

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.04.012

镀铜工艺对银镀层耐蚀性能的影响

李闪光^{1,2,3*}, 李晓征^{1,2,3}, 路亚娟^{1,2,3}, 沈晓^{1,2,3}, 张红军^{1,2,3}, 张怀垒^{1,2,3}

(1. 河南平高电气股份有限公司, 河南 平顶山 467001; 2. 平高集团 表面处理及金属防腐实验室, 河南 平顶山 467001; 3. 平高集团 路亚娟创新工作室, 河南 平顶山 467001)

摘要: 针对高压电器用铝合金类零部件在服役过程中易发生腐蚀的现象, 采用电镀工艺在 6063 铝合金表面制备银镀层, 对中间铜镀层、预镀银层的表面微观形貌、耐蚀性进行观察和分析, 研究镀铜工艺对镀层耐蚀性能的影响。结果表明, 镀层致密度与耐蚀性能呈正比; 低浓度镀铜溶液条件下, 镀层致密度及耐蚀性能得到了提升; 镀液中的杂质会影响镀层沉积的致密度, 导致耐蚀性能降低; 镀液添加剂对镀层致密度及耐蚀性能无明显改变。

关键词: 铝合金; 耐蚀性; 致密度

中图分类号: TM206

文献标识码: A

Effect of copper plating process on corrosion resistance of silver coating

Li Shanguang^{1,2,3*}, Li Xiaozheng^{1,2,3}, Lu Yajuan^{1,2,3}, Shen Xiao^{1,2,3},
Zhang Hongjun^{1,2,3}, Zhang Huailei^{1,2,3}

(1. Henan Pinggao Electric Co. Ltd, Pingdingshan 467001, China; 2. Lab of Surface Treatment and Metal Anti-corrosion, Pinggao Group, Pingdingshan 467001, China; 3. Lu Yajuan Innovation Studio, Pinggao Group, Pingdingshan 467001, China)

Abstract: In response to the corrosion phenomenon of aluminum alloy components used in high-voltage electrical appliances during service, a silver coating was prepared on the surface of 6063 aluminum alloy using electroplating technology. The surface microstructure and corrosion resistance of the intermediate copper and silver coatings were observed and analyzed, and the influence of copper plating technology on the corrosion resistance of the coating was studied. The results indicate that the density of the coating is directly proportional to its corrosion resistance. Under low concentration copper plating solution conditions, the density and corrosion resistance of the coating have been improved. Impurities in the plating solution affect the density of the deposited coating and reduce its corrosion resistance. The additive in the plating solution has no significant effect on the density and corrosion resistance of the coating.

Keywords: aluminum alloy; corrosion resistance; density reduction

随着我国电网建设领域的迅速发展, 电网规模日益增大, 因此对高压电器用铝合金类零部件的需求日益增加^[1,2]。电器产品通常需要具备良好的导电

性能, 银镀层因其附着力强、电阻率低等特点在高压电器产品的接触表面得到了广泛应用^[4-7]。然而, 铝合金镀银类零部件在服役过程中常出现腐蚀现

收稿日期: 2024-10-11

修回日期: 2024-11-18

通信作者: 李闪光(1997—), 女, 研究生, 助理工程师, email: 393189032@qq.com

引用信息: 李闪光, 李晓征, 路亚娟, 等. 镀铜工艺对银镀层耐蚀性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(4): 78-82.

Li Shanguang, Li Xiaozheng, Lu Yajuan, et al. Effect of copper plating process on corrosion resistance of silver coating [J]. 电镀与精饰, 2025, 47(4): 78-82.

象^[8,9]。因此，为满足日益严苛的输电需求、保障输电安全，对于镀银层耐蚀性能提升的研究迫在眉睫。

王朝铭等^[10]对直流及脉冲电镀银层耐蚀性开展试验，得出脉冲电流可提高镀层耐蚀能力的结论；付明等^[11]研究了铝合金前处理化学浸锌对镀层性能的影响，得到了优良银镀层的可行性制备工艺；张祖军等^[12]对Ni-P/Ni-B双层复合镀层和镀银层耐蚀性进行研究，所制备的复合镀层的耐蚀性优异；敖辽辉^[13]采用整体化学氧化和局部电镀镍-银-搪锡技术封闭了镀层微孔，提高了镀层的抗蚀性能。上述研究表明，大多数学者将目光聚焦于制备高耐蚀性镀层的工艺开发^[14-20]，鲜少对镀层组织及耐蚀性能进行系统研究。

