

激光熔覆铁基耐磨涂层的制备及摩擦学性能研究

王成, 王伟*, 丁士杰, 官鹏辉, 高原

西安建筑科技大学冶金工程学院, 陕西 西安 710055

摘要 采用激光熔覆技术在煤矿机械用 27SiMn 钢表面制备了 Fe 基涂层, 通过金相显微镜、扫描电子显微镜 (SEM)、三维共聚焦表面形貌仪、显微硬度仪和摩擦磨损试验机等对其显微组织与摩擦学性能进行分析。结果表明: 激光熔覆 Fe 基涂层的主要物相组成为 α -Fe 相和 (Fe-Cr) 固溶体相; 显微组织主要为枝晶状组织, 且组织致密均匀, 无明显裂纹等缺陷。涂层与基体之间具有良好的冶金结合, 截面显微硬度呈梯度变化, 涂层的平均硬度约为基体的 2.1 倍。基体的平均摩擦系数为 0.3344, 磨损率为 $70.8 \times 10^{-7} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, 磨损机理主要为黏着磨损和磨粒磨损; 涂层的平均摩擦系数为 0.3265, 磨损率为 $1.634 \times 10^{-7} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, 磨损机理主要为磨粒磨损。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 显微组织; 显微硬度; 摩擦学性能

中图分类号 TG174.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.2202011

1 引言

煤炭作为我国主要的消耗能源, 在冶金、电力、化工等领域中有着不可替代的作用^[1]。在煤炭开采作业中, 主要的煤矿机械设备有采煤机、掘进机、刮板输送机和液压支架, 统称“三机一架”^[2]。煤矿机械设备在高速、重载、振动、冲击等苛刻工况下长时间运行易发生磨损失效, 严重缩短设备使用寿命, 影响煤炭开采作业的正常进行^[3]。在易磨损的零部件表面制备耐磨涂层, 是解决煤矿机械设备磨损失效问题的最经济有效的方法之一^[4]。目前, 在煤矿机械设备表面制备耐磨涂层的主要技术有激光熔覆^[5]、电镀^[6]、等离子喷涂^[7]、堆焊^[8]等。与其他制备耐磨涂层的技术相比, 激光熔覆技术具有加热速度快、基材热影响区域小、工件热变形小等优点^[9], 且制备的涂层晶粒细小、组织致密、稀释率低, 涂层与基体结合强度高, 可有效提高工件表面硬度与耐磨性能^[10-13]。因此, 激光熔覆技术在煤矿机械生产、维修与再制造等领域中具有广阔的应用前景。

针对煤矿机械设备的磨损失效问题, 诸多学者在不同的煤矿机械上采用激光熔覆技术制备涂层并进行了大量研究。贾贤赏等^[14]在液压支柱钢表面采用激光熔覆技术制备了不同碳含量的不锈钢熔覆层, 并对其显微组织结构、耐磨及耐腐蚀性能进行了研究。结果表明: 随着碳元素含量的增加, 熔覆层的硬度和耐磨性能提高, 但耐腐蚀性能降低。郭卫等^[15]采用激光熔覆技术在液压支架立柱 27SiMn 钢表面上制备了铁基

合金熔覆层, 分析了熔覆层的显微组织、显微硬度及耐磨性能。结果表明: 在定载荷情况下, 随着摩擦速度的增大, 熔覆层的磨损率先增大后减小。Luo 等^[16]采用 CO_2 激光熔覆技术在煤矿刮板机溜槽板上制备了复合梯度功能涂层。结果表明: 该涂层具有较高的硬度和耐磨性, 可满足煤矿行业恶劣工作环境下机械零件或设备的使用要求。目前, 激光熔覆技术中常用的熔覆材料有陶瓷基、镍基、钴基和铁基等^[17]。孙琳等^[18]在 TC21 钛合金表面上, 采用陶瓷粉末 SiC 颗粒, 通过激光熔覆技术制备了复合涂层。结果表明: 添加微米 SiC 颗粒的熔覆层表面硬度和耐磨性分别为基体的 2.1 倍和 2.082 倍, 而添加纳米 SiC 颗粒的熔覆层表面硬度和耐磨性分别为基体的 2.4 倍和 1.475 倍。胡登文等^[19]使用 Ni 基合金粉末, 通过激光熔覆技术, 在 Q960E 钢表面上制备了 Ni 基 WC 耐磨涂层。结果表明: Ni-WC 熔覆层的抗磨粒磨损性能是 Q960E 基材的 6 倍以上, 能够有效提高 Q960E 钢的抗磨粒磨损性能。崔宸等^[20]采用 Co 基合金粉末, 在 42CrMo 钢表面制备了 Stellite-6 钴基激光熔覆层。结果表明: 未经热处理的熔覆层的摩擦系数为 0.42, 磨损主要表现为塑性变形、犁沟及脆性剥落; 热处理后, 熔覆层的摩擦系数降至 0.29, 磨损机理主要为磨粒磨损和黏着磨损。陈菊芳等^[21]采用铁基合金粉末, 在 45 钢表面制备了 Fe901 激光熔覆层。结果表明: 熔覆层的平均硬度为 718 HV, 显著高于基体的硬度; 45 钢的磨损机制主要为磨粒磨损、疲劳剥落和氧化磨损, 熔覆层的磨损机制主要为磨粒磨损。在这些粉末材料中, 陶瓷粉末

收稿日期: 2021-12-28; 修回日期: 2022-01-18; 录用日期: 2022-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(51975450)

通信作者: *gackmol@163.com

与金属合金粉末相比,热导率、线膨胀系数等性能差异较大,熔点相对较高,在激光熔覆过程中会产生较大的热应力,从而加剧了熔覆层中裂纹与孔洞等缺陷的形成^[22]。镍基和钴基合金粉末虽具有优异的耐磨、耐腐蚀性能和高温抗氧化性能,但其价格昂贵,在煤矿机械设备中难以推广应用^[23]。铁基合金粉末来源广泛、成本低且耐磨性能好,与基材成分相近,更容易与基体形成冶金结合,基体与涂层之间的界面结合牢固,而且加工过程中应力小,不易产生裂纹等缺陷,适合大批量工业生产,在煤矿机械设备修复与再制造领域中具有潜在的研究价值^[24-26]。因此,开展激光熔覆铁基涂层的摩擦学性能研究,对提高煤矿设备使用寿命、降低设备修复与再制造成本及推广铁基合金粉末的应用具有重要意义。

表 1 27SiMn 钢的化学成分

Table 1 Chemical compositions of 27SiMn steel

Element	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	Fe
Mass fraction / %	0.24-0.32	1.10-1.40	1.10-1.40	≤0.03	≤0.03	≤0.30	≤0.30	≤0.30	≤0.10	Bal.

表 2 铁基合金粉末的化学成分

Table 2 Chemical compositions of Fe-based alloy powder

Element	Cr	C	Ni	Mo	Si	Nb	Mn	V	Fe
Mass fraction / %	19.97	0.19	2.35	1.68	0.41	0.43	0.28	0.07	74.62

图 1 为铁基合金粉末的微观形貌、粒径分布和 X 射线衍射仪 (XRD) 物相图谱。如图 1 (a) 所示,粉末为球形颗粒,表面较为光滑。球形粉末的比表面积小、流动性好、各向受热均匀,所以在激光熔覆过程中,不易堵塞激光枪头,可以均匀地熔覆在基体表面上^[27]。图 1 (b) 所示为铁基合金粉末的高倍形貌,可以看出,球形粉末颗粒饱满,表面光滑,呈规则的球形结构。该结构可降低颗粒间的内聚力和摩擦力,增强粉末的流动性,进一步提升激光熔覆涂层的质量^[28]。图 1 (c) 所示为激光粒度仪对铁基合金粉末的检测结果,粉末的粒径为 45~270 μm,其粒径主要分布在 80~150 μm 范围内且呈高斯分布^[29]。根据 XRD 物相分析,如图 1 (d) 所示,铁基合金粉末主要由 (Fe-Cr)、(Fe, Ni)、(Fe-Cr-Ni) 固溶体以及体心立方 α-Fe 组成。

2.2 激光熔覆涂层的制备

利用激光熔覆设备在 27SiMn 钢基体表面上对铁基合金粉末进行熔覆,送粉方式采用同轴送粉,并用氮气作为保护气体。具体熔覆工艺参数为:光斑尺寸 15 mm×2 mm,激光功率 3000 W,扫描速度 6 mm/s,搭接率 45%,送粉速度 30 g/min。

