

钯活化对有机封装基板上铜/镍界面空洞和焊接性的影响

陆然, 王国辉*, 邓智成, 钟伟杰, 柯海波

广州广芯封装基板有限公司, 广州 510700

摘要: [目的] 研究化学镀镍钯金(ENEPIG)制程中 Cu/Ni 界面空洞的形成机理, 以及钯活化对薄镍钯金板焊接性能的影响。[方法] 对比了氯化钯与硫酸钯两种活化体系在不同钯离子浓度和活化时间下对 Cu/Ni 界面空洞的影响; 采用透射电子显微镜(TEM)分析 Cu/Ni 界面空洞的微观结构与元素分布; 通过三维 X 射线显微镜、扫描电子显微镜(SEM)及能谱仪(EDS)对焊接后样品的截面形貌与元素组成进行表征, 结合焊接过程气泡产生机理, 探讨界面空洞与焊接空洞的关联。[结果] 两种活化体系下, 界面空洞的数量和尺寸均随钯离子浓度和活化时间的增加而增大, 但氯化钯体系较硫酸钯体系产生更多、更大的 Cu/Ni 界面空洞, 空洞长径可超过 1 μm 。TEM 分析表明, 氯化钯体系产生的空洞内存在约 20 nm 厚的局部化学镀镍层, 导致空洞封堵并残留水汽。焊接后, 氯化钯体系板件焊点内部出现明显焊接空洞, 主要分布于金属间化合物(IMC)层上方, 而 IMC 层下方存在大量 Cu/Ni 界面空洞。硫酸钯体系板件未见明显焊接空洞。[结论] 氯化钯体系因钯活性高、氯离子具渗透性, 易在钯活化阶段形成更严重的 Cu/Ni 界面空洞, 空洞内残留的水汽在焊接过程中汽化膨胀, 是导致薄镍 ENEPIG 板件形成焊接空洞的关键因素。选用硫酸钯活化体系可有效降低界面空洞程度, 提升焊接可靠性。本研究为有机封装基板薄镍钯金制程中活化体系的选择与工艺优化提供了理论依据。

关键词: 化学镀镍钯金; 活化; 氯化钯; 硫酸钯; 铜/镍界面空洞; 焊接性

中图分类号: TQ153.2

文献标志码: A

文章编号: 1004-227X(2026)04-0017-08

Effect of palladium activation on Cu/Ni interfacial voids and solderability of organic packaging substrate

LU Ran, WANG Guohui *, DENG Zhicheng, ZHONG Weijie, KE Haibo

Greatch Substrates Co., Ltd., Guangzhou 510700, China

Abstract: [Objective] To study the formation mechanism of Cu/Ni interfacial voids during electroless nickel/palladium/gold plating (ENEPIG) process and the effect of palladium activation on solderability of thin-nickel ENEPIG boards. [Method] The effects of two activation systems, i.e. palladium chloride and palladium sulfate, on Cu/Ni interfacial voids were compared under different palladium ion concentrations and activation time. Transmission electron microscopy (TEM) was employed to analyze the microstructure and elemental distribution of Cu/Ni interfacial voids. The cross-sectional morphology and elemental composition of soldered samples were characterized using three-dimensional X-ray microscopy, scanning electron microscopy (SEM), and energy-dispersive spectroscopy (EDS). The relationship between interfacial voids and soldering voids was explored in combination with the mechanism of gas evolution during soldering. [Result] For both activation systems, the number and size of interfacial voids increased with the increasing palladium ion concentration and activation time. However, the palladium chloride system produced more and larger Cu/Ni interfacial voids than the palladium sulfate system, with void lengths exceeding 1 μm . TEM analysis revealed that voids generated by the palladium chloride system has a localized electroless nickel layer approximately 20 nm thick, leading to void sealing and residual moisture. After soldering, obvious soldering voids were observed inside the solder joints of boards treated with the palladium chloride system, primarily located above the intermetallic compound (IMC) layer, while a large number of Cu/Ni interfacial voids existed beneath the IMC layer. No significant soldering voids were found in boards treated with the palladium sulfate system. [Conclusion] Owing to the high activity of palladium and the permeability of chloride ions, the palladium chloride system is prone to forming severe Cu/Ni interfacial voids during the activation stage. Residual moisture trapped in these voids expands rapidly during soldering, which is a key factor leading to soldering voids in thin-nickel ENEPIG boards. The use of a palladium sulfate activation system can effectively reduce the extent of interfacial voids and improve soldering reliability. This study provides a theoretical basis for the selection and process optimization of activation systems in thin-nickel ENEPIG manufacturing for organic packaging substrates.

收稿日期: 2025-04-07 **修回日期:** 2026-03-17

第一作者: 陆然 (1982-), 男, 高级工程师, 研究方向为电镀及化学镀铜和电镀及化学镀表面处理。

通信作者: 王国辉 (1984-), 男, 工程师, 研究方向为电镀及化学镀表面处理。

引用格式: 陆然, 王国辉, 邓智成, 等. 钯活化对有机封装基板上铜/镍界面空洞和焊接性的影响[J]. 电镀与涂饰, 2026, 45 (4): 17-24.

