表面摩擦磨损与润滑

激光熔覆铁基复合涂层组织与性能影响

张华健[1]，孙中刚[1]，李峰[1]，常辉[1]，邢飞[2,3]

（1.南京工业大学 材料科学与工程学院 新材料研究院，南京 210009；2.辽宁增材制造产业技术研究院有限公司，沈阳 110021；3.沈阳中科煜宸科技有限公司，沈阳 110021）

摘 要：目的 在45#钢基体表面制备耐磨性优于基材的梯度涂层。**方法** 采用激光熔覆技术在基材上制备连接层后，分别用未添加 WC 颗粒、添加 3%和 5%WC 颗粒的铁基合金粉末制备耐磨涂层。通过金相显微镜（OM）、X 射线衍射仪（XRD）、扫描电子显微镜（SEM），研究了涂层的微观结构。通过维氏显微硬度计和 M-2000 磨损试验机，研究了涂层的力学性能。**结果** 获得的涂层致密，没有裂纹和气孔等缺陷，涂层内部 WC 清晰可见。连接层与基材具有良好的冶金结合，涂层组织主要有等轴组织、柱状组织和共晶组织。耐磨层物相组成为奥氏体（γ-Fe）、γ(Fe,Ni)固溶体和 Fe-Ni-Cr 固溶体。涂层表面的显微硬度最高为 559HV_1，比基材硬度（182HV_1）提升了 3 倍多。随着 WC 含量的增加，涂层的磨损量显著下降。**结论** 基材与连接层有沿基体表面生长的平面晶，涂层内部为柱状晶、树枝晶和共晶等组织，涂层顶部多为细小的等轴晶。加入 WC，涂层的显微硬度提高不明显，但 WC 周围的组织细化，显微硬度提高。无 WC 的涂层磨损机理主要为粘着磨损；3%WC 的涂层磨损较轻，磨损仍以粘着磨损为主；5%WC 的耐磨层磨损最轻，磨损机理为磨粒磨损，WC 的加入明显提高了涂层的耐磨性。

关键词：激光熔覆；铁基合金；显微组织；显微硬度；耐磨性；WC 含量

中图分类号：TG174.442 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2018)12-0127-07

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.12.018

Effect of Microstructure and Properties of Laser Cladding Iron-based Composite Coatings

ZHANG Hua-jian[1], SUN Zhong-gang[1], LI Feng[1], CHANG Hui[1], XING Fei[2,3]

(1.Tech Institute for Advanced Materials, College of Materials Science and Technology, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, china; 2.Institute of Liaoning Additive Manufacturing Technology Industry Co. Ltd, Shenyang 110021, China; 3.Shenyang Zhongke Raycgam Science and Technology Co. Ltd, Shenyang 110021, China)

ABSTRACT: A gradient coating was prepared on a 45 steel substrate to obtain a coating with better wear resistance than the substrate. After the connection layer was prepared on the substrate by laser cladding, the wear-resisting layer was prepared by using iron-based alloy powders without added WC particles and added 3% and 5% WC particles, respectively. The microstructure of the coating was studied by optical microscope (OM), X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM). The mechanical properties of coating were studied by Vickers microhardness tester and M-2000 wear tester. The coating is dense

收稿日期：2018-09-19；修订日期：2018-11-11

Received：2018-09-19；**Revised**：2018-11-11

基金项目：国家自然科学基金（51875274，51401105）

Fund：Supported by National Natural Science Foundation of China (51875274, 51401105)

作者简介：张华健（1991—），男，硕士研究生，主要研究方向为激光修复与再制造。

Biography：ZHANG Hua-jian (1991—), Male, Master, Research focus: laser repair and remanufacturing.

通讯作者：李峰（1981—），男，博士，讲师，主要研究方向为金属材料热处理。邮箱：fli@njtech.edu.cn

Corresponding author：LI Feng (1981—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: heat treatment of metal materials. E-mail: fli@njtech.edu.cn

without defects such as cracks and pores, and the WC particles inside the coating are clearly visible. The connection layer and the substrate have a good metallurgical bonding. The coating microstructure mainly has equiaxed, columnar and eutectic structure. The phase of the wear layer is austenite (γ-Fe), γ(Fe,Ni) solid solution and Fe-Ni-Cr solid solution. The average microhardness of the coating is 559HV_1 which is more than 3 times higher than substrate (182HV_1). As the WC content increases, the amount of wear of the coating decreases significantly. The substrate and the connecting layer have planar crystals grown along the surface of the substrate, and the inner structure of the coating is columnar crystal, a dendrite and eutectic structures, and the top of the coating is mostly a small equiaxed crystals. The addition of WC particles did not significantly improve the microhardness of the coating. The wear mechanism of coating without WC is mainly adhesive wear. The coating wear of 3% WC is light wear and wear is still mainly adhesive wear. The wear mechanism of 5% WC wears the lightest wear mechanism is abrasive wear. The addition of WC can significantly improve the wear resistance of the coating.