为此，本文以6063铝合金为研究基材，采用电镀方法并通过改变镀铜工艺在基材表面生成银镀层。研究发现，溶液浓度、杂质及添加剂等对银镀层耐蚀能力产生影响。研究中通过性能表征对比了镀层的微观形貌、孔隙率与耐蚀性能的关联，进而为高压电器用产品表面镀银技术的研究提供了

参考。

1 实 验

1.1 工艺流程

将6063铝合金试块作为基材，经粗磨、细抛至无痕镜面，经超声波清洗后风干备用。研究中所采用电镀方法的工艺过程如下：碱浸蚀(温度60℃~70℃，时间30 s~2 min)→酸洗(室温，时间15 s~4 min)→一次浸锌(温度(23±3)℃，时间1 min)→酸洗(室温，时间30 s~1 min)→二次浸锌(温度(23±3)℃，时间1 min)→镀铜(温度40℃~50℃，电流密度0.6~1.5 A/dm²)→预镀银(温度20℃~35℃，电流密度0.8~1.2 A/dm²)→氰化镀银(温度20℃~35℃，电流密度0.4~1.5 A/dm²)→中和(室温，时间5~15 s)→热水洗(温度80℃~85℃，时间5 min)。所用镀铜溶液组成如表1所示。序号1、2两种配方溶液取自生产线使用1月余的溶液，序号3-5配方溶液为试验重新配制、改进溶液。6063铝合金试块分别在序号1-5配方的镀铜溶液中施镀，得到5个样件，分别编号1#、2#、3#、4#和5#的试块。

表 1 镀铜溶液组成

Tab.1 Composition of the copper plating solution

序号	配方名称	CuCN/(g·L ⁻¹)	NaCN/(g·L ⁻¹)	添加剂/(g·L ⁻¹)		
				NaOH	Na ₂ CO ₃	NaKC ₄ H ₄ O ₆
1	低浓度配方	30~45	50~65	—	—	—
2	高浓度配方	60~70	75~90	—	—	—
3	新配置高浓度配方	60~70	75~90	—	—	—
4	改进高浓度配方 1	60~70	75~90	10~20	10~20	20~30
5	改进高浓度配方 2	60~70	75~90	—	20~30	40~50

1.2 镀层性能测试及表征

镀后试块表面清洗干燥后，利用Scope.A1型金相显微镜观察铜镀层和预镀银层的表面形貌和特征。利用贴滤纸法对镀层孔隙率进行测定，试验使用的指示剂为铁氰化钾，腐蚀液为NaCl溶液，孔隙率以滤纸上显色斑点的总面积与暴露于腐蚀液的镀层面积之比来度量。

按照GB/T 10125—2012《人造气氛腐蚀试验—盐雾试验》要求，对铝合金镀银层进行2~24 h中性盐雾试验，并对2、4、8、12和24 h银镀层的表面状态进行观测记录。实验环境为5%的NaCl溶液，气压设置为0.1~0.12 MPa，盐水桶温度调整为(35±1)℃，压力桶温度设定为(47±1)℃。

2 结果与讨论

2.1 镀层形貌及特征

图1为不同浓度镀铜溶液施镀后试块1#和试块2#的镀层表面形貌。从图中可以看出，镀层以球状颗粒状沉积在基层表面，整体呈现球形瘤状特征，颗粒分布排列有序。对比图(a)和图(b)可知，两种镀铜溶液施镀后，采用低浓度镀铜溶液的试块1#，镀铜层表面更为光滑、致密；而高浓度镀铜溶液施镀后的试块2#，铜层表面存在大颗粒，表面致密度低。通过图(c)和图(d)可以看出，镀铜层表面致密的试块，预镀银层也更为平整、致密；相反，镀铜层致密度低，预镀银层与铜层组织状态保持一致，其预

