

渗碳 9310H 钢表面电刷镀镍的摩擦磨损性能研究

林景辉¹, 卢政伟², 陈晨¹, 陈新斌¹, 辛奕韬¹, 胡光辉¹, 舒畅¹, 胡永俊^{1,3,*}, 姜发健³

1. 广东工业大学, 广州 510006

2. 中国航发湖南动力机械研究所, 株洲 412002

3. 阳江合金材料实验室, 阳江 529500

摘要: [目的] 研究渗碳 9310H 钢表面电刷镀镍工艺及其摩擦磨损性能, 为其表面强化与再制造提供理论依据。[方法] 以渗碳 9310H 钢为基材, 采用电刷镀技术依次沉积 Ni 底层、Cu 中间层和 Ni 工作层。采用维氏硬度计和激光共聚焦显微镜测定镀层的显微硬度和表面粗糙度。利用往复摩擦磨损试验机评估镀层在 30 N 和 100 N 载荷下的耐磨性, 采用扫描电子显微镜 (SEM) 和能量色散 X 射线光谱 (EDS) 分析磨痕形貌及元素分布, 探讨磨损机制。[结果] 采用电刷镀 “Ni 底层→Cu 中间层→Ni 工作层” 工艺制备的镀层厚度约为 50 μm, 表面平整致密, 粗糙度 R_a 为 0.12 μm, 显微硬度为 217 HV_{0.5}。在 30 N 载荷下, Ni 镀层的磨损量 (0.24 mg) 与渗碳层相当, 磨损机制为氧化磨损与磨粒磨损; 在 100 N 载荷下, Ni 镀层磨损量为 0.54 mg, 低于渗碳层的 0.65 mg, 磨损机制为磨粒磨损、氧化磨损与粘附磨损共存。[结论] 所制备的 Ni/Cu/Ni 镀层结构致密、结合良好, 虽然硬度低于渗碳层, 但凭借优异的韧性和抗磨性能, 在高载荷条件下展现出更优的耐磨性, 适用于渗碳 9310H 钢的表面修复与强化。

关键词: 渗碳钢; 电刷镀; 镍; 铜; 耐磨性; 显微硬度

中图分类号: TQ153.1+2

文献标志码: A

文章编号: 1004-227X (2026) 04-0065-08

Friction and wear properties of nickel coating deposited on carburized 9310H steel by electro-brush plating

LIN Jinghui¹, LU Zhengwei², CHEN Chen¹, CHEN Xinbin¹, XIN Yitao¹, HU Guanghui¹, SHU Chang¹, HU Yongjun^{1,3,*}, JIANG Fajian³

1. Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

2. Hunan Power Machinery Research Institute, AECC, Zhuzhou 412002, China

3. Yangjiang Alloy Materials Laboratory, Yangjiang 529500, China

Abstract: [Objective] The electro-brush nickel plating process on carburized 9310H steel and the friction and wear properties of the obtained coating were studied to provide a theoretical basis for surface strengthening and remanufacturing of the steel. [Method] Ni underlayer, Cu interlayer, and Ni working layer were sequentially electrodeposited on carburized 9310H steel by electro-brush plating. The microhardness and surface roughness of the coatings were measured using a Vickers hardness tester and a laser confocal microscope. The wear resistance of the coatings under loads of 30 N and 100 N was evaluated using a reciprocating friction and wear tester. The morphology and elemental distribution of the wear scars were analyzed by scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) to investigate the wear mechanisms. [Result] The coating prepared by electro-brush plating Ni underlayer, Cu interlayer and Ni working layer had a thickness of approximately 50 μm, a smooth and compact surface with a roughness R_a of 0.12 μm, and a microhardness of 217 HV_{0.5}. Under a load of 30 N, the wear mass loss of Ni coating (0.24 mg) is comparable to that of the carburized layer, and its wear mechanism was primarily oxidation wear and abrasive wear. Under a load of 100 N, the wear mass loss of Ni coating was 0.54 mg, lower than that of the carburized layer (0.65 mg), with a composite wear mechanism involving abrasive wear, oxidation wear, and adhesive wear. [Conclusion] The prepared Ni/Cu/Ni coating is compact and well-bonded. Although its hardness is lower than that of the carburized layer, it demonstrates superior wear resistance under high-load conditions due to its excellent toughness and anti-wear properties, making it suitable for the surface repair and strengthening of carburized 9310H steel.

收稿日期: 2025-03-17 **修回日期:** 2025-11-03

基金项目: 广东省特种设备检测研究院 2025 年科技项目 (2025JB1-1-03); 阳江市合金材料与五金刀剪重点产业人才振兴计划专项资金项目 (RCZX2024003)。

第一作者: 林景辉 (1999-), 男, 在读硕士研究生, 研究方向为材料表面工程。

通信作者: 胡永俊 (1979-), 男, 博士, 教授, 研究方向为材料表面工程。

引用格式: 林景辉, 卢政伟, 陈晨, 等. 渗碳 9310H 钢表面电刷镀镍的摩擦磨损性能研究[J]. 电镀与涂饰, 2026, 45 (4): 65-72.

LIN J H, LU Z W, CHEN C, et al. Friction and wear properties of nickel coating deposited on carburized 9310H steel by electro-brush plating [J]. Electroplating & Finishing, 2026, 45 (4): 65-72.

