

激光熔覆 WC/316L 复合涂层结构及磨损性能*

董 会^{1,2}, 惠瑞亮^{1,2}, 赵鑫哲^{1,2}, 袁天磊^{1,2}

(1. 西安石油大学 材料科学与工程学院, 西安 710065;

2. 西安市高性能油气田材料重点实验室, 西安 710065)

摘 要: 为改善激光熔覆过程中 WC 增强金属基复合涂层分解与分布不均匀的问题, 采用激光熔覆技术制备了 50%WC 含量的 WC/316L 复合涂层, 分别采用扫描电子显微镜 (SEM)、显微维氏硬度计、摩擦磨损试验机表征了熔敷层的组织形貌、硬度与摩擦磨损性能。结果显示, 低热输入量可以防止 WC 颗粒下沉, 提升熔覆层厚度方向上的 WC 颗粒分布均匀性; 但 WC 的平面分布均匀性较差, 同时低热输入导致 WC 颗粒结合较弱, 易发生脱落; 熔覆过程中, 粉末中 15% 的 WC 发生分解。研究表明, 通过降低激光热输入量, 可以制备 WC 厚度方向较为均匀的复合涂层, 提升熔覆层耐磨性, 但是需要优化 WC 平面分布均匀性与 WC 颗粒结合性能。

关键词: 激光熔覆; 耐磨层; 耐磨性; WC 增强金属基复合涂层

中图分类号: TG456.7

文献标识码: A

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2024.01.005

Laser Cladding WC/316L Composite Coating Structure and Wear Properties

DONG Hui^{1,2}, HUI Ruiliang^{1,2}, ZHAO Xinzhe^{1,2}, YUAN Tianlei^{1,2}

(1. Xi'an Shiyou University, School of Material Science and Engineering, Xi'an 710065, China;

2. Xi'an Key Laboratory of High Performance Oil and Gas Field Materials, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to improve the problem of uneven decomposition and distribution of WC reinforced metal matrix composite coating during laser cladding, a 50% WC content WC/316L composite coating was prepared using laser cladding technology. The microstructure, hardness, and friction and wear properties of the deposited layer were characterized using scanning electron microscopy (SEM), microscopic Vickers hardness tester, and friction and wear testing machine, respectively. The results show that low heat input can prevent WC particles from sinking and improve the uniformity of WC particle distribution in the thickness direction of the cladding layer. However, the planar distribution uniformity of WC is poor, and low heat input leads to weak bonding of WC particles, making them prone to detachment. During the cladding process, 15% of WC in the powder decomposes. Research has shown that by reducing the laser heat input, a composite coating with a more uniform thickness direction of WC can be prepared, improving the wear resistance of the cladding layer. However, it is necessary to optimize in-plane distribution uniformity and the bonding of WC particles.

Key words: laser cladding; wear-resistant coating; wear resistance; WC reinforced metal matrix composite coating

0 前 言

随着石油化工、电力、航空航天等行业的发展, 服役环境对结构件的耐磨性能要求越来越

高^[1-2]。譬如, 牙轮钻头是石油、矿山钻探设备的重要构件, 井中的溶解盐、固相颗粒等会促使牙轮钻头发生磨损、断裂, 而牙轮钻头成本约占钻孔成本的 40%^[3]。因此, 采用表面技术在构件

*基金项目: 陕西省优势学科项目“材料科学与工程”(项目编号 YS37020203); 陕西省大学生创新创业项目“基于核壳结构 WC-316L 复合粉末超硬涂层的制备与性能研究”(项目编号 202110705081)。

