

牵引销铸钢缺陷的激光熔覆研究

刘芳,郭子铭,尚纯,陆兴

(大连交通大学 材料科学与工程学院,辽宁 大连 116028)

摘要:以牵引销用铸钢(25号钢)为基体,利用激光熔覆技术熔覆奥氏体不锈钢涂层,采用光学显微镜、扫描和透射电镜、X射线衍射仪对熔覆层的组织和结构进行分析和表征,利用显微硬度计和磨损试验机对其硬度和磨损性能进行测试。结果表明:奥氏体不锈钢熔覆层由等轴晶、树枝晶和平面晶组成,热影响区由马氏体和索氏体组成。熔覆层树枝晶内为 γ 相,树枝晶间由 γ 相和碳化物 Cr_3C_2 构成。显微硬度自熔覆层—热影响区—基体,依次递减为 $310\text{ HV}_{0.1}$ — $280\text{ HV}_{0.1}$ — $170\text{ HV}_{0.1}$ 。25号钢基体为黏着磨损和磨料磨损,熔覆层为磨料磨损;磨损1 h后熔覆层的耐磨性能是25号钢基体的2倍。

关键词:激光熔覆;铸钢;显微组织;磨损性能

文献标识码:A **DOI:**10.13291/j.cnki.djdxac.2024.01.015

牵引销作为电力机车牵引装置中重要组成部分,在机车运行过程中承受牵引杆体的摩擦和冲击作用。某公司生产的和谐电3C型电力机车(HXD3C)的牵引销材质是ZG230-450(25号钢),铸造过程中,在其近表面处常产生零星的砂眼、气孔等缺陷^[1],易使牵引销在未达到服役寿命的情况下失效,因此需要对其近表面处缺陷进行局部修复。

激光熔覆层因其优异的耐磨性、耐蚀性、抗高温氧化性、抗疲劳等优点^[2-4],使得激光熔覆技术得到了快速发展^[5]。与传统的堆焊技术(如弧焊和热喷涂)相比^[6-8],激光熔覆可以产生更好的涂层,如致密的微观结构^[9]、高耐磨性^[10-11]、低稀释率与与基材冶金结合的特性,该技术成为零部件表面修复和改性的重要方法。

本文以25号钢为基体,采用激光熔覆技术制备了奥氏体不锈钢涂层,并对涂层组织结构、显微硬度和磨损性能进行了分析和测试。

1 实验方法

实验基材为25号钢,预先用砂纸磨制表面进行除锈。以奥氏体不锈钢粉末为激光熔覆材料,

其粒径范围为 $50\sim 100\ \mu\text{m}$,奥氏体不锈钢粉末的微观形貌见图1。其化学成分(质量分数)如下: C为0.02%、Si为0.82%、Mn为1.68%、Mo为0.08%、Cr为19.34%、Ni为9.97%、Fe为68.09%。

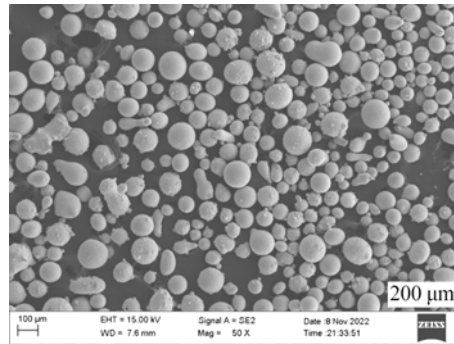


图1 奥氏体不锈钢粉末的微观形貌

激光熔覆实验前将奥氏体不锈钢粉未经干燥箱 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 充分干燥1 h。为了最大限度模拟牵引销近表面处砂眼的缺陷特征,激光熔覆前对25号钢表面进行机械挖孔处理,孔径为4 mm,孔深为0.5 mm。

本文使用YLS-6000光纤激光器,采用同轴

收稿日期:2023-02-22

基金项目:大连市科技创新基金项目(2021JJ11CG008)

