

6061 铝合金化学镀光亮镍前处理工艺

李峻杰¹, 王世春¹, 秦伟恒¹, 胡光辉¹, 罗继业¹, 郝志峰^{1,*}, 任长友²

1. 广东工业大学轻工化工学院, 广州 510006

2. 深圳市联合蓝海应用材料科技股份有限公司, 深圳 518020

摘要: [目的] 研发适用于 6061 铝合金化学镀光亮镍的二次浸锌前处理配方, 优化二次浸锌及退锌的工艺参数, 以获得表面均匀、薄而致密的锌置换层, 为后续化学镀光亮镍提供良好的基底。[方法] 通过扫描电子显微镜、能谱仪及激光共聚焦显微镜, 研究了浸锌液中 FeCl₃ 浓度、表面活性剂种类及浓度一次浸锌时间、退锌时间、二次浸锌时间对浸锌层形貌、成分和表面粗糙度的影响, 并对化学镀 Ni-P 合金层的微观形貌、光泽度、结合力等性能进行表征。[结果] 较优的浸锌配方为: 氧化锌 6 g/L, 氢氧化钠 60 g/L, 酒石酸钾钠 15 g/L, 三氯化铁 1 g/L, 聚乙二醇 6000 (PEG 6000) 500 mg/L。较优的前处理工艺参数为: 一次浸锌 40 s, 退锌 3 s, 二次浸锌 20 s。采用该工艺可在 6061 铝合金表面获得均匀致密的浸锌层。后续化学镀镍 1 h 所得 Ni-P 合金镀层呈镜面光亮(光泽度为 502 GU), 厚度均匀(平均值 13.5 μm, 变异系数 1.22%), 结合力达 0 级, 微观组织致密、无缺陷。[结论] 对铝合金进行适当的预处理有利于后续化学镀得到性能优异的 Ni-P 合金镀层, 本研究为铝合金化学镀前处理提供了可靠的方案。

关键词: 铝合金; 前处理; 二次浸锌; 化学镀; 光亮镍

中图分类号: TQ153.1+2

文献标志码: A

文章编号: 1004-227X (2026) 04-0031-10

Pretreatment process for electroless bright nickel plating on 6061 aluminum alloy

LI Junjie¹, WANG Shichun¹, QIN Weiheng¹, HU Guanghui¹, LUO Jiye¹, HAO Zhifeng^{1,*}, REN Changyou²

1. School of Chemical Engineering and Light Industry, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

2. Shenzhen United Blue Sea Applied Materials Technology Co., Ltd., Shenzhen 518020, China

Abstract: [Objective] To develop a secondary zinc dipping pretreatment formulation for electroless bright nickel plating on 6061 aluminum alloy, optimize the process parameters of secondary zinc dipping and zinc stripping, and obtain a uniform, thin, and compact zinc displacement layer as a favorable substrate for subsequent electroless bright nickel plating. [Method] The effects of FeCl₃ concentration and surfactant type and concentration in zinc dipping solution, first zinc dipping time, zinc stripping time, and secondary zinc dipping time on the morphology, elemental composition, and surface roughness of the zinc immersion layer were studied using scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive spectroscopy (EDS), and laser confocal scanning microscopy (LCSM). The microstructure, glossiness, and adhesion of the electrolessly plated Ni-P alloy coating were characterized. [Result] The zinc dipping formulation was optimized as follows: zinc oxide 6 g/L, sodium hydroxide 60 g/L, potassium sodium tartrate 15 g/L, ferric chloride 1 g/L, and polyethylene glycol 6000 (PEG 6000) 500 mg/L. The optimized pretreatment process parameters were as follows: first zinc dipping for 40 s, zinc stripping for 3 s, and second zinc dipping for 20 s. With this process, a uniform and compact zinc dipping layer was obtained on the 6061 aluminum alloy surface. The subsequent Ni-P alloy coating obtained after 1 hour of electroless plating exhibited a mirror-bright appearance (glossiness of 502 GU), uniform thickness (average value of 13.5 μm, coefficient of variation of 1.22%), adhesion rated as class 0, and a compact and defect-free microstructure. [Conclusion] Appropriate pretreatment of aluminum alloy facilitates the subsequent electroless plating to obtain Ni-P alloy coatings with excellent performance. This study provides a reliable pretreatment scheme for electroless nickel plating on aluminum alloys.

Keywords: aluminum alloy; pretreatment; secondary zinc dipping; electroless plating; bright nickel

化学镀光亮镍技术是通过在基材表面沉积一层镍磷合金层, 赋予零件高硬度、高耐磨性及镜面般光亮效果, 以此显著提升产品的附加值和市场竞争力^[1-2]。为获得理想的光亮镍层, 前处理是关键环节。化学镀镍前处理工艺因施镀基材的不同而有很大的区别, 但总体可以划分为除油、酸洗和活化三大主要步骤。

收稿日期: 2025-11-05 **修回日期:** 2026-03-09

第一作者: 李峻杰 (2001-), 男, 在读硕士研究生, 研究方向为化学镀镍。

通信作者: 郝志峰 (1971-), 女, 博士, 教授, 研究方向为电子化学品。

引用格式: 李峻杰, 王世春, 秦伟恒, 等. 6061 铝合金化学镀光亮镍前处理工艺[J]. 电镀与涂饰, 2026, 45 (4): 31-40.

LI J J, WANG S C, QIN H W, et al. Pretreatment process for electroless bright nickel plating on 6061 aluminum alloy [J]. Electroplating & Finishing, 2026, 45 (4): 31-40.

首先通过除油、酸洗等步骤有效去除铝合金表面的油污、氧化物和其他杂质，再在基材表面形成活化层，以提高基材表面的催化活性，促进后续镍层的沉积和生长，因此活化是影响后续电镀效果的关键工序。目前，钯活化法在金属和非金属化学镀前处理中都有着广泛的应用^[3-4]，尤其在铜基材的化学镀前处理中，可以根据应用场景的不同进行调整，提高化学镀镍层品质。姚吉豪等人^[5]对 PCB(印制线路板)化学镀镍前的钯活化进行改良，具体为通过钯活化和化学镀钯两步活化工艺，在基材上获得致密的 Pd 层，解决了常规传统化学镀金工艺中，Au 层结晶界面残留药水或吸收水汽引起的下层钯腐蚀问题，同时提高了镀层的结合力和焊接可靠性，使印制线路板在化镀金后具有优异的焊接可靠性和耐蚀性。笔者课题组^[6]在对线距和线宽为 12 μm 的超细线路化学镀镍的研究中发现，改良钯活化及增加前、后预浸工艺，在提高钯活化均匀性的同时能减少在非镀区域的沉积，有效改善化学镀镍渗、漏镀现象，提高产品良率。因此，化学镀镍前处理中活化对提高后续化学镀品质至关重要。

