213000

摘 要: 为提高 45 钢构件的耐磨与耐腐蚀性能, 采用激光熔覆技术在 45 钢表面制备 CX 不锈钢熔覆层。通过优化工艺参数(激光功率 320 W, 扫描速度 750 mm/s), 获得了无明显气孔、裂纹且冶金结合良好的熔覆层。利用金相显微镜、扫描电镜、电子背散射衍射(EBSD)及 X 射线衍射(XRD)对熔覆层及基体的显微组织进行分析, 发现熔覆层主要由细小板条马氏体组成, 且晶粒尺寸(平均 $<5\ \mu\text{m}$) 显著小于基体; 热影响区因快速加热冷却生成了马氏体组织。由于熔覆过程冷却速率快, 熔覆层内存在 Cr、Ni 元素分布不均导致的组织不均匀性。硬度测试表明, 熔覆层硬度高达约 650 HV, 远高于基体(约 197 HV), 这主要归因于细晶强化、固溶强化及马氏体相变强化。电化学腐蚀测试显示, 熔覆层的自腐蚀电位 ($-0.53\ \text{V}$) 高于基体 ($-0.67\ \text{V}$), 自腐蚀电流密度 ($3.48 \times 10^{-6}\ \text{A}/\text{cm}^2$) 低于基体 ($5.7 \times 10^{-5}\ \text{A}/\text{cm}^2$), 表明其耐腐蚀性能显著提升, 主要得益于熔覆层中较高的 Cr、Ni 含量促进形成了致密钝化膜。本研究证实, 采用激光熔覆 CX 不锈钢能够有效改善 45 钢表面的硬度与耐蚀性。

关键词: 激光熔覆; 45 钢; CX 不锈钢; 组织性能

中图分类号: TG174.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)02-0090-06

Microstructure and Properties of Laser-cladding CX Stainless Steel Coating on 45 Steel Surface

WANG Fan

Jiangsu Yuanfang Power Technology Co., Ltd., Changzhou 213000, China

Abstract: To improve the wear and corrosion resistance of 45 steel components, a CX stainless steel cladding layer was fabricated on the surface of 45 steel using laser cladding technology. By optimizing process parameters (laser power 320 W, scanning speed 750 mm/s), a defect-free cladding layer with good metallurgical bonding to the substrate was obtained. The microstructure of the cladding layer and substrate was analyzed using optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM), electron backscatter diffraction (EBSD), and X-ray diffraction (XRD). The results show that the cladding layer primarily consists of fine lath martensite, with a significantly finer grain size (average $<5\ \mu\text{m}$) than the substrate. Martensite formed in the heat-affected zone due to rapid heating and cooling. However, microstructural inhomogeneity was observed within the cladding layer, attributed to the fast cooling rate and uneven distribution of Cr and Ni elements. Hardness tests indicated that the cladding layer hardness reached approximately 650 HV, substantially higher than that of the substrate (approximately 197 HV). This enhancement is mainly attributed to grain refinement strengthening, solid solution strengthening, and martensitic transformation strengthening. Electrochemical corrosion tests revealed that the cladding layer exhibited a higher corrosion potential ($-0.53\ \text{V}$) and a lower corrosion current density ($3.48 \times 10^{-6}\ \text{A}/\text{cm}^2$) by an order of magnitude compared to the substrate ($-0.67\ \text{V}$, $5.7 \times 10^{-5}\ \text{A}/\text{cm}^2$), indicating significantly improved corrosion resistance. This improvement is primarily due to the higher Cr and Ni content in the cladding layer, which promotes the formation of a dense passive film. This study confirms that SLM cladding with CX stainless steel can effectively enhance the surface hardness and corrosion resistance of 45 steel.

收稿日期: 2025-10-31 修回日期: 2025-12-03

基金项目: 中国煤炭地质总局 2025 年科技创新重大专项(ZMKJ-2025-ZX01)

作者简介: 王 璠(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事煤炭机械激光熔覆方面的研究。E-mail: fanwang_G@outlook.com。

Keywords: laser cladding; 45 steel; CX stainless steel; microstructure and properties

引用格式:王璠. 45 钢表面激光熔覆 CX 不锈钢组织性能研究[J]. 电焊机, 2026, 56(2): 90–95.
Citation:WANG Fan. Microstructure and Properties of Laser-cladding CX Stainless Steel Coating on 45 Steel Surface[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(2): 90–95.

