

高锰钢表面激光熔覆 Fe-WC 复合涂层的组织与性能

皮自强, 杜开平, 郑兆然, 陈星

- (1. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160;
2. 特种涂层材料与技术北京市重点实验室, 北京 102206;
3. 北京市工业部件表面强化与修复工程技术研究中心, 北京 102206)

摘要: 采用激光熔覆技术在高锰钢基体上制备了不同 WC 含量的 Fe-WC 复合熔覆层, 研究了 WC 添加量对熔覆层组织和性能的影响。试验结果表明, 不同 WC 含量的 Fe-WC 熔覆层均含有马氏体、 M_7C_3 碳化物和未熔 WC 颗粒, 当加入 20wt.% 的 WC 时, 熔覆层中出现了残余奥氏体, 共晶碳化物呈鱼骨状沿晶界析出。Fe-WC 熔覆层的硬度和耐磨性随着 WC 添加量的增多而增大, 熔覆层中 WC 颗粒减小熔覆层基体与对磨副的接触面积, 合金基体固定和支撑 WC 颗粒避免其剥落, 二者协同作用使得熔覆层耐磨性增加。

关键词: 激光熔覆; 高锰钢; 铁基合金; 显微组织; 耐磨性能

中图分类号: TG174.4 文献标识码: A 文章编号: 1674-7127(2021)06-0010-08

DOI 10.3969/j.issn.1674-7127.2021.02.010

Microstructure and Properties of Fe-WC Laser Cladding Layers on the High Manganese Steel Substrate

Pi Ziqiang, Du Kaiping, Zheng Zhaoran, Chen Xing

- (1. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160;
2. Beijing Key Laboratory of Special Coating Materials and Technology, Beijing 102206;
3. Beijing Engineering Technology Research Center of Surface Strengthening and Repairing of Industry Parts, Beijing 102206)

Abstract: Fe-WC composite coatings with different WC contents were prepared on high manganese steel substrate by laser cladding. The effect of WC content on the microstructure and properties of the cladding layer was studied. The results show that the Fe-WC coatings with different WC content contains martensite, M_7C_3 carbide and unmelted WC particles. When 20wt.% WC was added, retained austenite appears in the cladding layer and eutectic carbide precipitates along the grain boundary in fishbone shape. The hardness and wear resistance of the Fe-WC cladding layer increased with the increase of WC content. The WC particles in the cladding layer were the skeleton and the alloy matrix was the support. The synergistic effect of the two make the wear resistance of the cladding layer increase.

Key words: Laser cladding; High manganese steel; Fe-based alloy; Microstructure; Wear resistance performance

0 引言

高锰钢在较高的冲击载荷作用下易发生加工

硬化, 其表面硬度可达 550HV 以上, 同时内部仍为韧性较好的奥氏体组织, 具有很好的抗冲击性和耐磨性, 因此高锰钢常被用于制作挖掘机的铲

齿、圆锥式破碎机的轧面壁和破碎壁、破碎机衬板、铁路辙岔、板锤、锤头等^[1-3]。在服役过程中,高锰钢制件受到强烈的冲击、碰撞、碾压和摩擦作用,往往在加工硬化发生之前就已产生一定程度的磨损、凹坑甚至部分剥落。因此,在高锰钢表面制备耐磨涂层,不仅可以提升其硬度和耐磨性,还可以为加工硬化提供一定的缓冲期,对延长其服役寿命有着十分重要的作用。

激光熔覆技术是在高能激光束的作用下将熔覆材料和基体表面同时熔化,得到与基体呈冶金结合的熔覆层,从而显著改善基体表面力学性能、物理性能和冶金性能的一种表面改性方法^[4-7]。激光熔覆颗粒增强耐磨涂层具有很高的硬度和耐磨性,受到了广泛关注。WC颗粒具有熔点和硬度高、热膨胀系数小、与金属熔体润湿性好、金属特性显著等优点,因此常作为强化相来提高激光熔覆层的耐磨性能^[8,9]。Song等人^[10]采用激光熔覆技术在304不锈钢表面制备了316L-WC复合熔覆层,与基体相比熔覆层的硬度和耐磨性得到了明显提升。Lu等人^[11]在H13模具钢表面制备了激光熔覆Fe-WC复合涂层,熔覆层的显微硬度随着深度呈梯度变化,且主要磨损机制为磨粒磨损。崔陆军等人^[12]用同轴送粉的方式在42CrMo表面激光熔覆Fe-WC合金粉末,结果表明WC陶瓷颗粒具有细化枝晶,阻断枝晶生长,增强熔覆层性能的能力,熔覆层平均硬度可达850HV0.3。张国法^[13]在高锰钢辙叉表面预置纳米碳化物陶瓷复合粉末涂层材料,然后对其进行激光熔覆处理,制备出厚度约为0.3mm熔覆层,使高锰钢辙叉在上道运营初期的磨耗量大幅降低。因此,在高锰钢表面制备激光熔覆WC增强铁基熔覆层,不仅可以提高其硬度和耐磨性,还可以有效解决高锰