铝合金是较难镀覆的基材之一，因其表面天然形成的致密氧化膜^[7-8]，以及加工过程中可能引入油污、划痕和其他微观缺陷，这些因素会在一定程度上影响镍层沉积的均匀性和致密性，导致镀层出现孔洞、麻点或光泽不均等缺陷^[9]。此外，铝合金在常规前处理中易出现过腐蚀或活化层分布不均的现象，从而影响后续镀层的平整度与镜面效果，甚至引发针孔、发花等缺陷^[10-11]。因此，前处理工艺不仅应有效去除基材表面杂质和致密氧化膜，还应在不损伤基材表面的前提下构建致密均匀的活化层。铝合金化学镀镍的前处理方法多样，主要包括直接化学镀镍^[12]、二次浸锌^[13]、电沉积薄锌层、阳极氧化、锡酸盐活化等。其中，二次浸锌凭借“二次置换、成膜均匀”的优势已成主流^[13-16]。然而，铝合金化学镀光亮镍对二次浸锌的要求非常严苛：活化层应薄而均匀，以确保后续化学镀镍层均一，并且最大限度地减少锌离子带入镀液，以延长镀液寿命^[17-18]。因此，严格控制二次浸锌的配方与工艺参数，对于提升化学镀镍层品质、延缓化学镀镍液老化极其重要。

不同牌号铝合金因其成分差异，前处理参数亦有所不同。本研究以 6061 铝合金化学镀光亮镍为例，研究了无氰浸锌液配方、一次浸锌、退锌及二次浸锌时间对置换锌层厚度和均匀性的影响，以获得更薄、更均匀的置换锌层，从而提升后续化学镀镍层的品质。

1 实验

1.1 铝合金前处理工艺

基材为 1 cm × 3 cm 的 6061 铝合金，所用试剂均为分析纯，所有溶液采用超纯水配制。如图 1 所示，基材前处理工艺流程为：除油→超纯水冲洗→酸洗→超纯水冲洗→一次浸锌→超纯水冲洗→退锌→超纯水冲洗→二次浸锌。

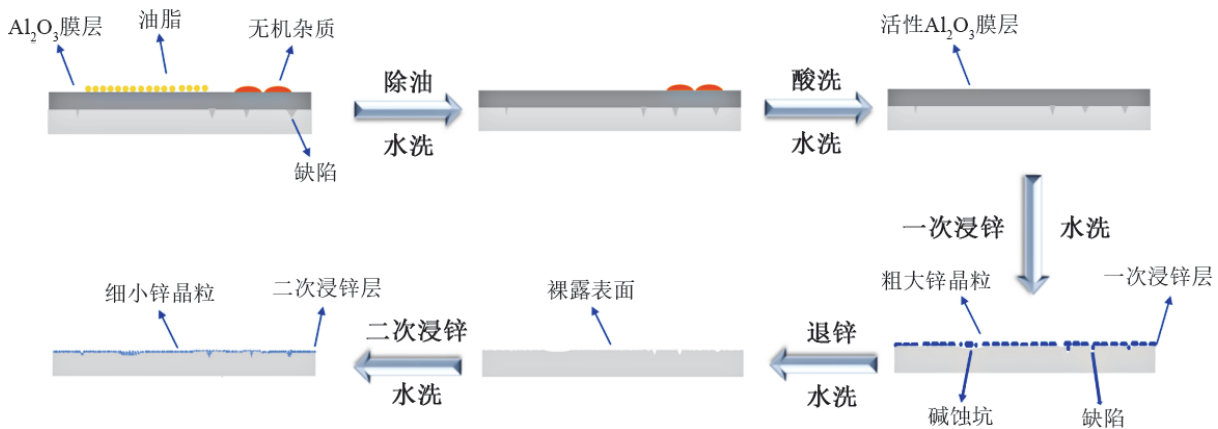


图 1 6061 铝合金前处理工艺流程
Figure 1 Process flow of pretreatment for 6061 aluminum alloy

1.1.1 除油

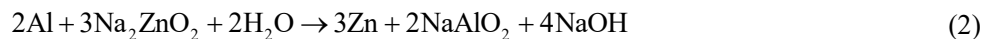
除油的目的在于除去基材表面的油脂。除油液组成和工艺参数为：氢氧化钠 5 g/L，磷酸三钠 30 g/L，硅酸钠 5 g/L，碳酸钠 10 g/L，温度 60 °C，时间 120 s。

1.1.2 酸洗

酸洗也称为出光, 主要目的是去除部分氧化铝薄膜, 活化表面, 也起到一定的清洁作用。酸洗液组成和工艺参数为: 浓硫酸 30 mL/L, 过硫酸钠 60 g/L, 常温, 时间 60 s。

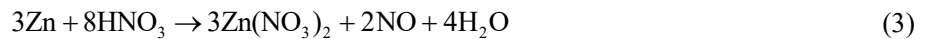
1.1.3 浸锌

浸锌的基本原理是利用溶液的碱性先腐蚀去除铝合金基材表面氧化膜, 使铝暴露, 再通过锌酸根离子与铝的置换反应在基材表面形成锌催化层, 同时阻止基材被氧化, 相关反应如式(1)和式(2)所示。一次浸锌要求锌层完整覆盖基体, 并且不会过度腐蚀基材; 二次浸锌则要求镀层均匀致密且尽量减薄。二者的关键在于协调置换反应速率与成核一致性, 可通过优化反应时间、组分浓度及添加适宜的表面活性剂实现^[7]。均采用碱性无氰体系, 具体配方为: ZnO 6 g/L, NaOH 60 g/L, KNaC₄H₄O₆ (酒石酸钾钠) 15 g/L, FeCl₃ 1 g/L, 表面活性剂适量。



1.1.4 退锌

退锌主要是为了去除一次浸锌形成的粗糙置换锌层及未完全溶解的 Al₂O₃ 膜。采用 20% (体积分数) 硝酸作为退锌液, 通过精确控制退锌时间, 可在溶解去除锌层及氧化膜的同时避免基体腐蚀, 从而减少对二次浸锌的干扰。



1.1.5 化学镀光亮镍

化学镀光亮镍的配方和工艺参数为: NiSO₄·6H₂O 25 g/L, NaH₂PO₂·H₂O 20 g/L, CH₃COONa 10 g/L, 二水合柠檬酸钠 20 g/L, 苹果酸 5 g/L, pH 5.0, 温度 85 °C, 时间 1 h。

1.2 性能检测

使用 Zeiss MERLIN Compact 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察 6061 铝合金在不同工序后的表面形貌, 并以 SEM 附带的能谱仪 (EDS) 分析表面的元素分布; 采用广州市明美光电技术有限公司的 MJ31 型金相显微镜观察化学镀镍层的表面形貌特征。采用 KathMatic KC-X1000 系列激光光谱共聚焦显微镜 (LSCM) 检测样品的表面粗糙度, 扫描区域为 100 μm × 100 μm, 扫描宽度 3 μm, 用时 23.7 min, 每个样品共测 10 个点。采用深圳市林上科技有限公司的 LS192 型光泽度仪检测镍层光泽度。参照国标 GB/T 9286-2021 《色漆和清漆 划格试验》, 采用划格法检测 Ni 层的结合力。