LU R, WANG G H, DENG Z C, et al. Effect of palladium activation on Cu/Ni interfacial voids and solderability of organic packaging substrate [J]. Electroplating & Finishing, 2026, 45 (4): 17-24.

Keywords: electroless nickel/palladium/gold plating; activation; palladium chloride; palladium sulfate; copper/nickel interfacial void; solderability

在有机封装基板领域，表面处理工艺主要包括化学镀镍钯金(ENEPIG)、电镀镍金、有机可焊保护膜(OSP)、化学镀锡等。ENEPIG 工艺凭借其高可靠性、低成本等优势，已成为应用最广泛的表面处理工艺之一^[1]。ENEPIG 工艺通过置换反应或自催化氧化还原反应，在铜表面依次沉积 Ni、Pd 和 Au，赋予产品优良的打线、焊接及耐热性能，同时满足长期存储要求，被认为是最理想的表面处理方案之一^[2]。

在 ENEPIG 制程中，在化学镀镍前需对铜表面进行钯活化处理，以沉积一层具有催化活性的 Pd 层，从而确保后续化学镀镍的顺利进行^[3-4]。目前，常用的钯活化药水主要分为氯化钯和硫酸钯两种体系。如图 1 所示，其基本原理均为 Pd²⁺在酸性条件下与 Cu 发生置换反应(Pd²⁺ + Cu → Pd + Cu²⁺)^[5]，进而在铜表面生成 Pd 层。该置换反应本质上是一个电化学腐蚀过程：铜作为阳极被氧化溶解，而钯作为阴极被沉积。该过程不可避免地导致铜表面发生局部腐蚀，形成微纳米级的 Cu/Ni 界面空洞(如图 2 所示)。长期以来，业界主要通过化学镀较厚的 Ni 层(通常为 3.0 ~ 8.0 μm)来覆盖这些界面空洞，并作为焊接时的有效屏障，因此空洞问题并未凸显。然而随着高频通信技术的发展，信号传输频率不断提高，厚 Ni 层带来的信号趋肤效应损耗已无法满足应用需求。在此背景下，薄镍钯金产品(Ni 层厚度小于 0.5 μm)应运而生，并逐渐成为市场主流。Ni 层的大幅减薄带来了新的可靠性挑战。在采用 SAC305 (Sn-3.0Ag-0.5Cu) 无铅焊料焊接时，亚微米级的超薄 Ni 层难以抵挡高温焊料的侵蚀，焊料中的 Sn 元素会迅速穿透 Ni 层，直接与下方的铜基体接触并反应，生成 Cu-Sn 金属间化合物(IMC)^[6-7]。若穿透区域下方存在 Cu/Ni 界面空洞，空洞内残留的微量药水或水汽将在高温焊接环境中瞬间汽化膨胀，最终在 IMC 层顶部形成大尺寸焊接空洞，严重削弱焊点的力学性能与可靠性。

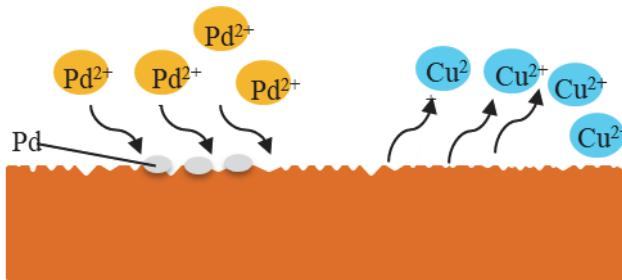


图 1 铜表面钯活化原理

Figure 1 Schematic diagram of palladium activation on copper surface

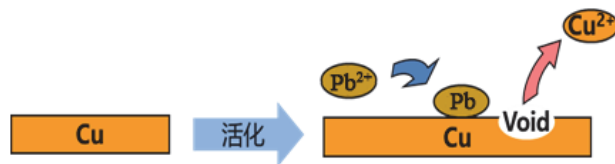


图 2 铜表面钯活化过程产生空洞的原理

Figure 2 Schematic diagram of void formation during palladium activation on copper surface

目前，关于薄镍 ENEPIG 工艺在焊接中的研究主要集中在焊接过程中 IMC 的变化机制及其影响。针对有机封装基板端 ENEPIG 加工时的 Cu/Ni 界面空洞在焊接过程中的变化机制及其对焊接性能影响的研究报道相对较少。为此，本文对比了氯化钯和硫酸钯两种活化体系在不同工艺参数下对 Cu/Ni 界面空洞的影响，并通过焊接试验研究界面空洞对薄镍钯金板焊接性能的影响，旨在为高品质 ENEPIG 制程中活化体系的选择与优化提供理论依据和实践指导。

1 实验

1.1 化学镀镍钯金工艺

选用 513 mm × 623 mm 的 BT 覆铜板为基体加工出图形线路和阻焊开窗，并完成化学镀镍钯金。其完整工艺流程为：除油→微蚀→酸洗→预浸→钯活化→化学镀镍(0.3 ~ 0.5 μm)→化学镀钯(0.1 ~ 0.2 μm)→化学镀金(0.1 ~ 0.2 μm)。