第一作者:刘芳(1978—),女,副教授。E-mail:sonialf@126.com

通信作者:郭子铭(1997—),男,硕士研究生。E-mail:1779289691@qq.com

送粉法进行激光熔覆。优化后工艺参数:负离焦量为 30 mm,光斑直径为 3 mm,单道激光熔覆实验时激光功率为 2 600 W,扫描速率为 6 mm/s,送粉率为 18.9 g/min;多道单层激光熔覆实验时激光功率为 2 500 W,扫描速率为 6 mm/s,搭接率为 40%,送粉率为 18.9 g/min。

利用 Leica DMI8 A 型光学显微镜、荷兰帕纳科 Empyrean X-射线衍射仪、Zeiss Supra 55 型场发射扫描电子显微镜和 JEM 2100F 透射电子显微镜对涂层的组织和结构进行分析和表征。

采用型号为 HV-1000B 的显微硬度计测试基体与熔覆层的硬度,加载时间为 15 s,实验载荷为 100 g。沿纵向熔覆层厚度方向从涂层表面开始测试至 25 号钢基体处,纵向同一厚度处横向测试 3 点硬度,并取其平均值。

磨损实验采用 UMT TriboLab 摩擦磨损测试仪,磨球为直径 5 mm 的 GCr15 材料,磨球硬度为 62 HRC,磨损载荷为 100 N,磨球往复距离为 6 mm,往复速率为 4 mm/s。用电子天平分别称出基体和涂层磨损前后的质量。

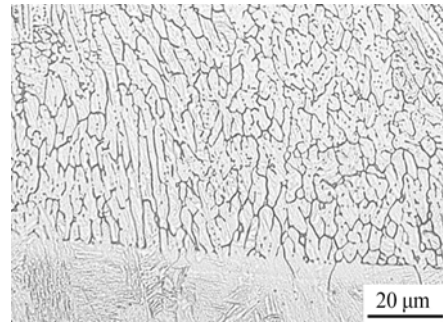
2 实验结果与讨论

2.1 显微组织分析

图 2 为熔覆层(CL)组织的扫描电镜图像。在激光熔覆过程中,激光束是一个能量分布不均匀的高斯热源。在加热和冷却过程中,不同的加热和冷却速率会导致每个区域的组织形态不同。根据凝固理论,固液界面稳定性(G/R)因子决定了熔覆层组织的生长形态,其中 G 为温度梯度, R 为凝固速率。从熔覆层上部与底部的显微组织可以看出,熔覆层上部主要由等轴晶和树枝晶组成,熔覆层底部主要由单一粗大的柱状晶组成,其生长方向基本垂直于熔合线,这是因为在熔覆的过程中垂直于熔合线的方向散热更快,熔合线区域的组织由平面晶组成。



(a) 上部



(b) 底部

图 2 熔覆层显微组织

图 3 为单道熔覆试样热影响区显微组织,由于各个位置在熔覆过程中经历的最高温度不同,其组织结构也有所差异,可分为淬火区和正火区。淬火区由片状马氏体组成,熔覆过程中,靠近熔池的基材快速升温至 A_{c1} 以上奥氏体化,随后又快速冷却形成片状马氏体。正火区组织与基材组织基本相同,只是相对于基体组织,正火区组织为更细小的索氏体。

