

铜导线表面热浸镀 PbSn 合金 镀层的组织与性能

Microstructure and properties of hot-dip
PbSn alloy coating on copper wires

姚小飞¹, 田 伟¹, 李 楠², 王 萍¹, 吕煜坤¹

(1 西安工业大学 材料与化工学院, 西安 710021;

2 西安泰力松新材料股份有限公司, 西安 710119)

YAO Xiao-fei¹, TIAN Wei¹, LI Nan², WANG Ping¹, LYU Yu-kun¹

(1 School of Materials Science and Chemical Engineering, Xi'an

Technological University, Xi'an 710021, China; 2 Xi'an Telison

New Materials Co., Ltd., Xi'an 710119, China)

摘要: 为了改善铜导线的可焊性和耐蚀性,采用热浸镀技术在铜导线表面制备 Pb40Sn60 和 Pb37Sn63 两种成分的低熔点合金镀层,利用扫描电镜(SEM)、能谱分析(EDS)、X射线衍射(XRD)等分析手段和电阻率检测实验、拉伸实验、中性盐雾实验等方法,系统研究其微观组织、相成分、电阻率、力学性能及耐蚀性。结果表明:Pb40Sn60 和 Pb37Sn63 两种成分的合金镀层均由 α 相和 β 相两相组成,镀层的电阻率分别约为 2.6832×10^{-3} 、 $2.5929 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$,均高于铜基体。铜导线热浸镀 Pb40Sn60 和 Pb37Sn63 两种成分合金镀层后的表面硬度分别为 13.4、12.6HV_{0.2};抗拉强度分别为 193、180 MPa;伸长率分别为 35%和 37%,与铜基体相比均降低。铜导线表面热浸镀 PbSn 合金镀层具有良好的导电性、力学性能及耐腐蚀性等综合性能。随着 Pb 含量的降低或 Sn 含量的增加,PbSn 合金镀层中 α 相的相对量减少、 β 相的相对量增大,其电阻率、硬度和强度降低,塑性略有增大,耐蚀性增强。Pb40Sn60 比 Pb37Sn63 合金镀层的腐蚀速率较高,分别为 2.44×10^{-2} 、 $3.65 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,耐腐蚀性较差。PbSn 合金镀层中 α 相比 β 相的腐蚀程度更为严重, α 相比 β 相的耐蚀性要差。

关键词: 铜导线;热浸镀;PbSn 合金;电阻率;力学性能;耐腐蚀性

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2019.000219

中图分类号: TQ153 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2020)03-0148-07

Abstract: Hot dip plating was used to prepare Pb40Sn60 and Pb37Sn63 low melting point alloy coatings on copper wires to improve the properties of weldability and corrosion resistance, and the microstructure and phase composition were examined by scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectrometry (EDS) and X-ray diffraction (XRD). Resistivity, mechanical properties and corrosion resistance of the alloy were investigated by the tests of electrical resistivity, tensile and neutral salt spray. The results show that the Pb40Sn60 and Pb37Sn63 alloy coatings are all composed of α phase and β phase, the resistivity of PbSn alloy coatings are all higher than that of copper substrate, the resistivity of Pb40Sn60 alloy coating is $2.6832 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$ and Pb37Sn63 alloy coating is $2.5929 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$. Hardness, strength and plasticity of copper after hot dipped PbSn alloy coatings all decrease, surface hardness of Pb40Sn60 and Pb37Sn63 alloy coatings is respectively 13.4HV_{0.2} and 12.6HV_{0.2}, tensile strength is respectively 193 MPa and 180 MPa, elongation is respectively 35% and 37%. PbSn alloy coatings on copper wire have good properties of conductivity, mechanical and corrosion resistance. With the decrease of Pb content or the increase of Sn content, the relative amount of α phase is reduced and relative amount of β phase increases in the PbSn alloy coating, resistivity, hardness and strength are all reduced, plasticity increases slightly, its corrosion resistance is enhanced. The corrosion rate of Pb40Sn60 alloy coatings is higher than that of Pb37Sn63 alloy coatings, the corrosion rate of Pb40Sn60 alloy coating is $2.44 \times 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ and

Pb37Sn63 alloy coatings is $3.65 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, and the corrosion resistance of Pb40Sn60 alloy coatings is relatively poor. The corrosion resistance of α phase is poor than that of β phase, the corrosion degree of α phase is more serious than that of β phase in PbSn alloy coating.

