

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.07.12

合金钢激光熔覆复合耐磨板组织和性能研究

毋晓军¹, 马君¹, 冯敏¹, 李玉良¹, 苏晓明¹, 项榆¹, 温国栋^{2*}

1. 陕煤集团神南产业发展有限公司, 陕西 榆林 719300

2. 西安科技大学, 陕西 西安 710054

摘要: 为了提升煤矿钻探装备耐磨构件的硬度和耐磨性, 基于激光熔覆技术, 以 Q345 钢为基板, 以 Fe 基合金粉末为熔覆材料, 成形了耐磨板, 研究了耐磨板的显微组织、显微硬度以及冲击功。结果表明, 激光熔覆层质量良好, 没有出现明显气孔和裂纹, 熔覆层与基体呈致密的冶金结合。熔覆层的显微组织主要为柱状晶和等轴晶, 其显微硬度最高值约为 600 HV, 复合板的硬度和耐磨性明显提升。试样的冲击功约为 20J, 断裂类型为混合断裂。该研究可为改善耐磨板的耐磨性能提供相关研究依据。

关键词: 激光熔覆; 显微组织; 硬度; 冲击功

中图分类号: TG174.4, TG665 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)07-0094-05

Research on the Microstructure and Performance of Dual-layer Wear-resistant Alloy Steel Plate with Laser Cladding

WU Xiaojun¹, MA Jun¹, FENG Min¹, LI Yuliang¹, SU Xiaoming¹, XIANG Yu¹, WEN Guodong^{2*}

1. Shennan Industry Development Co., Ltd., Yulin 719300, China

2. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

Abstract: In order to improve the hardness and wear resistance of the guide rails of the drilling rig, based on laser cladding technology, a wear-resistant plate was formed by using Q345 steel as the base plate and Fe-based alloy powder as the cladding material. The microstructure, microhardness and impact energy of the wear-resistant layer were studied. The results show that the laser cladding layer has good quality, there are no obvious pores and cracks, and the laser cladding layer and the matrix form a dense metallurgical bond. The microstructure of the cladding layer mainly consists of columnar crystal and equiaxial crystal. The maximum microhardness is 600 HV, and the hardness and wear resistance are significantly improved. The impact energy of the sample is about 20J, and the fracture type is mixed fracture. This study can provide relevant research basis for improving the wear resistance of wear-resistant plates.

Keywords: Laser cladding; Microstructure; Hardness; Impact energy

引用格式: 毋晓军, 马君, 冯敏, 等. 合金钢激光熔覆复合耐磨板组织和性能研究[J]. 电焊机, 2026, 56(7): 94-98.

Citation: WU Xiaojun, MA Jun, FENG Min, et al. Research on the Microstructure and Performance of Dual-layer Wear-resistant Alloy Steel Plate with Laser Cladding[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(7): 94-98.

0 引言

耐磨板由于其优异的耐磨性能在煤炭机械行业应用广泛。以钻探装备关键零部件导轨为典型案

例, 导轨是钻机的关键零件, 在钻进过程中需承受钻机钻孔时施加的反作用力, 在这种特殊工况下极易发生磨损^[1], 严重影响机床的精度和使用寿命。为实现导轨硬度和耐磨性能的提升, 同时兼顾生产效

收稿日期: 2025-05-20 修回日期: 2025-09-05

基金项目: 国家自然科学基金(52271045, 52075551); 陕西省科学技术厅创新人才推进计划项目(2020KJXX-045)

作者简介: 毋晓军(1981—), 高级工程师, 主要从事煤矿装备再制造研究。E-mail: 232612336@qq.com。

通讯作者: 温国栋(1984—), 博士, 副研究员, 主要从事轻量化、智能化先进煤矿钻探技术与装备研发。E-mail: gdwen@xust.edu.cn。

率和质量^[2],对表面强化工艺的研究具有重要意义。

激光熔覆技术^[3-15]是目前广泛使用的表面改性方法之一,具有稀释率低、热影响区小、涂层与基体冶金结合等优点,可在一定程度上改善基体表面的硬度和耐磨性。近年来,国内外学者在激光熔覆铁基涂层方面开展了大量研究。在涂层组织与硬度方面,龚泽东^[3]等通过激光熔覆技术在45钢基体表面制备了Fe基不锈钢合金涂层,有效提高了表面硬度、耐磨性及耐蚀性;关天宇^[4]等采用Fe基合金粉末在CL60车轮钢试样上进行激光熔覆,形成了(Fe、Ni)固溶体和 Cr_7C_3 碳化物两种强化相,显著提高了车轮材料表面硬度。在耐磨性能提升方面,杨林^[5]通过激光合金化和激光渗碳处理分别补充了Cr、C元素的含量,增铬强化单元体组织中出现了 M_7C_3 型碳化物,其耐磨性约提升了27%~30%;增碳强化单元体组织中C含量的增加生成了高碳马氏体,其耐磨性约提升了60%~63%。综上,固溶体和碳化物强化相的形成是提升熔覆层硬度和耐磨性的关键途径,这也为本文选择熔覆粉末成分提供了参考。