钢加工硬化初期耐磨性差,强度低,磨耗量大的问题,有效提高其服役寿命,从而减少部件更换周期,节约时间和成本。本研究制备了不同WC添加量的复合粉末,采用激光熔覆技术在高锰钢表面制备了WC颗粒增强铁基耐磨熔覆层,并对熔覆层的物相、显微组织、性能及磨损机制进行分析,阐明WC含量对熔覆层组织和性能的影响规律。

1 试验材料及方法

试验基材为高锰钢,熔覆粉末为自行制备的铁基合金粉末,其化学成分如表1所示,分别加入10 wt.%和20 wt.%的WC颗粒作为增强相。所用铁基合金粉末粒度范围为45~150 μm,WC粒度范围为25~90 μm,铁基合金粉末和WC粉末的形貌如图1所示。采用德国GTV公司的MF-LC 2000型激光熔覆设备进行激光熔覆试验,其工艺参数为:激光功率2 kW,送粉率33 g/min,光斑直径3.19 mm,扫描速度0.015 m/s,搭接率50%。

采用日立SU 5000扫描电镜对熔覆层的微观组织进行观察;采用德国PROGRES GRYPHAX大型卧式光学金相显微镜对样品金相进行观察;采用德国BRUKER公司的D8 ADVANCE型X射线衍射仪(XRD)对所制备的熔覆层进行物相检测分析;采用402 MVATM维氏硬度计对熔覆层截面显微硬度进行测量(标准压头,加载载荷200 g,加载时间10 s);采用德国BRUKER公司的UMT摩擦磨损试验仪对熔覆层进行摩擦试验(往复式摩擦磨损,接触方式为平面,Φ7.938 mm的SiN球,载荷为200 N,时间为20 min,钢球往复速率为10 mm/s);采用美国ZYGO三维白光干涉形貌仪对磨痕形貌进行观察并计算磨损体积。

表1 激光熔覆铁基粉末化学成分(wt.%)
Table 1 The chemical composition of laser cladding Fe-Based powder (wt.%)

| 编号 | 化学成分 | | | | | | 增强颗粒 |
|----|------|-----|------|-------|-------|----|------|
| | C | Ni | Cr | Si | Mn | Fe | WC |
| 1# | 0.11 | 1.4 | 16.2 | < 1.0 | < 1.0 | 余 | / |
| 2# | 0.11 | 1.4 | 16.2 | < 1.0 | < 1.0 | 余 | 10 |
| 3# | 0.11 | 1.4 | 16.2 | < 1.0 | < 1.0 | 余 | 20 |

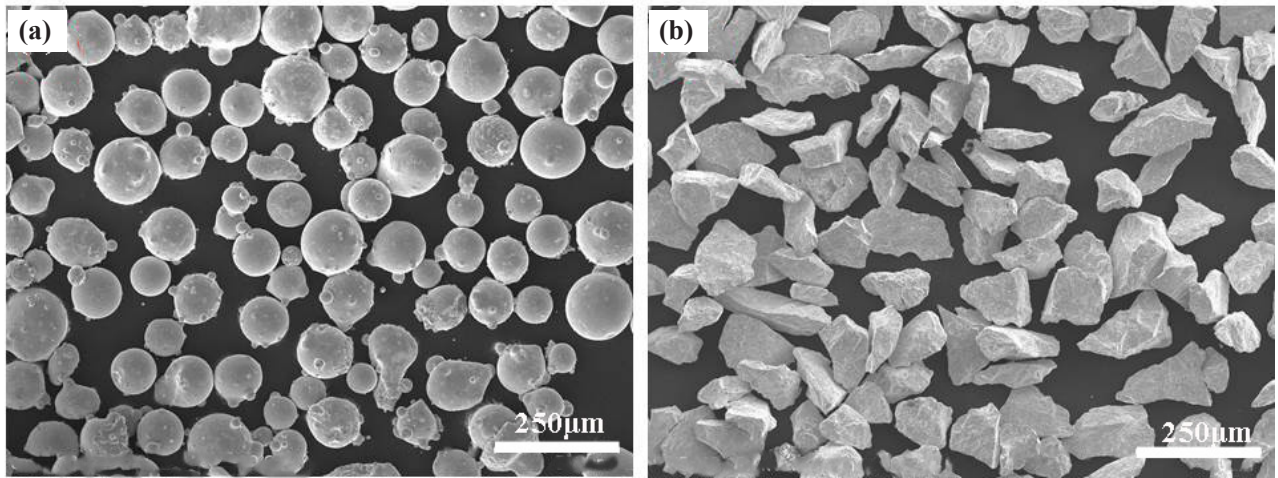


图 1 激光熔覆粉末形貌：(a) Fe 基合金粉末；(b) WC 粉末

Fig.1 Morphology of laser cladding powder: (a) Fe-based alloy powder; (b) WC powder

