

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.07.010

## 热震对银-铝复合材料组织和性能的影响

沈晓<sup>1,2,3\*</sup>, 李闪光<sup>1,2,3</sup>, 李晓征<sup>1,2,3</sup>, 熊鹏<sup>1,2</sup>, 杜书万<sup>1</sup>

(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:** 采用电镀的方法在铝合金表面制备银镀层, 对银-铝复合材料试样进行热震试验。利用金相显微镜、显微硬度计研究热震试验对材料形貌及力学性能的影响。结果表明, 热震试验保温时间 30 min 后, 相较于未热震试验的硬度无明显变化, 随着保温时间的延长, 铝基体和银镀层硬度大幅降低; 且加热后空冷银镀层的硬度略高于水冷银镀层的硬度; 同时, 热震试验 190 °C、30 min 后基体晶粒细化, 而热震试验 190 °C、2 h 后晶粒有长大趋势。

**关键词:** 热震试验; 银-铝复合材料; 力学性能

中图分类号: TM206

文献标识码: A

## Effect of thermal shock on microstructure and properties of silver coated composites

Shen Xiao<sup>1,2,3\*</sup>, Li Shanguang<sup>1,2,3</sup>, Li Xiaozheng<sup>1,2,3</sup>, Xiong Peng<sup>1,2</sup>, Du Shuwan<sup>1</sup>

(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:** Silver coating was prepared on the surface of aluminum alloy by electroplating. Thermal shock test was carried out on the silver coating composite material. The effect of thermal shock test on the morphology and mechanical properties of the materials was studied by metallographic microscope and microhardness tester. The results show that the hardness of aluminum substrate and silver coating has no obvious change compared with that of non-thermal shock test after 30min. The hardness of aluminum substrate and silver coating decreases significantly with the extension of thermal shock time. The hardness of air-cooled silver coating after heating is slightly higher than that of water-cooled silver coating. At the same time, the matrix grains were refined after 190 °C and 30 min of thermal shock test, while the grains showed a tendency to grow after 190 °C and 2 h of thermal shock test.

**Keywords:** thermal shock test; Ag-Al composite; mechanical property

金属银具有良好的导电性和导热性, 因其价格高昂, 常作为镀层材料使用<sup>[1-2]</sup>。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<sup>[3-6]</sup>。为检测金属基体上金属沉积层的附着力, 可以采用摩擦抛光实验、喷丸试验、锉刀

试验、弯曲法、热震试验等评价其性能。由于热震试验检测方法无损、灵活且检测结果快速高效, 适用于具有不同膨胀系数的涂镀层材料与基体材料的附着力检验。热震试验是将试样在一定温差的环境中进行温度的应变试验, 检测镀层经过不同温度环境变

收稿日期: 2024-01-31

修回日期: 2024-02-26

作者简介: 沈晓(1972—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为表面工程, email: 13837585720@163.com.

化后附着力的变化情况<sup>[7-8]</sup>。

经热震试验检测后的产品要用于高压电器产品的装配使用,严苛的服役条件要求材料具备适当的硬度以抵御摩擦,而热震试验会在一定程度上改变材料的组织状态和力学性能<sup>[9]</sup>。目前多数学者将目光聚焦于电镀工艺过程对材料性能的影响<sup>[10-18]</sup>,鲜有学者研究热震对银-铝复合材料的组织形貌及硬度性能的影响。

本文采用电镀的方法以铝合金为基材制备银-铝复合材料,对比不同热震工艺条件下银-铝复合材料的组织和性能,探明热震对银-铝复合材料的影响,为高压电器行业镀层材料的发展提供一定的理论基础。