2.3 显微组织及硬度测试

在激光熔覆后,沿垂直于涂层的方向取显微组织和摩擦试验试样。用砂纸打磨金相试样,进行机械抛光,采用 1.0 mL HF+1.5 mL HCl+2.5 mL HNO₃+

本文以煤矿机械设备常用的 27SiMn 钢为基体,以流动性好、耐磨性强的铁基合金粉末作为激光熔覆材料,研究了激光熔覆铁基涂层的显微组织及摩擦学性能。研究结果为铁基合金粉末在煤矿机械设备修复与再制造领域中的推广应用提供了理论依据。

2 试验材料及方法

2.1 原始材料

基体材料采用调质处理后的 27SiMn 钢(尺寸为 150 mm×100 mm×15 mm),化学成分如表 1 所示。激光熔覆粉末采用球形铁基合金粉末,化学成分如表 2 所示。试验前使用丙酮和无水乙醇对基体材料进行超声清洗,并将铁基合金粉末置于真空干燥箱中,在 70 °C 环境下干燥 2 h。

95 mL H₂O 腐蚀剂腐蚀 20 s。通过金相显微镜 (OM) 和带有能谱分析仪 (EDS) 的场发射扫描电子显微镜 (SEM) 观察其显微组织变化。采用 XRD 分析铁基合金粉末和涂层的物相组成,扫描角度为 20°~90°,步长为 0.02°。使用维氏显微硬度计测量显微硬度的变化,从涂层到基体,竖直方向上每间隔 100 μm 测试一次,载荷设置为 200 g,保压时间为 10 s。为了减小测量误差,每个取点位置沿水平方向测量三次,测量位置之间相隔 1 mm,取平均值作为显微硬度值的测量结果。

2.4 摩擦试验

使用球盘摩擦磨损试验机进行室温摩擦试验,试验前将基体和涂层试样用无水乙醇超声清洗 20 min。摩擦试验采用 GCr15 球为对磨材料,载荷为 15 N,旋转速度为 200 r/min,旋转半径为 3.00 mm,试验时间为 30 min。试验结束后利用扫描电镜对磨痕的形貌和成分进行分析,利用三维共聚焦表面形貌仪确定试样的磨损体积、磨损宽度及磨损深度。磨损率的计算公式为

$$W_r = \frac{V}{F \cdot D}, \quad (1)$$

式中:V 为磨损体积(mm³);F 为施加载荷(N);D 为滑动距离(m),表达式为

$$D = \omega \times 2\pi r \times t, \quad (2)$$

式中:ω 为转速(r/min);r 为旋转半径(m);t 为时间(min)。

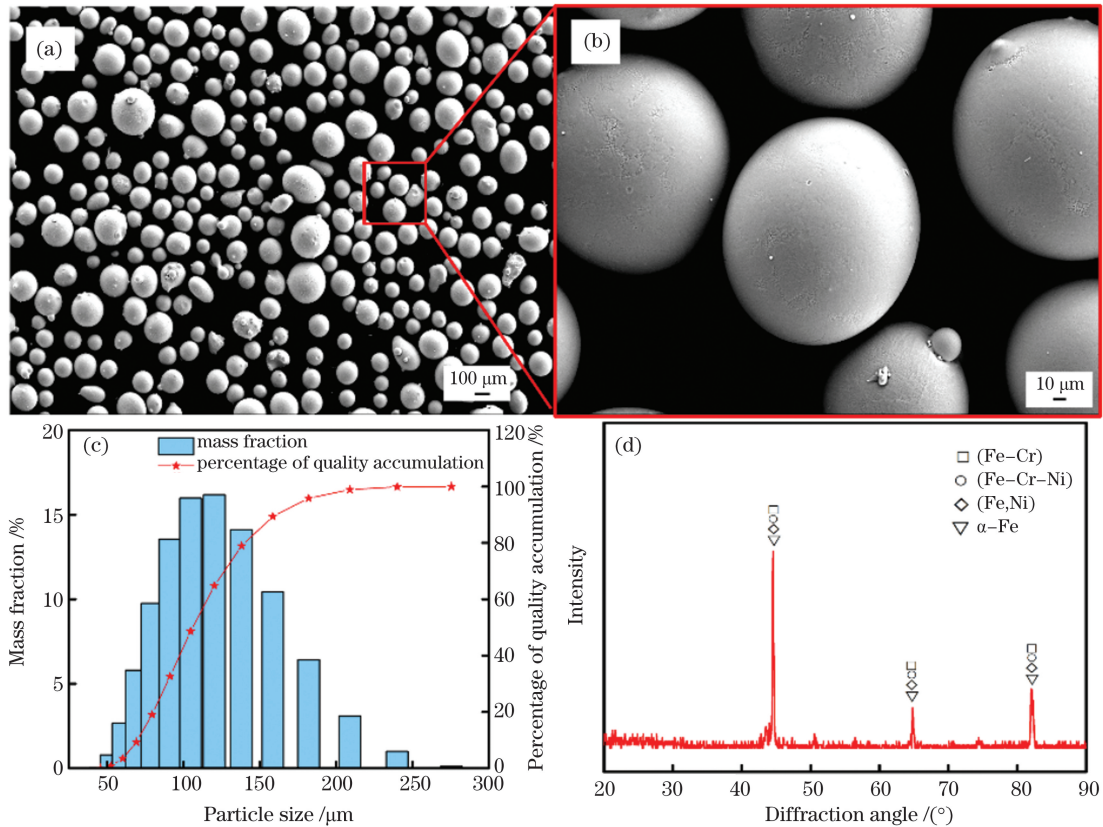


图 1 铁基合金粉末性能。(a) 粉末微观形貌;(b) 粉末微观形貌的放大图;(c) 粒径分布;(d) XRD 图

Fig. 1 Properties of Fe-based alloy powder. (a) Micro-morphology of powder; (b) magnified view of powder morphology; (c) particle size distribution; (d) XRD pattern

3 试验结果与讨论

3.1 涂层的显微组织与物相分析

图 2 (a) 为涂层表面的金相显微组织图, 涂层表面无裂纹、气孔等缺陷, 金相组织均匀, 晶粒尺寸相对较小, 涂层表面组织主要为均匀的枝晶状组织。这是由于在激光熔覆过程中, 当高能激光束通过基体表面时, 合金粉末迅速熔化, 形成熔池; 当激光束离开熔池时, 熔池金属开始凝固^[30]。而涂层表面直接与外部空气接触, 冷却速度快, 凝固速度大, 成分过冷度大, 促使涂层表面形成细小的枝晶状组织^[31]。激光熔覆后截面的组织形貌如图 2 (b) 所示, 根据凝固理论, 固液界面的温度梯度(G)和凝固速率(R)的比值决定了凝固组

织的生长形态。在涂层与基体的结合区域, 由于熔液与基体保持接触, 此时熔液的凝固速率几乎为 0, G/R 的值最大, 因此易形成胞状晶^[32]。此时固液界面以低速平界面的形式生长, 最终在熔池与基体的结合部出现无微观偏析的组织区域, 即“白亮带”。这条“白亮带”是铁基合金粉末与基体材料在激光束作用下互相扩散而形成的固溶结合层, 可以较大程度地提高涂层与基材的结合强度, 它的出现表示涂层与基体已形成了良好的冶金结合^[33]。随着凝固的进行, 温度梯度与凝固速率的比值开始减小, 同时成分过冷区的存在破坏了稳定性, 生成了枝晶状组织^[34]。在涂层上部, 冷却速度较快, 形成了平行于结合带的等轴晶。

