

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.11.008

# 不同钝化工艺的灯具外壳无氰锡仿金镀层性能分析

汪晖<sup>1\*</sup>, 王国顺<sup>2</sup>, 赵俊<sup>3</sup>

(1. 荆州理工职业学院, 湖北 荆州 434000; 2. 武汉大学 动力与机械学院, 湖北 武汉 430072;  
3. 欧普照明股份有限公司, 上海 201100)

**摘要:** 为提升灯具外壳抗腐蚀性能, 对比研究了三种钝化工艺(化学、阴极电化学及混合法)对无氰锡仿金电镀层的影响。以硫酸铜和锡酸钠为原料制备镀液, 采用电镀仪在金属基材表面沉积镀层, 从宏观和微观角度观察腐蚀情况, 并使用线性扫描伏安研究试腐蚀速率。结果表明, 不同钝化方式影响镀层宏观形貌, 其中混合钝化法表现最佳, 腐蚀坑少且浅, 钝化后的镀层抗腐蚀性能良好, 金色光泽持久; 微观分析显示, 未钝化的镀层腐蚀后结构疏松, 而钝化后的镀层结构紧密, 其中混合钝化的镀层结构最为致密。Tafel 试验进一步证实, 混合钝化膜的耐腐蚀性能更佳, 化学钝化与阴极电化学钝化保护效果相近。

**关键词:** 钝化工艺; 灯具外壳; 无氰锡仿金; 电镀层; 抗腐蚀性能

中图分类号: TM507

文献标识码: A

## Performance analysis of cyanide free tin imitation gold coating on lamp housings with different passivation processes

Wang Hui<sup>1\*</sup>, Wang Guoshun<sup>2</sup>, Zhao Jun<sup>3</sup>

(1. JingZhou Vocational College of Technology, Jingzhou 434000, China; 2. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Oppl Lighting Co., Ltd, Shanghai 201100, China)

**Abstract:** In order to improve the corrosion resistance of the lamp shell, this study compares the effects of three passivation processes (chemical, cathode electrochemical and mixing method) on cyanide-free tin imitation gold plating layer. The plating solution was prepared from copper sulfate and sodium tinate, deposited the plating layer on the surface of the metal substrate, observed the corrosion situation from macroscopic and microscopic angles, and tested the corrosion rate by linear scanning voltammetry. The results show that different passivation methods affect the macroscopic morphology of coating, in which the mixed passivation method has the best performance, corrosion pits are less and shallow, the passivation coating has good corrosion resistance and durable structure, while the passivation coating

收稿日期: 2025-03-10 修回日期: 2025-03-30

通信作者: 汪晖(1983—), 女, 本科, 副教授, 研究方向为电子信息技术、智能光电技术, email: dn655265@163.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91748211); 湖北省职业技术教育学会科学研究课题(ZJGB2019103); 湖北省教育厅首批对接服务湖北现代产业集群(智能家电产业集群)发展重点职业院校专业群(智能光电技术应用专业群)项目建设(鄂教职成函〔2022〕19号); 湖北省教育厅、湖北省财政厅湖北省高水平专业群(智能光电技术应用专业群)项目建设(鄂教职成函〔2022〕1号)

引用信息: 汪晖, 王国顺, 赵俊. 不同钝化工艺的灯具外壳无氰锡仿金镀层性能分析[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(11): 60-66, 107.

Wang Hui, Wang Guoshun, Zhao Jun, et al. Performance analysis of cyanide free tin imitation gold coating on lamp housings with different passivation processes[J]. Plating and Finishing, 2025, 47(11): 60-66, 107.

structure is tight, and the mixed passivation coating structure is the most compact. The Tafel test further confirmed that the mixed passivation film has better corrosion resistance, and the chemical passivation effect is similar to the cathode electrochemical passivation protection effect.