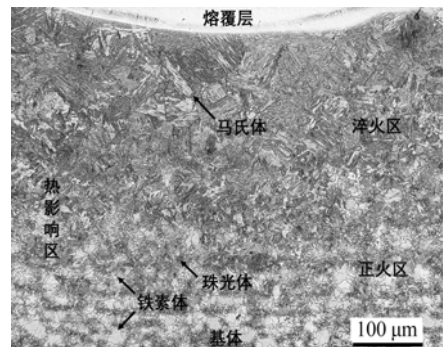


图 3 试样热影响区显微组织

2.2 X 射线衍射分析

熔覆层的 XRD 衍射图谱见图 4,由图 4 可见,奥氏体不锈钢熔覆层由单一的奥氏体(γ)相组成,无其他衍射峰出现。

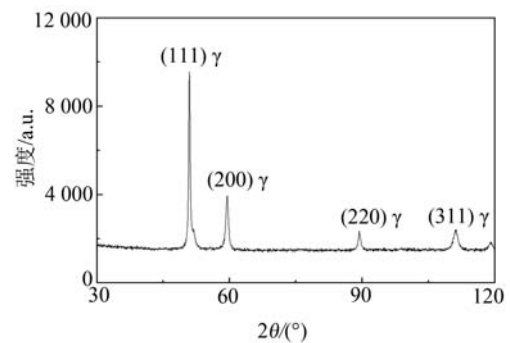
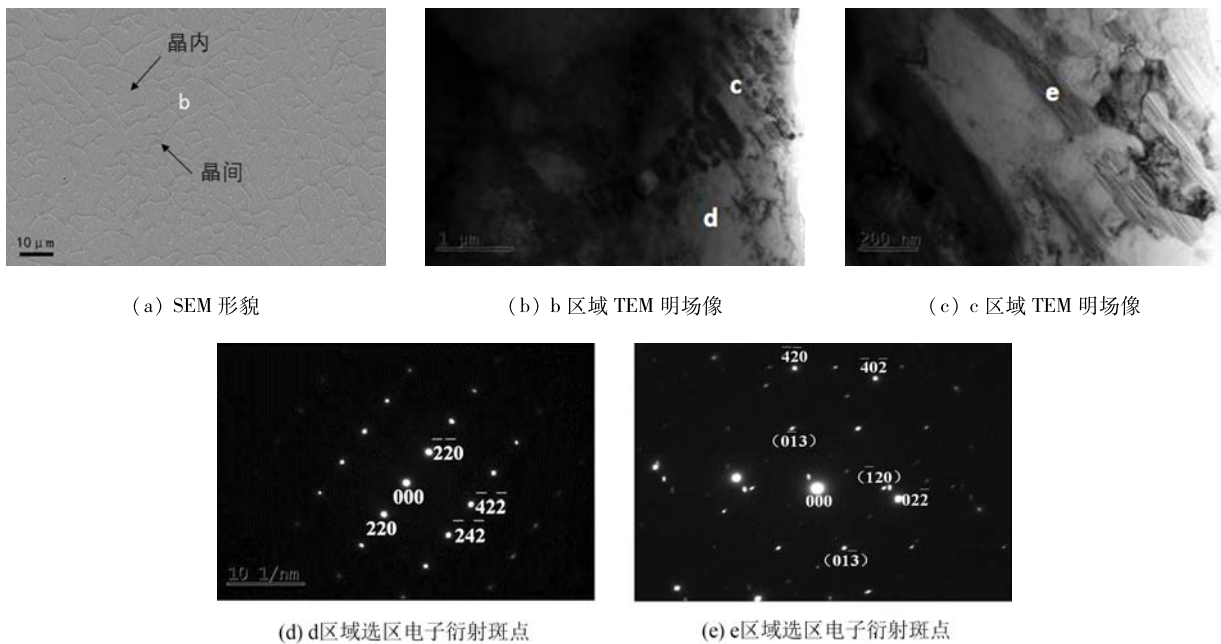


图 4 熔覆层的 XRD 衍射谱

2.3 熔覆层 TEM 分析

图5为奥氏体不锈钢熔覆层显微组织及选区衍射斑点。其中图5(a)为熔覆层显微组织的扫描电镜照片;图5(b)、图5(c)分别为b和c区域的透射电镜明场像;图5(d)、图5(e)给出了d(枝晶内)和e区域(枝晶间)选区电子衍射斑点。图5(a)中树枝晶内组织在透射电镜下呈现为白色基体,其对应的图5(d)衍射斑点为FCC结构的晶带轴为 $[113]$ 的 γ 相,这与图4中XRD衍射

