

列车车轮踏面局部损伤激光熔覆修复涂层的组织和性能分析

杨文斌, 苏子安, 肖乾, 陈道云, 聂林, 刘新龙, 马晓毅

(华东交通大学 交通智能运维技术与装备教育部重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘要: 本研究选用铁基、钴基及 316L 不锈钢三种合金粉末作为修复材料, 采用激光熔覆技术对列车车轮局部损伤进行经济高效的修复。在车轮踏面开展局部修复, 并利用 LGPS-30C 轮轨接触模拟试验台进行滚动-滑动摩擦试验, 系统分析了三种涂层的耐磨性能及抗滚动接触疲劳性能。并通过扫描电子显微镜和光学显微镜对涂层磨损形貌进行分析。激光熔覆形成的涂层主要由树枝状晶体与共晶组织组成, 涂层硬度相较于基材显著提升。磨损形貌的宏观与微观分析揭示了三种涂层性能的差异: 其中钴基合金涂层的磨损表面较为光滑, 未见裂纹萌生, 表现出最佳的耐磨性能; 相比之下, 316L 不锈钢合金涂层出现明显剥落, 磨损较为严重; 而铁基合金涂层虽磨损表面较为平整, 但在涂层与基材界面处存在较深裂纹及裂纹扩展现象, 存在涂层断裂与脱落的潜在风险。使用车轮试样进行局部激光熔覆修复并经过滚动-滑动摩擦试验后, 三种合金涂层相比之下, 钴基合金涂层表现更为优异。

关键词: 激光熔覆; 铁路车轮; 合金粉末; 局部车轮损伤; 滚动-滑动摩擦试验; 疲劳裂纹

Microstructural and Performance Analysis of Laser-Cladded Coatings for Localized Damage Repair on Train Wheel Treads

YANG Wenbin, SU Zian, XIAO Qian, CHEN Daoyun, NIE Lin, LIU Xinlong, Ma Xiaoyi

(Key Laboratory of Transportation Intelligent Operation and Maintenance Technology and Equipment, Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi 330013, China)

Abstract: Three alloy powders—Fe-based, Co-based, and 316L stainless steel—were selected as repair materials, and laser cladding technology was employed to achieve a cost-effective repair of localized damage on train wheel flanges. Localized repair was performed on the wheel tread, followed by rolling-sliding friction tests conducted using an LGPS-30C wheel-rail contact simulation test rig. The wear resistance and rolling contact fatigue (RCF) performance of the three coatings were systematically investigated. In addition, the wear morphologies of the coatings were characterized using scanning electron microscopy (SEM) and optical microscopy (OM). The laser-clad coatings were mainly composed of dendritic structures and eutectic phases, and their hardness was significantly enhanced compared with that of the substrate. Macroscopic and microscopic analyses of the wear morphologies revealed distinct performance differences among the three coatings. The Co-based alloy coating exhibited a relatively smooth wear surface without observable crack initiation, demonstrating the best wear resistance. In contrast, the 316L stainless steel alloy coating showed pronounced spalling and severe wear damage. Although the Fe-based alloy coating exhibited a comparatively smooth worn surface, deep cracks and crack propagation were observed at the coating-substrate interface, indicating a potential risk of coating fracture and delamination. Overall, after localized laser cladding repair on wheel specimens and subsequent rolling-sliding friction tests, the Co-based alloy coating demonstrated superior comprehensive performance among the three coatings.

Keywords: Laser additive manufacturing; Railway wheel; alloy powder; localized wheel damage; rolling-sliding friction test; fatigue crack

在铁路列车长期运行过程中, 车轮损伤是不可避免的问题。随着铁路向高速化与重载化方向发展, 车轮损伤问题愈加严重, 不仅影响列车的正常运行, 还对铁路运输安全构成严重威胁。车轮损伤的主要形式

收稿日期: 2025-12-01

基金项目: 江西省自然科学基金 (20232BAB204003); 江西省青年自然科学基金 (20242BAB20205); 江西省自然科学基金优青项目 (20252BAC210001)

为磨损与滚动接触疲劳（RCF）^[1-3]，二者是影响轮轨服役寿命的关键因素。目前，最常见的车轮修复方法是镟修^[4,5]，但该方法存在材料浪费大、经济损失高的问题，并显著缩短车轮的使用寿命。因此，为降低维护成本、延长车轮寿命并保障铁路交通安全，亟需开发高效且经济的车轮修复技术。

激光熔覆技术具备高能量密度、低热输入及涂层与基体之间实现冶金结合等优点，成为一种极具潜力的轮对局部损伤修复方法^[6]。目前已有大量研究利用激光熔覆技术提升车轮材料表面性能。Lewis 等^[7]以多相锰钢变体（MMV）、马氏体不锈钢（MSS）、TWIP 钢、NiCrBSi、Stellite12 和 Stellite6 合金粉末为熔覆材料，对 R260 轨道钢试样进行熔覆处理，旨在改善其耐磨性与抗滚动接触疲劳性能。滚动接触疲劳试验表明，所有熔覆涂层均表现出良好的抗疲劳性能，其中 Stellite 6 合金涂层的耐磨性能最佳，磨损率相较于未涂层基体降低约 70%。Xie 等^[8]选择了 304、314、2Cr13、316L 和 434L 五种不锈钢粉末对钢轨进行激光熔覆处理，所得涂层磨损率均低于未熔覆试样，但在熔覆涂层中出现疲劳裂纹，尤其以涂层边界处裂纹最为显著。其中，434L 涂层试样表现出最小磨损和最轻微的滚动接触疲劳损伤。慕鑫鹏等^[9]使用铁基和钴基合金粉末进行激光熔覆处理，并进行滚动磨损试验。结果发现，未经处理的轮轨试样相较两种熔覆层试样具有更显著的疲劳损伤；相比之下，钴基合金涂层的磨损率更低，疲劳裂纹更少，性能优于铁基涂层。

这些研究表明，激光熔覆涂层具有良好的耐磨性与抗滚动接触疲劳性能。但熔覆层中仍可能形成裂纹，此类疲劳裂纹的形成可通过向合金粉末中添加纳米粒子加以改善。例如，Ding 等^[10]通过在铁基粉末中添加不同质量分数的 WS₂，显著降低了涂层试样的磨损率以及疲劳裂纹的长度与深度。当 WS₂ 含量 6% 时，涂层在耐磨性与抗疲劳性能方面表现最优。总体来看，激光熔覆技术可实现轮轨表面的整体强化涂层，显著提升其耐磨性和抗滚动接触疲劳能力，从而有效保护基体材料。然而，考虑到激光熔覆技术效率较低、合金粉末利用率不高，制备大面积熔覆层的成本依然较高。为此，杨文斌等^[11]使用铁基和钴基两种自熔性合金在 ER8 车轮材料上制备激光熔覆涂层并进行摩擦与腐蚀试验，结果表明，相较于基体，两种涂层具有更优的耐磨、耐蚀性能，其中钴基涂层表现更优异。何成刚等^[12]采用 304L、316L 和 420 不锈钢粉末对轮对局部损伤区域进行激光熔覆修复，并在湿热环境下使用双盘摩擦磨损试验机进行实验。研究发现，随着循环次数增加，三种熔覆涂层中，304L 熔覆涂层裂纹角度小、深度浅切磨损率较小，与基体结合较好，表现更优异。Tomlinson 等^[13]以 R260 轨道钢为基体，采用原位激光熔覆技术，对局部损伤区域进行 Stellite6、MSS 与 R260 合金粉末修复，结果表明 R260 复合涂层表现出最佳的抗滚动接触疲劳性能，其抗疲劳能力与基体相当。与轮轨表面整体熔覆强化相比，局部修复在耗材用量与加工时间方面具有显著优势，实用性更高。

目前应用广泛的自熔合金粉末主要包括铁基、钴基和镍基三类，具有与钛合金、镁合金及合金钢良好的匹配性，能制备出性能优异的熔覆涂层^[14]。Guo 等^[15]将钴基合金粉末应用于轮轨材料的激光熔覆处理中，显著提升了材料的耐磨性。Xu 等^[16]通过不同元素配比制备铁基粉末涂层，结果表明镍元素的引入显著提高了涂层的冲击韧性和耐腐蚀性。Weng 等^[17]在 Ti-6Al-4V 钛合金基体上制备钴基复合涂层，结果显示该涂层的显微硬度与耐磨性能均优于基体材料。

