

激光与光电子学进展

高速激光熔覆和重熔复合技术制备铁基涂层的组织性能研究

张志虎¹, 孙文磊^{1*}, 黄勇², 刘金朵¹

¹新疆大学机械工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047;

²新疆工程学院机电工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830023

摘要 高速激光熔覆能大大提高熔覆效率,但高速激光熔覆层表面容易出现表面粗糙缺陷。采用高速激光熔覆和激光重熔混合工艺,可达到改善熔覆层表面质量、有效提升涂层性能的目的。在液压立柱材料 27SiMn 表面激光熔覆制备了 Fe90 不锈钢涂层,利用超景深显微镜、X 射线多晶衍射仪分别对熔覆层的表面形貌、微观组织结构、元素分布和物相构成进行了分析,通过硬度试验、耐磨损试验和电化学腐蚀试验对涂层的性能进行了验证。试验结果表明:涂层激光重熔后相比于重熔前表面粗糙度降低了 8.5%,涂层内部的微观组织更加细密均匀,没有相的消失和新相的出现,只是相的含量增加。在性能方面,重熔之后的硬度提高为基体的 2.6 倍,磨损失重降低 95%。采用激光重熔技术不仅改善了熔覆层表面质量,而且有效提升了涂层性能。

关键词 激光光学; 高速激光熔覆; 激光重熔; 表面形貌; 表面质量; 涂层性能

中图分类号 TN249;TG136

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2114009

Microstructures and Properties of Fe-Based Coating Prepared by High-Speed Laser Cladding and Remelting

Zhang Zhihu¹, Sun Wenlei^{1*}, Huang Yong², Liu Jinduo¹

¹School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830047, China;

²School of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi, Xinjiang 830023, China

Abstract Although high-speed laser cladding significantly enhances cladding efficiency, surface coarse defects easily occur on the high-speed cladding layer surfaces. The hybrid process of high-speed laser cladding and laser remelting can obviously improve the cladding layer surface quality. The Fe90 stainless steel coating was prepared on the surface of 27SiMn hydraulic column material by laser cladding. The surface morphology, microstructure, element distribution and phase composition of the cladding layer were analyzed by using the ultra depth of field microscope and X-ray polycrystalline diffractometer. The properties of the coating were verified by the hardness test, wear resistance test and electrochemical corrosion test. The experimental results show that the surface roughness of laser remelting coating is reduced by 8.5% compared with that before remelting, and the microstructure inside the coating is finer and uniform. There is not phase disappearance and new phase appearance, but the phase content increases. In

收稿日期: 2020-10-27; 修回日期: 2020-12-11; 录用日期: 2020-12-22

基金项目: 新疆维吾尔自治区克拉玛依市科技重大专项(2018ZD002B)、新疆维吾尔自治区自然科学基金(2017D01C062)、2019年度新疆维吾尔自治区高校科研计划(XJEDU2019Y064)

通信作者: *sunwenxj@163.com

terms of performance, the hardness after remelting is 2.6 times that of the substrate, the wear weight loss is reduced by 95%. The laser remelting technology improves the surface quality of the cladding layer and effectively improves the coating performance.

Key words laser optics; high-speed laser cladding; laser remelting; surface morphology; surface quality; coating properties

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 310.3915

1 引言

高速激光熔覆技术是近年来兴起的一种新型表面改性技术,通过改变激光与粉末流的交汇位置,在极高的扫描速度下形成的熔覆层具有成型质量良好、低稀释、高效率、高结合强度的特点,相比于传统的表面改性技术具有独特的优势^[1-2]。李俐群等^[3]利用超高速激光熔覆与常规激光熔覆分别制备了 431 不锈钢耐蚀涂层,对比可知,超高速激光熔覆涂层的整体组织更加均匀细密,涂层的性能也更加优异。娄艳丽等^[4]发现,在超高速激光熔覆下可形成超薄的合金涂层,通过改变粉末粒度大小、提高搭接率、改善基体形貌以及调整合适的激光重熔参数,可以有效地改善熔覆层的表面形貌,提高表面质量。Asghar 等^[5]在 LA43M 镁合金表面,利用超高速激光熔覆制备了 Ni60 硬质合金涂层,提升了材料表面力学性能,结果显示,涂层内部致密,无裂纹和气孔等缺陷,硬度提高为基体的 8 倍左右,基体的磨损失重为涂层的 6.5 倍,充分说明超高速激光熔覆制备的涂层性能具有极大的优势。激光重熔是利用大功率和高速激光对表面进行再一次熔化,一方面可以改善表面缺陷,另一方面还可以降低残余应力,防止裂纹产生,是目前应用最广的一种表面修复技术^[6]。Bo 等^[7]采用激光金属沉积和激光重熔的混合工艺制备了 316L 钢粉薄壁结构,发现激光重熔之后不仅晶粒尺寸细小且规则分布,而且重熔过程中形成的凝固组织有助于提高相邻层之间的物理结合性能,这种混合工艺明显提高了材料的抗拉强度、屈服强度和延伸率。Biswas 等^[8]采用激光重熔和激光熔炼两种不同的方法,对含碳化硅颗粒的

