

甲基磺酸盐体系下铜粉浸镀锡工艺的研究

林燕, 江小勇, 魏喆良

(福州大学 机械工程及自动化学院, 福州 350108)

摘要: **目的** 解决现有氯化盐体系和硫酸盐体系下,铜粉浸镀锡存在的问题。**方法** 以甲基磺酸锡为主盐,硫脲为络合剂,对铜粉进行浸镀锡,并分析锡离子浓度、硫脲浓度、甲基磺酸加入量及镀液温度等因素对锡镀层微观形貌的影响。**结果** 在甲基磺酸盐体系下,锡离子可与硫脲形成复杂络合离子,降低了锡离子的平衡电极电位,使铜粉浸镀锡成为可能。**结论** 当锡离子浓度为 0.15 mol/L,硫脲浓度为 0.80 mol/L,甲基磺酸加入量为 50 mL/L,镀液温度为 75 ℃时,可获得均匀、致密且与铜粉表面结合良好的镀锡层。

关键词: 浸镀锡; 甲基磺酸锡; 铜粉; 镀层

中图分类号: TQ153.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2014)02-0089-06

Technology of Immersion Tin Plating onto Copper Powder in Methyl Sulfonate System

LIN Yan, JIANG Xiao-yong, WEI Zhe-liang

(College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

ABSTRACT: **Objective** To solve the immersion tin problems existing in chloride system and sulfate system. **Methods** This paper used tin methane sulfonate as main salt and thiourea as complexing agent to immerse tin plating onto copper powder. And the influences of thiourea concentration, tin ion concentration, methyl sulfonic acid addition and bath temperature on the microstructure of tin plating were studied. **Results** The results showed that the tin ions could form complex ions with thiourea, which would reduce the equilibrium electrode potential of tin ions, and make it possible for immersion tin plating to immerse onto copper powder in methyl sulfonate system. **Conclusion** When the tin ion concentration was 0.15 mol/L, the thiourea concentration was 0.80 mol/L, the concentration of methane sulfonic acid was 50 mL/L, the solution temperature was 75 ℃, a uniform and dense tin coating with a good combination with copper surface could be obtained.

KEY WORDS: immersion tin; methyl sulfonate system; copper powder; plating

铜粉浸镀锡既可保持其优良特性,又可提高其抗氧化性能,且与镀银相比,成本较低^[1-3],因此,铜粉镀锡在导电填料、工业催化等领域中具有良好的应用前景。目前,关于铜浸镀锡的研究多集中在氯化盐体

系和硫酸盐体系^[4-14],这两种体系对环境的污染较大,所以开发一种更加绿色环保的镀液体系是未来铜粉镀锡的发展趋势。甲基磺酸盐体系相对危害小,并且废水处理较为简单,相对于氯化盐和硫酸盐体系更

收稿日期: 2013-11-14; 修订日期: 2013-12-26

Received: 2013-11-14; Revised: 2013-12-26

基金项目: 福州大学科技发展基金资助项目(2011-XQ-013)

Fund: Supported by the Science and Technology Development Fund Program of Fuzhou University(2011-XQ-013)

作者简介: 林燕(1990—),女,福建仙游人,硕士生,主要研究方向为表面加工与改性。

Biography: LIN Yan(1990—),Female,from Xianyou,Fujian,Master,Research focus: surface processing and modification.

加环保^[15]。此外,不管是在酸性、中性或者碱性溶液中,甲基磺酸盐体系都具有良好的稳定性,且在不同镀液环境下都无明显的水解现象^[16]。已有研究表明^[15-20],铜板在甲基磺酸盐体系下镀锡,所获得的锡镀层更加细腻,性能更加优越。所以,研究铜粉在甲基磺酸盐体系中镀锡具有一定的可行性。

针对铜粉比表面积大,化学活性比铜板、铜箔高的特点,文中旨在探索铜粉在甲基磺酸盐体系中浸镀锡的新工艺及其影响因素,以期获得最佳工艺方案,为今后的工业应用提供依据。

1 试验

1.1 铜粉浸镀锡

称取适量片状铜粉(50 μm 左右),按以下步骤进行预处理:丙酮除油→超声波处理 15 min→10% (体积分数)稀盐酸酸洗→水洗。在水洗过程中,适当加入少量的十二烷基苯磺酸钠,可起到分散作用。

