

# ER8 车轮钢激光熔覆涂层在酸雨环境下的 磨损与腐蚀性能分析研究

杨文斌, 夏金龙, 肖乾, 陈道云, 刘新龙

(华东交通大学 机电与车辆工程学院, 南昌 330013)

**摘要:** 目的 提高 ER8 高速车轮钢的耐磨和耐腐蚀性能, 增强车轮使用寿命。方法 在 ER8 车轮钢表面制备出 Fe 基合金粉末和 Co 基合金粉末 2 种涂层。借助 SEM、XRD、纳米压痕仪等表征设备分析涂层的金相组织形貌、物相种类和纳米硬度。利用 MFT-EC4000 往复电化学摩擦磨损试验机将试样置于酸雨溶液进行摩擦磨损试验及电化学腐蚀试验。结果 涂层表面组织致密均匀, 形成了良好的冶金结合, Fe 基与 Co 基合金涂层分别呈现出“胞状”与“蜂窝状”, 无明显孔洞、裂纹等缺陷。基体在低频 (1 Hz) 下发生轻微的磨粒磨损, 中高频 (2、4 Hz) 下出现了严重的剥落、点蚀现象, 其磨损机理主要为粘着磨损、氧化磨损和磨粒磨损, 涂层磨损区域则无明显腐蚀与剥落现象。在高频下, Fe 基涂层和 Co 基涂层的磨损率分别比基体减少  $46.10 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$  和  $39.85 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。同时, 涂层的阻抗值显著提高, 极化曲线测试结果显示, Fe 基涂层、Co 基涂层和基材的自腐蚀电位分别为  $-0.522$ 、 $-0.381$ 、 $-0.603 \text{ V}$ , 腐蚀密度分别为  $3.916$ 、 $0.312$ 、 $5.483 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。结论 修复后的车轮钢样品的耐磨损性能与耐腐蚀能力得到不同程度提高, 相比之下, 耐磨损方面 Fe 基合金涂层表现得更为优异; 耐蚀性方面, Co 基合金涂层略强于 Fe 基涂层。

**关键词:** 车轮钢; 激光熔覆; 合金粉末涂层; 摩擦磨损; 酸雨溶液; 电化学腐蚀

中图分类号: U270; TG174.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2023)01-0314-11

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.01.032

## Wear and Corrosion Resistance of Laser Cladding Coating on ER8 Wheel Steel in Acid Rain Environment

YANG Wen-bin, XIA Jin-long, XIAO Qian, CHEN Dao-yun, LIU Xin-long

(School of Mechatronics and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**ABSTRACT:** Laser cladding is an advanced surface modification technology, which can improve the surface properties such as

收稿日期: 2021-11-26; 修订日期: 2022-02-27

Received: 2021-11-26; Revised: 2022-02-27

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (51905172); 江西省自然科学基金 (20202BABL214028); 江西省教育厅科学技术研究项目 (GJJ180344); 江西省研究生创新专项资金项目 (YC2021-S462)

Fund: The Natural Science Foundation of China for the Youth (51905172); The Natural Science Foundation of Jiangxi, China (20202BABL214028); Science and Technology Research Project of Jiangxi Provincial Department of Education (GJJ180344); Postgraduate Innovation Special Fund Project of Jiangxi Province (YC2021-S462)

作者简介: 杨文斌 (1987—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为腐蚀摩擦、激光熔覆。

Biography: YANG Wen-bin (1987-), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: corrosion of friction and laser cladding.

通讯作者: 肖乾 (1977—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为轨道关系、激光熔覆。

Corresponding author: XIAO Qian (1977-), Male, Doctor, Professor, Research focus: rail relationship and laser cladding.

引文格式: 杨文斌, 夏金龙, 肖乾, 等. ER8 车轮钢激光熔覆涂层在酸雨环境下的磨损与腐蚀性能分析研究[J]. 表面技术, 2023, 52(1): 314-324.

YANG Wen-bin, XIA Jin-long, XIAO Qian, et al. Wear and Corrosion Resistance of Laser Cladding Coating on ER8 Wheel Steel in Acid Rain Environment[J]. Surface Technology, 2023, 52(1): 314-324.

wear resistance, corrosion resistance, fatigue wear resistance, oxidation resistance of different powder materials without changing the substrates. The work aims to improve the wear and corrosion resistance of ER8 high-speed wheel steel to increase the service life of wheels. In order to compare the wear resistance and corrosion resistance of different powder coatings and substrates in acid rain solution, the laser cladding technology was used to improve the performance of ER8 high-speed wheel steel and improve the service life of wheels, so as to cope with the bad service environment of train wheels. The wear and corrosion resistance of Fe-based alloy coating and Co-based alloy coating in simulated acid rain solution were compared and analyzed. The wheel steel was cut into sample blocks of 30 mm×20 mm×5 mm, and the circular gap with width of 10 mm and maximum depth of 2 mm was removed in the middle part of the matrix material sample. The substrate was polished smooth and cleaned with sandpaper. Under the laser power of 1 600 W, spot diameter of 4 mm, scanning rate of 7.5 mm/s and lap rate of 50%. Fe-based and Co-based alloy coatings were prepared by Laserline LDF6000-100 laser on the substrate surface. Then, the microstructure morphology, phase type and nano hardness of the coating were analyzed by SEM, XRD and nano indentation apparatus. With the help of MFT-EC4000 reciprocating electrochemical friction and wear tester, the samples were placed in acid rain solution for friction and wear test and electrochemical corrosion test. According to the results of uniform coating on the surface of compact structure, good metallurgical combination, Fe-based and Co-based alloy coating respectively presented "cellular" and "honeycomb". There was no obvious defects such as holes and cracks. The coating hardness is significantly higher than that of matrix hardness. The solid solution and carbide formation made Fe-based coating hardness more outstanding. The HV hardness was up to 714.4 on average. The substrate had light wear at low frequency (1 Hz) and, severe spalling, pitting corrosion at high frequency (2 Hz, 4 Hz). The wear mechanisms were mainly adhesion wear, oxidative wear and abrasive wear. There was no obvious corrosion and peeling phenomenon in the coating wear area. At high frequency, the wear rate of Fe-based coating and Co-based coating decreased by  $6.10 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$  and  $39.85 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ , respectively. At the same time, the impedance value of the coating in acid rain solution was significantly increased, and the polarization curve test results showed that the self-corrosion potential of Fe-based coating, Co-based coating and substrate was -0.522 V, -0.381 V and -0.603 V, respectively. The corrosion densities were  $3.916 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,  $0.312 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  and  $5.483 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , respectively. The wear resistance and corrosion resistance of the repaired wheel steel samples are improved to varying degrees. In comparison, the wear resistance of the Fe-based alloy coating is more excellent. The corrosion resistance of Co-based alloy coating is slightly stronger than that of Fe base coating.

**KEY WORDS:** wheel steel; laser cladding; alloy powder coating; friction and wear; acid rain solution; electrochemical corrosion

我国高速铁路通车里程和动车组保有量快速增长, 伴随而来的是运营维护成本的快速增长, 其中一部分成本来自于高速列车车轮的维护与更换。通常, 车轮损伤主要是由磨损和滚动接触疲劳及复杂的服役环境引起, 其中, 恶劣的酸雨环境就是一种典型的例子。如果不及时发现并处理车轮损伤, 轻则影响乘车体验, 重则可能导致脱轨等灾难性后果, 从而造成重大人员伤亡及巨大财产损失。据统计, 每年因腐蚀与锈蚀造成的钢铁损失约占钢铁年产量的 10%至 20%, 我国每年在腐蚀层面上造成的经济损失高达 2 300 亿元以上<sup>[1]</sup>, 而严峻的酸性环境会进一步加剧腐蚀的发生。目前常用的镟修工艺可以去除车轮表面损伤恢复车轮使用状态, 但会快速减小车轮尺寸, 导致明显缩短车轮服役寿命, 因此车轮损轮损伤的原位修复是更为理想的修复工艺。

由于激光熔覆具有耐蚀、耐磨、耐热及抗氧化等性能, 被广泛用于航空航天、矿山机械、汽车、石油化工、铁路、电力等行业<sup>[2-3]</sup>。与埋弧焊、等离子焊