0 引言

45 钢是一种优质的中碳调质结构钢, 综合力学性能较强, 具有优良的冷热加工性能, 常用于制造发动机活塞、轴、齿轮、连杆和螺栓等重要零部件, 但这些部件由于长时间工作于恶劣复杂的工况下, 很容易发生磨损、腐蚀甚至断裂等问题^[1]。采用激光熔覆方法在 45 钢表面制备具有优良耐磨耐蚀性能熔覆层可以有效提高 45 钢结构件的服役性能, 同时降低使用成本。

经过多年研究, 激光熔覆技术已经取得了巨大的发展, 熔覆层材料的选择也越来越丰富, 目前以 Ni 基、Co 基和 Fe 基合金为主。其中, Ni 基合金粉末具有良好的润湿性、耐腐蚀性和适中的价格, 在激光熔覆材料中应用较广, 它主要适用于局部要求耐高温、耐磨的工件。董璐璐^[2]在 45 钢表面激光熔覆 Ni 基复合熔覆层, 在得出最佳熔覆工艺参数的基础上进一步讨论 MoS₂ 和碳纳米管的含量对熔覆层磨损性能的影响。Si 等^[3]采用选择 Ni60 粉末和 35% 含量的 WC, 分析了激光功率对熔覆层耐磨性能的影响, 结果表明, 在激光功率为 2 200 W 时, 熔覆层的显微硬度和耐磨性均有显著的提高。但 Ni 基合金与铁基体的化学成分和物理性能存在较大的差异, 制备 Ni 基熔覆层时会产生较大的残余应力, 导致其裂纹敏感性较高。Co 基自熔性合金粉末的激光熔覆层能有效地提高零件的耐磨、耐蚀、耐高温等性能, 因此常被应用于耐高温的部件上^[4]。曹旺萍等在 45 钢表面激光熔覆制备钴基熔覆层, 探究激光功率对熔覆层成形质量和耐腐蚀性能的影响, 结果表明, 激光功率为 2000 W 时熔覆层成形质量较好, 耐磨性最优^[5]。Co 基合金虽然各项性能较为优异, 但由于其价格昂贵, 因此应用范围较小^[6]。相比于 Ni 基、Co 基熔覆材料, Fe 基熔覆材料具有价格低廉、与钢铁工件相容性好、工艺性能良好等优势, 可广泛应用于工业生产。

CX 不锈钢是一种新型马氏体时效不锈钢, 通过沉淀强化获得了出色的物理性能与力学性能, 且耐腐蚀性优异, 使其成为 45 钢熔覆层材料的选择之一。到目前为止, 已有学者进行了激光增材制造 CX 不锈钢的相关研究, 大多集中于激光增材制造工艺参数对成形件质量、组织与性能的影响^[7-8], 而 CX 不锈钢作为熔覆层材料对 45 钢基体性能的改善的相关研究较少。在此基础上, 本文采用 CX 不锈钢为熔覆材料, 在 45 钢表面制备熔覆层, 对比分析熔覆层和基体的显微组织、硬度和耐腐蚀性能的差异, 研究结果可以为采用激光熔覆技术提高 45 钢结构件服役性能和使用寿命提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验采用的基体材料为退火态的 45 钢, 熔覆层材料为 CX 不锈钢。基体尺寸 100(长)×100(宽)×10(厚) mm, 选用的 CX 钢粉末粒径约为 10~40 μm。基体及粉末的成分如表 1、表 2 所示。

表 1 45 钢的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of 45 steel (wt. %)

C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu
0.42~0.50	0.50~0.80	0.17~0.37	0.2~0.25	0.2~0.3	0.2~0.3

表 2 CX 不锈钢的化学成分(质量分数, %)

Table 2 Chemical composition of CX stainless steel (wt. %)

Cr	Ni	Mo	Al	Mn	Si	C
11.0~13.0	8.4~10.0	1.1~1.7	1.2~2.0	≤0.04	≤0.04	≤0.05

1.2 试验方法

在 BRL-M300 激光选区熔化增材制造设备上 进行预铺粉激光熔覆试验。采用优化后的工艺参数为激光功率 320 W, 扫描速度 750 mm/s, 激光熔覆过程示意如图 1 所示。