浸镀液以甲基磺酸锡为主盐,硫脲为络合剂,组成如下:锡离子 0.05 ~ 0.25 mol/L,甲基磺酸 30 ~ 70 mL/L,硫脲 0.40 ~ 1.20 mol/L。将预处理好的铜粉置于 55 ~ 95 ℃ 镀液中施镀 5 min,再用蒸馏水清洗 2 次,干燥保存。

1.2 测试表征

采用 SZ61 体视显微镜(日本 OLYMPUS 公司)和 JSM-6700F 型场发射扫描电子显微镜(日本 JEOL 公司)观察镀锡铜粉的表面形貌。

2 结果与讨论

2.1 锡离子浓度对锡镀层的影响

在硫脲浓度为 0.80 mol/L,甲基磺酸加入量为 50 mL/L,镀液温度为 75 ℃ 的条件下,改变锡离子浓度分别为 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 mol/L,对铜粉浸镀 5 min,镀层在体视显微镜下的形貌如图 1 所示。从图 1 可以看出,在一定范围内,随着锡离子浓度的增加,铜粉表面沉积的锡不断增多,经过预处理呈现出紫红色的铜粉表面逐渐被银白色的锡镀层覆盖。锡离子浓度过低时,所沉积的锡镀层不足以覆盖所有的铜粉,产生发灰、发黑现象,如图 1a 和 b 所示;锡离子浓度为 0.15 mol/L 时,则呈现出镀覆均匀的良好

效果,如图 1c 所示;锡离子浓度较高时,铜粉表面易被氧化,出现发黑现象,镀覆效果下降,如图 1d 和 e 所示。

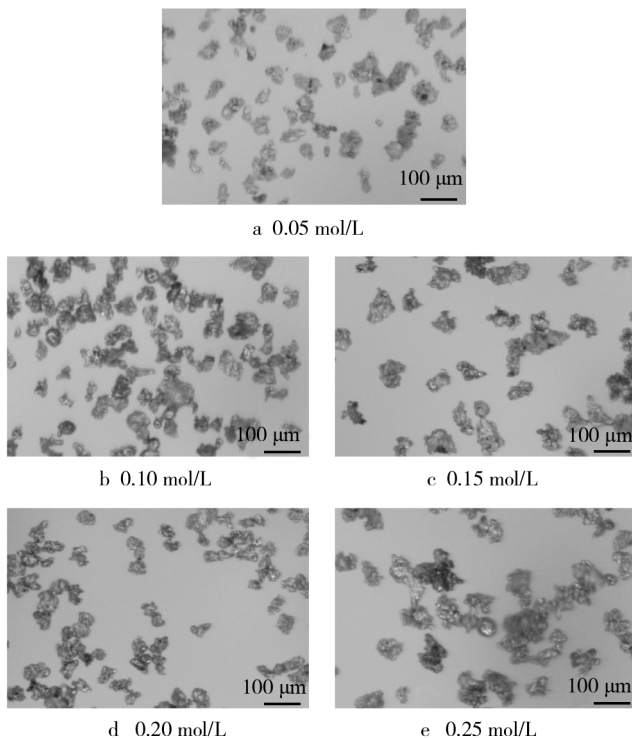
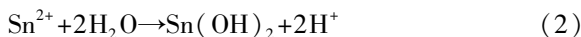
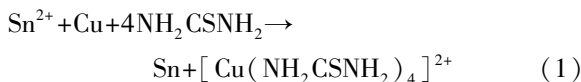


图1 锡离子浓度对铜粉表面镀锡层的影响

Fig.1 Effects of different tin ion concentration on the surface of tin plated copper powder