**Keywords:** passivation process; luminaire housing; cyanide-free tin imitation gold; electroplating layer; corrosion resistance

灯具外壳无锡仿金电镀是一种环保且美观的表面处理技术,广泛应用于现代照明行业,这种电镀层采用无氰电镀工艺,摒弃了传统电镀中常用的有毒氰化物,大大降低了对环境和操作人员的危害<sup>[1]</sup>。无氰电镀<sup>[2-3]</sup>作为一种环保型电镀技术,近年来得到了广泛的关注和应用,在无氰电镀中,锡仿金电镀层因其独特的色彩和装饰效果而受到青睐。与传统的有氰电镀相比,无氰电镀在合金化方式、电流密度要求以及镀层性能方面存在差异<sup>[4]</sup>。因此在无氰锡仿金电镀过程中,需要严格控制电镀条件以获得优良的镀层。无氰锡仿金电镀通过特定的电镀液配方和工艺参数,能够在灯具外壳表面形成一层均匀、致密的镀层,这层镀层不仅具有金色或类似黄金的亮丽外观,还具备优良的耐腐蚀性、耐磨性和抗变色能力<sup>[5]</sup>。与传统的有氰电镀相比,无氰锡仿金电镀在生产过程中更加安全环保,符合现代工业对绿色生产的要求。这种电镀层还具有良好的附着力和延展性,能够确保灯具外壳在使用过程中不易出现镀层脱落或开裂等问题。

钝化工艺是一种提高镀层耐蚀性的有效方法,通过钝化处理,可以在镀层表面形成一层致密的钝化膜,阻挡外界腐蚀介质对镀层的侵蚀,对于灯具外壳等需要长期暴露在潮湿环境中的部件来说,钝化工艺显得尤为重要<sup>[6-7]</sup>。在钝化工艺中,钝化液的选择和钝化条件的控制是影响钝化膜质量的关键因素,常见的钝化液包括铬酸盐钝化液、硅酸盐钝化液等,在选择钝化液时,需要考虑镀层的材质和性能要求。

当前研究中,众多学者对金属镀层的钝化工艺进行了分析。雷玉娟等<sup>[8]</sup>将钼酸盐作为钝化剂,按照预定的配方制备钝化液,并调整工艺参数,将电

镀后的样品置于钝化液中,进行钝化处理,形成钝化膜。使用硫酸铜点滴试验等加速腐蚀方法,模拟实际使用环境中的腐蚀条件,快速评估钝化膜的耐腐蚀性能。杜宝帅等<sup>[9]</sup>采用电刷镀技术在铜基体上制备了纯银以及Ag-Bi合金镀层,利用X射线衍射仪(X Ray Diffractometer, XRD)和扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)分析了镀层的物相组成和微观形貌,采用显微硬度计测试了镀层的硬度。通过极化曲线和电化学阻抗谱对镀层的耐腐蚀能力进行了表征,详细分析了自腐蚀电位、腐蚀电流密度和电荷转移电阻等电化学参数。腐蚀过程会导致材料内部产生松散颗粒,影响材料的使用寿命,为此,上述方法均研究了不同耐腐蚀方法对合金镀层的影响作用。但上述内容仅采用单一的方法进行钝化处理,在类似灯具外壳合金材料长期暴露于腐蚀环境中时,其耐腐蚀性会逐渐下降,难以满足长期使用的需求。

本研究使用硫酸铜和锡酸钠作为原料制备仿金镀层,并选取三种不同的钝化工艺处理镀层,将各钝化处理后的试验样品置于盐溶液中腐蚀,观察钝化后的观测宏观和微观形貌,并计算腐蚀速率,以评估不同钝化工艺对于腐蚀性能的影响。钝化膜的形成涉及氧化膜的致密性和离子迁移阻力<sup>[10-11]</sup>,混合钝化法通过优化钝化条件,促进了氧化膜的生成和致密化,同时增加了离子迁移的阻力,从而有效提高了镀层的抗腐蚀性能。

## 1 材料方法

### 1.1 材料及仪器设备

研究过程中使用材料情况如表1所示。

实验中所用设备如表2所示。

表1 材料

Tab.1 Materials

原料	厂家	浓度和级别
硫酸铜	山东星洪化工有限公司	0.113 mol/L, 工业级
锡酸钠	山东力昂新材料科技有限公司	0.039 mol/L, 工业级
乙二胺四乙酸二钠	广州华钰生物科技有限公司	0.210 mol/L, 工业级