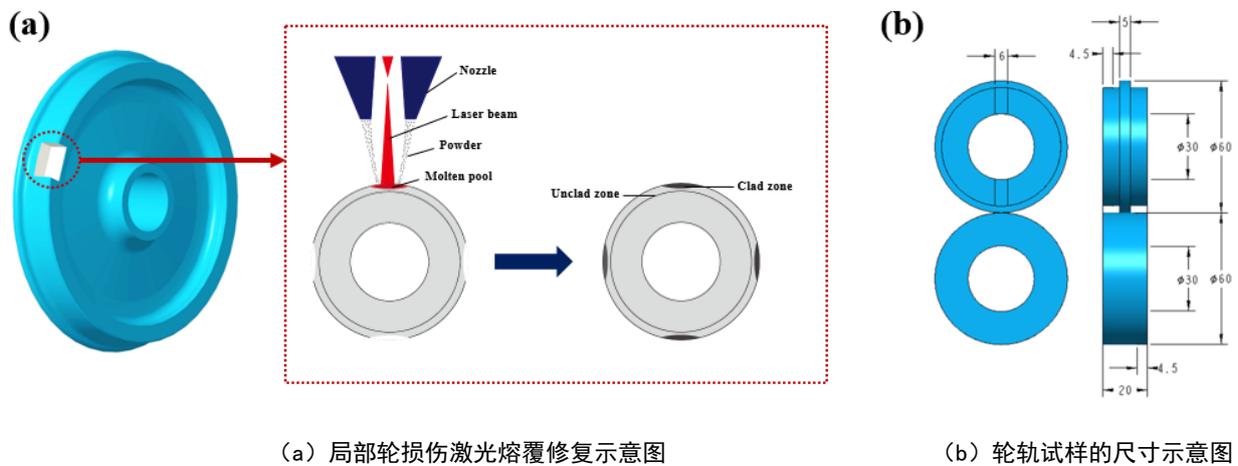
据现有研究表明，铁基合金粉末成本低廉且具有良好耐磨性，常用于铸铁及低碳钢基体材料的表面强化。钴基合金粉末则因其优异的高温性能与耐腐蚀能力，在工业应用中具有广泛用途^[14]。316L 不锈钢粉末熔覆涂层兼具较高耐磨性、抗滚动接触疲劳能力以及与基体相近的硬度^[18,19]。基于上述性能特征，有必要进一步对铁基、钴基及 316L 不锈钢合金粉末在轮轨局部修复中的应用性能进行比较与评估。

因此，本文拟采用铁基、钴基及 316L 不锈钢合金粉末，结合激光熔覆技术对铁路车轮局部损伤区域进行修复处理，并通过滚动摩擦试验对其耐磨性能及抗滚动接触疲劳能力进行系统评估，旨在探究三种合金熔覆涂层在轮轨滚动接触服役工况下的综合性能表现。

1 实验部分

1.1 实验样品

车轮试样采用 ER9 车轮钢作为基体材料，其化学成分见表 1。车轮与钢轨试样均加工成直径为 60 mm 的圆盘形状，如图 1 所示。为模拟车轮损伤，在轮面上预制四条缺口沟槽，随后分别采用铁基、钴基及 316L 不锈钢粉末进行激光熔覆修复。铁基、钴基及 316L 不锈钢粉末的松装密度分别约为 4.1g/cm^3 、 4.6g/cm^3 和 4.7g/cm^3 ，化学成分见表 2。三种合金粉末如图 2 所示，粉末为球形，直径约为 $30\text{--}100\mu\text{m}$ 。



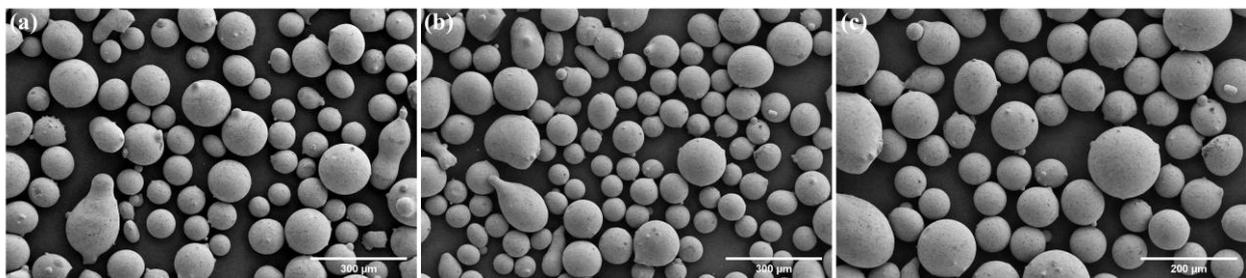
(a) 局部轮损伤激光熔覆修复示意图

(b) 轮轨试样的尺寸示意图

图 1 轮轨试样示意图

Fig.1 Schematic diagram of a wheel-rail specimen

铁基、钴基及 316L 不锈钢合金熔覆涂层的制备采用 TF-YF6000 型激光器，通过同步送粉方式，将合金粉末熔覆至车轮试样的局部损伤区域。激光熔覆工艺参数如下：光斑直径为 3 mm，激光输出功率为 2 600 W，扫描速度为 0.6 m/min，搭接率为 50%，送粉速率为 10 g/min，使用氩气保护气体。涂层制备后对其进行精加工处理，保证涂层表面粗糙度约为 0.2Ra ，并使用无水乙醇进行超声波清洗。



(a) 铁基合金涂层

(b) 钴基合金涂层

(c) 316L 不锈钢合金涂层

图 2 合金粉末的 SEM 图像

Fig.2 SEM photograph of the alloy powder

表 1 ER9 车轮钢的化学成分

Table.1 Chemical composition of ER9 wheel steel

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
wt.%	0.60	0.40	0.80	0.02	0.015	0.30	0.08

表2 三种合金粉末的化学成分

Table.2 Chemical composition of three alloy powders

Element	wt. %								
	C	Si	Cr	Mn	W	Ni	Mo	Fe	Co
Fe-based	0.90	1.50	17.00	-	-	10.50	-	Bal.	-
Co-based	1.00	1.10	27.00	-	4.4	0.8	-	0.9	Bal.
316L-based	0.08	1.00	17.00	2.00	-	12.00	2.50	Bal.	-

1.2 滚动接触疲劳试验

本试验采用LGPJ-30C型轮轨接触特性模拟试验台进行滚动-滑动摩擦试验。根据Hertz接触应力公式^[20], 模拟14吨轴重列车时, 对应的最大赫兹接触压力为1 100 MPa, 轮对轨道的最大法向载荷为2.31 kN。轮对转速设定为500r/min (对应列车运行速度为75 km/h), 滑移率为0.75%。在干摩擦条件下, 总循环次数为40 000转, 每运行20 000转停止一次进行观察。为确保试验结果的可靠性, 所有试验均重复进行三次

1.3 试样表征方法

采用维氏硬度计 (MVK-H21, 日本明石) 对激光熔覆车轮试样的硬度进行测量。设置试验载荷200gf, 加载时间15s, 点间距100 μ m。为减少误差, 在每个深度位置进行三次测量, 取其平均值作为该深度的参考显微硬度。使用线切割对轮对试样截取一小段样品, 随后进行磨削与抛光, 直至表面无划痕。样品经王水 (HCl:HNO₃ = 3:1, 体积比) 腐蚀后, 采用4XC金相显微镜 (OM) 观察涂层的显微组织。采用扫描电子显微镜 (SEM, SU8010, 日本日立) 及能谱分析仪 (EDS) 对涂层表面及截面形貌进行分析。涂层的物相组成通过X射线衍射仪 (XRD, Tiamor, PANalytical B.V., 荷兰) 进行分析。利用电子天平 (JA4103 \pm 0.1mg) 对车轮试样试验前后予以称量, 称量前后均使用无水乙醇进行超声波清洗, 每次试样重复测量6次, 最终取平均值。

