

铝合金微波壳体高磷化学镀镍工艺

潘亮*, 代永, 夏洪亮, 桂真兵

四川航天燎原科技有限公司, 成都 610100

摘要: [目的] 为解决铝合金微波壳体化学镀镍层结合力差、耐腐蚀性不足及槽液稳定性低的问题, 亟需开发一种适用于批量生产的高磷化学镀镍工艺。[方法] 以 5A06 铝合金为基材, 提出先浸锌+碱性化学镀镍, 再高磷化学镀镍, 最后采用自研 ZY-30 封闭剂进行封闭处理的工艺。说明了主要工艺流程和关键控制点。对化学镀工艺及封闭工艺进行改进。[结果] 所得 Ni 镀层的 P 质量分数约 12%, 呈半光亮银灰色, 结合力良好, 经 ZY-30 封闭后可通过 96 h 中性盐雾试验, 且不影响后续涂装漆膜的结合力。化学镀镍槽液连续使用 5 个周期未分解, 产品合格率大于 98%。[结论] 该工艺稳定可靠, 兼具良好的镀层性能和槽液稳定性, 已成功应用于实际生产

关键词: 高磷化学镀镍; 铝合金; 微波壳体; 结合力; 耐腐蚀性; 封闭; 槽液稳定性

中图分类号: TQ153.1+2

文献标志码: A

文章编号: 1004-227X (2026) 04-0025-06

High-phosphorus electroless nickel plating for aluminum alloy microwave enclosure

PAN Liang*, DAI Yong, XIA Hongliang, GUI Zhenbing

Sichuan Aerospace Liaoyuan Science and Technology Co., Ltd., Chengdu 610100, China

Abstract: [Objective] To address the issues of poor adhesion, insufficient corrosion resistance, and low bath stability of electroless nickel plating on aluminum alloy microwave enclosure, it is urgent to develop a high-phosphorus electroless nickel plating process suitable for mass production. [Method] Using 5A06 aluminum alloy as the substrate, a process was proposed involving zinc immersion followed by alkaline electroless nickel plating, then high-phosphorus electroless nickel plating, and finally sealing treatment with the home-developed ZY-30 sealing agent. The main process flow and key control points were described, and improvements were made to both the electroless plating and sealing processes. [Result] The obtained nickel coating had a phosphorus mass fraction of approximately 12%, exhibited a semi-bright silver-gray appearance, and demonstrated good adhesion. After sealing with ZY-30, the coating passed a 96-hour neutral salt spray (NSS) test without affecting the adhesion of subsequently applied paint films. The electroless nickel plating bath remained stable and did not decompose after five consecutive production cycles, with a product qualification rate exceeding 98%. [Conclusion] This process is stable and reliable, offering both excellent coating performance and bath stability, and has been successfully applied in actual production.

Keywords: high-phosphorus electroless nickel plating; aluminum alloy; microwave enclosure; adhesion; corrosion resistance; sealing; bath stability

铝及铝合金因其优异的比强度、导热性和可加工性能, 被广泛应用于航空航天、电子通信、国防工业等领域^[1-2]。此外, 铝合金的轻量化特性使其成为航天产品微波器件壳体制造的理想结构材料。然而, 铝合金表面自然形成的氧化膜极薄且多孔, 在恶劣环境中易发生点蚀和电偶腐蚀, 严重影响微波器件的长期服役性能^[3-4]。随着 5G 和毫米波通信技术的快速发展, 电子设备对电磁屏蔽性能的要求也日益提高^[5]。因此, 在铝合金表面构建兼具高耐蚀与高电磁屏蔽性能的防护层, 成为当前微波器件制造领域的一项紧迫需求。