图 3 为涂层表面的 EDS 元素分布图, 枝晶上的

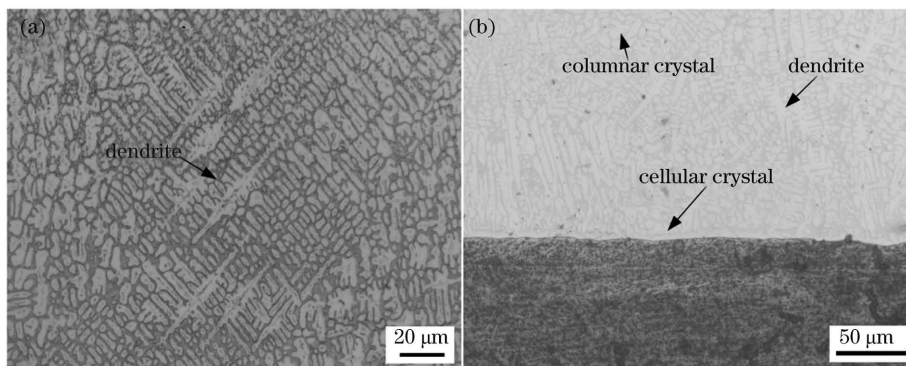


图 2 激光熔覆涂层的微观组织。(a) 表面;(b) 截面

Fig. 2 Microstructures of laser cladding coating. (a) Surface; (b) cross section

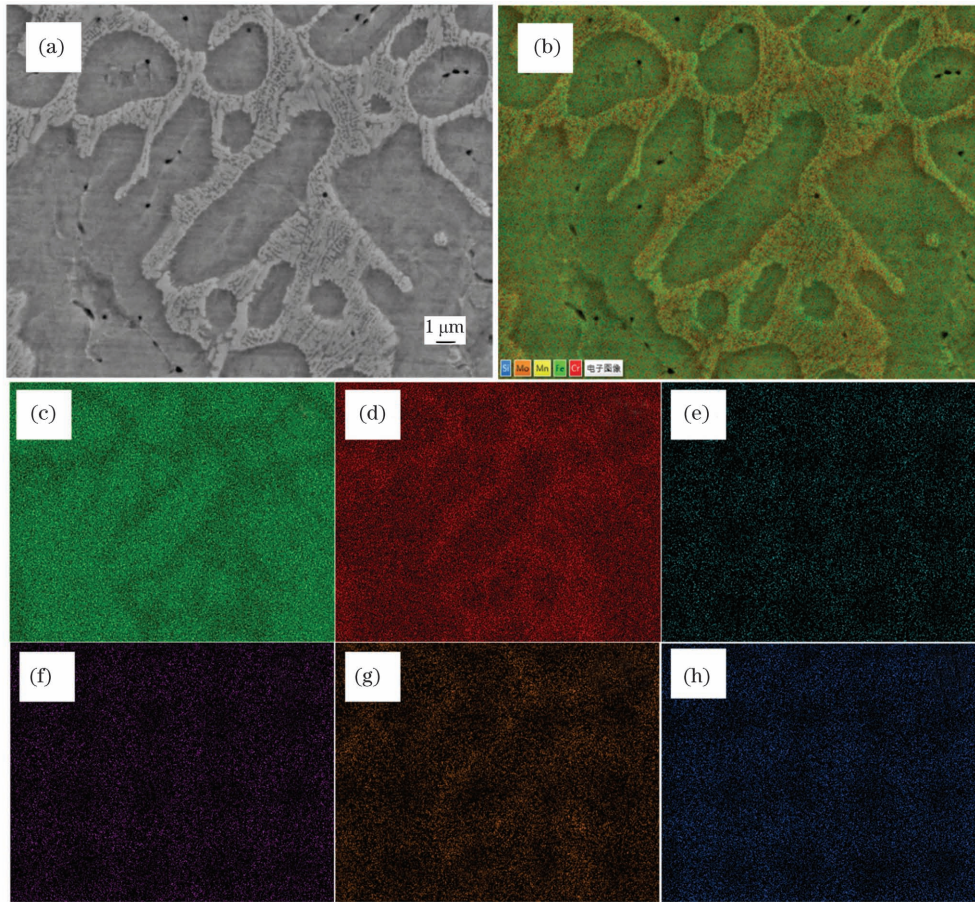


图 3 激光熔覆涂层表面 EDS 元素分布图。(a) 涂层表面的放大图；(b) 扫描区域；(c) Fe、(d)Cr、(e)C、(f)Ni、(g)Mo、(h)Si 元素的分布

Fig. 3 EDS element distributions on surface of laser cladding coating. (a) Magnified view of coating surface; (b) scanning area; distributions of (c) Fe, (d)Cr, (e)C, (f)Ni, (g)Mo, and (h)Si elements

Fe 元素含量低,枝晶上和枝晶内的元素分布不一,枝晶上的 Cr、Mo 元素富集,Fe 元素主要分布在枝晶内。根据元素面扫描结果可知,在激光熔覆过程中,由于冷

却速度过快,元素来不及均匀扩散,因此凝固后成分不均匀,这与成分偏析有关^[35]。涂层表面的元素含量如表 3 所示。

表 3 激光熔覆涂层表面的元素分布

Table 3 Element distributions on laser cladding surface

Element	Fe	Cr	C	Ni	Mo	Mn	Si	Nb
Mass fraction /%	69.49	17.89	7.66	2.11	1.20	0.47	0.82	0.36

图 4 为激光熔覆结合界面处的 EDS 线扫描图,可以看出,主要存在 Fe、Cr、Ni、Si、C 五种元素,其中 C 元素均匀分布于基体和涂层中,涂层和基体结合区中的 Fe 元素和 Cr 元素变化明显,说明 Fe、Cr 元素发生了扩散。涂层中的 Cr 元素含量比基体高,Cr 元素向基体发生扩散,而基体中的 Fe 元素含量比涂层高,Fe 元素向涂层发生了扩散。Ni、Si 元素的含量相对较少,涂层中的 Ni、Si 元素比基体高,说明 Ni、Si 元素向基体发生了扩散。在激光熔覆过程中,激光束的作用使铁基合金粉末和基体发生熔化,元素会由高浓度区域向低浓度区域扩散,从而促进了涂层与基体之间的冶金结合^[36]。

铁基涂层的 XRD 分析结果如图 5 所示。根据 X

射线衍射峰,结合 Jade PDF 卡片分析可得,涂层由体心立方 α -Fe 和 (Fe-Cr) 固溶体组成。由于 Cr 在 Fe 中的溶解度很大,且 Cr 和 Fe 可以形成无限的固溶体^[37],因此涂层主要由体心立方的 α -Fe 以及 Fe 和 Cr 的固溶体组成。

3.2 涂层硬度

从激光熔覆涂层表面到基体的一定距离范围内的显微硬度测试结果如图 6 所示。为了保证测量的准确性,每组数据均重复测试三次后取平均值。其中,涂层区域的平均显微硬度为 (652.62 ± 49.00) HV,热影响区(HAZ)与基体的平均显微硬度分别为 (515.29 ± 82.00) HV 和 (292.68 ± 19.00) HV,涂层的平均硬度约为基体的 2.1 倍。试样的显微硬度呈梯度变化,在