1 实验

1.1 银-铝复合材料的制备

1.2 银-铝复合材料热震试验方法

2 结果与讨论

2.1 热震试验检测镀层附着力的原理

2.2 热震试验对材料硬度的影响

试样	加热温度/℃	保温时间/min	冷却方式
1#	190	30	空冷
2#		30	水冷
3#		120	空冷
4#		120	水冷

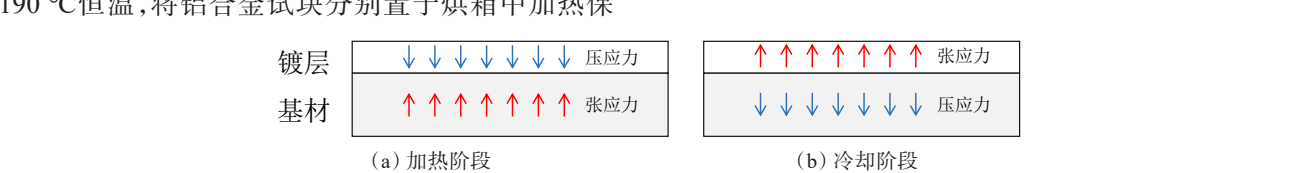
将铝合金试块作为基材,经粗磨、细抛至无痕镜面,经超声波清洗后,风干备用。采用电镀的方法镀银,工艺过程如下:碱浸蚀(温度 60℃~70℃,时间 30 s~2 min)→酸洗(室温,时间 15 s~4 min)→1 次浸锌(温度 23±3℃,时间 1 min)→酸洗(室温,时间 30 s~60 s)→二次浸锌(温度 23±3℃,时间 1 min)→镀铜(温度 40℃~50℃,时间 10 min,电流密度 0.6 A/dm<sup>2</sup>~1.5 A/dm<sup>2</sup>)→预镀银(温度 20℃~35℃,时间 5 s~15 s,电流密度 0.8 A/dm<sup>2</sup>~1.2 A/dm<sup>2</sup>)→氰化镀银(温度 20℃~35℃,电流密度 0.4 A/dm<sup>2</sup>~1.5 A/dm<sup>2</sup>)→中和(室温,时间 5 s~15 s)→热水洗(温度 80℃~85℃,时间 5 min)。

参考 GB/T 5270—82005《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》,利用 RGH-9039A 型号高温老化试验箱,设置 190℃恒温,将铝合金试块分别置于烘箱中加热保

温 30 min 及 2 h,取出后迅速置于室温和水中骤冷。热震试验工艺条件如表 1 所示。

当材料经历温度变化时,其膨胀系数也会发生变化。对于镀层材料,附着于不同膨胀系数的基材上,在高温状态下,镀层相对于基材可能会发生膨胀或收缩,形成应变差,镀层附着力不足以承受应变差异发生在宏观尺寸上的变化,可能会导致镀层从基材上剥离或损坏。

在加热初期,表面镀层比心部基材升温快,因此镀层的膨胀大于基材的膨胀,此时镀层受压应力而基材受张应力;在冷却阶段,表面镀层比心部基材更易感知温度变化,镀层冷却速度快,基材冷却速度慢,因此镀层受张应力而基材受压应力<sup>[19-21]</sup>。加热及冷却阶段,镀层与基材之间形成温度梯度,不均一的加热/冷却速率使镀层与基材间产生应变,以此检验镀层与基材的结合力。



HV;经热震试验(190℃、30 min),随即空冷和水冷至室温,测定铝基体硬度均为 60 HV,银镀层的硬度分别为 121 HV、112 HV;经热震试验(190℃、2 h),

表2 试块在不同热震条件下硬度

Tab.2 Hardness of test block under different thermal shock conditions

试验条件		铝基体硬度/HV	银镀层硬度/HV
原始试块		65	122
190 °C, 30 min	空冷	60	121
	水冷	60	112
190 °C, 2 h	空冷	33	97
	水冷	32	90

随即空冷和水冷至室温,测定铝基体硬度分别为33 HV、32 HV,银镀层的硬度分别为97 HV、90 HV。由表2可以看出,基体与镀层的硬度随保温时间的

增加而减小,这是因为随着保温时间的延长,材料中的应力得到了松弛,硬度随之降低。保温时间达到既定时间后,采用空冷或水冷的冷却方式对基体硬度的影响无明显变化,而空冷后镀层硬度略大于水冷后镀层硬度。

### 2.3 热震试验对材料组织的影响

图2为不同热震条件下银-铝复合材料截面的金相图。图2(a)为无镀层铝合金基体截面图,基体表面平整光滑;图2(b)为未经热震处理的银-铝复合材料,从图中可以看出,银层紧密沉积在铝合金机体表面;图2(c)~2(f)分别为热震试验190 °C、30 min和190 °C、2 h,随即空冷和水冷至室温后的组织状态,热震处理后表面银镀层状态无明显差别。