本文基于耐磨板在煤机装备使用的实际工况和前期调研,为了既满足使用要求,又能降低成本,缩短生产周期,采用激光熔覆方式在Q345钢双层耐磨板制备了铁基熔覆复合耐磨板,并对熔覆层的显微组织、显微硬度和冲击性能进行了系统研究,以为改善耐磨板的使用性能提供实验依据和技术参考。熔覆粉末采用含C、W及Mn的铁基粉末,形成形成W的固溶体或碳化物强化相,以提高耐磨构件的硬度。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

基板材料为Q345低合金高强钢板,尺寸规格为500 mm×200 mm×20 mm,其化学成分为C=0.20%,Si=0.50%,Mn=1.70%,P、S小于0.03%,其余为Fe。熔覆合金粉末成分为C=0.60%,Mn=0.60%,W=1.00%,其余为铁,粒径80~150 μm 。Q345基板的显微组织如图1所示,由图1可以看出,基板组织为铁素体和珠光体组织。

1.2 激光熔覆工艺

熔覆前,采用150~2000号SiC砂纸对基板表面进行打磨,随后进行喷砂粗化处理,最后用无水乙醇进行超声清洗并烘干,以去除基材表面的杂质和油污。熔覆层厚度为5 mm,为提高熔覆生产效率,搭接率为20%。采用西安鑫精合智能制造有限公司的定制激光增材设备进行激光熔覆,保护气体氩气流量为15 L/min,工艺参数为:激光功率1 200 W,扫描速率13 mm/s,光斑直径3 mm,送粉率12.5 g/min。

1.3 组织表征与性能测试

利用线切割机沿垂直于焊缝的方向取样,使用180~1200号SiC砂纸对试样依次进行打磨、抛光,采用王水进行腐蚀。利用蔡司AxioVert.A1研究级倒置式光学显微镜观察熔覆层的显微组织。

沿垂直于熔覆方向截取硬度试样和标准V型冲击试样,冲击试样按照GB/T229—2020标准制作,试样尺寸如图2所示。硬度试样和冲击试样均包含基板和熔覆层,其中基板和熔覆层的厚度均为5 mm。采用404S XV维氏显微硬度计对激光熔覆试样进行维氏硬度测试,加载载荷为500 g,加压时间为10 s,从基板到熔覆材料每隔2 mm测试一个点。

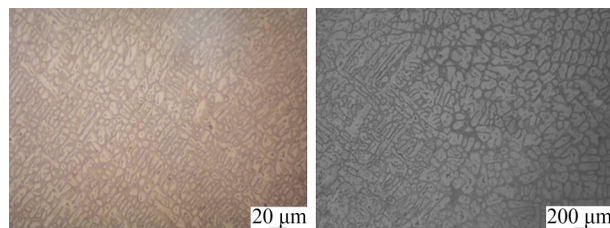


图1 基板的显微组织

Fig. 1 The microstructure of the substrate

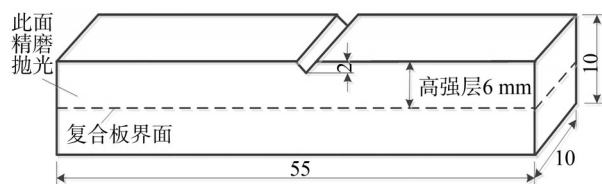


图2 V型冲击试样尺寸

Fig. 2 The dimensions of V-notch impact specimens

2 试验结果与讨论

2.1 熔覆层宏观形貌与界面组织

图3为熔覆涂层表面形貌,可以看出,熔覆层成

形良好,表面未发现裂纹和气孔等缺陷。图4是激光熔覆试样横截面的显微组织,由基体和熔覆层两部分组成,在基体和熔覆层之间均未发现肉眼可见的裂纹、气孔等缺陷,表明基体与熔覆层之间形成了致密的冶金结合。