Keywords: carburized steel; electro-brush plating; nickel; copper; wear resistance; microhardness

9310H 钢是一种高强度合金钢, 被广泛应用于高强度齿轮、轴等传动组件的制造。这类部件长期处于高负荷和高强度摩擦磨损的工况环境中, 容易导致表面材料逐渐磨损而报废^[1]。因此开展针对磨损零件的修复再制造技术研究, 对降本增效和资源循环利用具有重要意义^[2]。零件修复技术主要有激光熔覆、热喷涂、电刷镀等^[4]。热喷涂虽然操作简便, 但涂层结合力较差^[3]。激光熔覆营造的高温环境会引入较大的热应力, 可能导致材料变形和开裂, 并且设备复杂、成本高昂^[4]。电刷镀兼具设备便携、成本低廉、工艺灵活, 以及镀层表面平整、无需二次加工的优势^[5], 因此备受关注。电刷镀技术是一种基于电化学原理的表面快速修复方法, 通过刷镀笔将金属沉积于工件表面。与传统的槽镀技术相比, 在局部镀覆方面具有明显的优势, 尤其适用于结构复杂或精密零件的表面修复^[6]。

贺秀丽等^[7]对 30Cr13 钢表面进行电刷镀 Ni, 令其耐磨性与耐蚀性显著提高。许剑飞等^[8]通过电刷镀 Cr 技术对某零部件进行修复, 修复后镀层的力学性能与新件相当。张欢等^[9]通过电刷镀镍修补了受损的化学镀镍层, 通过研究刷镀前活化、刷镀工艺参数及后处理对刷镀 Ni 层结合力和耐蚀性的影响, 得到了较优的电刷镀 Ni 工艺。目前针对渗碳 9310H 钢表面电刷镀镍的研究相对匮乏, 尤其是其在高载荷等工况下的摩擦磨损性能及作用更需深入研究。本文拟采用电刷镀镍技术对渗碳 9310H 钢进行表面处理, 研究电刷镀镍对基体力学性能的影响及 Ni 镀层的磨损机制, 旨在为渗碳 9310H 钢表面的强化修复与再制造提供理论依据和技术支持。

1 实验

1.1 材料与设备

采用自动电刷镀实验平台, 包括电刷镀专用特种电源、恒温水槽、三连轴运动驱动系统、镀液循环过滤系统、试样夹持装置及电刷镀所需配件, 能够实现高精度和稳定的电沉积。

以石墨镀笔为阳极, 镀笔外包裹棉花与纱布; 阴极为 10 mm × 20 mm × 5 mm 的渗碳 9310H 钢试样, 其渗碳深度为 0.8 ~ 1.2 mm。

1.2 电刷镀工艺

电刷镀工艺流程为: 预处理→电净→酸洗→活化→电刷镀 Ni 底层→电刷镀 Cu 中间层→电刷镀 Ni 工作层。每道工序前用去离子水冲洗待镀表面, 并擦拭烘干。

1.2.1 预处理

先用 80#砂纸进行粗磨, 去除表面氧化层和锈迹; 再用 400#砂纸进行细磨, 提高表面光洁度; 最后用丙酮冲洗并擦拭, 去除油污和杂质, 以确保镀层与基体之间的良好结合。

1.2.2 电净

电净是为了进一步去除待镀试样表面的油污。电净液组成和工艺条件为: NaOH 30 g/L, Na₂CO₃ 40 g/L, Na₃PO₄ 65 ~ 70 g/L, 电源正接, 电压 10 ~ 12 V, 温度 25 °C, 镀笔速率 0.2 m/s, 电净液流速 25 mL/s, 时间 2 min。

1.2.3 酸洗

酸洗是为了去除试样表面的氧化物与锈迹, 露出新鲜的金属表面并使其活化, 提高电刷镀层的结合力。酸洗液组成和工艺条件为: 盐酸 36 mL/L, NaCl 120 g/L, 电源反接, 电压 11 ~ 15 V, 温度 25 °C, 镀笔速率 0.2 m/s, 镀液流速 25 mL/s, 时间 30 s。

1.2.4 活化

活化是为了去除酸洗时残留在试样表面的炭黑。活化液组成和工艺条件为: 柠檬酸 90 g/L, 柠檬酸钠 160 g/L, NaCl 2 g/L, 电源反接, 电压 12 ~ 15 V, 温度 25 °C, 镀笔速率 0.2 m/s, 活化液流速 25 mL/s, 时间 60 s。

1.2.5 电刷镀 Ni 底层

电刷镀 Ni 底层是通过高电压在基体表面进行冲击镀, 使镀层紧密贴合活化后遍布细小坑洞的基体

表面,有利于提高镀层结合力。电刷镀 Ni 底层的配方和工艺条件为: $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 300~350 g/L, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 10~20 g/L, 盐酸 20~30 mL/L, 乙酸 40~55 mL/L, 电源正接, 电压 11~15 V, 温度 25 °C, 镀笔速率 0.2 m/s, 镀液流速 25 mL/s, 时间 90 s。

1.2.6 电刷镀 Cu 中间层

Cu 镀层具有较小的内应力,将其作为中间层可确保镀层整体的结合力。电刷镀 Cu 中间层的配方和工艺条件为: $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 230~270 g/L, 硫氰酸钠 1 g/L, pH 3.0(用硫酸和醋酸钠调节), 电源正接, 电压 2~3 V, 温度 25 °C, 镀笔速率 0.2 m/s, 镀液流速 25 mL/s, 时间 90 s。

