铝合金常温碱性化学预镀镍工艺研究

赵 涛[1,2]，张德忠[1,2]，郭 涌[3]，丰远航[1,2]，王金玲[1,2]，张同晓[3]
（1. 中国机械总院集团武汉材料保护研究所有限公司，湖北 武汉 430030
2. 特种材料表面工程全国重点实验室，湖北 武汉 430030
3. 深圳市一真化工科技有限公司，深圳 龙岗 518100）

[摘 要]为了提高铝合金镀层的结合强度，避免传统浸锌工艺中锌离子溶解对化学镀镍槽液的污染与催化毒化，延长化学镀镍溶液的使用寿命，开发了一种适用于铝合金的常温碱性化学预镀镍工艺，可获得附着强度优异的镀层。通过正交试验，分析了镀液组分对镀层孔隙率的影响规律，并优选出镀液的最佳配方。采用控制变量法，系统考察了温度、pH 值及施镀时间对镀速、镀液稳定性与镀层附着强度的影响，并结合扫描电子显微镜（SEM）观察镀层生长的规律，明确了最佳施镀工艺参数。结果表明，预镀镍溶液的最佳配方为：硫酸镍 25.0 g/L、次磷酸钠 20.0 g/L、柠檬酸钠 40.0 g/L、加速剂 F 5.0 g/L、稳定剂 I 20.0 mg/L；确定施镀工艺范围为：常温、pH 值为 8～10、施镀时间 5.0～20.0 min。在此条件下所得镀层厚度宜控制在 0.25～0.50 μm 之间，可有效保证镀层质量。

[关键词]铝合金；常温；碱性；化学预镀镍；孔隙率；附着强度
[中图分类号] TQ153.1；TG174.44 [文献标识码] A doi：10.26935/j.issn.2097-5317.2026.0014
[文章编号] 2097-5317(2026)03-0013-07

Study on the Room-Temperature Alkaline Chemical Pre-Nickel Plating Process for Aluminum Alloys

ZHAO Tao[1,2], ZHANG Dezhong[1,2], GUO Yong[3], FENG Yuanhang[1,2], WANG Jinling[1,2],, ZHANG Tongxiao[3]
(1. China Academy of Machinery Wuhan Research Institute of Materials Protection Co., Ltd., Wuhan 430030, China
2. State Key Laboratory of Special Materials Surface Engineering, Wuhan 430030, China
3. Shenzhen Yizhen Chemical Technology Co., Ltd., Shenzhen 518100, China)

Abstract: To enhance the adhesion strength of coatings on aluminum alloys, prevent contamination and catalytic poisoning of electroless nickel plating baths caused by dissolved zinc ions in conventional zinc immersion processes, and extend the service life of electroless nickel plating solutions, a room-temperature alkaline electroless pre-nickel plating process suitable for aluminum alloys was developed, capable of producing coatings with excellent adhesion strength. Orthogonal experiments were used to

收稿日期：2026-04-03
Received：2026-04-03
通信作者：张德忠（1974-），研究员，研究领域：金属表面处理技术研发及其标准化，E-mail：dezhong8@foxmail.com
Corresponding Author：ZHANG Dezhong（1974-），Researcher，Research Focus：Development of Metal Surface Treatment Technologies and Standardization of Surface Engineering，E-mail：dezhong8@foxmail.com

analyze the influence pattern of bath components on coating porosity, and the optimal bath formulation was determined. The controlled variable method was systematically applied to investigate the effects of temperature, pH value, and plating time on plating rate, bath stability, and coating adhesion strength. In conjunction with scanning electron microscopy (SEM) observations of the growth pattern of the coating, the optimal plating process parameters were clarified. The results showed that the optimal formulation for the pre-nickel plating solution was: nickel sulfate 25.0 g/L, sodium hypophosphite 20.0 g/L, sodium citrate 40.0 g/L, accelerator F 5.0 g/L, and stabilizer I 20.0 mg/L. The optimal plating conditions were: room temperature, pH = 8–10, and a plating time of 5.0–20.0 min. Under these conditions, the resulting coating thickness should be controlled within the range of 0.25 to 0.50 μm, which can effectively ensure coating quality.