2 结果与讨论

2.1 浸锌配方的确定

2.1.1 FeCl₃ 质量浓度

浸锌的机理可概括为破膜、溶铝和沉积三步。首先, 铝合金表面的天然氧化膜在碱性浸锌液中溶解, 暴露出新鲜的活性铝; 随后, 铝与 OH⁻ 反应生成 AlO₂⁻, 同时发生置换反应, 溶液中的 ZnO₂²⁻ 被还原并沉积在基体表面。其中锌-铝置换反应速率显著影响着浸锌层的晶粒尺寸和表面粗糙度。若置换反应速率过高, 则所得 Zn 层晶粒粗大、结构疏松, 活性较差。在浸锌液中添加适量 Fe³⁺ 可有效调控锌的沉积行为^[16]。由于 Fe³⁺ 的氧化还原电位远高于 Zn²⁺, 因此 Fe³⁺ 会优先在新鲜铝表面还原成极细的铁晶核, 形成均匀致密的成核中心, 并抑制阴极极化, 使 Zn 层晶粒细化及整体均匀性提升。若 Fe³⁺ 浓度过低, 则 Zn²⁺ 仍在有限晶核上持续放电, 使晶粒持续长大; 而过量 Fe³⁺ 则易引入杂相。因此, 控制 Fe³⁺ 浓度是获得薄而致密、活化性能优异浸锌层的关键。

对 6061 铝合金基材依次进行常温除油 2 min、超纯水洗 20 s 及酸洗 1 min 后, 置于含有 0.5、1.0 或 2.0 g/L FeCl₃ 的浸锌液中, 反应 35 s 后冲洗、干燥, 所得一次浸锌层的形貌如图 2 所示。由图 2a 可知, 添加 0.5 g/L FeCl₃ 时, 浸锌层晶粒聚集, 枝晶现象明显。从图 2b 可见, 添加 1.0 g/L FeCl₃ 时所得浸锌层晶体粒径显著减小, 无明显的晶体间聚集和枝晶现象, 整体均匀平整。从图 2c 可知, 增大 FeCl₃ 质量浓度至

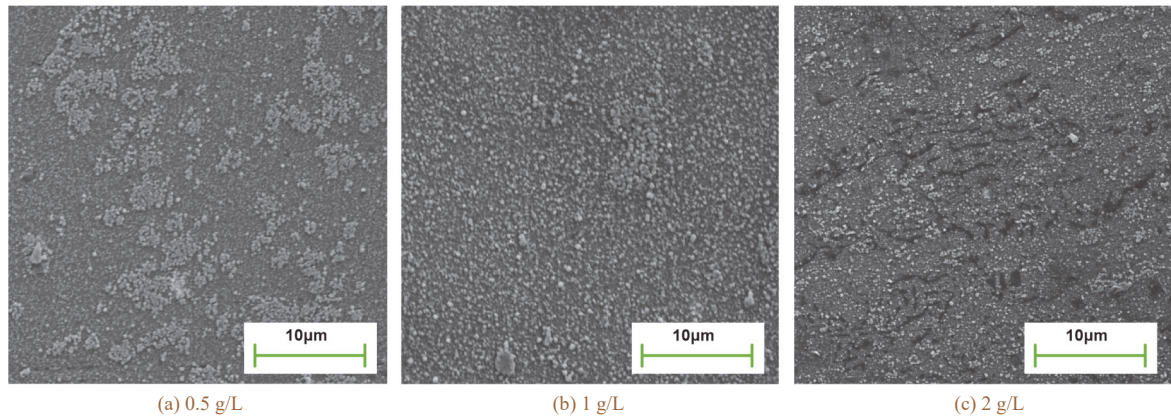


图2 FeCl₃ 质量浓度不同时所得一次浸锌层的表面形貌

Figure 2 Surface morphology of first zinc dipping layer obtained with different FeCl₃ mass concentrations

2.0 g/L 时, 浸锌层的晶粒均匀性与致密性显著下降。在浸锌过程中, Fe³⁺的关键作用是优先沉积并为 Zn²⁺ 提供大量成核位点。当 FeCl₃ 浓度较低时, 沉积的铁不能为 Zn²⁺ 的沉积提供足够多且分散的生长位点, Zn²⁺ 只能在铝基体上少数活性较高的位点形核并快速生长, 导致锌晶粒粗大并极易形成锌枝晶; 当 FeCl₃ 浓度过高时, 初始沉积的铁基层层过厚或过于致密, 反而阻碍了铝基体与溶液中 Zn²⁺ 的有效接触, 导致局部锌沉积受限, 而在其他区域又异常生长, 最终形成均匀性和致密性差的浸锌层。当添加适宜浓度(如 1.0 g/L FeCl₃)时, Fe³⁺ 的“竞争形核”和“抑制沉积”效应达到最佳平衡, 形成了致密、均匀的浸锌层。因此, 较优的 FeCl₃ 质量浓度为 1.0 g/L。

2.1.2 表面活性剂

上述 SEM 观察证实, 通过控制浸锌液的 FeCl₃ 浓度可在一定程度上提升一次浸锌层的均匀性和致密度。然而, 图 3 的 EDS 面扫图像显示, Zn 信号强度偏低且较分散, 表明一次浸锌层呈岛状生长, 其均匀性和覆盖率还有待提升。表面活性剂作为活化体系的关键组分, 可通过降低溶液表面张力、提高固/液界面的润湿性提高沉积的均匀性。基于此, 本研究在浸锌液中添加分子量不同的非离子型表面活性剂——聚乙二醇(PEG), 并考察了各自质量浓度对一次浸锌的影响, 希望利用 PEG 的胶束模板效应与界面吸附行为, 诱导 Zn 均匀成核并抑制择优生长, 最终实现晶粒细化、孔隙率下降及覆盖率提升。

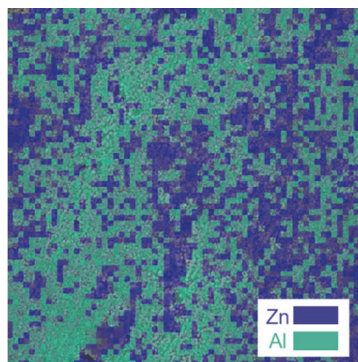


图3 一次浸锌处理后 6061 铝合金的 EDS 面扫图像

Figure 3 EDS mapping of 6061 aluminum alloy after first zinc dipping

从图 4 和图 5 可知, 在一次浸锌液中添加 PEG 6000 能够显著提升 Zn 晶粒的分散性和沉积量。随 PEG 6000 的质量浓度从 400 mg/L 增至 600 mg/L, 晶核密度增大, 晶粒细化, 覆盖率提高。相比之下, PEG 20000 因分子链较长, 空间位阻大, 表现出不同的调控行为。如图 6 所示, PEG 20000 的质量浓度为 400 mg/L 时, 其可以适当提高 Zn 成核密度, 但对晶粒的细化效果不显著; 500 mg/L 时, Zn 的质量分数增大, 但分散性较差; PEG 20000 质量浓度不低于 600 mg/L 时, 其长链聚合物在界面形成致密的吸附膜, 阻碍了 ZnO₂²⁻ 扩散, 导致局部过饱和度升高, 诱发非均相成核, 形成粗大颗粒状聚集体, 显著降低镀层致密性与均匀性。