Key words: copper wire; hot dipping; PbSn alloy; electrical resistivity; mechanical property; corrosion resistance

铜导线是电路板上主要的电路导电材料,但是铜的熔点(约为 1083.4°C)较高,导致电路板上的电子元器件与铜导线的焊接较为困难。通常采取锡焊的方式实现铜导线与电子元器件的焊接连接,但是该方法适于手工操作,不便于自动化生产,且质量难以保证,鉴于此,在铜表面制备熔点较低的镀层能够很好地解决这一问题。金属 Sn、Pb 的熔点低(Sn 熔点约为 231.9°C , Pb 熔点约为 327.5°C),强度与硬度均较低,质地柔软,有较高的导热性和较低的热膨胀系数^[1],耐大气腐蚀^[2-3],与钢、铜、铝等材料的可焊性良好^[4],是较好的焊接材料。PbSn 合金为共晶合金,共晶合金的熔点较其组元熔点更低,其可焊接性更为优异^[5]。罗序燕等^[6]研究了 $\phi 0.5 \text{ mm}$ 铜线材表面电镀 PbSn 合金的工艺和性能,结果表明 PbSn 合金镀层对大气、潮湿、水溶性盐溶液、弱酸等具有较好的抗腐蚀性能,与硫及硫化物几乎不发生腐蚀作用。尹娜等^[7]对 Pb37Sn63 钎料焊接 Au60AgCu 合金的研究表明,Pb37Sn63 合金焊料流动性和润湿性非常好,容易钎焊,具有良好的可焊性。杜楠等^[8]对 Pb40Sn60 合金镀层的焊接性研究表明,Pb40Sn60 合金镀层与金属的互溶性较好,焊接性能优良、焊点表面光泽性也很好。从已有公开文献对 PbSn 合金及其镀层性能的研究结果可见,PbSn 合金及其镀层具有良好的耐腐蚀性和可焊性,因此,研究铜导线表面 PbSn 合金镀层的制备技术和性能对提高电路板质量具有较大的价值。

PbSn 合金镀层制备通常采用含 Pb^{2+} 和 Sn^{2+} 的盐溶液,配合表面活化等处理工艺进行电镀或化学镀,不仅镀层的 PbSn 合金成分难以控制,而且镀层厚度小、效率低,还对环境有一定的污染性。热浸镀技术工艺简单,效率高,易于实现自动化生产,相对于电镀和化学镀等技术其污染性较低^[9-11],尤其适合于低熔点材料镀层的制备。王征等^[12]对铜表面热浸镀铝的组织研究表明,Cu/Al 界面主要生成了 CuAl_2 , CuAl , Cu_9Al_4 等金属间化合物;周德琴等^[13]对钢基体热浸镀铝和高温扩散处理研究表明,界面形成了 FeAl 和 Fe_3Al 韧性相为主的扩散层,这表明热浸镀技术能够在基体与镀层界面形成扩散层,达到冶金结合的效果。钢材表面热浸镀 Al 技术应用较为广泛,其相关方面的研究报道也较多^[14-16],但是有关铜表面热浸镀 PbSn

合金镀层的相关报道较少。虽然已有文献对 PbSn 合金可焊性和耐蚀性有了一些深入的研究,但是作为导电材料,有关其导电性、力学性能等方面还有待进一步研究。PbSn 合金共晶点成分为 Pb38.1Sn61.9,共晶温度为 183°C ^[17]。因此,本工作选取接近于共晶点的亚共晶 Pb40Sn60 合金和过共晶 Pb37Sn63 合金两种成分为研究对象,采用热浸镀的方法,在铜导线表面分别制备了 Pb40Sn60 和 Pb37Sn63 合金镀层,分析其微观组织、相成分、电阻率、力学性能及耐蚀性,系统研究了 PbSn 合金镀层的综合性能,并比较 PbSn 合金成分对各性能及综合性能的影响,为铜导线表面热浸镀 PbSn 合金镀层的实际应用提供理论支持。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

基体材料为带状铜导线,截面宽度为 5 mm 、厚度为 1 mm ,纯度大于 99% 的无氧铜。镀层材料选择纯 Pb 和纯 Sn,纯度均大于 99%,按照质量分数进行配比熔融。

1.2 实验方法及性能测试

镀层材料 Pb 和 Sn 按照质量分数 Pb40Sn60 和 Pb37Sn63 两种成分进行合金设计与配比,在熔化炉中加热至熔融,控制熔融的 PbSn 合金温度为 230°C 恒温,熔槽长度为 40 mm ,将待镀铜带线材以 3 m/min 的线速度水平拉动浸入并穿过熔融态的 PbSn 合金中,使铜带匀速连续运动,自然冷却,在铜带表面形成 PbSn 合金镀层。采用 SEM 观察镀层的表面和截面形貌,采用 EDS 和 XRD 分析镀层成分与相组成,利用电阻率测试仪、硬度测试仪和万能试验机分别检测镀层的电阻率、硬度与拉伸性能,采用中性盐雾实验评定镀层的耐腐蚀性能。