Key words: aluminum alloy; room temperature; alkaline; chemical pre-nickel plating; porosity; adhesion strength

0 前 言

铝合金化学镀镍可赋予材料极高的硬度、优良的耐蚀性及优异的焊接性能,在航空航天、电子电器、汽车等领域得到广泛应用[1]。然而,由于铝合金本身属于非活性基体,通常需先进行浸锌处理才能进行化学镀镍。传统化学镀镍工艺通常在高温、酸性条件下进行,浸锌层在此环境中易发生溶解,产生的锌离子不仅会导致镀层内应力升高、结合强度下降,还会显著降低镀液的稳定性和使用寿命[2-5]。经验表明,同一化学镀镍溶液用于钢铁基体时寿命可达到 12 个周期左右,而用于铝合金时仅为 6 个周期左右,且使用后期易出现镀层起皮、表面粗糙、光泽度下降等缺陷,大幅增加了生产成本[6,7]。

为此,本工作研究开发了一种可在常温下于沉锌层表面沉积镀层的碱性预镀镍溶液。该工艺旨在在浸锌铝材表面完整覆盖一层极薄、致密的预镀镍层,再进行常规化学镀镍,从而有效避免锌在常规镀液中的溶解与积累,延缓镀液老化,提高镀层质量,同时降低生产成本与废液排放,对推动行业可持续发展和环境保护具有重要意义。

1 试 验

1.1 基 材

采用 2024-T3 铝合金作为试验材料,尺寸 100 mm×50 mm×1 mm。

1.2 镀层制备

化学镀镍流程为:除油→碱蚀→除垢→沉锌→退锌→二次沉锌→碱性预镀镍→化学镀镍→干燥。

碱性预镀镍工艺:硫酸镍 15.0~30.0 g/L,次磷酸钠 15.0~30.0 g/L,柠檬酸钠 30.0~60.0 g/L,加速剂 F 5.0~20.0 g/L,稳定剂 I 10.0~40.0 mg/L,温度 10~50 ℃,pH 值 8~13,时间 0.5~60.0 min。

其中加速剂 F 为氟化物,能够降低反应活化能,加快沉积速度[8]。稳定剂 I 为碘酸盐,能够吸附在微小杂质上,避免引发不受控制的副反应或镀液分解,起到稳定镀液的作用[9]。

1.3 正交试验

在 25 ℃、pH 值为 9、预镀镍时间 10.0 min 条件下制备预镀镍试片,对预镀镍溶液中硫酸镍浓度、次磷酸钠浓度、柠檬酸钠浓度、加速剂 F 浓度以及稳定剂 I 浓度进行 5 因素 4 水平正交试验 L16(4^5),因素及水平选取见表 1,试验方案设计见表 2。以预镀镍镀层的孔隙率为评价指标,分析各组分浓度对镀层孔隙率的影响程度,确定预镀镍溶液的最佳组成,从而获得结构最致密的镀镍层。

表 1 因素水平表

Table 1 Factor level table

水平	因素				
	A ρ(硫酸镍)/(g·L^{-1})	B ρ(次磷酸钠)/(g·L^{-1})	C ρ(柠檬酸钠)/(g·L^{-1})	D ρ(加速剂 F)/(g·L^{-1})	E ρ(稳定剂 I)/(mg·L^{-1})
1	15.0	15.0	30.0	5.0	10.0
2	20.0	20.0	40.0	10.0	20.0
3	25.0	25.0	50.0	15.0	30.0
4	30.0	30.0	60.0	20.0	40.0

表 2 正交试验方案 L16(4^5)

Table 2 Orthogonal experiment scheme L16 (4^5)

试验号	因素					孔隙率/(个·dm^{-2})
	ρ(硫酸镍)/(g·L^{-1})	ρ(次磷酸钠)/(g·L^{-1})	ρ(柠檬酸钠)/(g·L^{-1})	ρ(加速剂 F)/(g·L^{-1})	ρ(稳定剂 I)/(mg·L^{-1})	
1	15.0	15.0	30.0	5.0	10.0	26.0
2	15.0	20.0	40.0	10.0	20.0	19.7
3	15.0	25.0	50.0	15.0	30.0	31.7