1.2.7 电刷镀 Ni 工作层

电刷镀 Ni 工作层的配方和工艺条件为: $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 300~350 g/L, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 20~30 g/L, 硼酸 40 g/L, 硫氰酸钠 1 g/L, pH 4.5(用氢氧化钠和硫酸调节), 电源正接, 电压 4~6 V, 镀液流速 25 mL/s, 时间 10 min。

1.3 镀层性能检测

1.3.1 显微硬度

使用美国 Buehler VH1202 维氏显微硬度计检测样品的显微硬度, 载荷 200 g, 加载时间 15 s, 每个样品测 5 个点, 取平均值。

1.3.2 表面粗糙度

使用 Olympus 4100 型激光共聚焦显微镜测定样品表面粗糙度 R_a , 在确保试样表面粗糙度一致的情况下进行摩擦磨损试验。

1.3.3 摩擦学性能

试样用砂纸打磨后置于 CFT-1 型摩擦磨损试验机上, 采用直径 6 mm、显微硬度约 1 200 HV 的 ZrO_2 陶瓷球作为摩擦副与之对磨, 分别施加 30 N 与 100 N 的载荷, 滑动摩擦速率为 200 r/min, 试验时间为 15 min。采用式(1)计算体积磨损率(W)。

$$W = \frac{\Delta m}{\rho d F} \quad (1)$$

式中: Δm 为磨损体积, mm^3 ; ρ 为金属镍的密度, 8.9 g/cm^3 ; d 为滑动摩擦距离, m; F 为法向载荷, N。

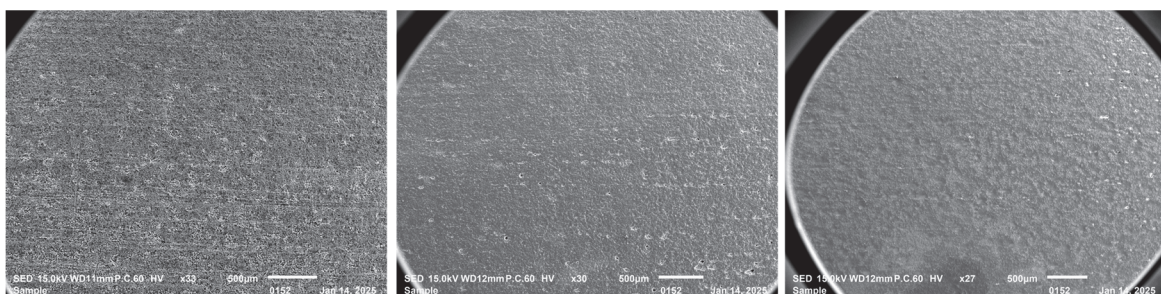
使用 Thermo Fisher Apero 2S HiVac 高分辨率场发射扫描电子显微镜(SEM)观察镀层的磨损形貌, 以及采用 Bruker XFlash 6160 能谱仪(EDS)分析磨痕表面的元素组成。

2 结果与讨论

2.1 电刷镀 Ni 底层和 Cu 中间层的作用

2.1.1 渗碳 9310H 钢在不同工序后的表面形貌

图 1 为渗碳 9310H 钢表面经前处理及刷镀 Ni 底层、Cu 中间层后的表面形貌, 从图 1a 和图 1d 可知, 活化处理后渗碳 9310H 钢表面遍布大大小小的孔洞, 呈现凌乱的破碎状形态。这是因为活化液与基体发生剧烈的氧化还原反应, 而晶界与渗碳体被优先腐蚀, 引发电池效应, 最终形成坑洞。从图 1b 和图 1e 可知, 电刷镀 Ni 底层后渗碳 9310H 钢表面坑洞被覆盖, 形成较为连续的镀层, 但存在少量孔隙。从图 1c 和图 1f 可知, 电刷镀 Cu 中间层后 Ni 底层的孔隙被填补, 表面平整性与致密性进一步提升。



(a) 活化后 (b) 电刷镀 Ni 底层后 (c) 电刷镀 Cu 中间层后
(a) After activation (b) After electro-brush plating of Ni underlayer (c) After electro-brush plating of Cu interlayer

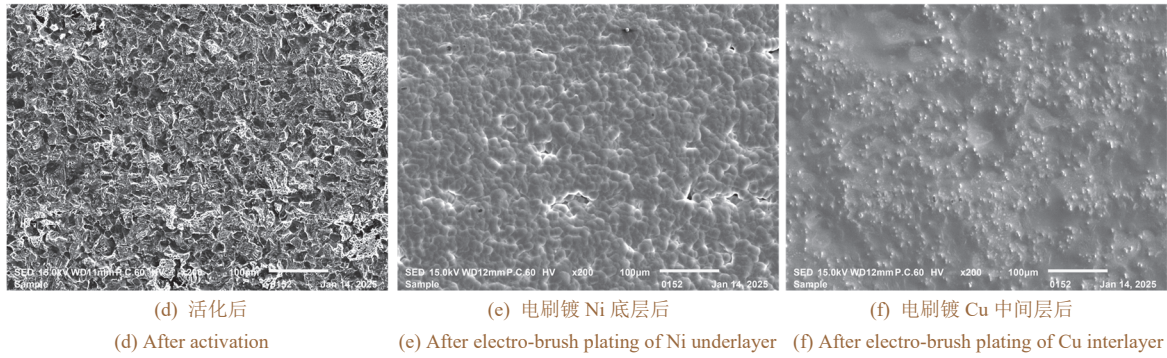


Figure 1 Surface morphologies of carburized 9310H steel after activation, and after electro-brush plating of Ni underlayer and Cu interlayer, respectively