KEY WORDS: laser cladding; iron based alloy; microstructure; microhardness; wear resistance; WC content

激光熔覆是近年来迅速发展的表面改性和零件修复技术，相对于弧焊、热喷涂和电镀等传统的表面改性和修复方式，具有结合强度高、稀释率低、加工精度较高、成形柔性较大、工件的热变形小、可实现自动化生产等优点，可在廉价基材上制备高性能（如耐磨、硬度高、耐蚀和抗氧化等）涂层，并广泛用于零件制造修复和失效零件再制造领域[1-5]。45#钢是一种优质碳素结构钢，具有较高的强度、优良的塑性和韧性，常被制造成螺栓、螺杆和轴等零件。这些零件在使用过程中，由于长期处于高强负荷工况条件下，表面出现缺陷而失效，若直接报废将增加成本和资源浪费。利用激光熔覆技术将已失效的零件进行再制造，恢复其使用性能，具有重要的经济效益和社会意义。

为进一步提高激光熔覆涂层的性能，可向单一合金涂层中加入 WC、Al_2O_3 等增强相制备成金属基复合涂层，将金属的延性、高强度和增强相的高硬度、高熔点及良好的化学稳定性等结合起来。Janicki [6] 利用激光熔覆技术，使用多孔结构的 Cr_3C_2 增强相制备了 Inconel 625/Cr_3C_2 复合涂层，研究发现在 30°~90° 冲击角度，涂层具有很高的耐蚀性，涂层的耐磨性与微观组织结构相关。Bartkowski 等[7]通过激光熔覆技术制备钴基 Stellite-6/WC 复合涂层，研究发现，随着 WC 含量的增加，涂层显微硬度增加，当 WC 由 30% 增加至 60%时，涂层显微硬度由约 350$HV_{0.05}$ 提升至约 1500$HV_{0.05}$，此外涂层的耐腐蚀性随 WC 含量的增加而降低。Hao 等[8]在 45#钢基体上制备 TiN/Al_2O_3 增强复合涂层，TiN/Al_2O_3 作为增强相使涂层具有高硬度和优异的耐磨性。曹建尉等[9]在 45#钢表面制备了 WC/Ni-P 复合涂层，研究了不同 CeO_2 含量对涂层组织和性能的影响，发现加入适当的 CeO_2 可降低涂层气孔率，随 CeO_2 含量的增加，涂层组织细化，耐磨性增强。李爱农等[10]在 45#钢表面制备铁基 Cr_3C_2/MoS_2 耐磨层，加入的 Cr_3C_2 在激光作用下生成了硬化相（$Cr_{23}C_6$），加入的 MoS_2 部分分解形成 CrS 微粒，其与保留下来的 MoS_2 起到润滑作用，使涂层的耐磨性获得了提升。近年来，在激光熔覆金属基复合涂层研究方面，镍基和钴基一直是研究热点，虽然在铁基复合涂层的研究中也有大量报道，但是关于研究 WC 增强铁基的复合涂层研究却较少，尤其是大颗粒球形 WC 增强铁基材料复合涂层的研究报道更少。基于此，文中选用铁基粉末，利用激光熔覆技术制备复合涂层，研究大颗粒球形 WC 含量对铁基熔覆层组织与性能的影响。

1 试验制备及方法

1.1 试验设备及材料

实验所使用的设备为中科煜宸自主研发的激光增材再制造平台，该平台配备 4 kW 半导体激光器、四路同轴送粉加工头、RC-PDF-D-2 送粉器及 KR60-3 型库卡机器人。应用激光熔覆技术在退火态 45#钢表面制备三种不同粉末配比的双层梯度涂层。其中打底层粉末为铁基自熔性合金粉末（1# powders），耐磨层粉末为单一的铁基自熔性粉末（2# powders）和不同质量分数的球形 WC 粉末混合后的改性铁基自熔性粉末，粉末化学成分和耐磨层配比分别如表 1 和表 2 所示，制得的不同耐磨层分别用 1# sample、2# sample 和 3# sample 表示。

表 1 基材及合金粉末的名义化学成分

Tab.1 Nominal chemical composition of substrate and powders

wt%

Materials	C	Cr	Ni	Mn	Si	B	Mo	W	V	Fe
45# steel	0.42~0.50	≤0.25	≤0.30	0.50~0.80	0.17~0.80					Bal.
1# powders	1.63	18.00	31.29	0.6	0.64	1.14	6.2			Bal.
2# p owders	1.98	4.74	7.79	0.91	1.15	2.1	1.5	1.84	0.60	Bal.