接、气电立焊等表面改性技术相比, 激光熔覆技术具有稀释率低、涂层孔隙率低、与基体材料结合强度高、材料选择性广、无环境污染等特点<sup>[4]</sup>。目前, 已有学者尝试将激光熔覆应用于列车车轮及钢轨的表面强化, 以提高其耐磨性和抗滚动接触疲劳性能以及耐腐蚀性, 并在此方面做了大量研究<sup>[5-6]</sup>。Lewis 等<sup>[7]</sup>在全尺寸 R260 钢轨上熔覆了一种 Co 基合金涂层和马氏体不锈钢涂层并进行了测试, 结果表明, 熔覆处理后, 钢轨的疲劳强度和耐磨损性能得到显著提高。Gamon 等<sup>[8]</sup>利用激光熔覆技术在铁路缓冲头上制备锰青铜和铝青铜涂层, 发现熔覆层可以显著减少缓冲头的滑动磨损。Wang 等<sup>[9]</sup>对熔覆后的重载轮轨材料磨损进行了相关试验, 结果表明, 激光熔覆处理前后的轮轨材料表面由明显的粘着磨损和剥离损伤向犁沟趋势变化。慕鑫鹏等<sup>[10]</sup>利用 CO<sub>2</sub> 多模拟激光器在轮轨材料表面制备出 Co 基与 Fe 基, 并进行了滚动摩擦磨损试验, 试验研究表明, 经激光熔覆处理后, 试样的磨损率得到了显著降低。Zhu 等<sup>[11]</sup>采用滚动接触试验研

究了车轮局部熔覆不锈钢涂层的磨损与滚动接触疲劳行为,发现涂层耐磨性及滚动接触疲劳性能均优于基体。可见,目前的研究主要集中于利用激光熔覆技术对车轮及钢轨进行表面强化,对于激光熔覆修复车轮的研究仍有待加深。本文考察了修复后车轮钢的耐磨损与耐腐蚀性能,并对界面区域与基体摩擦学性能的一致性进行了对比评估,研究结果可对激光熔覆在车轮损伤修复方面的工程应用提供一定的技术指导。

由于酸雨环境与列车运行速度多变性,列车车轮在面临恶劣服役环境的系统研究尚不充分。本文利用传统激光熔覆技术在 ER8 车轮钢表面制备出在激光熔覆领域应用广泛的 Fe 基和 Co 基合金局部修复涂层,主要因为 Fe 基和 Co 基合金粉末属于具有脱氧造渣能力的自溶性合金粉末,且制备简单、性能优异。将酸雨溶液作为第三介质,借助 MFT-EC4000 往复电化学摩擦磨损试验机对处于酸雨环境下的车轮试样进行模拟不同运行速度的滑动摩擦磨损试验,同时在酸雨溶液中进行电化学腐蚀试验,通过分析涂层的金相组织结构、显微硬度、磨损形貌、电化学腐蚀等情况,分别揭示了基体、Fe 基和 Co 基合金涂层在酸雨环境下滑动摩擦磨损过程中的损伤机理和电化学腐蚀行为。

1 试验

1.1 试样制备

采用线切割的方式从列车车轮(ER8 车轮钢)踏面以下 5 mm 处切取尺寸为 30 mm×20 mm×5 mm 的样块若干,并在样品中间部分切割去除宽度为 10 mm、最大深度为 2 mm 的圆弧缺口,如图 1 所示。在激光功率为 1 600 W、光斑直径为 4 mm、扫描速率为 7.5 mm/s、搭接率为 50%、车轮钢基体预热 200 ℃ 的条件下,利用激光熔覆技术对圆弧缺口进行修复,用金相砂纸将工作面逐级打磨至 2 000 # 砂纸,研磨抛光后进行超声清洗,烘干密封保存备用。车轮钢的化学成分见表 1,Fe 基和 Co 基合金粉末化学成分分别见表 2 和表 3。

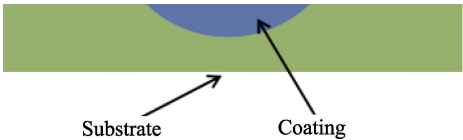


图 1 ER8 车轮钢涂层试样  
Fig.1 Schematic diagram of ER8 wheel steel coating specimen

表 1 ER8 车轮钢的化学成分  
Tab.1 Chemical composition of ER8 wheel steel

wt. %						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe
0.52	0.26	0.73	0.016	0.002	0.25	Bal.

表 2 Fe 基合金粉末化学成分  
Tab.2 Chemical composition of Fe-based powder

wt. %					
C	Si	B	Cr	Ni	Fe
0.8-1.2	2.0-3.0	1.2-1.8	18.0-20.0	9.0-12.0	Bal.

表 3 Co 基合金粉末化学成分  
Tab.3 Chemical composition of Co-based powder

wt. %						
C	Si	W	Cr	Ni	Fe	Co
0.9-1.2	0.9-1.3	4.0-4.8	26.0-27.5	0.8	0.9	Bal.

1.2 材料及方法

试验中所用的酸雨溶液的组成成分及含量见表 4,严格按照表内成分及含量科学合理地选取相应的化学试剂,采用精度为 0.005 g 的电子天平称取 17.76 g (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、10.00 g NaNO<sub>3</sub>、1.50 g Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O、1.00 g NaCl、1.00 g KNO<sub>3</sub>、0.96 g Mg (SO)<sub>4</sub>,误差规定在 0.01 g,将称取好的药品置于 500 mL 的烧杯中,加入 500 mL 的去离子水,并用玻璃棒搅拌待溶解完成后移至 5 L 的容器中,加入相同的去离子水直至 5 L,溶液的 pH 值控制在 3.1~3.5 范围内,如若达不到标准,可使用冰醋酸和 NaOH 固体进行调节。

表 4 酸雨溶液的组成成分及含量  
Tab.4 Composition and content of acid rain solution

μmol/L							
Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Mg <sup>2+</sup>	pH
76	17	171	9	12	170	8	3.1-3.5

摩擦磨损试验中,将试验样品放置在 MFT-EC4000 试验仪的试验台上,固定载荷为 10 N,酸雨溶液的流速为 4.5 mL/min,陪试件选用 φ6 mm 的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 球体,磨痕长度为 5 mm,球体的摩擦行程调整为刚好被涂层与基体平分。酸雨环境中不同滑动摩擦频率分别设置为低频(1 Hz)、中频(2 Hz)和高频(4 Hz),摩擦时间为 90 min。利用维氏硬度仪(Qness-Q60)测量试样表面的硬度,试验结束后,借助 SEM、XRD 和 OM 等表征设备对结果进行表征分析,为保证试验结果的可靠性,所有试验均重复 2 次。

在电化学腐蚀试验中,将打磨好的试样与配制好的酸雨溶液取出备用,分析设备采用电化学磨损仪工作站,在 pH 值为 3.5 的酸雨溶液中测试试样的极化曲线和交流阻抗。采用传统的三电极体系,涂层和基体试样分别为工作电极,Pt 电极为辅助电极,饱和甘汞电极作为参比电极(内充饱和 KCl 溶液)。首先将试样放入酸雨溶液上浸泡一段时间,以稳定开位电路,极化曲线的扫描范围相对开路电位为-1.5~1 V,扫描速率为 1 mV/s,并从极化曲线获得腐蚀参数。在稳定开位电路后,对试样进行电化学阻抗谱的测量,

扫描频率为  $10^5 \sim 0.01$  Hz, 所有试验均保持在室温 ( $26 \pm 1$ )  $^{\circ}\text{C}$  下进行。在室温下, 进行电化学阻抗谱(EIS)和极化曲线的测试, 研究涂层与基体试样在酸雨溶液中的腐蚀行为。