表 2(续)

试验号	因素					孔隙率/(个·dm^{-2})
	ρ(硫酸镍)/(g·L^{-1})	ρ(次磷酸钠)/(g·L^{-1})	ρ(柠檬酸钠)/(g·L^{-1})	ρ(加速剂 F)/(g·L^{-1})	ρ(稳定剂 I)/(mg·L^{-1})	
4	15.0	30.0	60.0	20.0	40.0	41.3
5	20.0	15.0	40.0	15.0	40.0	15.3
6	20.0	20.0	30.0	20.0	30.0	22.3
7	20.0	25.0	60.0	5.0	20.0	17.7
8	20.0	30.0	50.0	10.0	10.0	35.3
9	25.0	15.0	50.0	20.0	20.0	14.3
10	25.0	20.0	60.0	15.0	10.0	14.0
11	25.0	25.0	30.0	10.0	40.0	16.3
12	25.0	30.0	40.0	5.0	30.0	8.7
13	30.0	15.0	60.0	10.0	30.0	12.0
14	30.0	20.0	50.0	5.0	40.0	8.0
15	30.0	25.0	40.0	20.0	10.0	14.3
16	30.0	30.0	30.0	15.0	20.0	21.3
$k1$	29.68	16.90	21.48	15.10	22.40	-
$k2$	22.65	16.00	14.50	20.83	18.25	-
$k3$	13.33	20.00	22.33	20.58	18.68	-
$k4$	13.90	26.65	21.25	23.05	20.23	-
R	16.35	10.65	7.83	7.95	4.15	-

1.4 性能测试

(1)孔隙率:按照《电镀手册》第四版中的浸渍法[10]测量镀层孔隙率,具体方法如下:

测试液配制:将 10.0 g 白明胶浸于少量去离子水中,在水浴中加热至呈胶体溶液,冷却。另取 3.5 g 铝试剂、150.0 g 氯化钠,溶于 500 mL 去离子水中,将该溶液与上述胶体溶液混合,并用去离子水稀释至 1 L,均匀混合后备用。

测量方法:将待测试的化学镀镍试片竖直浸入测试液中静止 5.0 min,取出并用干净滤纸吸去水分,干燥后观察试片表面(正反两面)的红色斑点数,记为 N。

孔隙率计算:试片表面积为 S(dm^2),则孔隙率为 $\frac{N}{S}$ 个/dm^2。

(2)镀层厚度:使用佳谱 X 射线荧光光谱仪(XRF)测量镀层厚度,单位 μm。

(3)镀速:用镀层的厚度(μm)除以施镀时间(h)即为镀速,单位 μm/h。

(3)镀层形貌:使用 JSM-6510LV 场发射扫描电子显微镜在 5 000 倍下观察试样表面形貌。

(4)附着强度:按照 GB/T 5270-2005 中的弯曲试验和热震试验判断镀层附着强度是否合格。

(5)镀液稳定性:取 1 mL 浓度为 0.1 g/L 的氯化钯溶液加入到 50 mL 待测镀液中,观察镀液发生浑浊的时间(单位 s)。时间越长,镀液稳定性越好[11]。

2 结果与讨论

2.1 镀液组成优化

正交试验结果如表 2 所示。表中的 $k1$、$k2$、$k3$、$k4$ 分别表示各因素相应水平的孔隙率平均值,极差 R 是该因素下 4 个 ki 值的最大值与最小值之差,表示数据的离散程度。

分析极差 R 可知,各因素对孔隙率的影响从主到次依次为:硫酸镍浓度、次磷酸钠浓度、加速剂 F 浓度、柠檬酸钠浓度、稳定剂 I 浓度。

优化方案是指在所做的试验范围内,各因素较优的水平组合。各因素较优水平根据试验指标孔隙率确定,孔隙率越少,说明镀层越致密,因此应选取孔隙率少的水平(即各列 ki 中最小值对应的水平)。根据表 2 的 k 值大小排序,硫酸镍浓度列:$k3<k4<k2<k1$;次磷酸钠浓度列:$k2<k1<k3<k4$;柠檬酸钠浓度列:$k2<k4<k1<k3$;加速剂 F 浓度列:$k1<k3<k2<k4$;稳定剂 I 浓度列:$k2<k3<k4<k1$。因此,该镀液各组分的优化方案为 A3B2C2D1E2,即:硫酸镍 25.0 g/L、次磷酸钠20.0 g/L、柠檬酸钠 40.0 g/L、加速剂 F 5.0 g/L、稳定剂 I 20.0 mg/L。