化学镀镍具有优异的均镀能力, 可以在器件表面形成均匀致密的 Ni 镀层, 赋予器件优异的耐磨性和耐蚀性, 已成为铝合金表面处理的重要手段之一。其中, 高磷化学镀镍(P 质量分数不低于 10%) 为非晶态结构, 具有更优异的耐蚀性和电磁屏蔽效能(不小于 60 dB) 而备受关注^[6]。然而, 铝合金基体与镀层之间的电位差较大, 并且其表面氧化膜会影响基材与镀层之间的结合力, 导致铝合金上的化学镀镍层易出现起泡、剥落等问题^[7]。近年来, 国内外学者在高磷化学镀镍领域取得了一系列进展。沈岳军等^[8]通过使用复配稳定剂, 在确保镀液性能稳定的同时, 获得了耐蚀性优良的 Ni-P 合金镀层。李亚涛等^[9]则在化学镍溶液中添加

收稿日期: 2025-04-26 **修回日期:** 2025-09-23

通信作者: 潘亮 (1994-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为表面工程。

引用格式: 潘亮, 代永, 夏洪亮, 等. 铝合金微波壳体高磷化学镀镍工艺[J]. 电镀与涂饰, 2026, 45 (4): 25-30.

PAN L, DAI Y, XIA H L, et al. High-phosphorus electroless nickel plating for aluminum alloy microwave enclosure [J]. Electroplating & Finishing, 2026, 45 (4): 25-30.

纳米 SiO₂ 颗粒进行共沉积, 显著提高了镀层的显微硬度, 并保持了良好的韧性。然而, 上述研究多聚焦于镀液成分或镀层本体性能的提升, 针对铝合金基体的镀层结合力问题及服役环境所要求的长期耐蚀性, 尤其是镀后封闭工艺的优化, 仍有待深入探索。

笔者所在公司的微波壳体类产品要求将镀镍层厚度控制在 12 ~ 15 μm 之间, 中性盐雾试验时间不低于 96 h, 且须确保恶劣环境下的镀层结合力与耐蚀性。前期开槽使用厂家 A 的 SEXN-2002 高磷化学镍工艺, 主要针对钢铁件化学镀镍, 此类产品对耐蚀性无要求。然而, 后续在铝、铁件合槽(指共用一个化学镀镍槽)生产过程中, 暴露出镀液稳定性差(使用 2 个周期后即发生分解)及耐蚀性不达标问题。为此, 课题组改用了厂家 B 的 RK-3188 高磷化学镀镍工艺, 并自主研发了配套封闭剂。结果表明, 新工艺所得镀镍层呈半光亮银灰色, 热震试验后无起泡、起皮或脱落现象; 经封闭处理后的镀层在 96 h 中性盐雾试验后表面无腐蚀点, 满足严苛环境下的服役要求。该工艺目前已稳定投产近两年, 累计加工零件数千件, 产品交检合格率不低于 98%。本文介绍了该工艺的控制要点与封闭处理工艺, 旨在为铝合金微波器件的高可靠性表面防护提供技术方案。

1 铝合金微波壳体高磷化学镀镍简介

1.1 基体材料

采用 90 mm × 60 mm × 30 mm 的 5A06 铝合金板材作为机加毛坯件, 其化学成分(以质量分数计)为: Mg 5.8% ~ 6.8%, Si 0.4%, Mn 0.5% ~ 0.8%, Cu 0.1%, Zn 0.2%, Ti 0.02% ~ 0.1%, Al 余量。

1.2 工艺流程

镀前检查 → 有机溶剂除油 → 装挂 → 碱腐蚀 → 热水洗 → 二级水洗 → 酸洗出光 → 二级水洗 → 浸锌 → 二级水洗 → 退锌 → 二级水洗 → 二次浸锌 → 二级水洗 → 碱性化学镀镍 → 二级水洗 → 高磷化学镀镍 → 二级水洗 → 封闭 → 干燥 → 检验。

1.2.1 镀前检查

零件表面应无明显碰划伤, 周边无毛刺等缺陷。

1.2.2 有机溶剂除油

采用专用除油剂常温浸泡零件 3 ~ 5 min 以去除表面重油污。

1.2.3 碱腐蚀

NaOH 100 g/L, 十二烷基磺酸钠 2 g/L, 温度 60 ~ 80 °C, 时间 20 ~ 40 s。

1.2.4 酸洗出光

硝酸 350 ~ 500 g/L, 室温, 时间 5 ~ 10 s。

1.2.5 浸锌

RK-501C 浸锌剂(由厂家 B 提供) 300 ~ 500 mL/L, Zn²⁺ 6 ~ 10 g/L, 温度 18 ~ 43 °C。一次浸锌时间 60 ~ 120 s, 二次浸锌时间 30 ~ 60 s。

