

# WC 含量对激光熔覆制备轨道车辆耐磨涂层性能的影响

栾长雨<sup>1, 2</sup>

(1. 辽宁铁道职业技术学院 铁道车辆学院, 辽宁锦州 121000; 2. 大连交通大学机车车辆工程学院, 辽宁大连 116028)

**摘要:** 通过激光熔覆在轨道车辆铝合金表面制备Ni-x%WC复合涂层, 利用扫描电镜、显微硬度计、摩擦磨损试验机研究了不同WC含量对复合涂层形貌、显微硬度及耐磨性的影响。结果显示, 复合涂层无明显的裂纹, WC颗粒大部分分布在涂层中下部, 熔覆层与基体形成良好的冶金结合, 结合区发生化学反应且有元素过渡, 表现为冶金结合。随着WC含量的增多, 复合涂层的气孔增大增多, 平均显微硬度先增大后减小, 硬度分布变化幅度变大, 磨损量先减小后增大; 当WC含量为15%时, 平均显微硬度最大, 磨损量最小, 磨损表面无明显沟槽, 主要发生粘着磨损。

**关键词:** 激光熔覆; 轨道车辆; 复合涂层; 显微硬度; 耐磨性

## 作者简介:

栾长雨(1988-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为铁道车辆空调、铁道车辆制动技术。E-mail: clyuan88@126.com

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)07-0868-05

## 基金项目:

国家自然科学基金(11202043); 辽宁省自然科学基金(201602112); 牵引动力国家重点实验室项目(TPL0906)。

## 收稿日期:

2021-11-17 收到初稿,  
2022-01-13 收到修订稿。

由于轨道车辆的轻量化要求, 铝合金被大量运用在轨道车辆及其零部件上<sup>[1-3]</sup>。我国目前轨道车辆车体基本都在使用铝合金, 例如铝合金车体顶盖、车轮、齿轮箱、刹车片及刹车盘等<sup>[4-7]</sup>。轨道车辆如刹车片、车轮等部分零件经常处于磨损环境下, 对铝合金的耐磨性能要求较高, 因此, 国内很多学者将铝合金的耐磨性作为一个热门课题。王菲等<sup>[7]</sup>利用锻压技术制备了汽车用新型Al-Mg-Si-In铝合金, 研究了锻造温度对铝合金的力学性能和耐磨性能的影响, 结果表明, 最佳的始锻温度和终锻温度分别为445 ℃和350 ℃, 抗拉强度和屈服强度最大, 磨损体积最小。王宏健等<sup>[8]</sup>利用光学显微镜、扫描电子显微镜、能谱分析仪等分析手段研究了不同制备工艺对A356铝合金的滑动磨损性能的影响, 结果显示经T6热处理和细化变质剂处理后的A356铝合金硬度最高, 耐滑动磨损性能最佳。虽然通过铸造工艺能提升铝合金的性能, 但零件的耐磨性能提升效果不明显。激光熔覆的快速凝固特点可细化铝合金表面的微观组织, 提升铝合金表面的耐磨性能。因此, 利用激光熔覆对铝合金表面进行改性处理成为一种可行的方法。本研究通过激光熔覆在轨道车辆铝合金表面制备Ni-x%WC复合涂层, 探究了不同WC含量对铝合金的耐磨性能的影响, 为提升轨道车辆铝合金表面的耐磨性能提供一种制备方法。

## 1 试验材料与方法

本研究采用的基体材料是A356铝合金(化学成分如表1所示)。熔覆试验前先预热至150 ℃, 降低涂层与基体之间的温度梯度, 防止开裂。熔覆粉末材料选用的是Ni粉(粒径0.1~10 μm, 纯度99.9%)和WC粉(粒径10~53 μm, 纯度99.7%)。在激光熔覆制备涂层试验前, 先将A356基体用SiC砂纸打磨, 去除表面的氧化层, 并用无水乙醇清洗, 去除表面的油脂。将Ni粉和不同含量(5%、10%、15%、20%)的WC粉初步混合, 用无水乙醇进行超声清洗, 然后放进烘干箱中在200 ℃烘干2 h, 再将烘干后的混合粉末放入混粉器中充分搅拌。激光熔覆试验采用同步送粉法。设备