## 2 结果与讨论

### 2.1 车轮试样的金相组织和显微硬度

2 种不同合金涂层的显微组织结构如图 2 所示。可以看出, Fe 基合金涂层(见图 2a)与 Co 基合金涂层(见图 2b)组织形貌差异较为明显, 这是因为温度梯度( $G$ )和凝固速率( $R$ )对显微组织结构起着决定性的作用, 形状控制因子( $G/R$ )值对涂层的微观结构形貌有显著影响<sup>[12-13]</sup>。涂层表面均未发现明显的气孔、裂纹, 组织结构均匀而致密, 基体与涂层形成了良好的冶金结合。合金涂层由枝晶组织和共晶组织组成。在激光熔覆过程中, 当激光束离开熔池时, 涂层表面温度急剧下降, 合金粉末迅速与基体熔凝, 从而导致枝晶的形成。枝晶组织紧密排列, 且涂层表面出现大量弥散分布的物质, 这些物质是由于激光束离开熔池时, 未凝固的液态金属再次成核凝固而形成的固态合金, 也就是共晶组织, 液态金属的凝固速度则决定了共晶组织的形貌特征。与“胞状”的 Fe 基合金涂层组织相比, “蜂窝状”的 Co 基合金涂层组织表现得更为致密。另外, 2 种合金涂层热影响区的组

织呈现细片状的索氏体, 这是由于在激光束的高温作用所导致<sup>[14]</sup>。

2 种合金涂层的 XRD 谱图如图 3 所示。利用 Jade6.5 软件分析可以明显看出, 不同的涂层衍射峰有较大的差异, 其中 Fe 基合金涂层物相主要由奥氏体和碳化物  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  组成, 其中 Ni 元素大量固溶于奥氏体内, 形成 (Fe, Ni) 固溶体, 同时粉末中高含量的 Cr 元素通过高温易与 C 发生复杂的化学反应, 形成碳化物  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ <sup>[15]</sup>, 而这些碳化物可以有效提高材料的硬度与强度。Co 基合金涂层主要由  $\gamma\text{-Co}$  相与  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  构成, 同样在高温时, Co 基合金粉末中含量较高的 Cr 元素易与 C 形成碳化物  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ 。2 种熔覆涂层及基体的剖面硬度如图 4 所示, 熔覆涂层厚度约为 1 mm。涂层硬度较基体而言有明显提高, 且 Fe 基合金涂层硬度远高于 Co 基合金涂层, 平均硬度为 711.4HV。在涂层形成过程中, 熔池液体的快速冷却会使其产生固溶强化, 使得涂层硬度得到了明显提高<sup>[10]</sup>。界面区域硬度随着剖面深度的增加而迅速减小, 直至减小到 300.0HV 左右后保持稳定, 接近基体平均硬度值(287.0HV)。这是因为剖面的深度越深, 材料吸收的能量就越少, 以至于没有足够的能量使组织发生相变。这也说明界面区域的结构组织与基体的结构更为接近。Co 基合金涂层厚度的增加及热影响区域并未对 Co 基涂层的硬度产生较大影响, 涂层剖面与基体的硬度较为接近。

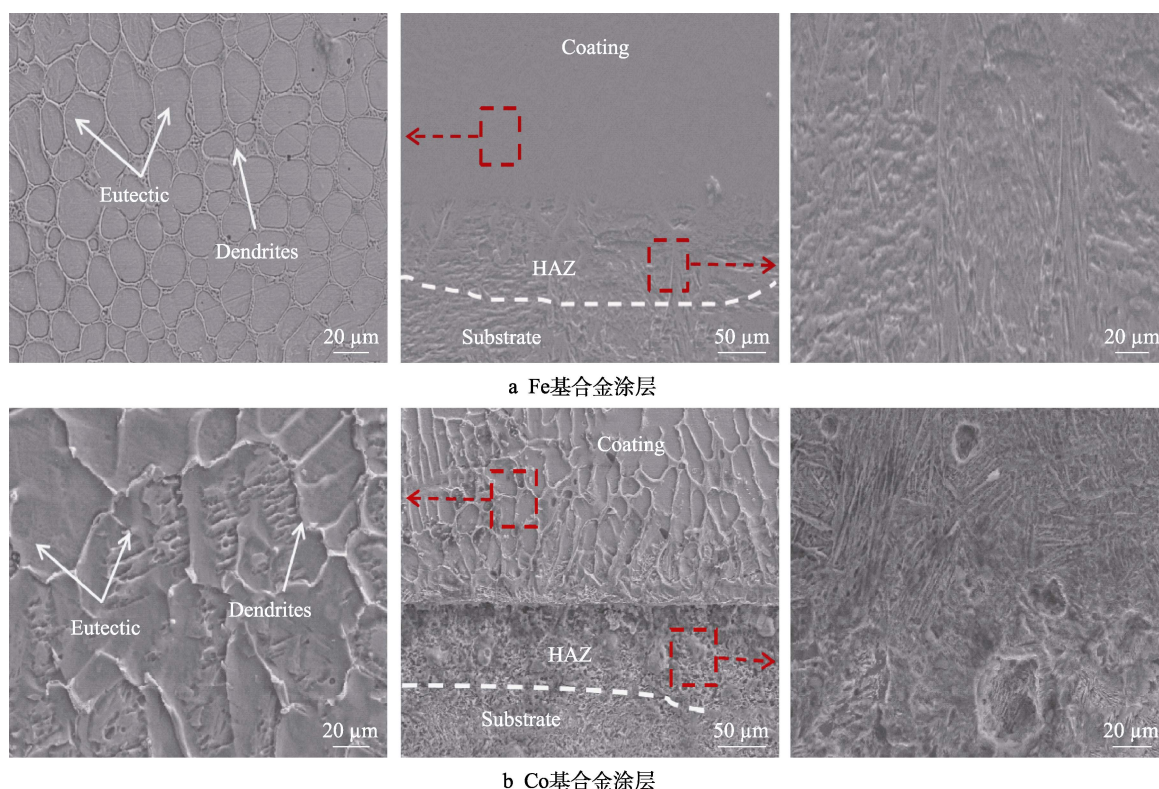


图 2 涂层试样微观组织

Fig.2 Micro structure of coating specimens: a) Fe-based coating; b) Co-based coating



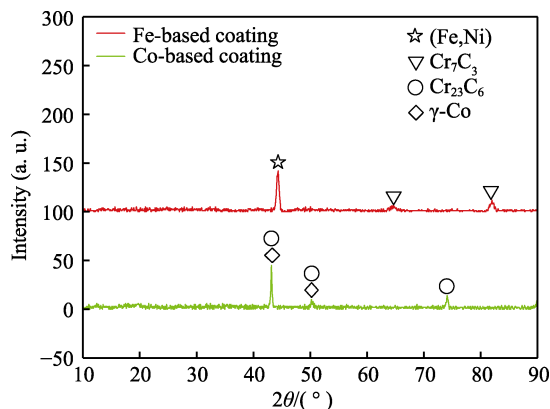


图3 涂层的XRD衍射谱线  
Fig.3 XRD pattern of coatings

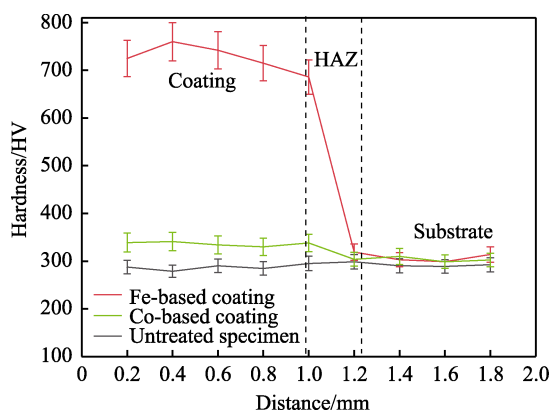


图4 涂层截面硬度曲线  
Fig.4 Hardness curve of coating section

## 2.2 摩擦系数

Fe基和Co基合金涂层在不同滑动频率条件下的试验摩擦系数曲线如图5所示。可以看出,摩擦系数与滑动速度成反比,且主要分为剧烈摩擦阶段和稳定摩擦阶段。由于试验前试样表面光滑并且存在吸附薄膜<sup>[16]</sup>,故摩擦副与试样表面刚接触时的初始阶段摩擦系数波动较大。随着时间的推移,滑动过程中表面和