1.2.6 退锌

硝酸 550 g/L, 室温, 时间 5 ~ 10 s。

1.2.7 碱性化学镀镍

使用厂家 B 的 RK-3171 碱性化学镀镍工艺, 具体工艺参数为: RK-3171A 150 mL/L, RK-3171B 70 mL/L, RK-3171D 0.5 ~ 2 mL/L, pH 9.6 ~ 11.5, 温度 35 ~ 43 °C, 时间 3 ~ 6 min。

1.2.8 高磷化学镀镍

使用厂家 B 的 RK-3188 化学镀镍工艺, 具体工艺参数为: RK-3188A 60 mL/L, RK-3188B 180 mL/L, 装载量 0.73 ~ 2.45 dm²/L, pH 4.8 ~ 5.2, 温度 85 ~ 90 °C, 时间 80 ~ 120 min。

1.2.9 封闭

采用以下 4 种封闭工艺对镀镍层进行封闭处理。

1) 铬酸封闭: CrO₃ 80 ~ 90 g/L, H₂SO₄ 25 ~ 30 g/L, NaCl 1 ~ 2 g/L, 室温, 时间 15 ~ 30 s。

2) 采用厂家 C 的 NiB-100 封闭液, 具体工艺参数为: NiB-100 2%~5% (体积分数), 温度 30~50 °C, 时间 2~3 min。

3) 采用厂家 C 的 NiB-500 封闭液, 具体工艺参数为: NiB-500 2%~5% (体积分数), 温度 30~50 °C, 时间 2~3 min。

4) 采用自研封闭液 ZY-30: ZY-30 封闭剂 40~50 g/L, 使用稀料 X-3 定容, 室温, 时间 15~30 s, 封闭后取出, 置于干燥箱中于 110 °C 固化 1 h。

2 化学镀镍关键控制点

笔者所在公司的化学镀镍工艺采用双层阻挡措施, 以保证化学镀镍层与基材之间的优异结合力, 并有效延长了化学镀镍槽液的使用周期。第一步为通过浸锌处理在铝基材表面形成 Zn-Ni 合金层, 防止基材再氧化; 第二步为通过碱性化学镀镍在表面制备一层薄薄的镍, 既避免了因锌溶解在化学镀镍槽中导致的槽液寿命缩短, 又赋予了镍镀层更优异的结合力。

2.1 浸锌

浸锌工艺在基材表面形成一层均匀连续的 Zn-Ni 合金层, 是保证镀镍层与铝基材结合力的关键工序之一。应根据使用频率定期维护浸锌溶液, 采用密度计检测浸锌溶液的密度, 使其密度保持在 1.08~1.14 g/mL, 根据测定值判断是否超出工艺范围并及时补加, 补加方法: 按浸锌液密度每提高 0.01 g/mL 需补加 50 mL/L 的 RK-501C 浸锌剂, 使用电子表格详细记录补加前后的浸锌液密度及 RK-501C 补加量以便于查询, 现已形成浸锌溶液使用频率与补加量的关系表。

2.2 碱性化学镀镍

碱性化学镀镍是保证镍镀层具有优异结合力和延长化学镀镍溶液使用周期的另一个关键工序。该工序还可以有效改善异型腔体件或复合工件表面活性, 避免漏镀。因此, 需要定期检测碱性化学镀镍溶液中的 Ni²⁺ 浓度, 使其维持在正常工艺范围内并及时补加, 补加方法: 按每提高 1 g/L Ni²⁺ 需要补加 13.2 mL/L RK-3171C。生产前需要检测槽液 pH, 确保 pH 在 9.6~11.5 之间, pH 可用 50% (体积分数) 氨水或 10% (体积分数) 硫酸调节。使用电子表格详细记录补加前后的 Ni²⁺ 浓度及补加数据以便于查询。