综上, PEG 6000 在 400~600 mg/L 范围内可通过降低界面张力、抑制晶粒合并, 实现晶粒细化和致密化; 而 PEG 20000 因空间位阻效应显著, 高浓度下易触发团聚, 不宜作为一次浸锌的添加剂。因此, 选择 500 mg/L PEG 6000 作为浸锌液表面活性剂。

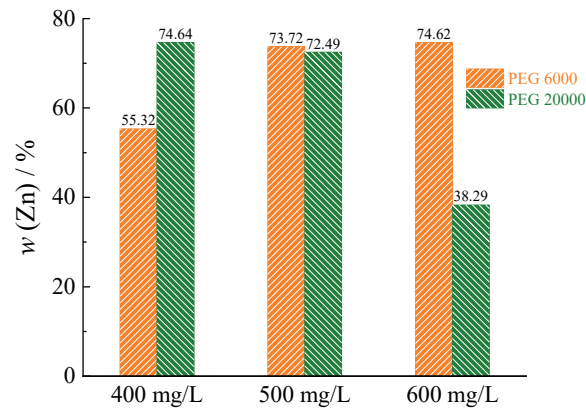


图4 不同表面活性剂及其浓度对6061铝合金一次浸锌后表面Zn质量分数的影响

Figure 4 Effect of surfactant type and concentration on Zn mass fraction on 6061 aluminum alloy after first zinc dipping

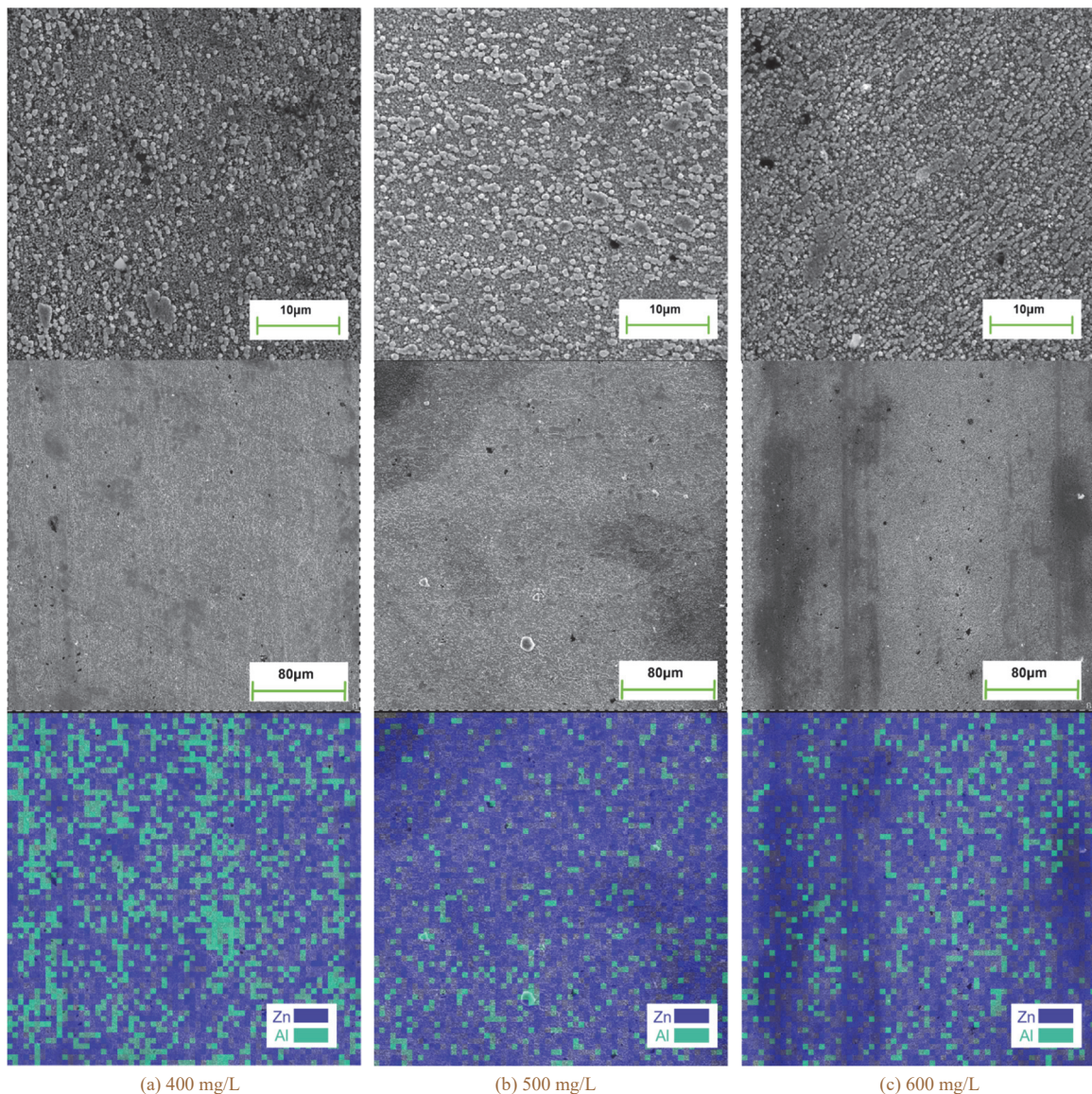


图5 不同PEG 6000浓度下一次浸锌层的表面形貌与EDS面扫图像

Figure 5 Surface morphology and EDS mapping of first zinc dipping layers obtained with different PEG 6000 concentrations

2.2 一次浸锌时间的影响

依次对6061铝合金基材常温除油2 min、超纯水洗20 s、酸洗1 min后，一次浸锌30~40 s，然后冲洗和干燥。图7和图8为一次浸锌不同时间后样品表面的Zn质量分数和微观形貌。由图8a可知，一次浸锌30 s时，锌未能均匀覆盖在铝合金基材表面，大部分沉积的锌呈现团状聚集，基材大面积裸露，此时Zn的质量分数仅仅为48.19%。随着一次浸锌时间的延长，锌晶粒的分布均匀性和沉积量均显著提升，Zn的