表 2　耐磨层的粉末配比

Tab.2 Powders ratio of wear-resisting layer

wt%

Wear-resisting layer	2# powders	WC powders
1# sample	100	0
2# sample	97	3
3# sample	95	5

1.2　试验方法

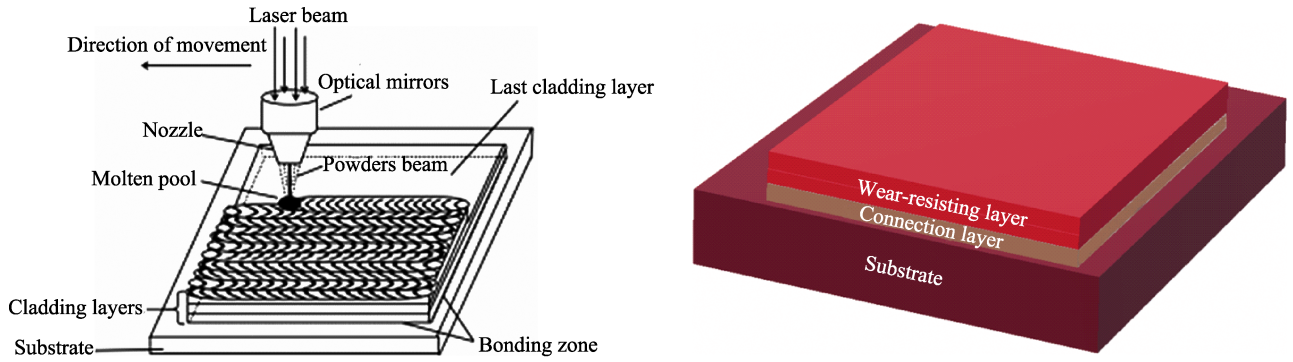
采用激光熔覆技术在 45#钢基体表面制备 50 mm×50 mm 的双层梯度涂层，分别为连接层和耐磨层，其中耐磨层为两层，激光熔覆原理及涂层结构如图 1 所示。样件采用表 3 中的激光加工参数进行制备。激光熔覆前，先用砂纸打磨基体表面，并用乙醇和丙酮清洗去除表面氧化皮和油污。

线切割截取涂层试样，使用 XQ-2 型金相镶嵌机制备金相试样。使用 240 目、400 目、1000 目和 2000 目砂纸打磨试样后，用粒度 W2.5 的金钢石抛光，而后用腐蚀液（V(HF)：V(HNO_3)：V(H_2O)=1：2：30）腐蚀 15 s，用 Zeiss 光学显微镜（Axio Observer. Alm）观察耐磨层的组织形貌，最后再用腐蚀液（V(HCl)：V(HNO_3)=3：1）腐蚀 1 s，观察连接层的组织形貌。用 HVS-1000 显微硬度计测量涂层的显微硬度，载荷为 0.98 N，保压时间为 10 s。涂层表面用砂纸打磨光滑，并用酒精和丙酮溶液擦拭干净，使用瑞士 ARL 公司 X′TRA 型 X 射线衍射仪进行物相分析。使用 M-2000 型摩擦磨损试验机进行摩擦磨损实验，载荷 300 N，转速 400 r/min，磨盘材质为 GCr15，磨盘直径为 50 mm，磨损时间 1 h。使用 JSM-5900 型扫描电镜对磨损试样的形貌进行观察。

表 3　激光加工参数

Tab.3　Laser process parameters

Laser power/W	Scan velocity /(mm·s^{-1})	Powder flow rate /(r·min^{-1})	Overlap rate/%	Protective gas /(L·min^{-1})	Beam point/mm
2000	10	1.0	50	20	4



a 激光熔覆原理图　　b 涂层结构示意图

图 1　激光熔覆原理图及涂层结构

Fig.1 Schematic diagram of laser cladding and structure of coating layer: a) schematic diagram of laser cladding, b) schematic diagram of coating