拉伸实验设备为 50 kN 电子万能材料试验机,拉伸试样为长度 100 mm 的全截面尺寸铜导线,伸长率测试标距为 30 mm ,加载变形速率为 1.0 mm/min ,采用 SEM 观察断口形貌。耐蚀性采用中性盐雾实验进行测试,实验温度为 35°C ,介质为 3.5% NaCl 溶液,盐雾腐蚀试样为长度 50 mm 的全截面尺寸铜导线,每隔 8 h 对试样表面进行目视观察,观察到试样表面有

发白或发红等腐蚀产物时,采用 SEM 观察腐蚀表面形貌,利用失重法计算腐蚀速率。

2 结果与分析

2.1 镀层显微组织

图 1 为 Pb40Sn60 与 Pb37Sn63 两种合金成分镀层的表面形貌和截面结构。从表面形貌图可以看出,两种成分 PbSn 合金镀层的组织分布均匀,表面致密,无明显的表面缺陷,略有不同的是 Pb40Sn60 比

Pb37Sn63 合金镀层中的白色组织 α 相较为粗大、相对量较多。从截面形貌图可以看出,两种成分 PbSn 合金镀层的厚度约为 25~30 μm ,与基体界面均无明显的间隙分层和气孔,结合紧密,说明基体与镀层结合较好,略有不同的是 Pb40Sn60 比 Pb37Sn63 镀层内的白色组织相对量较多且较粗大。镀层的表面形貌和界面形貌均表明 PbSn 合金镀层由灰色组织 β 相与白色组织 α 相组成,总体上灰色组织相对量较多,白色组织相对量较少,随 Pb 元素含量的减少或 Sn 元素含量的增多,PbSn 合金镀层中白色组织细化且相对量减少。

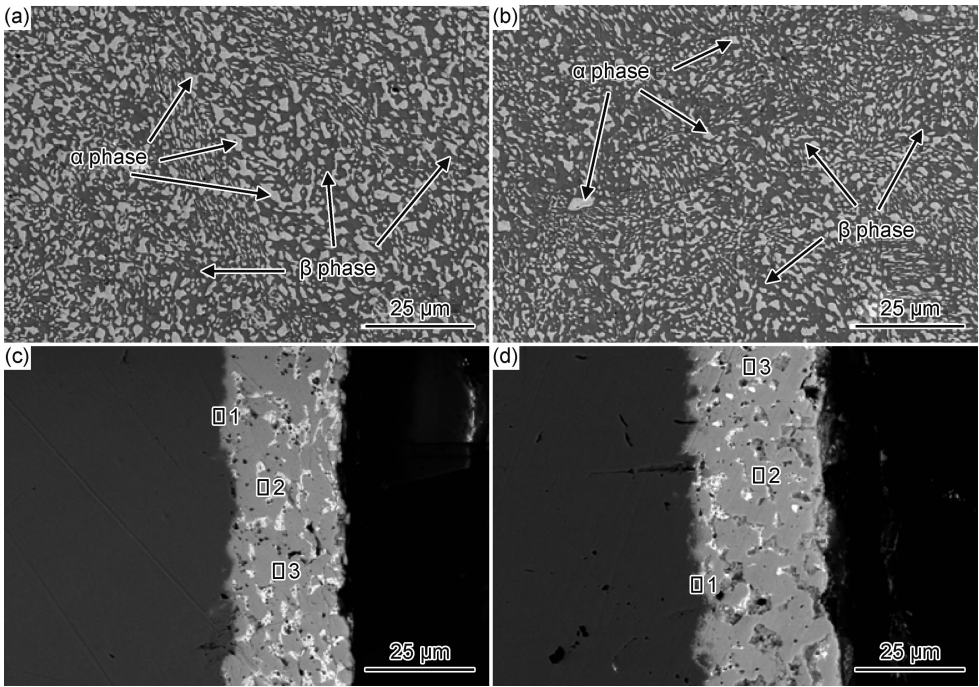


图 1 铜导线表面热浸镀 PbSn 合金镀层的微观形貌
(a)Pb40Sn60 镀层表面形貌;(b)Pb37Sn63 镀层表面形貌;(c)Pb40Sn60 镀层截面形貌;(d)Pb37Sn63 镀层截面形貌

Fig. 1 Morphologies of hot dipping PbSn alloy coatings on copper wires
(a)surface morphology of Pb40Sn60 alloy coating;(b)surface morphology of Pb37Sn63 alloy coating;
(c)section morphology of Pb40Sn60 alloy coating;(d)section morphology of Pb37Sn63 alloy coating