2024 铝合金进行了激光复合堆焊,详细分析了激光加工条件下复合层中覆层厚度、显微组织、相/织构、表面粗糙度和滑动磨损性能的变化。结果显示,重熔和超声振动辅助可显著改善熔覆层的厚度和显微组织(针状弹状硅相减少)。激光重熔可显著降低材料的磨损率。Chen 等^[9]对定向能沉积和激光重熔复合工艺制造的 361L 组件的组织与性能进行了分析研究,发现通过激光重熔,可以大幅度增加 δ 相,消除 σ 相,这在一定程度上提高了涂层的显微硬度和耐蚀性能,随着重熔功率的增加,涂层的表面质量和耐蚀性逐渐提高,但显微硬度有所下降。目前大多高速激光熔覆技术和激光重熔技术的研究只凸显了高速激光熔覆的优势,而对熔覆层表面粗糙缺陷问题的研究很少。激光重熔技术通过与传统修复技术的结合既能够消除涂层内部的缺陷,还能够进一步提高涂层的性能。本文利用高速激光熔覆和激光重熔混合工艺,在液压立柱材料 27SiMn 钢管表面制备了铁基不锈钢熔覆层,并对比分析了重熔前后的相组成、组织结构、元素分布规律及涂层的性能,在提高基体表面性能的同时验证了这种混合工艺的可行性。

2 试验材料及设备

试验基体材料为 27SiMn 钢管,尺寸为 120 mm×16 mm×300 mm,成分如表 1 所示。试验前首先对钢管表面进行机械打磨,然后对其表面进行除油除锈,之后用乙醇对其表面进行清洗,晾干。熔覆材料选用 Fe90 合金粉末,主要成分如表 2 所示,粉末颗粒尺寸为 75 μm ,使用前将粉末在 150 $^{\circ}\text{C}$ 环境下烘干处理 1.5 h。

表 1 27SiMn 钢成分

Table 1 Compositions of 27SiMn steel

Element	C	Si	Mn	V	Ni	Cu	S	P
Mass fraction / %	0.24-0.32	1.10-1.40	1.10-1.40	0.07-0.12	≤ 0.3	≤ 0.3	≤ 0.04	≤ 0.04

试验设备采用 ZKZM-X000W 高速熔覆光纤激光器,额定功率为 2 kW,光斑直径为 2.0 mm。保护

气体为氩气,在基材为 27SiMn 钢圆管的液压支架活塞杆试样表面进行多道激光熔覆处理。

表 2 Fe90 合金粉末成分

Table 2 Main chemical compositions of Fe90 alloy powder

Element	C	Si	Mo	Cr	B	Fe
Mass fraction / %	0.15	1.2	0.5	12.5	1.6	Bal.

熔覆后试样经过电火花线切割,被加工成尺寸为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 的块体,经过不同粗糙度的砂纸打磨之后再行抛光处理。试样一采用 HVS-1000A 显微硬度计进行硬度梯度检测。试样二用王水(HCl与HNO₃的体积比为3:1)进行腐蚀处理之后,利用 VHX-6000 超景深显微镜和 SUPRA55VP 扫描电子显微镜(SEM)观察熔覆层的宏观形貌与微观组织形貌。采用 X 射线能谱分析仪(EDS)、X 射线多晶衍射仪(XRD)对涂层的元素分布和物相进行测定。用 M-2000 磨损试验机对于重熔前后涂层的耐磨性能进行试验分析。高速激光熔覆和激光重熔的工艺参数如表 3 所示,其中 P 为激光功率, V_f 为送粉速度, V_s 为扫描速度, D 为搭接率。

表 3 试验工艺参数

Table 3 Process parameters for test

Process	P/W	$V_f /$ ($\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$)	$V_s /$ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	$D / \%$
High-speed laser cladding	1800	67	136	81
Remelting	1800	0	212	81

