

电刷镀制备银/银-石墨烯复合镀层及其性能

裴 锋¹, 董 丽², 田 旭¹, 马 光³, 王建才², 叶志国²

(1. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 南昌 330006;

2. 南昌航空大学材料科学与工程学院, 南昌 330063; 3. 国网智能电网研究院有限公司, 北京 102211)

摘 要: 在 KI 体系中采用电刷镀方法在铜基体上制备了银/银-石墨烯复合镀层, 研究了镀液中石墨稀含量对所制备复合镀层附着力、接触电阻、物相、耐蚀性和耐磨性的影响。结果表明: 纯银镀层和复合镀层的附着力都达到标准要求; 在 NaCl 和 H₂SO₄ 腐蚀介质中, 复合镀层的腐蚀速率均小于纯银镀层, 在 NaOH 腐蚀介质中则相反; 复合镀层的平均摩擦因数和磨损率最低, 分别为 0.274 和 5.68×10^{-6} mg/(m·N), 远小于纯银镀层, 接触电阻与纯银镀层相差不大。

关键词: 高压隔离开关; 石墨烯; 电刷镀; 复合镀层

中图分类号: TG174

文献标志码: A

文章编号: 1005-748X(2024)02-0036-07

户外高压隔离开关广泛应用于电力系统^[1], 其工作的户外环境会遇到恶劣的气候条件, 所以高压隔离开关经常出现触头发热^[2]、瓷瓶断裂、运动卡滞、分合闸不到位等问题^[3-4]。金属腐蚀也会直接或间接引起导电回路过热、瓷瓶断裂、操作失灵, 因此锈蚀也是一个不可忽略的问题^[5]。高压隔离开关常采用无氰镀银方式进行保护。在无氰镀银体系中添加石墨烯, 可提高镀层的耐磨性, 降低接触电阻, 且制备工艺环保, 符合发展需求。

张增广^[6]在 Na₂S、NaCl、H₂SO₄ 和 NaOH 四种腐蚀介质中研究了镀层的耐蚀性能, 结果表明: 银镀层、银-石墨复合镀层和银-石墨烯复合镀层三种银基镀层均优于纯铜, 其中银-石墨烯复合镀层的抗 Na₂S 和 NaCl 腐蚀能力最强, 银镀层、银-石墨复合镀层抗 H₂SO₄ 和 NaOH 腐蚀能力最佳。吕旺燕等^[7]在 3.5% (质量分数) NaCl 溶液中研究了银镀层和银-石墨烯复合镀层的耐蚀性, 结果表明, 在银镀层中添加石墨烯可以提高镀层的耐蚀性。普通的电镀方式难以处理复杂的零部件, 往往需要拆卸零件, 导致成本升高。电刷镀技术可以实现复杂形状供电设备的现场维修, 且具有操作方便灵活的特点^[8-12], 弥补了传统电镀^[13]在这方面的缺点。

作者在 KI 体系下采用电刷镀法在纯铜基体上制备了不同石墨烯含量的银/银-石墨烯复合镀层, 研究了复合镀层的结合力、接触电阻、耐蚀性和耐磨性。

1 试 验

1.1 镀层制备

阳极材料为石墨镀笔 (纯度 99.99%); 阴极材料也是基体材料, 为纯铜 (纯度 99.9%); 石墨烯 (<10 层碳原子) 的颗粒尺寸为 2~16 μm。

电刷镀前对铜基体进行打磨、电净、强化等前期处理。具体步骤如下: 将打磨水洗后的铜基体材料用电极夹固定, 在 10 V 电压、0.1~1.5 A/dm² 电流密度下电净处理 10 s, 用蒸馏水冲洗; 将电净之后的铜基体用电极夹固定, 在 10 V 电压、0.1~1.5 A/dm² 电流密度下强化处理 10 s, 用蒸馏水冲洗。

在 2 V 电压、0.1~1.5 A/dm² 电流密度下, 在固定强化后的铜基体上匀速刷镀纯银镀液 120 s 得到纯银镀层, 用蒸馏水冲洗; 在 1 V 电压、0.1~1.5 A/dm² 电流密度下, 匀速刷镀复合镀液 200 s, 经蒸馏水冲洗和干燥处理得到银/银-石墨稀复合镀层 (以下称复合镀层)。

纯银镀液中含硝酸银 30 g/L、碘化钾 400 g/L。复合镀液是在纯银镀液的基础上添加碳酸钾、石墨烯和石墨烯分散剂。其中碳酸钾质量浓度为 30 g/L, 石墨烯质量浓度分别为 0.5、1.0、1.5、2.0、5.0 g/L, 石墨烯分散剂添加量为石墨烯质量的 30%。