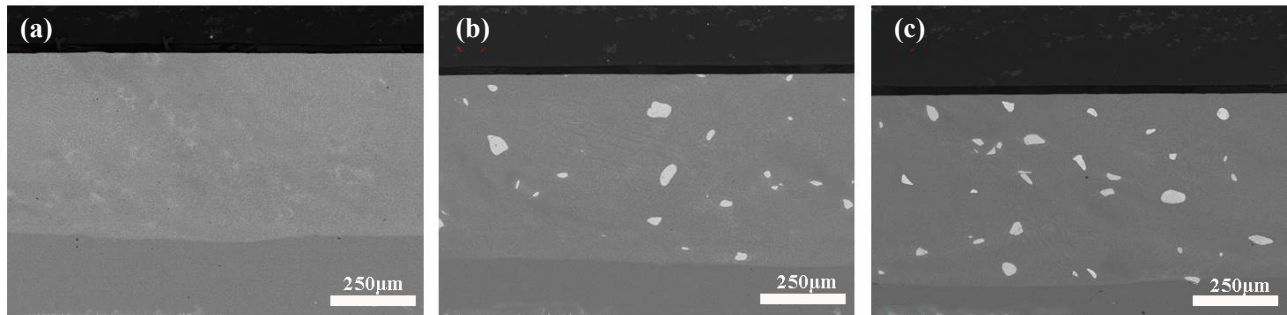
2 结果与讨论

2.1 熔覆层组织分析

不同 WC 添加量的激光熔覆 Fe 基合金熔覆层的显微组织如图 2 所示，可以看到熔覆层与基体的界面结合良好，熔覆层致密度较高，未发现明显的气孔和其他组织缺陷。熔覆层中均匀分布的白色颗粒为 WC，可以看到熔覆层中的 WC 颗粒的轮廓边缘相比图 1(b) 中变得更加平滑，说明激光熔覆过程中 WC 颗粒发生了部分熔解。结合 XRD 图谱（如图 4）可知熔覆层中均含有马氏体和 M_7C_3 型碳化物，当 WC 添加量增加至 20 wt.% 时，熔覆层中出现了奥氏体峰，这是因为在激光熔覆过程中，随着 WC 的部分溶解，奥氏体中 W 元素和 C 元素的含量增加提高了奥氏体的稳定性，使得快速冷却过程中马氏体转变开始温度 M_s 点降低，马氏体转变量变少，马氏体转变量降低，

残余奥氏体含量增加。

从显微组织来看，未添加 WC 的熔覆层显微组织为呈一定方向性的柱状晶，如图 2(d) 所示；当添加 10 wt.% 的 WC 时，熔覆层中柱状晶的方向性被破坏，且可以看到有等轴晶生成，如图 2(e) 所示；当添加 20 wt.% 的 WC 时，熔覆层中出现了大量散乱的树枝晶。这是因为激光熔覆过程中，熔覆层组织形态由熔池中合金温度梯度 G 和凝固速度 R 的比值 G/R 来决定，当加入 WC 颗粒时，未熔 WC 颗粒的存在破坏了熔池中热流的方向性，扰乱了组织的定向凝固过程。当添加 20wt.% 的 WC 时，熔解的 WC 过多，导致更多的富 W 的鱼骨状共晶碳化物沿晶界析出，图 2(f) 所示。此外，随着 WC 颗粒的添加量增加，熔池中界面增多，导致熔池散热速度变慢，因此过多的 WC 颗粒导致晶粒反而增大。



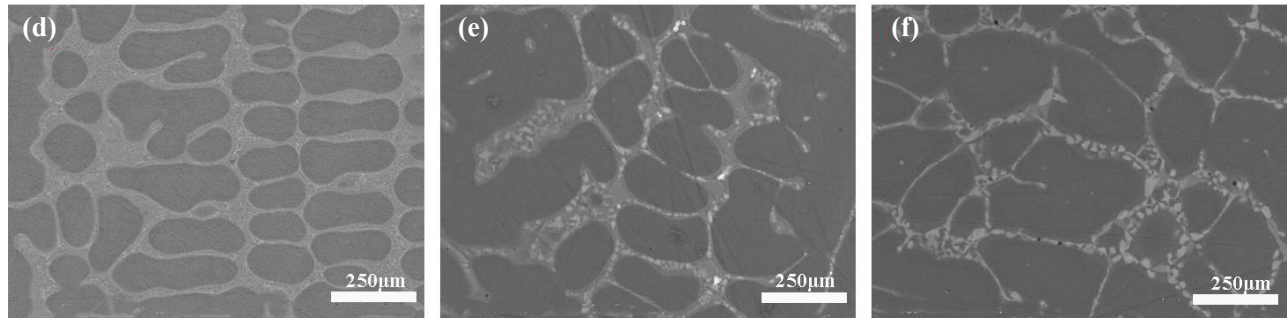


图 2 不同 WC 添加量激光熔覆 Fe 基涂层的 SEM 照片：(a), (d) 1#; (b), (e) 2#; (c), (f) 3#
 Fig.2 SEM pictures of the laser cladded layers with different WC contents: (a), (d) 1#; (b), (e) 2#; (c), (f) 3#