3 试验结果分析

3.1 宏观形貌分析

为了获得表面质量优异的熔覆层,分别用高速激光熔覆和高速激光熔覆+激光重熔的复合技术在基体表面制备 Fe90 不锈钢涂层。在较快的扫描

速度和超高的搭接率下,在基体表面形成了厚约 $83\text{ }\mu\text{m}$ 的涂层,熔覆后的试样表面如图 1 所示。图 2 是超景深显微镜下高速激光熔覆和激光重熔后的表面形貌图,其中图 2(a)是经过高速激光熔覆之后的熔覆层,表面粘附着半熔甚至未熔的粉末颗粒,形成凸起以及少量凹坑等缺陷,导致整体表面粗糙。这主要是由于在较高的扫描速度下,较低的热输入与粉末的不完全熔化加快了熔池的凝固速率,熔池的液相没有足够的时间进行扩散和流动,降低了熔池的润湿性。另外,根据激光能量密度 $E=P/(V_s d)$, (d 为光斑直径),当功率不变时,扫描速度越大,激光能量密度就越小,同时激光热源为高斯分布,能量分布不均匀导致部分粉末颗粒对激光能量的吸收不完全^[10],在熔池表面张力和润湿性的作用下,就会出现半熔甚至未熔的粉末颗粒粘附在熔覆层的表面,从而对熔覆层的表面形貌产生影响,此时高速激光熔覆层的表面粗糙度为 15.09。图 2(b)是熔覆层经过激光重熔之后的形貌,当激光辐射到熔覆层表面上时,熔覆层经历再一次的快速熔化和凝固的过程,出现了较薄的一层重熔层,在熔覆材料表面张力的作用下,表面的凸起、凹坑等缺陷基

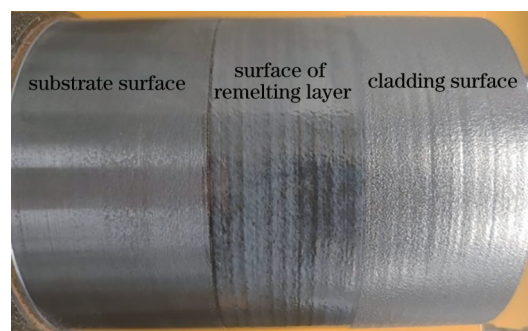


图 1 熔覆后试样的宏观表面形貌

Fig. 1 Macroscopic surface morphology of sample after cladding

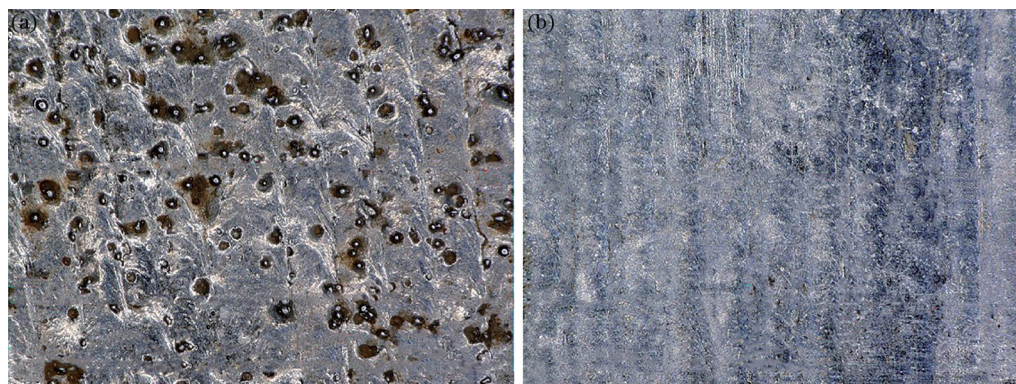


图 2 超景深显微镜下的表面形貌图。(a)高速激光熔覆表面;(b)激光重熔表面

Fig. 2 Surface topographies under ultra depth of field microscope. (a) High-speed laser cladding surface; (b) laser remelting surface

本消失,表面粗糙度为 13.83,相比于重熔前,下降了 8.5%,且无明显的宏观裂纹存在。

3.2 物相构成分析

图 3 是高速激光熔覆层重熔前后表面的 X 射线衍射分析图谱,可见熔覆层的相主要由 Fe、Cr 马氏体组织组成,并存在少量 Fe_3B 、 $\text{B}_{305.51}\text{Si}_{8.44}$ 、 Mo_2BC 等具有较高硬度的间隙化合物,这不仅能够增加熔覆层的硬度,还有利于提高熔覆层的耐磨性。熔覆层中弥散分布的 Mo 元素可以有效抑制网状化合物的形成,有利于降低熔覆层的脆性,因此减小熔覆层的开裂敏感性对防止裂纹的产生有积极地作用^[11]。而且激光重熔对涂层的物相组成并没有太大的影响,没有相的消失和新相的出现。只是经过激光重熔之后,衍射峰更加尖锐,且峰高变大,说明生成的相的含量增加,形成的晶粒更细小。