镀银层表面致密度随之降低。

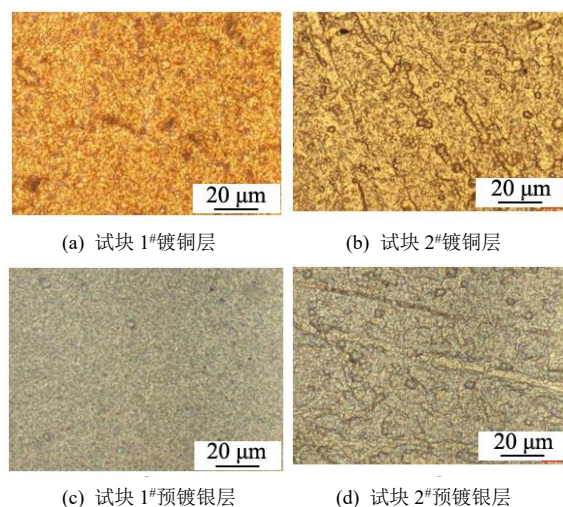


图1 不同浓度镀铜溶液施镀后试块1#和试块2#的镀铜层表面形貌

Fig.1 Surface morphology of the plating layer on test block 1# and 2# after plating in copper plating solutions with different concentrations

图2为反复使用和重新配置的高浓度镀铜溶液施镀后试块2#和试块3#的镀层表面形貌。采用X射线荧光分析仪对反复使用的镀铜溶液施镀后的试块2#的镀铜层进行成分测定。结果表明, 镀铜层中夹杂大量Zn、Fe、Pb等元素; 即镀铜溶液长时间使用后, 溶液中带入大量杂质离子, 电镀后被沉积至镀层表面。从图(a)和图(b)可以看出, 采用新配制镀铜溶液施镀后的试块镀层颗粒分布均匀, 排列有序, 镀铜

层表面更光滑、致密。对比图(c)和图(d)可知, 铜层平整度好、致密度高, 相应的预镀银层也表现为平整度好、致密度高的特征。

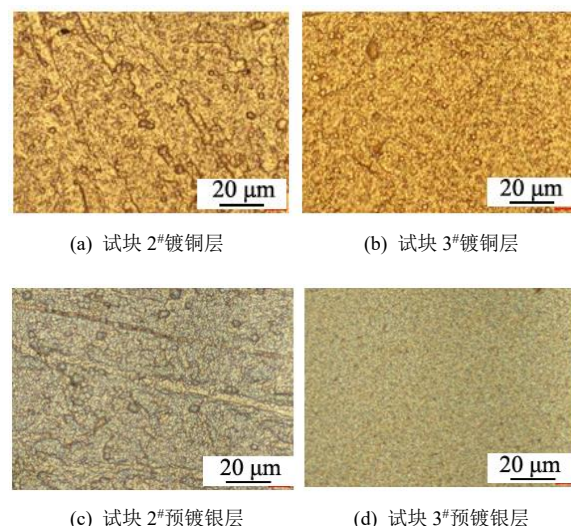


图2 反复使用和重新配置的高浓度镀铜溶液施镀后试块2#和试块3#的镀层表面形貌

Fig.2 Surface morphology of the plating layer on test block 2# and 3# after plating in reusable and reconfigured high concentration copper plating solutions

图3为不同添加剂溶液施镀后试块3#、4#和5#的镀铜层表面形貌。从图中可以看出, 3种试块镀铜层表面颗粒分布、致密程度相似, 添加剂的含量和种类对于改善镀铜层表面形貌和致密程度的影响作用不明显。

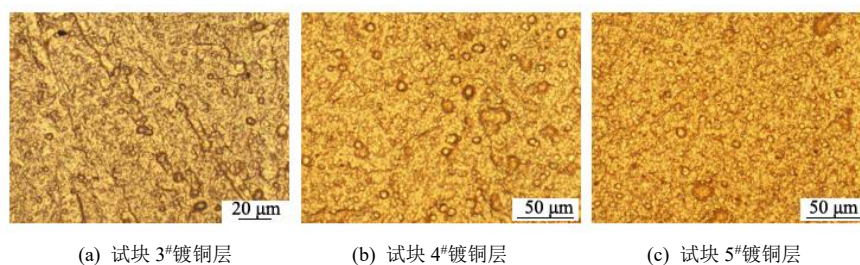


图3 不同添加剂溶液施镀后试块3#、试块4#和试块5#的镀铜层表面形貌

Fig.3 Surface morphology of the copper plating layer on test block 3#, 4# and 5# after plating in copper plating solutions with different additives

2.2 镀层孔隙率

图4为不同镀铜溶液施镀后试块1#和试块2#的孔隙率测定图。从图中可以看出, 试块2#孔隙率整体低于试块1#的孔隙率; 由图(a)和图(b)可以看出, 试块1#铜层孔隙率与预镀银层孔隙率水平相差不大, 对比图(c)和图(d)可以看出, 试块2#预镀银层孔