收稿日期: 2022-03-11

基金项目: 江西省电力有限公司重大科技项目 (52182020008L)

通信作者: 叶志国 (1979—), 教授, 博士, 从事电化学工程材料研究, 15979113456, yezhiguo2008@163.com

1.2 性能测试

1.2.1 附着力和物相测试

参考 GB/T 5270—2005《金属基体上的金属覆盖层 电沉积和化学沉积层 附着强度试验方法评述》中的划格法测试复合镀层的附着力;使用 D8ADVANCE-A25 型 X 射线衍射仪(XRD)对复合镀层的物相结构进行分析;采用 Dxr2xi 型共聚焦拉曼光谱仪测复合镀层中石墨烯的拉曼光谱,判断石墨烯的层数(激光波长 532 nm);应用 ONH-3000 型红外碳硫仪对复合镀层中碳含量进行定量分析。

1.2.2 耐蚀性测试

使用 Parstat 2273 电化学测试系统和三电极体系测复合镀层的极化曲线。其中饱和甘汞电极为参比电极,20 mm×20 mm×2 mm 的镀层试样为工作电极,Pt 片为辅助电极。测量温度为 25 ℃,腐蚀介质分别为 3.5% NaCl、1 mol/L H₂SO₄ 和 1 mol/L NaOH。

1.2.3 耐磨性测试

采用 WTE-2E 型摩擦磨损机进行摩擦磨损试验,分析复合镀层的耐磨性。试样尺寸为 20 mm×20 mm×2 mm,磨球为 φ4 mm 的 GCr 15 钢球,载荷为 280 g,转速为 300 r/min,摩擦直径为 6 mm,试验时间为 30 min。根据摩擦因数随时间变化曲

线和式(1)计算磨损率。

$$\omega = \frac{\Delta m}{2\pi R t n \mu N} \tag{1}$$

式中:ω 为磨损率,mg/(m·N);Δm 为摩擦磨损试验前后样品的质量损失量,g;R 为摩擦半径,m;t 为滑动时间,s;n 为主轴转速,m/s;μ 为平均摩擦因数;N 为转向载荷,N。

1.2.4 接触电阻测试

采用 DMR-4 接触电阻测试仪测量复合镀层的接触电阻。夹具与试样采用面接触形式,单个夹子的接触面积为 1.0 cm×0.5 cm。选择合适阻值量程,将仪器预热 5 min 后再进行测试(测试精度为 0.01 μΩ),每种镀层分别进行 5 次测量,其平均值即为镀层接触电阻。

2 结果与讨论

2.1 附着力

观察含不同量石墨烯镀液制备的复合镀层划格后的外观形貌,如图 1 所示。由图 1 可见,所有镀层均未发生脱落,达到 GB/T 5270—2005 标准要求。这表明采用电刷镀制备的无氰纯银镀层(0 g/L)和银/银-石墨烯复合镀层均拥有优异的附着力。

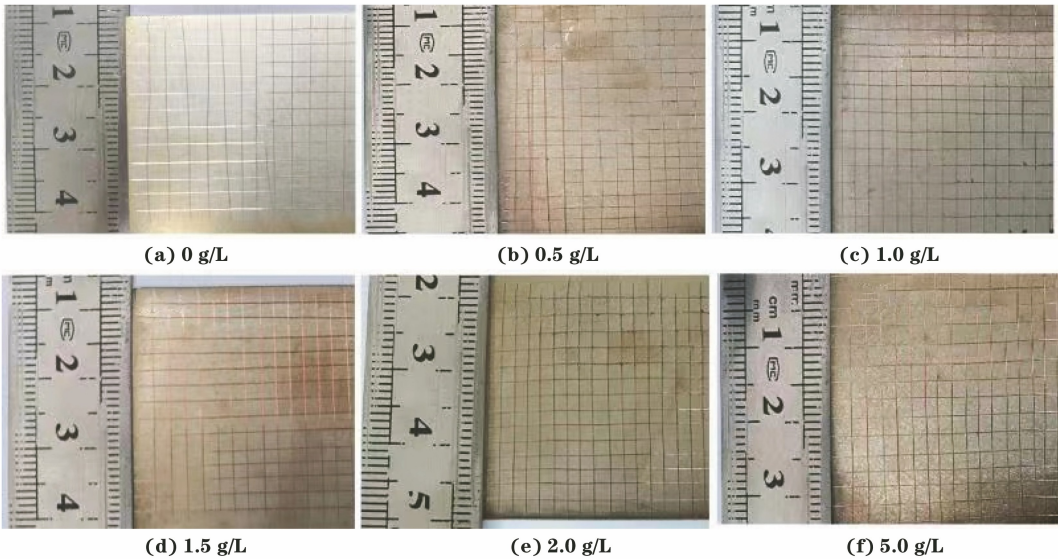


图 1 含不同量石墨烯镀液制备的复合镀层的附着力测试结果

Fig. 1 Adhesion test results of composite coatings prepared with plating solutions containing different graphene content