续表 1

原料	厂家	浓度和级别
酒石酸钾钠	湖北兴东诚化工有限公司	0.210 mol/L, 分析纯
氢氧化钠	沧州厚德化工产品有限公司	1.250 mol/L, 工业级
无水乙醇	山东赢胜化工有限公司	99.9%, 工业级
重铬酸钠	陕西东正集团	5 g/L, 工业级

表 2 设备

Tab.2 Equipment

设备名称	厂家	型号	参数
磁力搅拌机	上海梅颖仪器仪表制造有限公司	H01-1D	功率 40 W, 最大处理量 10 L, 温度控制范围室温~200 °C, 加热功率 300 W
超声清洗机	济宁科源超声波设备有限公司	JCBJ-3	清洗温度 0 °C~60 °C, 最大清洗温度 100 °C, 温度调节范围: 常温~100 °C, 最大功率 1 500 W
烘干箱	丹阳市凯峰涂装设备有限公司	GL881-TG	热风循环烘干, 最大温度 300 °C, 温度波动范围 0.2 °C, 温度均匀度 1 °C
扫描电子显微镜	广州微视光学科技有限公司	HM	分辨率纵向 300 nm, 防震台频率范围 5~30 Hz, 激光波段 405、488 和 561 nm
电解槽	杭州利安新材料科技有限公司	LA-001	抗压强度 32 MPa, 精度 20 μm
电镀仪	江苏天瑞仪器股份有限公司	Thick 800A	镀层厚度 50 μm 以内, 电源为交流(220±5) V
扫描电子显微镜	深圳市谱赛斯科技术有限公司	SU8700	—

## 1.2 灯具外壳无氰锡仿金电镀层制备

### (1) 镀液制备

在装有 30 mL 去离子水的烧杯中倒入硫酸铜, 使硫酸铜得到溶解, 静置备用。取等量的去离子水溶解锡酸钠, 但是锡酸钠与去离子水溶解的效果并不好, 因此需要在每 100 mL 去离子水中添加氢氧化钠(5.0±0.2) g, 促进锡酸钠的溶解, 待锡酸钠溶液转变成澄清状态就完成锡酸钠的溶解, 静置备用。向硫酸铜溶液中缓慢分多次倒入酒石酸钾钠和乙二胺四乙酸二钠, 经过搅拌实现各个溶液的均匀混合, 使用滴液漏斗把锡酸钠溶液缓慢滴入搅拌混合后的溶液中, 滴液速度控制在合理范围内。完成溶液配制以后, 使用质量分数为 10% 的 NaOH 溶液作为碱性调节剂, 或者量取 0.5 mol/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液作为酸性调节剂调整混合后镀液的酸碱度<sup>[12-13]</sup>, 将 pH 值控制在 12.5 至 12.7 范围内, 完成镀液制备以后, 在室温环境中静置镀液至镀液沉淀生成主沉淀物 Cu(OH)<sub>2</sub> 和次要沉淀 Sn(OH)<sub>4</sub>, 取沉淀后的清液进行电镀, 清

液中的铜锡摩尔比为 1.0 : 1.1。

### (2) 镀层制备

在电镀之前, 选取一个灯具外壳常用的不锈钢板作为被电镀的对象, 先使用目数较大的砂纸打磨钢板表面, 再使用目数较细的砂纸打磨钢板, 使用去离子水冲洗打磨后的钢板, 再使用碱性溶液冲洗钢板表面, 清除钢板表面的油污, 使用流动的清水, 冲洗钢板上的碱性溶液, 将该钢板置于无水乙醇环境中超声清洗 10 min, 取出后先使用棉布擦拭钢板表面, 将擦拭后的钢板置于烘干箱中, 充分烘干钢板表面的水分<sup>[14]</sup>。

使用电镀仪实现镀层的电镀<sup>[15-17]</sup>, 该电镀仪上安装电镀槽, 镀层电镀主要在电镀槽中完成, 电镀槽中倒入已制备好的镀液。电镀过程中, 电镀电源为 10 A, 电镀槽中的温度保持在 26 °C, 电镀时设定电镀电流<sup>[18]</sup>为 55 A/m<sup>2</sup>, 电镀时间设定为 15 min。电镀镀层制备的详细流程如图 1 所示。