2.1.2 Ni 底层和 Cu 中间层对体系结构和性能的影响

渗碳 9310H 钢经活化后，分别按照“Cu 中间层→Ni 工作层”、“Ni 底层→Ni 工作层”及“Ni 底层→Cu 中间层→Ni 工作层”的流程进行电刷镀，为便于探讨，将以上试样分别标记为 Cu/Ni₂、Ni₁/Ni₂ 和 Ni₁/Cu/Ni₂。3 种电刷镀试样的截面 EDS 成分分布情况及表面形貌分别如图 2 和图 3 所示。

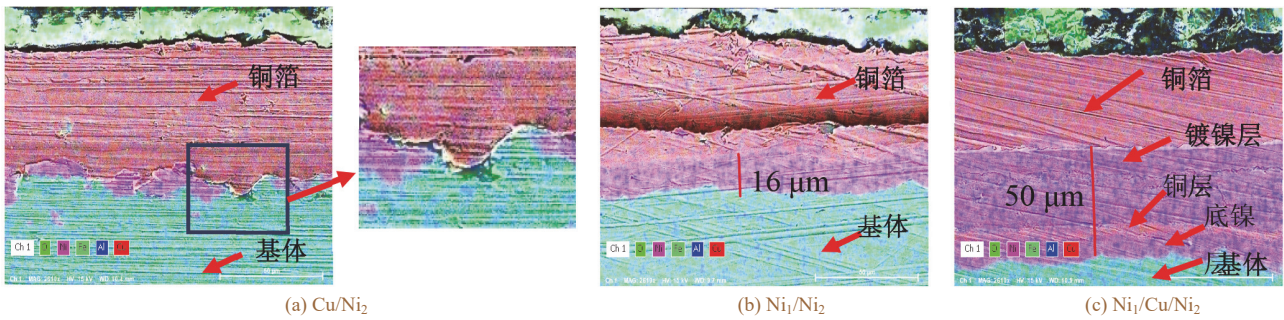


Figure 2 Cross-sectional element distribution of specimens electro-brush plated with different coatings

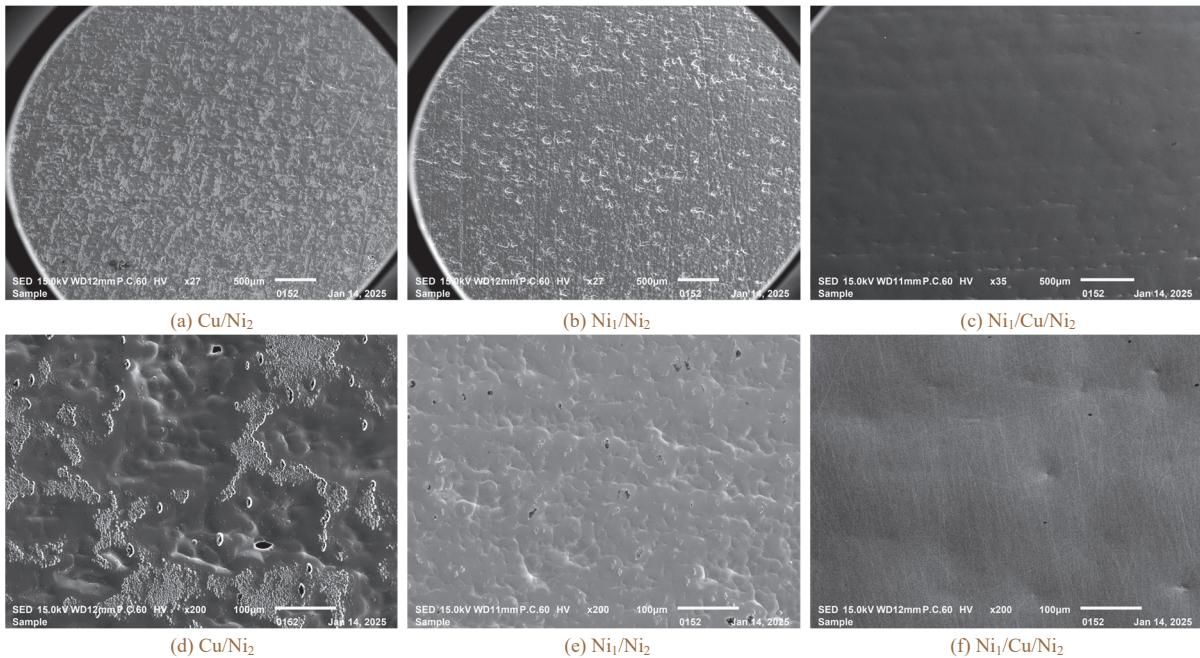


Figure 3 Surface morphologies of specimens electro-brush plated with different coatings

从图 2a 可知，直接在渗碳 9310H 钢表面电刷镀 Cu 中间层与 Ni 工作层时，所得 Cu/Ni₂ 镀层较薄且不连续，存在明显的漏镀区域。这是因为电刷镀 Cu 中间层与 Ni 工作层时采用的电压较低，电流密度较小，难以在粗糙的基底表面实现均匀沉积，导致镀层呈现凹凸不平、不规则的表面形貌(见图 3a 和图 3d)。相比之下，Ni 底层通过高电压冲击镀制备，其间电压可击穿基底表面残留氧化层，并在孔洞中快速沉积 Ni，