铜粉置换镀锡反应如式(1)所示。当甲基磺酸锡所提供的锡离子浓度较低时,反应沉积的锡较少,锡层不足以完全覆盖铜粉表面,并且此时镀液中所形成的络合离子 $[\text{Cu}(\text{NH}_2\text{CSNH}_2)_4]^{2+}$ 的浓度偏低,电化学极化作用较弱,结晶过电位较小,因此镀层覆盖效果较差。随着锡离子浓度的增加,镀液中络合离子 $[\text{Cu}(\text{NH}_2\text{CSNH}_2)_4]^{2+}$ 的浓度也随之增大,结晶过电位升高,镀层覆盖度提高。当锡离子浓度超过 0.15 mol/L 时,过量的锡离子有可能发生如(2)式所示的水解或氧化反应,从而导致镀液的稳定性下降,使得镀覆效果降低。分析认为,在本试验的条件下,锡离子浓度取 0.15 mol/L 为宜。



2.2 硫脲浓度对锡镀层的影响

在锡离子浓度为 0.15 mol/L,甲基磺酸加入量为 50 mL/L,镀液温度为 75 ℃ 的条件下,改变硫脲浓度

分别为 0.40,0.60,0.80,1.00,1.20 mol/L,对铜粉浸镀 5 min,镀层在体视显微镜下的形貌如图 2 所示。当硫脲浓度较低时,铜粉上的锡层镀覆不完全,在体视显微镜下出现了铜粉原有的紫红色及反应杂质的蓝色;随着硫脲浓度的增加,镀层覆盖逐渐完全,呈现出锡镀层的金属光泽,如图 2b 和 c 所示;硫脲浓度增加至超过 0.8 mol/L 时,镀层反而出现变暗的迹象,如图 2d 和 e 所示。

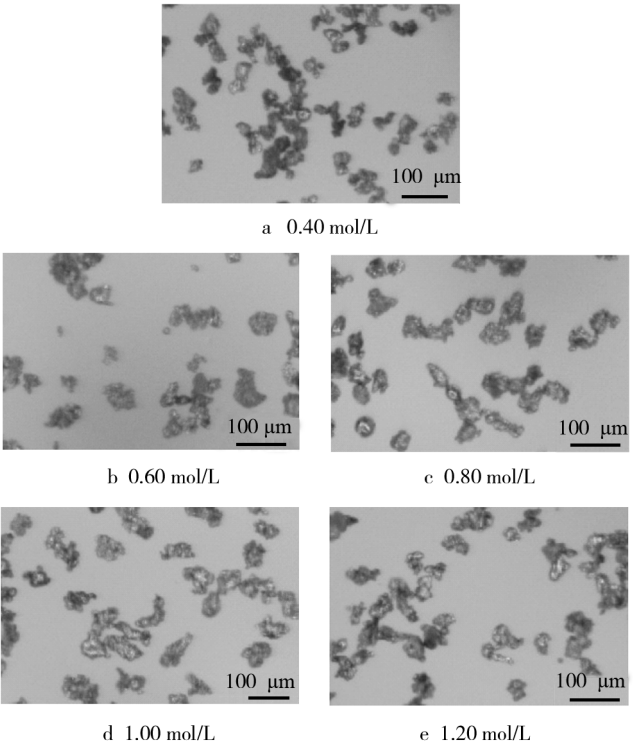


图 2 硫脲浓度对铜粉表面镀锡层的影响
Fig.2 Effects of different concentration of thiourea on the surface of tin plated copper powder

出现上述现象与硫脲在镀锡反应中所起的作用有关。在酸性环境下,Cu²⁺/Cu 的标准电极电位是 +0.337 V,而 Sn²⁺/Sn 的标准电极电位为 -0.136 V,因此直接在铜粉上置换镀锡是不可能的。要实现这一浸镀锡的过程,必须加入络合剂(即电位调整剂)。由于硫脲能够与 Cu²⁺和 Cu⁺形成稳定的络合离子 [Cu(NH₂CSNH₂)₄]²⁺和 [Cu(NH₂CSNH₂)₄]⁺,且 Cu(NH₂CSNH₂)₄²⁺/Cu 和 [Cu(NH₂CSNH₂)₄]⁺/Cu 的近似平衡电极电位分别是 -0.2025 V 和 -0.5761 V,Sn²⁺/Sn 的平衡电极电位为 -0.1637 V,这就为铜粉浸镀锡提供了可能^[21],因此以硫脲作为络合剂可以实现在铜粉上浸镀锡。