2.2 熔覆层显微组织

图5为熔覆层的显微组织。由图可知,激光熔覆过程中较大的冷却速度对晶粒长大有抑制作用,晶粒在尚未充分长大时便迅速结晶,因此熔覆层主要为细小的、交错生长的柱状晶和树枝晶。晶粒沿着温度梯度方向交叉向上生长,在一定范围内具有方向性,但总体上方向性较弱,该结果与Shi^[16]等人的研究结果一致。

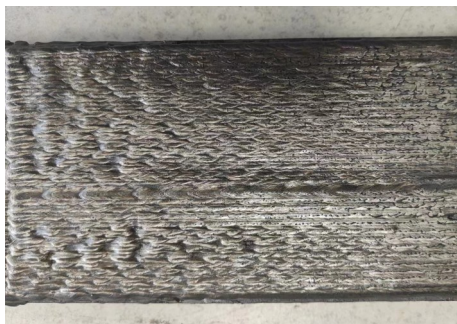


图3 激光熔覆表面

Fig. 3 The surface of laser cladding

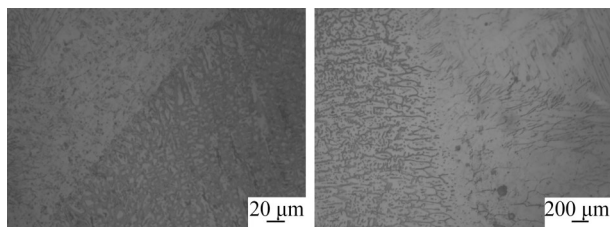


图4 界面显微组织

Fig. 4 Microstructure at the interface

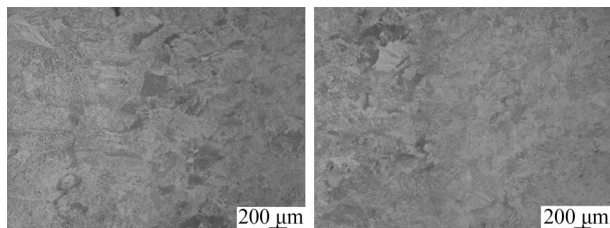


图5 熔覆层显微组织

Fig. 5 Microstructure of the cladding layer

2.3 显微硬度分析

图6为基板和熔覆层的显微硬度分布。由图可知,基板显微硬度平均值约为350 HV,激光熔覆区

域显微硬度平均值高于560 HV,最高可达约600 HV,较基板提高了约60%,熔覆层硬度显著提升。硬度提升的原因可从两方面分析:一方面,根据Hall-Petch公式可知,图4及图5的晶粒细小,表明其强度和硬度也高。