形成“铆钉效应”，从而提升了镀层与基体的结合强度，为后续镀层提供低缺陷的过渡镀层。从图 2b 可知，在电刷镀 Ni 底层后直接电刷镀 Ni 工作层所得 Ni₁/Ni₂ 镀层厚度仅 16 μm 左右，其表面形貌与 Ni 底层相似(见图 3b 和图 3e)，表明 Ni 工作层未能填充 Ni 底层表面的微孔和不平整之处。从图 2c、图 3c 和图 3f 可知，按 1.2 节完整流程电刷镀所得 Ni₁/Cu/Ni₂ 镀层厚度约为 50 μm，表面平整、均匀而致密，内部无明显缺陷，并且各镀层之间紧密结合、无明显的缝隙。电镀 Ni 工作层的镀液中添加了光亮剂，有助于在低电压下形成纳米晶结构，从而降低表面粗糙度。

2.1.3 Ni 底层和 Cu 中间层对体系性能的影响

对比了 Cu/Ni₂、Ni₁/Ni₂ 和 Ni₁/Cu/Ni₂ 的显微硬度、表面粗糙度及在 100 N 载荷下摩擦磨损后的磨损量，结果如图 4 所示。未电刷镀 Ni 底层的 Cu/Ni₂ 试样表面粗糙度与磨损量最高；无 Cu 中间层的 Ni₁/Ni₂ 试样显微硬度最高(341 HV_{0.5})；采用完整流程制备的 Ni₁/Cu/Ni₂ 试样表面粗糙度最低(0.12 μm)，其显微硬度虽显著低于 Ni₁/Ni₂，但磨损量却远低于后者。表明 Cu 中间层具有良好的延展性，能够有效填充 Ni 底层的微观孔隙与不平整部位，从而获得表面平整且耐磨性优异的镀层。

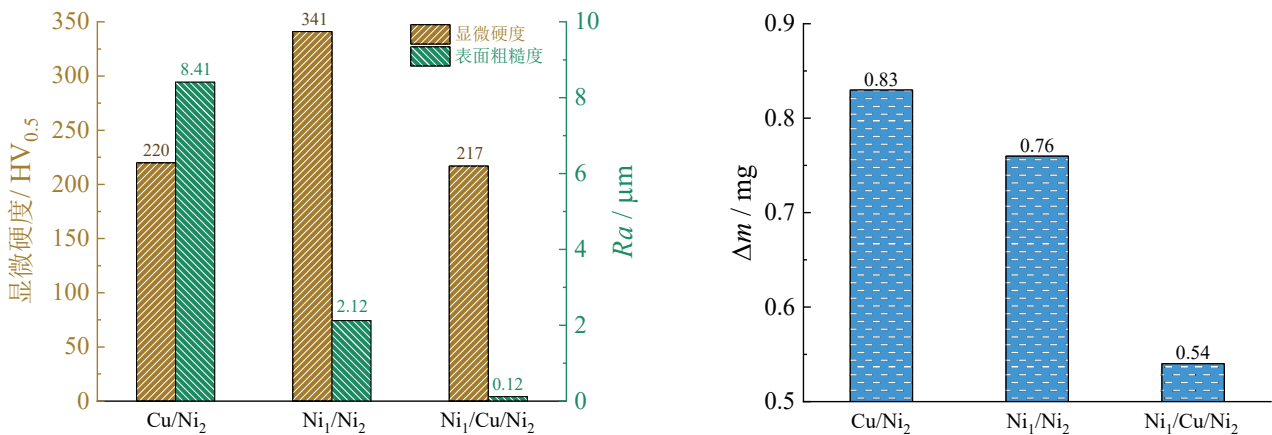


图 4 不同电刷镀试样的显微硬度、表面粗糙度和磨损量

Figure 4 Microhardness, surface roughness, and wear mass of specimens electro-brush plated with different coatings

2.2 渗碳 9310H 钢与电刷镀镍层的耐磨性对比

综上所述，采用“Ni 底层→ Cu 中间层→ Ni 工作层”的电刷镀工艺，能够在渗碳 9310H 钢表面获得微观结构均匀和耐磨性较好的镍镀层。为进一步验证该镀层在渗碳 9310H 钢表面强化修复与再制造中的应用潜力，下文将对其开展不同载荷(30 N 和 100 N)的摩擦磨损试验，并与未镀覆的基体进行对比。

2.2.1 磨损率和摩擦因数

表 1 为渗碳 9310H 钢及电刷镀镍层在不同载荷下摩擦磨损后的体积磨损率。在 30 N 载荷下的往复摩擦磨损试验中，Ni 镀层的磨损量与渗碳 9310H 钢的磨损量均为 0.24 mg。在 100 N 载荷下，Ni 镀层的体积磨损率增大至 0.54 mg，渗碳 9310H 钢的体积磨损率更是上升至 0.65 mg。

表 1 渗碳 9310H 钢与 Ni 镀层的体积磨损率

Table 1 Volumetric wear rate of carburized 9310H steel and Ni coating

样品	30 N		100 N	
	Δm / mg	W / (mm ³ ·N ⁻¹ ·m ⁻¹)	Δm / mg	W / (mm ³ ·N ⁻¹ ·m ⁻¹)
渗碳 9310H 钢	0.24	0.33	0.65	1.42
刷镀镍	0.24	0.35	0.54	1.36