硫脲浓度增加,镀液中络合离子 [Cu(NH₂CSNH₂)₄]²⁺

的浓度随之增大,电化学极化作用增强,结晶过电位升高,镀层覆盖度提高;但当硫脲过多,超过 0.8 mol/L 时,反应的过电位过高,导致铜电极表面附近有三维晶核的形成和长大,强烈的浓差极化又使晶核沿垂直于电极表面的方向生长,造成镀层表面粗糙,暗淡无光。在本试验条件下,硫脲浓度取 0.80 mol/L 为宜。

2.3 甲基磺酸加入量对锡镀层的影响

在锡离子浓度为 0.15 mol/L,硫脲浓度为 0.80 mol/L,镀液温度为 55 ℃ 的条件下,改变甲基磺酸加入量分别为 30,40,50,60,70 mL/L,对铜粉浸镀 5 min,镀层在体视显微镜下的形貌如图 3 所示。从图 3a 可以看出,当甲基磺酸加入量较少时,甲基磺酸锡易产生氧化,使得镀覆效果不明显,体视显微镜下能看到呈紫红色的裸露铜基材;随着甲基磺酸加入量的增多,镀层开始镀覆完全,镀层质量有所提高,如图 3b 所示;当甲基磺酸加入量达到 50 mL/L 时,镀层较为光滑,有金属光泽,如图 3c 所示;继续增加甲基磺酸的加入量,效果并无明显提高,如图 3d 和 e 所示。

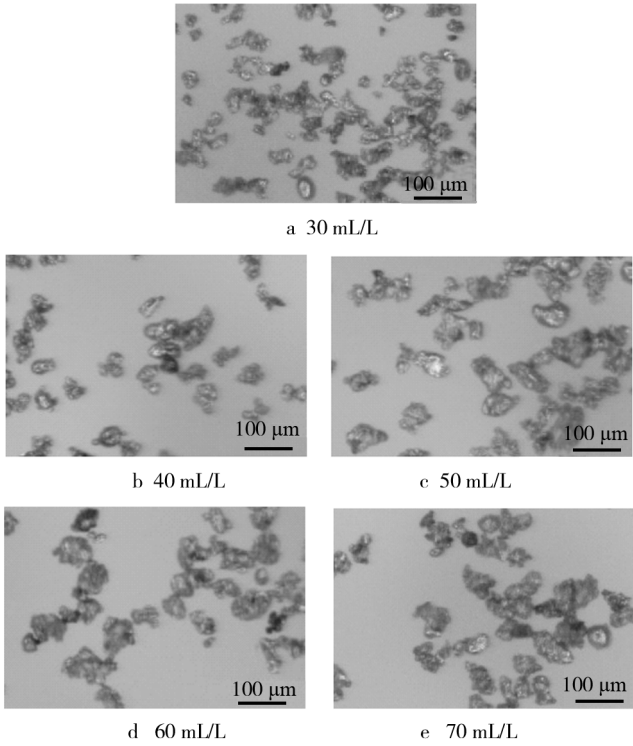


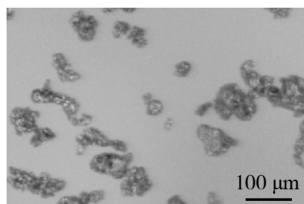
图 3 甲基磺酸加入量对铜粉表面镀锡层的影响
Fig.3 Effects of different amount of added methyl sulfonate on the surface of tin plated copper powder

从上述试验现象可以看出,在一定范围内,甲基磺酸的加入对镀锡层有一定的促进作用,但整体效果甚微。这是由于甲基磺酸能抑制甲基磺酸锡中的锡

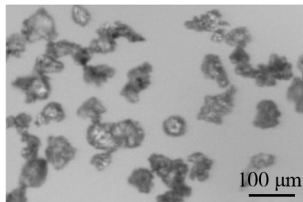
离子发生如(2)式所示的水解反应,从而提高镀液的稳定性和分散能力;但若加入过多的甲基磺酸,镀液的分散能力反而下降,导致镀层厚度不均匀。在本试验条件下,甲基磺酸加入量取 50 mL/L 为宜。