2.2 工艺条件优化

2.2.1 施镀温度的影响

配制优化后的镀液,调节 pH 值为 9,通过冰水和水浴锅控制镀液温度分别为 5、10、20、30、40、50 ℃,检测镀液稳定性。在经过适当前处理的铝合金表面进行预镀镍处理,检测预镀镍溶液的镀速。在经过不同温度预镀镍处理的试片表面制备 10 μm 中磷化学镍镀层,检测镀层结合强度。

镀速随施镀温度的变化如图 1 所示。由图 1 可知,镀速随施镀温度升高而加快,且温度越高,镀速提升越快。这是因为温度越高,镀液活性越强,越容易发生镍离子还原沉积反应,因此镀速越快。

镀液稳定性随温度的变化如图 2 所示。由图 2

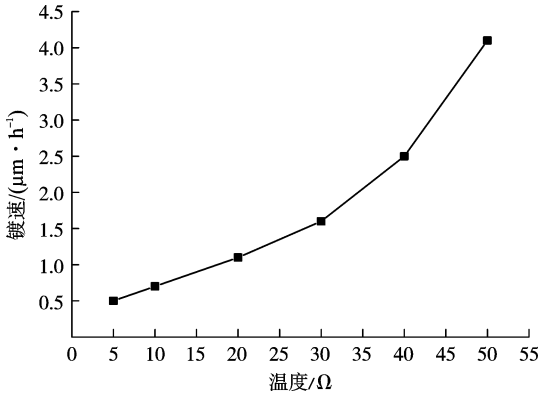


图 1　镀速随施镀温度的变化曲线

Fig. 1　Curve of plating rate with plating temperature

可知,镀液稳定性随施镀温度升高而降低,与镀速呈现的规律相反。这是因为温度越高,镀液活性越强,镍离子容易在催化活性点发生还原反应,导致镀液分解[12]。

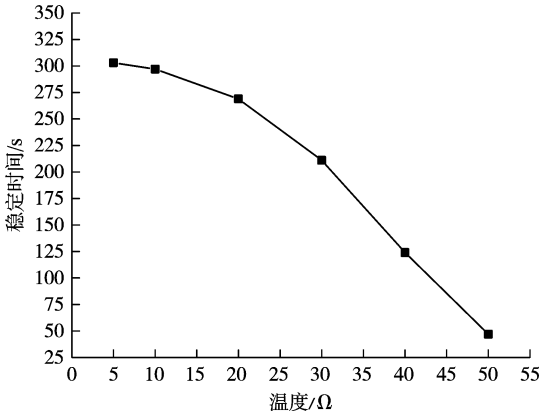


图 2　镀液稳定性随温度的变化曲线

Fig. 2　Curve of plating solution stability with temperature

镀层附着强度随温度的变化如表 3 所示。

表 3　镀层附着强度随温度的变化

Table 3　Variation of coating adhesion strength with temperature

预镀镍温度/℃	5	10	20	30	40	50
热震试验	鼓泡	合格	合格	合格	合格	合格
弯折试验	起皮	合格	合格	合格	合格	合格

由表 3 可知,预镀镍温度在 5 ℃时镀层附着强度不足,温度升高至 10~50 ℃范围时制备的镀层附着强度合格。这是因为温度低时镀液活性差,沉积速度慢,预镀镍层未能完全覆盖基体和沉锌层,裸露的锌层在后续的酸性镀液中发生部分溶解,甚至发生铝基材腐蚀,溶解产生的锌、铝离子会影响镀液质量,导致镀层应力升高,结合强度变差,同时还会降低镀液稳定性和使用寿命[13]。