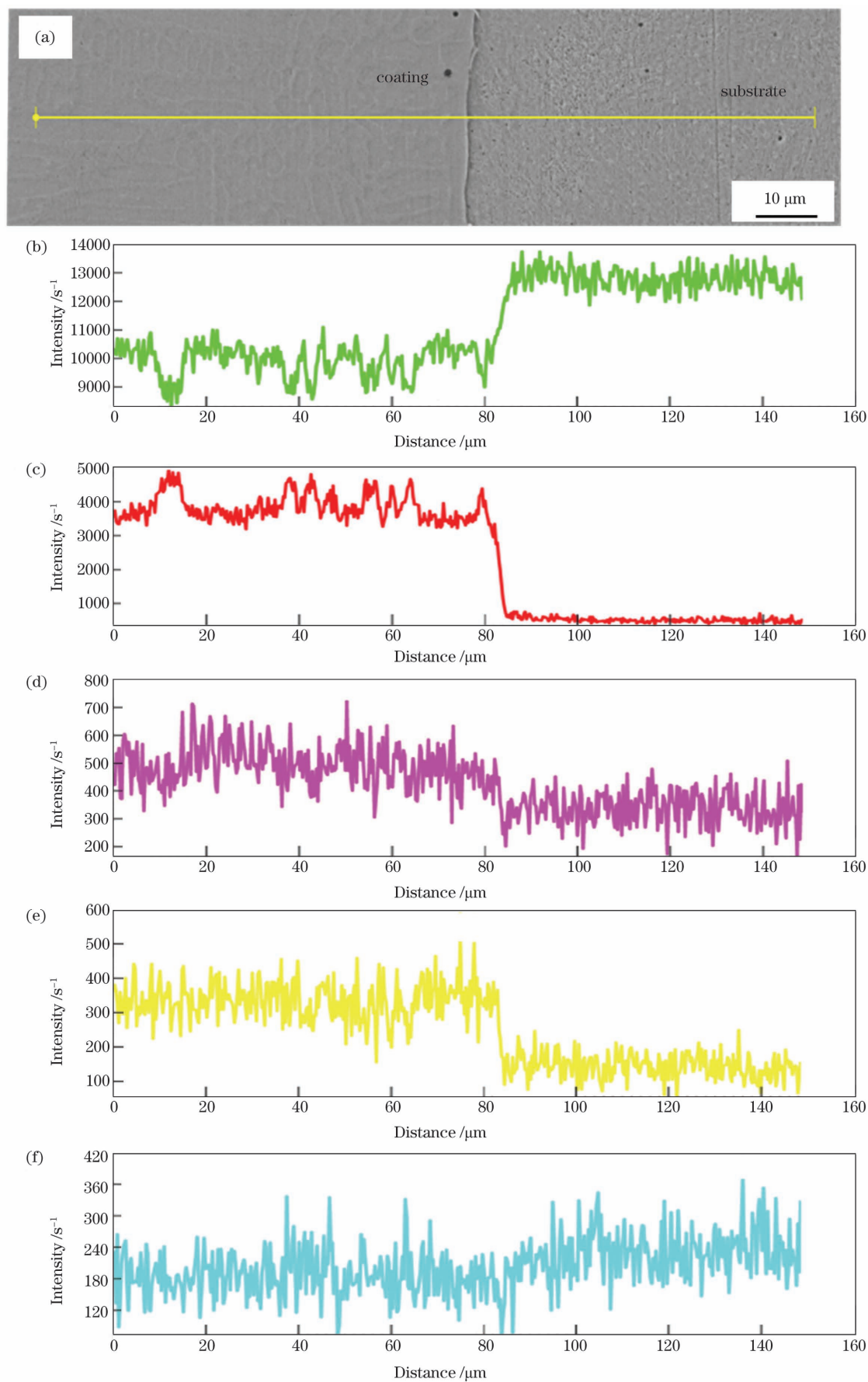


图 4 激光熔覆结合界面处的 EDS 线扫描图。(a)扫描区域;(b) Fe、(c)Cr、(d)Si、(e)Ni、(f)C 元素的分布

Fig. 4 EDS line scanning image at laser cladding bonding interface. (a) Scanning area; distributions of (b) Fe, (c)Cr, (d)Si, (e)Ni, and (f)C elements

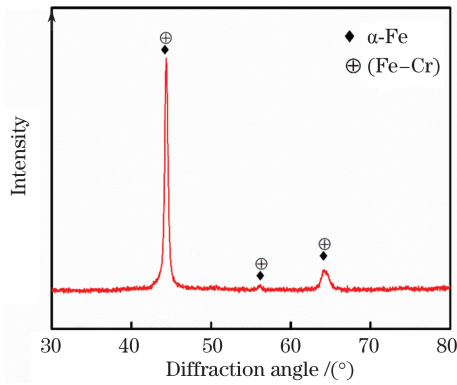


图 5 铁基涂层的 X 射线衍射图

Fig. 5 X-ray diffraction pattern of Fe-based coating

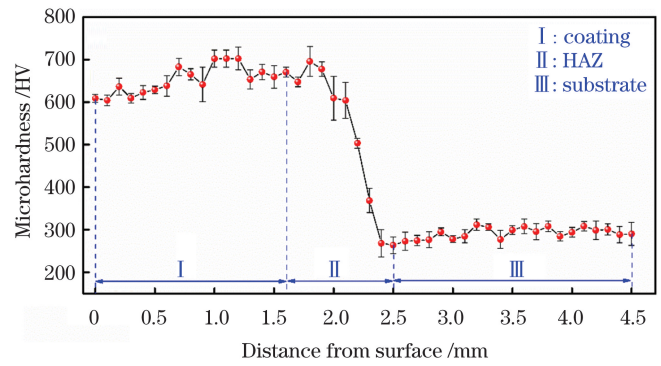


图 6 涂层和基体的显微硬度

Fig. 6 Microhardnesses of coating and substrate

热影响区出现急剧降低。这是因为在激光熔覆过程中,激光束高温辐射的影响导致基体与涂层之间的元素扩散稀释,离基体较远的区域,元素无法及时扩散,因此与基体结合处的硬度发生显著降低^[38]。显微硬度在涂层区域呈现出一定的波动(603.9 ~ 702.1 HV),这主要与涂层顶部至底部的显微组织变化有关。由于表面过冷度较大,形核较快,因此涂层顶部区域的显微组织呈现出细小的等轴晶[图 2(b)],硬度相对较高。根据凝固组织结晶参数 G/R 可知,在靠近熔池的内部区域,传热速度慢,成分过冷度大,因此靠近热影响区附近出现细小的胞状晶和枝晶状组织,导致硬度有所降低。热影响区前端硬度呈现下降的趋势,这是因为在激光熔覆过程中,激光高温辐射的影响导致基体与涂层之间的元素相互扩散稀释,所以热影响区硬度略有下降,基体与热影响区的结合带区域的硬度略有上升^[39]。

3.3 摩擦学性能分析

图 7 (a)为铁基合金基体和涂层的摩擦系数,基体和涂层的平均摩擦系数分别为 0.3344 和 0.3265,二者平均摩擦系数相差不大,但基体的摩擦曲线波动较大,最大摩擦系数为 0.4666,而涂层的最大摩擦系数为 0.4055。摩擦过程可分为两个阶段:初始磨损阶段和稳定磨损阶段。基体和涂层的摩擦系数曲线在 0~3 min 时呈线性增加。这是因为在初始磨损阶段,摩

擦副之间的接触实际上是微凸体接触,接触面积小、应力大,微凸体被挤压、剪切,产生大量磨粒,对接触面产生“犁削”作用,因此摩擦系数迅速增大^[40]。随着时间的增加,在表面微凸体被磨平后,逐渐进入稳定磨损阶段,摩擦曲线相对稳定。相较而言,基体的摩擦曲线波动较大,这是由于在摩擦过程中磨损严重,产生大量磨粒,因此基体表面粗糙度增加,影响摩擦系数的波动。摩擦系数是摩擦力与垂直载荷的比值,主要由表面粗糙度、载荷、滑动速度、温度、摩擦副材料等因素决定^[41]。基体和涂层均为铁基材料,主要元素为 Fe,且基体和涂层的表面在摩擦试验前经相同的工艺(打磨和抛光)处理,基体和涂层具有相同的初始粗糙度,因此基体与涂层的稳定摩擦系数变化不大。通过三维共聚焦表面形貌仪分析可知,基体和涂层的磨损体积分别为 $120 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$ 和 $2.77 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$ (表 4)。根据式(1)可得,涂层的磨损率为 $1.634 \times 10^{-7} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$,基体的磨损率为 $70.8 \times 10^{-7} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。涂层和基体的元素成分有所差异,且钢中添加的 Cr、Nb、Mo 元素易形成碳化物,能提高材料的耐磨性能^[42]。相关磨损理论^[43]指出,材料的耐磨性与其显微硬度成正比。基体硬度低,在摩擦试验过程中更容易造成表面脱落,涂层的平均硬度为基体的 2.1 倍,在摩擦过程中涂层不会造成大面积的磨损。另外,激光熔覆后的涂层组织中存在固溶体和硬质相,试样表面具有较