2.4 镀液温度对锡镀层的影响

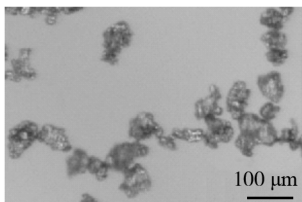
在锡离子浓度为 0.15 mol/L, 硫脲浓度为 0.80 mol/L, 甲基磺酸加入量为 50 mL/L 的条件下, 改变镀液温度分别为 55, 65, 75, 85, 95 °C, 对铜粉浸镀 5 min, 镀层在体视显微镜下的形貌如图 4 所示。从图 4 可以看出, 随着镀液温度升高, 铜粉表面的镀覆效果逐渐提高, 但当温度超过 75 °C 后, 镀覆效果开始变差。这是因为在中低温(55 ~ 75 °C)的条件下, 随着温度的升高, 镀液中离子的扩散速率增大, 浓差极化减小, 因此镀覆效果较好, 如图 4a, b 和 c 所示。温度较高时, 过快的反应速率会导致瞬间形核速率加快, 最终使得镀层表面晶粒粗大, 镀层表面变得粗糙无光, 如图 4d 和 e 所示。此外, 温度较高时, 基材铜粉与锡镀层也会因扩散作用而相互深入, 在这种情况下, 铜粉表面会形成铜锡合金相^[22], 而且镀液容易被氧化导致变质, 使得镀覆效果下降。在本试验条件下, 对微米级铜粉而言, 镀液温度选择 75 °C 较合适。



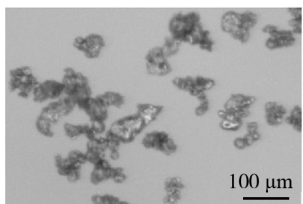
a 55 °C



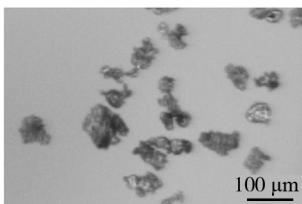
b 65 °C



c 75 °C



d 85 °C



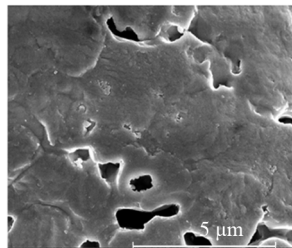
e 95 °C

图4 镀液温度对铜粉表面镀锡层的影响

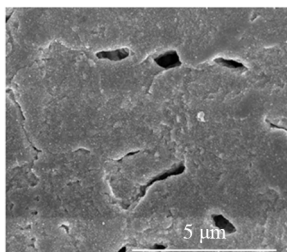
Fig.4 Effects of different bath temperature on the surface of tin plated copper powder

2.5 甲基磺酸盐体系浸镀锡工艺的确定

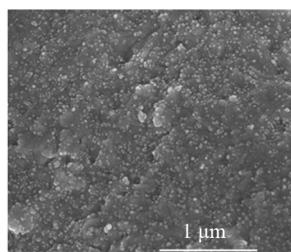
根据前面的试验结果可以看出, 镀液的主盐浓度、络合剂浓度、温度是甲基磺酸盐体系浸镀锡的主要影响因素。在前面研究得出的最优工艺条件下, 即锡离子浓度为 0.15 mol/L, 硫脲浓度为 0.80 mol/L, 甲基磺酸加入量为 50 mL/L, 镀液温度为 75 °C, 对铜粉进行浸镀锡, 并在扫描电镜下观察铜粉的表面形貌, 如图 5 所示。



a 原始铜粉



b 镀锡铜粉



c 镀锡铜粉局部放大

图5 铜粉的扫描电镜照片

Fig.5 SEM images of copper powder under different conditions

从图 5a 可以看出, 未经预处理的铜粉包裹了有有机薄膜保护层, 表面较为光滑平整。铜粉经过预处理后, 表面就会变得较为粗糙, 有利于镀覆金属镀层, 在此粗糙的铜粉表面镀锡, 由于实验中沉积的镀锡层较薄, 因此镀锡层表面仍较为粗糙, 如图 5b 所示。提高扫描电镜的放大倍数可以看到, 锡镀层以均匀颗粒状的形式点缀分布在铜粉表面, 如图 5c 所示。