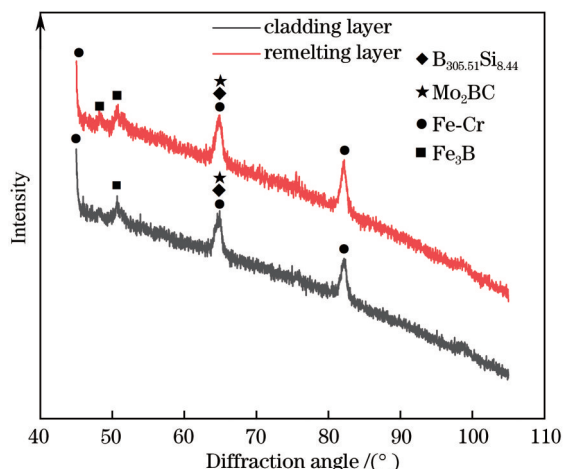


图 3 高速激光熔覆和重熔涂层表面的 XRD 分析

Fig. 3 XRD analysis of high-speed laser cladding and remelting layer surfaces

3.3 微观组织分析

图 4 是采用高速激光熔覆在基体表面制备的铁基不锈钢涂层的组织形貌图。在较快的扫描速度下,冷却速度增加,过冷度也增大^[12]。根据金属凝固原理,在较大的过冷度下,形核率明显高于晶核长大的速率。因此,单位时间内或者单位体积中形成的晶核的数量也就增多,从而抑制了晶粒的长大,获得的晶粒较细^[13],因此高速激光熔覆涂层的晶粒细密且分布均匀。图 4(a)展现了熔覆层试样截面的形貌,热影响区(HAZ)极小,且熔覆层无明显裂纹,但存在气孔等缺陷。本文针对熔覆层顶部、中部和底部及基体的结合区进行了微观组织的分析。结果如图 4(b)、(c)、(d)所示。凝固组织的

生长形态(晶粒的尺寸和生长方向)主要受温度梯度(G)与凝固速率(R)比值的影响^[14-15]。在激光熔覆初期,由于基体表面的温度过低,基体与熔覆层的结合界面的温度梯度最大,而凝固速率最小,因此 G/R 最大,底部与基体结合区主要以平面晶的形式生长。随着温度的升高,温度梯度变小,平面晶沿着垂直于结合区的方向逐渐转变为枝晶,并且尺寸较大。熔覆层中部区域由于热量散失慢而出现热量的累积,温度梯度减小,凝固速率逐渐增大,沿着散热的方向,晶粒呈现出连续外延生长的特性,由于散热方向的不一致,晶粒组织分布杂乱。在接近表面的位置,散热速率快,凝固速率加快,晶粒尺寸要比底部的更细小,并且生长方向比较纷乱无序。原因是熔池底部的晶粒继续向上生长,而熔池表面的晶粒却是非均匀形核和生长,而且沿着熔深方向生长。两种晶粒在长大过程中相互抑制,因此形成了比较细密且方向纷乱的组织。除此之外,高搭接率之下形成的熔池大部分落在前一道熔覆层,这相当于前一道经历了一次重熔,熔覆层的顶部容易形成比较细小的树枝晶组织。图 4(f)~(i)是经过重熔之后的重熔层截面形貌图。重熔层和熔覆层存在明显的分界,经过重熔之后,晶粒的尺寸明显更加细密,主要由较细较长的柱状枝晶组成,但是仍然有孔隙等缺陷存在,而形成此种缺陷的原因应归咎于熔覆材料中杂质颗粒的存在和熔覆速度过快导致的残留未熔颗粒团。当激光辐射至熔覆层表面时,由于重熔速度大于熔覆速度,因此只有熔覆层表面一层经历了二次熔化和凝固;在结合区同样由于温度梯度的影响,晶粒刚开始转变为粗大的枝晶,随着重熔过程的进行,晶粒在不同方向上发生细化和再结晶,晶粒开始了又一次的生长和成形。从重熔顶层到熔覆层,利用 EDS 线扫描能谱分析,发现 Fe、Cr 元素在重熔层和熔覆层分布均匀,并且涂层与基体之间仅在 $10\ \mu\text{m}$ 左右厚度范围内发生了扩散,如图 5 所示,稀释率达到 12%,这说明熔覆层与基体之间发生了良好的冶金结合。

3.4 硬度分析

图 6 是熔覆层在厚度方向上的硬度分布。基体、热影响区、熔覆层和重熔层的硬度呈阶梯分布,由图 6 可知,基体平均硬度在 265 HV 左右,合金涂层的平均硬度为 508 HV,激光重熔之后涂层的平均硬度达到了 695 HV 左右。通过高速激光熔覆,在 27SiMn 合金钢表面熔覆 Fe90 合金粉末,可以使得