图 3 是加入 10 wt.% 的 WC 熔覆层截面的光镜照片，从图中可以看到明显的熔覆层、热影响区和基体三个区域，且热影响区的晶粒尺寸要比基体小得多。图 3(b) 是热影响区的金相图，晶粒排列无明显方向性，平均晶粒尺寸小于 50 µm；图 3(c) 是基体的金相图，晶粒粗大，结合图 3(a) 来看，平均晶粒尺寸超过 300 µm；参考图 2(e) 可知熔覆层的平均晶粒尺寸小于 10 µm。熔池的散热主要通过与上方气体的对流散热以及与下方基

体的热传导来完成。在温度梯度与表面张力梯度的作用下，熔池内部发生强烈的 Marangoni 运动，能够使熔体的热传导系数提高到静止状态的 2.5 倍以上^[14]。因此熔池冷却速度最快可达 10⁶K/s，容易得到细晶组织。熔池下方的基体在高温作用下发生再奥氏体化，其冷却主要靠与基体之间的热传导，随着基体温度升高，其冷却速度变慢，晶粒相对熔覆层较粗。激光熔覆快速凝固过程可以有效地细化晶粒，从而增强熔覆层的强韧性。

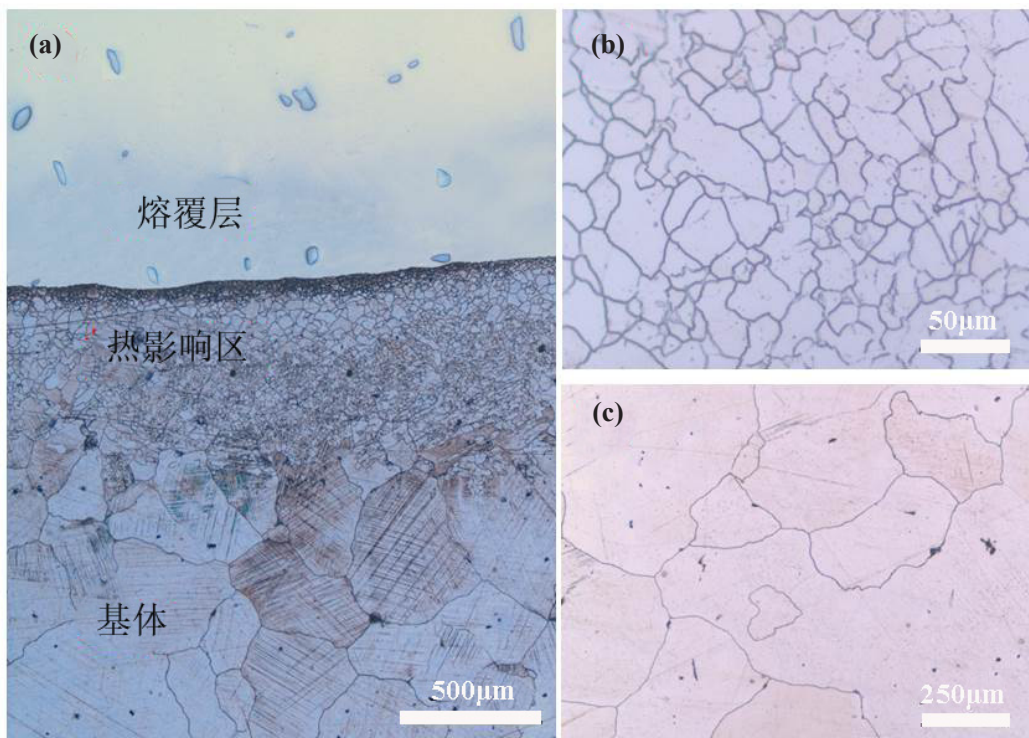


图 3 2# 样品截面光镜照片：(a) 熔覆层；(b) 热影响区；(c) 基体
 Fig.3 Optical morphology of the 2# sample: (a) cladding layer; (b) heat affected zone; (c) matrix

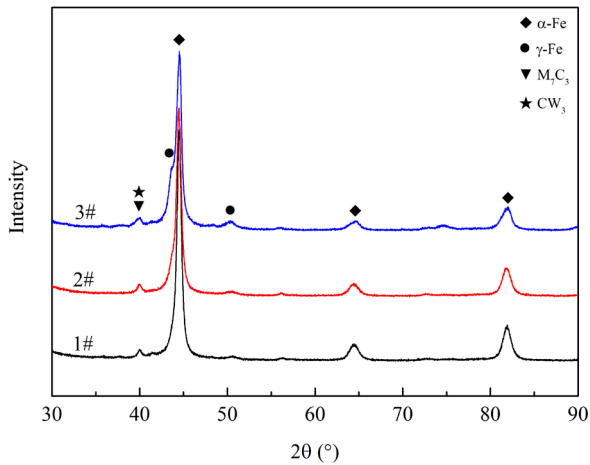


图 4 不同 WC 添加量激光熔覆 Fe 基涂层的 XRD 图谱
Fig. 4 XRD patterns of the laser cladded layers with different WC contents