隙率水平远高于铜层孔隙率。这是由于低浓度镀铜溶液有助于形成较为致密的铜层, 铜层将铝基体表面的孔隙填充较好, 有利于预镀银层在铜层表面沉积均匀、平整; 而在高浓度镀铜溶液条件下, 铜层对铝基体表面空隙填充不良, 在孔隙率较高的铜层表面进行预镀银工序, 薄银层无法有效填充铜层空

隙及基体表面空隙,造成预镀银层孔隙率进一步增大。结合图1中试块1[#]和试块2[#]的表面形貌可以得知,孔隙率变化趋势与镀层表面致密度变化成反比,因此孔隙率测定可以看做镀层致密度的宏观表现。

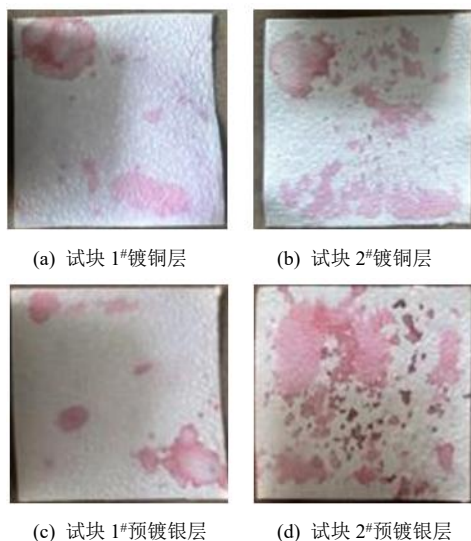


图 4 不同镀铜溶液施镀后试块 1[#]和试块 2[#]的孔隙率测定图

Fig.4 Porosity measurement of the test block 1[#] and 2[#] after plating with different copper plating solutions

2.3 耐盐雾试验

图5展示了不同工艺条件下试块1[#]-5[#]的盐雾试验表面状态。实验中对试块进行2~24 h的中性盐雾试验,并分别在2、4、8、12和24 h观察试块表面状态。结果表明,试块1[#]和试块3[#]-5[#]在24 h时出现起泡现象,记录耐盐雾时间为12 h;试块2[#]在8 h时出现起泡现象,记录盐雾时间为4 h。这表明试块1[#]、3[#]-5[#]的耐盐雾时间均高于试块2[#]。结合图1和图2可以得出,材料的孔隙对耐腐蚀性有较大影响,镀层致密度越大,孔隙率越低,镀层耐腐蚀性能越高。这是由于材料孔隙中的腐蚀介质会使材料不同区域间形成阴、阳极,加速腐蚀的发生,从而降低镀层耐蚀性能。



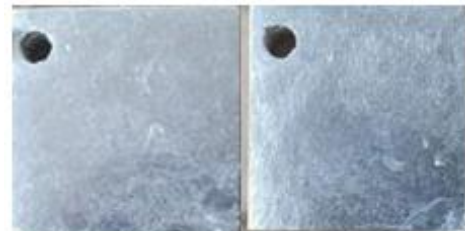
(a) 试块 1[#], 盐雾试验 12 h



(b) 试块 2[#], 盐雾试验 4 h



(c) 试块 3[#], 盐雾试验 12 h



(d) 试块 4[#], 盐雾试验 12 h



(e) 试块 5[#], 盐雾试验 12 h

图 5 不同工艺条件下试块 1[#]-5[#]盐雾试验表面状态

Fig.5 Surface state of the test blocks 1[#]-5[#] in salt spray test under different process conditions

2.4 讨论

通过对比不同工艺条件施镀的试块镀层形貌、孔隙率及耐盐雾试验结果,可以将孔隙率变化看做是镀层致密度的宏观表现,镀层致密度与耐盐雾时间呈正比关系。在高、低两种浓度镀铜溶液中施镀后,低浓度镀铜溶液施镀后的镀铜层及镀银层表面致密度更高、耐盐雾时间更长,即低浓度镀铜溶液施镀可提高银镀层耐蚀性能。通过对比新旧镀铜溶液施镀后试块的性能,旧溶液中含有的杂质降低了镀铜层的致密度,采用新溶液施镀后镀铜层及镀银层表面致密度更高、耐盐雾时间更长,即含有杂质