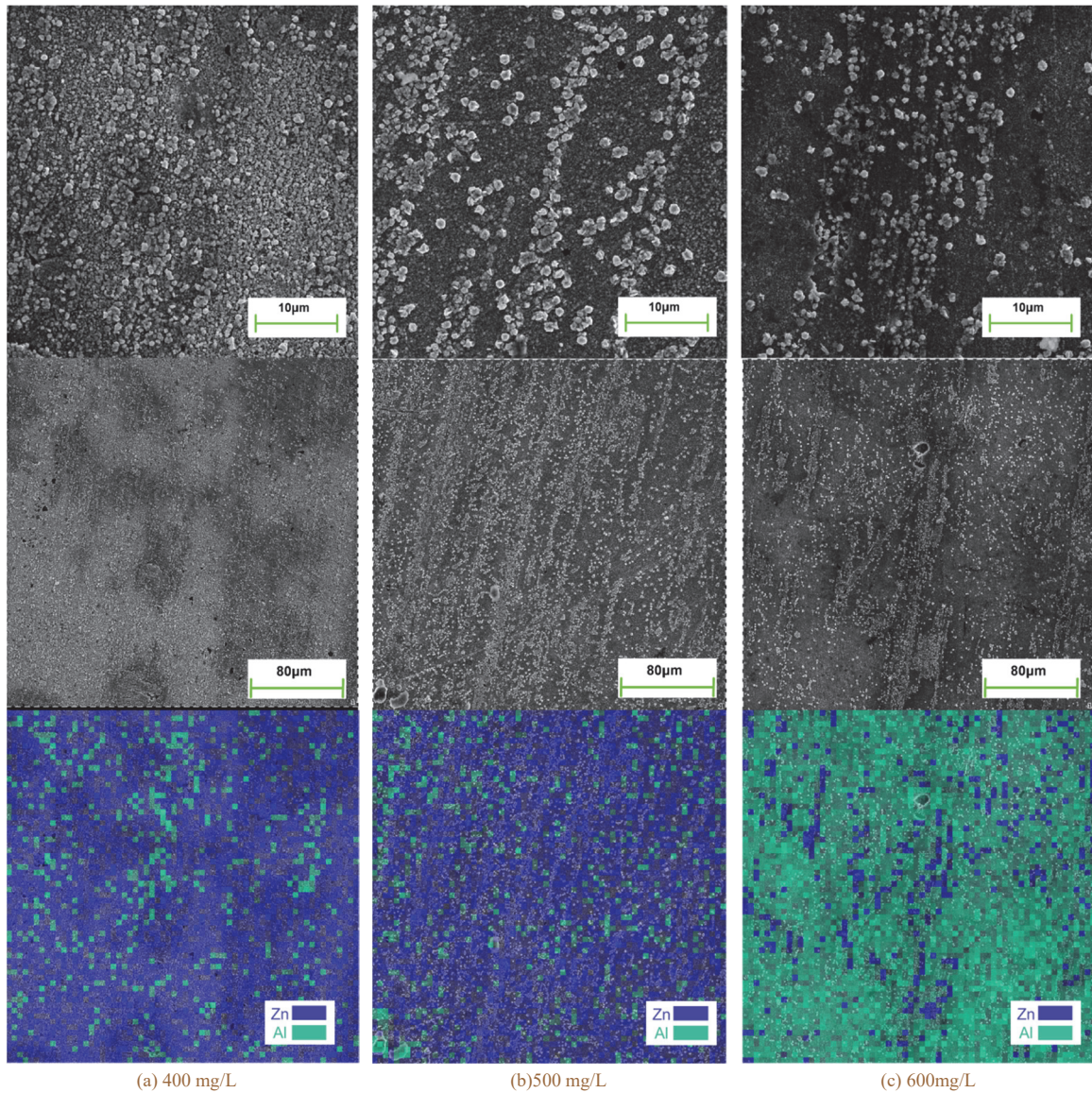


图 6 不同 PEG 20000 浓度下一次浸锌层的表面形貌与 EDS 面扫图像
Figure 6 Surface morphology and EDS mapping of first zinc dipping layers obtained with different PEG 20000 concentrations

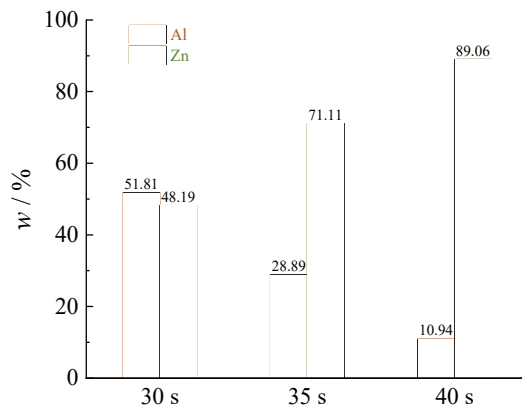


图 7 不同一次浸锌时间下样品表面的 Zn 质量分数
Figure 7 Zn mass fraction on specimen surface after different first zinc dipping durations

分布逐渐从聚集向均匀分散状态过渡，如图 8b 所示。由图 8c 可知，浸锌 40 s 时，锌分布均匀，无明显堆积生长，此时 Zn 的质量分数为 89.06%，表面锌层覆盖率高。浸锌时间较短时，形成的活性位点有限，晶核只是在特定位点而非整个表面均匀成核，导致形成了彼此分离的聚集态的锌晶粒。随着浸锌时间延长，沉积的锌覆盖下层基体，使局部置换反应停止，新的锌晶核倾向于在未被覆盖的、裸露的基体暴露区域形成。随着浸锌时间进一步延长，锌晶粒持续生长并逐渐合并，最终形成连续且宏观均匀的锌层。