结果相吻合。对图5(e)组合斑点进行标定,确定其条状组织为正交晶系的 Cr_3C_2 (晶带轴为 $[631]$),周围白色基体为面心立方晶系的 γ 相(晶带轴为 $[122]$)。这说明激光熔覆奥氏体不锈钢粉末时,先从液相中析出了 γ 相,然后发生了共晶反应,形成了 γ 相和碳化铬片层相间的共晶组织。由于上述X射线分析的是熔覆层表层,极有可能是表层位置碳化物的含量低于5%,所以未显示出有 Cr_3C_2 的存在。



(a) SEM 形貌

(b) b 区域 TEM 明场像

(c) c 区域 TEM 明场像

(d) d 区域选区电子衍射斑点

(e) e 区域选区电子衍射斑点

图5 熔覆层微观组织形貌与选区衍射斑点

2.4 显微硬度分布

图6为熔覆层至25号钢基体的显微硬度曲线,从图6可以看出,自熔覆层—热影响区—基体其硬度呈现逐渐降低的变化趋势。从图中也可以看出,最上层由于其温度处于粉末熔点的临界值,导致粉末附着在熔池表面未完全熔透,显微硬度略有波动;随着距离的增大,熔覆层质量趋于稳

定,最大显微硬度值为 $314 \text{HV}_{0.1}$,显微硬度稳定在 $310 \text{HV}_{0.1}$ 左右。

激光熔覆过程中,热影响区各位置所经历的最高温度不同,奥氏体化的程度也有所不同,接近熔合线的热影响区淬火区在熔覆过程中温度高于液相线,在快速冷却后得到了强度较高的马氏体组织,使其显微硬度维持在 $280 \text{HV}_{0.1}$ 左右。随着表面距离的增大,马氏体组织的占比逐步降低。到达热影响区正火区,其组织主要为细小的铁素体与索氏体,随着深度的增大,熔覆后冷却速率逐渐变慢,其显微硬度也逐步稳定的下降至25号钢基体的硬度,即 $170 \text{HV}_{0.1}$ 。

2.5 摩擦磨损实验分析

图7为基体与奥氏体不锈钢激光熔覆层在干摩擦条件下的质量磨损随时间的变化曲线。在同等磨损时间下,熔覆层的磨损失重始终比基体少,且随着磨损时间的增大,二者的差距也越来越大,

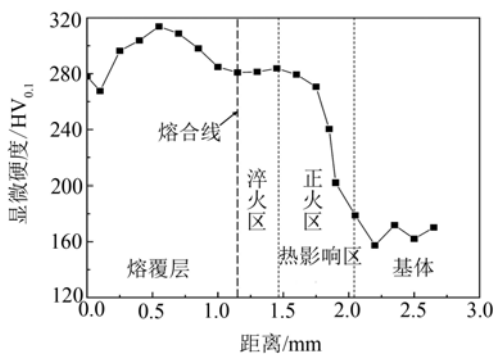


图6 熔覆层的显微硬度曲线

在磨损 30 min 后基体的磨损失重约为熔覆层的 1.5 倍;在磨损 1 h 后基体的磨损失重约为熔覆层的 2 倍。这说明激光熔覆奥氏体不锈钢涂层后,耐磨性能显著提高。

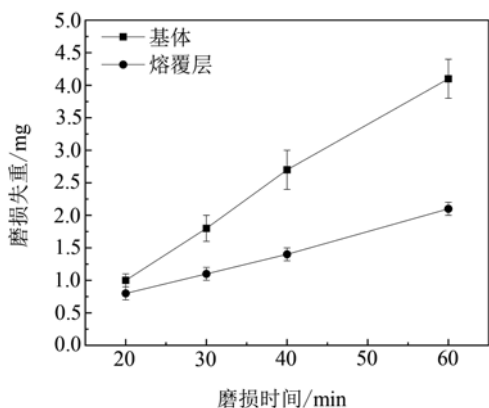
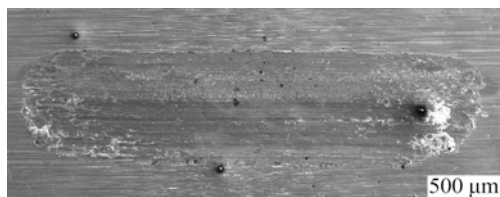