1.2 实验方法

1) 根据镍钯金的工艺流程,分别在钯活化前、钯活化后及化学镀镍后确认铜面空洞分布情况,以验证钯活化对铜表面腐蚀产生空洞的影响。

2) 分别采用氯化钯与硫酸钯两种体系进行活化处理,主要研究了钯离子浓度和活化时间对 Cu/Ni 界面空洞的影响。

3) 采用钯离子质量浓度均为 30 mg/L 的氯化钯和硫酸钯体系,在 40 °C 下活化处理 120 s,对经过完整 ENIG 流程处理的样品进行 245 °C 漂锡测试,采用 SUB100 场发射扫描电子显微镜 (FESEM) 观察切片形貌,以对比不同活化体系样品的焊接空洞差异。

1.3 测试方法

1.3.1 空洞分布

取氯化钯体系活化前后样品、化学镀镍后样品,以及不同体系活化样品,采用 SUB100 场发射扫描电子显微镜对其研磨切片进行形貌分析,并统计各自的空洞数量和尺寸。

1.3.2 空洞形貌和元素组成

取 40 °C 氯化钯活化 180 s 样品切片,采用 Talos F200X 透射电子显微镜 (TEM) 对空洞缺陷进行形貌和元素分布表征。

1.3.3 焊接性能测试

取经过完整 ENIG 流程处理的样品,清除板面异物后,浸入助焊剂 10 s,取出后垂直悬挂静置 20 s,直至无助焊剂滴落。清除锡炉表面锡渣后,将样品与水平面呈 45° 浸入 245 °C 的无铅锡炉中保持 5 s,取出后水洗、风干,完成焊接过程。采用 YXLON Cheetah EVO 三维 X 射线显微镜,对焊接后的样品表面进行视场观察 (放大 50 倍);采用扫描电镜与 XFlash 6/60 X 射线能谱仪 (EDS) 对焊接后样品进行形貌和元素组成分析。

2 结果与讨论

2.1 化学镀镍钯金 Cu/Ni 界面空洞成因分析

图 3 所示为氯化钯体系活化前、活化后及其化学镀镍后样品的截面形貌。在氯化钯活化前,铜面未发现空洞,活化后铜面产生尺寸约为 500 nm 的空洞,化学镀镍后空洞尺寸和数量无明显变化。说明在化学镀镍钯金的工艺流程中,铜界面空洞为置换型钯活化所致。

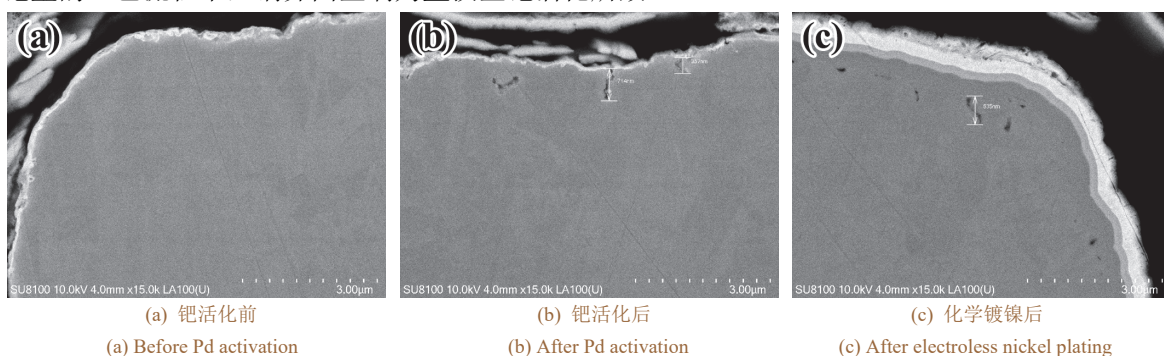


图 3 钯活化前后及化学镀镍后 Cu/Ni 界面空洞分布情况

Figure 3 Distribution of voids at Cu/Ni interface before and after Pd activation, and after electroless nickel plating

进一步采用 TEM 对氯化钯活化体系 ENIG 样品 Cu/Ni 界面的微小空洞进行形貌与元素分析,结果如图 4 所示。空洞内仅存在厚度约 20 nm 的 Ni-P 合金层,无明显的 Pd 层和 Au 层。进一步证明 Cu/Ni 界面空洞在钯活化过程中产生,并且空洞内有镀镍药水流入,完成局部化学镀镍后空洞即被封堵,猜测有化学镀镍药水或水汽残留在空洞中。