2.2 物相特性

图 2 是含不同量石墨烯镀液制备的复合镀层的 XRD 谱。由图 2 可以看到,在纯银镀层和复合镀层 XRD 谱 2θ 为 38.1°, 44.3°, 64.4°, 77.4° 处,均出现了银在晶面(111), (200), (220), (311) 的特征峰。在复合镀层 XRD 谱中,26.6° 处未发现

碳的衍射峰,这主要是因为镀液中石墨烯含量较少,进入镀层的碳含量偏低;而 50.4° 处发现铜的衍射峰,这主要是因为镀层较薄,检测到了铜基体。另外, XRD 谱中并无其他杂峰,表明制备的镀层并无其他杂相。

图 3 是含不同量石墨烯镀液制备的复合镀层的

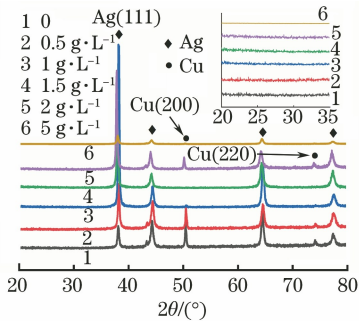


图 2 含不同石墨烯量镀液制备的复合镀层的 XRD 谱
Fig.2 XRD patterns of composite coatings prepared with plating solutions containing different graphene content

拉曼光谱。由图 3 可知:当镀液中含 2.0 g/L 石墨烯时,在对应复合镀层的拉曼光谱中可以明显观察到石墨烯的两个特征峰 D 峰和 G 峰,说明此时与银共沉积的石墨烯量较多;而当镀液中含 0.5~1.5 g/L 石墨烯时,石墨烯的两个特征峰均较弱,说明此时只有少量石墨烯与银共沉积。另外,复合镀层的拉曼光谱中均有 2D 峰,且 2D 峰比较尖锐,说明复合镀层中的石墨烯没有发生团聚。

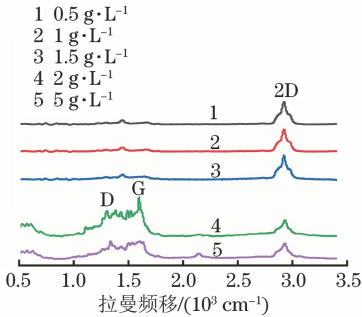


图 3 含不同量石墨烯镀液制备的复合镀层的拉曼光谱
Fig.3 Raman spectra of composite coatings prepared with plating solutions containing different graphene content

用红外碳硫仪分析含不同量石墨烯镀液制备的复合镀层中的碳含量,结果如表 1 所示。从表 1 中可以看出,随着镀液中石墨烯含量的增加,复合镀层中碳含量先增大后减小,当石墨烯质量浓度为 2.0 g/L 时,对应复合镀层中碳含量达到最大。这是因为当

表 1 含不同量石墨烯镀液制备的复合镀层的碳含量

Tab.1 Carbon content in composite coatings prepared with plating solutions containing different graphene content		
石墨烯质量浓度/(g·L ⁻¹)	碳质量分数/%	碳原子分数/%
0.5	0.42	3.65
1.0	0.41	3.57
1.5	0.47	4.07
2.0	0.70	5.96
5.0	0.33	1.48

镀液中石墨烯质量浓度大于 2.0 g/L 时,镀笔的摩擦挤压和刷镀放热作用使石墨烯片层在电刷镀过程中发生团聚,团聚的石墨烯片超过临界尺寸后,会在自身重力以及外力作用下从镀层上脱落^[6],所以复合镀层中石墨烯含量减少。

2.3 耐蚀性

图 4 是含不同量石墨烯镀液制备的复合镀层在 3.5% NaCl 溶液中的极化曲线,对其进行拟合得到复合镀层的自腐蚀电位与腐蚀电流密度,如表 2 所示。从表 2 中可以看到,纯银镀层的自腐蚀电位是 -0.261 6 V。当镀液中石墨烯质量浓度分别为 1.0、2.0、5.0 g/L 时,对应复合镀层的自腐蚀电位相对于纯银镀层的自腐蚀电位分别正移了 0.023 5、0.015 7、0.007 4 V,其中石墨烯质量浓度为 1.0 g/L 时对应复合镀层的自腐蚀电位最大。随着镀液中石墨烯含量的增加,腐蚀电流密度没有呈现出特定的规律,纯银镀层的腐蚀电流密度为 3.60×10⁻⁶ A/cm²,复合镀层的腐蚀电流密度均小于纯银镀层的;其中,