2.3 化学镀镍

化学镀镍槽液性能直接影响 Ni 镀层品质, 需要定期对化学镀镍槽液进行过滤, 分析槽液中 Ni²⁺ 浓度并及时补加, 按每提高 1 g/L Ni²⁺ 浓度需要分别补加 10 mL/L RK-3188A 和 10 mL/L RK-3188C (补充剂), 每次分析和补加结束做好电子记录, 注意每次 Ni²⁺ 浓度的最大补充量不能超过原镀液 Ni²⁺ 浓度的 15%, 否则沉积速率会降低 30%~40%。为保证生产效率, 沉积速率应不低于 8 μm/h, 即 Ni²⁺ 质量浓度不得低于 5.2 g/L, 并且在施镀前需要调整槽液 pH 至 4.7~5.4, 使用 50% 氨水或 10% 硫酸调节槽液 pH, 施镀过程必须用含 5 μm 过滤芯的过滤系统连续过滤, 保证槽液循环流动并除掉部分镍颗粒, 防止槽液分解。某些特殊产品要求 Ni 镀层厚度大于 20 μm, 则应设置下限温度 85 °C, 防止镀层出现麻点。每天工作结束后必须停止加热, 避免还原剂和稳定剂分解, 同时控制槽液温度不超过温度上限 90 °C。

镀镍槽中 Ni²⁺ 浓度分析步骤为: 1) 准确吸取 5 mL 槽液, 装于 250 mL 锥形瓶中; 2) 加入 50 mL 超纯水, 加 10 mL 紫尿酸铵指示剂; 3) 用 0.1 mol/L EDTA (乙二胺四乙酸) 标准溶液滴定, 直至槽液变成紫色, 采用式 (1) 计算 Ni²⁺ 质量浓度 $\rho_{\text{Ni}^{2+}}$ (单位 g/L)。

$$\rho_{\text{Ni}^{2+}} = \frac{C_{\text{EDTA}} V_{\text{EDTA}} M_{\text{Ni}}}{V_{\text{S}}} \quad (1)$$

式中: C_{EDTA} 为 EDTA 标准溶液的浓度 (单位 mol/L), V_{EDTA} 为滴定所消耗的 EDTA 标准溶液体积 (单位 L), M_{Ni} 为 Ni 元素的摩尔质量 (58.69 g/mol), V_{S} 为吸取的镀镍槽液体积 (单位 L)。

槽液中 Ni²⁺ 浓度上限为 6.0 g/L, 根据分析所得 Ni²⁺ 浓度, 得到相应的 RK-3188A 和 RK-3188C 补加量, 具体列于表 1。

表 1 化学镀镍槽液成分的补加量

Table 1 Replenishment amounts of different components for electroless nickel plating bath

Ni ²⁺ 活度/ %	Ni ²⁺ 质量浓度/(g·L ⁻¹)	RK-3188A 体积分数/(mL·L ⁻¹)	RK-3188C 体积分数/(mL·L ⁻¹)
100	6.0		
96.7	5.8	2	2
93.3	5.6	4	4
90.0	5.4	6	6
86.7	5.2	8	8

3 不同化学镀镍工艺对比

以 Ni 镀层的耐蚀性、外观及槽液使用周期(累计补加的镍离子总量达到开缸初始装载量时, 记为一个周期)为指标, 对比了厂家 A 的 SEXN-2002 和厂家 B 的 RK-3188 两种不同化学镀镍工艺的性能, 结果见表 2。

表 2 不同化学镀镍工艺的性能对比

Table 2 Performance comparison of different electroless nickel plating processes

化学镀镍工艺	是否进行碱性化学镀镍	Ni 镀层 NSS 试验结果	Ni 镀层外观	槽液使用周期
SEXN-2002	否	72 h 无腐蚀	半光亮深银灰色	2.0
	是	96 h 无腐蚀		3.5
RK-3188	否	96 h 无腐蚀	半光亮银灰色	5.0
	是	96 h 无腐蚀		> 5.0