2.2 钯活化药水体系和参数对 Cu/Ni 界面空洞影响

2.2.1 活化时间的影响

采用氯化钯活化体系,在 40 °C 下对板件活化不同时间并化学镀镍钯金,样品界面形貌如图 5 所示。

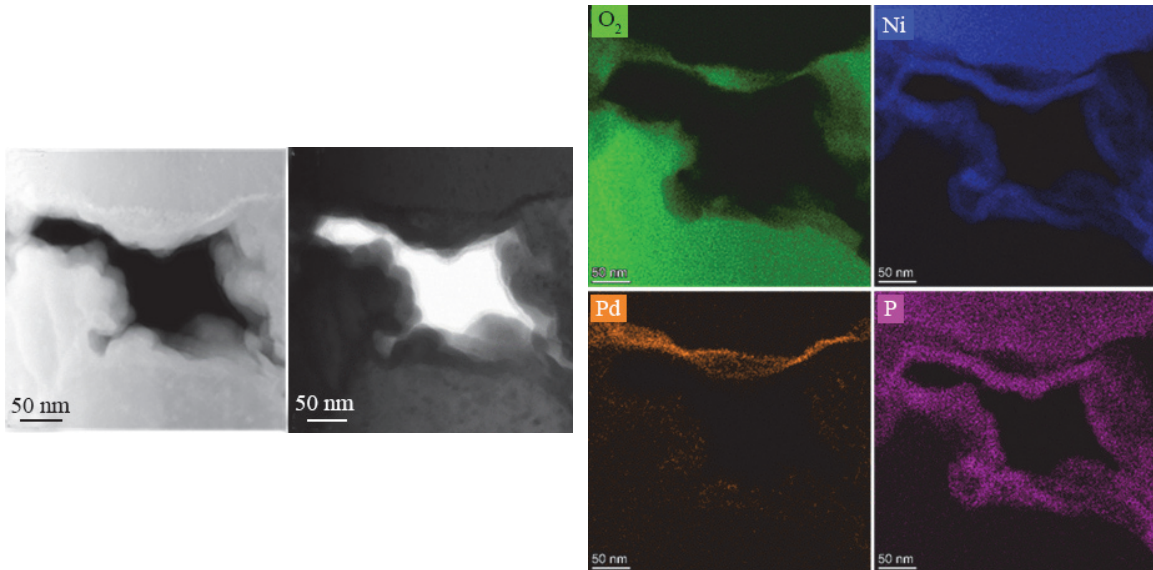


图4 氯化钯活化体系 Cu/Ni 界面空洞微区 TEM 形貌和元素分布

Figure 4 TEM morphologies and corresponding EDS elemental mapping of void at Cu/Ni interface generated during activation with palladium chloride system

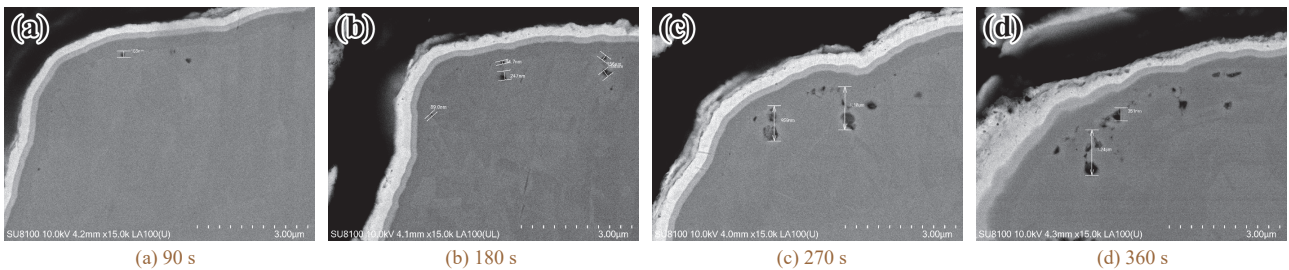


图5 采用氯化钯体系活化不同时间的板件 Cu/Ni 界面空洞 SEM 图像

Figure 5 SEM images of voids at Cu/Ni interface in specimens activated with palladium chloride system for different time

从图 5 可知，板件 Cu/Ni 界面空洞的严重程度与活化时间呈正相关。活化时间为 90 s 时，空洞尺寸与数量都保持在较低水平，空洞长径小于 500 nm。当活化时间大于 270 s 时，Cu/Ni 界面空洞数量较多，排列更紧密，部分空洞甚至连接为一体，其长径超过 900 nm。采用扫描电镜在 15 000 倍下统计不同切片样品 Cu/Ni 界面的空洞尺寸和数量，结果如图 6 所示。随着活化时间延长，空洞数量和尺寸总体增大。

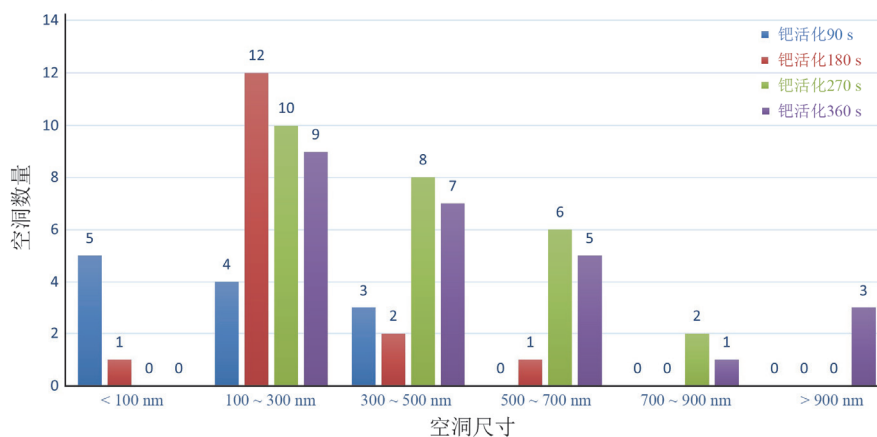


图6 采用氯化钯体系活化不同时间的板件 Cu/Ni 界面空洞数量和尺寸分布

Figure 6 Distribution of quantity and size of voids at Cu/Ni interface in specimens activated with palladium chloride system for different time