图 5 为渗碳 9310H 钢及电刷镀镍层在不同载荷下摩擦磨损过程中的摩擦因数曲线。在 30 N 载荷下渗碳 9310H 钢的摩擦因数低于 Ni 镀层，而在 100 N 下 Ni 镀层的摩擦因数更低。

综上所述，在高载荷条件下，Ni 镀层的耐磨性优于渗碳 9310H 钢。这可能是因为 9310H 钢基体表面渗碳层的显微硬度(573 HV_{0.5})远高于 Ni 镀层，其脆性也就更高，在高载荷下更容易发生脆性断裂，而 Ni 镀层具有良好的韧性和结合强度，在高载荷表现出更好的耐磨性。

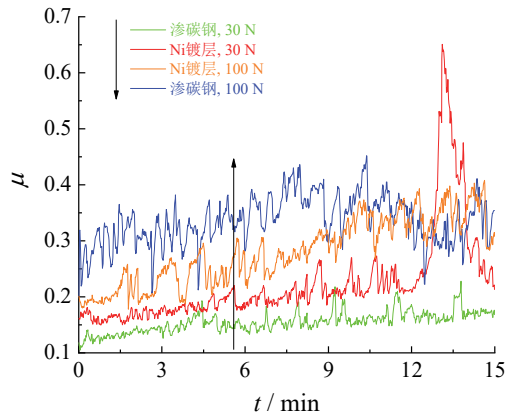
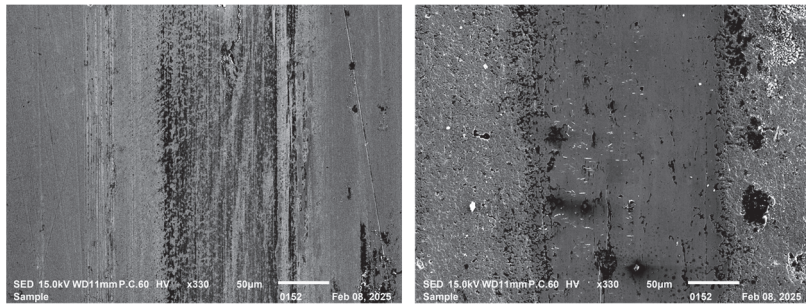


图 5 渗碳 9310H 钢与 Ni 镀层的摩擦因数曲线

Figure 5 Friction coefficient vs. time curves of carburized 9310H steel and Ni coating

2.2.2 低载荷 (30 N) 下的表面磨损机制

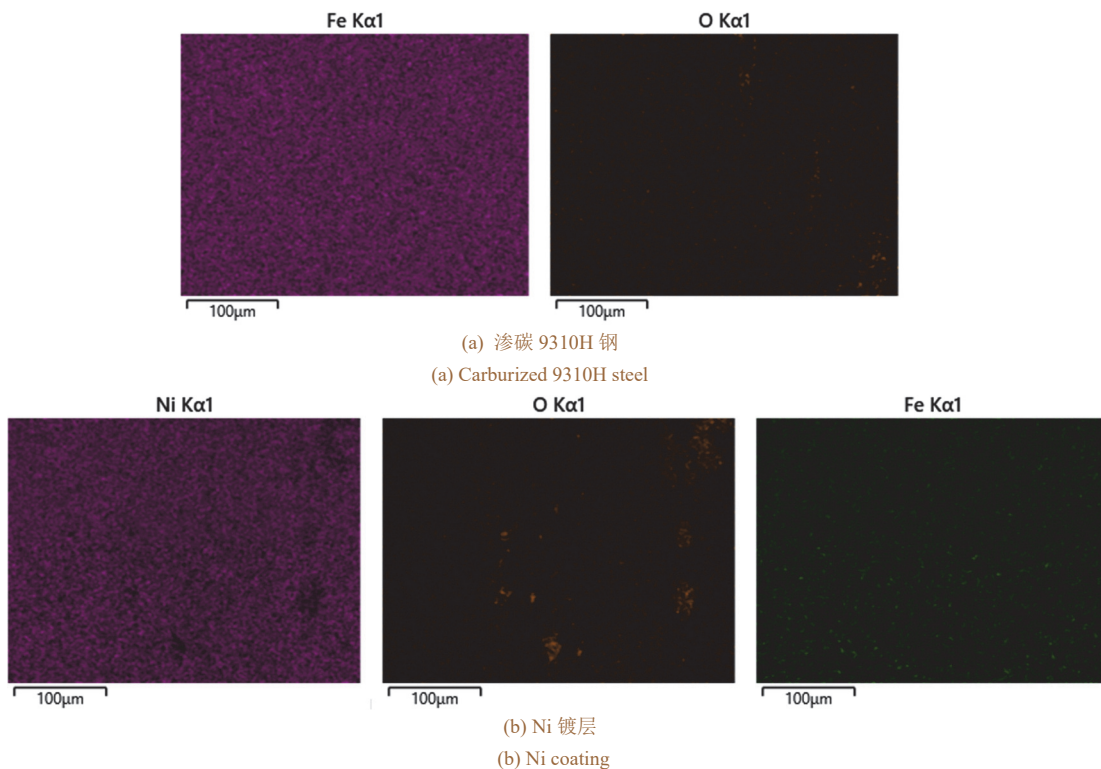
图 6 和图 7 是在 30 N 的低载荷下进行往复摩擦磨损 15 min 后, 渗碳 9310H 钢与电刷镀镍层的磨痕形貌和元素分布。两种试样表面皆分布有犁沟状划痕, 磨痕处均检测到 O 元素。O 元素的存在是摩擦过程中摩擦生热导致局部升温, 促使基体表面发生氧化反应生成 Fe_3O_4 、NiO 等氧化物所致。可见二者的磨损