3 结论

1) 以甲基磺酸锡为主盐, 硫脲为络合剂时, 镀液的锡离子主要以复杂络合离子 $[\text{Cu}(\text{NH}_2\text{CSNH}_2)_4]^{2+}$ 形式存在, 降低了锡离子的平衡电极电位, 使铜粉表面浸镀锡成为可能。

2) 随着镀液中锡离子浓度和硫脲浓度的增加, 镀层覆盖度提高, 但若过量, 反而会使镀层粗化, 镀液稳定性和分散性变差。添加适量的甲基磺酸, 可抑制

甲基磺酸锡中锡离子发生水解反应,在一定程度上提高镀液的稳定性和分散能力。适当提高镀液温度,可使镀液中各种离子的扩散速率增大,浓差极化作用减小,镀层质量提高。

3) 采用甲基磺酸盐体系,当锡离子浓度为0.15 mol/L,硫脲浓度为0.80 mol/L,甲基磺酸加入量为50 mL/L,镀液温度为75℃时,可获得均匀、致密且与铜粉表面结合良好的镀锡层,所获锡层以均匀颗粒状的形式点缀分布在铜粉表面。

参考文献

- [1] 常英,刘彦军. 片状镀银铜粉的制备及性能表征[J]. 化工新型材料,2005,33(4):56—58.
CHANG Ying, LIU Yan-jun. The Preparation and Characterization of Flake Silver-coated Copper Powder [J]. New Chemical Materials, 2005, 33(4): 56—58.
- [2] 刘志杰,赵斌,张宗涛,等. 超细核壳铜银双金属粉末的抗氧化性能研究[J]. 无机化学学报,1997,13(1):32—37.
LIU Zhi-jie, ZHAO Bin, ZHANG Zong-tao, et al. Oxidation Resistance of Ultrafine Cu-Ag Bimetallic Powders [J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 1997, 13(1): 32—37.
- [3] 李雅丽,付新,党蕊. 乙二醇介质中铜微粉表面化学镀银的研究[J]. 表面技术,2013,42(3):60—62.
LI Ya-li, FU Xin, DANG Rui. Study on the Electroless Silver Plating on Copper Powders in Ethylene Glycol Medium [J]. Surface Technology, 2013, 42(3): 60—62.
- [4] 牟国俊,赵斌. 纳米核壳式铜-锡双金属粉的制备及性能研究[J]. 无机化学学报,2004,20(9):1055—1060.
MU Guo-Jun, ZHAO Bin. Preparation and Characterization of Core-shell Cu-Sn Bimetallic Nanoparticles [J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2004, 20(9): 1055—1060.
- [5] 陈步明,郭忠诚. 片状铜粉化学镀锡的工艺研究[J]. 电镀与精饰,2006,28(5):8—11.
CHEN Bu-ming, GUO Zhong-cheng. A Study on Process of Electroless Tin Plating on Flake Copper Powder [J]. Plating and Finishing, 2006, 28(5): 8—11.
- [6] 王尚军,方晓祖. 超细铜粉的化学镀锡及其抗氧化性能研究[J]. 电子元件与材料,2008,27(10):58—61.
WANG Shang-jun, FANG Xiao-zu. Study on Electroless Tin Plating and Antioxidation Properties of Ultrafine Copper Powder [J]. Electronic Components and Materials, 2008, 27(10): 58—61.
- [7] 郭忠诚,徐瑞东,朱晓云,等. 铜基上化学镀锡[J]. 电镀与环保,2000,20(5):22—23.
GUO Zhong-cheng, XU Rui-dong, ZHU Xiao-yun, et al. Electroless Sn on Copper Substrate [J]. Electroplating & Pollution Control, 2000, 20(5): 22—23.