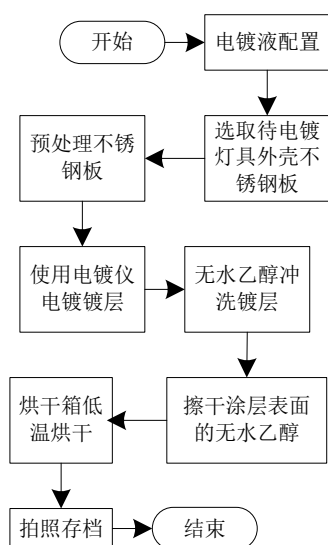


图1 电镀工艺流程图

Fig.1 Flow chart of electroplating process

### 1.3 钝化工艺处理

本文研究钝化工艺对于灯具外壳无氰锡仿金电镀层抗腐蚀性能,钝化处理通过在金属镀层表面形成一层薄而致密的氧化物膜,这层膜能够显著减缓金属与环境中的氧、水、氯等有害物质的反应速度,提高镀层的耐腐蚀性。为了确定钝化工艺的影响,选取三种不同钝化方法处理本文制备的镀层(化学钝化法形成的钝化膜厚度为 $0.20\ \mu\text{m}$ ;阴极电化学钝化法形成的钝化膜厚度为 $0.25\ \mu\text{m}$ ;混合钝化法形成的钝化膜厚度为 $0.35\ \mu\text{m}$ ),确定何种钝化方法对于镀层的影响更大<sup>[19]</sup>。各个钝化工艺处理方式如下:

#### (1) 化学钝化法

使用重铬酸钠作为钝化剂,将本文制备的各个镀层试件置于该钝化剂中,每次浸泡时间设定为7 s,钝化过程中持续搅拌,使镀层试件充分浸泡在钝化液之中,钝化温度为 $(40\pm 1)\ ^\circ\text{C}$ 恒温水浴。完成钝化后从钝化液中将镀层试验样品取出,使用去离子水冲洗镀层试验样品表面残留的钝化液,置于烘干箱之中,设置烘干温度为 $60\ ^\circ\text{C}$ ,烘干时间为20 min,提升镀层表面的稳定性。

#### (2) 阴极电化学钝化法

使用带有阴、阳两个电极板的电解槽完成该钝化试验。在阴极电化学钝化过程中,金属被作为阴极,置于含有钝化液的电解槽中。当电流通过电解槽时,钝化液中的阴离子会在金属阴极表面发生还原反应,同时金属表面的阳离子也可能参与反应,共同形成一层致密的氧化物或氢氧化物膜,即钝化

膜。这层膜能够阻止金属表面的进一步氧化反应,从而延缓金属的腐蚀速度。阳极板主要原料为铜板,规格为 $35\ \text{mm}\times 65\ \text{mm}\times 1\ \text{mm}$ ,阳极电极板的有效面积均为 $15\ \text{cm}^2$ <sup>[20]</sup>。本文制备的镀层钢板作为阴极板,除材质不同,外观规格、有效面积与阳极板一致,将含有浓度为 $1.25\ \text{mol/L}$ 的重铬酸钠、缓冲剂等钝化液倒入电解槽之中,设定钝化温度为 $25\ ^\circ\text{C}$ ,电流密度为 $1.19\ \text{A}/\text{dm}^2$ ,钝化时间为7 s。完成钝化后,还需要冲洗、擦拭、烘干。

#### (3) 混合钝化

先使用化学钝化处理镀层试件,再使用阴极电化学钝化法处理,完成混合钝化后冲洗、擦拭、烘干。

### 1.4 抗腐蚀性能分析

#### (1) 腐蚀处理

使用盐雾试验箱对各个试验样品开展腐蚀处理,盐雾试验箱中盛有浓度为5%的NaCl腐蚀性溶液。将各个试验样品放置在烟雾试验箱中的试验架上,各个试验样品放置时,间隔一定距离,彼此之间不发生接触,腐蚀过程中,设定试验箱的温度和湿度分别为 $36\ ^\circ\text{C}$ 和95%,试验箱中每间隔0.5 h向各个试验样品均匀喷洒盐性溶液,共持续24 h,对各个试验样品加速腐蚀。使用摄像设备拍摄记录各个试验样品在各个阶段的腐蚀情况<sup>[21-22]</sup>。