2.2 镀层成分及相分析

采用 XRD 对 Pb40Sn60 和 Pb37Sn63 合金镀层的相组成进行了分析,结果如图 2 所示,可以看出,两种成分镀层的 XRD 图谱相组成基本相同,均由 Pb 和 Sn 相组成,未发现其他的合金相,这说明镀层的组成相由 Sn 元素固溶于 Pb 元素中的 α 相和 Pb 元素固溶于 Sn 元素中的 β 相两种固溶体相组成,从峰值的强弱来看, α 相峰值较弱, β 相峰值较强,结合图 1 中镀层表面形貌和截面结构分析可知,镀层相组成中 β 相比 α 相的含量较多,且随着 Pb 含量的降低、Sn 含量的增加,镀层中 α 相的相对量减少、 β 相的相对量增大。

采用 EDS 对 PbSn 合金镀层不同组织的元素成

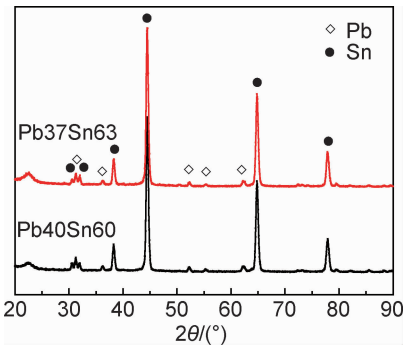


图 2 铜导线表面热浸镀 PbSn 合金镀层的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD spectra of the hot-dip PbSn alloy coatings on copper wires

分进行了分析,结果如表 1 所示,可以看出,基体与镀层的界面处均含有 Cu,Pb,Sn 3 种元素,表明 PbSn 合金镀层与铜基体界面处的元素发生了原子互扩散,镀层和基体界面形成了冶金结合;白色组织中的 Pb 元素含量相对较多,而 Sn 元素的含量较少,由此可推断镀层中的白色组织为 Sn 元素固溶于 Pb 元素中的 α 相;灰色组织中 Sn 元素含量相对较多,而 Pb 元素的含量较少,可知灰色组织为 Pb 元素固溶于 Sn 元素中的 β 相。

表 1 热浸镀 PbSn 合金镀层 EDS 分析结果
Table 1 Analysis results of hot-dip PbSn alloy coatings by EDS

Composition of alloy coating	Position	Atom fraction of elements/%		
		Cu	Pb	Sn
Pb40Sn60	1	24.72	43.05	32.23
	2	0	4.58	95.42
	3	0	83.39	16.61
Pb37Sn63	1	21.36	41.83	36.81
	2	0	5.01	94.99
	3	0	93.59	6.41

2.3 电阻率

室温(约 20 ℃)条件下测试了镀层的电阻率,Pb40Sn60 和 Pb37Sn63 两种合金镀层的电阻率分别为 2.6832×10^{-3} , $2.5929 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$ 。可知,Pb37Sn63 比 Pb40Sn60 合金镀层的电阻率小,且其两种成分合金镀层的电阻率均高于其组元纯金属 Pb 或 Sn 的电阻率(室温下纯 Pb 的电阻率为 $2.0684 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$,纯 Sn 的电阻率为 $1.26 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$ ^[18]),可知 Pb 的电阻率高于 Sn。因此,PbSn 合金镀层中 Pb 含量降低或 Sn 含量增加,其电阻率降低。

2.4 硬度

两种成分合金镀层的显微硬度测试结果见表 2,可以看出,Pb40Sn60 和 Pb37Sn63 两种成分合金镀层的表面硬度分别为 13.4,12.6HV_{0.2},截面硬度分别为 20.4,18.7HV_{0.2},均显著低于 Cu 基体的硬度,Pb40Sn60 比 Pb37Sn63 成分镀层的表面硬度和截面硬度均较高,这说明随着 PbSn 合金镀层中 Pb 含量降低或 Sn 含量增加,镀层的硬度降低。从硬度的由表及里的变化来看,镀层表面硬度低于镀层与铜基体界面处的硬度,而镀层与铜基体界面处的硬度明显低于 Cu 基体的硬度,由 EDS 分析可知,PbSn 合金镀层与铜基体界面处 Cu,Pb,Sn 3 种元素发生了原子互扩散,表明镀层与基体界面区的一定范围内 Cu,Pb 和 Sn 元素之间产生了一定程度的合金化,从而导致硬度由表及里形成由低到高的变化,这也说明了 PbSn 合金镀层和铜基体界面形成了冶金结合。