- [8] 王星星,龙伟民,吕登峰,等. 工艺条件对 BAg50CuZn 钎料表面电镀锡溶液电阻的影响[J]. 表面技术,2013,42(4):76—78.
WANG Xing-xing, LONG Wei-min, LYU Deng-feng, et al. Effect of Technological Condition on Resistance of Electroplating Tin Solution Based on BAg50CuZn Brazing Filler Metal [J]. Surface Technology, 2013, 42(4): 76—78.
- [9] 方景礼. 电镀配合物——理论与应用[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
FANG Jing-li. Theory & Application of Coordination Compounds in Electroplating [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [10] 史建卫. 无铅化 PCB 表面材料及工艺特点[J]. 电子工艺技术,2011,32(5):306—312.
SHI Jian-wei. Material and Technology Characters of Lead-free PCB Finish [J]. Electronics Process Technology, 2011, 32(5): 306—312.
- [11] 徐瑞东,郭忠诚,靳跃华. 铜基上化学镀锡新工艺初探[J]. 电镀与涂饰,2001,20(4):26—29.
XU Rui-dong, GUO Zhong-cheng, JIN Yue-hua. Preliminary Investigation of Electroless Tin Plating on Copper Substrate [J]. Electroplating & Finishing, 2001, 20(4): 26—29.
- [12] 孙武. PCB 上化学镀锡工艺的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
SUN Wu. The Research of Electroless Tin Plating on PCB [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [13] 周栋,王瑀,丁毅,等. 黄铜拉链化学镀锡工艺研究[J]. 表面技术,2010,39(2):58—60.
ZHOU Dong, WANG Yu, DING Yi, et al. Process Technique of Electroless Tin Plating on Brass Zipper [J]. Surface Technology, 2010, 39(2): 58—60.
- [14] 王星星,龙伟民,裴贇,等. BAg45CuZn 钎料表面化学镀锡的研究[J]. 表面技术,2013,42(3):56—58.
WANG Xing-xing, LONG Wei-min, PEI Yin-yin, et al. Research of Electroless Tin Plating on BAg45CuZn Brazing Filler [J]. Surface Technology, 2013, 42(3): 56—58.
- [15] 王明杰,刘雪华. 甲基磺酸盐体系中的铜箔缎面镀锡[J]. 福建工程学院学报,2009,7(1):64—66.
WANG Ming-jie, LIU Xue-hua. Satin Finishing Tin Coating on the Copper Foil in the MSA Electroplate Bath System [J]. Journal of Fujian University of Technology, 2009, 7(1): 64—66.
- [16] BALAJI R, MALATHY Pushpavanam. 甲基磺酸在电镀相关金属精饰领域的应用[J]. 罗慧梅,译. 电镀与涂饰,2004,23(5):40—45.

