

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.05.002

氧化石墨烯强化银镀层的耐蚀性和耐磨性研究

刘凯¹, 沈喜训^{1,2,3*}, 马祥⁴, 孙鹏¹, 徐群杰^{1,2,3}

(1. 上海电力大学 环境与化学工程学院, 上海 200090; 2. 上海市电力材料防护与新材料重点实验室, 上海 200090; 3. 上海热交换系统节能工程技术研究中心, 上海 200090;
4. 上海航天信息研究所, 上海 201109)

摘要: 为满足电连接器在服役过程中对导电银镀层的耐蚀性和耐磨性的需求, 本文基于 5,5-二甲基乙内酰脲作为主络合剂的无氰镀银溶液, 通过添加氧化石墨烯纳米片, 采用直流电沉积在铜基材表面制备了银-氧化石墨烯复合镀层。采用光学显微镜、扫描电子显微镜、能谱仪、X 射线衍射仪对镀层表面形貌、成分和晶体结构进行了表征, 并通过电化学实验和摩擦磨损试验对复合镀层的耐蚀性和耐磨性进行了测试。结果表明, 氧化石墨烯的掺入改变了银的晶体生长方向, 并细化了组织, 提高了银镀层的硬度、耐蚀性与耐磨性。

关键词: 银基复合镀层; 氧化石墨烯; 电镀; 耐磨性; 耐蚀性

中图分类号: TQ153.2 文献标识码: A

Study on corrosion resistance and wear resistance of silver coatings strengthened by graphene oxide

Liu Kai¹, Shen Xixun^{1,2,3*}, Ma Xiang⁴, Sun Peng¹, Xu Qunjie^{1,2,3}

(1. School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Materials Protection and Advanced Materials in Electric Power, Shanghai 200090, China; 4. Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: To meet the need for corrosion and wear resistance of conductive silver coatings for electrical connectors during service, the silver-graphene oxide composite coating on the copper substrate surfaces was prepared by using the direct current electrodeposition from a cyanide free silver graphene oxide composite plating solution with 5,5-dimethylhydantoin as the main complexing agent in this paper. The surface morphology, composition, and crystal structure of the composite coating were characterized using the optical microscope, scanning electron microscope, energy spectrometer, and X-ray diffractometer. The corrosion resistance and wear resistance of the composite coating were evaluated by the electrochemical experiments and wear tests. The results show that the addition of graphene oxide changes the crystal growth direction of silver, refines the microstructure, and improves the hardness, corrosion resistance and wear resistance of the silver coating.

Keywords: silver composite coating; graphene oxide; electroplating; wear resistance; corrosion resistance

收稿日期: 2023-09-11

修回日期: 2024-01-18

作者简介: 刘凯(1998—), 男, 硕士在读, email: 31571355@qq.com

*通信作者: 沈喜训(1977—), 男, 博士, 副教授, email: shenxixun@shiep.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(21972090), 上海市科委项目(19DZ2271100)

银金属由于其优异的导电性和可焊性,被广泛用作电器、电子和通信设备领域的电子连接器、高压电触头和导电滑环等电连接器表面的导电功能涂层^[1-3]。在电连接器的实际使用过程中,接触部件之间频繁接触、插拔等机械动作容易导致电连接器表面的银镀层磨损、氧化和腐蚀等失效^[4-8],大大增加了电连接器的接触电阻,严重影响了电接触部件的可靠性,不能满足实际使用寿命的要求。因此,迫切需要进一步开发具有高硬度和高抗腐蚀的银镀层。

为了满足电连接器对银镀层机械性能的高要求,在实际应用中通过采用引入微量合金元素,构造合金化的银复合镀层来提高银镀层的机械性能。商业上主要通过往电镀液中添加酒石酸锑钾制备银锑合金来改善纯银镀层的机械性能^[9]。除了锑元素之外,研究者们还尝试引入镍、钴等合金元素构造银基合金镀层^[10-11]。和纯银镀层相比,虽然这些合金具有较高的硬度和耐磨性,但是微量合金元素的添加降低了银镀层的导电性,使得电连接器的接触电阻变大^[12]。除了添加微量合金元素外,研究者还尝试通过引入具有优良自润滑性能和导电性的石墨、金刚石、碳纳米管、石墨烯等碳基相,以提高银镀的耐磨性^[13-16]。研究表明,在保证不影响银镀层导电性的同时,这些碳族相的引入可以显著提高银镀层的抗磨损性能,说明引入碳族第二相构造银-碳复合镀层是一种提高银镀层耐磨性的有效方法。然而,这些碳族第二相粒子由于与水相容性较差,在电镀液中分散能力较差容易发生团聚,导致复合镀层中第二相掺杂量不均匀,镀层质量不高,给电镀工艺管控带来极大挑战^[17]。因此,需要解决碳族相的分散能力来改善银基复合镀层的质量。氧化石墨烯(GO)是石墨烯的一种衍生物,具有与石墨烯类似的优异的导电性能、力学性能和润滑性能,其结构上还具有丰富的羟基、环氧化物、羰基、羧基等含氧官能团^[18]。这些含氧官能团不仅使GO具有良好的亲水性和分散能力,还可以为离子/分子反应提供更多活性位点^[19]。GO的结构特性使其相比于其它碳族材料更适合作为银基复合镀层的强化相。