采用的是最大功率为2 kW的连续波YAG激光系统和三轴数控工作台, 激光熔覆加工工艺参数如下: 激光扫描速率200 mm/min, 激光功率800 W, 激光光斑直径2 mm, 送粉速率为10 g/min, 搭接率45%。激光熔覆试验进行时使用氩气作为保护气体, 防止铝合金基体和混合粉末氧化。利用不同WC含量(5%、10%、15%、20%)的Ni基混合粉末制备Ni-x% WC涂层。激光熔覆完成后, 试样冷却至常温, 再用线切割机沿垂直于涂层表面方向将涂层切割成10 mm厚、10 mm×20 mm的方块, 放置在超声波清洗机中用无水乙醇进行超声清洗后, 将样品镶嵌制成10 mm×20 mm的长方形金相试样, 涂层横截面露出表面以待观察, 用砂纸对金相试样进行打磨并抛光, 再用无水乙醇超声清洗后, 用HF、HCl、HNO<sub>3</sub>和H<sub>2</sub>O体积比为2:3:5:90的水溶液对金相试样表面进行蚀刻, 无水乙醇清洗并吹干后利用自带能谱分析仪(EDS)的扫描电镜(SEM)对涂层横截面进行观察分析试样的形貌、微观组织和元素分布。

利用显微硬度计(HV-1000)对涂层横截面进行显微硬度测试, 载荷为0.2 kg, 加载时间为10 s, 间隔距离为50 μm。在室温下利用M-2000型摩擦磨损试验仪对涂层表面进行耐磨损性能测试, 恒定滑动速度0.3 m/s,

滑动距离300 m, 摩擦副为GCr15(硬度HRC60), 载荷15 N, 测试前后分别对试样进行称重, 计算磨损前后的磨损量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 复合涂层微观组织

图1显示了激光扫描速率200 mm/min, 激光功率800 W, 激光光斑直径2 mm, 搭接率45%时, 不同WC含量复合粉末制备的Ni-x% WC复合涂层横截面形貌。从图1中可以看出, 复合涂层致密均匀, 与基体之间结合紧密, 形成了一道明显的冶金结合区域, 大部分WC颗粒仍保持球形, 分布在复合涂层的中下部, 这主要是由于WC颗粒的高熔点和激光束辐照产生的大量热量在熔池中形成环流, 使WC颗粒快速均匀地分布在熔池中下部, 这是由于WC颗粒相比于Ni、Al具有更大的密度和更高的熔点, 且熔池内熔体环流效应较弱。对图1中1、2、3、4点进行EDS能谱分析, 各元素含量如表2所示。在WC颗粒与基体的结合界面发生了元素扩散, 熔化的微量W元素与Ni、Al、Si等元素形成紧密的结合

表2 图1中不同点的EDS能谱分析  
Table 2 EDS analysis of different points in Fig.1

点	Al	Si	Ni	W	C	w <sub>B</sub> /%
1	25.73	16.86	32.42	9.42	0.47	
2	22.86	14.42	29.63	10.83	0.75	
3	21.17	13.83	25.35	12.51	0.96	
4	20.58	11.56	21.32	14.65	1.45	

表1 A356铝合金化学成分  
Table 1 Chemical composition of A356 aluminum alloy

Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Zn	Ti	Al	w <sub>B</sub> /%
7.15	0.12	0.03	0.36	0.07	0.06	0.01	余量	