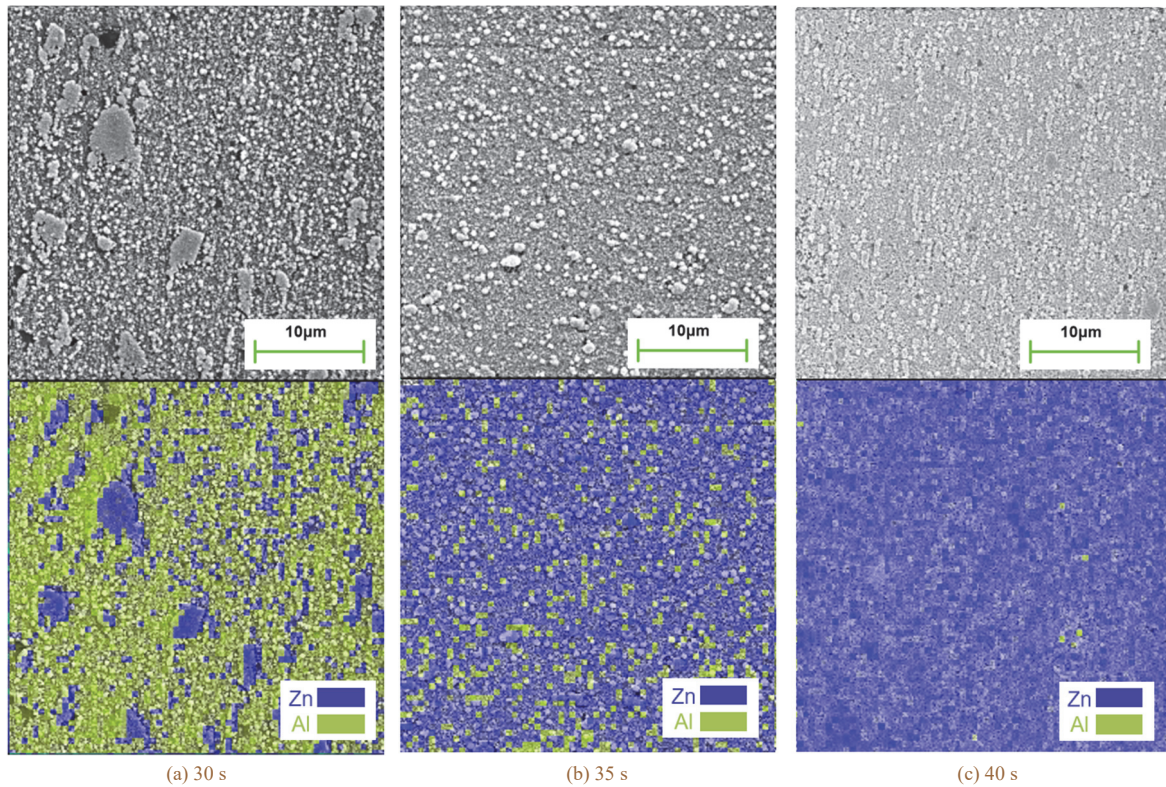


图8 不同一次浸锌时间下样品的表面形貌及 EDS 面扫图像

Figure 8 Surface morphology and EDS mapping of specimens after different first zinc dipping durations

2.3 退锌时间的影响

2.3.1 退锌后的表面形貌

图9所示为退锌处理不同时间后样品的表面形貌。图9a显示,退锌1s时基体表面仍残留一定量Zn晶核,一次浸锌层剥离不完全,局部覆盖度仍较高,易在后续二次浸锌时诱发非均匀成核。退锌3s后,Zn层已完全去除,样品表面洁净且保留原始的轧制纹理。退锌时间进一步延长至5s和10s后,基体表面明显变粗糙,出现蜂窝状蚀坑,这是HNO₃过度腐蚀铝合金所致。过度腐蚀不仅会降低样品的尺寸精度,还可能引入残余应力,不利于后续镀层的结合力。本工艺宜将退锌时间控制在3s。

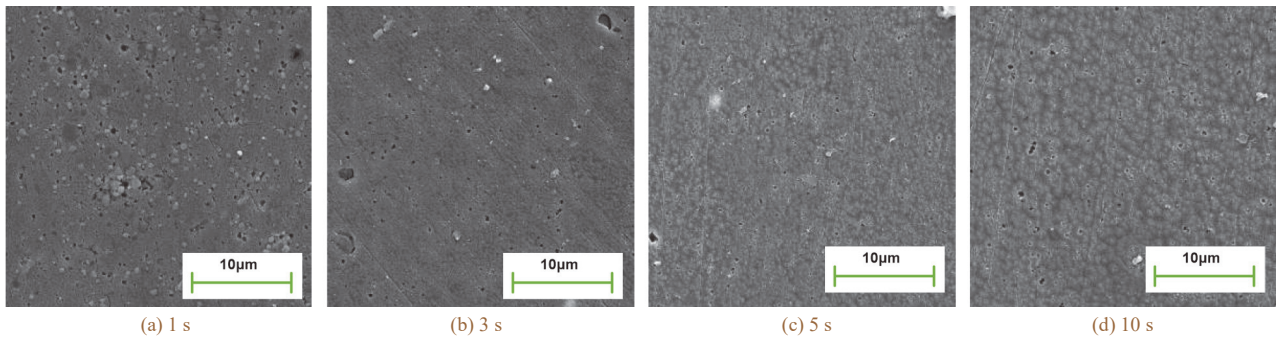


图9 不同退锌时间后样品的表面形貌

Figure 9 Surface morphology of specimens after different zinc stripping durations

2.3.2 退锌后的表面粗糙度

退锌不同时间后样品的 R_a (轮廓算术平均偏差)、 R_q (轮廓均方根偏差)和 R_t (轮廓最大高度)如图10所示。退锌1s时,样品的 R_t 最大。退锌3s时, R_a 、 R_q 和 R_t 均降至最低。退锌5s和10s时,样品的 R_a 、 R_q 和 R_t 较退锌3s时均有不同程度的增大。表面粗糙度参数与SEM形貌相互印证,均表明最佳的退锌时间为3s。

2.4 二次浸锌时间的影响

将退锌后的样品进行超纯水洗3s,再二次浸锌20~40s,其表面和截面形貌如图11和图12所示。由图11可知,随二次浸锌时间延长,样品表面的蚀坑数量和直径增大,40s时蚀坑尺寸和数量均最大。

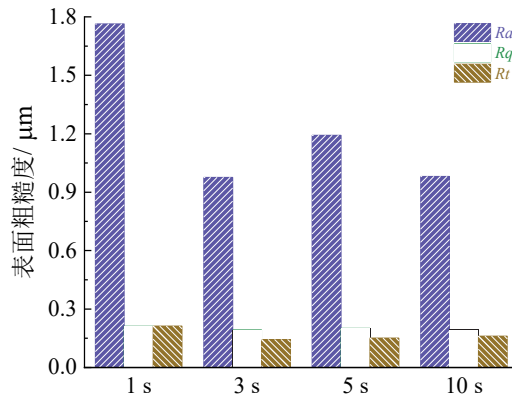


图 10 不同退锌时间后样品的表面粗糙度

Figure 10 Surface roughness of specimens after different zinc stripping durations

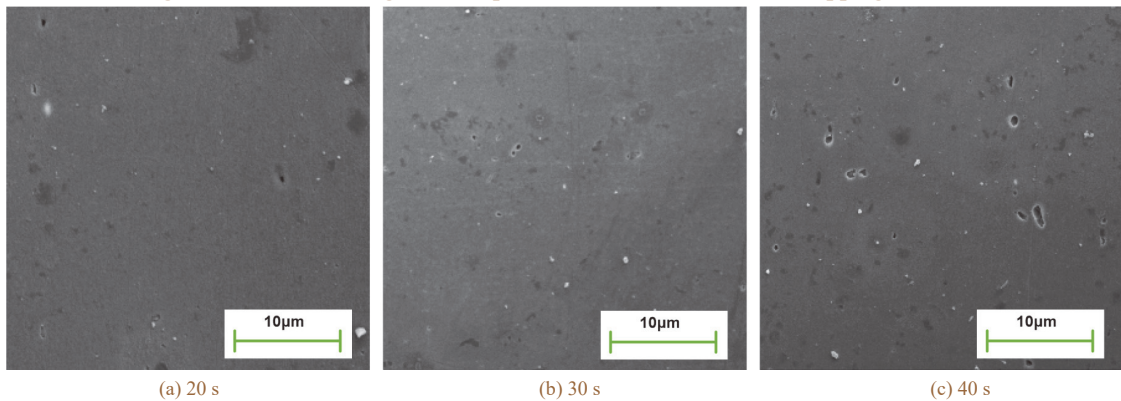


图 11 不同二次浸锌时间下样品的表面形貌

Figure 11 Surface morphology of specimens after different secondary zinc dipping durations