因此,本文以GO作为掺杂第二相、采用5,5-二甲基乙内酰脲(DMH)作为络合剂的无氰镀银溶液,在铜基体表面上电镀银-GO复合镀层。研究了GO的掺入对银镀层的结构和形貌的影响,并通过硬度测试、磨损实验和电化学分析对银GO复合镀层的

机械性能和腐蚀性能进行了研究。

1 实验部分

1.1 电镀及工艺流程

采用宽2 cm、长12 cm的黄铜片(实施电镀面积区域尺寸为2 mm×3 mm)作为阴极,纯度为99.99%纯银片作为阳极,阴极与阳极面积比为1:2。使用银-GO复合电镀溶液,采用直流电沉积工艺,在电流密度为1 A/dm²的条件下,在黄铜表面制备银-GO复合镀层。电镀工艺流程为:裁剪基材→化学除油→去离子水冲洗→超声乙醇除油→去离子水冲洗→活化→去离子水冲洗→制备GO悬浮液→超声复合电镀液→电沉积→去离子水冲洗→冷风吹干。

黄铜片的化学除油是将黄铜片置于由70 g/L NaOH、30 g/L Na₃PO₄、30 g/L Na₂CO₃、25 g/L Na₂SiO₃组成的除油液中浸泡5~10 min;超声乙醇除油是将黄铜片置于无水酒精溶液中,超声清洗1~2 min;活化处理是将黄铜片放置于质量浓度为5%稀硫酸溶液中浸泡1~2 min,去除黄铜片表面的氧化层。

制备GO悬浮液:将5 g通过Hummer法^[20]自制的GO薄片分散放入500 ml去离子水中,采用超声破碎机超声1.5 h,制成分散均匀的GO纳米片悬浮溶液。图1是经过超声处理的GO纳米片的形貌。从图1可以看到,GO纳米片尺寸处于0.5~2.0 μm之间,其平均晶粒尺寸约为800 nm。

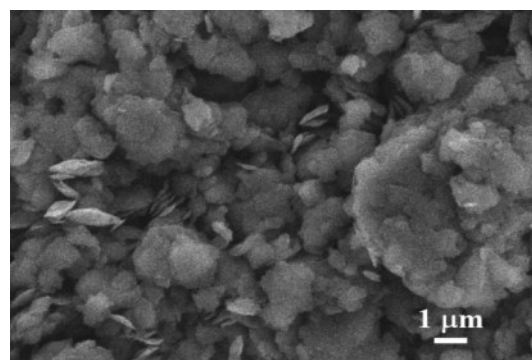


图1 GO纳米片的形貌

Fig.1 Morphology of GO nanosheets

GO复合电镀溶液的组成为:10~30 g/L硝酸银、60~100 g/L的DMH、40~80 g/L焦磷酸钾、30~50 g/L氯化钾、50 ml/L的GO纳米片、0.5~1.0 g由含醛基和羧基化合物组成的复合光亮剂。使用氢氧化钾调控pH至10,电镀前,将GO复合电镀液置于超声破碎

机中超声分散2~3 min。在磁力连续搅拌的条件下电镀15 min。为了对比,相同工艺条件下在上述不含有GO的纯银镀液中,用电沉积制备了同样厚度的纯银镀层。

1.2 形貌与结构表征

采用型号为BX53的奥林巴斯光学显微镜(OP)对镀层的显微形貌和压痕形貌进行观察。采用型号为JEM-7800F的扫描电子显微镜(SEM)观察镀层表面的微观形貌,通过场发射扫描电子显微镜中的EMAX能谱仪分析镀层的成分。采用D/max 2200型X射线衍射仪(XRD)对镀层的晶体结构和晶粒尺寸进行分析。XRD辐射源为Cu-K α 射线,波长为0.1541 nm,扫描范围为10°~80°,步长为0.02°。

1.3 显微硬度测试

采用型号为HVS-1000的数字显微维氏硬度计对镀层的显微硬度进行测量。施加载荷为0.05 kgf,保持载荷的作用时间为10 s,每个样品测量三个区域,测量结果取三个区域硬度的平均值。通过硬度计自带成像转接摄像头,捕获压痕形貌,根据压痕对角线值,计算出硬度镀层的硬度值。

1.4 耐蚀性测试

利用CHI600E型电化学工作站测试两种镀层在5%氯化钠溶液中的极化曲线和电化学阻抗谱,以分析镀层的耐蚀性。实验所采用的三电极体系中,甘汞电极作为参比电极,铂电极作为对电极,镀层(暴露面积为1 cm²)作为工作电极,扫描速度为5 mV/s。测试前先将样品浸泡在3.5%氯化钠溶液中,直到开路电位稳定。电化学交流阻抗谱测试的频率范围为100 kHz~0.01 Hz,交流激励信号峰值为5 mV,利用ZSimWin软件分析阻抗数据并且拟合等效电路。

1.5 耐磨性测试

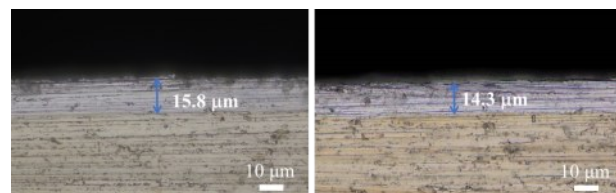
采用MMW-1型摩擦磨损试验机分析镀层的耐磨性能。采用45号碳钢磨球作为摩擦副,分别在4.05 N和14.05 N的载荷下对两种镀层进行往复滑动摩擦实验。采用光学显微镜对磨损后试样表面形貌进行观察。