表面制备高硬耐磨涂层对提升钻采效率与构件寿命、降低成本具有重要意义^[3-5]。

WC增强金属基复合涂层因高硬度、高耐磨特点,且能与Fe基、Ni基、Co基涂层具有良好的润湿性,广泛用作耐磨件涂层^[6-7]。WC增强金属基复合涂层制备方法主要有热喷涂、激光熔覆等,激光熔覆具有低稀释率、基体与涂层为冶金结合等优点,在石油化工、电力等行业得到广泛应用^[8]。激光熔覆过程中, W_2C 、 Fe_3W_3C 等次生化合物可作为形核中心,增加形核率,促进二次枝晶形成,提升熔覆层硬度^[9-11]。WC高温分解成的W、C与Ni、Cr等元素易形成高硬度新相,发挥弥散强化作用^[12]。但WC高温分解时易形成CO、CO₂,在熔覆层中形成气孔^[11]。另外,由于WC与金属基母相的线膨胀系数存在一定差异,当WC含量增加至一定数量时熔覆层会出现纵向裂纹等缺陷^[13]。当WC质量分数为20%时熔覆层未出现裂纹,摩擦性能较好^[14]。WC质量分数为20%时熔覆层硬度较低,还有提升空间,但当继续增加WC含量时,WC颗粒下沉数量增多,硬质颗粒间发生接触,影响熔覆层结构连续性^[15-16],这不仅会恶化WC颗粒分布均匀性,还会在熔覆层内部造成微裂纹,使得弱结合WC颗粒数量增加,降低熔覆层耐磨性能。

研究表明,增加辅助场,如感应加热、磁场、机械振动和超声振动,可以提升WC颗粒分布均匀性^[17-20]。感应加热虽然可以在一定程度上提高均匀性,但作用力易导致涂层产生裂纹^[17]。外加电磁场不仅可以降低WC分解量还可以提升WC分布均匀性,但会使熔池温度升高,形核率下降,导致涂层晶粒粗大,影响涂层力学性能^[18]。在机械振动的作用下WC均匀性提高,涂层气孔和裂纹等缺陷明显降低,但机械振动易造成组织成型差,产生松动^[19]。采用超声辅助场,可以使组织结构均匀化,提高WC均匀性,但超声热效应会导致WC分解量增加^[20]。

综上,外场辅助可以在一定程度上改善涂层的性能与WC分布均匀性,但是仍然存在问题尚未解决。研究表明,低热输入量可以提升熔池粘度,降低WC分解^[21-22]。粘度的提升导致熔池浮力增

加、辅助激光熔覆凝固速度快的特点,可以有效缓解WC下沉问题,降低裂纹、气孔的产生几率。

基于此,本研究通过控制热输入量制备WC/316L复合熔覆层,研究低热输入量时WC的溶解与分布特征,以及高WC含量对裂纹和气孔的影响,并探究了熔覆层的硬度与摩擦磨损性能。

1 试验方法

基材选用Q235钢,尺寸为150 mm×150 mm×13 mm,熔覆前采用喷砂除锈。熔覆层材料为316L与WC的混合粉末,比例为1:1。采用机械混合的方式将两种粉末混合10 min,至二者混合均匀,然后将混合粉末送入送粉器。图1为316L粉末微观形貌,316L为实心粉末,呈现无规则形貌,尺寸为45~75 μm。WC为实心粉末,呈球形,尺寸为50~100 μm。

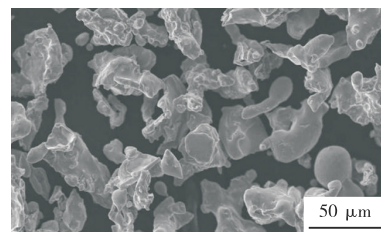


图1 316L粉末微观形貌

熔敷前混合粉末在120℃烘干1 h以上。激光熔敷参数见表1。熔覆后将熔敷层切割成20 mm×20 mm的金相试样,使用不同型号砂纸(180#、400#、800#、1 000#、1 500#、2 000#)打磨试样,再采用粒度1.5 μm的金刚石抛光液抛光试样。采用JSM-6390A型扫描电镜及能谱分析仪分析熔覆层结构、成分及摩擦磨损表面形貌与成分。采用断面测试熔覆层硬度,载荷为300 g,加载时间为10 s。以熔覆层表面为初始位置,每隔200 μm测试1个硬度,至基体侧3个测试点硬度相同为止。采用销盘摩擦副测试熔敷层摩擦磨损性能,摩擦副选用GCr15,熔覆层磨损试样尺寸为Φ4.8 mm×12.7 mm,加载力为50 N,测试时间为5 min,转速为100 r/min。