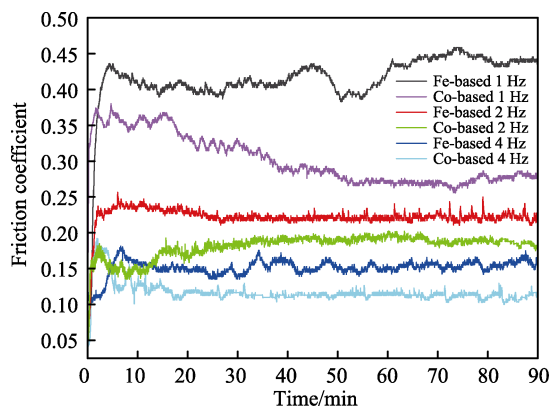


图5 不同滑动速度下涂层的摩擦系数随时间的变化曲线  
Fig.5 Variation curves of friction coefficient of coating with time at different sliding speeds

吸附膜会逐渐遭到不同程度的破坏,试样磨面慢慢变得粗糙,导致摩擦系数急剧上升。同时,摩擦过程中产生的摩擦热会进一步导致摩擦系数的增大。经过跑合后,车轮钢试样表面达到稳定磨损的状态,摩擦系数趋于平稳。随着滑动频率的增加,摩擦系数逐渐下降,主要是因为滑动速度越高,磨擦表面产生氧化物越多,氧化物则能起到一定的润滑减磨作用,从而使摩擦系数减小<sup>[17]</sup>。

## 2.3 磨痕形貌

图6和图7给出了不同滑动速度下涂层与基体结合区域的表面磨损形貌SEM图和OM图。综合图6和图7可以看出,从界面区域往基体位置走向,磨损程度明显加重,摩擦面损伤形貌总体上由明显的粘着磨损和严重的剥离损伤向磨粒磨损转变。从图6和图7中Fe基合金涂层界面区域在滑动频率为1、2、4 Hz时的界面结合区域磨损形貌可以看出,涂层与基体之间的磨损形貌相差较大,滑动频率为1 Hz时,Fe基涂层在酸雨环境下摩擦表面光滑,并发现少部分的磨屑粘附在接触面上,主要表现为轻微的磨粒磨损。随着滑动速度的加快,犁沟逐渐明显,磨屑颗粒变多,直接导致的结果是磨面上的黑色氧化物明显增多、磨痕宽度增大。从图6和图7中Co基合金涂层界面区域在滑动频率为1、2、4 Hz时的界面结合区域磨损形貌可以看出,其摩擦磨损机制与Fe基合金涂层类似,但点蚀与氧化程度则更为轻微。与2种涂层相比,基体的腐蚀与磨损则较为严重,摩擦面上出现明显的剥落坑、氧化层、犁沟,说明车轮材料之间的磨损主要为粘着磨损、氧化磨损以及磨粒磨损3种磨损机理,且这种现象随着滑动速度的加大越加严重。这是由于在滑动摩擦过程中,试样表层材料发生脆断从试样表面剥落形成硬质颗粒,这些犁沟是由硬度较大的颗粒与试样表面发生相对滑动而形成的。同时,反复挤压变形使得试样最终在摩擦磨损和剪切力的共同作用下,受到酸雨溶液点蚀的部位发生粘着剥落,形成剥落坑。摩擦副之间往复摩擦产生了较高的摩擦热,在摩擦热和酸性环境的共同作用下,磨面形成黑色氧化物。另外,酸雨溶液中的氯离子以及一些呈酸性的离子会破坏试样表面氧化膜的形成,以及沿着微裂纹向试样深度方向渗透,促进点蚀的形成,加快腐蚀速率<sup>[18]</sup>。综合图6和图7可以观察到,分界线的两端呈现出2种完全不同的摩擦磨损形貌,基体的损伤程度远远高于涂层,而界面区域的磨损形貌则更趋向于基体部分,从某种程度说明界面区域的摩擦学性能与基体存在一定程度的相似性。

以2 Hz滑动频率下的EDS平面扫描分析结果为例,如图8所示。涂层与基体Cr元素分布差异十分明显,基体上检测到少量Cr,是因为摩擦时基体上携带了少许涂层的磨屑。O元素主要集中分布在剥落

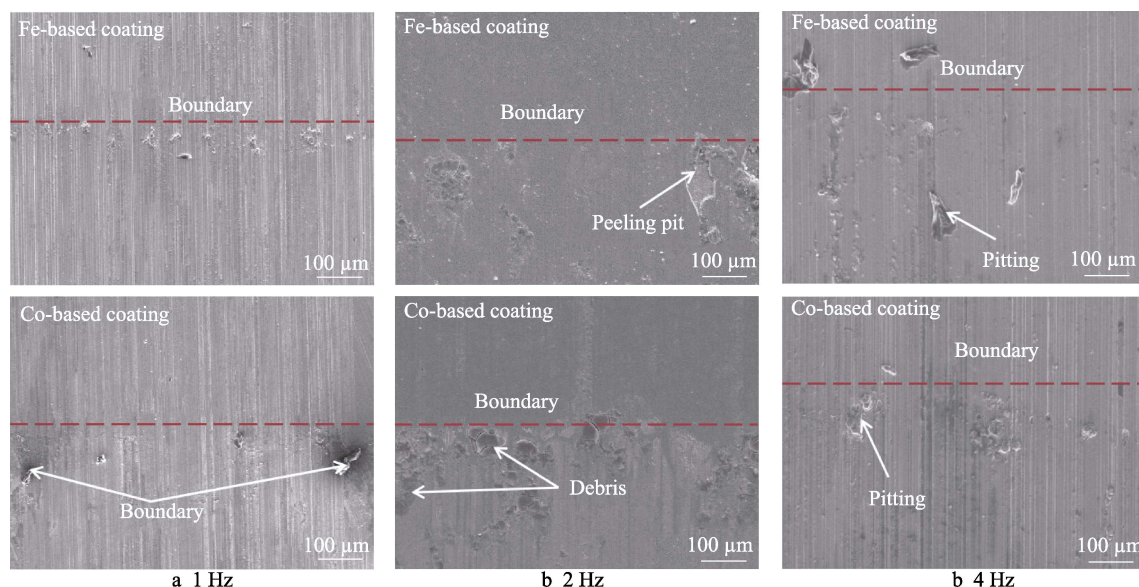


图 6 试样表面损伤形貌的 SEM 图像  
Fig.6 SEM images of specimens surface damage morphology

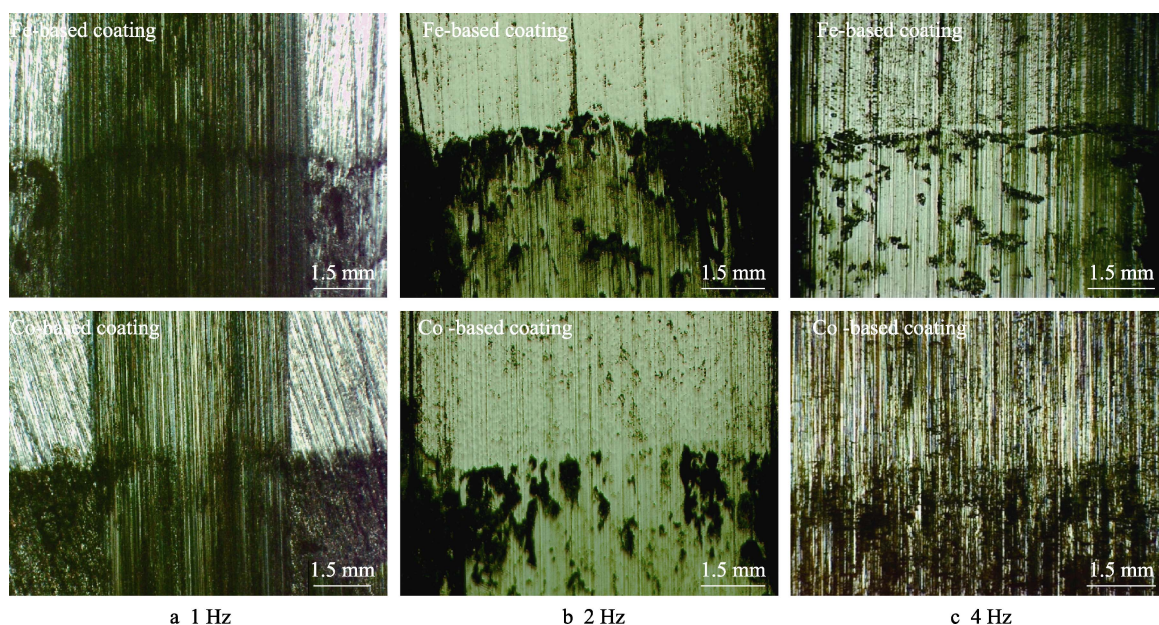


图 7 试样表面损伤形貌的 OM 图像  
Fig.7 OM images of specimens surface damage morphology

的点蚀坑与黑色的氧化层中,而涂层表面 O 元素分布均匀,并未发现集中现象,这也恰恰说明涂层的高耐蚀性和高抗氧化性。

## 2.4 磨损率

图 9 与图 10 分别为滑动摩擦试验后磨痕的 3D 光学轮廓形貌和不同频率下涂层与 ER8 基体的磨痕二维轮廓曲线。基体在 3 种频率下的磨痕深度与宽度变化明显,1 Hz 下基体的磨痕深度与宽度分别约为 5.26 μm 和 540 μm。随着频率的增加,磨痕深度与宽度也随之增加,4 Hz 下磨痕深度和宽度分别为 43.54 μm 和 1 100 μm 左右,呈现出中高碳钢耐磨性较差的特