2 结果与讨论

2.1 形貌和成分分析

图2为纯银镀层和银-GO复合镀层截面的OP照片。从图中可以看到,纯银镀层和GO复合镀层

的平均厚度分别约为15.4 μ m和14.3 μ m,二者与基体界面处都没有孔洞缝隙等缺陷,说明镀层与基体结合良好。



(a) 纯银镀层

(b) 银-GO复合镀层

图2 纯银镀层和银-GO复合镀层的截面OP照片

Fig. 2 Cross-sectional OP pictures of pure silver coating and silver-GO composite coating

图3为纯银镀层和银-GO复合镀层表面形貌的OP照片。从图3(a)和3(b)可见,纯银镀层表面呈现出球状生长的团簇结构。而GO的掺杂改变了银镀层的形貌特征,从图3(c)可见,银-GO复合镀层表面呈现出非常细小的球状生长团簇,说明GO掺杂细化了组织。在复合电沉积过程中,GO通过嵌入基体产生无序结构缺陷来增强银结晶的成核点,同时GO向生长中心的表面扩散过程还会干扰晶体生长,这可能是导致复合镀层组织细化的原因^[21]。从图3(d)的局部放大照片可以观察到许多灰色褶皱状的GO均匀分布在银镀层中。这种GO纳米片在镀层中的存在状态还可以通过SEM进一步观察到。

图4(a)为尺寸较大的GO纳米片嵌入到银镀层中的SEM形貌图。与光学显微观察结果一致,除了这些尺寸较大的GO纳米片被观察到外,在一些区域还捕捉到尺寸非常细小的GO纳米片,如图4(b)中箭头1和2所示。为了进一步证实GO纳米片的存在,通过EDS对箭头所示1和2区域进行了能谱分析,其能谱谱线见图4(c)和4(d)。从图4(c)和4(d)可以看到,能谱谱线上除了银元素出现之外,一定占比的碳元素还被检测到,说明GO纳米片在银镀层中呈现均匀分布的状态。

2.2 结构分析

图5是纯银镀层与银-GO复合镀层的XRD图。从图5(a)可知,在纯银镀层衍射图谱中出现了四个晶面的衍射峰,分别是在衍射角为38.09°上出现的非常强的(111)晶面衍射峰和在衍射角44.77°、65.17°、81.41°上出现的弱的(200)、(220)、(311)晶面衍射峰,这说明纯银镀层是以(111)晶面择优生长的。银-GO复合镀层的衍射图谱明显不同于纯银,