对试样打磨、抛光后进行腐蚀处理, 腐蚀液成分为: FeCl₃ 4~6.5 g、浓 HCl 10~20 mL、H₂O 50 mL, 腐蚀时间 15 s。使用 Axiolab 5 金相显微镜、Gemini

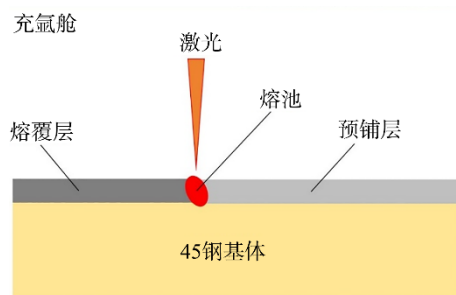


图1 激光熔覆过程示意

Fig. 1 Schematic diagram of the laser cladding process

SEM 360 扫描电镜进行组织成分分析。采用 HVS-1000A 型显微硬度计测试基体及熔覆层硬度, 载荷 500 gf, 加载时间 15 s。采用 CS2350H 型电化学工作站对熔覆层及基体材料进行电化学腐蚀试验。选用饱和甘汞电极为参比电极, 铂电极作为辅助电极, 质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液为腐蚀介质。试验前, 先进行 2 h 的开路电位测试以消除潜在的表面反应和体系漂移。极化曲线测试试验中, 扫描电位范围 $-0.5 \sim 2$ V, 扫描速率 0.5 mV/s; 阻抗测试试验中选取频率范围为 $10^2 \sim 10^5$ Hz, 交流幅值为 10 mV。

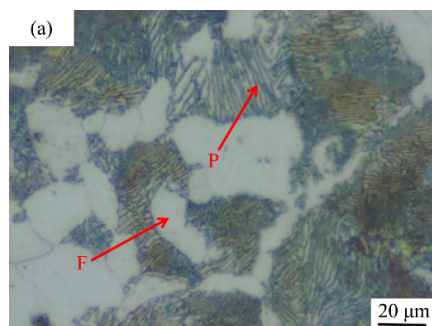
2 试验结果及分析

2.1 微观组织及成分分析

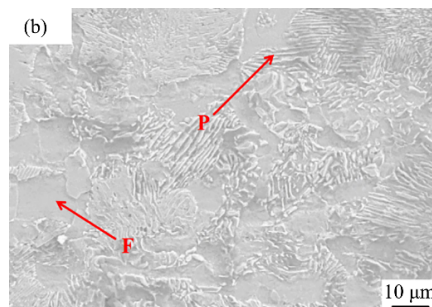
采用金相显微镜和扫描电镜观察基体 45 钢的显微组织, 结果如图 2 所示。可以看出 45 钢的显微组织主要为铁素体(F)+珠光体(P)。

激光熔覆后, 试样横截面金相组织如图 3 所示。可以看到, CX 钢熔覆层的厚度约 150 μm 。CX 钢熔覆层和基体之间形成了良好的冶金结合, 二者的界面处没有观察到明显的裂纹、气孔等缺陷。在熔覆层和基体之间存在宽度为 50~60 μm 的热影响区, 如图 3b 所示。

采用 SEM 分析截面的显微组织, 结果如图 4 所示。热影响区的显微组织中有马氏体生成, 如图 4a、4b 所示。这是由于在熔覆层的制备过程中, 热影响区的原始组织在加热过程中会向奥氏体转变, 并且奥氏体晶粒会在热作用下进一步长大, 随后又快速冷却, 形成了马氏体组织^[9]。熔覆层显微组织分布不均匀, 如图 4b 所示。在熔覆层的区域 1 可以观察到针状马氏体的存在, 在区域 2、3 则不明显。



(a) 金相组织



(b) 扫描组织

图2 基体材料显微组织

Fig. 2 Microstructure of the Substrate

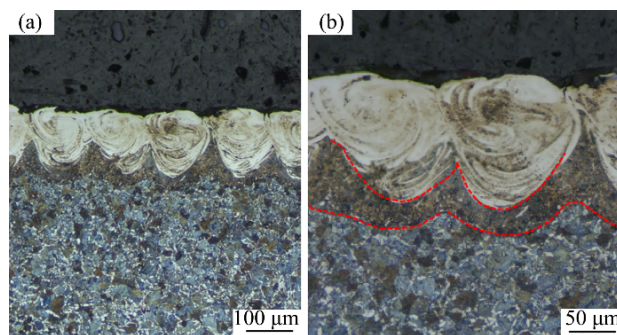


图3 熔覆层及基体截面显微组织

Fig. 3 Cross-sectional microstructure of the cladding layer and substrate

出现这种显微组织差异的主要原因和合金元素的分布有关。熔覆层内 Ni、Cr 元素分布面扫描的结果如图 5 所示。可以看出, 在针状马氏体存在的区域 Cr、Ni 含量较低, 而在针状马氏体不明显的区域 Cr、Ni 元素含量较高, 主要是由于激光熔覆过程冷却速率快, 元素难以充分扩散。