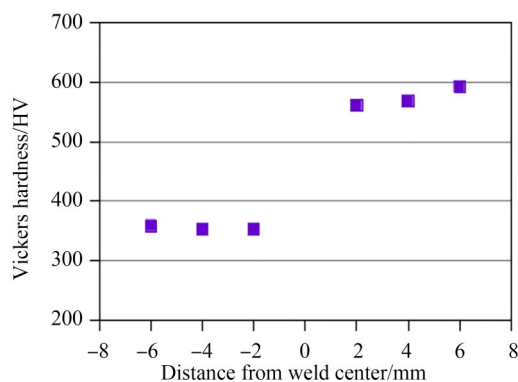


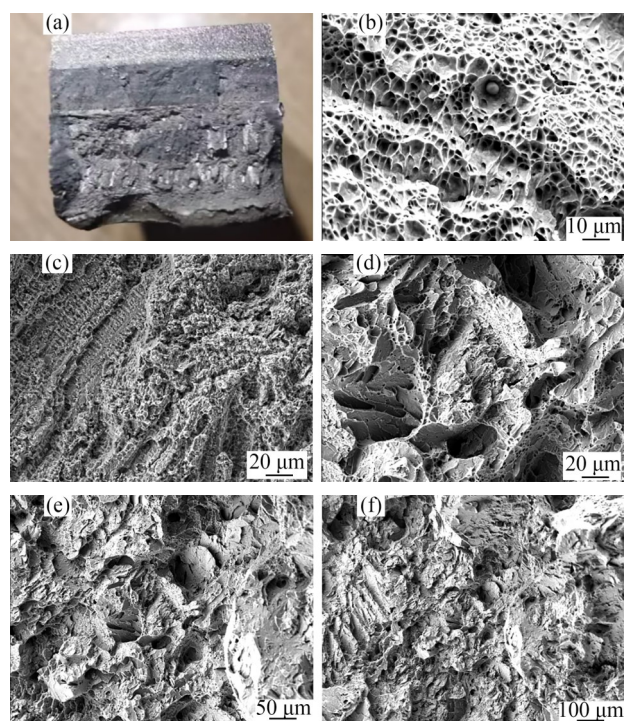
图6 基板和熔覆层的硬度分布

Fig. 6 Hardness distribution of the substrate and the cladding layer

2.4 冲击韧性及断口分析

经测试,包含熔覆层和基板的试样冲击功约为20 J,明显低于母材。图7为含有熔覆层和基板的冲击试样断口,断口由剪切唇、纤维区和放射区三部分组成。在剪切唇区可见小而浅的韧窝,放射区呈现明显的解理断裂特征,且裂纹沿熔覆方向快速扩展。在图7c红色框中标注的区域,裂纹沿相互平行的柱状晶开裂,且上下两层柱状晶沿同一方向开裂。

这一现象与激光熔覆过程中晶粒生长的遗传性有关。激光熔覆开始前,基板处于室温状态,基板和熔覆层之间的温度梯度较大,热量沿温度梯度方向反方向向基板传导,熔池结晶速率急剧增加。随着熔覆过程的进行,由于复杂的热循环和热量积累,试样温度逐渐升高,界面附近的晶粒在热作用下长大,使界面处的晶粒尺寸略大。同时,熔覆层与熔池之间的温度梯度减小,基板方向传热速率减慢,熔池冷却速率降低,形成了沿熔覆高度方向外延生长的柱状晶。尽管熔覆时上层对下层具有热处理作用,下层对上层具有预热作用,但在热循环和热累积的共同作用下,熔覆层方向上的温度梯度仍然较大,且晶粒生长具有遗传性,上层柱状晶依附下层柱状晶外延生长,柱状晶的生长方向与沉积方向大致平行,即下层晶粒尺寸在一定程度上决定了上层晶粒尺寸,但该遗传现象仅在个别区域出



(a)宏观形貌;(b)剪切唇;(c-f)纤维区和放射区

图7 冲击断口形貌

Fig. 7 The overall view of impact fracture

现,如图7c所示。此外,基板和熔覆层之间良好的冶金结合及均匀的组织保证了载荷的有效传递,有利于提高了材料的整体性能。

3 结论

本文针对煤矿钻探装备耐磨构件使用过程中易磨损的问题,采用精选的铁基粉末,通过激光熔覆技术提升了构件表面的硬度,延长了使用寿命,提高了产品质量,还降低了维护和更换成本,具体结论有:

(1)获得了5 mm厚的冶金结合质量良好的铁基熔覆层,熔覆层的显微组织主要为柱状晶和树枝晶。

(2)熔覆层显微硬度最高值可达600 HV,平均值约为560 HV,比母材提高了约60%。

(3)包含熔覆层和基板试样的冲击功约为20 J,断口主要由剪切唇、纤维区和放射区组成。在剪切唇区可以观察到韧窝,而在放射区可见明显的解理断裂特征。

参考文献:

- [1] 鄢忠方. 激光熔覆技术在钻机耐磨导轨上的应用[J]. 煤矿机械, 2022, 43(12): 159-160.
YAN Z F. Application of laser cladding technology on wear-resistant guide rails of drilling rigs[J]. Coal Mining Machinery, 2022, 43(12): 159-160.
- [2] 林道杰. 导轨副摩擦磨损试验及耐磨性提升关键技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
Lin D J. Research on friction and wear test of guide rail pair and key technology for improving wear resistance [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021.
- [3] 龚泽东, 龚海军, 高正源, 等. 45钢表面激光熔覆铁基不锈钢粉末工艺研究[J]. 热加工工艺, 2025, 54(20): 137-142.
GONG Z D, GONG H J, GAO Z Y, et al. Study of Laser Cladding Iron-based Stainless Steel Powder Process on 45 Steel Surface[J]. Hot Working Technology, 2025, 54(20): 137-142.
- [4] 关天宇, 张旭. 车轮表面激光熔覆铁基粉末熔覆层组织研究[J]. 机械工程与自动化, 2025, 54(1): 160-164.
GUAN T Y, ZHANG X. Study on the Microstructure of Iron-based Powder Cladding Layer for Laser Cladding on Wheel Surface[J]. Mechanical Engineering and Automation, 2025, 54(1): 160-164.
- [5] 杨林. 激光增铬、增碳强化单元体对严重非均匀磨损导轨的修复研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
YANG L. Study on the repair of severe non-uniform wear guide rail by laser chromization and carburization reinforcement unit [D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [6] 林一鸣, 师文庆, 江龙威, 等. 添加MoS₂对激光熔覆铁基涂层耐磨性能的影响[J]. 激光技术, 2025, 49(4): 556-563.
LIN Y M, SHI W Q, JIANG L W, et al. Effect of MoS₂ addition on the wear resistance of laser cladding iron-based coatings [J]. Laser Technology, 2025, 49(4): 556-563.
- [7] Liu P Y, Li H, Zhang R H, et al. Wear Resistance of Laser Cladding TiC Particle-Reinforced Fe-based Gradient Coating[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2024, 53(03): 632-643.
- [8] 吴朝锋, 马明星, 刘文今, 等. 激光原位制备复合碳化物颗粒增强铁基复合涂层及其耐磨性的研究[J]. 金属学报, 2009, 45(08): 1013-1019.
Wu C F, Ma X X, Liu W J, et al. Study on in-situ