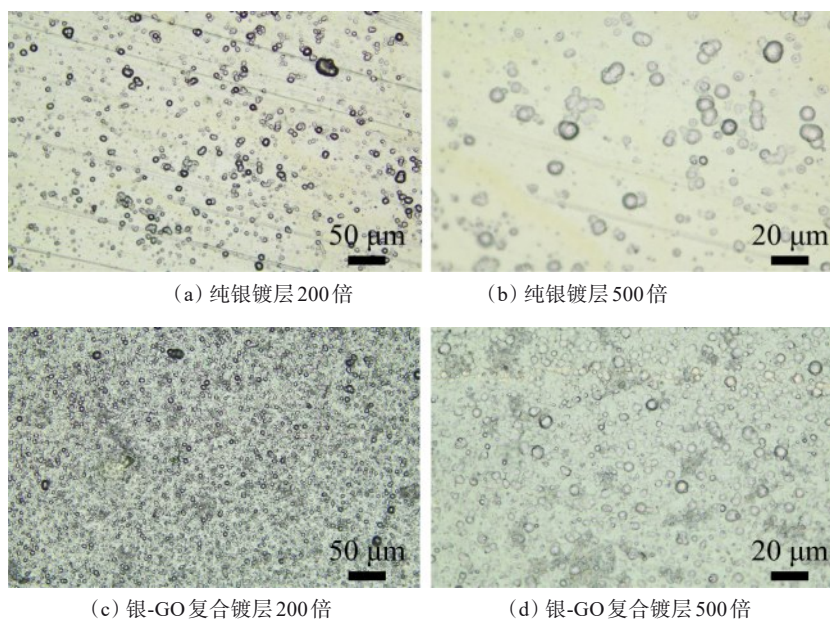


图3 纯银镀层和银-GO 复合镀层的表面OP 照片

Fig.3 Surface OP pictures of pure silver coating and silver-GO composite coating

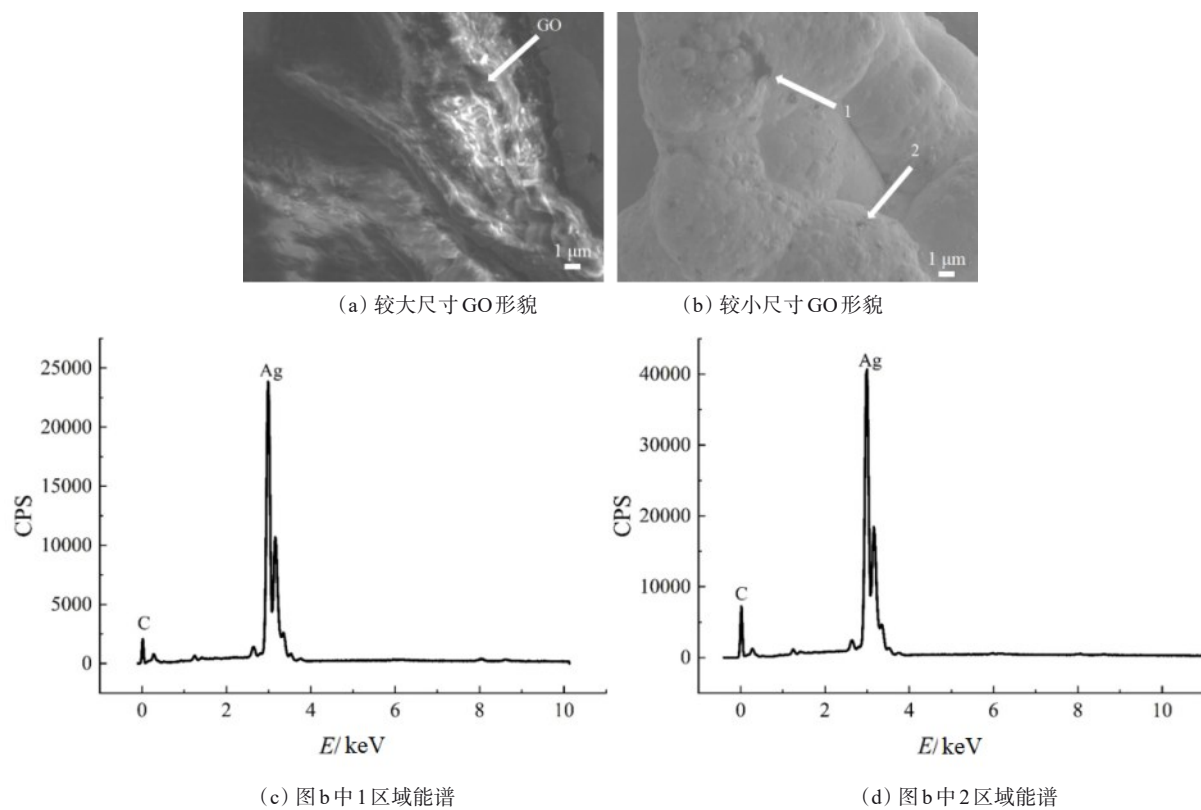


图4 银-GO 复合镀层的SEM 照片和能谱

Fig.4 SEM pictures and energy spectrum of silver-GO composite coating

从图5(b)可以看到,在银-GO复合镀层的衍射图谱中,在低衍射角度区域(10~30°之间)出现了明显的包状衍射峰,这是GO的衍射峰。另外,GO的掺杂还改变了银镀层的择优生长方向。从图5(b)银-GO