采用硫酸钯活化体系，在温度 40 °C 下对板件活化不同时间并化学镀镍钯金。如图 7 所示，板件 Cu/Ni 界面空洞的尺寸和数量较氯化钯活化时明显减小。活化时间为 90 s 时，Cu/Ni 界面基本无空洞。当活化时间不少于 270 s 时，镀金手指的拐角位置出现轻微空洞，但最大尺寸小于 500 nm。统计不同切片样品 Cu/Ni 界面空洞尺寸和数量分布，结果如图 8 所示。对比图 8 与图 6 可知，活化时间相同时，硫酸钯体系活化样品 Cu/Ni 界面的空洞数量少于氯化钯体系，并且尺寸更小。

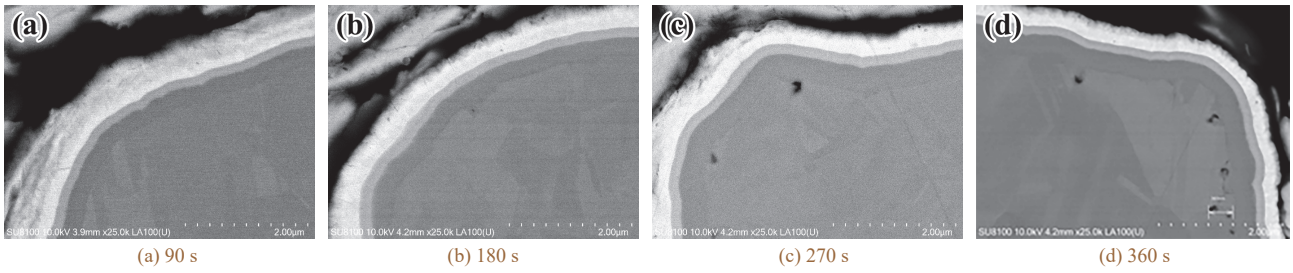


图7 采用硫酸钯体系活化不同时间的板件 Cu/Ni 界面空洞 SEM 图像

Figure 7 SEM images of voids at Cu/Ni interface in specimens activated with palladium sulfate system for different time

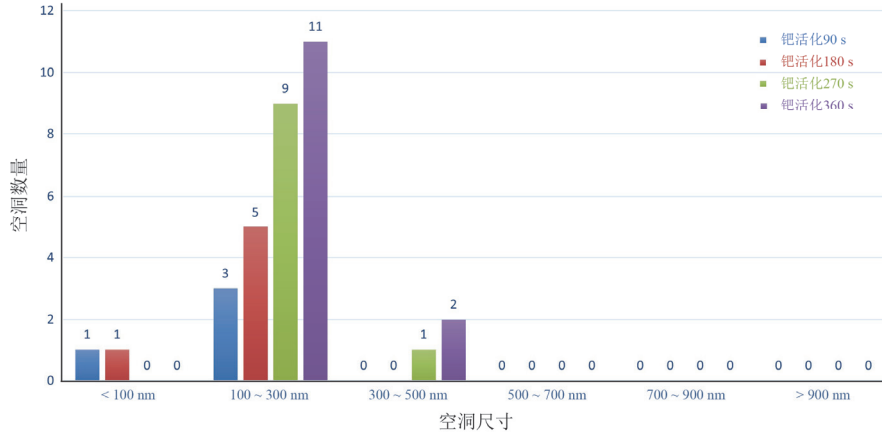
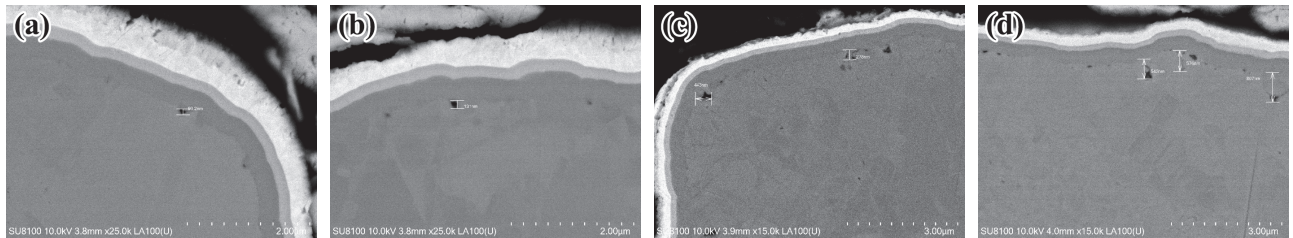


图8 采用硫酸钯体系活化不同时间的板件 Cu/Ni 界面空洞数量和尺寸分布

Figure 8 Distribution of quantity and size of voids at Cu/Ni interface in specimens activated with palladium sulfate system for different time