表1 激光熔敷参数

激光功率/W	扫描速率/(mm·s ⁻¹)	送粉速率/(g·min ⁻¹)	搭接率/%	离焦量	Ar保护气体流量/(L·min ⁻¹)
900	3	30	50	0	10

2 结果与分析

2.1 熔覆层组织形貌与成分

图2为激光熔敷层宏观形貌, 熔敷层表面具有金属光泽。文献研究表明, 激光熔敷制备 WC 涂层时, 涂层易出现裂纹与气孔^[9,13,23]。基于图2宏观形貌可知, 本研究熔敷层表面未出现明显裂纹与气孔, 可初步判断低热输入量可以在一定程度上降低气孔、裂纹的数量, 提升熔覆层致密性。



图2 激光熔覆层宏观形貌

图3为熔覆层断面形貌, 图中白色衬度为 WC 颗粒, 灰色衬度为 316L。WC 质量分数为 50% 时, 熔覆层没有明显的气孔和裂纹。与高热输入量的 WC 出现明显下沉相比^[24], 本研究制备的熔覆层中 WC 颗粒没有发生明显下沉。图3中局部黑色圆形缺陷为金相试样制备过程中 WC 颗粒脱落遗留的坑洞, 不是制备过程中的气孔。本研究熔覆参数决定了热输入量较低, 部分 WC 颗粒与 316L 之间的结合力较弱。金相制备过程中, 弱结合 WC 颗粒发生剥落, 形成图3所示坑洞。弱结合硬质颗粒剥落易造成磨粒磨损, 加剧熔覆层与对磨材料磨损。另外, 弱结合的 WC 颗粒会造成应力集中, 可能导致摩擦磨损过程中发生疲劳磨损^[25]。因此, 低热输入量时, 未出现微裂纹等问题, 但仍然会导致熔覆层出现弱结合缺陷。

激光熔覆过程中, WC 通常会发生分解。在

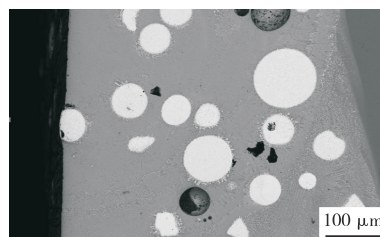
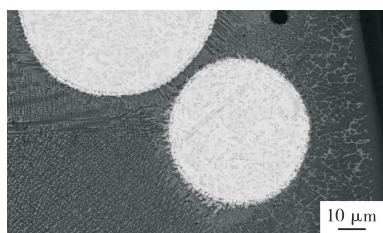


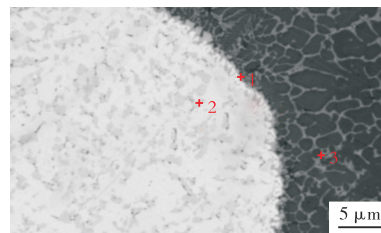
图3 激光熔覆层断面形貌

本研究低热输入的情况下, WC 颗粒同样发生了分解, 但还有大量 WC 硬质颗粒保留在涂层。熔覆层中大颗粒 WC 质量分数约为 35%。因此, 熔覆层制备过程中, 约 15% 的 WC 发生分解。由于 WC 和 316L 颗粒为机械混合, 在密度、重力、浮力和拖拽力等因素的影响下, 混合粉末送粉不均匀, 导致 WC 大颗粒在熔覆层的分布不均匀^[15-16,26]。但是粘度较高的金属溶液在一定程度上提升了 WC 浮力, 有利于缓解下沉问题。因此, 本研究熔覆层中的 WC 大颗粒没有发生明显下沉, 沿着涂层厚度方向分布较为均匀, 但送粉均匀性导致 WC 沿平面分布不均匀。