2 结果与讨论

2.1 微观组织结构及元素/物相组成

图3分别展示了铁基、钴基及316L不锈钢合金涂层的截面显微组织。通过光学显微镜 (OM) 观察可清晰识别出涂层与基体之间的结合区域。在涂层与基体之间可以观察到明显的界限线。根据冶金凝固理论, 该边界是判断两种材料之间实现冶金结合的重要特征之一^[21]。在激光熔覆过程中, 合金涂层的显微组织主要受到温度梯度 (G) 与凝固速率 (R) 的共同影响^[22]。由OM图像可见, 三种涂层的界面区域均存在柱状晶。这些柱状晶是在快速冷却和界面区高温梯度作用下生长形成的, 其晶粒生长方向垂直于基体表面。

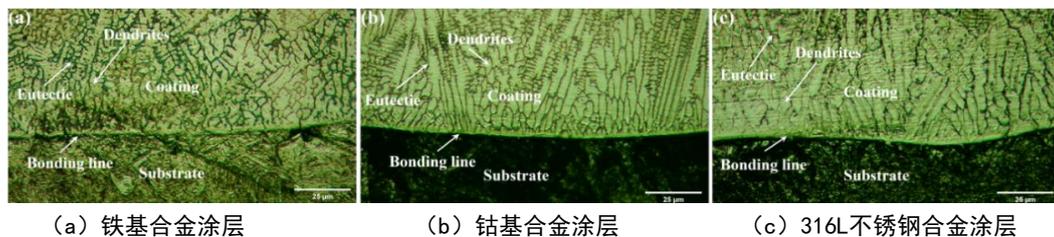


图3 车轮试样涂层-基体结合区域的光学显微镜图

Fig.3 OM image of the coating-substrate bonding region of the wheel specimen

EDS面分布结果进一步揭示了涂层/基体结合处显著的元素扩散行为, 如图4所示, 三种合金涂层的Cr与Ni元素在界面附近形成明显的成分梯度区, 表明合金元素在熔池与基体之间发生了充分混合与在凝固。

铁基中的C元素和钴基中的铁元素也同样形成了梯度区，充分表明涂层与基体之间均形成了以元素互扩散和局部重熔为特征的冶金结合界面。

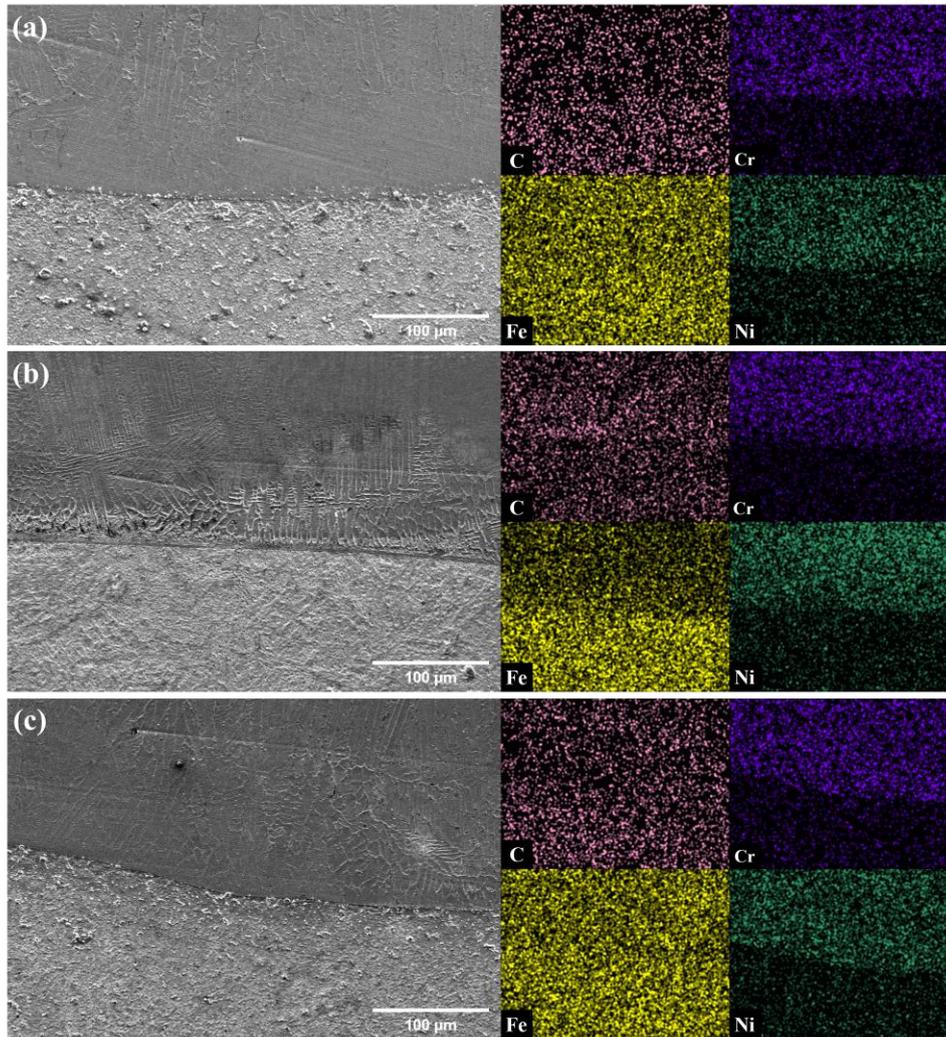
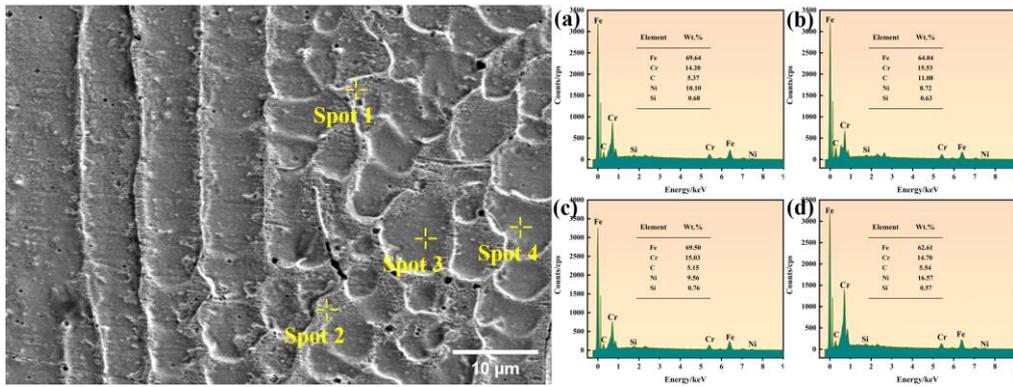


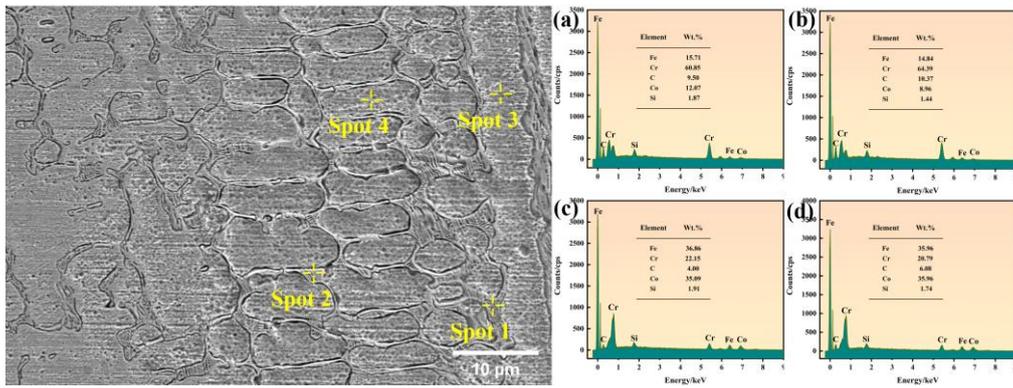
图4 车轮试样涂层-基体结合区域的元素分布. (a) 铁基合金涂层, (b) 钴基合金涂层, (c) 316L不锈钢合金涂层