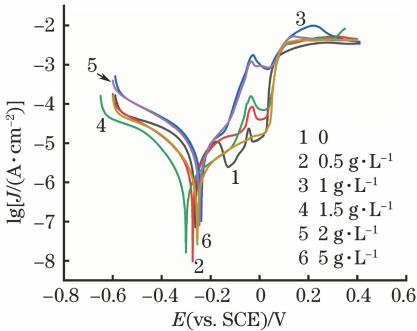


图 4 含不同量石墨烯镀液制备的复合镀层在 3.5% NaCl 溶液中的极化曲线

Fig.4 Polarization curves of composite coatings prepared with plating solutions containing different graphene content in 3.5% NaCl solution

表 2 含不同量石墨烯镀液制备的复合镀层在 3.5% NaCl 溶液中的自腐蚀电位和腐蚀电流密度

Tab.2 Free corrosion potentials and current densities of composite coatings prepared with plating solutions containing different graphene content in 3.5% NaCl solution		
石墨烯质量浓度/(g·L ⁻¹)	E _{corr} (vs. SCE)/V	J _{corr} /(A·cm ⁻²)
0	-0.261 6	3.60×10 ⁻⁶
0.5	-0.272 8	1.65×10 ⁻⁶
1.0	-0.238 1	3.41×10 ⁻⁶
1.5	-0.301 1	1.15×10 ⁻⁶
2.0	-0.245 9	6.97×10 ⁻⁷
5.0	-0.254 2	3.27×10 ⁻⁶

石墨烯质量浓度为 2.0 g/L 时对应复合镀层的腐蚀电流密度最小,其值为 6.97×10^{-7} A/cm²。腐蚀电流密度与腐蚀速率成正比,因此在 3.5% NaCl 溶液中复合镀层的腐蚀速率均小于纯银镀层的。在与银共沉积过程中,石墨稀均匀分布于晶粒与晶界处,并镶嵌到镀层的孔隙中^[14],这增加了复合镀层的致密性;另外,石墨烯具有非常稳定的物理化学性能,覆盖在镀层表面的石墨烯可以使腐蚀介质与晶粒隔离,阻止复合镀层发生腐蚀,从而使镀层的耐蚀性提高^[4]。

图 5 是含不同量石墨烯镀液制备的复合镀层在 1 mol/L H₂SO₄ 溶液中的极化曲线,对其进行拟合得到复合镀层的自腐蚀电位与腐蚀电流密度,如表 3 所示。从表 3 可以看到,纯银镀层的自腐蚀电位是-0.046 0 V。当镀液中石墨烯质量浓度分别为 0.5、1.0、2.0、5.0 g/L 时,对应复合镀层的自腐蚀电位相对于纯银镀层的自腐蚀电位分别正移了 0.059 0、0.042 0、0.021 0、0.033 0 V,随着镀液中石墨烯含量

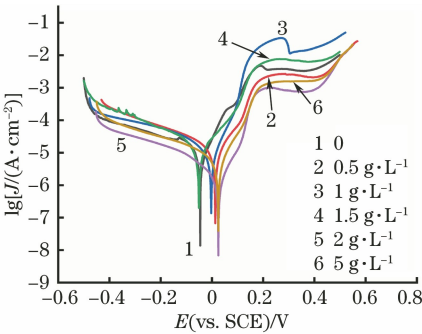


图 5 含不同量石墨烯镀液制备的复合镀层在 1 mol/L H₂SO₄ 溶液中的极化曲线

Fig. 5 Polarization curves of composite coatings prepared with plating solutions containing different graphene content in 1 mol/L H₂SO₄ solution

表 3 含不同量石墨烯镀液制备的复合镀层在 1 mol/L H₂SO₄ 溶液中的自腐蚀电位和腐蚀电流密度
Tab. 3 Free corrosion potentials and current densities of composite coatings prepared with plating solutions containing different graphene content in 1 mol/L H₂SO₄ solution

石墨稀质量浓度/ (g·L ⁻¹)	E_{corr} (vs. SCE)/V	$J_{\text{corr}}/$ (A·cm ⁻²)
0	-0.046 0	8.70×10^{-6}
0.5	0.013 0	5.79×10^{-6}
1.0	-0.004 0	3.33×10^{-6}
1.5	-0.052 0	7.39×10^{-6}
2.0	-0.025 0	5.60×10^{-7}
5.0	-0.013 0	2.72×10^{-6}