性。涂层在 3 种频率下磨痕的深度和宽度与基体相比都稍有改善,其中 Fe 基合金涂层在 1 Hz 的滑动频率下磨痕深度约为 4.1 μm,4 Hz 频率下的磨痕深度增至 10.3 μm。同等条件下,Co 基合金涂层的磨痕深度和宽度略微大于 Fe 基合金涂层,但都小于基体材料的深度和宽度。图 11 为 ER8 车轮钢基体和涂层在不同频率下的磨损率,其计算公式如式(2)所示。

$$k = \frac{V}{2SnW} \quad (1)$$

式中:  $k$  为磨损率,  $\text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ ;  $V$  为磨损量,  $\text{cm}^3$ ;  $S$  为滑动单程长度,  $\text{cm}$ ;  $n$  是循环次数;  $W$  为载荷,  $\text{N}^{[19]}$ 。基体材料在不同频率下都表现出高磨损率且磨



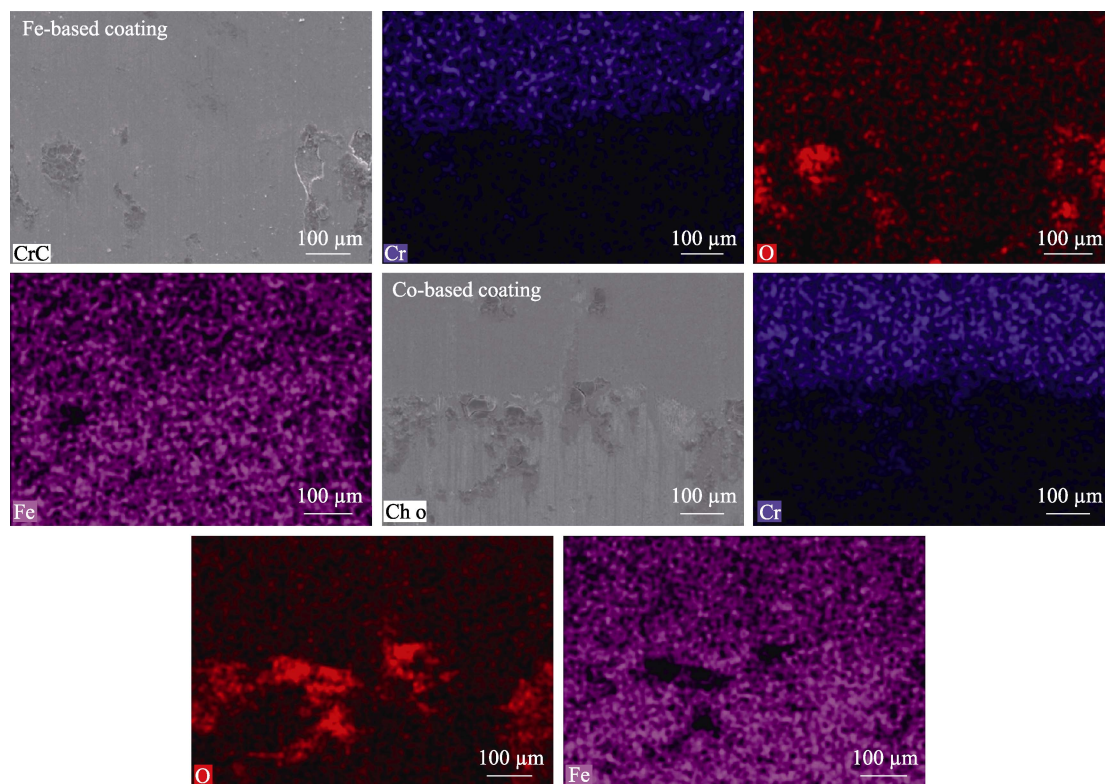


图8 2 Hz 下界面区域磨痕形貌的EDS元素分布

Fig.8 EDS element distribution of wear trace morphology in interface region at 2 Hz

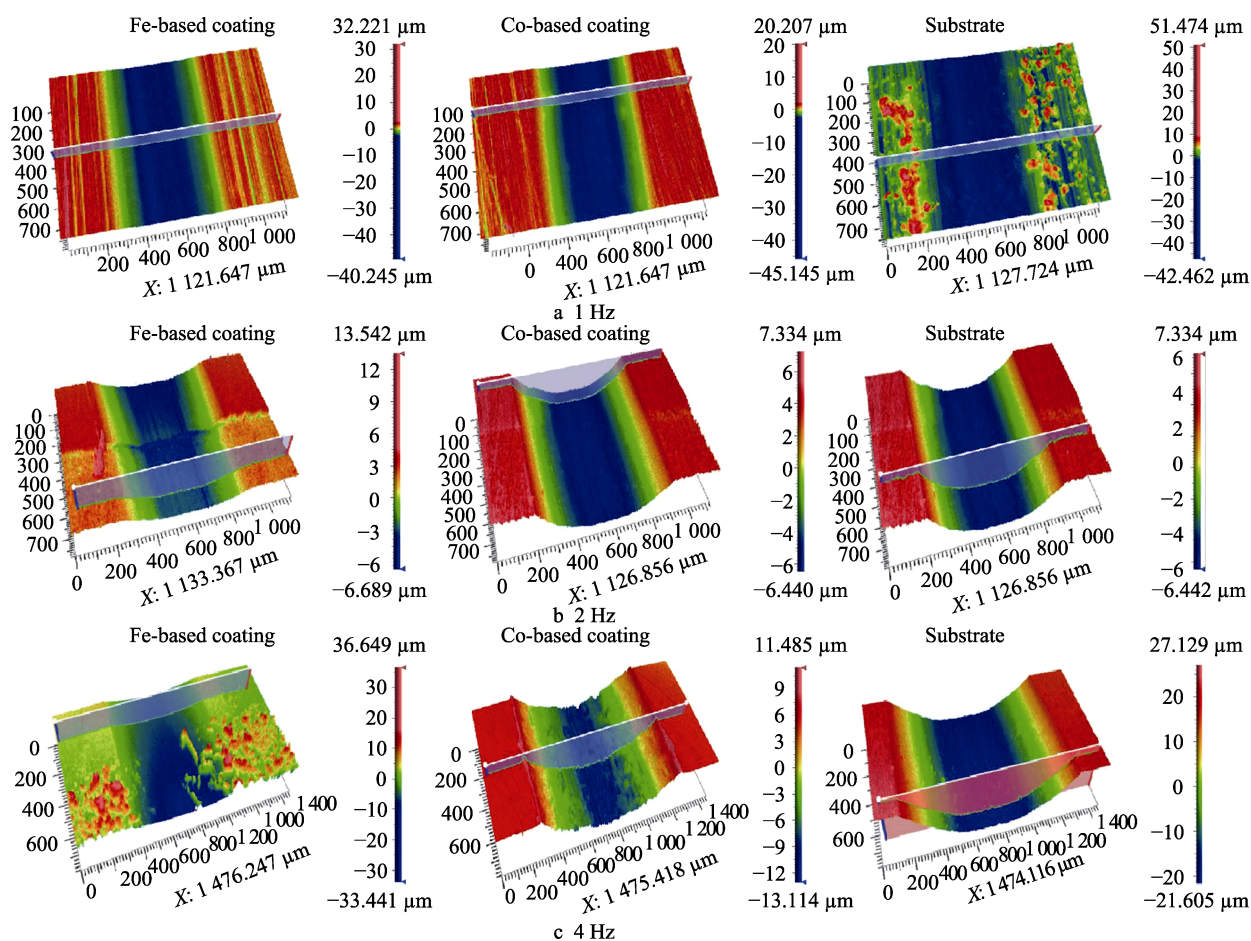


图9 不同滑动速度下涂层与基体的磨痕3D轮廓形貌

Fig.9 3D contour morphology of wear traces of coating and substrate at different sliding speeds