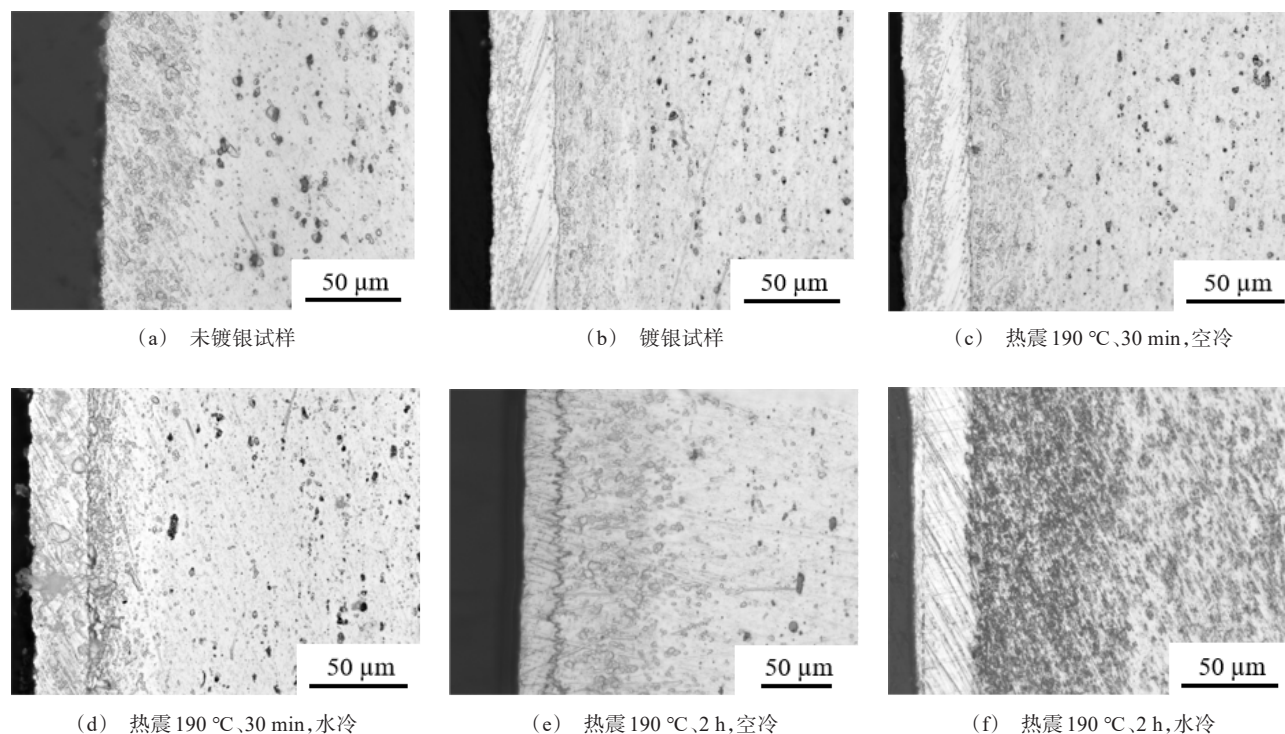


图2 不同热震条件下材料垂直截面的金相图

Fig.2 Metallographic of vertical sections of materials under different thermal shock conditions

图3为不同热震条件下铝合金基材的金相图。图3(a)~3(b)为无热震处理的基材组织,从图中可以看出,晶粒呈分散粒子状分布;图3(c)~3(d)分别为热震试验190 °C、30 min,随即空冷和水冷至室温后的组织,由图可知,晶粒形态仍然呈现出分散粒子状,但晶粒大小有所减小且分布密度增加,这是由于

铝合金基材在加热条件下,基材中杂质形核继而形成细小晶粒;图3(e)~3(f)分别为热震试验190 °C、2 h,随即空冷和水冷至室温后的组织,由图可知,晶粒形态仍未改变,但晶粒有长大的趋势,这是因为随着加热时间的延长,原本细小晶粒在加热时间的影响下而长大。