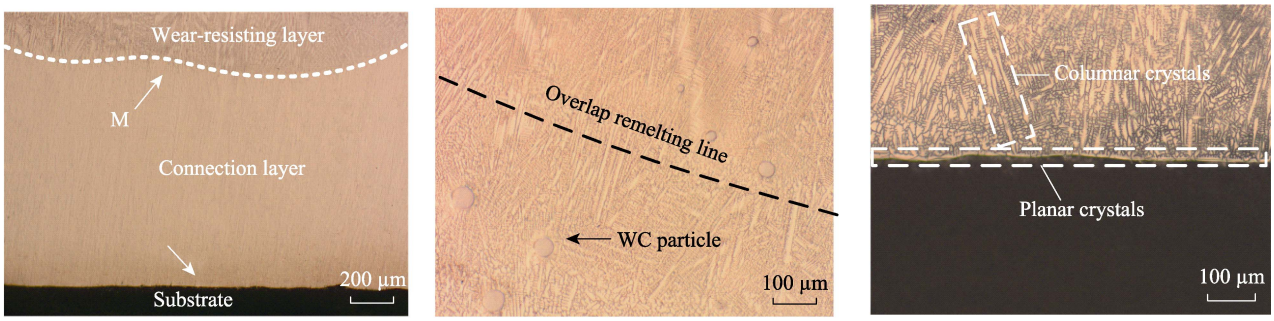
2　结果与分析

2.1　涂层显微组织分析

应用金相显微镜对激光熔覆法制备的双层梯度涂层进行微观组织形貌分析。由图 2a 可知，在相同的腐蚀条件下，各区域呈现出不同的颜色，表明各区域的耐酸蚀性能不同，从颜色深浅可知，不同区域的耐蚀能力由强到弱依次为连接层、耐磨层和基材。图 2b 为耐磨层中部区域的微观组织形貌，可以清晰地看到 WC 颗粒分布在涂层内，涂层致密，没有裂纹和气孔等缺陷。另外，从图 2b 中可观察到涂层组织形貌非常复杂，主要有等轴组织、柱状组织和共晶组织等。激光熔覆过程中，熔池内的温度场复杂，导致小区域内的温度梯度方向不一、凝固速率不同，从而形成了复杂的组织形态。图 2c 是用腐蚀液（V(HCl)：V(HNO_3)=3：1）腐蚀 1 s 后得到的组织形貌，在基材与连接层之间存在一条沿基材表面生长的平面晶。根据凝固原理，凝固组织的生长形态主要受温度梯度/凝固速率（G/R）的影响 [11-12]，在激光熔覆初期，界面结合的温度梯度 G 最大，凝固速率 R 最小，故 G/R 最大，导致平面晶在基材表面生长，说明连接层和基材之间具有良好的冶金结合。随着时间的推移，温度梯度 G 降低，凝固速率 R 增大，G/R 减小，界面失稳，向柱状晶和枝晶转变，晶粒沿着温度降低的方向生长。

此外，由图 3a 可知，在耐磨层两层界面熔合区

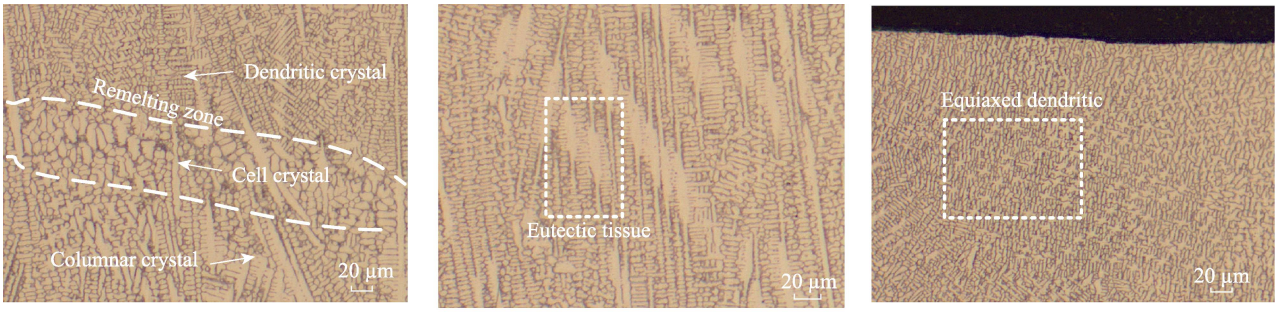
（即激光重熔区）形成了椭圆状的胞状晶组织，在重熔线两侧，组织以柱状晶、树枝晶为主，生长方向垂直于重熔线，且重熔线下方的晶粒组织大于上方。因梯度涂层的制备是一个连续过程，重熔线两侧的温度较高且梯度小，所以重熔区的组织倾向于产生椭圆状的胞状组织，又因新的熔覆层位于上方，冷却通道多，形成的晶粒组织相对较细。如图 3b，涂层中部区域观察到有大量的共晶组织产生，说明内部组织发生了共晶组织转变，激光熔覆具有快速凝固特性，高温下形成的相来不及转变，从而在室温保留了下来。图 3c 是涂层顶部的微观组织形貌，涂层顶部由于冷却的通道更多，形成的组织以等轴组织为主[13]。



a 梯度涂层横截面　　b 耐磨涂层中部区域　　c 界面结合区域

图 2　涂层横截面的微观组织

Fig.2 Microstructure of the cross section of coating layer: a) cross section of gradient coating, b) middle zone of wear-resisting layer, c) interface bonding zone



a 耐磨涂层重熔区　　b 耐磨涂层中部区域　　c 耐磨涂层顶部区域

图 3　不同区域的显微组织

Fig.3 Microstructure of the different zones: a) remelting zone of wear-resisting layer, b) middle zone of wear-resisting layer, c) top zone of wear-resisting layer