图 5 是加入 10 wt.% 的 WC 熔覆层截面的 EDS 线扫描照片，熔覆层与高锰钢基体之间的界面主要是元素扩散界面。界面处，熔覆层与高锰钢基体之间元素互相扩散、溶解形成固溶体，以 Cr 和 Mn 元素为例，可以看到元素含量沿着界面呈现明显的梯度变化。熔覆层与高锰钢基体之间的界面不是严格的直线，而是呈一定起伏的波形界面。这是由于激光熔覆过程是一个动态熔化与凝固的过程，粉末在高锰钢表面熔化形成熔池，高锰基体与熔池之间形成一个半熔化区，因此熔池下方的固 / 液界面处于两个等温面之间，两个等温面之间的晶粒由于各向异性，各晶粒的界面能存在差异，导热系数也各不相同，从而导致熔化速度不同，使固 / 液界面形成起伏不定的波形界面。

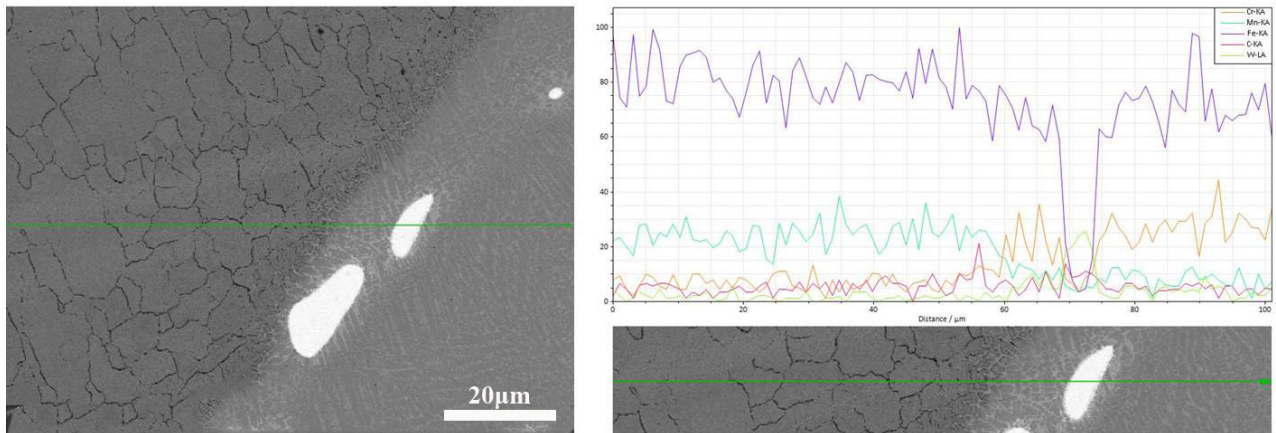


图 5 2# 样品 EDS 线扫描
Fig.5 EDS line scan of the 2# sample

2.2 熔覆层硬度

不同 WC 添加量激光熔覆 Fe 基熔覆层的显微硬度如图 6 所示。三种样品显微硬度均由熔覆层到基体逐渐降低。熔覆层中主要为马氏体组织，因此硬度较高，未添加 WC 的 1# 样品平均显微硬度为 540 HV0.2，加入 10 wt.% 的 WC 颗粒后，平均显微硬度有了明显提升，为 603 HV0.2，继续增加 WC 颗粒的添加量，熔覆层硬度缓慢提升，当加入 20 wt.% 的 WC 颗粒时，熔覆层平均显微硬度为 633 HV0.2。显微硬度的增加主要有三方

面的原因：一是 W 元素固溶于马氏体中起到了固溶强化的效果；二是熔覆层中 C 含量的增加使得马氏体中含碳量增加，马氏体硬度升高，同时 C 含量的增加导致析出更多的碳化物数量增多，熔覆层硬度增大；三是未熔的 WC 颗粒弥散分布起到弥散强化的效果。在热影响区，由于熔覆层和基体之间的元素互扩散作用，以及冷却速度慢导致晶粒变粗，其硬度由熔覆层至基体逐渐降低，呈梯度分布。而高锰钢基体未经加工硬化，其硬度较低，在 300 HV0.2 左右。

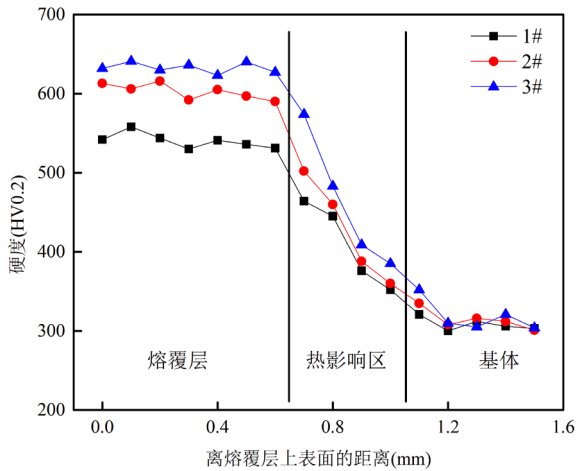


图 6 不同 WC 添加量激光熔覆 Fe 基熔覆层的显微硬度
Fig. 6 Hardness of the laser cladded layers with different WC contents