在熔覆层内部出现的元素分布不均匀现象主要和熔覆层、基体成分差异及激光熔覆较快的冷却速率有关。基体表面一部分材料被熔化后形成的液态金属和 CX 钢粉末熔融形成的液态金属未充分混合便快速冷却, 熔覆层成分被基体元素稀释, 导

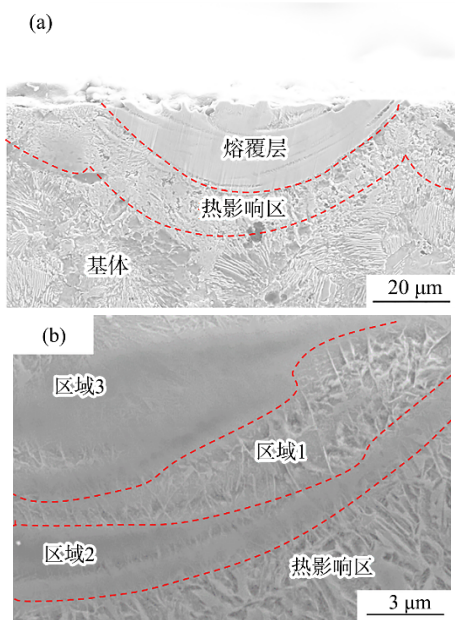
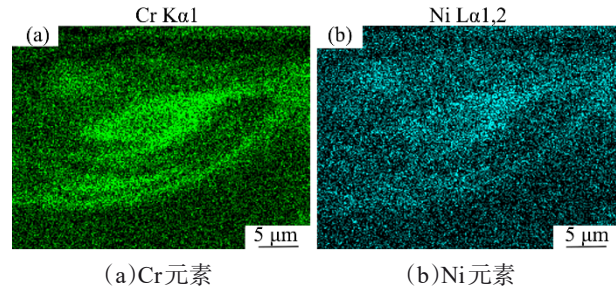


图4 截面SEM组织

Fig. 4 Cross-sectional SEM microstructure

致熔覆层内元素分布不均匀。

图6为基体材料与熔覆层XRD结果,可以看出熔覆层物相主要由马氏体构成,且和基体的衍射峰相比左移。这是由于Cr、Ni等元素的固溶作用使得晶格常数变大,导致衍射峰向左移动。