表 2 热浸镀 PbSn 合金镀层的硬度
Table 2 Hardness of hot-dip PbSn alloy coatings

Composition of alloy coating	Hardness(HV _{0.2})		
	Cu substrate	Section of coating	Surface of coating
Pb40Sn60	77.0	20.4	13.4
Pb37Sn63	76.4	18.7	12.6

2.5 拉伸性能

铜导线表面热浸镀 PbSn 合金镀层后的拉伸性能测试结果如图 3 所示,可以看出,热浸镀 PbSn 合金镀层后的铜导线依然保持了铜基体良好的塑性和易变形性。铜导线分别热浸镀 Pb37Sn63 和 Pb40Sn60 两种合金镀层后的屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为 67 MPa 和 85 MPa,180 MPa 和 193 MPa,37% 和 35%,均有所降低,且热浸镀 Pb37Sn63 比 Pb40Sn60 成分合金强度降低更为明显、伸长率反之。这说明铜导线表面热浸镀 PbSn 合金镀层后,其变形抗力和塑性均降低,随 PbSn 合金镀层中 Pb 含量增加或 Sn 含量降低,铜导线强度相对提高,塑性相对降低。材料硬度增大,会使其强度提高、塑性降低,由硬度测试结果可知,Pb40Sn60 比 Pb37Sn63 成分合金镀层的硬度要高,致使前者强度相对较高、塑性相对降低。因此,随着 PbSn 合金镀层中 Pb 含量增加或 Sn 含量降低,镀层的硬度增大,由此导致强度提高、塑性降低。

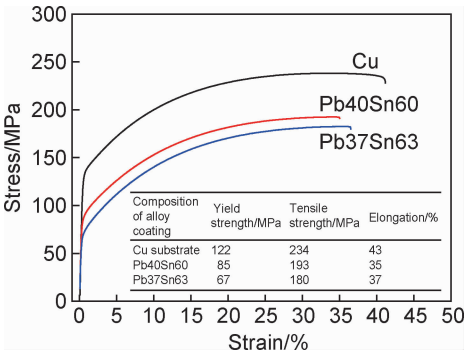


图 3 铜导线热浸镀 PbSn 合金镀层后的应力-应变曲线
Fig. 3 Stress-strain curves of copper wires after hot-dip PbSn alloy coatings

图 4 为铜导线热浸镀 PbSn 合金镀层后的拉伸断口形貌,从断口的低倍形貌来看,镀层与基体在拉伸变形过程中结合紧密、未出现分层现象,同步变形且变形均匀,这说明镀层与基体结合较好。断口处镀层伴随基体发生了大量的颈缩现象,表明铜导线热浸镀 PbSn 合金镀层后仍然保持了较好的延伸性,PbSn 合金镀层也具有较好的塑性变形能力。从断口的微观形貌来看,PbSn 合金镀层断裂处有大量的撕裂棱,铜导线基

体断口平滑,主要为河流花状形貌,伴有少量韧窝和撕裂棱。李秀辉等^[19]研究表明纯铜试样拉伸断口为大量韧窝形貌,分析认为其断裂类型为韧性断裂;Meng等^[20]研究表明 PbSn 钎焊接头断口呈现韧窝形貌,表

明纯铜和 PbSn 合金都具有良好的韧性。这说明 PbSn 合金镀层为韧性断裂特征,而铜导线热浸镀 PbSn 合金镀层后的断裂为解理断裂、准解理断裂和韧窝断裂的混合断口特征。