Fig.4 Elemental distribution in the coating-substrate bonding region of the wheel specimen. (a) Fe-based alloy coatings, (b) Co-based alloy coatings, (c) 316L Stainless steel alloy coatings

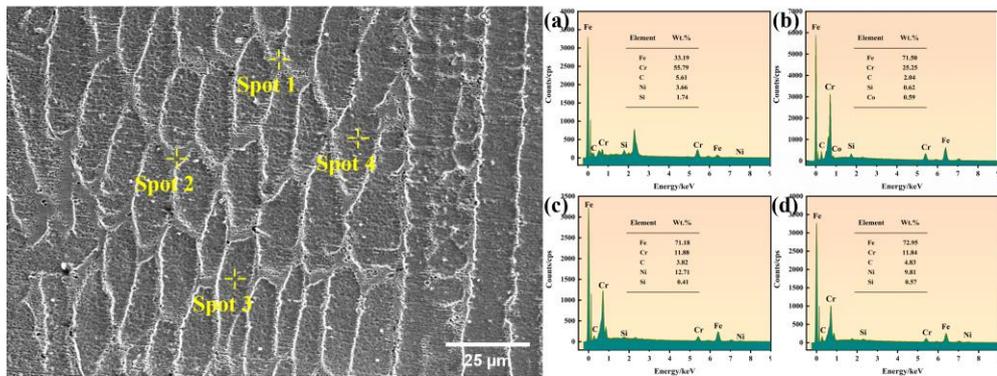
图5显示了三种合金涂层的SEM图像及其EDS分析结果。涂层的显微组织主要由枝晶和共晶相组成，这是由于激光束在基体表面形成的熔池部分吸收能量后所致。在此过程中，合金粉末被引入熔池并熔化。随着激光束离开熔池，熔融合金迅速冷却并凝固，形成枝晶结构。随后，剩余合金溶液在枝晶间的固态区域中发生形核和凝固，形成共晶相^[23]。EDS分析分别对点1、点2（共晶相）和点3、点4（枝晶区）进行了元素扫描。铁基合金涂层的显微组织中含有大量Fe元素，同时还含有Cr元素，以及少量C、Ni和Si元素。这主要归因于熔覆过程中形成的Cr碳化物，有效提升了涂层的性能。钴基合金涂层的EDS分析结果表明，其主要由Co、Cr、Fe和C元素组成，其中Co元素在枝晶区域分布较为均匀，而Cr元素则在共晶区域较为富集，表明Co元素在涂层中结晶分布均匀，而Cr元素更倾向于在共晶区域形成晶体。对于316L不锈钢合金涂层，其EDS分析结果显示，与铁基合金涂层相比，316L涂层枝晶区域中Fe元素分布更加均匀，而Cr元素则在共晶区域中富集。



EDS results of the Fe-based alloy coatings



EDS results of the Co-based alloy coatings



EDS results of the 316L stainless steel alloy coating

图5 三种合金涂层的EDS分析结果。(a)点1的EDS分析结果,(b)点2的EDS分析结果,(c)点3的EDS分析结果,(d)点4的EDS分析结果

Fig.5 EDS results of the three alloy coatings. (a) EDS results of point 1, (b) EDS results of point 2, (c) EDS results of point 3, (d) EDS results of point 4.

图6显示了铁基、钴基及316L不锈钢熔覆涂层的X射线衍射(XRD)谱图。值得注意的是,三种熔覆涂层中几乎未检测到氧化物相。XRD谱图分析表明,铁基熔覆涂层主要由固溶体相组成,包括 α -(Fe, Ni)及 Cr_7C_3 。这主要归因于铁基粉末在激光束超高温作用下熔化形成熔池。此外,Fe与Ni元素结合形成 α -(Fe, Ni)固溶体,有助于提高涂层的耐磨性,而Cr与C元素反应生成硬质碳化物 Cr_7C_3 ,显著提升了涂层的硬度。钴基熔覆涂层主要由 γ -(Co, Fe, Ni)固溶体及碳化物 Cr_7C_3 组成。由于冷却速度极快, γ -(Co, Fe, Ni)相在未发生相变的情况下被保留。同时,合金粉末中的C与Cr元素结合生成高铬碳化物 Cr_7C_3 ,该相

在熔池迅速冷却条件下得以稳定存在，从而提高了涂层的耐磨性能^[24]。对于 316L 不锈钢合金涂层，其主要呈现 γ - (Fe, Ni, Cr) 面心立方固溶体和微量的 Cr_{23}C_6 碳化物，表明涂层以奥氏体组织为主。

2.2 硬度

图 7 展示了三种不同合金涂层的显微硬度值。经过激光熔覆处理后，三种合金涂层的硬度较基体有显著提升。铁基、钴基及 316L 不锈钢合金涂层的平均硬度分别约为 624 HV、527 HV 和 345 HV。各涂层的硬度分布较为均匀，波动较小。结合图 5 中的能谱分析、图 6 中的 XRD 分析及激光熔覆处理工艺可知，固溶度的提高使涂层产生固溶强化效应，从而提升其性能；同时，高硬度碳化物的生成亦进一步增强了涂层的硬度。热影响区的硬度呈现出明显下降的趋势，主要原因在于基体在熔覆过程中吸收了能量，导致涂层与基体之间未能充分稀释以诱发相变，从而造成热影响区硬度急剧下降^[25]。

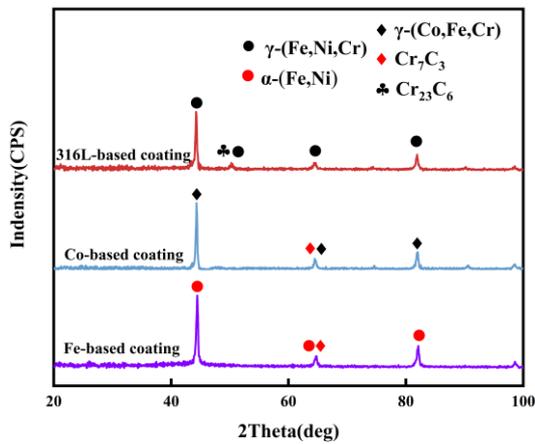


图6 三种涂层的XRD分析结果

Fig.6 XRD analysis results of three coatings

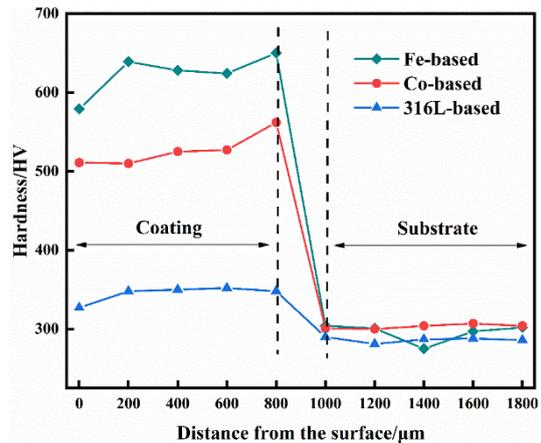


图7 三种合金涂层的硬度值

Fig.7 Hardness of the three alloy coatings

2.3 摩擦系数与磨损率

图8展示了经过滚动-滑动摩擦试验后三种合金涂层的摩擦系数与磨损质量。可以观察到，三种修复试样的摩擦系数均随时间逐渐降低。试样初始经过加工后表面较为光滑，但在滚动试验开始后，表面光滑性被破坏，变得粗糙。粗糙峰谷间的接触导致摩擦力增大。随着试验进行，粗糙峰逐渐被磨平，接触面趋于平滑，摩擦系数稳定下降。在摩擦过程中，涂层表面温度升高，摩擦热促使涂层材料在氧气及其他合金元素的作用下形成氧化膜。该氧化膜具有一定的润滑作用，从而有助于降低摩擦系数。在三种涂层中，钴基合金涂层表现出最低且最稳定的摩擦系数，表明其耐磨性能最佳。316L不锈钢合金涂层性能居中，而Fe基合金涂层的摩擦系数最高，且下降速度较慢且不稳定。这可能是由于摩擦过程中高温促使铁氧化物（如 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 ）的生成。尽管这些氧化物硬度较高，但其润滑性能较弱，仅能使摩擦系数略微降低。