复合镀层的衍射图谱可以看到,(311)晶面的衍射峰强明显提高,说明银-GO复合镀层的银是沿着晶面(311)和(111)择优生长。

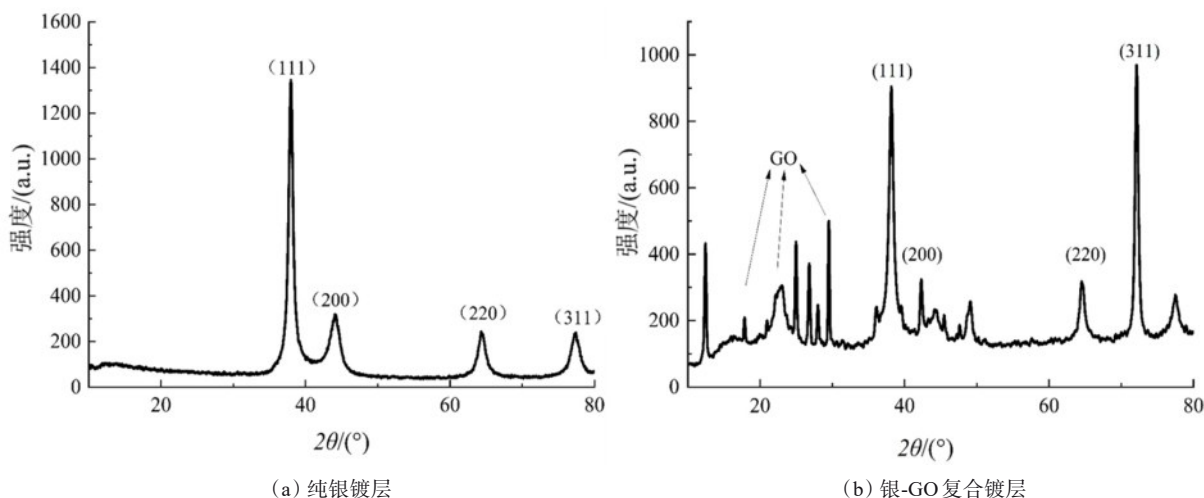


图5 纯银镀层和银-GO复合镀层的XRD图

Fig.5 XRD images of pure silver coating and silver-GO composite coating

2.3 耐蚀性能分析

图6是纯银镀层与银-GO复合镀层的塔菲尔曲线。

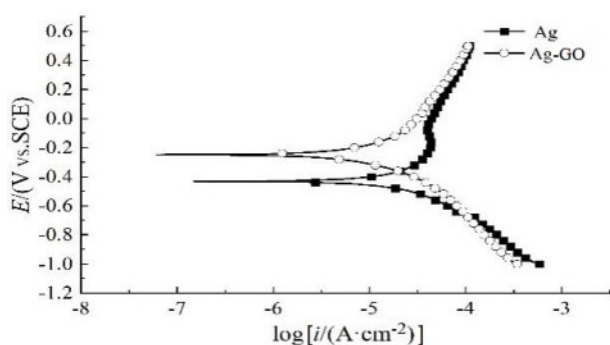


图6 纯银镀层和银-GO复合镀层的塔菲尔曲线

Fig. 6 Tafel curves for pure silver coating and silver-GO composite coating

由图6可以看到,和纯银镀层相比,银-GO复合镀层的自腐蚀电位发生了明显正移。为了定量比较两种镀层的耐腐蚀性,使用塔菲尔曲线外推法求出了两种银镀层的腐蚀电位(E_{corr})和腐蚀电流密度(i_{corr}),结果见表1。由表1可知,纯银镀层的 E_{corr} 约为-0.4345 V,银-GO复合镀层的 E_{corr} 约为-0.2458 V,与纯银镀层相比,其 E_{corr} 向正方向偏移了约190 mV。纯银镀层的 i_{corr} 约为 $2.539 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$,而银-GO复合镀层的 i_{corr} 约为 $5.512 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$,比纯银镀层下降了

近一个数量级。更正的 E_{corr} 和更小的 i_{corr} 意味着镀层具有更小的腐蚀速率,说明银-GO复合镀层比纯银镀层更耐腐蚀性介质中氯离子的侵蚀,可以更好地抑制阳极反应,减缓腐蚀过程,为铜基体提供更好的腐蚀保护。

表1 纯银镀层和银-GO复合镀层在3.5%NaCl溶液中的腐蚀电位和腐蚀电流密度

Tab.1 Corrosion potentials and corrosion current densities of pure silver coating and silver-GO composite coating in 3.5% NaCl solution

样品	E_{corr}/V	$i_{\text{corr}}/(\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2})$
Ag	-0.4345	2.539×10^{-5}
Ag-GO	-0.2458	5.512×10^{-6}

为了进一步说明银-GO复合镀层具有更好的抗腐蚀能力,对镀层进行了化学阻抗谱的测试。图7是纯银镀层与银-GO复合镀层在3.5% NaCl溶液中的奈奎斯特图(图中插图为等效电路)。从图7可以看到,纯银镀层和银-GO复合镀层都具有两个相似的电容环,分别对应于高频、中频和低频。高频区域的电容环与涂层电阻 R_{coat} 有关,中频和低频区域的电容环与界面处的法拉第反应引起的电荷转移电阻 R_{ct} 有关。而银-GO复合镀层具有更大的容抗弧,表明在电化学反应过程中其电荷转移阻抗更大。

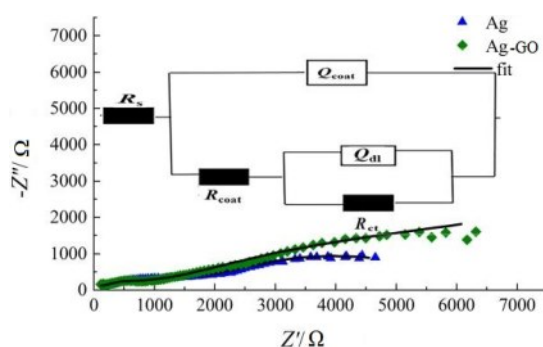


图7 纯银镀层和银-GO复合镀层在3.5% NaCl溶液中的奈奎斯特图

Fig. 7 Nyquist plots of pure silver plating and silver-GO composite plating in 3.5% NaCl solution

采用图7插图中($R_s(Q_{coat}(R_{coat}(Q_{dl}(R_{ct}))$)等效电路对交流阻抗谱进行拟合,拟合结果与原始阻抗曲线图基本吻合,说明所选的等效电路比较合理。等效电路拟合获得的电化学参数被概括在表2中。从表2可知,银-GO复合镀层的电荷转移电阻 R_{ct} 和极

化电阻 R_p 都明显高于纯银镀层。腐蚀溶液与金属界面之间的电荷转移速率通常与极化电阻 R_p 呈反比,即极化电阻越大,金属的腐蚀速率越低。这表明银-GO复合镀层能更好地抵抗氯离子的侵蚀,有更好的耐腐蚀性,与塔菲尔曲线获得的结果一致。

表2 银-GO复合镀层的EIS结果的拟合参数

Tab.2 Fitting parameters for EIS results of silver-GO composite coatings

试样	$R_s / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$R_{coat} / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$R_{ct} / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	Q_{coat}		Q_{dl}		$R_p / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$
				$Y_1 / (\text{W}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^n)$	n_1	$Y_2 / (\text{W}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^n)$	n_2	
Ag	62	2690	3821	7.109×10^{-5}	0.315	6.108×10^{-4}	0.546	6511
Ag-GO	81	1579	10290	3.146×10^{-5}	0.347	2.720×10^{-4}	0.381	11869