的镀铜溶液施镀会使银镀层耐蚀性能降低。在同一浓度镀铜溶液中添加不同组分的添加剂,试块的致密度和耐盐雾时间未有明显改变,即添加剂对银镀层的耐蚀性能提升无明显作用。

3 结论

(1) 在高、低浓度CuCN和NaCN配制的镀铜溶液施镀后,低浓度镀铜溶液施镀有助于可提高银镀层耐蚀性能;

(2) 旧镀铜溶液中夹杂大量Zn、Fe、Pb等元素,镀铜溶液中杂质会降低银镀层耐蚀性能;

(3) 镀铜溶液中配制NaOH、Na₂CO₃、NaKC₄H₄O₆添加剂,银镀层耐蚀性能无明显改变,镀铜溶液中添加剂对银镀层耐蚀性能提升无影响。

参考文献

- [1] 郑克勤. 刀闸触头材料在电流下的腐蚀行为及银-石墨烯耐蚀涂层的研究[D]. 广东: 华南理工大学, 2019.
- [2] 郝留成, 廉继英, 周瑛, 等. 6063 铝合金材料镀银层脱落原因及其解决途径[J]. 铸造技术, 2009, 30(10): 1350-1352.
- [3] 吴明孝, 刘涛, 杨威, 等. 开关柜梅花触头触片镀银层性能研究与分析[J]. 兵器材料科学与工程, 2022, 45(4): 80-84.
- [4] 陈川, 陈宜斌, 王宝凤, 等. 搅拌速率对银-石墨复合镀层耐蚀性和耐磨性的影响[J]. 腐蚀与防护, 2016, 37(11): 869-872.
- [5] 李宝增, 张颖杰, 刘畅, 等. 酸洗工艺对铝合金镀银质量的影响[J]. 电镀与精饰, 2015, 37(10): 28-31.
- [6] 马利民. 铸铝导体镀银工艺改进[J]. 高压电器, 2007, 43(5): 396-397.
- [7] 陈勿初. 高压电器铝合金镀银工艺[J]. 电镀与涂饰, 2011, 30(1): 22-23.
- [8] 王天鹏, 聂晓波, 孙明成, 等. 某沿海变电站HGIS套管接线端子镀银层腐蚀剥落的原因[J]. 腐蚀与防护, 2022, 43(5): 68-73.
- [9] 杨志远. 变电站设备导体材料腐蚀行为及防护技术研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2018.
- [10] 王朝铭, 许赵武. 脉冲与直流电镀银层的耐蚀性试验[J]. 材料保护, 1998, 31(3): 35-36.
- [11] 付明. 铝及铝合金零件镀银前化学浸锌的工艺研究[J]. 材料保护, 2007, 40(1): 32-34.
- [12] 张祖军, 王勇. 铝合金化学镀 Ni-P/Ni-B 双层复合镀层及其性能研究[J]. 材料导报, 2006, 20(2): 342-344.
- [13] 敖辽辉. 毫米波铝合金腔体的整体化学氧化及其焊接处局部电镀银的处理效果[J]. 材料保护, 2015, 48(5): 60-61.
- [14] 陈康, 郭崇武. 高耐蚀性三价铬黑铬镀层制备工艺[J]. 电镀与涂饰, 2020, 39(3): 144-145.
- [15] 刘春敬, 袁军平, 黄宇亨. 银合金镀覆氮化锆薄膜的颜色及耐蚀性研究[J]. 电镀与涂饰, 2014, 33(3): 111-114.
- [16] 刘凯, 沈喜训, 马祥, 等. 氧化石墨烯强化银镀层的耐蚀性和耐磨性研究[J]. 电镀与精饰, 2024, 46(5): 11-19.
- [17] 陈晓丽, 沈晓, 张颖杰, 等. 6063 铝合金镀银前处理工艺[J]. 电镀与涂饰, 2012, 31(10): 35-37.
- [18] 姚恩静. 铝及铝合金电刷镀银[J]. 电镀与精饰, 2001, 23(5): 32-34.
- [19] 胡云, 赵洪图. 锌-镍合金电镀工艺及镀层耐蚀性研究[J]. 电镀与环保, 2018, 38(6): 21-23.
- [20] 蔡积庆. 耐热耐蚀性镀银工艺[J]. 电镀与环保, 2003, 23(1): 19-21.