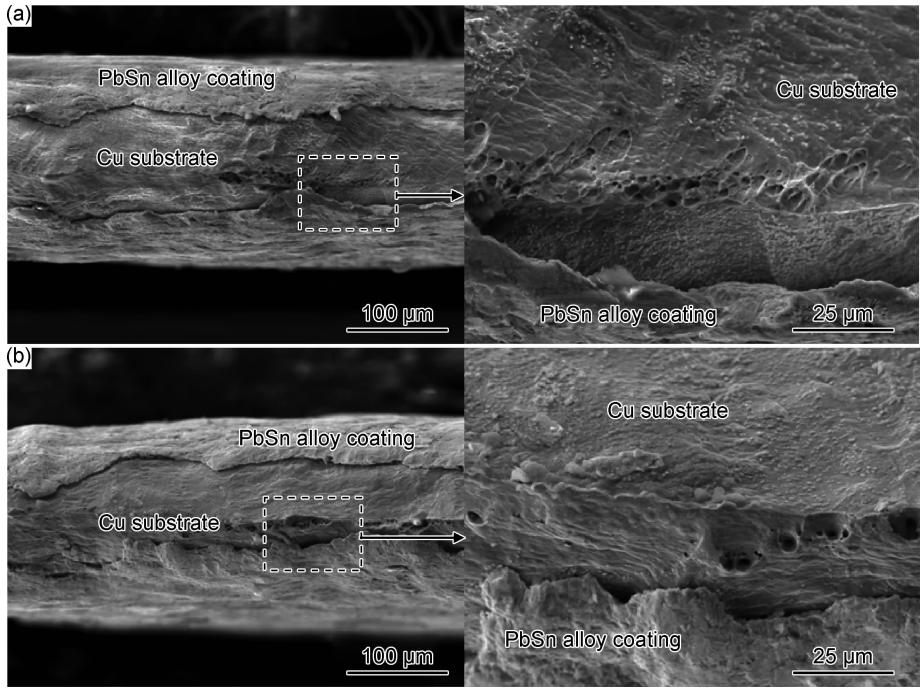


图 4 铜导线表面热浸镀 PbSn 合金镀层后的拉伸断口形貌
(a)Pb40Sn60 合金镀层;(b)Pb37Sn63 合金镀层

Fig. 4 Morphologies of tensile fracture after hot-dip PbSn alloy coating on copper wires
(a)Pb40Sn60 alloy coating;(b)Pb37Sn63 alloy coating

2.6 耐腐蚀性能

采用中性盐雾腐蚀实验评价了铜导线表面热浸镀 PbSn 合金镀层的耐腐蚀性能,其 144 h 后表面腐蚀形貌如图 5 所示。可以看出,两种成分镀层表面均发生了局部腐蚀,腐蚀部位如图 5 中箭头所示区域,从局部腐蚀的面积来看,Pb40Sn60 镀层的腐蚀程度较严重。

采用失重法计算了 Pb40Sn60 和 Pb37Sn63 两种不同成分合金镀层的均匀腐蚀失重率分别为 $2.44 \times 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $3.65 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,这表明 Pb37Sn63 比 Pb40Sn60 合金镀层的耐腐蚀性能要好。邱萍等^[21]对 PbSn 合金在模拟湿热大气环境中的电化学腐蚀的研究也表明,随 Pb 含量的增加,PbSn

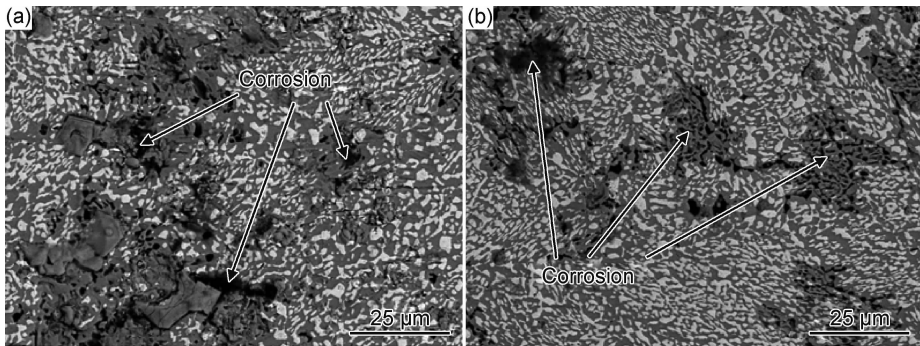


图 5 铜导线热浸镀 PbSn 合金镀层表面腐蚀形貌
(a)Pb40Sn60 合金镀层;(b)Pb37Sn63 合金镀层

Fig. 5 Corrosion morphologies of hot-dip PbSn alloy coating on copper wires
(a)Pb40Sn60 alloy coating;(b)Pb37Sn63 alloy coating

合金耐蚀性变差。因此, Pb40Sn60 比 Pb37Sn63 合金镀层的腐蚀速率大、耐腐蚀性差。

从腐蚀表面的微观形貌可以看出, 在腐蚀区域的 α 相和 β 相都有不同程度的腐蚀, 但 α 相较 β 相的腐蚀程度严重。这表明 PbSn 合金镀层中, 以 Sn 固溶于 Pb 中的 α 相比以 Pb 固溶于 Sn 中的 β 相耐蚀性要差。根据镀层不同相元素含量的分析结果可知, α 相中富含 Pb 元素, 而 β 相中富含 Sn 元素, Pb 比 Sn 耐蚀性差, 因此, α 相比 β 相的耐蚀性差, 由此导致 PbSn 合金镀层中 α 相先于 β 相腐蚀, 且 α 相比 β 相的腐蚀程度更为严重。根据相图计算 α 和 β 两相的相对量可知, Pb40Sn60 比 Pb37Sn63 合金中 α 相的相对量要多, 从图 1 中镀层微观形貌的分析也可知, Pb40Sn60 和 Pb37Sn63 合金镀层中的 α 相比 β 相的相对量都要多。因此, Pb40Sn60 合金镀层更容易腐蚀、其耐蚀性相对较差。由此可知, 随 Pb 元素成分减少或 Sn 元素成分增多, PbSn 合金镀层中 α 相的相对量减少、 β 相的相对量增多, 其耐腐蚀性增强。