银-GO复合镀层耐蚀性能的提高可能归功于GO掺杂诱发的组织细化。在电化学腐蚀过程中,均匀细小的组织可以形成较小的阳极/阴极面积比,来避免严重的局部腐蚀^[22-23]。同时,细小的GO纳米片在电沉积过程中可以有效地填充到银镀层的缝隙和微孔等微观缺陷处,阻碍腐蚀介质择优沿着缺陷处向基体内部快速渗入。此外,由于银镀层中加入了GO纳米片,会引起腐蚀路径严重扭曲,增加了腐蚀介质的扩散路径,这利于复合镀层耐腐蚀性的提升。

2.4 显微硬度分析

银-GO和纯银镀层的硬度测试结果见表3。从

表3 银-GO复合镀层和纯银镀层的显微硬度值

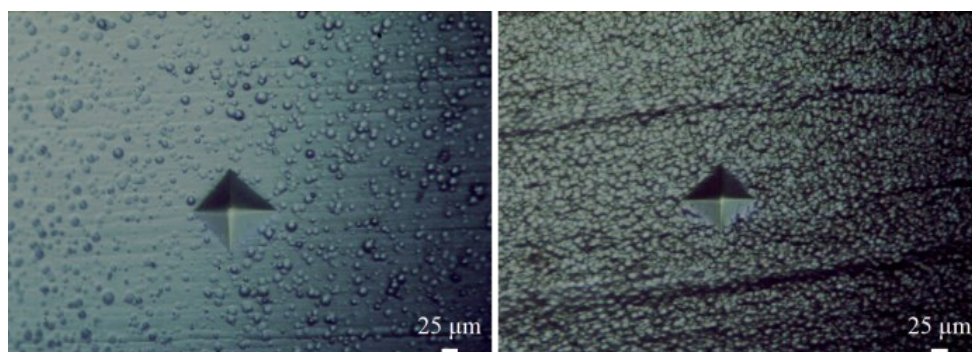
Tab.3 Microhardness values of pure silver coating and silver-GO composite coating

镀层类型	显微硬度/HV			
	测试点1	测试点2	测试点3	平均值
Ag	105	105	100	103
Ag-GO	109	115	112	112

表3可知,纯银镀层的平均显微硬度为103 HV,而银-GO复合镀层的平均显微硬度为112 HV,这说明银-GO复合镀层具有更大的硬度,这一点从二者的硬度压痕的尺寸对比也可以反映出来。图8是纯银镀层和银-GO复合镀层的硬度压痕形貌。从图8可以看到,在同样载荷下,银-GO复合镀层的压痕尺寸明显小于纯银镀层的压痕尺寸,表明GO的掺杂提高了银镀层的硬度。这种硬度的提高可能与GO的掺杂细化了组织有关^[24]。

2.5 耐磨性能分析

图9是在载荷为4 N和14 N下,纯银镀层和银-GO复合镀层的摩擦系数曲线。从图中可以看到,两种镀层的摩擦系数曲线分为两个阶段:前500 s是摩擦系数随磨损时间而逐渐上升的过渡期阶段;超过500 s后,摩擦系数不再随着磨损时间的延长而变化,维持在一个稳定的区间范围。这种摩擦系数的过渡阶段与摩擦试验头与镀层之间摩擦力的不稳定有关,因此,稳态阶段的摩擦系数是评价镀层耐磨性的参考值。从摩擦系数曲线可以看到,在两种载荷