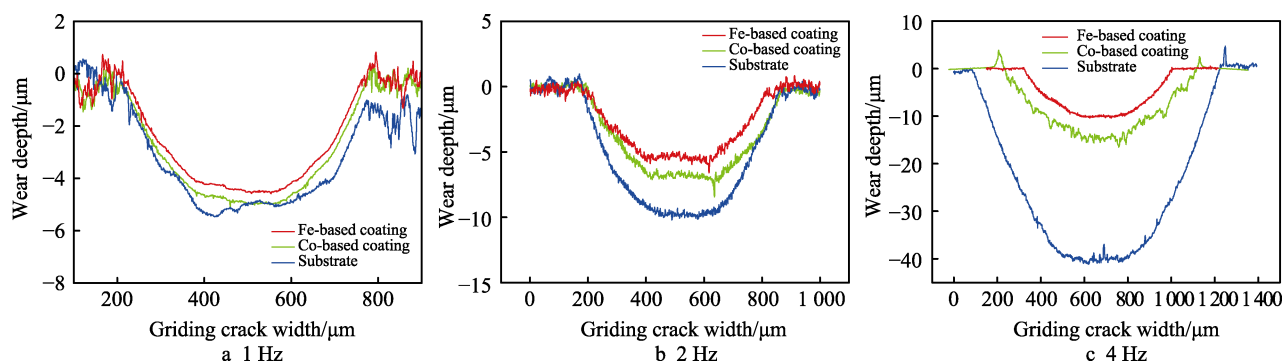


图 10 不同滑动速度下基体与涂层的磨痕轮廓变化曲线

Fig.10 Change curves of wear trace profile of substrate and coating at different sliding speeds

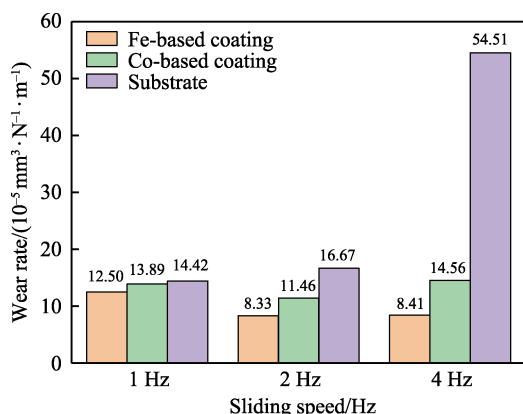


图 11 不同滑动速度下基体和涂层的磨损率

Fig.11 Wear rates of substrate and coating at different sliding speeds

磨损率与频率成正比。低频与中频条件下熔覆涂层的磨损率均略微小于基体材料,随着速度的增加,涂层的磨损率基本保持不变,而基体磨损率则显著增加。通常情况下,熔覆涂层的磨损率与滑动速度成正比,这是由于随着滑动速度的增加,容易在界面位置出现明显的摩擦热效应,从而导致涂层破裂,失去保护效果,形成更为严重的剥落,增大磨损率<sup>[20]</sup>。但由于本研究的循环次数  $n$  不同,故存在涂层磨损率随频率增加而降低的现象。另外,基体试样的磨损率在高频作用下显著上升,出这一情况的原因可能是因为在高速往复摩擦过程中,基体材料由于滑动速度过高而出现局部破裂,破裂脱落的部分形成硬质磨屑,增加了磨损量。

## 2.5 电化学腐蚀

3 种试样的电化学阻抗谱如图 12 所示,阻抗谱显示出半圆形状,且半圆都呈现出电容型,半圆的直径大小直接反应的是试样表面的阻抗大小。可以明显看出,Co 基涂层直径最大,其次是 Fe 基涂层,半径最小的为基体材料。根据电化学腐蚀的特点,采用如图 13 所示的等效电路对基体和涂层的阻抗测试结果进行拟合,其中图 13a 和图 13b 分别为基体与涂层的等效电路。相元用  $Q$  和  $n$  表示,其中  $CPE_{bl}$  和  $CPE_{dl}$  分别为基体界面电容和双电层电容有关的常数相元。 $CPE$  是因系统原因形成的非理想电容的常相位元件,在模拟中常常引入作为纯电容,

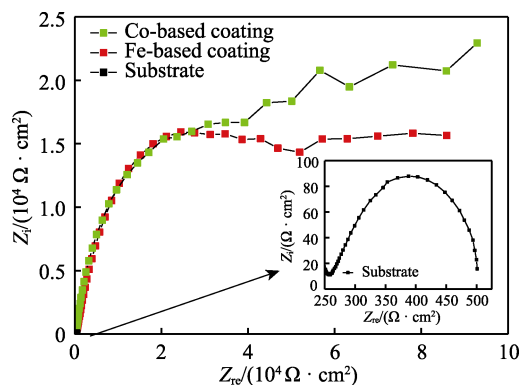


图 12 3 种试样在酸雨溶液中的电化学阻抗谱

Fig.12 Electrochemical impedance spectra of three specimens in acid rain solution

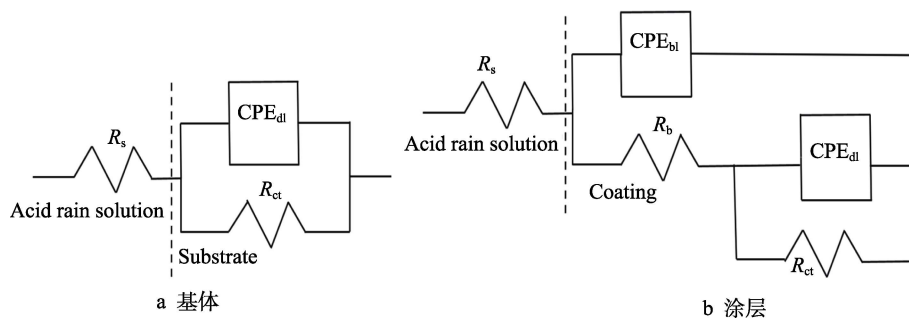


图 13 基体与涂层在酸雨溶液的等效电路:

Fig.13 Equivalent circuit of substrate and coating in acid rain solution: a) substrate; b) coating



表 5 3 种试样在酸雨溶液中的电化学阻抗拟合结果  
Tab.5 Electrochemical impedance fitting results of three specimens in acid rain solution

Specimens	$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Q_{bl}/(\text{F} \cdot \text{cm}^{-2})$	$n_{bl}$	$R_b/(\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Q_{dl}/(\text{F} \cdot \text{cm}^{-2})$	$n_{dl}$	$R_{ct}/(\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2)$
Substrate	1.87	—	—	—	$1.1 \times 10^{-3}$	0.71	5.8
Fe-based coating	11.46	$6.671 \times 10^{-5}$	0.651 5	230.4	$7.2 \times 10^{-4}$	0.610 4	20.53
Co-based coating	12.89	$5.93 \times 10^{-5}$	0.409 3	259.2	$6.4 \times 10^{-5}$	0.659 8	23.09

使得试验数据与模拟数据较好的吻合<sup>[21-23]</sup>, 其中 EIS 测量通常与等效电路 (EEC) 进行类比分析。在图 13a 中,  $R_s$  是酸雨溶液电阻,  $R_{ct}$  为溶液-衬底界面与  $\text{CPE}_{dl}$  并联时的电阻; 图 13b 中,  $R_s$  为酸雨溶液电阻,  $R_b$  为腐蚀产物膜电阻,  $R_{ct}$  为涂层平行于恒相元  $\text{CPE}_{bl}$  的阻挡层电阻。 $R$  值越大, 说明材料的耐腐蚀性能越强。采用 ZSimpWin 软件获取基体和涂层的 EIS 数据, 拟合数据见表 5。结合图 12 与表 5 数据分析, 3 种试样中基材的阻抗值最小, 显现的耐腐蚀性能最低, Co 基涂层具有最大的阻抗值, Fe 基涂层次之, 但相差并不大。初步判定熔覆涂层的耐腐蚀性能明显优于基体。