- preparation of composite carbide particle-reinforced iron-based composite coatings and their wear resistance [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2009, 45 (08): 1013-1019.
- [9] 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(02): 611-617.
- CAO J L, YANG X F, WANG Shouren, et al. Wear and corrosion resistance of laser cladding Ni60-TiC ceramic coating on the surface of 45 steel [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2020, 49(02): 611-617.
- [10] 尹燕, 李志慧, 李辉, 等. 铸轧辊套表面超高速激光熔覆钴基熔覆层高温耐磨性能[J]. *焊接学报*, 2021, 42 (09): 81-92.
- YIN Y, LI Z H, LI H, et al. High-Temperature Wear Resistance of Ultra-High-Speed Laser Cladding Cobalt-Based Coatings on the Surface of Cast Roll Sleeves [J]. *Journal of Welding Science*, 2021, 42(09): 81-92.
- [11] 丁清苗, 李瑶治, 王银娜. 扫描速度对 X90 钢表面激光熔覆哈氏合金 C276 涂层耐蚀耐磨性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2025, 54(2): 28-36.
- DING Q M, LI Y Z, WANG Y N. Effect of Scanning Speed on Corrosion and Wear Resistance of Laser Cladding Hastelloy C276 Coating on X90 Steel [J]. *thermal processing technology*, 2025, 54(2): 28-36.
- [12] 李坤, 房嘉辉, 廖若冰, 等. 高性能金属激光能量场表面热处理技术研究现状及展望[J]. *中国激光*, 2024, 51(04): 1-17.
- LI K, FANG J H, LIAO R B, et al. Research Status and Prospect of Surface Heat Treatment Technology for High Performance Metal Laser Energy Field [J]. *Chinese Lasers*, 2024, 51(04): 1-17.
- [13] 齐泓钧, 坚永鑫, 陈子晗, 等. 超高速激光熔覆技术及其耐磨蚀涂层材料研究进展[J]. *热加工工艺*, 2024, 53(16): 1-8.
- QI H J, JIAN Y X, CHEN Z H, et al. Research progress of ultra-high-speed laser cladding technology and its wear-resistant coating materials [J]. *Thermal working technology*, 2024, 53(16): 1-8.
- [14] 陈月明, 肖华强, 林波, 等. 激光熔覆 Ti3V2Nb 基轻质高熵合金涂层耐磨性能的研究[J]. *激光技术*, 2024, 48(06): 891-899.
- CHEN Y M, XIAO H Q, LIN B, et al. Study on Wear Resistance of Laser Cladding Ti3V2Nb-based Lightweight High Entropy Alloy Coatings [J]. *Laser Technology*, 2024, 48(06): 891-899.
- [15] 李振岗, 王海燕, 张建勋. 表面改性技术在石油钻采设备零部件中的应用[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(22): 27-31.
- LI Z G, WANG H Y, ZHANG J X. Application of surface modification technology in oil drilling and production equipment parts [J]. *Thermal Processing Technology*, 2018, 47(22): 27-31.
- [16] Shi R, Khairallah S A, Roehling T T, et al. Microstructural control in metal laser powder bed fusion additive manufacturing using laser beam shaping strategy [J]. *Acta Materialia*, 2020, 184: 284-305.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>