(a)Cr元素

(b)Ni元素

图5 EDS面扫描结果

Fig. 5 EDS elemental mapping results

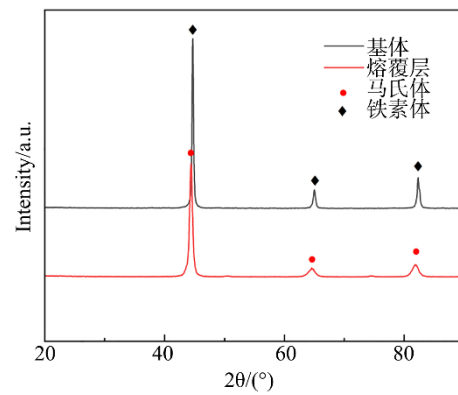


图6 XRD衍射图谱

Fig. 6 XRD diffraction pattern

基体45钢及CX钢熔覆层的EBSD结果如图7所示。从图7a、7c、7e可以看出,45钢基体基本由等

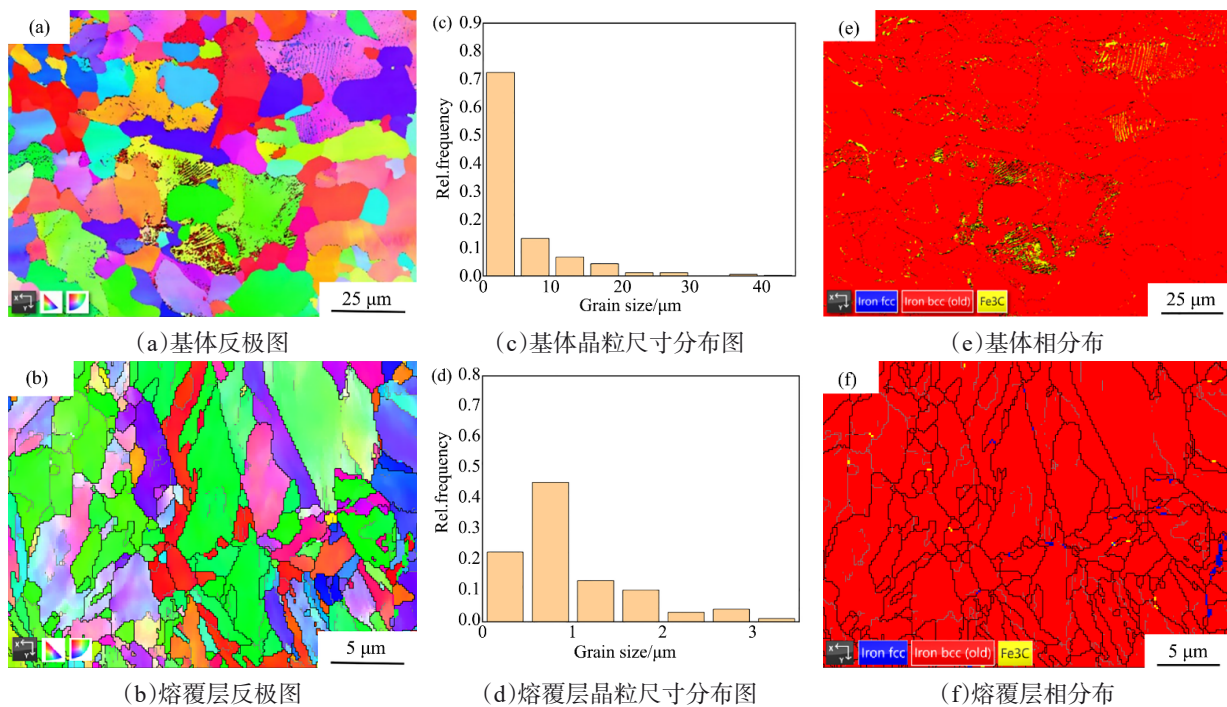


图7 基体及熔覆层EBSD结果

Fig. 7 EBSD results of the substrate and cladding layer

轴晶构成,晶粒尺寸介于 $5\sim 40\ \mu\text{m}$,主要物相为铁素体和渗碳体。熔覆层的EBSD结果如图7b、7d、7f所示。由图7b可以看出,熔覆层中靠近基体的部分晶粒尺寸明显小于熔覆层顶部,这是由于在熔覆层制备过程中,基体材料的温度较低且导热性较好,在熔池内部形成了较大的温度梯度以及过冷度,因此形成了大量的细小晶粒。然而,随着熔覆道次的增加,所产生的热量会逐渐累积,导致基体材料的温度升高。这使得熔覆层与基体材料之间的温度梯度减小,在随后的冷却凝固过程中,晶粒有足够的生长时间,更容易长大,形成了柱状晶组织^[10]。由图7d可以看出,相比于基体材料,熔覆层的晶粒更为细小,平均尺寸低于 $5\ \mu\text{m}$ 。结合XRD与SEM结果可知,熔覆层主要由马氏体构成,晶界处存在少量的 Fe_3C ,如图7f所示,这是由于熔覆层制备过程中,部分基体材料熔化导致C元素进入熔覆层,在晶界处形成了 Fe_3C 。

2.2 性能分析

2.2.1 硬度分析

从熔覆层顶端开始至基体材料的硬度变化如图8所示。CX不锈钢熔覆层区域硬度约650 HV,热影响区硬度约310 HV,基体材料硬度约197 HV。可以看到,与基体材料相比,熔覆层和热影响区的硬度均有所提升。熔覆层的组织为马氏体,晶粒尺寸较为细小,起到了细晶强化作用;除此之外,熔覆材料中还含有Cr、Ni元素,可以起到固溶强化作用^[11]。以上因素的共同作用导致熔覆层硬度远高于基体。在热影响区,由于热作用导致其显微组织中有马氏体生成,因此其强度也要高于基体。