的增加,自腐蚀电位的变化不大且没有线性相关性。纯银镀层的腐蚀电流密度为 8.70×10^{-6} A/cm²,复合镀层的腐蚀电流密度均小于纯银镀层的,这主要是因为随着镀层中石墨烯含量的增加,暴露在表面的银层减少,硫酸溶液并未接触到银层,避免了腐蚀的发生。当石墨烯质量浓度为 2.0 g/L 时,对应复合镀层的腐蚀电流密度最小,其值为 5.60×10^{-7} A/cm²,这说明此时进入到镀层中的石墨烯量最多,镀层致密、孔隙率小,镀层耐蚀性好。继续增加镀液中石墨烯的含量,复合镀层的腐蚀电流密度又增大。主要原因是,石墨烯极易团聚导致其在刷镀过程中从镀层表面滑落,进入镀层中的石墨烯量慢慢减小,镀层致密性降低,硫酸溶液进入空隙内,增加了反应面积,导致腐蚀电流密度增大,复合镀层的耐蚀性下降。

图 6 为含不同量石墨烯镀液制备的复合镀层在 1 mol/L NaOH 溶液中的极化曲线,对其进行拟合得到复合镀层的自腐蚀电位与腐蚀电流密度,如表 4 所

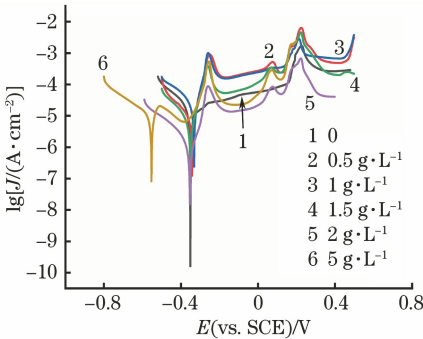


图 6 含不同量石墨烯镀液制备的复合镀层在 1 mol/L NaOH 溶液中的极化曲线

Fig. 6 Polarization curves of composite coatings prepared with plating solutions containing different graphene content in 1 mol/L NaOH solution

表 4 含不同量石墨烯镀液制备的复合镀层在 1 mol/L NaOH 溶液中的自腐蚀电位和腐蚀电流密度
Tab. 4 Free corrosion potentials and current densities of composite coatings prepared with plating solutions containing different graphene content in 1 mol/L NaOH solution

石墨稀质量浓度/ (g·L ⁻¹)	E_{corr} (vs. SCE)/V	$J_{\text{corr}}/$ (A·cm ⁻²)
0	-0.352 0	1.38×10^{-5}
0.5	-0.342 0	1.13×10^{-5}
1.0	-0.334 0	1.52×10^{-6}
1.5	-0.353 0	8.20×10^{-6}
2.0	-0.355 0	4.46×10^{-6}
5.0	-0.555 0	1.36×10^{-5}

示。从表 4 可以看到,纯银镀层的自腐蚀电位是 $-0.352\ 0\ \text{V}$ 。随着镀液中石墨烯含量的增加,复合镀层的自腐蚀电位先增大后减小,当镀液中石墨烯质量浓度为 $1.0\ \text{g/L}$ 时,对应复合镀层的自腐蚀电位最大。纯银镀层的腐蚀电流密度为 $1.38\times 10^{-5}\ \text{A/cm}^2$,复合镀层的腐蚀电流密度均小于纯银镀层的,这说明复合镀层的腐蚀速率均小于纯银镀层的。当石墨烯质量浓度为 $1.0\ \text{g/L}$ 时,对应复合镀层的腐蚀电流密度出现最小值,为 $1.52\times 10^{-6}\ \text{A/cm}^2$ 。由于石墨烯覆盖在镀层表面,优先被腐蚀,石墨烯性质又比较稳定,所以镀层的耐蚀性提高^[15]。

2.4 耐磨性

由图 7(a)可知,纯银镀层和复合镀层都经历了磨合和稳定两个阶段。纯银镀层的磨合阶段大约为 $11\ \text{min}$,磨合期间摩擦因数随时间的延长先增大后趋于稳定。复合镀层的磨合阶段均为 $6\ \text{min}$ 左右。当镀液中石墨烯质量浓度为 $0.5\ \text{g/L}$ 和 $1.0\ \text{g/L}$ 时,

对应复合镀层的摩擦因数随时间延长先减小后增大,最后上升到一个稳定值;当石墨烯质量浓度为 $5.0\ \text{g/L}$ 时,对应复合镀层的摩擦因数随时间延长先增大后减小,最后趋于一个稳定数值;当石墨烯质量浓度为 $1.5\ \text{g/L}$ 和 $2.0\ \text{g/L}$ 时,对应复合镀层的摩擦因数经过了磨合阶段后都逐渐趋于稳定。