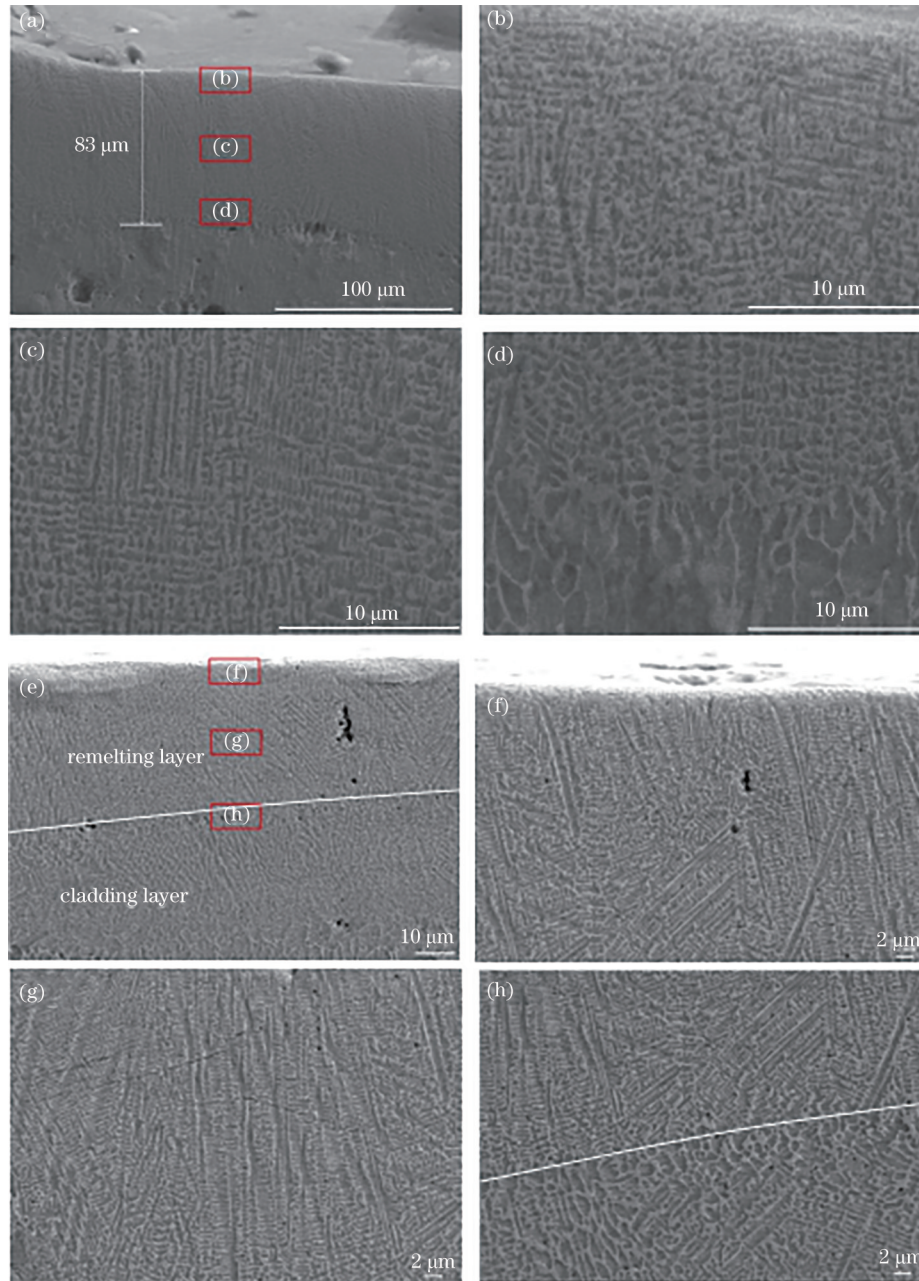


图 4 高速激光熔覆层和重熔层的微观组织结构。(a)熔覆层试样的截面;(b)熔覆层顶部区域;(c)熔覆层中部区域;(d)熔覆层底部区域;(e)重熔试样的截面;(f)重熔层顶部区域;(g)重熔层中部区域;(h)重熔层底部区域
 Fig. 4 Microstructures of high-speed laser cladding and remelting layers. (a) Cross-section of cladding layer; (b) top area of cladding layer; (c) middle area of cladding layer; (d) bottom area of cladding layer; (e) cross-section of remelting layer; (f) top area of remelting layer; (g) middle area of remelting layer; (h) bottom area of remelting layer

基体的表面硬度提高至原来的 1.9 倍,而重熔后的硬度可以提高至 2.6 倍,即通过高速激光熔覆和激光重熔工艺,制备的 Fe90 涂层能够显著提高基体的表面硬度。一方面,高速激光熔覆过程中的晶粒之间的高速撞击和快速凝固使得熔覆层的晶粒细化并产生晶格畸变,再加上细晶强化的作用,涂层组织更加致密均匀,硬度提升^[16-17]。另一方面,熔覆层不同位置的温度梯度和凝固速率都不一样,从底部到顶