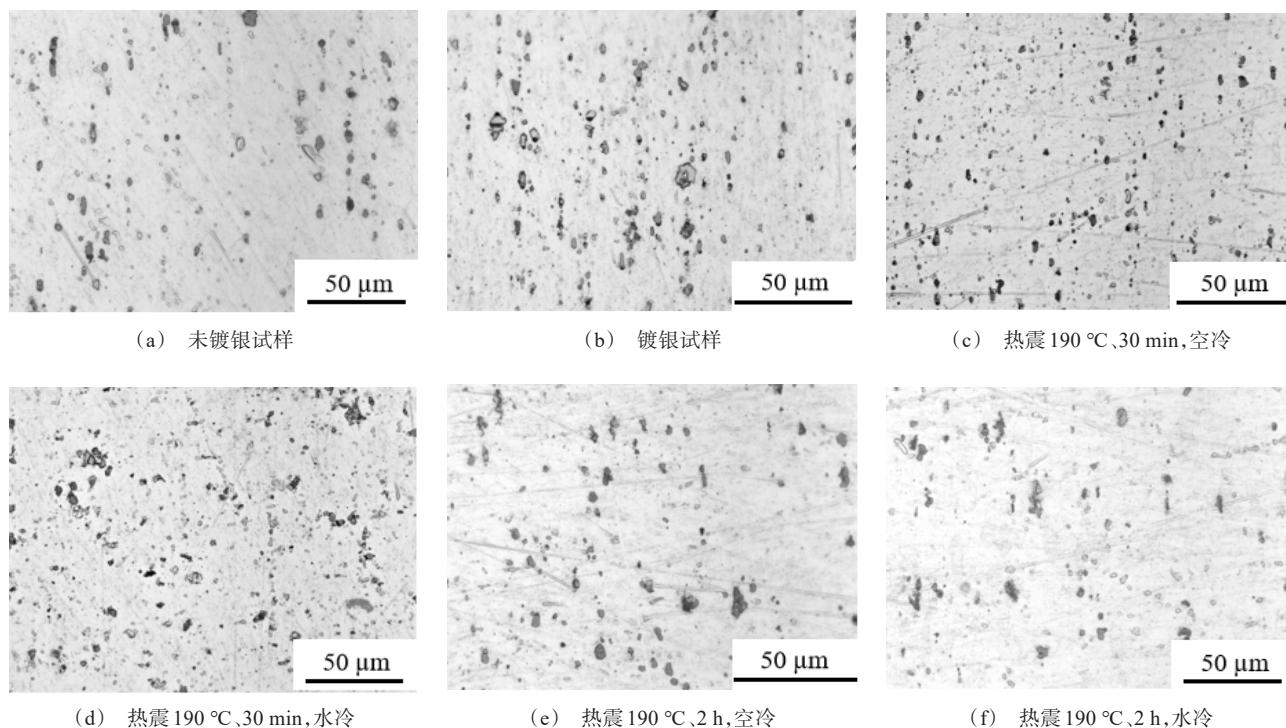


图3 不同热震条件下铝合金基材的金相图

Fig. 3 Metallographic of aluminum alloy substrate under different thermal shock conditions

## 2.4 讨论和分析

由表2可知,相较于无热震处理的铝合金试样,热震试验190 °C、30 min后空冷和水冷后表面银镀层的硬度存在差别,铝合金基体的硬度无明显变化。加热保温处理后,试样整体保持较高温度,将其置于空气下冷却,空气自然通过对流来散热的方式不会使材料温度急剧下降,有助于维持原有力学性能;而水冷是通过液体流动来散热,可以在短时间内将材料温度降低至较低水平,从而导致材料力学性能有所下降;因此,在热震试验后,采用空冷方式的材料的硬度高于水冷方式的材料的硬度。由图3可知,热震试验190 °C、30 min后,基体组织晶粒细小且多,这部分细小且多的晶粒相较于原始粗大的晶粒来说,会使材料获得更高的强度和硬度;同时,由于加热的作用,材料中残存的应力得到了松弛,强度和硬度随之减小;在应力松弛和细晶强化的作用下,铝基体的硬度并没有明显变化。热震试验190 °C、2 h后,铝基体和表面银镀层的硬度大幅下降,由图3可以看出,保温2 h后,基体组织由原本细小晶粒转变为较为粗大的晶粒,基体材料的强度和硬度降低;保温时间的延长使材料中的应力得到了充分的释