试验结果说明预镀镍温度应控制在 10~40 ℃内,即在常温状态下可获得结合力合格的镀层。

2.2.2 镀液 pH 值的影响

按最优配方配制镀液,通过 1+1 氨水和 20%的硫酸溶液调节镀液 pH 值分别为 7、8、9、10、11,保持镀液温度为 25 ℃,检测镀速和镀液稳定性。在经过不同 pH 值镀液预镀镍处理的试片表面制备 10 μm 中磷化学镍镀层,检测镀层附着强度。

镀速随镀液 pH 值的变化如图 3 所示。由图 3 可知,随预镀镍溶液 pH 值升高,镀速逐渐加快。这是因为次磷酸钠在碱性条件下更易解离出具有强还原性的 H^-离子或直接释放电子,加速镍离子的还原反应,因此镀速加快[14]。

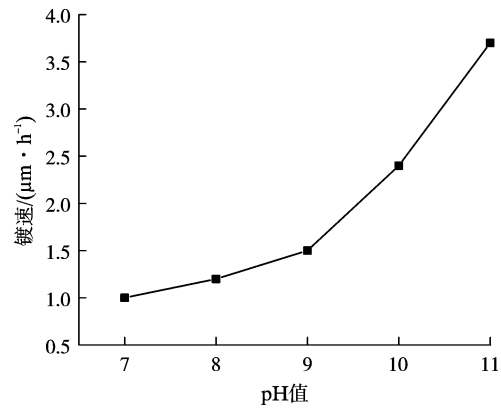


图 3　镀速随镀液 pH 值的变化曲线

Fig. 3　Curve of plating rate with pH of plating solution

$$H_2PO_2^- + 3OH^- \rightarrow HPO_3^{2-} + 2H_2O + 2e$$

镀液稳定性随镀液 pH 值的变化如图 4 所示。

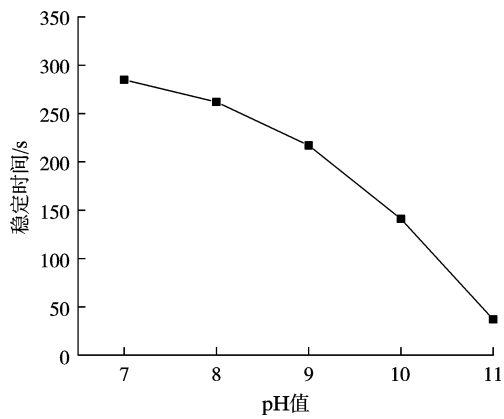


图 4　镀液稳定性随镀液 pH 值的变化曲线

Fig. 4　Curve of plating solution stability with pH of plating solution

由图 4 可知,随预镀镍溶液 pH 值升高,镀液稳定性逐渐降低,pH 值至 11 时,镀液快速分解。这是因为

pH 值过高时反应活性增强,镍离子非常容易在非活性表面发生还原沉积,因而稳定性变差,甚至发生分解。

镀层附着强度随 pH 值的变化如表 4 所示。

表 4　镀层附着强度随 pH 值的变化

Table 4　Variation of coating adhesion strength with pH value