图9可以明显看出316L不锈钢合金涂层的磨损率最大，钴基合金涂层的磨损率最小。316L不锈钢以奥氏体固溶体为主，硬度较低，再循环接触应力下易发生显著塑性累积和剥落，导致磨损率显著增加；铁基合金涂层中 Cr_7C_3 的析出显著提高了涂层硬度，从而抑制了塑性变形和磨粒犁削，但脆性碳化物在循环接触载荷作用下容易引起裂纹萌生与局部剥落；而钴基涂层通过 γ 固溶体与碳化物的协同强化，表现出最优的耐磨性。

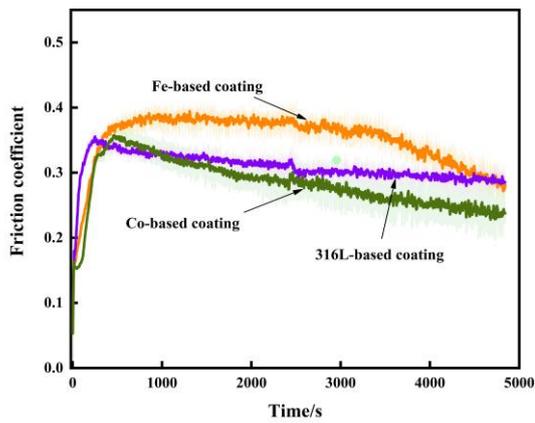


图8 摩擦系数
Fig.8 Coefficient of friction

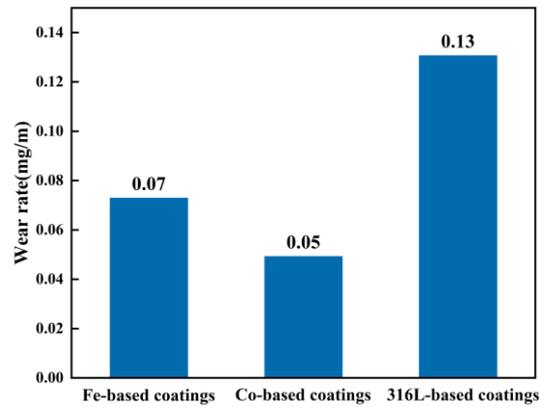


图9 磨损率
Fig.9 Wear rate

2.4 磨损形貌

图 10 显示了轮对试样在滚动-滑动摩擦试验后的表面形貌及元素分布。铁基合金涂层表面存在明显裂纹，可能是由于摩擦过程中应力超过涂层的抗裂强度所致，这些裂纹使涂层在后续摩擦条件下更易发生剥落。钴基合金涂层表面相对平整，仅观察到少量微小凹坑，表明钴基涂层具有良好的抗裂性能。316L 不锈钢合金涂层表面则显示出明显的磨损痕迹，并伴有碎屑及剥落区域。结合表 3 结果，三种涂层中均含有 O 元素，表明摩擦过程中存在氧化-划痕-再氧化的机理^[26]。涂层中 C 与 O 元素的分布较为均匀，表明在滚动过程中表面形成了氧化层。钴基合金涂层样品主要由 Fe、Cr、Co、C 及 O 元素组成，其中 C 与 O 元素的含量分别达到 20.30%和 23.24%，高于另外两种涂层。铁基合金涂层样品主要由 Fe、Cr、C 及 O 元素构成，Fe 元素含量最高，占比达 69.31%。316L 不锈钢合金涂层样品则主要由 Fe、Cr、Ni、C 及 O 元素组成，其中 Ni 元素含量较前两者更高。Ni 元素的加入显著提升了涂层的冲击韧性及耐腐蚀性能，且 Ni 含量越高，涂层的机械性能越优越^[16, 27]。此外，三种合金涂层表面中均发现少量 Mo 元素，Mo 的添加也有可能有效提高涂层的耐磨性并降低磨损速率^[28]。

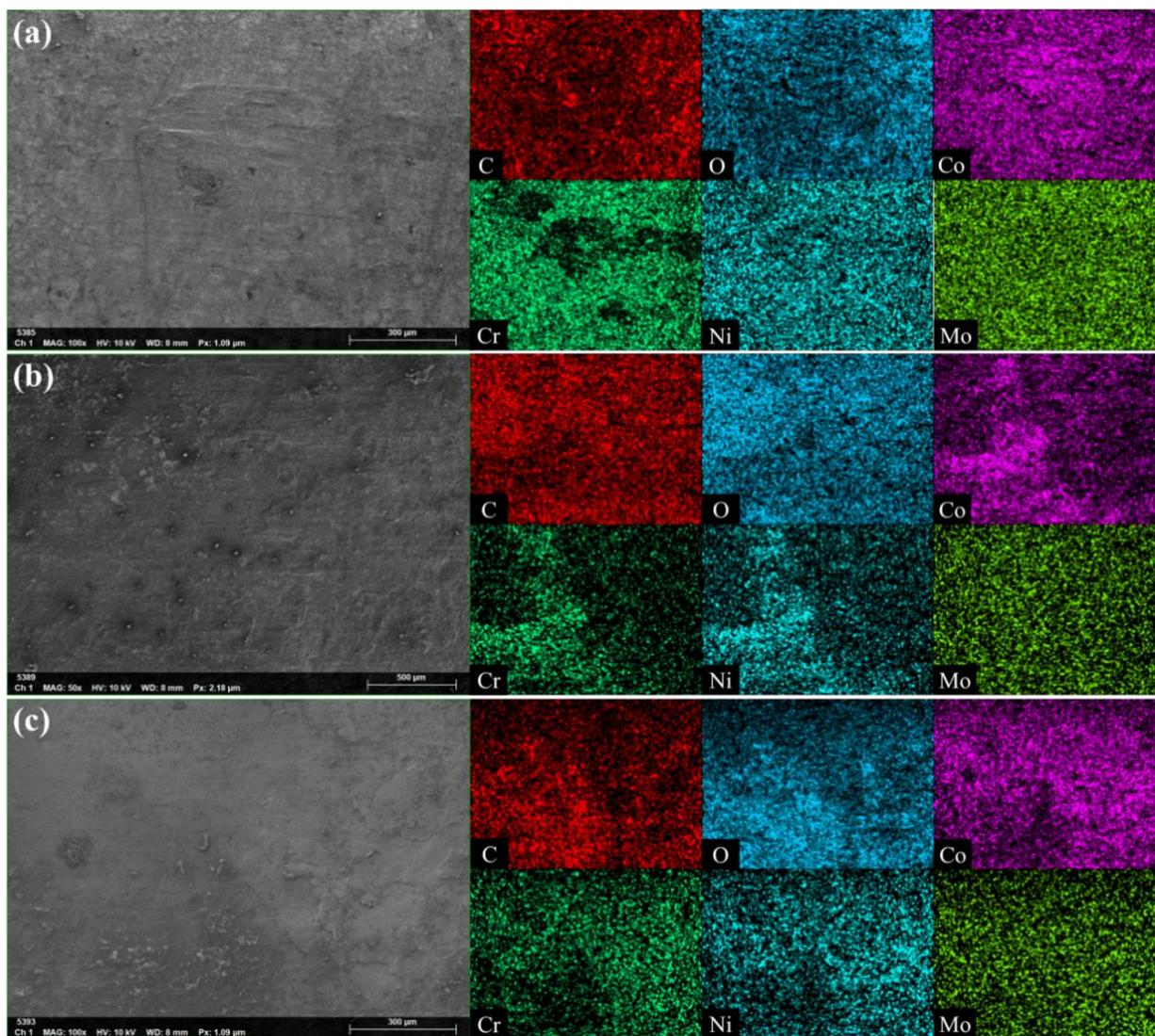


图10 三种涂层的磨损形貌及元素分布。(a) 铁基合金涂层, (b) 钴基合金涂层, (c) 316L不锈钢合金涂层

Fig.10 Wear morphology and elemental distribution of three coatings, (a) Fe-based alloy coating, (b) Co-based alloy coating, (c) 316L stainless steel alloy coating.