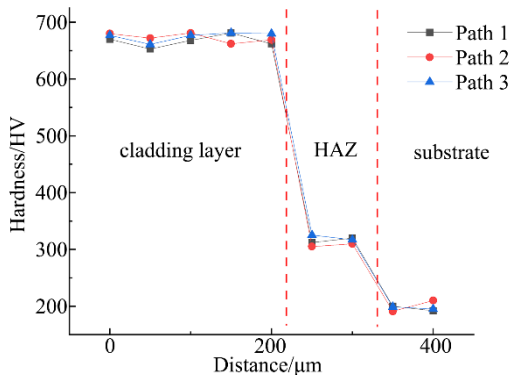


图8 不同位置的硬度变化趋势

Fig. 8 Variation trend of hardness at different locations

2.2.2 耐腐蚀性能分析

基体材料与熔覆层的动电位极化曲线扫描结果如图9所示,利用Tafel直线外推法分析可得两种材料的自腐蚀电位与自腐蚀电流密度,其结果见表3所示。以自腐蚀电位为界限,上半部分为阳极极化曲线,下半部分为阴极极化曲线。由表3可知,熔覆层的自腐蚀电位大于基体材料,且熔覆层的自腐蚀电流密度小于基体材料,这表明制备了熔覆层的试样具有更好的耐腐蚀性能。

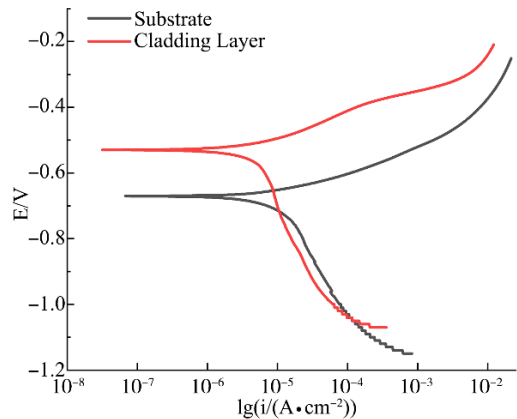


图9 基体及熔覆层动电位极化曲线

Fig. 9 Potentiodynamic polarization curves of the substrate and cladding layer

表3 极化曲线试验数据

Table 3 Experimental data of potentiodynamic polarization curve

材料	自腐蚀电位/V	自腐蚀电流密度/($\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$)
基体(45钢)	-0.67	5.70×10^{-5}
熔覆层(CX不锈钢)	-0.53	3.48×10^{-6}

这是由于两种材料的显微组织不同,导致耐腐蚀性能也不同。在腐蚀的初始阶段,基体材料45钢的金相组织由铁素体和珠光体构成,电位差较大,形成腐蚀微电池,从而增加阳极溶解的倾向。相比之下,熔覆层的金相组织主要为马氏体,各晶粒之间的电位差较小,因此腐蚀驱动力较弱,熔覆层相对不容易被腐蚀。在腐蚀后期,45钢的晶粒腐蚀速率差异较大,腐蚀产物生长速度不均匀,产生较大的内部应力。而熔覆层中的晶粒间腐蚀速率相差不大,腐蚀产物生长相对均匀,因此产生的腐蚀产物具有较好的致密性和连续性,其内应力较低;更重要的是熔覆层中Cr含量较高,能够在表面形成连续且致密的钝化膜,有效阻碍腐蚀介质的渗透,且熔覆层中的Ni元素有助于稳定钝化膜,因此熔覆层

的耐腐蚀性能强于基体材料^[12-13]。

3 结论

(1)在 45 钢表面采用激光熔覆方法制备 CX 不锈钢熔覆层,在激光功率 320 W,扫描速度 750 mm/s 条件下,熔覆层内部无明显缺陷。

(2)热影响区因激光加热后的快速冷却发生奥氏体向马氏体的转变,熔覆层主要由平均晶粒尺寸小于 5 μm 的细小板条马氏体构成,晶粒细化程度显著优于基体;熔覆层内存在的组织不均匀性,源于冷却速率过快导致的 Cr、Ni 元素扩散不充分及基体成分稀释效应,XRD 与 EBSD 分析证实 Cr、Ni 元素的固溶作用使熔覆层晶格常数发生变化,晶界处少量 Fe_3C 的形成与基体 C 元素的迁移相关。