2.2　耐磨层物相分析

图 4 为成分配比不同的耐磨层的 XRD 图谱。由图 4 可知，三种不同粉末配比的耐磨层主要由奥氏体（γ-Fe）、γ(Fe,Ni)固溶体、Fe-Ni-Cr 固溶体组成，随着 WC 含量的增加，可观察到图谱中最强峰出现分峰现象。激光加工过程中，激光熔化金属粉末，并在基体表面形成熔池，在凝固初期（即高温时），会从液态析出大量的奥氏体相和 γ(Fe,Ni)固溶体，由于激光熔覆快速凝固的特性，冷却速度极快，可达 10 ℃/s，导致有大量的奥氏体相来不及发生相转变，而在室温保留下来。另外，合金粉末中 Fe、Ni 和 Cr 元素占主要成分，它们均为第三周期元素，原子半径相近，相互之间可相互替代，故易形成 Fe-Ni-Cr 固溶体。2#和 3#试样表面的 XRD 图谱中并未发现 WC 相的峰，原因可能是添加 WC 含量少，加上在激光熔覆过程中又有 WC 颗粒沉积到熔覆层内部，导致耐磨层表层的 WC 相分布异常少，故图谱中未出现明显的 WC 峰。

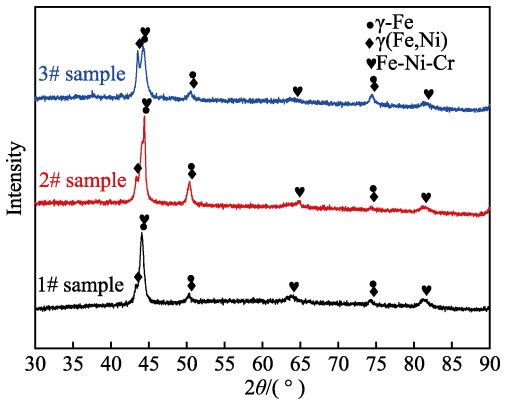
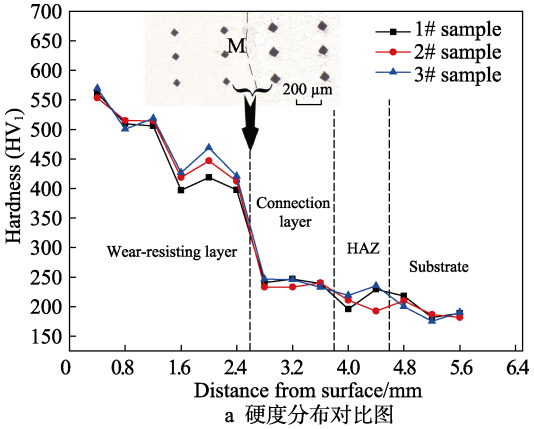


图 4　耐磨层的物相分析

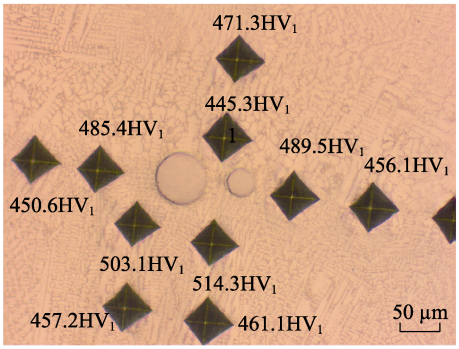
Fig.4 X-ray diffraction of the wear-resisting layer

2.3　涂层显微硬度分析

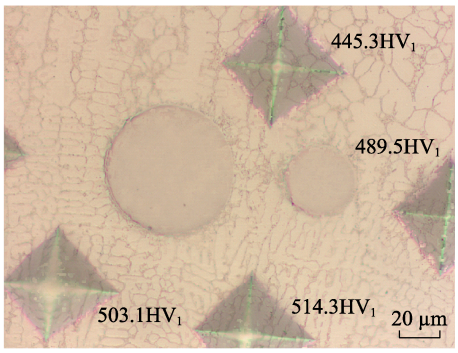
图 5 是用维氏显微硬度计测量得出的涂层截面显微硬度分布。涂层截面显微硬度只检测涂层基质，由于 WC 颗粒硬度极高，当测试区域有 WC 颗粒存在



a 硬度分布对比图



b WC颗粒周围硬度分布



c WC周围放大图

图 5　涂层横截面的显微硬度及 WC 颗粒周围显微硬度

Fig.5 Microhardness profile along the cross section of coating and Hardness distribution around WC particles: a) hardness distribution comparison, b) hardness distribution around WC particles and enlarge image (c)