(a) 渗碳 9310H 钢
(a) Carburized 9310H steel
(b) Ni 镀层
(b) Ni coating

图 6 渗碳 9310H 钢与 Ni 镀层在 30 N 载荷下的磨痕形貌

Figure 6 Wear scar morphology of carburized 9310H steel and Ni coating under 30 N load



(a) 渗碳 9310H 钢
(a) Carburized 9310H steel

(b) Ni 镀层
(b) Ni coating

图 7 渗碳 9310H 钢与 Ni 镀层在 30 N 载荷下磨损后表面元素分布

Figure 7 Surface element distribution of carburized 9310H steel and Ni coating after wear under 30 N load

均以氧化磨损和磨粒磨损为主。对比可见, Ni 镀层的磨痕较宽, 渗碳 9310H 钢因硬度较高而磨痕较窄。然而, 两者整体磨损率相近, 这是因为 Ni 镀层表面生成的 NiO 呈层状结构, 能够在摩擦接触面形成具有润滑作用的薄膜, 从而减小了磨痕深度。说明硬度并非影响磨损率的唯一因素。

2.2.3 高载荷(100 N)下的磨损机制

在 100 N 的高载荷下进行往复摩擦磨损 15 min 后, 渗碳 9310H 钢与电刷镀镍层的磨痕形貌和元素分布如图 8 和图 9 所示。两种试样的磨痕表面均呈现沿滑动方向的犁沟状划痕, 表现出典型的磨粒磨损特征。EDS 分析显示磨痕区域存在氧元素, 且磨痕内部可见少量碎屑, 说明该载荷下的磨损过程同时涉及氧化磨损、粘着磨损与磨粒磨损。对比两者的磨痕形貌可见明显差异: 渗碳 9310H 钢的磨痕长而浅, 伴有片状剥落现象, 磨屑较少并堆积于磨痕两侧; 而镀镍层的磨痕短而深, 磨损产物多堆积于磨痕附近。渗碳层虽然硬度较高, 但脆性也随之增大, 在高载荷循环摩擦作用下易引发微裂纹扩展, 最终导致材料脆性剥落, 形成大面积磨损痕迹, 磨损较严重。相比之下, Ni 镀层硬度较低却韧性良好, 能有效抑制裂纹的萌生与扩展, 从而降低磨损率。此外, Ni 镀层在摩擦过程中能够通过塑性变形适应对偶件的表面形貌, 促使接触应力分布更均匀, 减少局部应力集中; 同时, 高韧性材料在摩擦过程中能够形成稳定的转移膜, 进一步降低摩擦因数和磨损率。因此, 尽管渗碳层硬度更高, 但 Ni 镀层凭借其优异的韧性在高载荷下表现出更优的抗磨损性能。

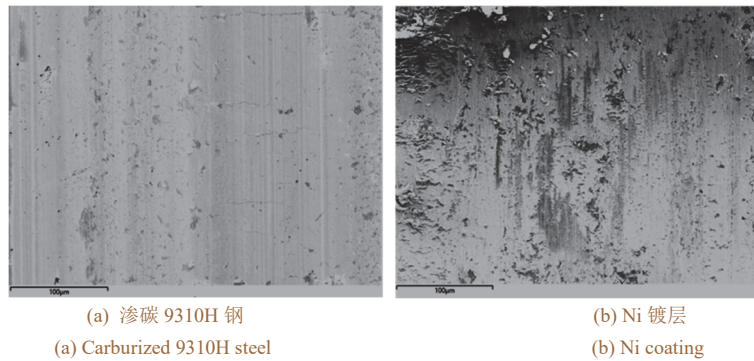


图 8 渗碳 9310H 钢与 Ni 镀层在 100 N 载荷下的磨痕形貌
Figure 8 Wear scar morphology of carburized 9310H steel and Ni coating under 100 N load