(3)由于细晶强化和固溶强化作用,熔覆层的强度高于基体 45 钢;且由于 Cr、Ni 元素的共同作用,熔覆层的耐腐蚀性能高于基体 45 钢。

参考文献:

- [1] 阴明,郭枝梁,庞雅琪,等. 激光熔覆铁铬梯度涂层界面调控与性能研究[J]. 电焊机,2024,54(7):20-25.
YIN M, GUO Z L, PANG Y Q, et al. Laser Cladding of Iron-Chromium Gradient Coatings: Interface Regulation and Performance Improvement[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(7): 20-25.
- [2] 董璐璐. 45 钢表面激光熔覆 Ni 基复合涂层的工艺及摩擦磨损性能研究[D]. 河南: 河南理工大学, 2022.
DONG L L. Study on technology and tribological properties of Laser Cladding Ni matrix composite coating on 45[D]. Henan: Henan University of Technology, 2022.
- [3] Si S H, Yuan X M, Liu Y L, et al. Effect of Laser Power on Microstructure and Wear Resistance of WCP/Ni Cermet Coating[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2006, 13(3): 74-78.
- [4] Weng F, Yu H, Chen C, et al. Microstructures and wear properties of laser cladding Co-based composite coatings on Ti-6Al-4V[J]. Materials & Design, 2015, 80: 174-181.
- [5] 曹旺萍,李银标,王振宇. 45 钢表面激光熔覆钴基涂层组织与磨损性能研究[J]. 应用激光, 2022, 42(2): 41-47.
CAO W P, LI Y B, WANG Z Y. Study on Microstructure and Properties of Wear-resistant Coating on 45 Steel Surface by Laser Cladding[J]. Applied Laser, 2022, 42(2): 41-47.
- [6] Wang X, Zhang M, Du B, et al. Microstructure and wear properties of laser clad composite coating[J]. Surface Review & Letters, 2012, 19(5): 1-10.
- [7] 张亮亮,王敏杰,张佳琪,等. 离焦量对激光选区熔化 CX 马氏体时效不锈钢成形性能研究[J]. 中国激光, 2021, 48(22): 193-207.
ZHANG L L, WANG M J, ZHANG J Q, et al. Effect of Defocus Distance on Formability of CX Maraging Stainless Steel by Selective Laser Melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(22): 193-207.
- [8] 李锦坤,郭雷明,麦惠淇. 热处理工艺对激光 3D 打印成形 CX 不锈钢组织与性能的影响[J]. 材料研究与应用, 2023, 17(3): 559-566.
LI J K, GUO L M, MAI H Q. Effect of Heat Treatment Process on Microstructure and Properties of 3D Printed CX Stainless Steel[J]. Materials Research and Application, 2023, 17(3): 559-566.
- [9] Wu Z, Li T, Li Q, et al. Process optimization of laser cladding Ni60A alloy coating in remanufacturing[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 120: 105718.
- [10] 董丹阳,刘常升,陈岁元,等. 激光熔覆 Fe-Si 涂层的超精细结构[J]. 金属学报, 2008(02): 188-192.
DONG D Y, LIU C S, CHEN S Y, et al. Hyperfine Structure of Laser Cladding Fe-Si Coating[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008(02): 188-192.
- [11] 文平,李春福,赵毅,等. Cr, Mo, Ni 在 $\alpha\text{-Fe(C)}$ 中占位、键合性质及合金化效应的第一性原理研究[J]. 物理学报, 2014, 63(19): 280-287.
WEN P, LI C F, ZHAO Y, et al. First principles calculation of occupancy, bonding characteristics and alloying effect of Cr, Mo, Ni in bulk $\alpha\text{-Fe(C)}$ [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(19): 280-287.
- [12] 姜越,尹钟大,朱景川,等. 马氏体时效不锈钢的发展现状[J]. 特殊钢, 2003, 24(3): 1-5.
JIANG Y, YIN Z D, ZHU J C, et al. Development Status of Maraging Stainless Steel[J]. Special Steel, 2003, 24(3): 1-5.
- [13] 林凡,张少宗,施瑞鹤. 高铬镍不锈钢钝化膜及其耐腐蚀性能[J]. 上海交通大学学报, 2000(08): 1014-1017.
LIN F, ZHANG S Z, SHI R H. Passive Film and Corrosion Behavior of High Cr-Ni Stainless Steel[J]. Journal of Shanghai JiaoTong University, 2000(08): 1014-1017.