时，在距顶部相同距离的 WC 颗粒的左侧 0.3 mm 处进行硬度测量点选取。由图 5a 可观察到，1#、2#、3#试样的硬度从顶部至底部逐渐降低，三者具有相似的硬度分布趋势且具有一定的梯度。涂层各个区域的显微硬度差别不大，由此可见 WC 的含量并不能明显改变涂层的显微硬度。涂层表面最高的显微硬度为 559HV_1，相对于基材（182HV_1）提升了 3 倍多。耐磨层内距涂层表面越近，硬度越高，这是因为硬度与抗扭曲变形的能力有关。在涂层顶部有大量细密的等轴组织（如图 3c），晶界面积相对较大，由于晶界处晶体的取向完全不同，当塑性变形通过晶界从一个晶粒到另一个晶粒时，晶界的高阻力使其很难通过，从而表现出很高的硬度[14]。在耐磨层与连接层交界处，显微硬度急剧下降。原因是激光熔覆制备耐磨层时，必然要将连接层的一部分重熔，而连接层含有较高含量的 Ni 元素（如表 1），重熔使 Ni 元素发生扩散，而 Ni 元素可促进 γ-Fe 形成以及扩大 γ 区的元素，较多的 γ-Fe 相增加了涂层的塑性，导致该交界处的硬度急剧下降[15]。最后，由于基材受到长时间的热输入，相当于给热影响区域做了退火处理，因而热影响区和基材的显微硬度差别很小。

虽然整体上显微硬度差别很小，但是在 WC 周围，涂层硬度有明显的差别。图 5b 是 WC 周围硬度分布，通过测试可知，靠近 WC 颗粒的涂层硬度明显要高，图 5c 是 WC 周围放大的图，观察到 WC 附近的组织更加细密，但同时也观察到图中标记点 1 处在重熔区，该区域晶粒大而少，晶界少，阻碍变形的能力差，因此硬度相对较低。

2.4　涂层耐磨性能分析

图 6 是根据添加了不同 WC 含量的耐磨层的质量损失计算得出的磨损率。其中 1#试样是未添加 WC 颗粒的耐磨涂层，2#、3#试样是分别添加了 3%和 5%WC 颗粒的耐磨涂层。随着 WC 含量的增加，耐磨涂层的磨损率明显下降，说明涂层耐磨性的增强归功于加入的 WC 颗粒。在干滑动摩擦开始时，与表面接触的地方具有很高的温度，导致接触区域表面的硬度迅速下降。由于表面的相互摩擦接触作用，局部的高温形成接触式焊接，结果导致材料表面产生严重的塑性变形，进而材料从摩擦表面脱落。但是由于 WC 具有很高的硬度，其分散在涂层内部起到了弥散强化的作用，添加了 WC 的耐磨涂层具有良好的抗微剪切、抗微犁切和抗表面反复塑性变形的能力。因此，加入 WC 颗粒的耐磨涂层具有良好的耐磨性能[16]。

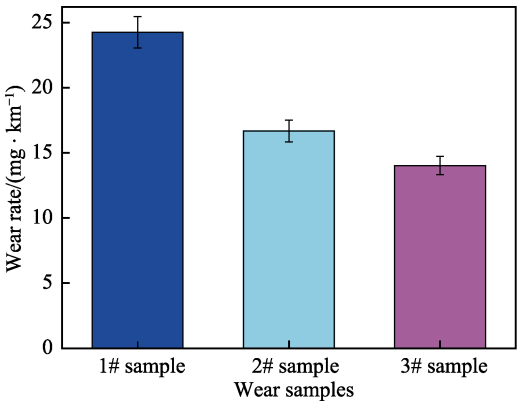
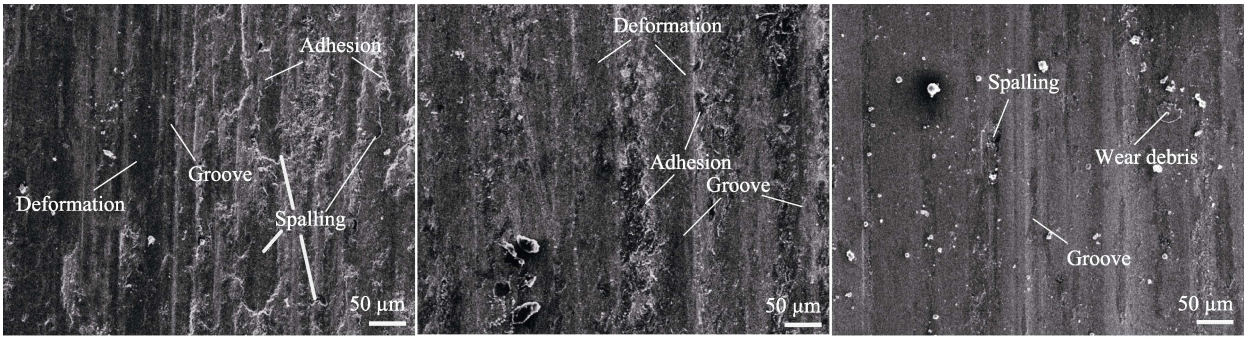