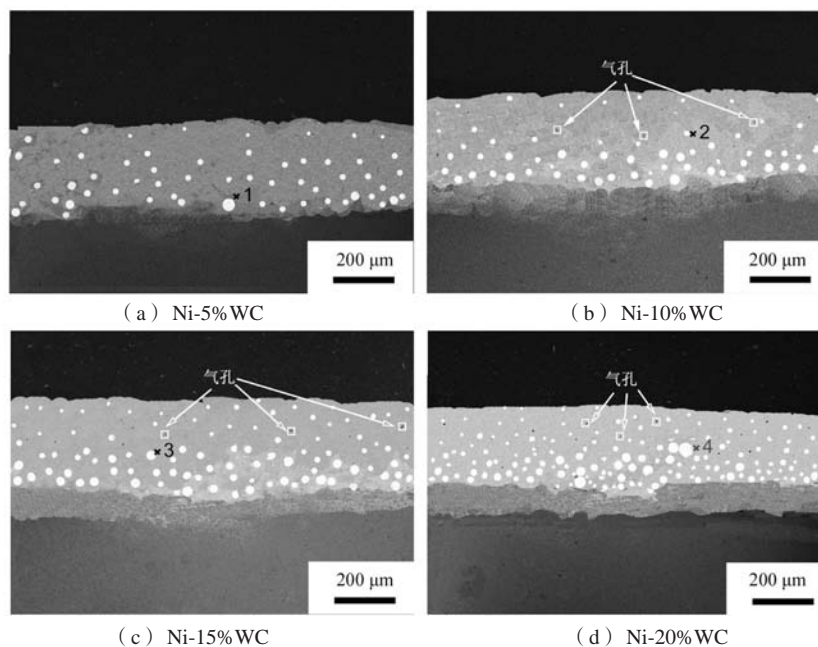


图1 复合涂层横截面形貌

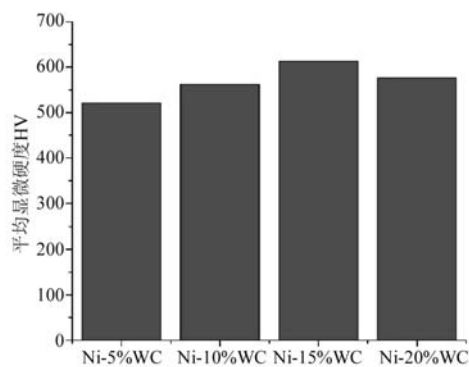
Fig. 1 Cross-sectional morphologies of composite coatings

面,共同起到了固溶强化的作用,将WC颗粒牢固地镶嵌在复合涂层中。图1a-d中复合涂层均不存在裂缝等明显缺陷,随着WC含量的增加,Wc颗粒分布越来越不均匀,更多的WC颗粒分布在复合涂层中下部<sup>[9]</sup>,并且开始出现气孔,Wc含量越高,气孔越多、越大。结合之前的研究<sup>[10-11]</sup>和EDS能谱分析结果,气孔产生的原因主要是在激光熔覆的过程中,大量热量的输入使得WC颗粒产生热分解,产生的碳与少量的氧气反应,生成一氧化碳和二氧化碳<sup>[12]</sup>,而激光熔覆是一个快速凝固的过程,气体没有足够的时间从熔池中逸出,在复合涂层中形成气孔,Wc含量越高,产生的气体越多,气孔越多、越大。

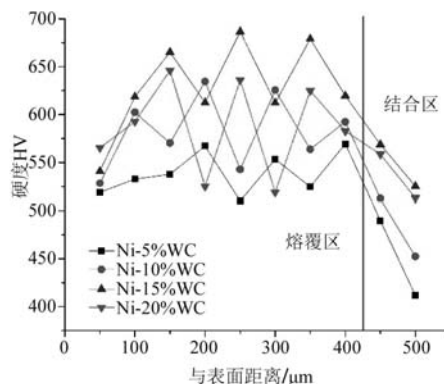
## 2.2 复合涂层显微硬度

图2显示了不同WC含量的复合涂层的横截面显微硬度。从图2中可以明显看出,当WC含量为5%时,复合涂层的平均显微硬度值为HV521.5,复合涂层横截面

上硬度分布较为均匀,上下浮动较小;增大WC含量至10%时,复合涂层的平均显微硬度值增大到HV562.4,硬度分布上下浮动变大;当WC含量增大到15%时,平均显微硬度增大到HV612.8,比Ni-5%WC复合涂层高17.5%,硬度分布上下浮动变化较大;继续增大WC含量至20%时,平均显微硬度增大到HV576.3,硬度分布上下浮动最大。这表明,随着WC含量的增大,平均显微硬度先增大后减小,硬度分布的浮动逐渐变大。这是由于WC的加入,在非平衡条件下,非均匀形核作用增大,晶界和位错增多,Wc颗粒部分熔化并向复合涂层中扩散,并与Ni、Al固溶体形成牢固的结合,Ni-Al固溶体起到了固溶强化作用,硬质颗粒WC则起到了颗粒强化作用,激光熔覆工艺的快速凝固特点,减少了成分偏析,进一步发挥了固溶强化作用。随着WC含量增大,复合涂层中出现气孔,气孔周边较为疏松,硬度偏低,导致显微硬度先增大后减小,硬度分布浮动变大。