利用电化学工作站测试了 ER8 车轮钢基体、Fe 基和 Co 基合金涂层的动电位极化曲线, 如图 14 所示。借助 Tafel 法、线性极化法分析了 3 种试样在酸雨溶液中的动电位极化曲线, 并确定了腐蚀电位和腐蚀电流密度等参数来表征熔覆涂层在酸雨溶液中的耐腐蚀性能<sup>[24]</sup>, 电化学腐蚀参数见表 6, 并通过现有参数计算出极化电阻  $R_p$ , 极化电阻公式如式 (2)<sup>[25]</sup> 所示。

$$R_p = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3(\beta_a + \beta_c) J_{\text{corr}}} \quad (2)$$

式中:  $E_{\text{corr}}$  为腐蚀电位;  $J_{\text{corr}}$  为腐蚀电流密度;  $\beta_c$  为阳极极化曲线斜率;  $\beta_a$  为阴极极化曲线斜率。结合图 14 和表 6 可以看出, ER8 车轮钢基体和熔覆涂层在酸雨溶液中均未出现明显的钝化区域, 说明在开路电位为  $-1.5 \sim 1 \text{ V}$  条件下, 基体和涂层表面均未生成了钝化膜。同时可以发现, 基体的  $E_{\text{corr}}$  与  $J_{\text{corr}}$  明显

低于 2 种涂层, 表明在酸雨溶液中, 熔覆涂层的腐蚀倾向与腐蚀速率都远远低于基体<sup>[26]</sup>。随着腐蚀时效时间的增加, 合金涂层的腐蚀电位  $E_{\text{corr}}$  表现出正方向移动的趋势, 腐蚀电流密度  $J_{\text{corr}}$  趋于降低, 极化电阻  $R_p$  增大。根据法拉第欧姆定律<sup>[27]</sup>, 电化学腐蚀速率与腐蚀电流密度  $J_{\text{corr}}$  呈正比关系, 同时与极化电阻  $R_p$  呈反比关系。这说明涂层腐蚀电流密度  $J_{\text{corr}}$  越大, 涂层的腐蚀速率越快, 耐蚀性能就越弱, 而涂层极化电阻  $R_p$  越大, 则涂层的耐腐能力就越优异。同时, Fe 基合金涂层与 Co 基合金涂层耐腐蚀性能的差距并不明显, 主要是因为 2 种合金涂层 Cr 元素的含量相差并不明显, 而 Cr 元素的存在能有效提高材料的耐腐蚀性能。

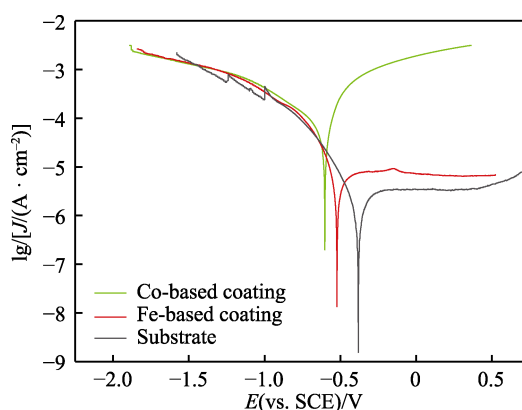


图 14 3 种试样在酸雨溶液中的极化曲线  
Fig.14 Polarization curves of three specimens in acid rain solution

表 6 3 种试样的电化学特性参数  
Tab.6 Electrochemical characteristics of three specimens

Specimens	$E_{\text{corr}}(\text{vs. SCE})/\text{V}$	$J_{\text{corr}}/(\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	$\beta_c/(\text{mV} \cdot \text{dec}^{-1})$	$\beta_a/(\text{mV} \cdot \text{dec}^{-1})$	$R_p/\Omega$
Fe-based coating	-0.522	3.916	83.769	279.68	7 149.8
Co-based coating	-0.381	0.312	40.320	49.489	30 984.4
Substrate	-0.603	54.829	330.86	118.02	511.4

### 3 结论

本文利用激光熔覆技术在 ER8 车轮钢材料中制备了局部 Fe 基和 Co 基合金涂层, 采用往复摩擦磨损和电化学腐蚀试验研究了涂层在酸雨溶液中的摩擦磨损及腐蚀机理。可以得出以下结论:

1) 摩擦系数与滑动速度成反比关系, 并且在相

同参数条件下, Co 基合金涂层的摩擦系数略小于 Fe 基合金涂层。

2) 在酸雨溶液中基体材料磨面上呈现的损伤形貌总体上由明显的粘着磨损和严重的剥离损伤向涂层磨粒磨损机制转变, 而涂层磨面则为轻微的磨粒磨损。

3) 与基体相比, 2 种合金涂层均具有相对较低的磨损率, 且随着滑动速度的增大, 涂层耐磨性表现

得更为优异; 高频 (4 Hz) 条件下, Fe 基与 Co 基合金涂层的磨损率比基体分别最高能减少  $46.10 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$  和  $39.85 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。

4) 基体、Fe 基合金涂层和 Co 基合金涂层的极化电阻分别为 511.4、7 148.8、30 984.4  $\Omega$ , 故涂层表现出优异的耐腐蚀性能。相较之下 Co 基合金涂层更为优异, 但由于 Fe 基合金涂层成本更低, 表现出更优异的耐磨损性能, 耐腐蚀性能与 Co 基合金涂层差距并不明显, 在实际工程应用中, Fe 基合金涂层仍为优选。