#### (2) 微观形貌分析

使用扫描电子显微镜观察各个不同钝化工艺处理后镀层的微观形貌。

#### (3) 腐蚀速率测试

使用线性扫描伏安法测试不同钝化工艺处理后,采用的是三电极体系进行测试,三个电极分别是为工作电极、参比电极和辅助电极,测试仪器为电化学工作站。该测试过程中极化电压扫描范围设定为 $-300\sim 300\ \text{mV}$ ,同时设定扫描速度为 $1\ \text{mV}/\text{s}$ 。

## 2 结论与分析

化学钝化是一种通过化学方法在金属表面形成一层致密的氧化物或氢氧化物膜的过程。这种膜能够阻止金属与腐蚀介质直接接触,从而减缓或防止金属的腐蚀。在本研究中,使用重铬酸钠作为钝化剂进行化学钝化,当镀层样品浸入含有重铬酸钠的钝化液中时,重铬酸根离子在金属表面发生还原反应,同时金属表面的阳离子与溶液中的阴离子(如氢氧根离子)结合,形成一层致密的钝化膜。这层膜主要由金属的氧化物或氢氧化物组成,具有良好的

抗氧化和抗腐蚀性能。

电化学阴极钝化则是通过电化学方法在金属表面形成钝化膜的过程。在此过程中，金属被作为阴极置于电解槽中，当施加适当的电流和电压时，电解槽中的阴离子会在金属表面发生还原反应，同时金属表面的阳离子也可能参与反应，共同形成一层致密的氧化物或氢氧化物膜。这种膜的形成与化

学钝化类似，但电化学阴极钝化能够在更短的时间内形成更均匀的钝化膜。

### 2.1 不同钝化工艺下的腐蚀分析

获取三种不同钝化工艺处理后的仿金镀层经过腐蚀处理后的宏观形貌，为使试验结果具有对比性，将未经钝化的仿金镀层作为对照组，试验结果如图2所示。

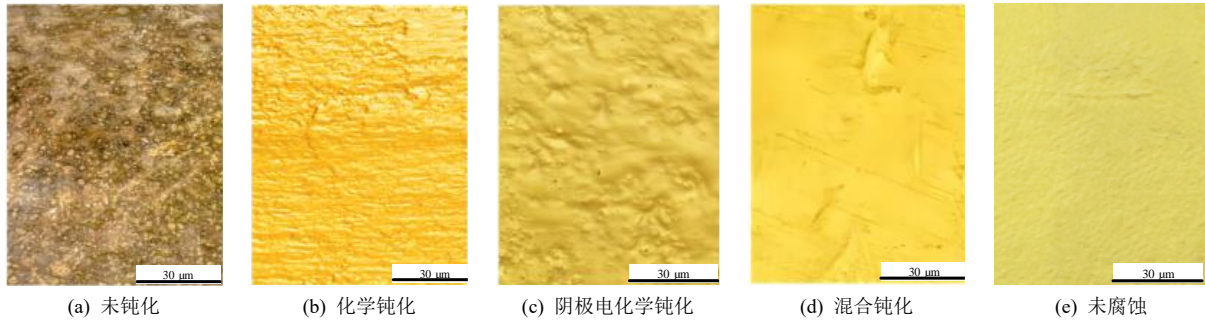


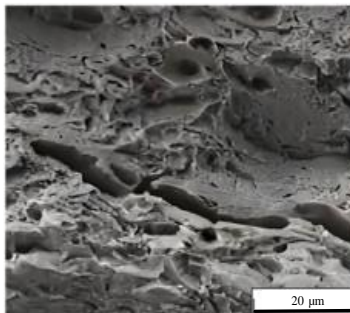
图2 不同钝化工艺下仿金镀层的腐蚀宏观形貌

Fig.2 Macroscopic corrosion morphology of imitation gold coatings under different passivation processes