由图 7(b)可知,纯银镀层的平均摩擦因数为 0.577 ,远远大于复合镀层的平均摩擦因数;随镀液中石墨烯含量的增加,复合镀层的平均摩擦因数先减小后增大,当石墨烯质量浓度为 $2.0\ \text{g/L}$ 时,复合镀层的平均摩擦因数出现最低值,为 0.274 。

由图 7(c)和(d)可知,镀层的磨损率和平均磨痕宽度并没有出现明显规律。当石墨烯质量浓度为 $2.0\ \text{g/L}$ 时,对应复合镀层的磨损率出现最低值,为 $5.68\times 10^{-6}\ \text{mg}/(\text{m}\cdot\text{N})$;而当石墨烯质量浓度为 $1.0\ \text{g/L}$ 时,平均磨痕宽度出现最低值,为 $0.296\ \text{mm}$ 。

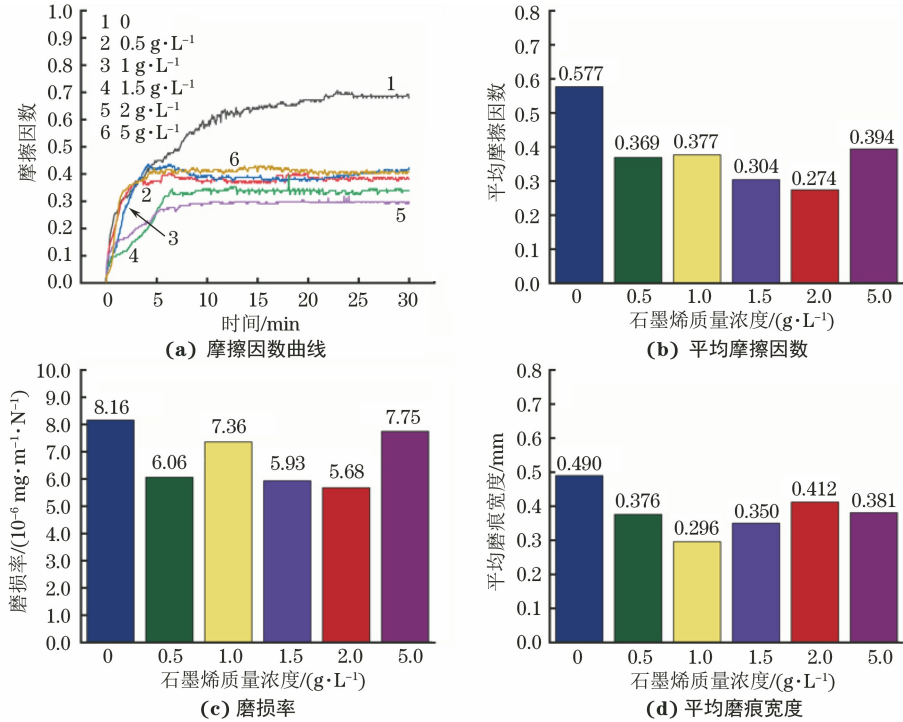


图 7 含不同量石墨烯镀液制备的复合镀层的耐磨性

Fig. 7 Abrasion resistance of composite coatings prepared with plating solutions containing different graphene content:

(a) friction factor curves; (b) average friction factor; (c) wear rate; (d) average abrasion width

图 8 为摩擦磨损后镀层的形貌。由图 8 可见,纯银镀层出现大量的剥落坑以及磨粒,说明其发生了黏着磨损、磨粒磨损和疲劳磨损,部分区域铜基体裸露。当石墨烯质量浓度为 $0.5\ \text{g/L}$ 时,在磨球的挤压下对应复合镀层出现了大量平行于磨球运行方向的犁沟和少量疲劳裂纹以及疲劳剥落现象,摩擦

表面较为平整,剥落现象较纯银镀层有所减缓。随着镀层中石墨烯含量的增加,复合镀层的摩擦表面变得完整,剥落现象逐渐改善。可见,当石墨烯质量浓度为 $1.5\ \text{g/L}$ 时,对应复合镀层的摩擦表面仍然有少量裂纹。但当石墨烯质量浓度为 $2.0\ \text{g/L}$ 时,对应复合镀层的摩擦表面已平整,犁沟较浅。当石