图 7 25 号钢基体与奥氏体不锈钢熔覆层失重曲线

按照磨损机理可以将磨损分为疲劳磨损、冲蚀磨损、黏着磨损、磨料磨损等。一般来说,磨损行为往往是某一种机理起主要作用,多种机理同时进行的。图 8 分别为基体与奥氏体不锈钢熔覆层磨损 1 h 后的磨损形貌。从图 8 可以看出,基体材料磨损后的犁沟较深且有一定程度的塑性变形,边缘部位黏着现象比较明显,是典型的黏着磨损和磨料磨损特征,这是因为基体硬度较低,在磨损过程中出现剥落坑。奥氏体不锈钢熔覆层的磨痕较浅,有少量脱落痕迹,主要为磨料磨损,这是由于激光熔覆快速冷却使奥氏体不锈钢熔覆层组织变细,在磨损过程中起到了支撑和连接耐磨增强相的作用,熔覆层中韧性较好的 γ 相和硬质相 Cr_3C_2 联合作用,提高了其耐磨性能。



(a) 基体



(b) 奥氏体不锈钢熔覆层

图 8 磨损 1 h 后的扫描电镜形貌

3 结论

(1) 奥氏体不锈钢熔覆层由等轴晶、树枝晶和平面晶组成,热影响区由马氏体和索氏体组成。熔覆层树枝晶内为 γ 相,树枝晶间由 γ 相和碳化物 Cr_3C_2 构成。

(2) 显微硬度自熔覆层—热影响区—基体,逐渐递减为 $310 \text{ HV}_{0.1}$ — $280 \text{ HV}_{0.1}$ — $170 \text{ HV}_{0.1}$ 。

(3) 25 号钢基体为黏着磨损和磨料磨损,熔覆层为磨料磨损。磨损 1 h 后基体的磨损失重约为熔覆层的 2 倍,即奥氏体不锈钢熔覆层的耐磨性能是 25 号钢基体的 2 倍。

参考文献:

- [1] 王雪峰,付海昌,张逸纯. 牵引销铸造工艺改进[J]. 铸造技术,2018,39(6):1248-1249.
- [2] 王国林,杨文华. 挂舵臂超厚铸钢件裂纹修复工艺和应用[J]. 金属加工(热加工),2021(4):24-27.
- [3] 李丽丹. 承受动载荷铸钢设备裂纹焊接修复技术[J]. 设备管理与维修,2020(2):104-105.
- [4] 王新华,张嗣伟,王德国. 石油钻机盘式刹车副材料的摩擦磨损性能研究[J]. 润滑与密封,2007(12):5-8.
- [5] LIU Y N, DING Y, YANG L J, et al. Research and progress of laser cladding on engineering alloys: a review[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 66: 341-363.
- [6] MATEOS J, CUETOS J M, VIJANDE R. Tribological properties of plasma sprayed and laser remelted 75/25 $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}$ coatings [J]. Tribology International, 2001, 34(5): 345-351.
- [7] 宋志坤,何庆复,谢基龙. 镍基热喷涂层对列车车轮铸钢抗制动热疲劳损伤作用机制探讨[J]. 北京交通大学学报,2006(4):86-88.
- [8] KIM C, YOO H, JEON J Y, et al. Study on improvement of surface properties of low carbon steel using laser cladding[J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2021, 66(4): 1033-1036.
- [9] GRUM J, ŽNIDARŠIČ M. Microstructure, microhardness, and residual Stress analysis of laser surface cladding of low-carbon steel[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2004, 19(2): 243-258.
- [10] 陆萍萍,王勇,韩彬,等. 深井钻机刹车盘激光熔覆铁基涂层的组织与摩擦磨损性能[J]. 中国表面工程, 2010,23(1):92-96.
- [11] 李聪玮,刘泽,王明,等. 铁基激光熔覆层的微观结构和摩擦磨损性能研究[J]. 矿冶工程,2021,41(5):149-152.

(下转第 119 页)