表3 图10的EDS分析结果

Table.3 EDS analysis results in Fig. 10

Content	wt.%								
	C	O	Si	P	Cr	Fe	Co	Ni	Mo
(a)	7.01	7.21	0.77	0.81	11.93	69.31	1.30	0.96	0.70
(b)	20.30	23.24	0.65	3.40	4.27	40.77	6.10	0.45	0.81
(c)	10.79	11.07	0.39	1.98	7.08	61.12	1.76	4.70	1.11

在完成滚动-滑动摩擦试验后,对涂层的宏观表面磨损情况进行了观察,如图11所示。试验初期,三种合金涂层的表面均较为光滑。然而,随着试验时间的延长及滚动-滑动过程的持续推进,各涂层表面出现了不同程度的磨损。铁基合金涂层在与基体的结合边界处出现明显裂纹,且随着转数的增加,裂纹进一步扩展。钴基合金涂层的磨损表面始终保持相对平整,整个试验过程中未出现明显劣化。相比之下,316L不锈钢合金涂层的表面则较为粗糙,出现了明显的剥落现象,其磨损形貌在整个试验过程中表现出较为规律的变化特征。

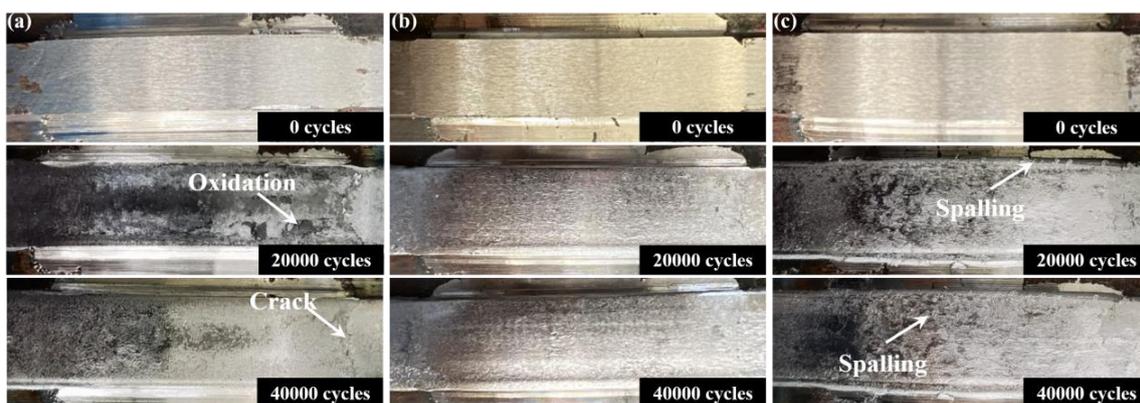


图 11 滚动试验后涂层的宏观表面形貌。(a) 铁基合金涂层, (b) 钴基合金涂层, (c) 316L 不锈钢合金涂层

Fig.11 Macroscopic surface morphology of coatings after rolling. (a) Fe-based alloy coating, (b) Co-based alloy coating, (c) 316L stainless steel alloy coating

为进一步分析涂层的磨损形貌, 图 12 和图 13 分别展示了三种合金涂层的表面及截面 SEM 图像。可以观察到, 铁基合金涂层在界面区域存在明显裂纹, 铁基涂层以碳化物强化物强化为主, 大量 Cr_7C_3 碳化物的形成显著提高了涂层硬度, 但同时降低了材料的抗裂能力, 轮对滚动过程中循环接触载荷作用下导致材料内部发生疲劳损伤, 最终沿剪应力方向形成裂纹^[29]。其表面还伴有划痕和犁沟现象, 可以判断铁基涂层存在磨粒磨损。如图 13(a)所示, 裂纹深度约为 $33\ \mu\text{m}$, 并向深部区域扩展, 如果在持续接触应力作用下可能发生涂层断裂。钴基合金涂层通过固溶强化与细小碳化物弥散强化的协同作用, 在硬度与韧性之间实现了较优平衡, 从而在循环接触应力条件下能够有效抑制裂纹扩展。其磨损表面相对平整, 仅存在局部剥落碎屑、大量微小凹坑及少量材料堆积, 说明在滚动过程中可能存在黏着磨损现象。如图 13(b)所示, 钴基合金涂层中未发现明显裂纹, 仅存在轻微剥落凹坑。相比之下, 316L 不锈钢合金涂层主要依赖固溶强化, 其塑性和韧性较好, 但由于缺乏高硬度强化相, 对接触疲劳抵抗能力不足, 最终呈现以剥落为主的失效形式。从图 13(c)可见, 其裂纹深度相较铁基合金涂层更浅。在滚动过程中, 涂层表面同时受到垂直载荷与切向载荷的共同作用, 裂纹在此过程中不断萌生和扩展, 最终可能引发疲劳断裂并导致涂层从表面剥离^[30]。

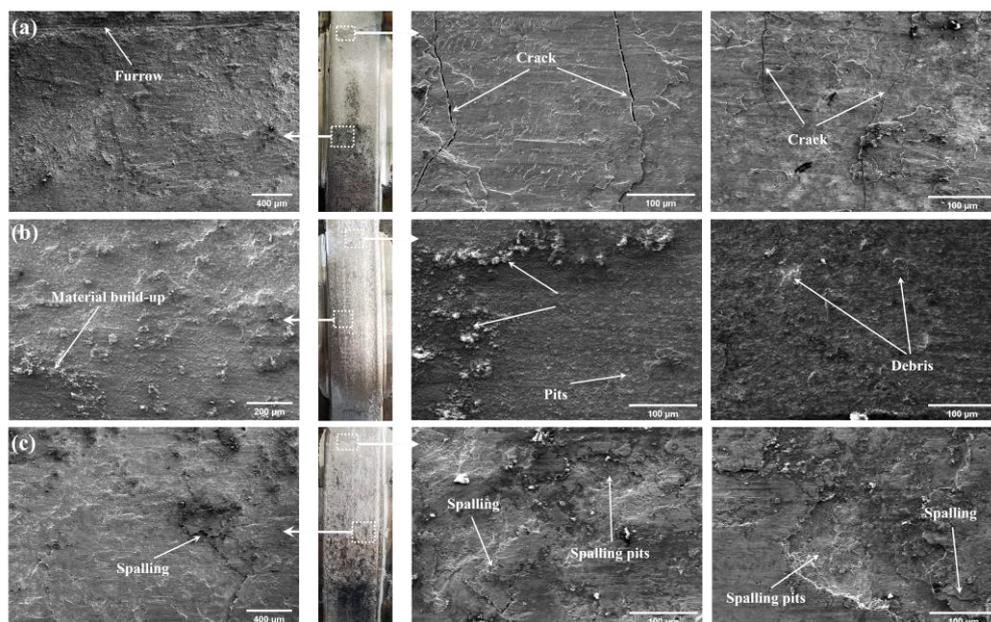


图12 试样表面损伤形貌的SEM图像。(a) 铁基合金涂层, (b) 钴基合金涂层, (c) 316L 不锈钢合金涂层

Fig.12 SEM photograph of the surface damage morphology of the specimens. (a) Fe-based alloy coating, (b) Co-based alloy coating, (c) 316L stainless steel alloy coating