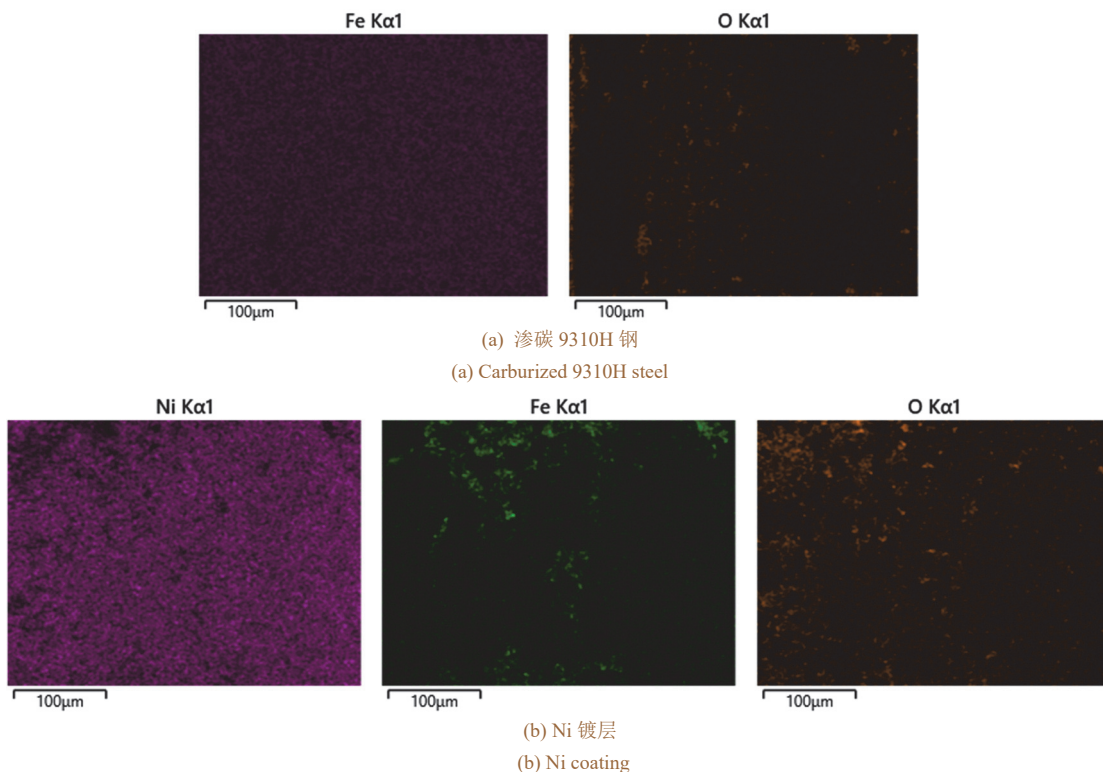


图 9 渗碳 9310H 钢与 Ni 镀层在 100 N 载荷下磨损后表面元素分布
Figure 9 Surface element distribution of carburized 9310H steel and Ni coating after wear under 100 N load

3 结论

1) 采用“Ni 底层→Cu 中间层→Ni 工作层”的电刷镀工艺,可获得性能较优的镀层。其中,Ni 底层通过高电流密度冲击镀有效填充基体表面活化时形成的微孔,增强界面结合;Cu 中间层凭借良好的延展性进一步平整表面,为 Ni 工作层提供均匀致密的沉积基底,最终获得总厚度约 50 μm、表面平整、结构致密的多层组合镀层。

2) Ni 镀层在 30 N 与 100 N 载荷下均表现出良好的耐磨性。在 30 N 低载荷下,其磨损率与高硬度的渗碳层相当;在 100 N 高载荷下,Ni 镀层的磨损率低于渗碳层,体现出更优的承载适应性。

参考文献:

- [1] 苏骐,苏威铭,张吉阜,等.不同表面强化处理对 9310 钢防护性能的影响[J].材料研究与应用,2019,13(4):271-277.
SU Q, SU W M, ZHANG J F, et al. Effect of different surface strengthening treatments on the protective properties of 9310 steel [J]. Materials Research and Application, 2019, 13 (4): 271-277.
- [2] 张鹏远,庞兆夫,黄磊,等.循环经济理论在机械零件失效修复中的运用[J].特钢技术,2011,17(2):48-50.
ZHANG P Y, PANG Z F, HUANG L, et al. Application of cycle economy theory in the repairing of lose effectiveness mechanical parts [J]. Special Steel Technology, 2011, 17 (2): 48-50.
- [3] WANG H Y, CHEN S C, XIANG Y. Study on repairing technologies and repairing experiment by electro-brush plating of camshaft [C] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. [S.l.]: IOP Publishing, 2018, 439 (2): 022010.
- [4] 黄光灿,郭纯,李云,等.农机零部件表面修复及强化技术现状与展望[J].金属加工(热加工),2023(5):127-131.
HUANG G C, GUO C, LI Y, et al. Current situation and prospect of surface repair strengthening of agricultural machinery parts [J]. MW Metal Forming, 2023 (5): 127-131.
- [5] 姚成武,黄坚,吴毅雄.轧辊表面激光强化与修复技术的应用现状[J].热加工工艺,2007,36(8):69-72,77.
YAO C W, HUANG J, WU Y X. Application status of laser hardening and repairing technology on roller surface [J]. Hot Working Technology, 2007, 36 (8): 69-72, 77.
- [6] 陈虎,杨松,许惠菊,等.电刷镀镍过程中 316L 不锈钢表面状态的变化[J].电镀与涂饰,2017,36(16):853-857.
CHEN H, YANG S, XU H J, et al. Surface state change of 316L stainless steel during brush nickel plating [J]. Electroplating & Finishing, 2017, 36 (16): 853-857.
- [7] 贺秀丽,马千钧,梁红玉,等.电刷镀镍对 30Cr13 钢耐腐蚀和力学性能的影响[J].电镀与涂饰,2023,42(3):12-16.
HE X L, MA Q J, LIANG H Y, et al. Effect of electro-brush nickel plating on corrosion resistance and mechanical property of 30Cr13 steel [J]. Electroplating & Finishing, 2023, 42 (3): 12-16.
- [8] 许剑飞,喻世臣,朱平,等.耐磨零部件的电刷镀铬修复[J].电镀与涂饰,2024,43(5):22-30.
XU J F, YU S C, ZHU P, et al. Repair of a wear-resistant part by electrobrush plating with chromium [J]. Electroplating & Finishing, 2024, 43 (5): 22-30.
- [9] 张欢,肖海丽,肖飞,等.刷镀镍修补化学镀镍层工艺及性能研究[J].电镀与精饰,2019,41(4):42-46.
ZHANG H, XIAO H L, XIAO F, et al. Study on process and properties of brush plating nickel repairing electroless nickel plating [J]. Plating and Finishing, 2019, 41 (4): 42-46.

【编辑:周新莉】