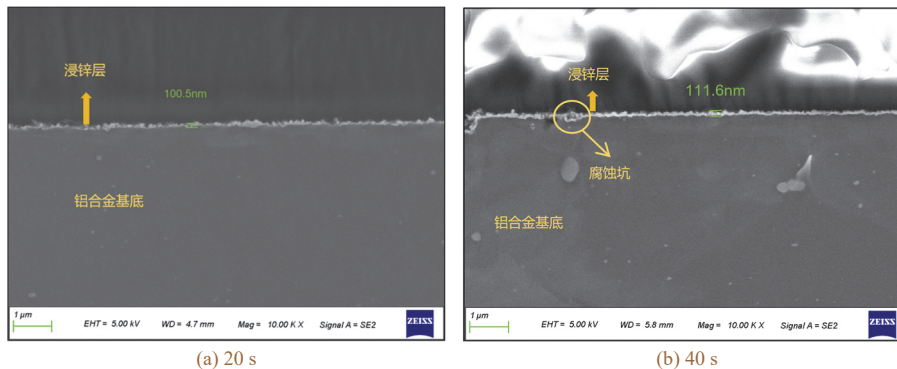


图 12 不同二次浸锌时间下样品的截面形貌

Figure 12 Cross-sectional morphology of specimens after different secondary zinc dipping durations

由图 12 可知，二次浸锌 20 s 时 Zn 层厚度约为 100.5 nm，无明显腐蚀；二次浸锌 40 s 时 Zn 层厚度略增至 111.6 nm，但碱蚀现象较为明显。对比一次浸锌，二次浸锌形成的锌晶粒显然小的多，这是因为退锌后基材表面均匀分布着大量活性点，在二次浸锌时锌晶核瞬间同时在这些活性点上形成，并且成核点非常密集，横向和纵向的生长空间均被严重限制，最终形成连续的薄覆盖层。因此选择二次浸锌时间为 20 s。

2.5 前处理工艺改进后的化学镀 Ni-P 合金层性能

采用改进的工艺对 6061 铝合金预处理后化学镀镍 1 h，经去离子水冲洗与干燥后检测所得 Ni-P 合金镀层的性能。

2.5.1 外观

图 13 显示，Ni-P 合金镀层呈镜面光亮，采用 LS192 光泽度仪测得其平均光泽度为 502 GU，达到镜面光亮级别(光泽度大于 400 GU)。

2.5.2 结合力

从图 14 可知，Ni-P 合金镀层的切割边缘平滑，网格区域无起皮、脱落现象，结合力达 0 级，满足后续机械加工与服役的要求。



图 13 Ni-P 合金镀层的外观

Figure 13 Appearance of Ni-P alloy coating

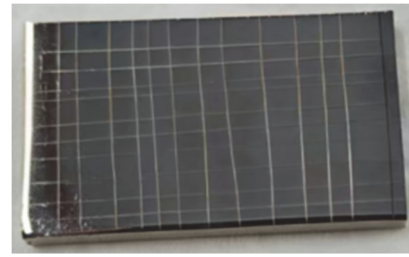


图 14 Ni-P 合金镀层划格试验后的外观

Figure 14 Appearance of Ni-P alloy coating after cross-cut test

2.5.3 厚度均匀性

采用 XRF 在样品对角线交叉 5 点扫描以检测 Ni-P 合金镀层的厚度。从图 15 可知, Ni-P 合金镀层的平均厚度为 13.48 μm , 标准偏差为 0.164 μm , 变异系数(CV)为 1.22%, 说明其厚度均匀性良好。

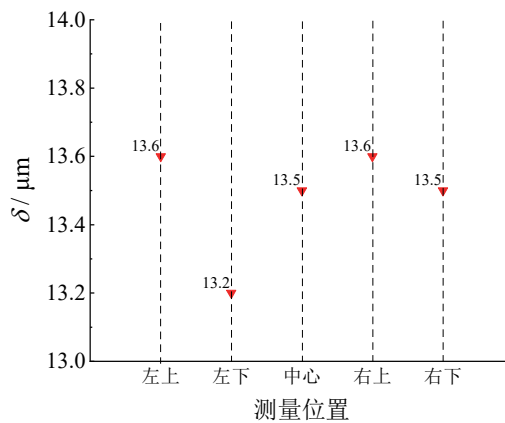
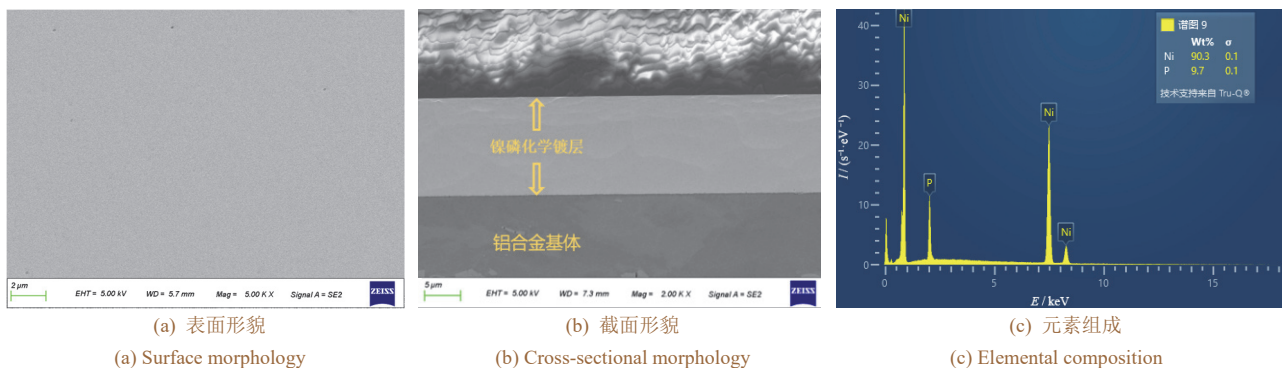


图 15 Ni-P 合金镀层的厚度

Figure 15 Thickness of Ni-P alloy coating

2.5.4 微观形貌和元素组成

镀镍层的表面形貌以及元素组成如图 16 所示。由图 16a 和图 16b 可知, Ni-P 合金镀层微观组织致密均匀, 无微孔、裂纹等缺陷, 与基体界面清晰连续、无明显的缝隙。从图 16c 的 EDS 谱图可见, 所得 Ni-P 合金镀层的 P 质量分数为 9.7%, 属于高磷范畴, 从理论上而言应具备优异的耐蚀性。



(a) 表面形貌
(a) Surface morphology

(b) 截面形貌
(b) Cross-sectional morphology

(c) 元素组成
(c) Elemental composition

图 16 Ni-P 合金镀层的表面形貌、截面形貌及元素组成

Figure 16 Surface morphology, cross-sectional morphology, and elemental composition of Ni-P alloy coating

3 结论

1) 优选浓度为 1 g/L 的 FeCl_3 调控锌-铝置换反应速率, 添加 500 mg/L 非离子表面活性剂 PEG 6000 进一步促进锌晶粒分散生长, 从而获得均匀致密浸锌层。