部,熔覆层中的温度梯度逐渐减小,凝固速率逐渐增大,因此随着到熔覆层表面距离的增加,晶粒细化程度越大,硬度越高。经过激光重熔之后,熔覆层的晶粒更加细密,而晶粒尺寸更细小,晶粒分布的相对密度更大,晶粒的细化有利于晶粒边界的形成,对硬度的提高有明显的优势。同时激光重熔过程中产生了更多的硬质相和具有较高硬度的间隙化合物,使得重熔过后熔覆层的表面硬度进一步提升。

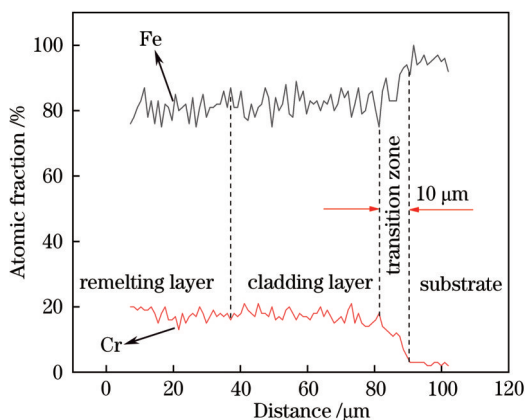


图 5 涂层的元素分布

Fig. 5 Element distribution of coating

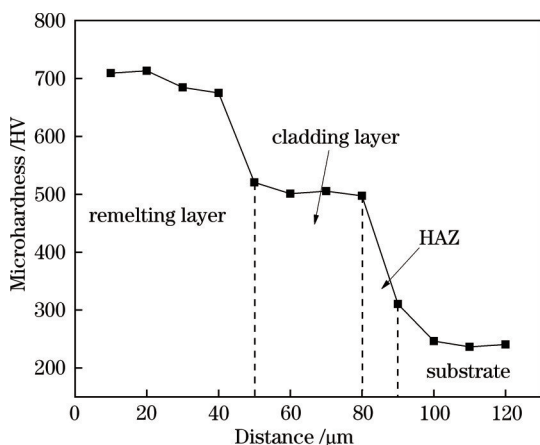


图 6 涂层的硬度分布

Fig. 6 Hardness distribution of coating

3.5 耐磨性能分析

磨损量和摩擦系数是表征耐磨性能的重要参

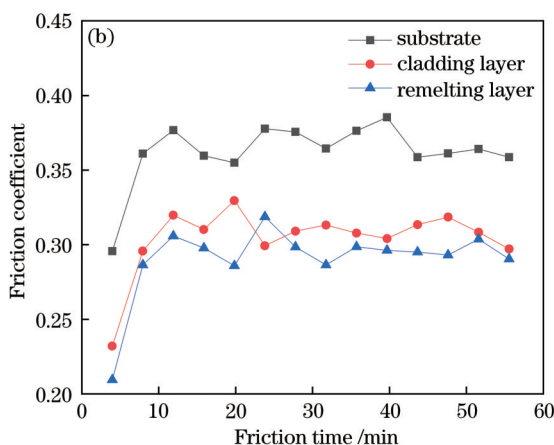
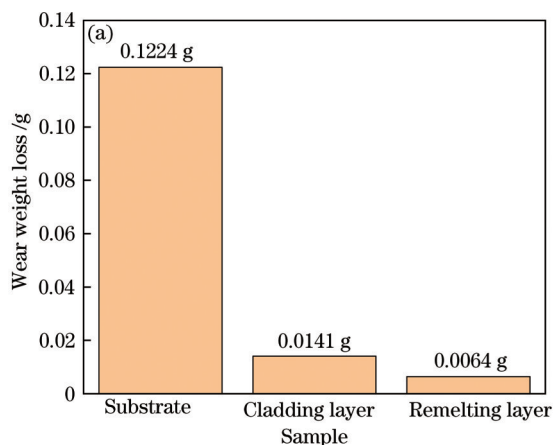


图 7 试样的磨损性能。(a)磨损失重;(b)摩擦系数

Fig. 7 Wear performances of sample. (a) Wear weight loss; (b) friction coefficient