放,因此导致了材料整体硬度的下降。

## 3 结论

(1) 随着保温时间的延长,铝基体和银镀层硬度大幅降低;加热后空冷银镀层的硬度略高于水冷后银镀层的硬度。

(2) 热震试验190 °C、30 min后,铝基体晶粒细化;而热震试验190 °C、2 h后,晶粒有长大趋势。

## 参考文献

- [1] 路亚娟,沈晓,张红军,等. 新型光亮剂对电镀银层性能的影响[J]. 电镀与涂饰, 2017, 36(8): 399-402.
- [2] 韩力. 铝及其合金高附着力镀银工艺探讨[J]. 电镀与精饰, 2012, 34(7): 31-34.
- [3] 梁明生,吕荣义. 银镀层光照腐蚀变色及其防护[J]. 高压电器, 2007, 43(6): 474-475.
- [4] 陈勇,宋晓琦,熊航行,等. 球磨法对氧化银-铝复合材料导电性能的影响[J]. 贵金属, 2023, 44(2): 29-35.
- [5] 王家文,李胜君,程俊明,等. 超高压产品大型铝合金导体铸焊结合工艺研究[J]. 中国铸造装备与技术, 2020, 55(3): 67-69.
- [6] 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.
- [7] 苏哲安, 杨鑫, 黄启忠, 等. 高温热震对具有 SiC 涂层的 C/C 复合材料压缩性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2012, 17(1): 102-108.
- [8] 姚西媛, 冯广辉, 李博. 高温氧化及热震对 SiC/ZrB<sub>2</sub>-SiC/SiC 涂层炭/炭复合材料力学行为的影响[J]. 材料科学与工艺, 2020, 28(1): 1-6.
- [9] Li H J, Li K Z, Shi X H, et al. Effect of thermal shock and oxidation on mechanical property of carbon/carbon composites with a silicide coating[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(z3): 37-40.
- [10] 罗晗, 董威威, 白云峰, 等. 阳极对槽针电镀三价铬镀层性能的影响[J]. 电镀与涂饰, 2023, 42(9): 18-23.
- [11] 周国庆, 向倩, 秦水平, 等. 水对低共熔溶剂中电沉积 Zn-Fe 合金镀层性能的影响[J]. 表面技术, 2023, 52(3): 237-245.
- [12] 张璐, 余云丹, 卫国英. 电流密度对电沉积钴-铁-二氧化锆复合镀层性能的影响[J]. 电镀与涂饰, 2023, 42(9): 1-6.
- [13] 邓志强, 张春江, 陈绪蕾, 等. 阳极材料对镍铜合金电镀工艺及镀层性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(6): 9-15.
- [14] 刘政军, 武小娟, 苏允海. 热处理对高磷化学厚镀层耐腐蚀性能的影响[J]. 热加工工艺, 2014, 43(18): 163-165.
- [15] 张安琴, 詹中伟, 张骐, 等. 17-4PH 不锈钢无氰镀银封闭处理的耐腐蚀及抗微动磨损性能[J]. 电镀与涂饰, 2023, 42(13): 36-44.
- [16] 詹兴刚, 胡军林, 刘燕, 等. 航空发动机用离子镀银紧固件的耐酸性盐雾性能研究[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(11): 12-17.
- [17] 颜晨光. 铸铝合金镀银工艺的改进[J]. 电镀与环保, 2016, 36(3): 16-17.
- [18] 孔凡蓬, 徐帆, 陈秉坚, 等. 氧化对铜基件镀银产品电气性能的影响及其预防和解决方法[J]. 电镀与涂饰, 2015, 34(9): 510-513.
- [19] 董平, 李瑞文, 江帆, 等. 铀表面 Al/Ti 复合镀层热应力的有限元分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(6): 885-889.
- [20] 高冰媛, 于爱兵, 李照, 等. 热震法分离电镀金刚石工具磨料层与基体的研究[J]. 宁波大学学报: 理工版, 2011, 24(1): 67-70.
- [21] 谢华, 陈文哲, 钱匡武. 热处理对 Ni-P 镀层内应力及结合强度的影响[J]. 电镀与环保, 2004, 24(3): 13-15.