2.3 熔覆层耐磨性能

高锰钢基体及不同 WC 添加量激光熔覆 Fe 基熔覆层的磨损体积如图 7 所示，高锰钢基体采用经加工硬化后的样品，其硬度为 512 HV0.2，熔覆层的磨损体积由图中磨痕轮廓云图计算得到。从图中可以看到，熔覆层的磨损体积相比基体显著降低，加入 WC 颗粒后，熔覆层的磨损体积进一步降低，1# 不含 WC 样品的熔覆层磨损体积是基体的 66.7%，2# 加入 10 wt.% 的 WC，熔覆层磨损体积是基体的 52.3%，3# 加入 WC 颗粒增加至 20 wt.%，熔覆层磨损体积是基体的 48.1%。说明高锰钢表面激光熔覆 Fe 基熔覆层能够明显提升耐磨性，加入 WC 颗粒有利于耐磨性的进一步提升，这主要是因为 WC 颗粒溶解在熔覆层中产生固溶强化的作用，同时未熔 WC 颗粒作为强化同样有利于熔覆层耐磨性提升。

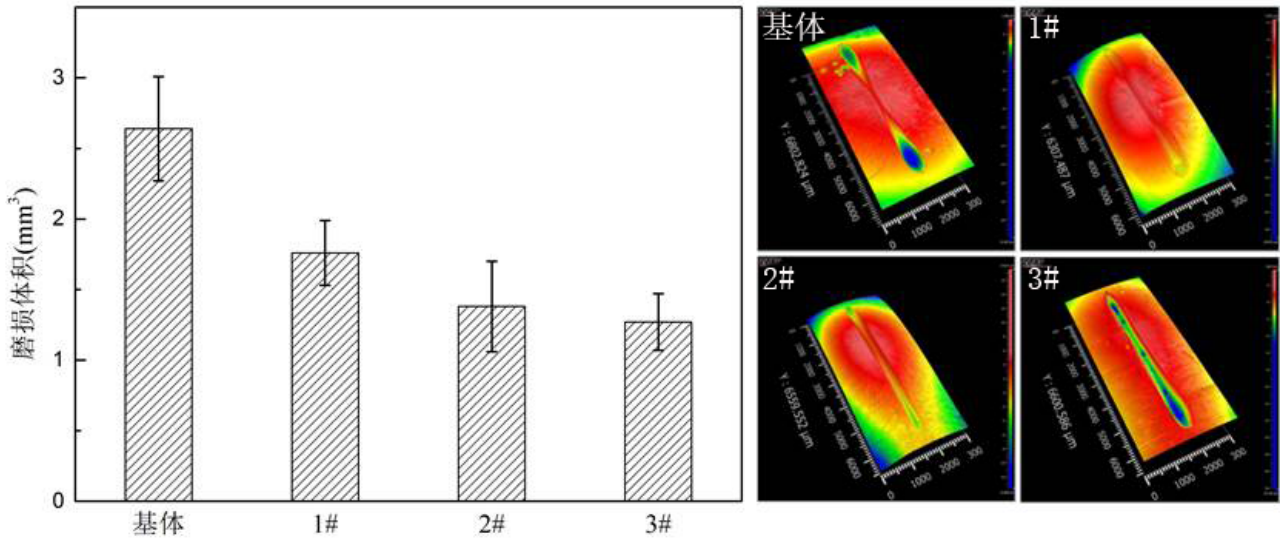


图 7 不同 WC 添加量激光熔覆 Fe 基熔覆层的磨损体积
Fig. 7 The volume loss of the laser cladded layers with different WC contents

试样的摩擦系数随干摩擦磨损时间的变化趋势如图 8 所示，在滑动摩擦磨损初期容易产生磨屑，磨屑与试样之间的剪切和刮擦以及磨屑与磨屑之间的相互作用易导致摩擦系数产生强烈的波动，曲线的噪声和震动较大。300 s 后，试验的摩擦系数均趋于平稳。随着 WC 颗粒添加量增加，

试验的平均摩擦系数增大，这是由于 WC 颗粒硬度大，在滑动摩擦磨损实验中 WC 颗粒的尖角与对磨材料之间发生刮擦，随着 WC 颗粒越多，与磨球之间的对磨越强，导致试样的平均摩擦系数增大^[15]。

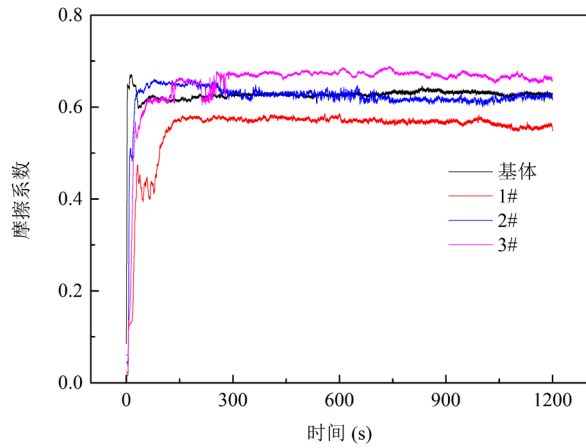


图 8 不同 WC 添加量激光熔覆 Fe 基涂层的摩擦曲线
Fig.8 The friction curves of the laser clad layers with different WC contents