注: Ni 镀层厚度都在 15 μm 左右, 均使用 ZY-30 封闭剂封闭处理。

由表 2 可知, 对于 SEXN-2002 化学镀镍工艺, 预先进行碱性化学镀镍能够显著提升 Ni 镀层的耐蚀性, 并延长槽液的使用周期。主要原因是铝件经碱性化学镀镍后表面形成了微米级 Ni 镀层, 既避免了锌在化学镀镍槽液中的直接溶解, 又为基体提供了腐蚀防护屏障。相比之下, RK-3188 工艺的槽液使用周期明显更长, 说明其槽液稳定性更好。因此, 最终选择 RK-3188 高磷化学镀镍工艺替代原来的 SEXN-2002 化学镀镍工艺。

4 封闭工艺参数优化

为满足铝合金微波壳体镀镍层的耐蚀性要求, 在 100 mm × 100 mm × 1 mm 的 5A06 铝合金方形试片上制备了厚度为 12~15 μm 的 Ni 镀层, 并采用不同浓度自研 ZY-30 封闭剂进行处理。随后, 参照 GJB 150.11A-2009 《军用装备实验室环境试验方法 第 11 部分: 盐雾试验》进行 96 h 中性盐雾(NSS) 试验, 并参照 QJ 479-1990 《金属镀覆层结合强度试验方法》通过弯曲法检测 Ni 镀层的结合力: 将试片固定在平口台钳上, 快速反复弯折 180°, 直至断裂。镀层 NSS 试验 96 h 无腐蚀即耐蚀性合格, 弯曲试验后无起皮、脱落即结合力合格, 试验结果见表 3。当封闭剂 ZY-30 的质量浓度不低于 40 g/L 时, 经封闭处理的 Ni 镀层耐蚀性能够满足要求, 但 ZY-30 质量浓度大于 50 g/L 时, 其在 Ni 镀层表面的流平性差, 封闭膜厚, 影响产品外观。因此, 自研封闭剂 ZY-30 的较佳质量浓度为 40~50 g/L。

表 3 ZY-30 封闭剂质量浓度对 Ni 镀层性能的影响

Table 3 Effect of mass concentration of ZY-30 sealant on properties of Ni coating

ZY-30 质量浓度 / (g·L ⁻¹)	镀镍层外观	结合力	耐蚀性
35	半光亮银灰色	合格	不合格
40	半光亮银灰色	合格	合格
45	半光亮银灰色	合格	合格
50	半光亮银灰色	合格	合格
55	半光亮银灰色, 封闭剂流平差	合格	合格

进一步对比了采用不同封闭剂处理时 Ni 镀层耐蚀性及其后续涂装漆膜结合力, 其中 Ni 镀层结合力测试方法同上, 漆膜结合力则参照 GB/T 9286-1998 《色漆和清漆 漆膜的划格试验》进行, 结果如表 4 所示。Ni 镀层未封闭或进行铬酸封闭时, 耐蚀性不合格, 而采用市售封闭剂 NiB-100、NiB-500 及自研 ZY-30 封闭处理后, 耐蚀性合格, 但使用 NiB-100 和 NiB-500 封闭会影响后续漆膜的结合力。

表 4 不同封闭剂的性能比较
Table 4 Performance comparison of different sealants

封闭剂	外观	Ni 镀层结合力	Ni 镀层耐蚀性	漆膜结合力
铬酸	光亮银灰色	合格	不合格	合格
市售 NiB-100	光亮银灰色	合格	合格	不合格
市售 NiB-500	光亮银灰色	合格	合格	不合格
自研 ZY-30	光亮银灰色	合格	合格	合格
未封闭	光亮银灰色	合格	不合格	合格

5 工艺改进后 Ni 镀层的性能

5.1 外观

采用改进的工艺在 100 mm × 50 mm × 1 mm 的 5A06 铝合金试片表面制备 Ni 镀层，厚度控制在 12 ~ 15 μm 之间。如图 1 所示，所得 Ni 镀层均匀连续，呈半光亮的银灰色，符合 QJ 491-1986 《化学镀镍层技术条件》中的外观要求。