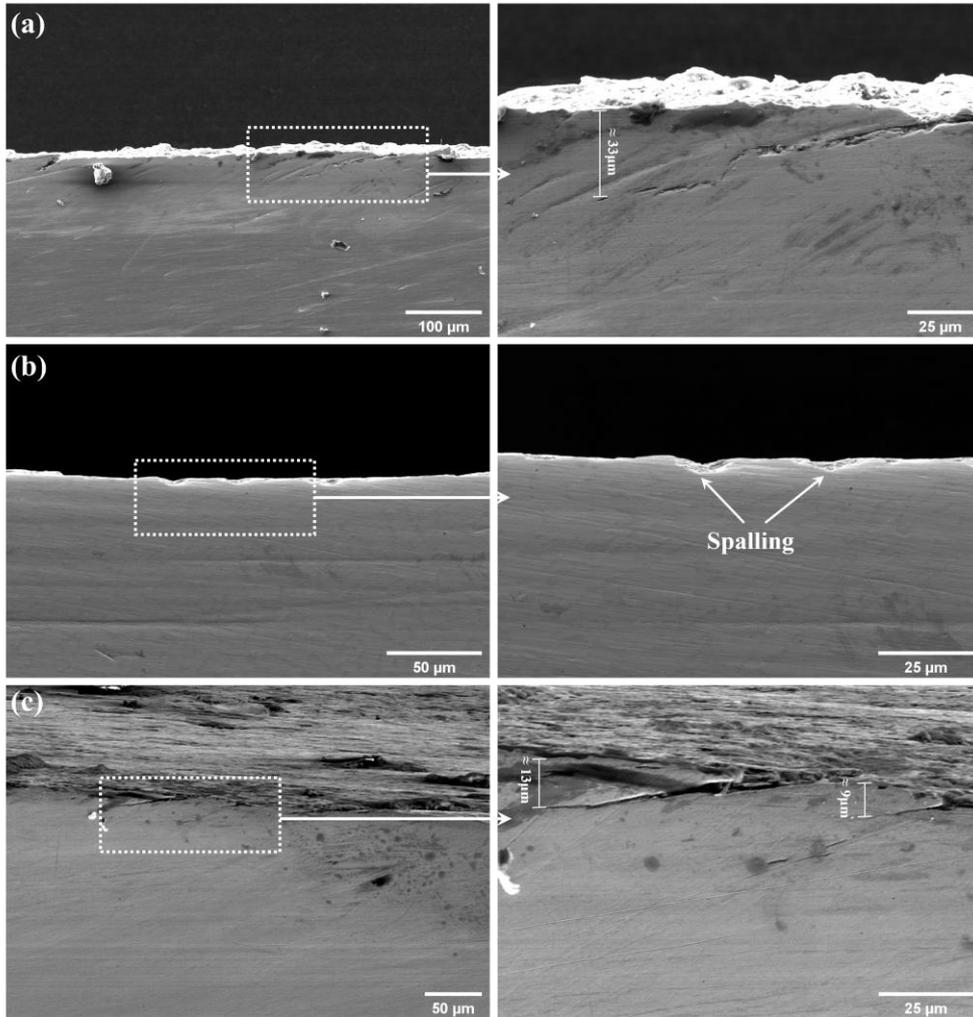


图 13 车轮试样局部修复涂层截面形貌的 SEM 图像. (a) 铁基合金涂层, (b) 钴基合金涂层, (c) 316L 不锈钢合金涂层
Fig.13 SEM photograph of the cross-sectional morphology of the localized repair coatings on the wheel specimens. (a) Fe-based alloy coating, (b) Co-based alloy coating, (c) 316L stainless steel alloy coating

图 14 中的 OM 图像可以清晰观察到涂层截面边界处的磨损形貌。结合涂层表面磨损形貌的 SEM 图像可知, 铁基合金涂层在边界区域的裂纹明显比涂层中部区域更为严重。这些裂纹已扩展至基体, 并可能在后续的摩擦与疲劳载荷作用下引发断裂和剥落现象。相比之下, 钴基合金涂层和 316L 不锈钢合金涂层在滚动-滑动疲劳试验后, 涂层与基体在边界处仍保持良好结合。钴基合金涂层表面仅存在少量微坑, 整体涂层结合牢固; 而 316L 不锈钢合金涂层则出现表面分层现象, 可能导致涂层剥落及类似损伤。综上所述, 在三种合金涂层中, 钴基合金涂层表现出最佳的耐磨与抗疲劳性能。尽管铁基合金涂层表面磨损较轻, 但其内部裂纹扩展较为严重, 可能导致涂层断裂, 甚至脱离基体。316L 不锈钢合金涂层内部裂纹较浅, 但在剪切应力作用下表面发生剥落, 进而可能加剧涂层的磨损速率。

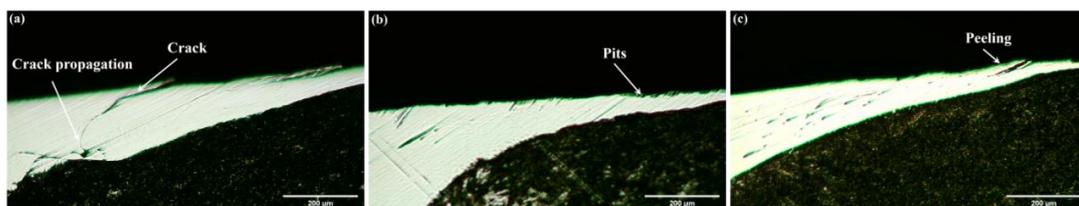


图14 涂层边界的OM图像. (a) 铁基合金涂层, (b) 钴基合金涂层, (c) 316L不锈钢合金涂层

Fig.14 OM photograph of the coating boundary. (a) Fe-based alloy coating, (b) Co-based alloy coating, (c) 316L stainless steel alloy coating

图15展示了三种合金涂层的磨损行为。铁基合金涂层表面存在明显裂纹及浅犁沟，主要原因在于该涂层硬度较高，加之涂层中夹杂的硬质颗粒产生切削作用，进而形成犁沟。钴基合金涂层表面可见大量微坑，并伴有少量磨损碎屑堆积，表明其主要磨损机制为黏着磨损。相比之下，316L不锈钢合金涂层表面出现了显著剥落现象，且在截面中观察到微小裂纹。这可能与其硬度较低有关，进而导致裂纹扩展、表层剥离与剥落现象。据此可判断，316L不锈钢合金涂层的主要磨损机制为疲劳磨损。

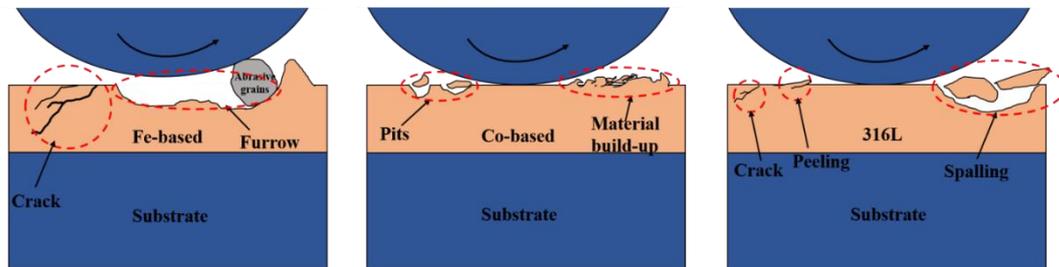


图15 涂层磨损示意图

Fig.15 Schematic diagram of coating wear

3 结论

1) 三种激光熔覆合金涂层的显微组织主要由枝晶和共晶组织构成。与基体相比，三种涂层的硬度均显著提高。

2) 采用三种合金涂层修复的轮对试样摩擦系数均呈逐渐降低趋势。其中钴基合金涂层的摩擦系数最低，优于铁基和 316L 不锈钢合金涂层。

3) 铁基合金涂层的磨损表面出现明显裂纹、细微划痕及犁沟，且边界处裂纹扩展显著，其主要磨损机制为磨粒磨损。钴基合金涂层磨损表面较为平整，仅存在细小微坑，表明其主要磨损机制为粘着磨损。316L 不锈钢合金涂层磨损表面表现出明显剥落和剥落坑，且裂纹较浅，提示疲劳磨损为其主要磨损机制。