#### 参考文献:

- [1] 邢少华. 热浸镀钢材在海洋环境中腐蚀行为的对比研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.  
XING Shao-hua. The Corrosion Behavior and Mechanism Contrast of Hot Dipped Steel in Sea Environment[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.
- [2] 李嘉宁. 激光熔覆技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.  
LI Jia-ning. Laser Cladding Technology and Its Application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016.
- [3] 张津超, 石世宏, 龚燕琪, 等. 激光熔覆技术研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(10): 1-11.  
ZHANG Jin-chao, SHI Shi-hong, GONG Yan-qi, et al. Research Progress of Laser Cladding Technology[J]. Surface Technology, 2020, 49(10): 1-11.
- [4] 杜学芸, 许金宝, 宋健. 激光熔覆再制造技术研究现状及发展趋势[J]. 金属加工(热加工), 2020(3): 15-19.  
DU Xue-yun, XU Jin-bao, SONG Jian. Research Status and Development Trend of Laser Cladding Remanufacturing Technology[J]. MW Metal Forming, 2020(3): 15-19.
- [5] 孟丽. 钢轨表面激光-感应复合熔覆技术基础研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.  
MENG Li. Fundamental Studies of Laser-Induction Hybrid Cladding Technique on Full-Scale Rail Surface[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [6] 付志凯, 王文健, 丁昊昊, 等. 激光熔覆铁基合金对轮轨材料磨损与损伤性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(8): 217-222.  
FU Zhi-kai, WANG Wen-jian, DING Hao-hao, et al. Effect of Laser Cladding Fe-Based Alloy on Wear Performance of Wheel and Rail Steels[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(8): 217-222.
- [7] LEWIS S R, LEWIS R, GOODWIN P S, et al. Full-Scale Testing of Laser Clad Railway Track; Case Study - Testing for Wear, Bend Fatigue and Insulated Block Joint Lipping Integrity[J]. Wear, 2017, 376-377: 1930-1937.
- [8] GAMON W, ANIOLEK K. Examination of the Sliding Wear of Bronze Coatings on Railway Buffer Heads[J]. Wear, 2020, 448-449: 203235.
- [9] WANG W J, HU J, GUO J, et al. Effect of Laser Cladding on Wear and Damage Behaviors of Heavy-Haul Wheel/Rail Materials[J]. Wear, 2014, 311(1-2): 130-136.
- [10] 慕鑫鹏, 王文健, 祝毅, 等. 两种激光熔覆涂层对轮轨材料磨损与损伤性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2020, 40(2): 225-233.  
MU Xin-peng, WANG Wen-jian, ZHU Yi, et al. Effects of Two Laser Cladding Coatings on Wear and Damage Properties of Wheel/Rail Materials[J]. Tribology, 2020, 40(2): 225-233.
- [11] ZHU Y, YANG Y, MU X, et al. Study on Wear and RCF Performance of Repaired Damage Railway Wheels: Assessing Laser Cladding to Repair Local Defects on Wheels[J]. Wear, 2019, 430-431: 126-136.
- [12] ZHOU Sheng-feng, DAI Xiao-qin, ZHENG Hai-zhong. Microstructure and Wear Resistance of Fe-Based WC Coating by Multi-Track Overlapping Laser Induction Hybrid Rapid Cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(1): 190-197.
- [13] NAVAS C, CADENAS M, CUETOS J M, et al. Microstructure and Sliding Wear Behaviour of Triballoy T-800 Coatings Deposited by Laser Cladding[J]. Wear, 2006, 260(7/8): 838-846.
- [14] 朱张校, 姚可夫. 工程材料[M]. 5 版. 北京: 清华大学出版社, 2011.  
ZHU Zhang-xiao, YAO Ke-fu. Engineering Materials[M]. Fifth Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.
- [15] FU Z K, DING H H, WANG W J, et al. Investigation on Microstructure and Wear Characteristic of Laser Cladding Fe-Based Alloy on Wheel/Rail Materials[J]. Wear, 2015, 330-331: 592-599.
- [16] 慕鑫鹏. 车轮材料激光熔覆涂层微观组织与磨损性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.  
MU Xin-peng. Study on Microstructure and Wear Properties of Laser Cladding Coating on Wheel Materials[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [17] 李新星. 钛合金在不同滑动速度和介质下磨损行为和机制的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.  
LI Xin-xing. Research on Wear Behavior and Mechanism of Titanium Alloys under Various Sliding Velocities and Environmental Media[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.
- [18] IWABUCHI A, SONODA T, YASHIRO H, et al. Application of Potential Pulse Method to the Corrosion Behavior of the Fresh Surface Formed by Scratching and Sliding in Corrosive Wear[J]. Wear, 1999, 225-229: 181-189.
- [19] JB/T 7268—2007, 湿式烧结金属摩擦材料 摩擦性能试验方法[S].  
JB/T 7268—2007, Sintered Metal Friction Materials Run in Lubricants Determination of Frictional Characteristics[S].
- [20] 许肖, 梁文萍, 缪强, 等. ZrN 改性层对 TA18 钛合金摩擦磨损性能的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(5): 133-140.  
XU Xiao, LIANG Wen-ping, MIAO Qiang, et al. Effect

- of ZrN Modified Layer on Friction and Wear Properties of TA18 Titanium Alloy[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(5): 133-140.
- [21] AHNIA F, KHELFAOUI Y, ZAID B, et al. Thermally Sprayed Al/Mo Coatings on Industrial Steel E335 and Effects on Electrochemical Parameters in Simulated Acid Rain[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 696: 1282-1291.
- [22] LIU Ya-nan, SUN Rong-lu, NIU Wei, et al. Effects of CeO<sub>2</sub> on Microstructure and Properties of TiC/Ti<sub>2</sub>Ni Reinforced Ti-Based Laser Cladding Composite Coatings[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 120: 84-94.
- [23] BUČKO M, MIŠKOVIĆ-STANKOVIĆ V, ROGAN J, et al. The Protective Properties of Epoxy Coating Electrodeposited on Zn-Mn Alloy Substrate[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2015, 79: 8-16.
- [24] ROUT P K, GHOSH M M, GHOSH K S. Microstructural, Mechanical and Electrochemical Behaviour of a 7017 Al-Zn-Mg Alloy of Different Tempers[J]. *Materials Characterization*, 2015, 104: 49-60.
- [25] 黄元春, 谭维杨, 张传超, 等. 时效处理对新型 Al-5.6Zn-1.6Mg-0.15Zr 合金显微组织及耐腐蚀性能的影响[J]. *金属热处理*, 2021, 46(1): 161-166.
- HUANG Yuan-chun, TAN Wei-yang, ZHANG Chuan-chao, et al. Effect of Aging Treatment on Microstructure and Corrosion Resistance of New Al-5.6Zn-1.6Mg-0.15Zr Alloy[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2021, 46(1): 161-166.
- [26] 王根, 李新梅, 卢彩彬, 等. CoCuFeNiTi 高熵合金涂层的制备和性能研究[J]. *材料研究学报*, 2021, 35(8): 561-571.
- WANG Gen, LI Xin-mei, LU Cai-bin, et al. Preparation and Properties of CoCuFeNiTi High Entropy Alloy Coating[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2021, 35(8): 561-571.
- [27] LIAO M, RENAUD G, BELLINGER N C. Fatigue Modeling for Aircraft Structures Containing Natural Exfoliation Corrosion[J]. *International Journal of Fatigue*, 2007, 29(4): 677-686.

责任编辑: 刘世忠

(上接第 305 页)

- [20] WANG Lu, LI Yu-hong, HAN Zhi-da, et al. Composite Structure and Properties of Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Graphene Oxide and Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Graphene[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2013, 1(29): 8385-8397.
- [21] FAN Li-shuang, ZHANG Yu, GUO Zhi-kun, et al. Hierarchical Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Anchored on 3D Graphene Aerogels via C—O—Mn Linkage with Superior Electrochemical Performance for Flexible Asymmetric Supercapacitor[J]. *Chemistry—A European Journal*, 2020, 26(42): 9314-9318.
- [22] CAO Li-yun, WANG Rui-yi, XU Zhan-wei, et al. Constructing MnOC Bonds in Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Super P Composite for Superior Performance in Li-Ion Battery[J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2017, 798: 1-8.
- [23] LI Shuang, YU Li-li, SHI Yu-ting, et al. Greatly Enhanced Faradic Capacities of 3D Porous Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/G Composites as Lithium-Ion Anodes and Supercapacitors by C—O—Mn Bonding[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(10): 10178-10188.
- [24] BOURLINOS A B, GOURNIS D, PETRIDIS D, et al. Graphite Oxide: Chemical Reduction to Graphite and Surface Modification with Primary Aliphatic Amines and Amino Acids[J]. *Langmuir*, 2003, 19(15): 6050-6055.
- [25] SZABÓ T, BERKESI O, FORGÓ P, et al. Evolution of Surface Functional Groups in a Series of Progressively Oxidized Graphite Oxides[J]. *Chemistry of Materials*, 2006, 18(11): 2740-2749.
- [26] ZHANG Wan-yu, XU Hai, XIE Fei, et al. General Synthesis of Ultrafine Metal Oxide/Reduced Graphene Oxide Nanocomposites for Ultrahigh-Flux Nanofiltration Membrane[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 471.
- [27] FANG Guo-zhao, WU Zhuo-xi, ZHOU Jiang, et al. Sodium-Ion Batteries: Observation of Pseudocapacitive Effect and Fast Ion Diffusion in Bimetallic Sulfides as an Advanced Sodium-Ion Battery Anode [J]. *Advanced Energy Materials*, 2018, 8(19): 1870092.
- [28] ZHAO Rui-zheng, QIAN Zhao, LIU Zhong-yuan, et al. Molecular-Level Heterostructures Assembled from Layered Black Phosphorene and Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> MXene as Superior Anodes for High-Performance Sodium Ion Batteries[J]. *Nano Energy*, 2019, 65: 104037.
- [29] NIU Yu-bin, XU Mao-wen, DAI Chun-long, et al. Electrospun Graphene-Wrapped Na<sub>6.24</sub>Fe<sub>4.88</sub>(P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>)<sub>4</sub> Nanofibers as a High-Performance Cathode for Sodium-Ion Batteries[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2017, 19(26): 17270-17277.
- [30] HUANG Ying-de, YU Rong-tian, MAO Gao-qiang, et al. Unique FeP@C with Polyhedral Structure In-Situ Coated with Reduced Graphene Oxide as an Anode Material for Lithium Ion Batteries[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 841: 155670.

责任编辑: 万长清