(a) 试样平均显微硬度



(b) 试样显微硬度分布变化

图2 试验显微硬度及分布变化

Fig. 2 Average microhardness and microhardness distribution of samples

## 2.3 复合涂层耐磨损性能

不同WC含量复合涂层在相同条件下的磨损量如图3所示。可以看出,随着WC含量的增大,复合涂层的磨损量先减小后增大。因为WC具有良好的耐磨性能,

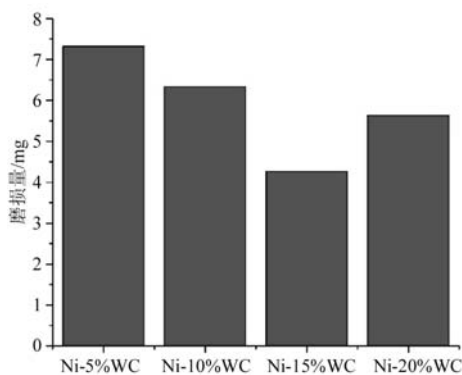


图3 不同WC含量复合涂层的磨损量

Fig. 3 Wear losses of composite coating with different WC contents

复合涂层区域有WC硬质颗粒,可以提高复合涂层的耐磨性。但WC含量过大时,复合涂层的耐磨损性能反倒降低,这是由于过量的WC颗粒导致气孔增大增多,使得气孔周围的区域疏松多孔,耐磨损性能不佳。从图4中不同WC含量复合涂层的磨损表面SEM形貌可以看出,当WC含量为5%时,磨损表面有较深、较宽的平行沟槽和部分磨粒,此时主要存在粘着磨损和部分磨粒磨损。当WC含量为10%时,磨损表面的沟槽变小、变浅,磨损机理由粘着磨损和少量磨粒磨损组成。当WC含量为15%时,磨损表面的沟槽几乎消失,说明此时只发生粘着磨损。继续增大WC含量至20%时,磨损表面有大的磨损坑存在,此时发生粘着磨损和部分磨粒磨损。未熔化的WC颗粒可以发挥强化作用,有效减弱磨损表面的犁沟作用,提升复合涂层的耐磨损性能,而Ni-20%WC复合涂层气孔周围的WC颗粒因结合不够牢固容易出现颗粒剥离脱落<sup>[13]</sup>,导致耐磨损性能