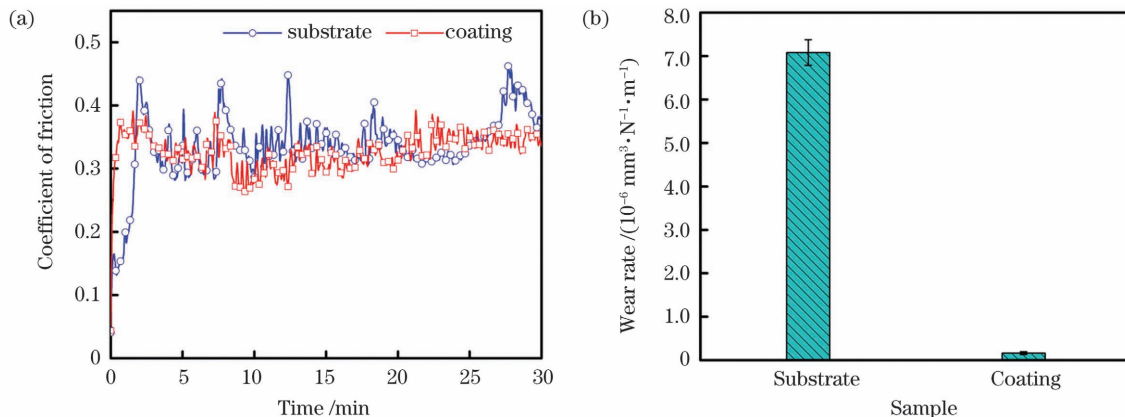


图 7 基体和涂层的摩擦磨损试验结果。(a)摩擦系数;(b)磨损率

Fig. 7 Friction and wear test results of substrate and coating. (a) Coefficient of friction; (b) wear rate

高的硬度,所以激光熔覆涂层具有较好的抗磨损性能^[44]。涂层与基体的磨损率如图 7 (b)所示,基体的磨损率是激光熔覆涂层磨损率的 43 倍。由此可知,采用激光熔覆技术对煤矿机械设备进行表面强化后,表面耐磨性得到增强,设备的使用寿命得到有效延长。

为了进一步研究涂层和基体的磨损行为,测量了

试样表面磨痕的三维图像、磨痕宽度和磨痕深度,结果如图 8 所示。计算得到的磨损结果如表 4 所示。基体磨痕宽度为 0.870 mm,涂层磨痕宽度为 0.456 mm;基体磨损深度为 27.664 mm,涂层磨损深度为 1.41 mm;基体的磨损宽度和深度分别是涂层的 1.91 倍和 19.62 倍。结果表明,涂层耐磨性更好,对材料表面具有更好的保护效果。

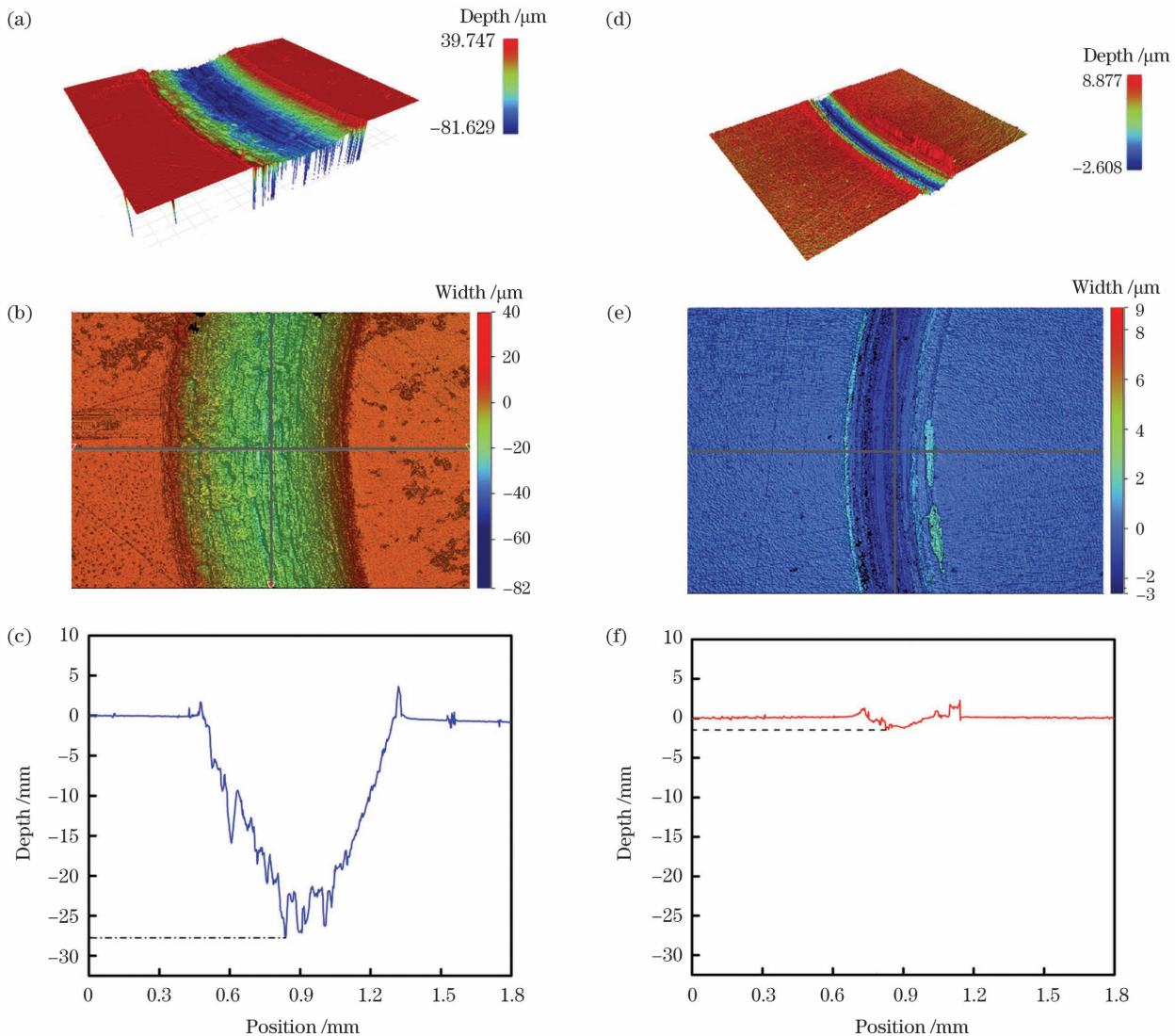


图 8 磨痕的测试结果。(a)基体三维图像;(b)基体的磨损宽度;(c)基体的磨损深度;(d)涂层的三维图像;(e)涂层的磨损宽度;(f)涂层的磨损深度

Fig. 8 Test results of wear tracks. (a) 3D image of substrate; (b) wear width of substrate; (c) wear depth of substrate; (d) 3D image of coating; (e) wear width of coating; (f) wear depth of coating

表 4 基体和涂层的磨损结果

Table 4 Wear results of substrate and coating

Sample	Width of wear track /mm	Depth of wear track /mm	Wear volume / mm ³	Wear rate / (mm ³ ·N ⁻¹ ·m ⁻¹)	Maximum coefficient of friction	Average coefficient of friction
Substrate	0.870	27.664	120.00×10 ⁻⁴	70.800×10 ⁻⁷	0.4666	0.3344
Coating	0.456	1.410	2.77×10 ⁻⁴	1.634×10 ⁻⁷	0.4055	0.3265