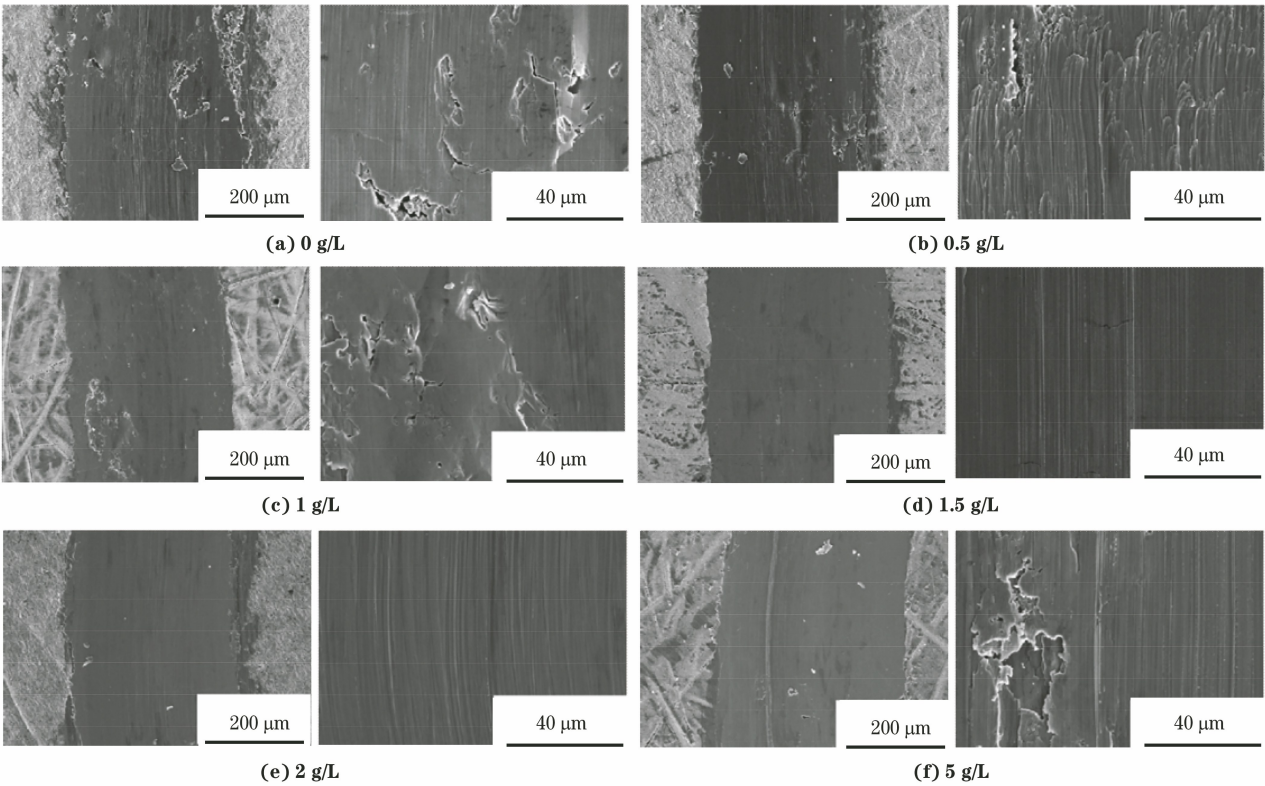


图 8 含不同量石墨烯镀液制备的复合镀层的摩擦磨损形貌

Fig. 8 Friction and wear morphology of composite coatings prepared with plating solutions containing different graphene content

墨稀质量浓度增加到 5.0 g/L 时,对应复合镀层的表面出现明显的鳞片状形貌和因黏着剥落出现的大凹坑。这主要是因为石墨烯含量过高,在镀液中迅速聚集成团聚的石墨,导致镀层表面组织不致密,孔隙率增大。

2.5 接触电阻

图 9 为含不同量石墨烯镀液制备的复合镀层的接触电阻。从图 9 可以看到,纯银镀层的接触电阻为 52.1 $\mu\Omega$,复合镀层的接触电阻较纯银镀层的略微升高,但幅度不大。纯银具有优异的导电性能^[16],石墨烯的电阻率高于纯银,纯银镀层中夹杂

微量的石墨烯颗粒后,接触电阻发生小幅升高。尽管复合镀层的导电性能比纯银镀层的略微下降,但是其耐蚀性和耐磨性都有所提升。石墨稀的加入改善了镀层的综合性能,对于提高户外环境中高压隔离开关的稳定性具有重要意义。

3 结 论

(1) 通过电刷镀技术制备了银/银-石墨烯复合镀层,相较于相同工艺条件下制备的纯银镀层,复合镀层的组织更加致密,质量更优。

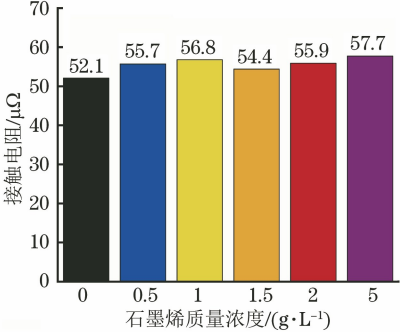
(2) 在 NaCl 和 H₂SO₄ 腐蚀介质中,复合镀层的腐蚀速率均小于纯银镀层,但在 NaOH 腐蚀介质中,纯银镀层的耐蚀性能优于复合镀层。