3 结论

(1) 铜导线表面热浸镀 PbSn 合金镀层界面具有冶金结合特征, Pb40Sn60 和 Pb37Sn63 两种成分的合金镀层均由 α 与 β 两相组成, 随着 Pb 含量的降低、Sn 含量的增加, 镀层中 α 相的相对量减少、 β 相的相对量增大。

(2) 室温下 Pb40Sn60 与 Pb37Sn63 合金镀层的电阻率分别为 $2.6832 \times 10^{-3} \Omega \cdot m$ 和 $2.5929 \times 10^{-3} \Omega \cdot m$, 均高于其组元纯金属 Pb 或 Sn 的电阻率(室温下纯 Pb 的电阻率为 $2.0684 \times 10^{-3} \Omega \cdot m$, 纯 Sn 的电阻率为 $1.26 \times 10^{-3} \Omega \cdot m$), PbSn 合金镀层中 Pb 含量降低或 Sn 含量增加, 其电阻率降低。

(3) 与铜基体的力学性能相比, 铜导线表面热浸镀 PbSn 合金镀层后的硬度、强度及塑性均降低, PbSn 镀层硬度明显低于铜基体, 且随着 Pb 含量降低或 Sn 含量增加, PbSn 合金镀层的硬度和强度降低、塑性略有增大。

(4) Pb40Sn60 比 Pb37Sn63 合金镀层的腐蚀速率较大, 耐腐蚀性较差。随 Pb 含量的增加或 Sn 含量的减少, PbSn 合金镀层的耐蚀性降低。PbSn 合金镀层中 α 相先于 β 相腐蚀, 且 α 相比 β 相的腐蚀程度更为严重, α 相比 β 相的耐蚀性差。

参考文献

[1] LEE J S, AHN Y S, KANG G H, et al. Recovery of Pb-Sn alloy

and copper from photovoltaic ribbon in spent solar module[J]. Applied Surface Science, 2017, 415: 137-142.

- [2] ZHANG N X, CHINH N, KAWASAKI M, et al. Self-annealing in a two-phase Pb-Sn alloy after processing by high-pressure torsion[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 666: 350-359.
- [3] KHAN P Y, DEVI M M, BISWAS K. Formation and stability of Pb-Sn embedded multiphase alloy nanoparticles *via* mechanical alloying[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46(8): 3365-3377.
- [4] LIU C, SONG D J, HAO L F, et al. Study of the microstructure and mechanical properties of PbSn alloys deposited on carbon fiber reinforced epoxy composites[J]. Polymers & Polymer Composites, 2014, 22(2): 215-219.
- [5] DU D F, HOU L, GAGNOUD A, et al. Effect of an axial high magnetic field on Sn dendrite morphology of Pb-Sn alloys during directional solidification[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 588: 190-198.
- [6] 罗序燕, 李东林. 铜线材氟硼酸盐高速电镀光亮锡铅及锡铅钴合金[J]. 表面技术, 2004, 33(4): 67-68.
LUO X Y, LI D L. High speed electroplating bright Sn-Pb & Sn-Pb-Co alloy bath on copper wire in fluoroborate plating bath[J]. Surface Technology, 2004, 33(4): 67-68.
- [7] 尹娜, 曲文卿, 杨淑娟, 等. 金合金锡铅软钎焊接头脆性行为[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(5): 670-673.
YIN N, QU W Q, YANG S J, et al. Brittle behavior of gold alloy joint soldered with tin-lead solder[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(5): 670-673.
- [8] 杜楠, 付明. 提高小型镀铝锡合金焊接件抗氧化性的工艺研究[J]. 航空精密制造技术, 2012, 48(5): 33-35.
DU N, FU M. Process research on promoting oxidation resistance of lead tin alloy weldment[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2012, 48(5): 33-35.
- [9] 周英伟, 高波. Si、Mg、RE 对热浸镀锌铝基合金镀层组织与性能的影响研究进展[J]. 表面技术, 2017, 46(11): 183-189.
ZHOU Y W, GAO B. Effects of Si, Mg and RE on microstructure and properties of hot dip galvanized alloy coatings[J]. Surface Technology, 2017, 46(11): 183-189.
- [10] 李安敏, 郑良杰, 胡武, 等. 钢材热浸镀铝的研究进展[J]. 材料导报, 2013, 27(9): 96-99.
LI A M, ZHENG L J, HU W, et al. Advances in research of hot-dip aluminizing technology for steel[J]. Materials Review, 2013, 27(9): 96-99.
- [11] 孙伟, 蔡启舟, 罗强. RE 对热浸镀铝镀层组织及耐腐蚀性能的影响[J]. 中国表面工程, 2010, 23(6): 24-29.
SUN W, CAI Q Z, LUO Q. Effects of rare earth on microstructure and corrosion resistance of hot-dip aluminum coating[J]. China Surface Engineering, 2010, 23(6): 24-29.
- [12] 王征, 刘平, 刘新宽. 铜热浸镀铝的组织与性能[J]. 稀有金属, 2015, 39(10): 955-960.
WANG Z, LIU P, LIU X K. Microstructure and performance of hot-dip aluminizing coating of copper[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2015, 39(10): 955-960.
- [13] 周德琴, 陈伟, 张秋阳, 等. 不同基体热浸镀铝镀层组织和高温磨