2) 优化后的浸锌配方和工艺: ZnO 6 g/L, NaOH 60 g/L, 酒石酸钾钠 15 g/L, FeCl_3 1 g/L, PEG 6000 500 mg/L, 温度 20~25 $^\circ\text{C}$, 一次浸锌时间 40 s, 退锌时间 3 s, 二次浸锌时间 20 s。

3) 采用优化的工艺二次浸锌后可获得厚度约 100 nm 均匀锌层; 化学镀镍后可获得光亮的高磷 Ni-P 合金镀层, 平均光泽度为 502 GU, 厚度为 13.5 μm , 结合力达 0 级(划格法), 表面粗糙度低、平整性好, 综合性能优异。

参考文献:

- [1] 李剑斌, 郭兴红. 水合氯醛对光亮镍镀层性能的影响[J]. 电镀与涂饰, 2022, 41 (21): 1505-1509.
LI J B, GUO X H. Effect of chloral hydrate on properties of electroplated bright nickel coating [J]. Electroplating & Finishing, 2022, 41 (21): 1505-1509.
- [2] 张业明, 方达经, 陈志亮, 等. 镁合金化学镀光亮镍磷合金[J]. 腐蚀与防护, 2009, 30 (5): 332-334.
ZHANG Y M, FANG D J, CHEN Z L, et al. Technology of electroless Ni-P deposition on magnesium alloy [J]. Corrosion and Protection, 2009, 30 (5): 332-334.
- [3] KUO L C, HUANG Y C, LEE C L, et al. The activation effect of Pd nanoparticles on electroless nickel-phosphorous deposition [J]. Electrochimica Acta, 2006, 52 (1): 353-360.
- [4] 安美特德国有限公司. 非电解镀镍的预处理方法: 201080013774.8 [P]. 2012-04-04.
ZETTELMEYER E. Pre-treatment process for electroless nickel plating: CN102405306 [P]. 2012-04-04.
- [5] 深圳市创智成功科技有限公司. 一种用于 PCB 电路板化学镍金的钯活化方法: CN202110238810.0 [P]. 2021-06-29.
YAO J H, CHEN J L. Palladium activation method for electroless nickel immersion gold of PCB: CN113046733 [P]. 2021-06-29.
- [6] 广东工业大学. 一种抑制集成电路封装柔性基板超细线路化学镀镍渗镀和漏镀的方法和应用: CN202510973244.6 [P]. 2025-09-26.
HAO Z F, QIN W H, LI J J, et al. Method and application for suppressing electroless nickel plating and leakage plating of ultra-fine line electroless plating of integrated circuit packaging flexible substrate: CN120700481 [P]. 2025-09-26.
- [7] 肖鑫, 许律, 刘万民. 铝及铝合金全光亮化学镀镍磷合金工艺优选[J]. 材料保护, 2011, 44 (3): 64-67, 91.
XIAO X, XU L, LIU W M. Technology for electroless bright nickel-phosphorous alloy plating on aluminum and aluminum alloy [J]. Materials Protection, 2011, 44 (3): 64-67, 91.
- [8] 胡光辉, 王斌, 崔子雅, 等. 活化工艺对铝合金化学镀镍的影响[J]. 电镀与涂饰, 2021, 40 (19): 1477-1482.
HU G H, WANG B, CUI Z Y, et al. Effects of different activation processes on electroless nickel plating of aluminum alloy [J]. Electroplating & Finishing, 2021, 40 (19): 1477-1482.
- [9] 邓银, 张胜涛, 苏新虹, 等. 前处理对化学沉镍金面外观影响的研究[J]. 印制电路信息, 2011 (11): 42-45, 51.
DENG Y, ZHANG S T, SU X H, et al. Study on impact of different pre-treatments on gold surface appearance in electroless nickel immersion gold process [J]. Printed Circuit Information, 2011 (11): 42-45, 51.
- [10] 程林凯, 兀文博, 梁民, 等. 6061 铝合金化学导电氧化后颜色不均原因分析及解决措施[J]. 机械研究与应用, 2025, 38 (1): 135-137.
CHENG L K, WU W B, LIANG M, et al. Analysis and solution measures for uneven color of 6061 aluminum alloy after chemical conductive oxidation [J]. Mechanical Research & Application, 2025, 38 (1): 135-137.
- [11] 朱卓敏, 王宗雄, 储荣邦. 光亮镍镀常见故障处理及镀液维护方法[J]. 电镀与涂饰, 2017, 36 (11): 577-586.
ZHU Z M, WANG Z X, CHU R B. Troubleshooting for bright nickel electroplating and its bath maintenance [J]. Electroplating & Finishing, 2017, 36 (11): 577-586.
- [12] 宿辉, 张迎, 原小寓, 等. 2024 铝合金直接化学镀镍工艺及镀层性能[J]. 电镀与涂饰, 2023, 42 (1): 24-30.
SU H, ZHANG Y, YUAN X Y, et al. Direct electroless nickel plating on 2024 aluminum alloy and properties of the coating [J]. Electroplating & Finishing, 2023, 42 (1): 24-30.
- [13] 武剑, 陈阵, 司云森, 等. 1060 铝材两步化学浸锌工艺[J]. 材料保护, 2011, 44 (5): 37-39.
WU J, CHEN Z, SI Y S, et al. Two-step electroless zinc plating process of 1060 aluminum [J]. Materials Protection, 2011, 44 (5): 37-39.
- [14] 毕晨, 刘定富, 曾庆雨. 2A12 铝合金化学镀镍前处理工艺研究[J]. 贵州科学, 2016, 34 (3): 88-92.
BI C, LIU D F, ZENG Q Y. A study on pretreatment process of electroless nickel plating on 2A12 aluminum alloy [J]. Guizhou Science, 2016, 34 (3): 88-92.
- [15] 常德华. 铝合金电镀前处理技术探究[J]. 冶金与材料, 2022, 14 (1): 67-68.
CHANG D H. Study on pre-treatment technology for aluminum alloy electroplating [J]. Metallurgy and Materials, 2022, 14 (1): 67-68.
- [16] 张娟, 连忠平, 袁景追, 等. 二次浸锌预处理对钛合金化学镀镍沉积行为和镀层结合力的影响[J]. 电镀与涂饰, 2022, 41 (19): 1382-1388.
ZHANG J, LIAN Z P, YUAN J Z, et al. Effect of secondary zinc dipping as a pretreatment on electroless deposition behavior of nickel on titanium alloy and adhesion of the coating obtained thereon [J]. Electroplating & Finishing, 2022, 41 (19): 1382-1388.
- [17] 黄晓梅, 张密林. 铝及其合金浸锌溶液用表面活性剂的优选[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2007, 19 (5): 333-337.
HUANG X M, ZHANG M L. Optimization of surface active agents of zinking bath for aluminum and its alloys [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2007, 19 (5): 333-337.
- [18] 王伟. 铝带材电镀薄镍层工艺的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
WANG W. Research on electroplating thin nickel layer technology on aluminum strip [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.

【 编辑: 周新莉 】