图 6　不同 WC 含量耐磨层试样的磨损率

Fig.6 Wear rate of wear-resisiting layer with different WC content

图 7a、b 分别是不同耐磨涂层在扫描电镜下的磨损形貌，可以明显地发现 3#试样的耐磨层磨损最轻（图 7c），其次是 2#试样的耐磨层（图 7b），1#试样的耐磨层磨损严重（图 7a）。在 1#试样内部发现了严



a 未添加WC颗粒的1#试样　　b 添加了3wt%WC颗粒的2#试样　　c 添加了5wt%WC颗粒的3#试样

图 7　耐磨层磨损表面 SEM 形貌

Fig.7 SEM images showing worn surface of wear-resisting layers: a) 1# sample without WC particles, b) 2# sample with 3wt%WC particles, c) 3# sample with 5wt%WC particles

重的塑性变形和粘着磨损，磨损试样表面出现了较深的磨痕并有严重的剥落现象，在摩擦测试过程中，在纯剪切应力的作用下，试样产生了错位滑移和塑性变形，主要原因是该试样的表面硬度远远低于对磨材料 GCr15 的硬度，其磨损机制主要为粘着磨损[17-18]。2# 试样相对于 1#试样，磨损机制仍以粘着磨损为主，但如图 7b 所示，塑性变形减轻，磨痕减少并且凹槽深度变浅。3#试样相对于前两组，未出现明显的塑性变形，磨痕的深度较浅，只有轻微的剥离，并有少量的磨粒产生。在干滑动磨损试验的负荷下，试样表面产生磨损碎片并成为磨损过程中的磨粒，在剪切力的作用下，磨粒在试样表面切割出凹痕。因 WC 本身硬度和 WC 周围组织硬度较高，磨损过程中，随着磨损表面附近交替应力的出现，导致微裂纹的产生并发生扩展，从而导致磨损表面剥落[19-20]。

3　结论

1）采用激光熔覆技术在 45#钢表面制备双层梯度涂层，获得的涂层致密，没有裂纹和气孔等缺陷，WC 颗粒在其内部清晰可见。连接层与基材结合处有沿基材表面生长的平面晶，两者呈良好的冶金结合。涂层内部组织为柱状晶、树枝晶和共晶等，涂层顶部多为细小的等轴晶。耐磨层物相组成为奥氏体（γ-Fe）、γ(Fe,Ni)固溶体、Fe-Ni-Cr 固溶体。

2）WC 的加入未明显地提高涂层的显微硬度，但 WC 周围组织细化，显微硬度提升。涂层表面最高显微硬度为 559HV_1，比基材硬度（182HV_1）提升了 3 倍多。未添加、添加了 3%WC 颗粒和添加了 5%WC 颗粒的涂层显微硬度具有相似的分布趋势，随着 WC 含量的增加，涂层的耐磨性增加，磨损量显著下降。无 WC 涂层的磨损机理主要为粘着磨损；3%WC 的涂层磨损较轻，仍以粘着磨损为主；5%WC 的耐磨层磨损最轻，磨损机理为磨粒磨损，WC 的加入明显提高了涂层的耐磨性。

参考文献：

[1] 董世运, 张晓东, 徐滨士, 等. 45 钢凸轮轴磨损凸轮的激光熔覆再制造[J]. 装甲兵工程学院学报, 2011, 25(2): 85-87.
DONG Shi-yun, ZHANG Xiao-dong, XU Bin-shi, et al. Laser cladding remanufacturing of 45 steel camshaft worn cam[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2011, 25(2): 85-87.

[2] ZHOU H M, ZHANG H M, QIN H F. 35CrMo steel surface by laser cladding Fe-based WC composite coating performance analysis[J]. Optical engineering, 2014, 9295: 1-8.

[3] 张浩敏, 周后明, 秦衡峰, 等. 基于激光熔覆的 35CrMo 钢轴类零件修复再制造[J]. 热加工工艺, 2014, 43(10): 155-159.
ZHANG Hao-min, ZHOU Hou-ming, QIN Heng-feng, et al. Remanufacturing of 35CrMo steel shaft parts repair based on laser cladding[J]. Hot working technology, 2014, 43(10): 155-159.