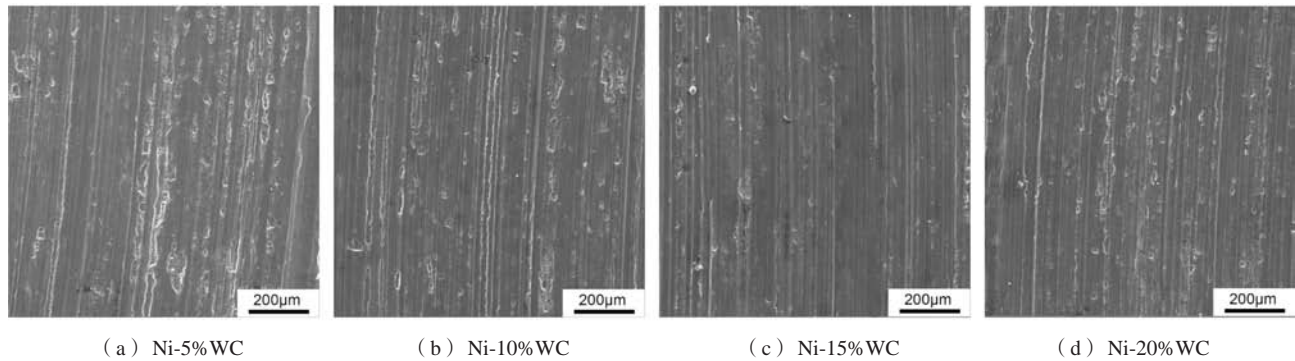


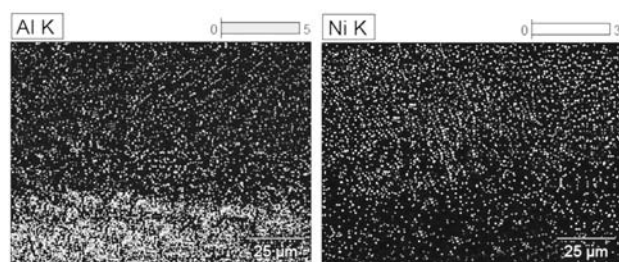
图4 复合涂层的磨损表面SEM形貌

Fig. 4 SEM morphologies of worn surfaces for composite coatings

减弱。

## 2.4 机理分析

激光熔覆过程中,高能激光的辐照使温度快速上升,将熔覆粉末Ni与铝合金基体熔化,大部分激光能量作用在熔覆粉末上,熔化的粉末堆积在基体表面形成熔覆层,少量激光能量作用在基体上,部分基体熔化形成熔池,整个熔覆层与熔池形成了一个中间温度高、四周温度低的温度梯度。在短时间内,熔覆层与熔池内部发生对流现象,熔化的Al被卷到熔覆层中,对熔覆层起到稀释作用,Ni粉在高温熔化后与基体中的Al在结合区发生反应生成AlNi和AlNi<sub>3</sub><sup>[14]</sup>,通过液-固相作用,而后冷却结晶形成熔覆层与基体形成紧密的结合,而WC由于其熔点较高无法全部熔化,激光熔覆的快速凝固使得WC颗粒被固溶于熔覆层中,且WC颗粒密度较大,容易下沉到熔池底部,使得WC颗粒大部分分布在涂层中下部(图1)。熔覆层与铝合金基体表面中间形成一道颜色介于熔覆层与基体之间的明显的结合区,结合区界面发生化学反应,生成化合物形成化学结合,对结合区进行面扫描分析,其结果如图5所示。可发现,从熔覆层向基体方向,各元素发生了明显的成分过渡,Al元素逐渐增多,Ni元素逐渐减少,这就证明了熔覆层与基体之间的结合属于冶金结



(a) Al元素

(b) Ni元素

图5 结合区各元素分布情况

Fig. 5 Distributions of different elements in bonding area

合<sup>[15]</sup>。从图1中看出,气孔主要分布在熔覆层中上部,气孔比较微小,呈现为圆球形,气孔孔径约为3~10 μm。虽然WC的熔点较高,但WC会在1 073 K时发生分解,生成W<sub>2</sub>C和C,分解的C与少量的氧气在熔池中发生反应,生成了少量CO和CO<sub>2</sub>,生成的气体在熔池底部形成气泡,气泡生长并上升逸出,但熔池快速凝固,凝固速度大于气泡上升的速度,导致有些气体还未来得及逸出,因此气泡在熔覆层中上部形成圆球形的气孔,WC含量越高,分解产生的气体越多,形成的气泡就越多。当增加WC含量时,WC作为增强相,可提高铝合金表面的耐磨性,但过量的WC导致熔覆层硬度变小,熔覆层中上部的气孔更多,导致其耐磨性降低。

## 3 结论

(1) 不同WC含量复合涂层无明显的裂纹,WC颗粒大部分分布在涂层中下部,熔覆层与基体形成良好的冶金结合,结合区发生化学反应且有元素过渡,表现为冶金结合。

(2) 随着WC含量增大,复合涂层中的气孔变大、变多,主要是由于WC热分解生成一氧化碳,又无法及时逸出,WC含量越高,生成的一氧化碳越多,气孔也就越多、越大。

(3) 随着WC含量增大,复合涂层的平均显微硬度先增大后减小,硬度分布浮动越来越大,这主要是因为Ni-Al固溶体的固溶强化和WC硬质颗粒的颗粒强化,使复合涂层的平均显微硬度先增大,Ni-15% WC复合涂层的平均显微硬度最大,但过量的WC使得气孔增大、增多,平均显微硬度减小,硬度分布浮动增大。

(4) WC硬质颗粒提升了复合涂层的耐磨损性能,随着WC含量的增大,复合涂层的磨损量先减小后增大,Ni-15% WC复合涂层的磨损量最小,磨损表面无明显沟槽,主要发生粘着磨损,Ni-20% WC复合涂层由于气孔周围WC的结合不牢固,容易剥落产生磨损坑。