2.2.2 钯离子浓度的影响

采用不同钯离子浓度的氯化钯和硫酸钯体系，在 40 °C 下对样品活化 120 s 并化学镀镍钯金。如图 9 和图 10 所示，随着钯离子浓度升高，两种体系活化样品 Cu/Ni 界面空洞的尺寸和数量均增大，其中氯化钯体系活化样品的空洞数量和尺寸变化更明显。



(a) 氯化钯, 10 mg/L Pd²⁺ (b) 氯化钯, 30 mg/L Pd²⁺ (c) 硫酸钯, 10 mg/L Pd²⁺ (d) 硫酸钯, 30 mg/L Pd²⁺
(a) Palladium chloride, 10 mg/L Pd²⁺ (b) Palladium chloride, 30 mg/L Pd²⁺ (c) Palladium sulfate, 10 mg/L Pd²⁺ (d) Palladium sulfate, 30 mg/L Pd²⁺

图9 不同钯离子浓度下不同活化体系的 Cu/Ni 界面空洞 SEM 图像

Figure 9 SEM images of voids at Cu/Ni interface in specimens activated with different systems at different palladium ion concentrations

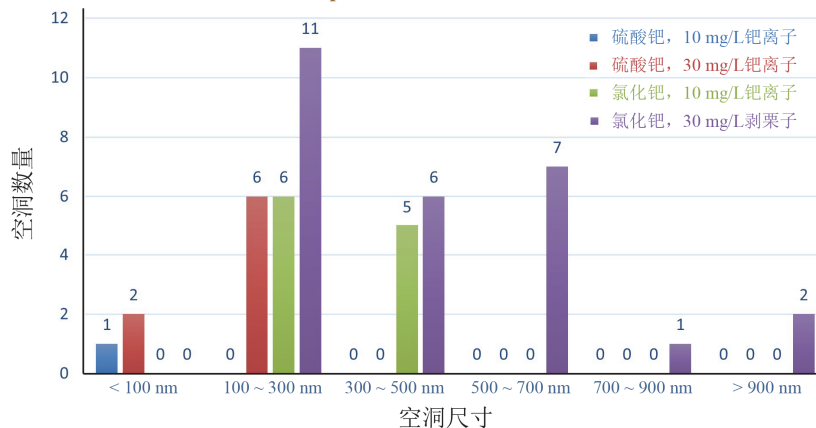


图10 不同钯离子浓度下不同活化体系的 Cu/Ni 界面空洞数量和尺寸分布

Figure 10 Distribution of quantity and size of voids at Cu/Ni interface in specimens activated with different systems at different palladium ion concentrations

综上所述,在相同条件下,氯化钯体系活化较硫酸钯体系活化产生更多、更大的 Cu/Ni 界面空洞;硫酸钯活性较低,置换量少,形成的 Pd 层更致密^[5-6], Cu/Ni 界面空洞更少、更小。

2.3 化学镀镍钯金 Cu/Ni 界面空洞对焊接性能的影响

对氯化钯体系和硫酸钯体系的 Ni/Pd/Au 板件进行锡焊处理后,采用三维 X 射线显微镜观察焊点内部形貌。结果表明,氯化钯体系板件的焊点中存在明显的焊接空洞,如图 11a 所示,焊锡区域呈灰色,而其中的白色椭圆形区域即为焊接空洞。硫酸钯体系的 Ni/Pd/Au 板件焊点内未见明显空洞,如图 11b 所示。

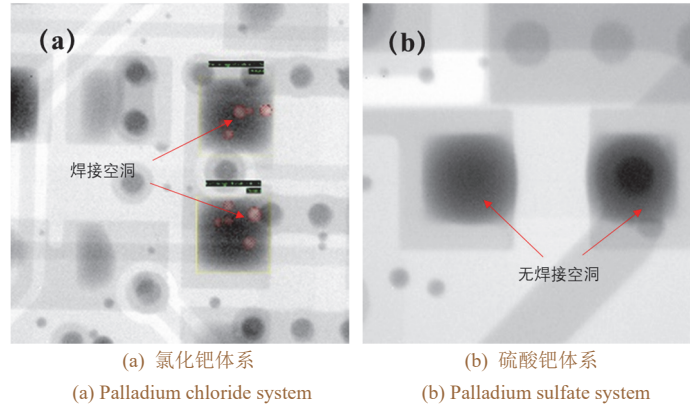


图 11 镍钯金板件锡焊后三维 X 射线显微图像
Figure 11 Three-dimensional X-ray images of ENEPIG boards

进一步对氯化钯活化体系 Ni/Pd/Au 板件的焊接空洞区域进行 SEM 截面观察,结果如图 12 所示。大尺寸焊接空洞主要分布在 IMC 层上方焊料中,IMC 层下方则分布着大量小尺寸空洞。