图 9 为高锰钢基体以及不同 WC 添加量熔覆层的磨损形貌图。图 9(a) 为高锰钢基体的表面磨

损形貌，从图中可以观察到犁沟、大块剥落以及分层现象，表面高锰钢基体发生了比较严重的磨损。高锰钢加工硬化后其硬度较高，与磨球接触部位发生冷焊形成黏着点，在滑动摩擦的过程中产生较大应力将基体表面的材料拉起，导致大块剥落^[16]。同时，高锰钢加工硬化后存在大量的位错，当遇到阻碍时，位错堆积形成微裂纹，在应力作用下裂纹聚集、扩展，形成平行与基体表面的连续裂纹，导致分层现象产生^[17, 18]。图 9(b) 为不含 WC 颗粒的熔覆层磨损形貌，可以看到较深的犁沟和小块剥落，磨损程度比高锰钢基体要轻得多，这要归功于高硬度的马氏体和碳化物的强化作用。加入 WC 颗粒后，均匀分布的高硬度高耐磨 WC 颗粒能够起到骨架作用，减小熔覆层基体与对磨副的接触面积，也能够一定程度上减少磨屑的产生。此外，硬质 WC 颗粒不会与对磨副发

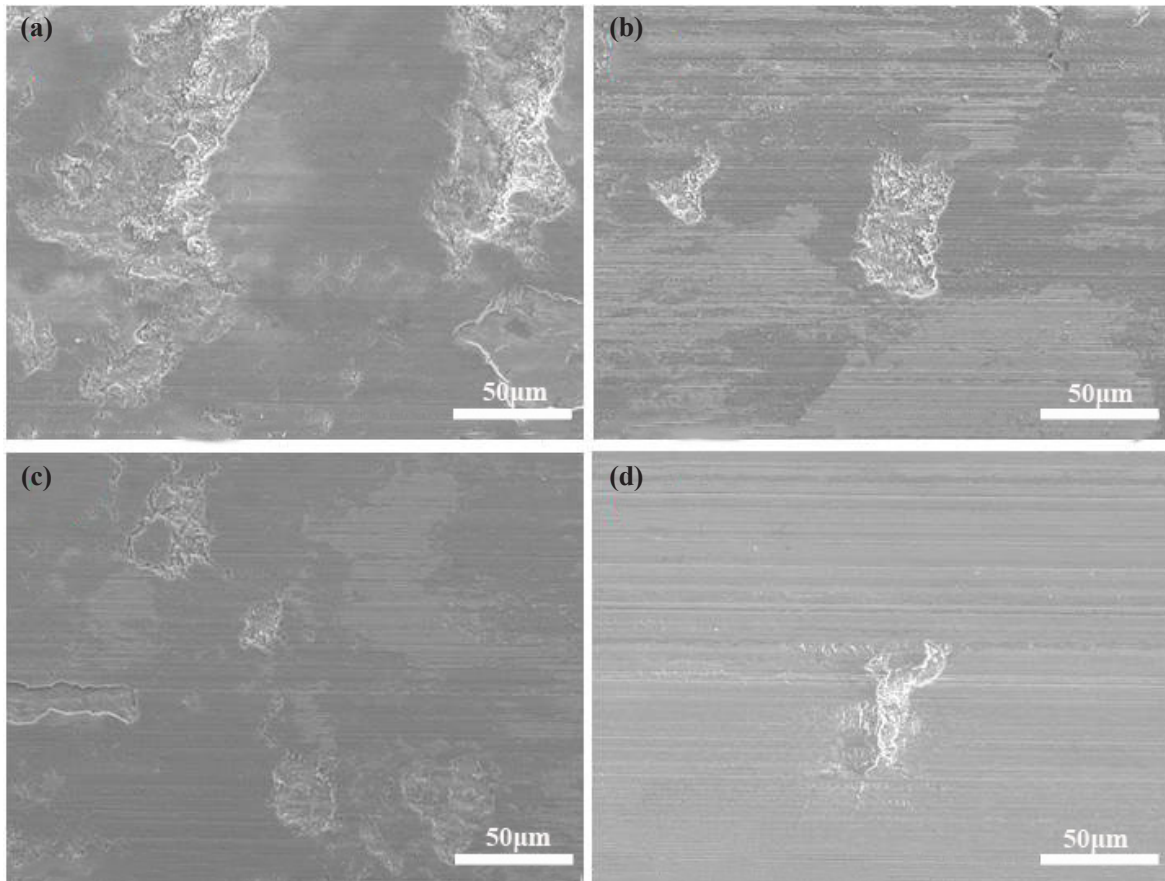


图 9 高锰钢基材和不同 WC 添加量熔覆层的磨损形貌：(a) 基体；(b)1#；(c)2#；(d)3#
Fig. 9 The wear morphology of the high manganese steel and laser clad layers with different WC contents:
(a)matrix; (b)1#; (c)2#; (d)3#