## 参考文献:

- [1] 王正安, 汪明朴, 李周, 等. 轨道交通车辆大型材用7005铝合金的热处理特性 [J]. 中国有色金属学报, 2010, 20 (6): 1110-1115.
- [2] 孙巍, 李鹏伟, 王彦俊, 等. 轨道车辆用6N01铝合金型材挤压焊合线形态的研究 [J]. 轻合金加工技术, 2012, 40 (5): 33-35, 56.
- [3] 吕艳荣, 高安江. 高速列车车体用A6N01铝合金型材焊接裂纹研究 [J]. 热加工工艺, 2010, 39 (17): 169-170, 172.
- [4] 代颖辉. 挤压铸造A356铝合金重载车轮的模具设计 [J]. 铸造, 2016, 65 (2): 155-157, 161.
- [5] 田晓生, 刘杰, 张明新, 等. 液态模锻A356铝合金汽车轮毂的微观组织及性能 [J]. 热加工工艺, 2016, 45 (17): 150-151, 155.
- [6] 徐贵宝, 周峰, 马俊成, 等. 机车铝合金齿轮箱体选材及低压铸造工艺研究 [J]. 铸造, 2014, 63 (10): 987-990.
- [7] 王菲, 盛鹏程. 锻造温度对汽车用新型Al-Mg-Si-In铝合金性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (15): 128-132.
- [8] 王宏健, 司乃潮, 丁冉, 等. 制备工艺对A356滑动磨损性能的影响 [J]. 铸造, 2015, 64 (11): 1123-1128.
- [9] WU P, DU H M, CHEN X L, et al. Influence of WC particle behavior on the wear resistance properties of Ni-WC composite coatings [J]. Wear, 2004, 257 (1-2): 142-147.
- [10] AMADO J M, TOBAR M J, ALVAREZ J C, et al. Laser cladding of tungsten carbides (Spherotene (R)) hardfacing alloys for the mining and mineral industry [J]. Applied Surface Science, 2009, 255 (10): 5553-5556.
- [11] CHAO M J, WANG W L, LIANG E J, et al. Microstructure and wear resistance of TaC reinforced Ni-based coating by laser cladding [J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202 (10): 1918-1922.
- [12] ZHOU S, ZENG X, HU Q, et al. Analysis of crack behavior for Ni-based WC composite coatings by laser cladding and crack-free realization [J]. Applied Surface Science, 2008, 255: 1646-1653.
- [13] 蒋业华, 周荣, 张玉勤, 等. 颗粒体积分数对WC/铁基表面复合材料冲蚀磨损性能的影响 [J]. 铸造, 2002, 51 (7): 428-430.
- [14] MASSE J E, FABRE A, BARRALLIER L, et al. Microstructure and corrosion resistance of magnesium alloy ZE41 with laser surface cladding by Al-Si powder [J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202 (20): 4901-4914.
- [15] ZHANG P X, YAN H, SUN Y H. Microstructure, microhardness and corrosion resistance of laser cladding  $Al_2O_3@Ni$  composite coating on 304 stainless steel [J]. Journal of Materials Science, 2021, 56 (13): 1-16.

---

## Effect of WC Content on Wear Resistant Coating Properties of Rail Vehicles Prepared by Laser Cladding

LUAN Chang-yu<sup>1,2</sup>

(1. Liaoning Railway Vocational and Technical College, Institute of Railway Rolling Stock, Jinzhou 121000, Liaoning, China;  
2. Dalian Jiaotong University, College of Locomotive and Rolling Stock Engineering College, Dalian 116028, Liaoning, China)

### Abstract:

Ni-x%WC composite coating was prepared on aluminum alloy surface of rail vehicle by laser cladding. The effects of different WC contents on the morphology, microhardness and wear resistance of the composite coating were studied by scanning electron microscope, microhardness tester and friction and wear tester. The results showed that the composite coating had no obvious cracks, and most of the WC particles were distributed in the middle and lower part of the coating. The cladding layer formed a good metallurgical bonding with the matrix, and the bonding area had chemical reaction and element transition, which was manifested as the metallurgical bonding. With the increase of the WC content, the porosity of the composite coating increased, the average microhardness first increased and then decreased, the microhardness distribution changed more greatly, and the wear loss first decreased and then increased. When the WC content was 15%, the average microhardness was the largest and the wear loss was the smallest. There was no obvious groove on the wear surface, and adhesive wear mainly occurred.

### Key words:

laser cladding; rail vehicle; composite coating; microhardness; wear resistance