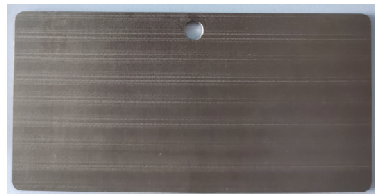


图 1 化学镀镍层的外观
Figure 1 Appearance of electrolessly plated Ni coating

5.2 磷含量

以 100 mm × 50 mm × 1 mm 的 5A06 铝合金试片为基体，制备厚度为 12 ~ 15 μm 的 Ni 镀层，并采用 Oxford Ultim Max 能谱仪 (EDS) 分析镀层 P 含量。结果显示，Ni 镀层的平均 P 质量分数为 12%，满足微波壳体 Ni 镀层 P 质量分数不低于 10% 的技术要求。

5.3 结合力

5.3.1 Ni 镀层结合力

以 100 mm × 50 mm × 1 mm 的 5A06 铝合金试片为基体，制备厚度为 12 ~ 15 μm 的 Ni 镀层，然后参照 QJ 479-1990 进行弯曲试验。从图 2 可知，Ni 镀层经弯曲试验后无起皮、脱落，说明 Ni 镀层与基体间的结合力合格。

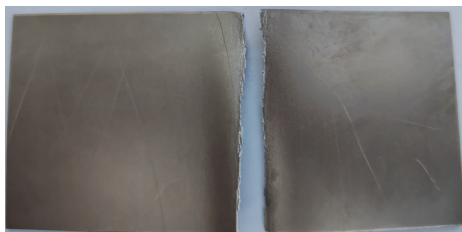


图 2 弯曲法测试结果
Figure 2 Result of flexural testing

5.3.2 漆膜结合力

以 100 mm × 100 mm × 1 mm 的 5A06 铝合金试片为基体，制备厚度为 12 ~ 15 μm 的 Ni 镀层，经封闭处理后喷涂 A04-9 飞机灰(厚度控制在 100 ~ 120 μm 之间)，随后采用划格法检测漆膜结合力。从图 3 可知，切割边缘平滑，网格内无漆膜脱落，说明漆膜与 Ni 镀层间的结合力合格。

5.4 耐蚀性

以 100 mm × 50 mm × 1 mm 的 5A06 铝合金试片为基体，制备厚度为 12 ~ 15 μm 的 Ni 镀层，再进行封闭处理，最后按照 GJB 150.11A-2009 的要求分别对未封闭处理和 ZY-30 封闭试样进行 96 h 中性盐雾试验。从图 4 可知，NSS 试验 96 h 后，ZY-30 封闭试样的 Ni 镀层无鼓泡、起皮、腐蚀等现象，说明其耐蚀性合格。

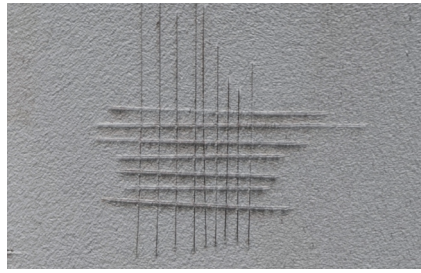


图3 划格法测试结果
Figure 3 Result of cross-cut test

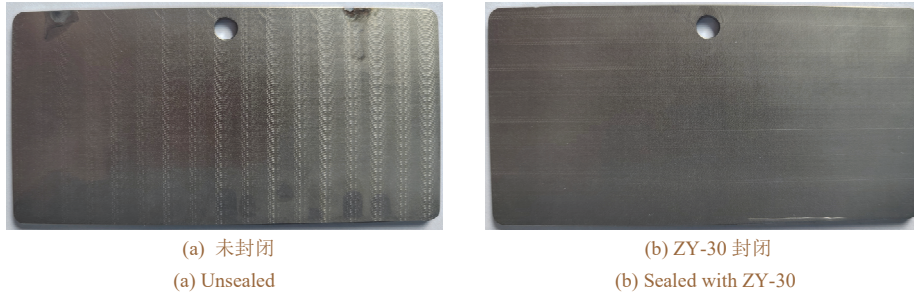


图4 未封闭和封闭试样NSS试验96h后的外观
Figure 4 Appearance of unsealed and sealed specimens after 96 hours of NSS test