图 9 为涂层与基体的磨损形貌。基体的磨损较为严重,磨痕深度为 27.664 mm,磨痕中存在明显的剥离和局部分层。这是因为在摩擦过程中,基体与对磨

材料接触,表面接触区域的局部温度升高,硬度迅速降低,从而产生局部黏着。同时,磨损表面存在较深的犁沟,这是对磨面的硬凸起物和粗糙峰在摩擦过程中引

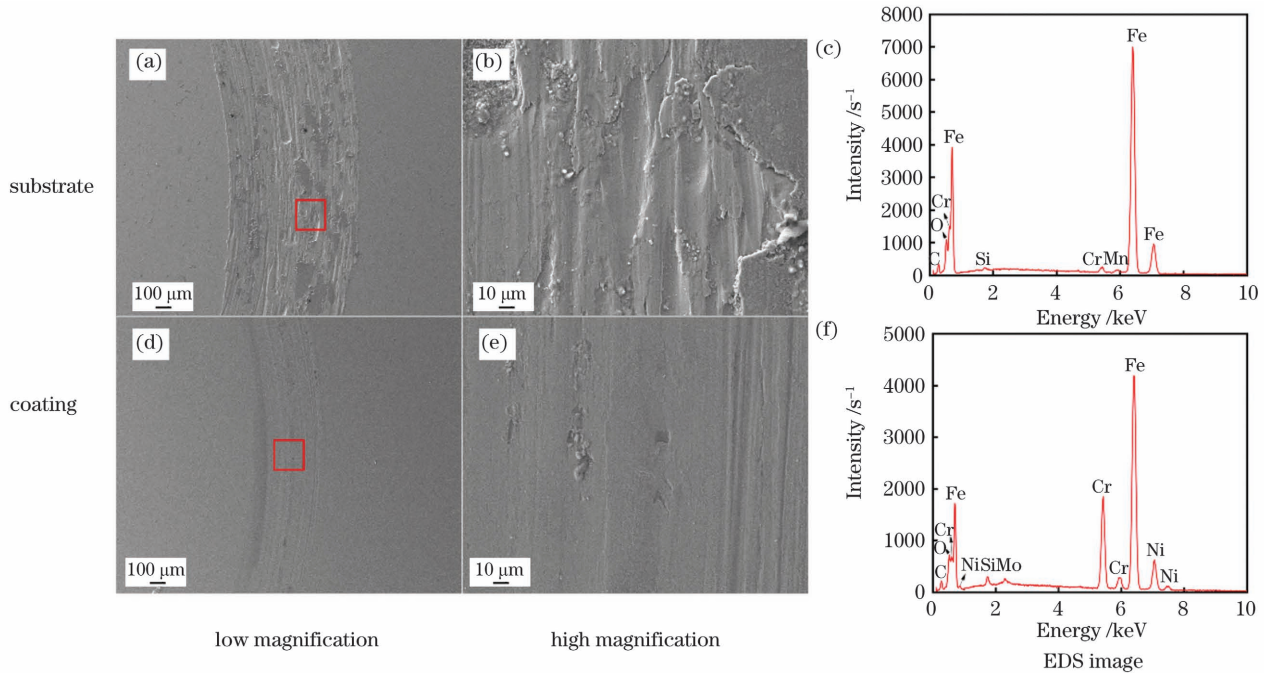


图 9 磨损形貌

Fig. 9 Wear morphologies

起的磨粒磨损结果^[45]。除此之外,在干摩擦过程中,磨屑在摩擦表面的堆积导致了严重磨损,因此磨损体积相对较大。涂层磨痕相对光滑,磨痕宽度和深度大幅度降低,磨损表面存在浅显的犁沟,无明显的剥离和局部分层。这是因为硬度越高,黏着的真实接触面积越小,发生黏着磨损的几率降低,产生的磨屑减少^[46]。根据 EDS 分析可得,大量氧元素富集在铁元素周围。在摩擦磨损过程中,由于接触界面的温度升高,大部分磨屑被氧化成铁的氧化物^[47],氧化物颗粒从磨痕中脱落,作为磨料颗粒嵌于接触区域的犁沟内。Li 等^[48]的研究结果表明,这是氧化磨损的一种表现。在涂层的能谱中,Cr 元素的强度较高,且出现了 Mo、Ni 元素,说明涂层的耐磨性与 Cr、Mo 和 Ni 元素的存在有关。有关文献^[49]指出,随着 Cr 元素的加入,合金中出现了明显的树枝晶。这是由于 Cr 元素起到了固溶强化的作用,且在摩擦磨损过程中,材料的抗塑性变形和抗压能力都有所提升,Cr 元素也起到抗磨作用。综上所述,基体的磨损机理是以黏着磨损和磨粒磨损为主,涂层的磨损机理主要为轻微的磨粒磨损,同时均伴有氧化磨损。这是因为涂层硬度远高于基体硬度,根据相关磨损理论^[43],材料硬度的提高也能进一步提高其耐磨性能,这与之前的硬度结果一致。

4 结 论

以煤矿机械设备常用的 27SiMn 钢为基体,以流动性好、耐磨性强的铁基合金粉末作为激光熔覆材料,采用激光熔覆技术,研究了激光熔覆铁基涂层的组织结构及摩擦学性能。结果表明:

1) 激光熔覆 Fe 基涂层的主要物相成分为 α -Fe 相

和 (Fe-Cr) 固溶体相,涂层表面主要由枝晶状组织构成,组织致密均匀,无明显裂纹等缺陷。

2) 截面的显微硬度呈梯度变化。涂层区的显微硬度为 603.9~702.1 HV,热影响区的显微硬度为 263.8~695.5 HV,基体的显微硬度为 273.2~311.6 HV。涂层的平均硬度为 (652.62 ± 49.00) HV,热影响区的平均硬度为 (515.29 ± 82.00) HV,基体的平均硬度为 (292.68 ± 19.00) HV,涂层的平均硬度约为基体的 2.1 倍。

3) 基体的平均摩擦系数为 0.3344,涂层的平均摩擦系数为 0.3265。基体的磨损率为 $70.8 \times 10^{-7} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$,涂层的磨损率为 $1.634 \times 10^{-7} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$,基体的磨损率是激光熔覆涂层磨损率的 43 倍。

4) 摩擦磨损过程中基体的磨损机理是以黏着磨损和磨粒磨损为主,涂层的磨损机理主要为磨粒磨损,基体和涂层均存在氧化磨损。

参 考 文 献

- [1] 张跃楠, 汤文博, 黎文强, 等. 液压支架立柱激光熔覆铁基合金涂层的研究[J]. 煤炭技术, 2020, 39(1): 174-176.
Zhang Y N, Tang W B, Li W Q, et al. Study of laser cladding of Fe-based alloy coating on hydraulic support column[J]. Coal Technology, 2020, 39(1): 174-176.
- [2] 黎文强, 马宗彬, 丁紫阳. 煤矿机械磨损失效及表面改性技术的研究[J]. 煤矿机械, 2017, 38(7): 114-116.
Li W Q, Ma Z B, Ding Z Y. Research on coal mine mechanical wear failure and surface modification technology[J]. Coal Mine Machinery, 2017, 38(7): 114-116.
- [3] 冯仕焱. 煤矿机械磨损失效与激光熔覆研究[J]. 煤炭与化工, 2015, 38(6): 67-69, 72.
Feng S Y. Study on wear failure form of coal mining machinery and laser cladding[J]. Coal and Chemical Industry, 2015, 38(6): 67-69, 72.
- [4] 曹振华. 煤矿机械磨损失效及表面改性技术研究[J]. 机械管理