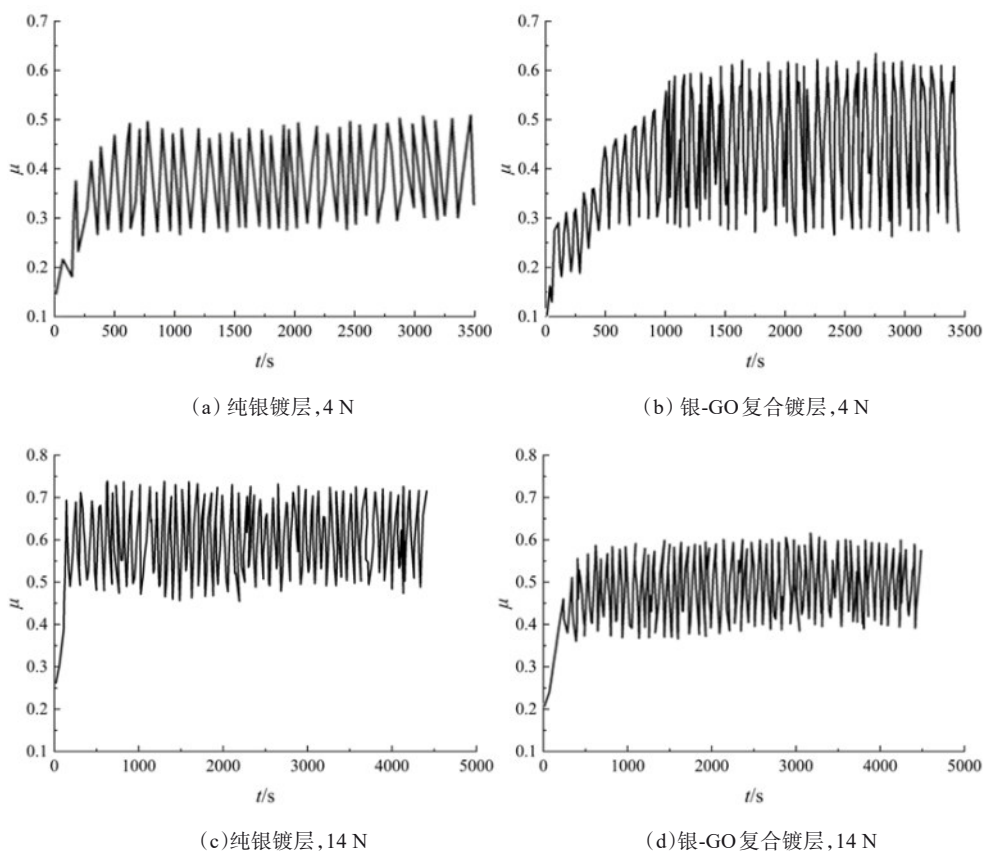


(a) 纯银镀层

(b) 银-GO 复合镀层

图 8 纯银镀层和银-GO 复合镀层的硬度压痕图

Fig. 8 Hardness indentation diagrams of pure silver coating and silver-GO composite coating



(a) 纯银镀层, 4 N

(b) 银-GO 复合镀层, 4 N

(c) 纯银镀层, 14 N

(d) 银-GO 复合镀层, 14 N

图 9 纯银镀层和银-GO 复合镀层的摩擦系数随时间的变化曲线

Fig. 9 Friction coefficient versus time curves for pure silver coating and silver-GO composite coating

下,银-GO 复合镀层的摩擦系数都比纯银镀层的摩擦系数小。如图 9(a)所示,在载荷 4 N 下,纯银镀层的平均摩擦系数约为 0.5,而银-GO 复合镀层(图 9(b))的平均摩擦系数约为 0.40。增大载荷至 14 N,两种镀层的摩擦系数也随之增加。从图 9(c)可以

看到,纯银镀层的平均摩擦系数约为 0.55,而银-GO 复合镀层的平均摩擦系数约为 0.44(图 9(d))。两种载荷下磨损结果的比较说明了银-GO 复合镀层具有更小的摩擦系数,表明其具有更大的耐磨性。

为了进一步比较两种镀层耐磨性,对两种镀层磨损后磨痕的形貌进行了观察。图10是纯银镀层与银-GO复合镀层分别在4 N和14 N载荷下稳态阶段磨损后的磨痕形貌。如图10(a)和(c)所示,纯银镀层在两种载荷下的磨痕宽度较大,磨痕深,且在磨痕边缘出现了镀层的碎化和剥落,说明纯银镀层的磨损更加严重。而从图10(b)和10(d)可以看到,银-GO复合镀层在两种载荷下都展示出较浅的磨损

深度和较窄的磨痕宽度,磨痕表面及周围并没有出现剥落和碎化现象。两种镀层磨损形貌的对比进一步说明银-GO复合镀层具有更大的抗磨损能力。其耐磨性提高的原因是:在摩擦磨损过程中,掺杂在银镀层中的GO纳米片相当于润滑剂,起到了耐磨和减磨的作用。另外,GO的掺入细化了组织、提高了硬度,也有利于银-GO复合镀层耐磨性的提高。

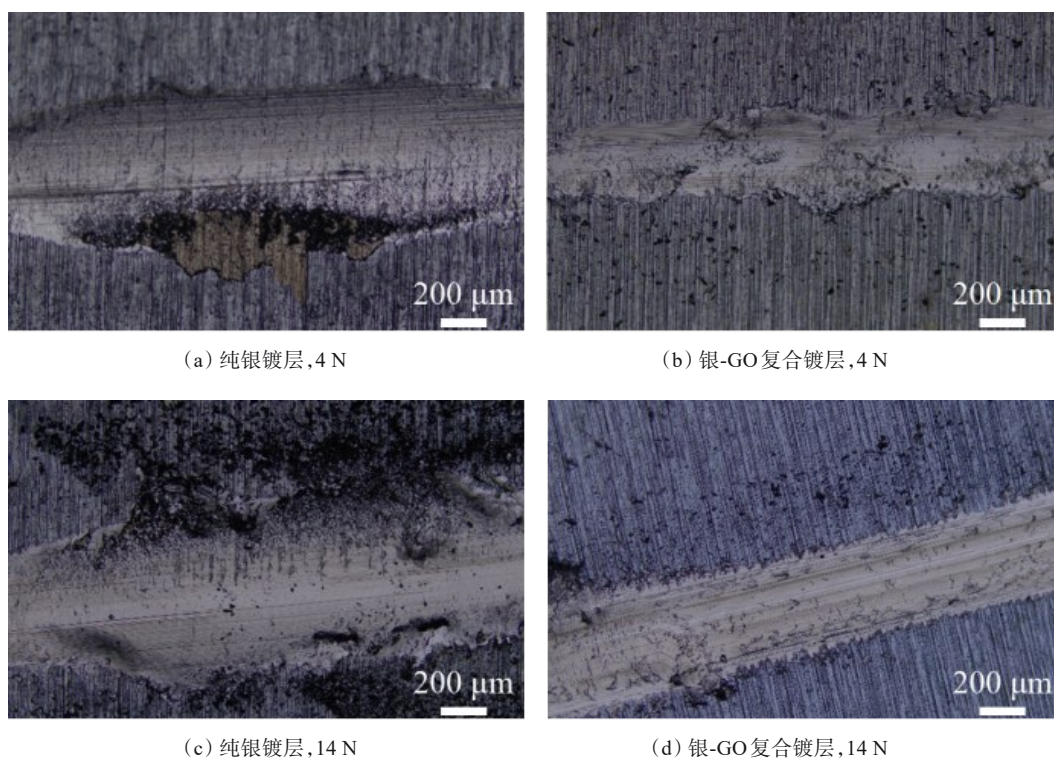


图10 纯银镀层和银-GO复合镀层在不同载荷下磨损后的形貌

Fig. 10 Morphology of pure silver coating and silver-GO composite coating after wear under different loads