WC 在进入熔池后会与液态 Fe、Cr 等发生冶金结合, 熔覆层中会有新的产物生成, 反应产物会影响熔覆层的组织结构。图4为熔覆层形貌及 WC 与 316L 结合区域界面特征, 熔覆层不同位置的能谱分析结果见图5和表2。基于图4、图5可知, 大部分 WC 和 316L 形成了冶金结合, 熔覆层中除 316L 和 WC 外, 还生成了新相。从表2与图5结果可知, 白色衬度2为原始 WC 硬质颗粒, 灰色衬度1、黑色衬度3均为 WC 分解后与 316L 生成的新相。基于化学成分可知, 分别为 W_2C 和 Fe_3W_3C 。熔覆过程中, 未分解的 WC、 W_2C 、 Fe_3W_3C 可作为形核中心, 促进二次枝晶形成, 提升熔覆层硬度^[27]。另外, WC 硬质颗粒会因为和基体膨胀系数、晶粒尺寸、位错运动以及 WC 的分布的情况而产生细晶强化、



(a) 1 000 ×



(b) 3 000 ×

图4 熔覆层形貌及 WC 与 316L 结合区域界面特征

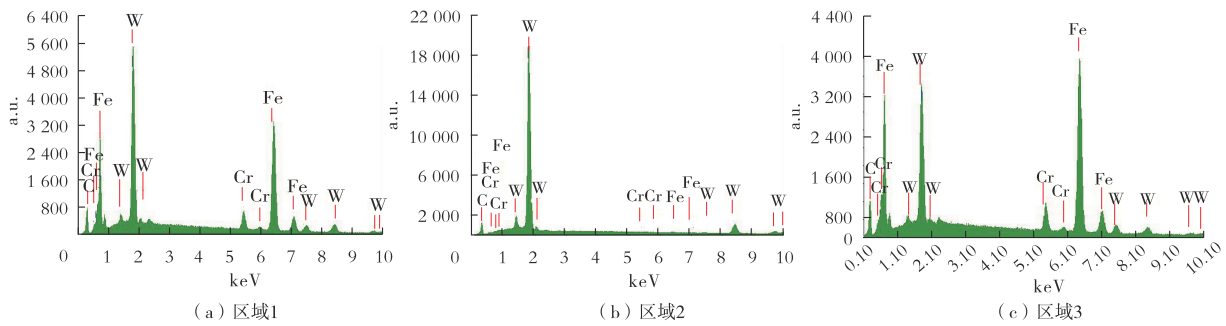


图5 熔覆层不同位置的能谱分析图

表2 图4中标记区域的化学成分

标记区域	化学成分/%			
	w(C)	w(Cr)	w(Fe)	w(W)
1	5.65	5.51	54.22	34.61
2	5.20	—	0.94	93.86
3	3.71	10.49	52.81	32.99

固溶强化以及弥散强化^[6,9,14]。WC在一定程度时可有效提高复合材料的硬度和耐磨性能，但WC颗粒会对基体造成割裂效应。另外，如图3所示，弱结合WC颗粒脱落会大幅度降低熔覆层耐磨性，导致磨粒磨损。因此，低输入量可以提升WC分布均匀性，但是会影响部分WC颗粒的结合强度。

2.2 熔敷层硬度

熔覆层的断面显微硬度分布如图6所示。由于激光热输入量较低，熔覆层没有明显的过渡区，靠近表面区域熔覆层硬度约为580HV_{0.3}，靠近基体的硬度约为640HV_{0.3}。由表层到界面，熔覆层的硬度逐渐升高，这主要是熔覆过程中WC下沉导致。因此，低热输入量时，截面形貌显示WC深度方向分布较为均匀，对WC大颗粒的分布均匀性有较大改良，但仍存在WC下沉问题。