- 开发, 2018, 33(7): 80-81.
- Cao Z H. Study on wear failure and surface modification technology of coal mine machinery[J]. Mechanical Management and Development, 2018, 33(7): 80-81.
- [5] 张天刚, 张倩, 庄怀风, 等. TC4 表面 Ti₂SC-Ti₂Ni 复合结构相的自润滑激光熔覆层组织与性能[J]. 光学学报, 2020, 40(11): 1114001.
- Zhang T G, Zhang Q, Zhuang H F, et al. Microstructure and properties of Ti₂SC-Ti₂Ni composite structural phase self-lubricating laser cladding layer on TC4 surface[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(11): 1114001.
- [6] 白永胜. 矿用活柱表面激光熔覆强化技术的研究[J]. 煤矿机械, 2020, 41(9): 66-68.
- Bai Y S. Study on laser cladding strengthening technology of mine movable column surface[J]. Coal Mine Machinery, 2020, 41(9): 66-68.
- [7] 程相榜, 孟贺超, 张自强. 液压千斤顶活塞杆用激光熔覆研究进展[J]. 表面技术, 2017, 46(6): 249-255.
- Cheng X B, Meng H C, Zhang Z Q. Laser cladding for piston rods of hydraulic jacks[J]. Surface Technology, 2017, 46(6): 249-255.
- [8] 王晶晨, 贾国平, 白冰, 等. 液压支架零部件防腐及再制造工艺研究进展[J]. 材料导报, 2015, 29(21): 112-117.
- Wang J C, Jia G P, Bai B, et al. Research progress on antiseptic and remanufacturing process of hydraulic support components[J]. Materials Review, 2015, 29(21): 112-117.
- [9] 周建忠, 何文渊, 徐家乐, 等. 激光熔覆 Al₂O₃/Fe901 复合涂层的强化机制及耐磨性[J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0514001.
- Zhou J Z, He W Y, Xu J L, et al. Strengthening mechanism and wear resistance of Al₂O₃/Fe901 composite coating prepared by laser cladding[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0514001.
- [10] 徐家乐, 周建忠, 谭文胜, 等. 电磁搅拌辅助激光熔覆钴基合金涂层的抗热腐蚀性能[J]. 光学学报, 2019, 39(1): 0114002.
- Xu J L, Zhou J Z, Tan W S, et al. Thermal corrosion resistance of co-based alloy coatings by laser cladding assisted by electromagnetic stirring[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(1): 0114002.
- [11] 董哲, 杨洗陈. 激光熔覆中球形粒子对激光散射强度的研究[J]. 光学学报, 2009, 29(5): 1296~1300.
- Dong Z, Yang X C. Research of scattering intensity with spherical particles in laser cladding[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(5): 1296-1300.
- [12] 杨洗陈, 栗丽, 张焯. 激光熔覆中同轴粉末流温度场的数值模拟[J]. 光学学报, 2009, 29(11): 3114~3120.
- Yang X C, Li L, Zhang Y. Numerical simulation of temperature field of coaxial powder flow in laser cladding[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(11): 3114-3120.
- [13] 杨杰, 胡凌云. 激光熔覆技术在煤矿机械中的应用[J]. 煤矿机械, 2019, 40(6): 136-137.
- Yang J, Hu L Y. Application of laser cladding technology in coal mine machinery[J]. Coal Mine Machinery, 2019, 40(6): 136-137.
- [14] 贾贤赏, 马尧, 王旭. 碳含量对激光熔覆马氏体不锈钢组织性能的影响研究[J]. 热喷涂技术, 2021, 13(1): 73-78.
- Jia X S, Ma Y, Wang X. Study on the effect of carbon content on the microstructure and properties of stainless steel laser cladding layer[J]. Thermal Spray Technology, 2021, 13(1): 73-78.
- [15] 郭卫, 李凯凯, 柴蓉霞, 等. 27SiMn 钢表面激光熔覆铁基合金组织和耐磨性分析[J]. 应用激光, 2018, 38(3): 351-357.
- Guo W, Li K K, Chai R X, et al. Analysis of microstructure and wear resistance of Fe-based alloy on 27SiMn steel surface by laser cladding[J]. Applied Laser, 2018, 38(3): 351-357.
- [16] Luo J, Gao J J, Gou S W, et al. Study on microstructure and mechanical properties of Ni60 + WC/Ni35/AISI1040 functional surface gradient structure of remanufacturing chute plate for the mining scraper by a low cost high power CO₂ laser cladding technique[J]. Materials Research Express, 2020, 7(8): 086521.
- [17] 姚燕生, 唐建平, 张亚超, 等. 非晶合金激光制造技术研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(2): 0202012.
- Yao Y S, Tang J P, Zhang Y C, et al. Development of laser fabrication technology for amorphous alloys[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(2): 0202012.
- [18] 孙琳, 位超群, 隋欣梦, 等. SiC 颗粒尺寸对 TiNi 基熔覆层组织与性能的影响[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0502002.
- Sun L, Wei C Q, Sui X M, et al. Effects of SiC particle size on microstructures and properties of TiNi based cladding layers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0502002.
- [19] 胡登文, 刘艳, 陈辉, 等. Q960E 钢激光熔覆 Ni 基 WC 涂层组织及性能[J]. 中国激光, 2021, 48(6): 0602120.
- Hu D W, Liu Y, Chen H, et al. Microstructure and properties of laser cladding Ni-based WC coating on Q960E steel[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(6): 0602120.
- [20] 崔宸, 武美萍, 夏思海. 热处理对 42CrMo 钢表面激光熔覆钴基涂层性能的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 0602011.
- Cui C, Wu M P, Xia S H. Effect of heat treatment on properties of laser cladding cobalt-based coating on 42CrMo steel surface[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0602011.
- [21] 陈菊芳, 李小平, 薛亚平. 45 钢表面激光熔覆 Fe901 合金的摩擦磨损性能[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0502001.
- Chen J F, Li X P, Xue Y P. Friction and wear properties of laser cladding Fe901 alloy coating on 45 steel surface[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0502001.
- [22] 李洪波, 高强强, 李康英, 等. 表面激光熔覆 H13/NiCr-Cr₃C₂ 复合粉末熔覆层性能研究[J]. 中国激光, 2021, 48(18): 1802017.
- Li H B, Gao Q Q, Li K Y, et al. Properties of surface laser cladding H13/NiCr-Cr₃C₂ composite powder cladding layer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(18): 1802017.
- [23] 李嘉宁. 激光熔覆技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
- Li J N. Laser cladding technology and its application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016.
- [24] 田玉亮, 李杰. Cr 含量对铁基激光熔覆层组织与性能的影响[J]. 矿冶, 2020, 29(6): 74-79.
- Tian Y L, Li J. Effect of Cr content on the structure and properties of Fe-based laser cladding layers[J]. Mining and Metallurgy, 2020, 29(6): 74-79.
- [25] 翟建华, 张苑麟, 许慧印, 等. 刮板输送机扁平链激光熔覆修复研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(4): 041402.
- Zhai J H, Zhang W L, Xu H Y, et al. Study on laser cladding repair of flat chain of scraper conveyor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(4): 041402.
- [26] 魏宏璞. 核阀密封面无钴铁基合金及激光涂层性能研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2010.
- Wei H P. Study on nuclear valve sealing surface co-free Fe-based alloys and properties of laser coating[D]. Suzhou: Soochow University, 2010.
- [27] 黄青, 王卫泽, 万雷, 等. 喷涂工艺参数对硅灰石涂层结构的影响[J]. 焊接学报, 2010, 31(3): 45-48, 115.
- Huang Q, Wang W Z, Wan L, et al. Effect of spray parameters on microstructure of plasma sprayed wollastonite coatings[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(3): 45-48, 115.
- [28] Fan L, Chen H Y, Dong Y H, et al. Corrosion behavior of Fe-based laser cladding coating in hydrochloric acid solutions[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(7): 1019-1030.
- [29] Shang F M, Chen S Y, Zhou L, et al. Effect of laser energy volume density on wear resistance and corrosion resistance of 30Cr15MoY alloy steel coating prepared by laser direct metal deposition[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 421: 127382.
- [30] 李时春, 莫彬, 肖罡, 等. 金属材料的激光增材制造微观组织结构特征及其影响因素[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(1):