- 损行为[J]. 材料工程, 2018, 46(2): 93-98.
- ZHOU D Q, CHEN W, ZHANG Q Y, et al. Microstructure and high-temperature wear behavior of hot-dipped aluminized coating on different substrate materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(2): 93-98.
- [14] 雍薇, 黄兴民, 张雷, 等. 热浸镀铝球墨铸铁失效机理研究[J]. 材料工程, 2016, 44(8): 77-84.
- YONG W, HUANG X M, ZHANG L, et al. Failure mechanism of hot dip aluminized ductile iron[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(8): 77-84.
- [15] 李锋, 吕家舜, 杨洪刚, 等. 热浸镀 Zn11Al3Mg0.2Si 合金镀层微观组织实验研究[J]. 表面技术, 2011, 40(3): 32-35.
- LI F, LV J S, YANG H G, et al. The experiment research of microstructure of hot-dip galvanized Zn11Al3Mg0.2Si alloy coating[J]. Surface Technology, 2011, 40(3): 32-35.
- [16] 童晨, 苏旭平, 李智, 等. 热浸镀 Zn-6%Al-3%Mg 镀层合金层生长研究[J]. 材料工程, 2013(7): 54-60.
- TONG C, SU X P, LI Z, et al. Research on hot-dipped Zn-6%Al-3%Mg alloy coatings intermetallics layer growth[J]. Journal of Materials Engineering, 2013(7): 54-60.
- [17] 周楷尧, 汤忠毅, 董勇, 等. 多元低熔点共晶合金 Sn16Bi52Pb32 和 In21Sn12Bi49Pb18 凝固组织和相组成研究[J]. 材料导报, 2016, 30(11): 99-103.
- ZHOU K Y, TANG Z Y, DONG Y, et al. Microstructure and phase composition of multi-component low-melting-point eutectic alloys Sn16Bi52Pb32 and In21Sn12Bi49Pb18[J]. Materials Review, 2016, 30(11): 99-103.
- [18] FADIN V V, ALEUTDINOVA M I. Changes in the electric conductance of sliding contacts under occurrence of a Pb-Sn melt in the contact space[J]. Russian Physics Journal, 2013, 55(9): 1028-1033.
- [19] 李秀辉, 燕绍九, 洪起虎, 等. 石墨烯添加量对铜基复合材料性能的影响[J]. 材料工程, 2019, 47(1): 11-17.
- LI X H, YAN S J, HONG Q H, et al. Influence of graphene content on properties of Cu matrix composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(1): 11-17.
- [20] MENG M, WANG Z B, WANG X, et al. Creep-caused fracture of PbSn solder joint[J]. International Journal of Modern Physics B, 2017, 31: 16-19.
- [21] 邱萍, 严川伟, 王福会. Cu/Sn63-Pb37 偶对在模拟湿热大气环境中的电化学腐蚀[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2007, 27(6): 329-333.
- QIU P, YAN C W, WANG F H. Electrochemical corrosion behaviors of the galvanic couple Cu/Sn63-Pb37 in simulated atmosphere[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2007, 27(6): 329-333.

基金项目:陕西省教育厅科研计划项目(2018JK0396);陕西省重点研发计划-工业领域项目(2018GY-111)

收稿日期:2019-03-12;**修订日期:**2019-11-12

通讯作者:姚小飞(1978—),男,讲师,博士,主要研究方向为金属材料表面改性与腐蚀防护,联系地址:陕西省西安市学府中路2号西安工业大学未央校区材料与化工学院(710021),E-mail: yxf933@126.com

(本文责编:寇凤梅)