- BALAJI R, MALATHY Pushpavanam. Methanesulphonic Acid in Electroplating Related Metal Finishing Industries [J]. LUO Hui-mei, Translate. Electroplating & Finishing, 2004, 23(5): 40—45.
- [17] 刘雪华,唐电. 铜浸镀锡层的宏、微观形貌形成过程[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(19): 19—23.
- LIU Xue-hua, TANG Dian. Formation Process of the Micro-cosmic and Macroscopical Morphology of Immersion Tin Plating onto Copper Substrate[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(19): 19—23.
- [18] 陈春成. 铜基上化学镀锡工艺研究[J]. 电镀与精饰, 2002, 24(5): 20—22.
- CHEN Chun-cheng. An Investigation of Electroless Tin Plating on Copper Substrate[J]. Plating and Finishing, 2002, 24(5): 20—22.
- [19] 方景礼. 印制板的表面终饰工艺系列讲座——第二讲超薄型超高密度挠性印制板的置换镀锡工艺[J]. 电镀与涂饰, 2004, 23(1): 36—39.
- FANG Jing-li. Lecture Series on Final Surface Finishing Process for PCB-Ⅱ Process of Replacement Sn Plating for Super Thin Flexible PCB with Super Density [J]. Electroplating & Finishing, 2004, 23(1): 36—39.
- [20] 方景礼. 印制板的表面终饰工艺系列讲座——第三讲TI-1 新型印制板用置换镀锡工艺[J]. 电镀与涂饰, 2004, 23(2): 36—42.
- FANG Jing-li. Lecture Series on Final Surface Finishing Process for PCB-Ⅲ A New Process of Replacement Sn Plating for PCB with TI-1 Additive[J]. Electroplating & Finishing, 2004, 23(2): 36—42.
- [21] 赵杰, 李宁, 傅石友. 化学镀锡反应历程的研究进展[J]. 电镀与涂饰, 2006, 25(8): 44—47.
- ZHAO Jie, LI Ning, FU Shi-you. Research Progress of Electroless Tin Plating Reaction Mechanism [J]. Electroplating & Finishing, 2006, 25(8): 44—47.
- [22] 余凤斌, 刘贞, 陈瑛. 化学镀法制备铜银双金属粉及其抗氧化性研究[J]. 电工材料, 2010(1): 23—25.
- YU Feng-bin, LIU Zhen, CHEN Ying. Preparation of Cu-Ag Bimetallic Powder by Electroless Plating and Its Oxidation Resistance Research [J]. Electrical Engineering Materials, 2010(1): 23—25.
-
- (上接第74页)
- [13] 宋仁国, 曾梅光. 7050 铝合金晶界偏析与应力腐蚀、腐蚀疲劳行为的研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1996, 16(1): 1—7.
- SONG Ren-guo, ZENG Mei-guang. Investigation of Relation between Grain Boundary Segregation and Behavior of Stress Corrosion and Corrosion Fatigue in 7050 Aluminum Alloy [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protect, 1996, 16(1): 1—7.
- [14] 余洪斌, 刘道新. 3 种表面处理对 2E12-T3 铝合金晶间腐蚀和剥离腐蚀行为的影响[J]. 材料保护, 2012, 45(7): 22—24.
- YU Hong-bin, LIU Dao-xin. Effect of Surface Treatment on Intergranular Corrosion Behavior and Exfoliation Corrosion Behavior of 2E12-T3 Aluminum Alloy [J]. Journal of Materials Protection, 2012, 45(7): 22—24.
- [15] 苏景新, 张昭. 铝合金的晶间腐蚀与剥蚀[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2005, 25(3): 187—191.
- SU Jing-xin, ZHANG Zhao. Review on the Intergranular Corrosion and Exfoliation Corrosion of Aluminum Alloys [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protect, 2005, 25(3): 187—191.
- [16] 张圣麟. 铝合金表面处理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- ZHANG Sheng-lin. Surface Treatment Technique of Aluminum Alloys [M]. Beijing: Chemical Industry Publishing, 2009.
- [17] 朱祖芳. 铝合金阳极氧化与表面处理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- ZHU Zu-fang. Anodizing and Surface Treatment Technique of Aluminum Alloys [M]. Beijing: Chemical Industry Publishing, 2004.
- [18] 罗来正, 肖勇, 陈智君, 等. 航空用 2D12 铝合金在海洋大气环境中的腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(4): 39—41.
- LUO Lai-zheng, XIAO Yong, CHEN Zhi-jun, et al. Research on Corrosion Behavior of 2D12 Aluminum Alloy for Aircraft in Marine Atmospheric Environment [J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(4): 39—41.
- [19] 叶彬, 朱做涛, 穆志韬. 铝合金材料腐蚀形貌及裂纹扩展分析[J]. 装备环境工程, 2011, 8(4): 54—58.
- YE Bin, ZHU Zuo-tao, MU Zhi-tao. Corrosion Morphology and Crack Growth Analysis of Aluminum Alloy Material [J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(4): 54—58.
- [20] 李旭东, 朱武峰, 穆志韬. LD2 铝合金腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(1): 8—12.
- LI Xu-dong, ZHU Wu-feng, MU Zhi-tao. Corrosion Behavior Investigation of LD2 Aluminum Alloy [J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(1): 8—12.