(3) 当镀液中石墨烯质量浓度为 2.0 g/L 时,对应复合镀层的平均摩擦因数达到最低(0.274),远远低于纯银镀层的平均摩擦因数,接触电阻为 55.9 $\mu\Omega$,与纯银镀层相差不大。石墨烯的加入改善了镀层的综合性能,对提高户外高压隔离开关的稳定性具有重要意义。

参考文献

[1] 曹春博,王慧源. 隔离开关触指镀银层现场修复新工艺

图 9 含不同量石墨烯镀液制备的复合镀层的接触电阻
Fig. 9 Contact resistance of composite coatings prepared with plating solutions containing different graphene content



- 的应用[J]. 内蒙古电力技术,2017,35(6):66-69.
- [2] 向常桂,黄立才. 户外隔离开关导电回路过热的原因及对策[J]. 湖北电力,2010,34(4):28-29.
- [3] 林岩. 户外高压隔离开关常见缺陷分析及对策[J]. 硅谷,2010,3(3):16-17.
- [4] 姚原,韩金涛. 高压断路器故障检修及状态监测[J]. 山东工业技术,2017(8):45.
- [5] 曹胜利,苑金海,赵昌. 户外高压隔离开关腐蚀与防护分析[J]. 电气制造,2007,2(6):46-48.
- [6] 张增广. 银-石墨烯及银-石墨复合镀层的制备与性能研究[D]. 广州:华南理工大学,2017.
- [7] 吕旺燕,王文俊,聂铭,等. 高压隔离开关用银-石墨烯复合镀层的绿色制备与性能优化[J]. 广东电力,2019,32(7):112-123.
- [8] 丁小龙. 电刷镀 Ni-石墨烯复合镀层的制备与性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2018.
- [9] 唐义号,熊丽芳,熊哲,等. 电刷镀再制造技术快速修复缺陷零件应用研究[J]. 直升机技术,2011(2):49-51, 55.
- [10] 谭俊,田辉,高玉琳,等. 电刷镀纳米结构镀层的发展及其机理研究走向[J]. 中国表面工程,2008,21(5):15-20.
- [11] 张嗣伟. 我国摩擦学工业应用的节约潜力巨大——谈我国摩擦学工业应用现状的调查[J]. 中国表面工程,2008,21(2):50-52.
- [12] 徐飞,邓庆,肖银平. 电刷镀在工程机械维修中的应用[J]. 南方农机,2020,51(11):111,115.
- [13] 杨眉,田小梅,张万里,等. W-Ni-Fe 合金镀层与硬铬镀层耐磨性的对比试验[J]. 电镀与精饰,2010,32(9):27-30.
- [14] 朱荻,张文峰,雷卫宁. 基于电沉积技术的纳米晶材料晶粒细化工艺研究[J]. 人工晶体学报,2004,33(5):765-769.
- [15] 陶祯臻. 石墨烯纳米复合水性涂层的防腐性能研究[D]. 马鞍山:安徽工业大学,2015.
- [16] 陈俊寰,夏延秋,曹正锋. 铜基银镀层的导电性及摩擦磨损性能[J]. 材料保护,2016,49(10):1-4,13,5.

Preparation of Silver/Silver-Graphene Composite Coatings by Brush Plating and Their Properties

PEI Feng¹, DONG Li², TIAN Xu¹, MA Guang³, WANG Jiancai², YE Zhiguo²

(1. State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Nanchang 330006, China;

2. School of Material Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

3. Institute of State Smart Grid, Beijing 102211, China)

Abstract: The silver/silver-graphene composite coatings were prepared on copper substrate in KI system by electric brush plating technology. The effects of graphite content in electrolytes on adhesion, contact resistance, material phase, corrosion resistance and wear resistance of the composite coatings were investigated. The results show that the adhesion of both pure silver coating and composite coating met the standard requirements. The corrosion rates of the composite coatings were less than that of pure silver coating in NaCl and H₂SO₄ corrosive media, which was inverse in NaOH corrosion medium. The lowest average friction factor and wear rate of composite coatings were 0.274 and 5.68×10^{-6} mg/(m·N), respectively, which was much smaller than that of pure silver coating, and the contact resistance of composite coating was not much different from that of pure silver coating.

Key words: high-pressure isolation switch; graphene; electric brush plating; composite coating