0100007.
Li S C, Mo B, Xiao G, et al. Microstructure characteristics and their influence factors during laser additive manufacturing of metal materials[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(1): 0100007.
- [31] 李朝晖, 李美艳, 韩彬, 等. 高压柱塞高速激光熔覆镍基合金涂层组织和耐磨性[J]. 表面技术, 2020, 49(10): 45-54.
Li Z H, Li M Y, Han B, et al. High-pressure plunger high-speed laser cladding nickel-based alloy coating structure and wear resistance[J]. Surface Technology, 2020, 49(10): 45-54.
- [32] 黄蕾, 周建忠, 徐家乐, 等. H13 钢表面激光熔覆 NiCr/Cr₃C₂ 涂层组织及其摩擦学性能[J]. 应用激光, 2019, 39(4): 556-562.
Huang L, Zhou J Z, Xu J L, et al. Microstructure and tribological properties of laser cladding NiCr/Cr₃C₂ coating on H13 steel surface[J]. Applied Laser, 2019, 39(4): 556-562.
- [33] 丁阳喜, 殷小耀, 廖芳蓉, 等. 激光熔覆铁基合金粉末修复高速列车车轮磨损失效研究[J]. 粉末冶金技术, 2014, 32(3): 174-177.
Ding Y X, Yin X Y, Liao F R, et al. Research on repairing high-speed train wheel steel by laser cladding iron-based alloy powder[J]. Powder Metallurgy Technology, 2014, 32(3): 174-177.
- [34] 楼程华, 路远航, 骆芳, 等. Cr₁₂MoV 模具钢激光熔覆 Fe 基合金的组织与性能分析[J]. 应用激光, 2013, 33(1): 14-17.
Lou C H, Lu Y H, Luo F, et al. Microstructure and performance of laser cladding Fe-based alloy on Cr₁₂MoV steel[J]. Applied Laser, 2013, 33(1): 14-17.
- [35] 蔡擎, 陈文静, 陈晓男, 等. EA4T 钢表面激光熔覆 Fe-Cr-Ni 涂层的组织与性能[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2017, 36(2): 33-37.
Cai Q, Chen W J, Chen X N, et al. Microstructure and mechanical properties of Fe-Cr-Ni alloy cladding layer on EA4T steel by laser cladding[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2017, 36(2): 33-37.
- [36] Chen J L, Zhou Y J, Shi C, et al. Microscopic analysis and electrochemical behavior of Fe-based coating produced by laser cladding[J]. Metals, 2017, 7(10): 435.
- [37] 胡庚祥, 蔡珣, 戎咏华. 材料科学基础[M]. 3 版. 上海: 上海交通大学出版社, 2010.
Hu G X, Cai X, Rong Y H. Fundamentals of materials science[M]. 3rd ed. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2010.
- [38] 徐家乐, 谭文胜, 胡增荣, 等. 不同载荷下激光熔覆钴基合金涂层的摩擦学性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(7): 0714008.
Xu J L, Tan W S, Hu Z R, et al. Tribological properties of laser cladding co-based alloy coating under different loads[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(7): 0714008.
- [39] 吴鹏飞, 魏昕, 屈海艳, 等. Cr₁₂MoV 钢表面激光熔覆 Fe 基合金熔覆层组织与性能的研究[J]. 热加工工艺, 2022, 51(6): 99-102.
Wu P F, Wei X, Qu H Y, et al. Research on microstructure and performance of laser cladding Fe-based alloy coating on surface of Cr₁₂MoV steel[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(6): 99-102.
- [40] 李珂尧, 周健松, 王凌倩. B、Si 元素对激光熔覆 Fe-Cr-Mo-B-Si 非晶涂层的非晶形成能力及其摩擦学机理的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(8): 192-202.
Li K Y, Zhou J S, Wang L Q. Effect of B and Si elements on the amorphous formation ability and tribological mechanism of Fe-Cr-Mo-B-Si amorphous coatings by laser cladding[J]. Surface Technology, 2020, 49(8): 192-202.
- [41] 祁琦, 柴蓉霞, 张汉杰, 等. 转速对激光熔覆铁基合金耐磨性的影响[J]. 应用激光, 2020, 40(1): 50-55.
Qi Q, Chai R X, Zhang H J, et al. Effect of rotating speed on wear resistance of laser cladding iron base alloy[J]. Applied Laser, 2020, 40(1): 50-55.
- [42] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2008.
Wen S Z, Huang P. Principles of tribology [M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [43] Archard J F. Surface topography and tribology[J]. Tribology, 1974, 7(5): 213-220.
- [44] 慕鑫鹏, 王文健, 祝毅, 等. 两种激光熔覆涂层对轮轨材料磨损与损伤性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2020, 40(2): 225-233.
Mu X P, Wang W J, Zhu Y, et al. Effects of two laser cladding coatings on wear and damage properties of wheel/rail materials[J]. Tribology, 2020, 40(2): 225-233.
- [45] Zhang M, Luo S X, Liu S S, et al. Effect of molybdenum on the wear properties of (Ti, Mo)C-TiB₂-Mo₂B particles reinforced Fe-based laser cladding composite coatings [J]. Journal of Tribology, 2018, 140(5): 1-7.
- [46] 路昕. 42CrMo 钢表面激光熔覆 Fe-36Ni 因瓦合金熔覆层组织性能及其强化研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021.
Lu X. Study on microstructure and strengthening of Fe-36Ni invar alloy cladding coating by laser cladding on 42CrMo steel [D]. Qingdao: Qingdao Tehcnology University, 2021.
- [47] Fan L, Chen H Y, Dong Y H, et al. Wear and corrosion resistance of laser-cladded Fe-based composite coatings on AISI 4130 steel[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2018, 25(6): 716-728.
- [48] Li M Y, Wang Y, Han B, et al. Microstructure and properties of high chrome steel roller after laser surface melting [J]. Applied Surface Science, 2009, 255(17): 7574-7579.
- [49] 陈亚楠. Ni₃Al(Cr) 合金组织及滑动摩擦磨损性能的研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2018.
Chen Y N. Study on microstructure and sliding friction and wear properties of Ni₃Al (Cr) alloy [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2018.

Preparation and Tribological Properties of Fe-based Wear-Resistant Coating by Laser Cladding

Wang Cheng, Wang Wei^{*}, Ding Shijie, Gong Penghui, Gao Yuan

College of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China

Abstract

Objective The coal mine machinery and equipment are susceptible to wear failure and their service life is reduced because of the harsh working conditions, including high speed, heavy load, vibration, impact, and so on. Preparing wear-resistant coating on worn parts' surface is one of the most economical and efficient approaches to address the challenge of wear failure of coal mine machinery and equipment. The laser cladding technology has the benefits of fast heating speed,

small heat-affected zone of the substrate, small thermal deformation of the workpiece, fine grain size, compact microstructure and low dilution rate of the coating, and metallurgical bonding between the coating and the substrate, which can efficiently enhance the workpiece's surface hardness and wear resistance. Thus, the laser cladding technology has a broad use prospect in the field of coal mine machinery production, maintenance, and remanufacturing. The Fe-based alloy powder has exceptional qualities of low cost and excellent anti-wear properties, and it is always employed in the repair and remanufacturing applications of coal mine machinery and equipment. Thus, the microstructure and tribological properties of Fe-based coating fabricated using laser cladding technology on the 27SiMn steel surface are studied. This offers a theoretical basis for Fe-based alloy powder's application in the coal mine machinery and equipment.

Methods Fe-based alloy powder is produced on the surface of 27SiMn steel using the laser cladding equipment. The spot size, laser power, scanning speed, lap rate, and powder feeding rate are 15 mm×2 mm, 3000 W, 6 mm/s, 45%, and 30 g/min, respectively. The phase compositions and morphologies of the Fe-based alloy powder and coating are examined using an X-ray diffractometer (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). The changes in microhardness are measured using the hardness tester, and the substrate and coatings' tribological properties at room temperature are analyzed by the friction and wear tester .

Results and Discussions From the coating surface [Fig. 2a)], the dendrite is presented in the microstructure. The growth changes of the microstructure in the molten pool zone during laser cladding are presented in Fig. 2(b), and the cellular structures are generated in the bonding area between the coating and the substrate. The Cr and Mo elements are enriched around the grain boundary and the Fe element is presented in the grain (Fig. 3). From Fig. 4, the Fe and Cr elements are changed visibly in the bonding zone between the coating and the substrate. It implies that the Fe and Cr elements' mutual diffusion has happened. This element diffusion phenomenon demonstrates that the Fe-based alloy powder and substrate are melted during the process of laser cladding because of the laser beam's action. The coating's XRD analysis result is demonstrated in Fig. 5, and the coating comprises of the body-centered cubic α -Fe phase and (Fe-Cr) solid solution phase. The coating's microhardness is demonstrated in Fig. 6. The coating area's average microhardness is (652.62 ± 49.00) HV, and the average microhardnesses of the heat-affected zone and the substrate are (515.29 ± 82.00) HV and (292.68 ± 19.00) HV, respectively. The coating's average microhardness is about 2.1 times that of the substrate. In Fig. 7(a), the average friction coefficients of the coating and the substrate are 0.3265 and 0.3344, respectively. The wear volumes of the coating and the substrate are 2.77×10^{-4} mm³ and 1.2×10^{-2} mm³, respectively (Table 4 and Fig. 8). The wear rates of the coating and the substrate are demonstrated in Fig. 7(b). Compared with the substrate's wear rate, the coating's wear rate decreases by 97%. Figure 9 demonstrates the wear morphologies of the coating and the substrate. The substrate's wear is more serious, and the coating's wear track is relatively smooth.

Conclusions In this research, the microstructure and tribological properties of Fe-based coating fabricated using laser cladding technology on the 27SiMn steel surface are studied. The primary phases of laser cladding Fe-based coating contain the α -Fe phase and (Fe-Cr) solid solution phase. The coating surface microstructure is composed of dendrite structure, which is dense and uniform, without visible cracks or other defects. The cross-sectional microhardness shows a gradient change. The coating's average hardness is about 2.1 times that of the substrate. The substrate's wear rate is 70.8×10^{-7} mm³·N⁻¹·m⁻¹, and the coating's wear rate is 1.634×10^{-7} mm³·N⁻¹·m⁻¹. The wear mechanisms of the substrate are primarily adhesive wear and abrasive wear, while the coating's wear mechanisms are primarily abrasive wear, and oxidation wear exists in both the substrate and coating.

Key words laser technique; laser cladding; microstructure; microhardness; tribological properties