体和涂层的磨损形貌如图 8 所示,在相同的试验条件下,形成的磨损面积从大到小依次为基

数,在相同试验条件下,磨损量越少,摩擦系数越小,代表试样的耐磨性能越好^[18]。本文在正压力为 100 N、磨损时间为 60 min 的试验条件下,对 27SiMn 钢基体、熔覆层、重熔层进行了耐磨性测试试验。用乙醇对试样进行清洗吹干后,分别测量磨损前后试样的质量 M 、 M_0 ,为了保证试验结果的可靠性,每个样件称量 8 次取平均值。分别绘制基体、熔覆层和重熔层在相同试验条件下磨损量的柱状图及摩擦系数随时间变化的曲线图,如图 7 所示。相比于基体,熔覆层和重熔层的磨损量明显小,约为基体的 12% 和 5%。基体的摩擦平均系数 (0.3623) 远远高于熔覆层 (0.3027) 和重熔层 (0.2905),相对而言,重熔之后基体的摩擦系数最小,这也就说明经过高速激光熔覆后,基体的耐磨性能得到提高,且重熔之后的耐磨性能更优。基体、熔覆层及重熔层的摩擦系数在刚开始摩擦时迅速升高,此时称之为摩擦初期。在 8 min 左右的时候开始趋于平稳,但是在 8~23 min 这个过程中摩擦系数的波动幅度较大,此时称之为摩擦中期。在 23 min 之后才保持平稳,这个过程称为摩擦后期。这是因为在摩擦初期,对磨材料的比表面粗糙度不同,并且对磨材料的硬度相差不大,但相对接触面积逐渐增大,因此出现了摩擦系数快速上升的现象;在摩擦中期,由于熔覆材料中多种硬质相的存在,摩擦系数的波动幅度较大;在摩擦后期,熔覆层和摩擦副表面的粗糙度逐渐下降,对磨面积达到动态平衡,摩擦系数趋于稳定,说明材料具有良好稳定的耐磨性^[19-21]。

体、熔覆层、重熔层。从图 8(a)中可以看出,在摩擦过程中,基体表面出现了较深的犁痕和大量微小的

磨损碎片,甚至发生剥落^[22]。从图 8(b)、(c)中可以看出,熔覆层表面出现少量的划痕,但是仍然存在少量的磨损碎片,这说明基体和熔覆层表面的磨损形式主要是磨粒磨损和黏着磨损。而重熔层表面只是出现了较多轻微的划痕,说明失效形式主要是

磨粒磨损。一般而言,熔覆层的硬度与耐磨性能密切相关,较高的硬度可以明显提高熔覆层的抗磨粒磨损性能^[23]。由于重熔层的硬度高于熔覆层与基体,因此重熔层的耐磨损性能更优。



图 8 超景深显微镜下的磨损形貌。(a)基体;(b)熔覆层;(c)重熔层

Fig. 8 Wear morphologies under ultra depth of field microscope. (a) Substrate; (b) cladding layer; (c) remelting layer

4 结 论

利用高速激光熔覆在液压支架表面制备了 Fe90 不锈钢涂层,涂层表面质量良好,与基体形成良好的冶金结合,涂层性能优异。然而,高速激光熔覆层的表面仍然存在表面粗糙的缺陷,因此采用激光重熔技术对熔覆层的表面进行处理,发现激光重熔之后熔覆层的表面粗糙度明显下降。涂层的微观组织致密均匀,经过激光重熔之后晶粒进一步细化。重熔之后熔覆层中的 Fe_3B 、 $\text{B}_{305.51}\text{Si}_{8.44}$ 、 Mo_2BC 等具有较高硬度的间隙化合物的含量增加,涂层硬度提高为基体表面硬度的 2.6 倍,磨损失重降低 95%。研究结果说明激光重熔改善了高速激光熔覆层的表面质量,硬度、耐磨损性能也明显提升。

参 考 文 献

- [1] Schopphoven T, Gasser A, Wissenbach K, et al. Investigations on ultra-high-speed laser material deposition as alternative for hard chrome plating and thermal spraying[J]. *Journal of Laser Applications*, 2016, 28(2): 022501.
- [2] Wu Y, Liu Y, Chen W J, et al. Research status and development direction of extreme high-speed laser material deposition[J]. *Electric Welding Machine*, 2020, 50(3): 1-10, 140.
吴影, 刘艳, 陈文静, 等. 超高速激光熔覆技术研究现状及其发展方向[J]. *电焊机*, 2020, 50(3): 1-10, 140.
- [3] Li L Q, Shen F M, Zhou Y D, et al. Comparison of microstructure and corrosion resistance of 431 stainless steel coatings prepared by extreme high-speed laser cladding and conventional laser cladding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(10): 1002010.
- [4] 李俐群, 申发明, 周远东, 等. 超高速激光熔覆与常规激光熔覆 431 不锈钢涂层微观组织和耐蚀性的对比[J]. *中国激光*, 2019, 46(10): 1002010.
- [5] Lou L Y, Li C X, Zhang Y, et al. Microstructure and surface morphology evolution of FeCr alloy thin coatings deposited by ultra-high speed laser cladding with low laser power[J]. *Journal of Yanshan University*, 2020, 44(2): 116-124.
姜丽艳, 李成新, 张煜, 等. 低功率超高速激光熔覆 FeCr 合金薄涂层微观结构与表面形貌演化[J]. *燕山大学学报*, 2020, 44(2): 116-124.
- [5] Asghar O, Lou L Y, Yasir M, et al. Enhanced tribological properties of LA43M magnesium alloy by Ni60 coating via ultra-high-speed laser cladding[J]. *Coatings*, 2020, 10(7): 638.
- [6] Zhao Y Z, Sun J, Guo K, et al. Investigation on the effect of laser remelting for laser cladding nickel based alloy[J]. *Journal of Laser Applications*, 2019, 31(2): 022512.
- [7] Xin B, Zhou X X, Cheng G, et al. Microstructure and mechanical properties of thin-wall structure by hybrid laser metal deposition and laser remelting process[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 127: 106087.
- [8] Biswas S, Alavi S, Harimkar S. Effect of laser remelting and simultaneous application of ultrasonic vibrations during laser melting on the microstructural and tribological properties of laser clad Al-SiC composites[J]. *Journal of Composites Science*, 2017, 1(2): 13.