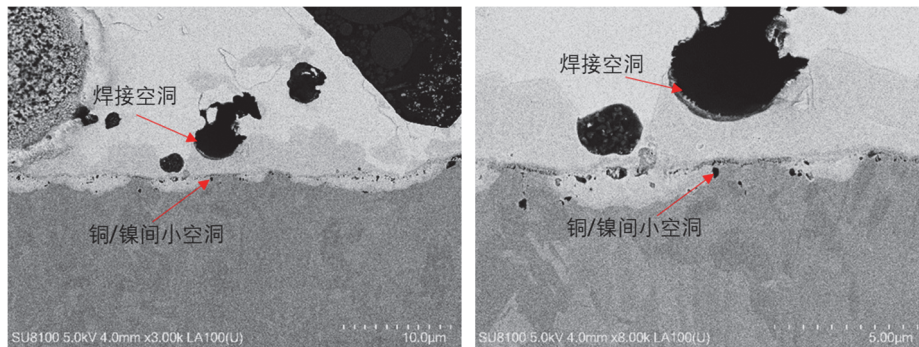


图 12 氯化钯活化体系薄镍钯金板件焊接空洞的截面 SEM 图像
Figure 12 SEM image of welded cavity section of thin ENEPIG boards activated by palladium chloride system

为进一步探究 Cu/Ni 界面空洞与焊接空洞之间的关联,对焊接空洞区域进行 EDS 面扫描分析,结果如图 13 所示。白色区域为焊接 IMC 层,黄色区域为锡焊料,蓝色区域为化学镀 Ni-P 层。部分区域 Ni-P 层缺失,这是因为锡焊时 Ni-P 层已与 SAC305 焊料发生反应,生成含 Cu、Ni、Sn 的 IMC 层^[7-8]。随着 Ni-P 层被消耗,Cu/Ni 界面的空洞暴露并被焊料包裹,形成焊接空洞。

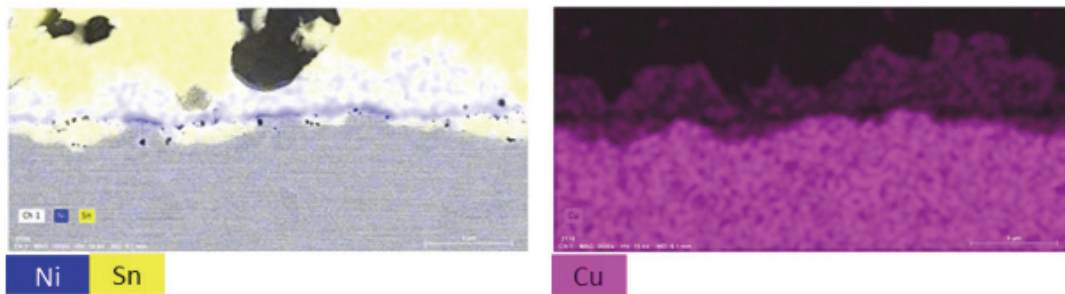


图 13 氯化钯活化体系 Ni/Pd/Au 板件焊接空洞截面的 EDS 元素分布
Figure 13 EDS mapping of cross-sectional welded cavity in thin ENEPIG board activated with palladium chloride system

结合上文对 Cu/Ni 界面空洞的 TEM 分析可知,Cu/Ni 界面空洞有微量水汽残留。这些水汽在焊接过程中的行为可结合焊接空洞的形成机理加以分析。研究表明,焊接空洞的产生主要来源于两方面:一是基板或镀层界面缺陷处残留水汽在高温下汽化膨胀;二是锡膏中助焊剂发生的化学反应,包括与金属氧化物

反应生成水汽($2\text{RCOOH} + \text{SnO} \rightarrow (\text{RCOO})_2\text{Sn} + \text{H}_2\text{O}\uparrow$)、酯化反应生成水汽($\text{RCOOH} + \text{R}'\text{OH} \rightarrow \text{RCOOR}' + \text{H}_2\text{O}\uparrow$)及高温裂解(如图 14 所示)。本研究涉及的薄镍 ENEPIG 板件中, Ni-P 层厚度仅 $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 。焊接过程中, 部分区域 Ni-P 层被焊料完全消耗并形成 IMC 层, 导致下方 Cu/Ni 界面空洞暴露。空洞内残留的水汽随即进入熔融焊料, 在高温下迅速汽化膨胀形成气泡。由于气泡所受浮力通常小于焊料的表面张力, 若无外力作用促使其逸出, 气泡将被截留在凝固的焊点内部, 最终在 IMC 层上方形成大尺寸焊接空洞^[9]。

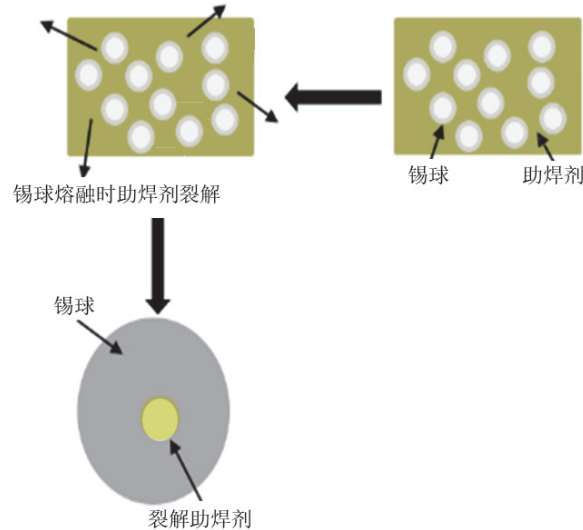


图 14 助焊剂裂解产生焊接空洞机理

Figure 14 Schematic diagram of soldering void formation mechanism due to flux decomposition