4) 综合分析比较三种试样后，钴基合金涂层表现出优异的疲劳抗裂性能及良好的滚动接触疲劳(RCF)裂纹扩展抑制能力。

参考文献

- [1] Tunna J, Sinclair J, Perez J. A review of wheel wear and rolling contact fatigue[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers -- Part F, 2007, 221(2):271-289. DOI:10.1243/0954409JRRT72.
- [2] Hu, Y.Zhou, L.Ding, H. H.Tan, G. X.Lewis, R.Liu, Q. Y.Guo, J.Wang, W. J. Investigation on wear and rolling contact fatigue of wheel-rail materials under various wheel/rail hardness ratio and creepage conditions[J]. Tribology International, 2020, 143. DOI:10.1016/j.triboint.2019.106091.
- [3] 刘颖宾, 宫彦华, 王强, 等. 列车车轮滚动接触疲劳裂纹评价研究 [J]. 摩擦学学报, 2020, 40(03):305-313. DOI:10.16078/j.tribology.2019210.
LIU Y B, GONG Y H, WANG Q, et al. Evaluation of Rolling Contact Fatigue Crack of Train Wheels[J]. Tribology, 2020, 40(03):305-313. DOI:10.16078/j.tribology.2019210.
- [4] Faccoli, M, Petrogalli, et al. An integrated model for competitive damage mechanisms assessment in railway wheel steels[J]. Wear: an International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear, 2015.
- [5] Yazici O, Yilmaz S. Investigation of effect of various processing temperatures on abrasive wear behaviour of high power diode

- laser treated R260 grade rail steels[J].Tribology International, 2018, 119(000):8.DOI:10.1016/j.triboint.2017.11.006..
- [6] 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.DOI:10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.10.001.
- ZHANG J C, SHI S H, GONG Y Q, et al. Research Progress of Laser Cladding Technology[J]. Surface Technology, 2020, 49(10):1-11.DOI:10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.10.001.
- [7] Lewis, S, R, et al. Improving rail wear and RCF performance using laser cladding[J]. Wear An International Journal on the Science & Technology of Friction Lubrication & Wear, 2016.
- [8] Xie T, Zhou L, Ding H, et al. Investigation on the Rolling Contact Fatigue Behaviors of Different Laser Cladding Materials on the Damaged Rail[J]. Journal of Tribology, 2021, 143(5):1-33.DOI:10.1115/1.4050690.
- [9] 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(02):225-233.DOI:10.16078/j.tribology.2019105.
- MU X P, WANG W J, ZHU Y, et al. Effects of Two Laser Cladding Coatings on Wear and Damage Properties of Wheel/Rail Materials[J]. Tribology, 2020, 40(02):225-233.DOI:10.16078/j.tribology.2019105.
- [10] Ding H, Mu X, Zhu Y, et al. Effect of laser claddings of Fe-based alloy powder with different concentrations of WS₂ on the mechanical and tribological properties of railway wheel[J]. Wear: an International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear, 2022(488/489-):488/489.DOI:10.1016/j.wear.2021.204174.
- [11] 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(01):314-324.DOI:10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.01.032.
- YANG W B, XIA J L, XIAO Q, et al. Wear and Corrosion Resistance of Laser Cladding Coating on ER8 Wheel Steel in Acid Rain Environment[J]. Surface Technology, 2023, 52(01):314-324.DOI:10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.01.032.
- [12] 何成刚, 王欣纪, 俞茹昕, 等. 湿热环境下车轮材料局部激光熔覆不锈钢粉末涂层磨损与损伤行为[J]. 中国表面工程, 2025, 38(03):372-383.
- HE C G, WANG X J, YU R X, et al. Wear and Damage Behaviors of Locally Laser-cladded Wheel Materials in a Humid Hot Environment Using Stainless Steel Powder[J]. China Surface Engineering, 2025, 38(03):372-383.
- [13] Tomlinson K, Fletcher D I, Lewis R. Evaluation of laser cladding as an in-situ repair method on rail steel[J]. Tribology International, 2023, 180:108210-.DOI:10.1016/j.triboint.2022.108210.
- [14] Liu Y, Ding Y, Yang L, et al. Research and progress of laser cladding on engineering alloys: A review[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 66:341-363.DOI:10.1016/j.jmapro.2021.03.061.
- [15] Guo H M, Wang Q, Wang W J, et al. Investigation on wear and damage performance of laser cladding Co-based alloy on single wheel or rail material[J]. Wear, 2015.DOI:10.1016/j.wear.2015.03.002.
- [16] A X X, A H F L, A K Y L, et al. Mechanical properties and electrochemical corrosion resistance of multilayer laser cladded Fe-based composite coatings on 4Cr5MoSiV1 steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 284.DOI:10.1016/j.jmatprotec.2020.116736.
- [17] Weng F, Yu H, Chen C, et al. Effect of process parameters on the microstructure evolution and wear property of the laser cladding coatings on Ti-6Al-4V alloy[J]. Journal of alloys and compounds, 2017, 692: 989-996.
- [18] Ghosh S, Bibhanshu N, Suwas S, et al. Micro-mechanisms underlying enhanced fatigue life of additively manufactured 316L stainless steel with a gradient heterogeneous microstructure[J]. Materials Science and Engineering A, 2023, 886(000):16.DOI:10.1016/j.msea.2023.145665.
- [19] Li W, Meng L, Wang S, et al. Plastic deformation behavior and strengthening mechanism of SLM 316L reinforced by micro-TiC

particles[J].Materials Science and Engineering A, 2023, 884(000):17.DOI:10.1016/j.msea.2023.145557.

- [20] Zeng D , Lu L , Li Z ,et al.Influence of laser dispersed treatment on rolling contact wear and fatigue behavior of railway wheel steel[J].Materials & Design, 2014, 54(Feb.):137-143.DOI:10.1016/j.matdes.2013.08.041.
- [21]苏修梁,张欣宇.表面涂层与基体间的界面结合强度及其测定[J].电镀与环保,2004,(02):6-11.
SU X L, XIN Y. Interfacial Bonding Strength between Surface Coating and Substrate and Its Measurement[J]. Electroplating & Pollution Control, 2004,(02):6-11.
- [22]王新林,石世宏,郑启光.激光熔覆层凝固特征与凝固组织控制研究[J].应用激光,2001,(03):164-166.
WANG X L, SHI H, ZHENG Q G. Study on solidification feature and the solidification microstructure control of laser cladding laser[J]. Applied Laser, 2001,(03):164-166.
- [23] Xiao Q, Li S, Yang W, et al. High-temperature tribological properties of coatings repaired by laser additive manufacturing on railway wheel tread damage[J]. Wear, 2023, 520: 204674.
- [24] Ren B , Zhang M , Chen C ,et al.Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Stellite 12 Fabricated by Laser Additive Manufacturing[J].Journal of Materials Engineering & Performance, 2017.DOI:10.1007/s11665-017-2984-0.
- [25] Lai Q , Abrahams R , Yan W ,et al.Investigation of a novel functionally graded material for the repair of premium hypereutectoid rails using laser cladding technology[J].Composites Part B Engineering, 2017, 130(dec.):174-191.DOI:10.1016/j.compositesb.2017.07.089.
- [26] Sheng S, Zhou H, Wang X, et al. Friction and wear behaviors of Fe-19Cr-15Mn-0.66 N steel at high temperature[J]. Coatings, 2021, 11(11): 1285.
- [27] Xie Z, Liu Y, Wu Y, et al. The effects of Ni and Al elements on microstructure and mechanical properties of low carbon CoCrMo alloy coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2024, 494: 131355.
- [28]董刚,王建鹏,齐欢,等.Mo 含量对 18Ni300 熔覆层耐磨性和强度的影响 [J].表面技术,2025,54(13):121-134.DOI:10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2025.13.011.
DONG G, Wang J P, QI H, et al. Effect of Mo Content on Wear Resistance and Strength of 18Ni300 Cladding Layer[J]. Surface Technology, 2025,54(13):121-134.DOI:10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2025.13.011.
- [29] 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: 126-136.
- [30]Ma,L,He,et al.Wear mapping and transitions in wheel and rail materials under different contact pressure and sliding velocity conditions[J].Wear An International Journal on the Science & Technology of Friction Lubrication & Wear, 2016.



通信作者: 杨文斌 (1987—), 男, 讲师, 博士, 硕士生导师, 研究方向为轮轨滚动接触疲劳、激光增材再制造、等离子体电解沉积。E-mail: yangwenbin891024@163.com。