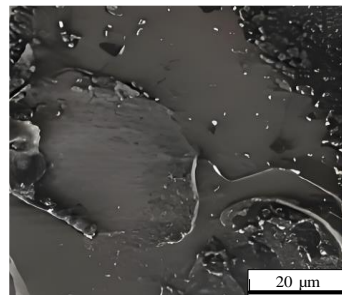
对比图2中各个试验样品的宏观形貌能够看出，图2(a)未经钝化的原始无氰锡仿金电镀层在腐蚀处理后出现严重镀层腐蚀。相比之下，图2(b)~(d)中经过钝化的无氰锡仿金电镀层则未出现明显腐蚀锈，镀层的金色光泽保持良好。这是因为不同方法的钝化处理在镀层表面形成一层抗氧化、抗腐蚀的钝化膜，有效阻隔了盐性溶液进入镀层内部，起到了良好的保护作用。虽然经过钝化的镀层虽然未出现大量的腐蚀坑，但是宏观形貌均受到不同程度的破坏。由此可以推断，采用化学钝化处理叠加阴极电化学钝化法的混合钝化法处理后的镀层，在腐蚀后的宏观形貌表现相对更为良好。

### 2.2 微观形貌分析

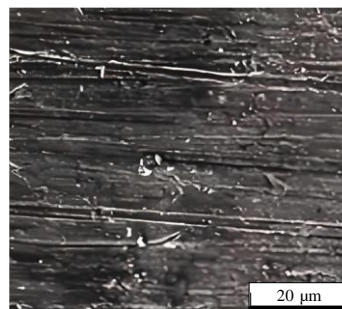
通过显微设备观察经过不同钝化方法处理后镀层的微观形貌，确定经过不同钝化处理后，再使用盐雾腐蚀法，镀层腐蚀后的微观形貌，试验结果如图3所示。



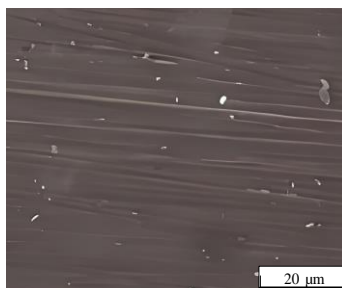
(a) 未钝化



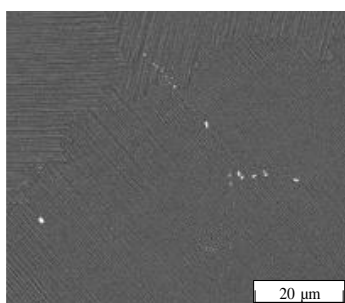
(b) 化学钝化



(c) 阴极电化学钝化



(d) 混合钝化



(c) 未腐蚀

图3 不同钝化工艺下的腐蚀微观形貌

Fig.3 Corrosion micromorphologies under different passivation processes

从图3(a)中的微观形貌试验结果能够明显看出, 未经过钝化处理的镀层在腐蚀后, 其微观结构中出现明显的腐蚀裂纹, 这表明未经钝化的镀层受腐蚀影响后内部结构出现破坏, 呈现出稀疏的微观结构。相比之下, 图3(b)和图3(c)的微观形貌显示, 受到腐蚀溶液侵蚀后, 这两个试验样品都出现不同程度的结构侵蚀, 但是内部结构中未出现明显疏松孔洞。这表明腐蚀溶液并未大量渗入镀层内部, 这种情况是由于钝化后形成的钝化膜对镀层起到了保护作用。在图3(d)中, 经过混合钝化处理的镀层内部结构较为致密, 几乎未受到腐蚀溶液的侵袭。这一结果与图2中的宏观试验结果相吻合, 进一步证明了经过混合钝化处理后, 镀层形成一层性能较为良好的钝化膜, 能够抵抗腐蚀性物质的渗入, 从而保护镀层不受损害。