综上所述, Cu/Ni 界面空洞中残留的水汽是导致薄镍 ENEPIG 板件在焊接后形成大面积焊接空洞的关键因素。

3 结论

通过对比氯化钯与硫酸钯两种活化体系的 Cu/Ni 界面差异, 根据 TEM 分析结果阐明了化学镀镍钯金 Cu/Ni 界面空洞的产生原因。通过 X 射线检测、SEM 及 EDS 分析了焊接截面组织结构, 结合焊接过程气泡的产生机理, 探究了 Cu/Ni 界面空洞与焊接空洞的关系。主要结论如下:

1) 化学镀镍钯金 Cu/Ni 界面空洞无法完全避免。氯化钯活性高, 起镀快, 且氯离子具有渗透性与腐蚀性, 所以氯化钯活化体系的板件 Cu/Ni 界面空洞较为严重, 空洞长径可超过 $1 \mu\text{m}$ 。硫酸钯活性低, 起镀慢, 不易产生 Cu/Ni 界面空洞, 浸泡 300 s 后空洞长径小于 300 nm 。

2) Cu/Ni 界面空洞是形成焊接空洞的原因之一。对于化学镀薄镍钯金镀层, 高温焊接时部分区域化学镀镍层被完全消耗形成 IMC, Cu/Ni 界面空洞中的水分或气体在焊接过程中会形成焊接空洞, 对产品产生可靠性风险。选用合适参数的硫酸钯活化体系可降低这一风险。

参考文献:

- [1] 刘彬灿, 李轶楠. 基于有机基板的化学镀镍钯金工艺应用与测评[J]. 电子与封装, 2024, 24 (2): 020110.
LIU B C, LI Y N. Application and evaluation of chemical nickel-palladium immersion gold process based on organic substrates [J]. Electronics and Packaging, 2024, 24 (2): 020110.
- [2] 刘镇权, 吴培常, 林周秦, 等. 详解化学镀镍钯金工艺[J]. 印制电路信息, 2018, 26 (10): 32-40.
LIU Z Q, WU P C, LIN Z Q, et al. Expatriate ENEPIG surface treatment process in detail [J]. Printed Circuit Information, 2018, 26 (10): 32-40.
- [3] 潘海进, 王宗, 陈凯, 等. 半加工工艺化学镀镍钯金产品基材渗镀原因分析[J]. 电镀与涂饰, 2025, 44 (12): 14-18.
PAN H J, WANG Z, CHEN K, et al. Cause analysis of substrate permeation plating during ENEPIG process by semi-additive method [J]. Electroplating & Finishing, 2025, 44 (12): 14-18.
- [4] 胡光辉, 潘湛昌, 魏志钢. PCB 化学镀镍漏镀现象分析[J]. 印制电路信息, 2010 (6): 45-48.
HU G H, PAN Z C, WEI Z G. Analysis of skip plating phenomenon of electroless nickel plating on PCB [J]. Printed Circuit Information, 2010 (6): 45-48.
- [5] 姚俊合, 何湘柱, 陈云毅, 等. 印刷电路板铜电路表面化学镀镍前预镀镍替代无钯活化[J]. 电镀与涂饰, 2018, 37 (4): 160-164.
YAO J H, HE X Z, CHEN Y Y, et al. Electroless nickel pre-plating as a substitute for palladium activation before electroless nickel plating on copper patterns of printed circuit boards [J]. Electroplating & Finishing, 2018, 37 (4): 160-164.
- [6] 刘刚, 张文健, 陈佳, 等. 印刷焊料对 ABF 基板在 uHAST 及 HTST 老化后焊接可靠性的影响[J]. 电镀与涂饰, 2025, 44 (12): 26-35.
LIU G, ZHANG W J, CHEN J, et al. Solder joint reliability of ABF substrates with different printing solders after uHAST and HTST aging [J]. Electroplating & Finishing, 2025, 44 (12): 26-35.

- [7] HO C Y, DUH J G. Quantifying the dependence of Ni(P) thickness in ultrathin-ENEPIG metallization on the growth of Cu-Sn intermetallic compounds in soldering reaction [J]. Materials Chemistry and Physics, 2014, 148 (1/2): 21-27.
- [8] HO C E, FAN C W, WU W H, et al. Reliability evaluation on a submicron Ni(P) thin film for lead-free soldering [J]. Thin Solid Films, 2013, 529: 364-368.
- [9] 资春芳, 李维俊, 卞英曼, 等. 常见锡膏焊接缺陷及应对措施[J]. 电子元件与信息技术, 2024, 8 (9): 13-15, 19.
- ZI C F, LI W J, BIAN Y M, et al. Common solder paste defects in soldering and countermeasures [J]. Electronic Component and Information Technology, 2024, 8 (9): 13-15, 19.

【编辑：周新莉】