- [9] Chen X H, Chen B, Cheng X, et al. Microstructure and properties of hybrid additive manufacturing 316L component by directed energy deposition and laser remelting[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2020, 27(7): 842-848.
- [10] Chong K. Study on microstructure refinement and properties of TiC-VC reinforced Fe-based laser cladding layers[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2019.
种凯. 原位自生 TiC-VC 增强 Fe 基激光熔覆层组织细化及其性能研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2019.
- [11] Wang T, Qiao W L, Wang N, et al. Effect of scanning speed on microstructure and properties of laser cladding NiCoCrAlY coating[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(21): 211403.
王涛, 乔伟林, 王宁, 等. 扫描速度对激光熔覆 NiCoCrAlY 涂层组织及性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(21): 211403.
- [12] Dong S Y, Yan S X, Xu B S, et al. Processing optimization and properties of laser cladding Fe90 coating[J]. Journal of Functional Materials, 2011, 42(S1): 15-18.
董世运, 闫世兴, 徐滨士, 等. Fe90 合金激光熔覆工艺优化及性能研究[J]. 功能材料, 2011, 42(S1): 15-18.
- [13] Li J. The forming and control of variable cross-section thin-walled part by cladding with annular laser [D]. Suzhou: Soochow University, 2013.
李冀. 环形光激光熔覆变截面薄壁件的成形与控制[D]. 苏州: 苏州大学, 2013.
- [14] Ding Z Z, Pan C G, Chang Q M, et al. Microstructure and wear properties of SiC_p/Ni35 coatings by laser cladding[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2017, 37(8): 886-890.
丁紫正, 潘成刚, 常庆明, 等. 激光熔覆 SiC_p/Ni35 覆层组织与磨损性能研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(8): 886-890.
- [15] 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.
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.
- [16] Zheng B J, Wei J Y, Jiang Y H, et al. Wear property of NiCoFeCrTi high entropy alloy coating by laser cladding [J]. Laser Technology, 2016, 40(3): 432-435.
郑必举, 魏金宇, 蒋业华, 等. 激光熔覆 NiCoFe-CrTi 高熵合金涂层及其耐磨性能研究[J]. 激光技术, 2016, 40(3): 432-435.
- [17] 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.
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.
- [18] Wang Y F, Li H, Shi Z Q, et al. Laser cladding Fe-based solid solution alloy coating with high corrosion resistance[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(8): 61-65.
王彦芳, 李豪, 石志强, 等. 激光熔覆高耐蚀 Fe 基固溶体合金涂层[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(8): 61-65.
- [19] Zhang P L, Yan H, Xu P Q, et al. Fe-Ni-B-Si-Nb amorphous and nanocrystalline composite coating prepared by laser cladding and remelting[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(11): 2846-2851.
张培磊, 闫华, 徐培全, 等. 激光熔覆和重熔制备 Fe-Ni-B-Si-Nb 系非晶纳米晶复合涂层[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(11): 2846-2851.
- [20] Wang H J, Zhang W, Peng Y B, et al. Microstructures and wear resistance of FeCoCrNi-Mo high entropy alloy/diamond composite coatings by high speed laser cladding[J]. Coatings, 2020, 10(3): 300.
- [21] Li Y N, Li Z G, Wang X X, et al. Fe-based wear-resistant coating on railroad switch prepared using laser cladding technology and its properties[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0402009.
李英男, 李铸国, 王晓翔, 等. 道岔尖轨表面的激光熔覆铁基耐磨涂层及其性能[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0402009.
- [22] Jin M, He D Y, Wang Z J, et al. Microstructure and properties of laser clad 2205 dual-phase stainless steel/TiC composite coatings[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(11): 111403.
靳鸣, 贺定勇, 王曾洁, 等. 激光熔覆 2205 双相不锈钢/TiC 复合涂层的显微组织与性能[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 111403.
- [23] Liu Y N, Sun R L, Niu W, et al. Microstructure and friction and wear resistance of laser cladding composite coating on Ti811 surface[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0102010.
刘亚楠, 孙荣禄, 牛伟, 等. Ti811 表面激光熔覆复合涂层的微观组织及摩擦磨损性能[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0102010.