### 2.3 腐蚀速率测试结果

为了深入理解腐蚀过程中的电荷转移和物质传递行为, 采用等效电路模型解析电化学工作站测

得的腐蚀速率数据, 等效电路模型如图4所示。

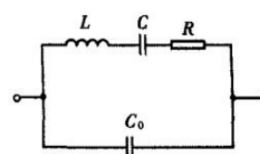


图4 等效电路

Fig.4 Equivalent circuit

图4中,  $R$ 是测试系统中的电阻性元件, 电阻值的大小可以反映腐蚀过程中的电荷传递难易程度;  $C$ 代表双电层电容, 即金属与电解质溶液界面处形成的电容性元件;  $L$ 为电感, 用于描述腐蚀过程中的扩散效应或其它非纯电阻性过程。设定等效电路中溶液电阻为 $5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 、电荷转移电阻为 $10 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 、双电层电容为 $10^{-5} \text{ F/cm}^2$ 。正常情况下, 腐蚀速率与电流密度成正比, 电流密度越大, 腐蚀速率越快。三种不同钝化方法处理后, 测量了不同钝化条件下仿金电镀层的Tafel曲线, 如图5所示。不同电压下对应的电流密度变化情况如表3所示。

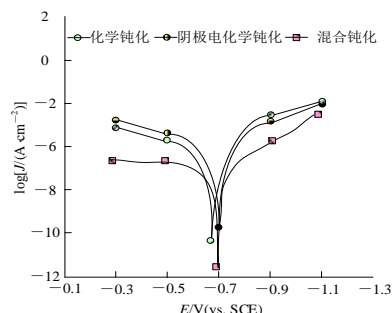


图5 不同钝化条件下仿金电镀层的 Tafel 曲线

Fig.5 Tafel curves of gold like electroplated coatings under different passivation conditions

表3 钝化样品在不同电压下的电流密度

Tab.3 Current density of different electroplated coatings at different voltages

电压( $E$ )/V	-0.3	-0.5	-0.7	-0.9	-1.1
化学钝化腐蚀电流密度/( $\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	$3.16 \times 10^{-4}$	$2.51 \times 10^{-6}$	$1.00 \times 10^{-10}$	$1.00 \times 10^{-3}$	$7.94 \times 10^{-3}$
阴极电化学钝化腐蚀电流密度/( $\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	$1.00 \times 10^{-4}$	$1.58 \times 10^{-6}$	$3.16 \times 10^{-11}$	$6.31 \times 10^{-4}$	$6.31 \times 10^{-3}$
混合钝化腐蚀电流密度/( $\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	$3.16 \times 10^{-7}$	$2.51 \times 10^{-7}$	$3.16 \times 10^{-12}$	$1.00 \times 10^{-6}$	$3.98 \times 10^{-3}$

由表3可知, 三种钝化方法的腐蚀速率均呈现非线性电压依赖性, 而混合钝化在腐蚀过程中的电流值始终比其他两个方法低, 表明混合钝化方法在

腐蚀作用下, 可以形成致密氧化膜, 使金属表面成为阴极, 对灯具外壳起到保护的作用, 可显著抑制腐蚀。

钝化工艺下灯具外壳无氰锡仿金电镀层抗腐蚀性性能与其结构有关。上述试验发现混合钝化法形成的钝化层结构更为致密且均匀,可以提供更好的抗腐蚀保护。钝化层的厚度也是影响其抗腐蚀性能的重要因素,过薄的钝化层无法提供足够的保护,而过厚的钝化层也会导致应力集中和附着力问题。盐雾试验是一种用于评估材料在盐雾环境下的抗腐蚀性能,通过盐雾试验,可以获得关于钝化层在长时间腐蚀作用下的耐久性和稳定性的信息。其中,混合钝化层可能具有更高的致密性、更均匀的组成以及适当的厚度,这些因素共同作用下提高了镀层的抗腐蚀耐久性。

### 3 结语

综上所述,本研究通过宏观形貌观察、微观形貌分析以及腐蚀速率测试等方法,对不同钝化工艺处理后的仿金镀层的抗腐蚀性能进行了全面评估。结果表明,混合钝化法在处理仿金镀层时表现出最佳的抗腐蚀性能。通过本次研究将为优化钝化工艺、提高镀层的抗腐蚀性能提供有力的支持。