6 结语

采用 RK-3188 高磷化学镀镍工艺成功在铝合金微波壳体表面制备得到半光亮的银灰色 Ni 镀层, 其与基材间的结合力满足 QJ479-1990 的要求, 并且 P 质量分数达 12%, 属于高磷镀层。进一步采用自主研发的 ZY-30 封闭剂处理后, 镀层可通过 96 h 中性盐雾试验, 耐蚀性显著提升, 并且不影响后续涂装漆膜的结合力。

目前该工艺已稳定投产近 2 年, 槽液连续使用 5 个周期不发生分解, 生产过程稳定, 产品一次交检合格率超过 98%, 具备良好的工程应用前景。

参考文献:

- [1] 付国华, 张礼学. 铝合金微波腔体表面处理工艺[J]. 电镀与涂饰, 2022, 41 (8): 571-573.
FU G H, ZHANG L X. Surface treatment of the cavity of a microwave device made of aluminum alloy [J]. Electroplating & Finishing, 2022, 41 (8): 571-573.
- [2] 孙雪松, 沈岳军, 康鑫. 铝合金基体缺陷对其表面化学镀镍综合性能的影响[J]. 电镀与涂饰, 2020, 39 (23): 1620-1624.
SUN X S, SHEN Y J, KANG X. Effects of some defects of aluminum alloy substrate on properties of nickel coating electrolessly plated on it [J]. Electroplating & Finishing, 2020, 39 (23): 1620-1624.
- [3] 刘元石, 张鲲, 苟国庆, 等. 田口法优化铝合金超声波辅助化学镀镍工艺[J]. 电镀与涂饰, 2022, 41 (11): 758-764.
LIU Y S, ZHANG K, GOU G Q, et al. Optimization for ultrasonic-assisted electroless nickel pre-plating on aluminum alloy by Taguchi method [J]. Electroplating & Finishing, 2022, 41 (11): 758-764.
- [4] 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.
- [5] 陈扬杰, 钟良, 杜广, 等. 蚕丝织物化学镀铜/镍及其电磁屏蔽性能[J]. 电镀与涂饰, 2023, 42 (5): 1-7.
CHEN Y J, ZHONG L, DU G, et al. Electroless copper/nickel plating on silk fabrics and its electromagnetic shielding property [J]. Electroplating & Finishing, 2023, 42 (5): 1-7.
- [6] 胡信国, 王殿龙, 戴长松, 等. 不同磷含量化学镀镍层的硬度和耐腐蚀性能[J]. 电镀与涂饰, 2003, 22 (3): 18-21.
HU X G, WANG D L, DAI C S, et al. Hardness and corrosion resistance of electroless Ni deposits with different phosphorus concentration [J]. Electroplating & Finishing, 2003, 22 (3): 18-21.
- [7] 李雨, 杨晨, 刘定富. 高磷化学镀镍磷合金工艺优化[J]. 电镀与涂饰, 2014, 33 (23): 1024-1026.
LI Y, YANG C, LIU D F. Optimization of electroless plating process for high-phosphorus nickel-phosphorus alloy [J]. Electroplating & Finishing, 2014, 33 (23): 1024-1026.
- [8] 沈岳军, 安远飞, 刘志运, 等. 铝合金连接器高磷化学镀镍-磷合金稳定剂的研究和应用[J]. 电镀与涂饰, 2024, 43 (11): 40-46.
SHEN Y J, AN Y F, LIU Z Y, et al. Study and application of stabilizer for high-phosphorus electroless nickel-phosphorus alloy on aluminum alloy connector [J]. Electroplating & Finishing, 2024, 43 (11): 40-46.
- [9] 李亚涛, 沈岳军. 镀液基础配方对化学镀 Ni-P-纳米 SiO₂ 的影响[J]. 广东化工, 2019, 46 (8): 80-82.
LI Y T, SHEN Y J. Effect of bath base formula on electroless Ni-P-nano-SiO₂ [J]. Guangdong Chemical Industry, 2019, 46 (8): 80-82.

【编辑: 周新莉】