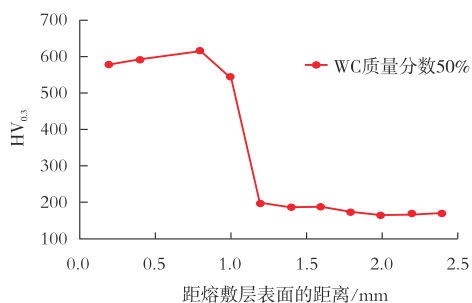


图6 熔覆层断面显微硬度

2.3 摩擦磨损结果

摩擦磨损结果显示，复合涂层与GCr15对磨时，摩擦系数为 0.49 ± 0.04 ，熔覆层磨损率约为 $0.35 \text{ mg}/(\text{N} \cdot \text{min})$ 。由于其热输入量仍然偏高，硬质相出现熔化，因此降低热输入量是进一步提升熔敷层硬度与耐磨性的可行性途径。提升扫描速率可以降低热输入量，但是该方法会造成熔覆层缺陷密度增加。从熔覆层断面结构可知，金属相在900 W的激光功率下完全可以熔化，并形成致密熔覆层，但WC仍然发生了分解。继续降低激光功率，可以降低热输入量，进一步降低WC分解量，但是易造成WC颗粒弱结合问题，需要进一步调节热输入量与送粉率之间的关系，提升弱结合WC颗粒结合强度。

图7为熔敷层的磨损形貌，从图7可见，试样表面呈现明显的犁沟形貌，为典型的磨粒磨损形貌^[8]。本研究熔覆条件下，由于WC高含量与激光低热输入量，熔覆层存在一定数量的弱结合WC颗粒。摩擦磨损过程中，WC颗粒脱落形成熔敷层-硬质颗粒-对磨样的三体磨损，硬质颗粒对熔敷层形成切削、挤压作用，发生磨损。有文献表明，弱结合颗粒可能造成疲劳磨损^[25]，但图中未发现疲劳磨损形貌。本研究条件下制备熔敷层中的WC颗粒尽管有一定量的弱结合，但是未达到脱落形成微裂纹的程度。因此，熔覆层主要发生磨粒磨损。

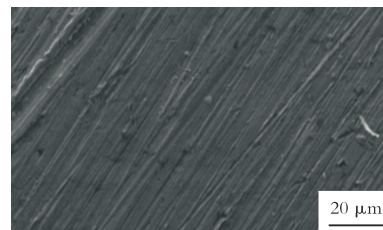


图7 熔覆层表面磨损形貌

3 结 论

(1) 低热输入量可以提升熔覆层厚度方向 WC 颗粒分布的均匀性, 但存在 WC 颗粒平面分布均匀性与弱结合问题。熔覆过程中, 粉末中 15% 的 WC 发生分解。

(2) 当 316L 熔覆层 WC 为 50% 时, 熔覆层硬度高于 580 HV_{0.3}, 硬度与基体相比提高了 2 倍。

(3) 在本研究摩擦磨损条件下, 熔敷层均以磨粒磨损为主, 摩擦系数约为 0.49, 磨损率约为 0.35 mg/(N·min)。

(4) 通过降低激光熔敷热输入量, 可制备 WC 厚度方向较均匀的复合涂层, 提升熔覆层耐磨性, 但需要优化 WC 平面分布均匀性与弱结合问题。

参考文献:

- [1] 陈华辉, 邢建东, 李卫. 耐磨材料应用手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [2] CHEN P, WU Z, YI Y, et al. Effect of surface Cr/C infiltration on microstructure, mechanical properties and wear resistance of high chromium cast iron [J]. China Foundry, 2022, 19 (3) : 218-224.
- [3] 程昊禹. 致密油复杂地层优快钻井技术研究[D]. 荆州: 长江大学, 2021.
- [4] 谢杰, 陈建云, 李子骏, 等. Ti-6Al-4V 合金表面改性技术[J]. 钛工业进展, 2013, 30(3): 1-6.
- [5] GUO C, ZHOU J, ZHAO J, et al. Effect of ZrB₂ on the microstructure and wear resistance of Ni-based composite coating produced on pure Ti by laser cladding [J]. Tribology Transactions, 2010, 54(1): 80-86.
- [6] 孙帅, 李崇桂, 李帅, 等. WC 含量对激光熔覆 Al₂O₃/TiO₂ 涂层组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2018, 43(12): 78-82.
- [7] 张浩, 梁国星, 刘东刚, 等. 高速钢表面激光熔覆 Fe-Al-Ti-WC 复合涂层[J]. 热加工工艺, 2020, 49(24): 80-83.
- [8] 吴厚平, 张立, 王元杰, 等. 化学包裹粉工艺制备粗晶粒 WC-Co 硬质合金[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(4): 701-705.
- [9] 黄伯云, 韦伟峰, 李松林, 等. 现代粉末冶金材料与技术进展[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 1917-1933.
- [10] 徐天昊. 铜合金表面制备 Ni 基涂层工艺与性能研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2022.
- [11] 李福泉, 冯鑫友, 陈彦宾. WC 含量对 WC/Ni60A 激光熔覆层微观组织的影响[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 117-123.
- [12] 刘洪喜, 冷凝, 张晓伟, 等. 40Cr 刀具表面激光熔覆 WC/Co50 复合涂层的微观组织及其磨损性能[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(1): 190-195.
- [13] 戎磊. 激光熔覆碳化钨颗粒增强镍基合金梯度熔覆层的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [14] 胡柏林. WC 含量与形态对镍基合金激光熔覆层组织及性能的影响[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
- [15] 李福泉, 陈彦宾, 李俐群, 等. Al 合金表面激光钨极氩弧复合熔注 WC 颗粒研究[J]. 中国激光, 2009, 36(10): 1718-1723.
- [16] CHEN Y B, LIU D J, LI L Q, et al. WC P/Ti-6Al-4V graded metal matrix composites layer produced by laser melt injection [J]. Surface and Coatings Technology, 2008(19): 4780-4787.
- [17] FARAHMAND P, KOVACEVIC R. Laser cladding assisted with an induction heater (LCAIH) of Ni-60%WC coating [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015 (222) : 244-258.
- [18] 刘洪喜, 纪升伟, 蒋业华, 等. 旋转磁场辅助激光熔覆 Fe60 复合涂层的显微组织与性能[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 115-120.
- [19] FOROOZMEHR E, LIN D, KOVACEVIC R. Application of vibration in the laser powder deposition process [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2009, 11(1): 38-44.
- [20] 钦兰云, 王维, 杨光. 超声辅助钛合金激光沉积成形试验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 76-81.
- [21] NING Z, LI T, HUI G, et al. Effect of ultra-fine WC particles on microstructural evolution and wear behavior of Ni-based Nano-CeO₂ coatings produced by laser [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(1): 20-25.
- [22] 杨胶溪, 张健全, 常万庆, 等. 激光熔覆 WC/Ni 基复合涂层[J]. 材料工程, 2016, 44(6): 110-116.
- [23] 疏达. 激光熔覆碳化钨增强镍基涂层的原位合成机制及性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- [24] 李倩, 陈发强, 王茜, 等. 激光熔覆 WC 增强 Ni 基复合涂层的研究进展[J]. 表面技术, 2022, 51(2): 129-143.
- [25] 桂王林, 陈吉, 崔霄. 脉冲电流密度对 Ni-WC/Co 纳米复合镀层摩擦磨损性能的影响[J]. 材料保护, 2018, 51(1): 72-75.
- [26] 车得福. 多相流及其应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- [27] ZHOU S W, XU T Y, HU C, et al. A comparative study of tungsten carbide and carbon nanotubes reinforced Inconel 625 composite coatings fabricated by laser cladding [J]. Optics & Laser Technology, 2021(140): 106967.

作者简介: 董 会 (1981—), 男, 山东济宁人, 副教授, 博士, 主要从事表面工程技术相关工作。

收稿日期: 2023-04-20

修改返回日期: 2023-11-02

编辑: 黄蔚莉