生冷焊和黏着,能够有效避免熔覆层产生大块剥落。此时合金基体起到对 WC 颗粒的支撑与固定作用,使熔覆层的耐磨性显著提高。图 9(c)所示, WC 颗粒添加量 10 wt.% 的熔覆层表面剥落和分层现象明显减轻,当 WC 颗粒的添加量增加到 20 wt.% 时,虽然 WC 的固溶强化作用增大, WC 骨架增多,但是易导致熔覆层中残余应力增大,合金基体的支撑作用不足,导致 WC 颗粒剥落^[19];同时过多的 WC 颗粒与对磨副碰撞发生破碎,导致磨屑增多,犁沟加深,如图 9(d)所示。因此, WC 颗粒添加量从 10 wt.% 增加至 20 wt.%,对熔覆层的耐磨性提升并没有十分显著。

3 结论

(1) 采用激光熔覆在高锰钢表面制备了 Fe-WC 熔覆层,熔覆层组织由马氏体、 M_7C_3 碳化物和未熔 WC 颗粒组成,当 WC 颗粒添加量增加至 20 wt.% 时,熔覆层中出现了残余奥氏体。

(2) 随着 WC 颗粒添加量增多,Fe-WC 熔覆层中碳化物沿晶界呈网状析出,当 WC 颗粒添加量增加至 20 wt.% 时,熔覆层中出现鱼骨状共晶碳化物。

(3) 随着 WC 颗粒添加量增多,Fe-WC 熔覆层的硬度和耐磨性增大,WC 颗粒在熔覆层中起到骨架作用,合金基体起到支撑作用,二者协同使得熔覆层耐磨性增加。

参考文献

- [1] Vdovin K N, Feoktistov N A, Gorlenko D A. The effect of the cast high-manganese steel primary structure on its properties[C]//Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, 2016, 870: 339-344.
- [2] Qian L, Feng X, Zhang F. Deformed microstructure and hardness of Hadfield high manganese steel[J]. Materials transactions, 2011, 52(8): 1623-1628.
- [3] Mahlami C S, Pan X. An Overview on high manganese steel casting[C]//World Foundry Congress 2014: 1-10.
- [4] Siddiqui A A, Dubey A K. Recent trends in laser cladding and surface alloying[J]. Optics and Laser Technology, 2021, 134: 106619.
- [5] Zhu L, Xue P, Lan Q, et al. Recent research and development status of laser cladding: A review[J]. Optics and Laser Technology, 2021, 138: 106915.
- [6] Singh S, Goyal D K, Kumar P, et al. Laser cladding technique for erosive wear applications: a review[J]. Materials Research Express, 2020, 7(1): 012007.
- [7] Gao W, Chang C, Li G, et al. Study on the laser cladding of FeCrNi coating[J]. Optik, 2019, 178: 950-957.
- [8] Zhou S F, Dai X Q, Zheng H Z, et al. Microstructure and wear resistance of Fe-based WC coating by multi-track overlapping laser induction hybrid rapid cladding[J]. Optics and Laser Technology, 2012, 44:190-197.
- [9] Gu D D, Meiners W. Microstructure characteristics and formation mechanisms of in situ WC cemented carbide based hardmetals prepared by Selective Laser Melting[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(29):7585-7592.
- [10] Song L, Zeng G, Xiao H, et al. Repair of 304 stainless steel by laser cladding with 316L stainless steel powders followed by laser surface alloying with WC powders[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 24(part1):116-124.
- [11] Lu J Z, Cao J, Lu H F, et al. Wear properties and microstructural analyses of Fe-based coatings with various WC contents on H13 die steel by laser cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 369: 228-237.
- [12] 崔陆军, 于计划, 曹衍龙, 等. 42CrMo 钢表面 Fe-WC 激光熔覆层的组织与性能 [J]. 金属热处理, 2020, 45(10): 205-209.
- [13] 张国法. 激光熔覆技术在高锰钢辙叉生产上的应用 [J]. 热加工工艺, 2008, 37(11): 81-82.
- [14] Crowe C T. Review-numerical models for dilute gas-particle flows[J]. Journal of Fluids Engineering, 1982, 104(3): 297-303.
- [15] Jing Z, Zhou H, Zhang P, et al. Effect of thermal fatigue on the wear resistance of graphite cast iron with bionic units processed by laser cladding WC[J]. Applied Surface Science, 2013, 271: 329-336.
- [16] 曹俊, 卢海飞, 鲁金忠, 等. WC 对激光熔覆热作模具的组织磨损性能的影响 [J]. 中国激光, 2019, 7: 60-66.
- [17] Suh N P. An overview of the delamination theory of wear [J]. Wear, 1977, 44(1): 1-16.
- [18] 张煜, 姜丽艳, 徐庆龙, 等. 超高速激光熔覆镍基 WC 涂层的显微结构与耐磨性能 [J]. 金属学报, 2020, 56(11): 92-102.
- [19] Kadolkar P B, Watkins T R, De Hosson J T M, et al. State of residual stress in laser-deposited ceramic composite coatings on aluminum alloys [J]. Acta Materialia, 2007, 55(4): 1203-1214.