### 参考文献

- [1] 吕成斌, 吕鹏, 魏亚平, 等. 环保无氰电镀银镀层在人工汗液中的耐腐蚀性能研究[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(12): 88-92.
- [2] 孙志, 程娜, 陈峰, 等. ZHL-02 碱性无氰电镀银工艺的抗金属杂质污染性能[J]. 电镀与涂饰, 2020, 39(5): 249-254.
- [3] 饶翔, 刘新宽. 压延铜箔的无氰电镀锌黑化处理工艺[J]. 材料保护, 2022, 55(5): 123-128.
- [4] Huang J, Zhang W, Xu H, et al. Effect of heat treatment on corrosion properties of Ti-6Al-4V titanium alloy produced by electron powder bed fusion[J]. Journal of Management, 2024, 76(6): 3039-3049.
- [5] Silva P F, Silva M B, et al. Controllable coating graphene oxide and silanes on cu particles as dual protection for anticorrosion[J]. American Chemical Society Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(32): 38857-38866.
- [6] Rai S, Ji G. Synthesis of mint leaf extract and mint-leaf-based NiO nanoparticles, coating of extract layers without and with NiO nanoparticles on copper through drop-casting, and their analysis for the corrosion prevention in saline water[J]. New Journal of Chemistry, 2023, 47(39): 18374-18385.
- [7] Song Z, Ding L, Zhang S, et al. The development of a porous nickel/polysiloxane superhydrophobic coating with long-time corrosion resistance properties[J]. Surface & Coatings Technology, 2024, 493(2): 131296.
- [8] 雷玉娟, 范云鹰. 锌镀层钼酸盐-氟盐金色钝化膜性能及形成过程的研究[J]. 材料保护, 2020, 53(9): 60-64.
- [9] 杜宝帅, 闫芝成, 张忠文, 等. 电刷镀 Ag-Bi 合金镀层的结构与耐蚀性能研究[J]. 表面技术, 2024, 53(4): 110-116, 183.
- [10] 辛公锋, 龙关旭, 袁阳光, 等. 高强钢丝两种镀层耐蚀性及点蚀概率模型[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2023, 55(4): 616-623.
- [11] 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.
- [12] Li C, Goei R, Li Y, et al. Effect of chromium on erosion-corrosion properties of ZrO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles reinforced Fe-based composites in artificial seawater slurries[J]. Corrosion Science, 2022, 198(4): 110138.
- [13] 蒋存波, 孙晨光, 聂瑾芳, 等. 基于光电传感器的液溶胶浓度测量方法的研究[J]. 计算机仿真, 2022, 39(4): 413-418.
- [14] Acikbas G, Sezer K, Ozcan S A N C. The effect of hydrophobic coating applied to mica reinforced epoxy matrix composites on the water absorption properties of the composite[J]. Polymer bulletin, 2024, 81(7): 6207-6224.
- [15] 丁浩, 张慧, 孙锡科, 等. 电刷镀-电接触强化复合工艺制备厚镀层研究[J]. 热加工工艺, 2022, 51(24): 92-96.
- [16] 石延辉, 蔡金宝, 甘卿忠, 等. 离子色谱在元器件腐蚀失效分析中的应用研究[J]. 电子器件, 2022, 45(1): 13-18.
- [17] 孙文涛, 周立峰, 方磊, 等. 铜锡合金电镀层锡含量的几种测试方法比较[J]. 材料保护, 2022, 55(11): 184-187.
- [18] Fatemeh M, Majid M. In Silico-DFT investigation of nanocluster alloys of Al-(Mg, Ge, Sn) coated by nitrogen heterocyclic carbenes as corrosion inhibitors[J]. Journal of cluster science, 2023, 34(6): 2901-2918.
- [19] Zheng Q, Mei S, Xiao Z, et al. Tribological, oxidation and corrosion properties of ceramic coating on AISI H13 steel by rare earth-Cr composite boronizing[J]. Ceramics International, 2024, 50(6): 8760-8776.