[4] 黄勇, 孙文磊, 陈影. 激光熔覆再制造复杂轴类零件的轨迹规划[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(5): 53-59.
HUANG Yong, SUN Wen-lei, CHEN Ying. Trajectory planning of laser cladding remanufacturing for complex shaft shaped part[J]. Infrared and laser engineering, 2017, 46(5): 53-59.

[5] 于有生, 倪火炬, 温家伶. 铁基合金激光熔覆的研究[J]. 中国表面工程, 2004(4): 24-27.
YU You-sheng, NI Huo-ju, WEN Jia-ling. A study on laser cladding of iron-based alloy[J]. China surface engineering, 2004(4): 24-27.

[6] JANICKI D. Laser cladding of inconel 625-based composite coatings reinforced by porous chromium carbide particles[J]. Optics laser technology, 2017, 94: 6-14.

[7] BARTKOWSKI D, MŁYNARCZAK A, PIASECKI A, et al. Microstructure, microhardness and corrosion resistance of stellite-6 coatings reinforced with WC particles using laser cladding[J]. Optics & laser technology, 2015, 68: 191-201.

[8] HAO J J, LI J C, YANG S H, et al. TiN/Al_2O_3-reinforced composite coating prepared by reactive nitrogen-arc cladding process[J]. Welding in the world, 2016, 60(2): 169-175.

[9] 曹建尉, 陈华辉, 李国华, 等. 稀土对激光熔覆 WC/Ni-P 涂层微磨料磨损性能的影响[J]. 中国表面工程, 2004, 22(4): 20-23.
CAO Jian-wei, CHEN Hua-hui, LI Guo-hua, et al. The effect of rave earth on the micro-abrasive wear properties of laser-cladding WC/Ni-P coatings [J]. China surface engineering, 2004, 22(4): 20-23.

[10] 李爱农, 魏成靓, 刘娇姣, 等. 激光熔覆铁基 Cr_3C_2/MoS_2 覆层的组织和摩擦磨损性能[J]. 中国表面工程, 2015, 28(5): 77-85.
LI Ai-nong, WEI Cheng-liang, LIU Jiao-jiao, et al. Microstructure, friction and wear properties of laser cladding Fe-based Cr_3C_2/MoS_2 coatings[J]. China surface engineering, 2015, 28(5): 77-85.

[11] KURZ W, FISHER D J. 凝固原理[M]. 李建国, 胡侨丹, 译. 北京: 高等教育出版社, 2010.
KURZ W, FISHER D J. Fundamentals of solidification[M]. LI Jian-guo, HU Qiao-yi, translated. Beijing: Higher Education Press, 2010.

[12] 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.
WANG Yan-fang, LI Hao, SHI Zhi-qaing, et al. Laser cladding Fe-based solid solution alloy coating with high corrosion resistance[J]. Infrared and laser engineering, 2017, 46(8): 61-65.

[13] WANG X L, SUN W L, CHEN Y, et al. Research on trajectory planning of complex curved surface parts by laser cladding remanufacturing[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2018, 96(5-8): 2397-2406.

[14] HUANG F X, JIANG Z H, LIU X M, et al. Effects of process parameters on microstructure and hardness of layers by laser cladding[J]. ISIJ international, 2011, 51(3): 441-447.

[15] 张净宜, 邱长军, 贺沅玮, 等. 不同 Ni 含量铁基激光熔覆层组织和性能的研究[J]. 表面技术, 2017, 46(6): 221-225.
ZHANG Jing-yi, QIU Chang-jun, HE Yuan-wei, et al. Microstructure and properties of Fe-based laser cladding with different Ni content[J]. Surface technology, 2017, 46(6): 221-225.

[16] WANG X H, ZOU Z D, QU S Y, et al. Microstructure and wear properties of Fe-based hardfacing coating reinforced by TiC particles[J]. Journal of materials processing technology, 2005, 168(1): 89-94.

[17] HUGHES D A, DAWSON D A, KOREELL J S, et al. Near surface microstructures developing under large sliding loads[J]. Journal of materials engineering and performance, 1994, 3(4): 459-475.

[18] QU S Y, WANG X H, ZHANG M, et al. Microstructure and wear properties of Fe-TiC surface composite coating by laser cladding[J]. Journal of materials science, 2008, 43(5): 1546-1551.

[19] SHI Y, LI Y M, LIU J, et al. Investigation on the parameter optimization and performance of laser cladding a gradient composite coating by a mixed powder of Co50 and Ni/WC on 20CrMnTi low carbon alloy steel[J]. Optics & laser technology, 2018, 99: 256-270.

[20] OZSARAC U, FINDIK F, DURMAN M. The wear behaviour investigation of sliding bearings with a designed testing machine[J]. Materials & design, 2007, 28(1): 345-350.