3 结论

本文采用DMH作为络合剂的无氰镀银溶液,以GO纳米片作为掺杂相,在铜基体上制备了银-GO复合镀层。GO纳米片的掺杂细化了银镀层的组织,同时改变了银镀层的择优生长方向,形成了双择优生长的银镀层。相比于纯银镀层,银-GO复合镀层具有更高的显微硬度、更低的摩擦系数和更高的耐蚀性。掺杂GO可以有效改善银镀层的耐磨性和耐蚀性,对于提升银镀层在电连接器领域的服役性能具有实际价值。

参考文献

- [1] 王昊,郝建军,安成强,等. 电镀技术在电子产品中的应用[J]. 电镀与精饰, 2013, 35(6): 39-44.
- [2] 强轶. 化学镀银工艺改进及其在5G通信领域中的应用探讨[J]. 材料保护, 2020, 53(10): 77-80.
- [3] 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.
- [4] 李宏楼,徐刚,姚灿江,等. 高低温条件下隔离开关触头耐磨特性研究[J]. 高压电器, 2021, 57(7): 46-52.
- [5] 宋肖肖,崔子凡,何鹏,等. 磁控溅射银镀层和电镀银镀

- 层硬度及结合性对比研究[J]. 中国表面工程, 2021, 34(1): 104-111.
- [6] 张慧茹, 薛小龙. 改进化学镀银及氧化石墨烯/聚合物复合薄膜对银层的腐蚀防护[J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(2): 56-65.
- [7] 张弘弘, 赵晴, 杜楠, 等. 硫代硫酸盐体系银/石墨烯复合电镀工艺及镀层性能[J]. 材料保护, 2017, 50(7): 49-52.
- [8] 张骐, 张安琴, 骆晨, 等. 电流密度对 5,5-二甲基乙内酰胺体系电镀银的影响[J]. 电镀与涂饰, 2021, 40(3): 183-186.
- [9] 许赵武, 张元丽. 银锡合金镀层中锡的分析[J]. 表面技术, 1998, 27(4): 40-41.
- [10] 刘建平. 电镀银镍合金工艺及其在电接触材料生产中的应用[J]. 电镀与涂饰, 2007, 26(3): 14-16.
- [11] 王丽丽. 化学镀锡-银合金镀液[J]. 电镀与精饰, 2005, 27(4): 46-48.
- [12] 徐瑞东, 王军丽, 薛方勤, 等. 锡合金镀层工艺的研究现状及展望[J]. 电镀与涂饰, 2003, 22(3): 44-50.
- [13] Zhu Y, Murali S, Cai W, et al. Graphene and graphene oxide: synthesis, properties, and applications[J]. Advanced Materials, 2020, 22(35): 3906-3924.
- [14] Kim K S, Zhao Y, Jang H, et al. Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes[J]. Nature, 2009, 457(7230): 706-710.
- [15] Zhang Y B, Brar V W, Girit C, et al. Origin of spatial charge inhomogeneity in graphene[J]. Nature Physics, 2009, 5(10): 722-726.
- [16] Stankovich S, Dikin D A, Dommett G H B, et al. Graphene-based composite materials[J]. Nature, 2006, 441(7100): 282-286.
- [17] 王建才, 裴锋, 田旭. 户外高压隔离开关用电接触银/石墨/石墨烯复合镀层的制备与性能研究[J]. 当代化工研究, 2022, 20: 14-16.
- [18] 张笑娟, 魏琦峰, 任秀莲. 氧化石墨烯的制备方法、结构、性质及应用研究进展[J]. 热加工工艺, 2022, 51(7): 2106-2112.
- [19] 代波, 邵晓萍, 马拥军, 等. 新型碳材料-石墨烯的研究进展[J]. 材料导报, 2010, 24(03): 17-21.
- [20] 张震, 于翔, 刘飞. 产业化制备石墨烯纳米片研究进展[J]. 新型工业化, 2017, 7(1): 40-48.
- [21] Praveenkumar C M, Venkatesha T V, Shabadi R. Preparation and corrosion behavior of Ni and Ni-graphene composite coatings[J]. Materials Research Bulletin, 2013, 48(4): 1477-1483.
- [22] Khabazian S, Sanjabi S. The effect of multi-walled carbon nanotube pretreatments on the electrodeposition of Ni-MWCNTs coatings[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(13): 5850-5856.
- [23] Tao S, Li D. Tribological, mechanical and electrochemical properties of nanocrystalline copper deposits produced by pulse electrodeposition[J]. Nanotechnology, 2006, 17(1): 65-69.
- [24] 郑克勤, 吕旺燕, 刘仲武, 等. 银-石墨烯复合镀层的制备及镀层性能[J]. 材料保护, 2019, 52(6): 84-90.