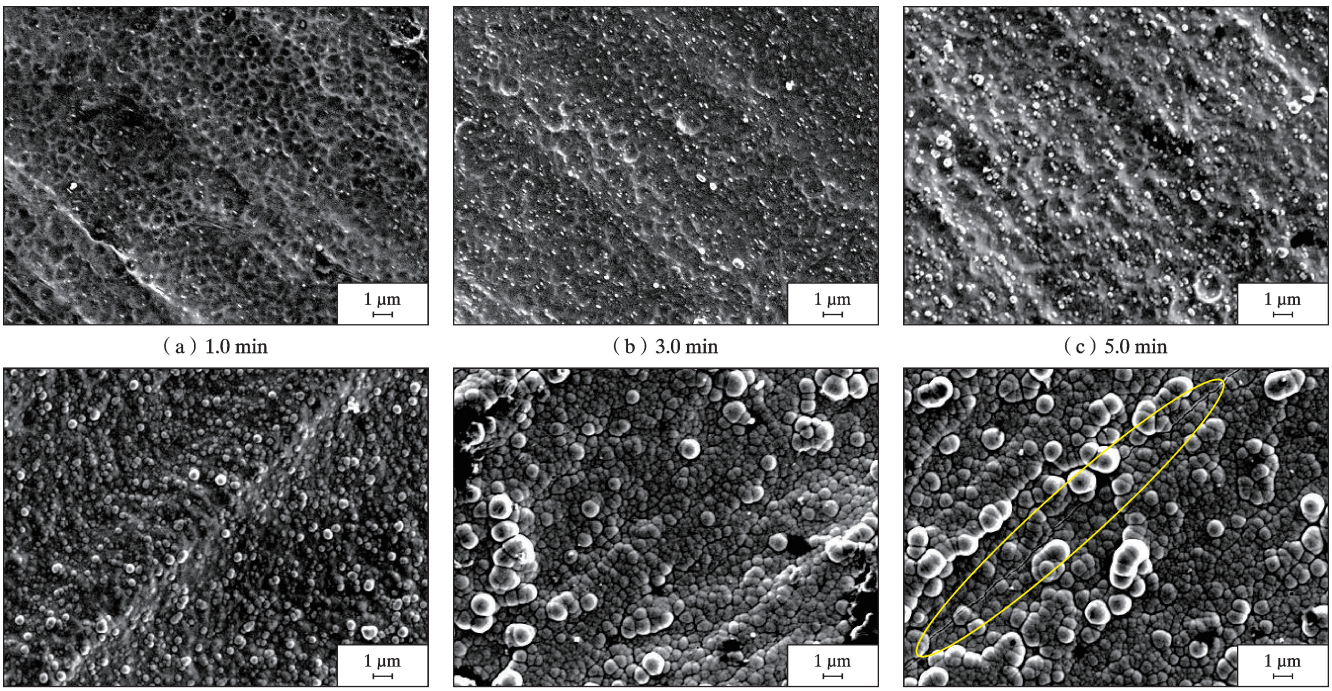
pH 值	7	8	9	10	11
热震试验	合格	合格	合格	合格	开裂、起皮
弯折试验	起皮	合格	合格	合格	起皮

由表 4 可知,预镀镍溶液 pH 值为 7 时制备的试片经过弯折试验镀层边缘起皮,附着强度差,这是因为预镀镍层厚度不足。pH 值在 8~10 时制备的镀层附着强度合格。pH 值为 11 时制备的试片经过试验产生开裂起皮现象,这是因为 pH 值过高导致镀液活性过强,沉积的镀层粗糙、致密性不足[15]。

综上,预镀镍溶液的 pH 值应控制在 8~10。

2.2.3　施镀时间的影响

配制优化后的镀液,调节 pH 值为 9,控制镀液温度为 25 ℃,预镀镍 1.0、3.0、5.0、10.0、20.0、30.0 min,使用场发射扫描电镜,在 5 000 倍放大倍数下观察镀层试样的微观形貌,分析镀层在不同阶段的生长过程,结果如图 5 所示。



(a) 1.0 min　(b) 3.0 min　(c) 5.0 min

(d) 10.0 min　(e) 20.0 min　(f) 30.0 min

图 5　施镀不同时间的微观形貌

Fig. 5　Microstructure after plating for different times

由图 5 可知,施镀初期(1.0~5.0 min)镀层呈典型“岛状生长”模式:施镀 1.0 min 时基材表面出现少量微小晶核(图 5a),表明 Ni-P 镀层开始在活性位点沉积;3.0~5.0 min 时晶核逐渐增多、长大,但仍分散且不连续,镀层处于扩展阶段(图 5b、5c);10.0 min 时晶粒尺寸显著增大、分布密集,开始呈现连续膜特征(图 5d);20.0 min 时晶粒进一步长大并填补间隙,镀层均匀性与致密性显著提升,镀层已完全覆盖基材表面(图 5e);30.0 min 时晶粒继续长大,但表面出现线性缝隙(图 5f),结合缝隙分布特征,判定主要为沿晶断裂,伴少量穿晶断裂,分析原因如下:

沿晶断裂:化学镀 Ni-P 合金中,磷原子具有较强的晶界偏析倾向,易在晶界富集形成偏析层,降低晶界内聚能[16]。同时,偏析层还会提高氢原子在晶界的溶解度与滞留时间,导致大量固溶氢原子向晶界迁移并富集,进而复合为 H_2 分子,产生极高局部内压。晶界内聚能降低与 H_2 内压升高的协同作用,使晶界成为裂纹萌生的优先位置,最终引发沿晶断裂。

穿晶断裂:Ni-P 镀层为面心立方(FCC)结构,析氢产生的氢原子易占据晶格间隙,引起晶格畸变与体积膨胀,产生内应力。当应力超过晶内结合强度时,即发生穿晶断裂[17]。

协同效应:30.0 min 沉积的镀层厚度可能超过临界值,在铝基体的刚性约束下无法通过塑性变形松弛

内应力。晶界氢脆(沿晶弱化)与内应力累积的协同作用,促使镀层通过开裂释放应变能,最终形成如图 5f 中的裂纹。

镀层附着强度随预镀镍时间的变化如表 5 所示。由表 5 可知,预镀镍时间≤3.0 min 时,试片试验后边缘出现起皮,镀层附着强度不足,这是因为预镀镍层厚度不足。预镀镍时间在 5.0~20.0 min 内,镀层附着强度测试均合格,说明预镀镍层提高了镀层的附着强度[18]。预镀镍时间 30.0 min 时制备的镀层附着强度测试出现裂纹。

表 5 镀层附着强度随预镀镍时间的变化

Table 5 Variation of coating adhesion strength with pre-nickel plating times

预镀镍时间/min	1.0	3.0	5.0	10.0	20.0	30.0
热震试验	鼓泡	鼓泡	合格	合格	合格	裂纹
弯折试验	起皮	起皮	合格	合格	合格	裂纹

综上,预镀镍的时间应控制在 5.0~20.0 min。

3 结 论

(1)预镀镍溶液中各组分对镀层孔隙率的影响顺序依次为:硫酸镍浓度>次磷酸钠浓度>加速剂 F 浓度>柠檬酸钠浓度>稳定剂 I 浓度,预镀镍溶液的最佳组成为硫酸镍 25.0 g/L、次磷酸钠 20.0 g/L、柠檬酸钠 40.0 g/L、加速剂 F 5.0 g/L、稳定剂 I 20.0 mg/L。

(2)施镀工艺会影响镀速和镀液稳定性,温度和 pH 值越高,镀速越快,但镀液稳定性越差,还可能会导致镀层粗大、应力升高,影响后续镀层的性能。镀层厚度应控制在 0.25~0.50 μm,过薄难以起到过渡层的作用,过厚会导致镀层应力升高,脆性增大。基于此,确定施镀工艺范围为:常温、pH 值 8~10、施镀时间 5.0~20.0 min。

[参 考 文 献]

[1] 陈远军, 刘锦云, 王 敏, 等. 1060 铝化学镀镍直接置换锌前处理工艺[J]. 表面技术, 2013, 42(5): 77-80.
CHEN Y J, LIU J Y, WANG M, et al. Pretreatment of Electroless Ni-P Coating on 1060 Aluminum Substrate by Replacing Zinc Directly[J]. Surface Technology, 2013, 42(5): 77-80.

[2] 胡芳珍, 张阳阳, 崔 兵. 建筑用铝合金表面电镀工艺及应用性能[J]. 电镀与精饰, 2026, 48(2): 112-120.
HU Z F, ZHANG Y Y, CUI B. Surface electroplating technology and application performance of aluminum alloy for construction[J]. Plating & Finishing, 2026, 48(2): 112-120.

[3] 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. Research on Pretreatment Technology for Aluminum Alloy Electroplating[J]. Metallurgy and Materials, 2022, 14(1): 67-68.

[4] 丁运虎, 黄兴林, 邓华才, 等. 高硅铝合金电镀环保前处理技术研究[J]. 材料保护, 2017, 50(4): 55-57.
DING Y H, HUANG X L, DENG H C, et al. Environmentally Friendly Pretreatment Technology on High-Silicon Aluminum Alloy before Electroplating[J]. Materials Protection, 2017, 50(4): 55-57.

[5] 李大洋, 熊俊良. 铝合金电镀金鼓包原因分析及解决措施[J]. 电镀与精饰, 2024, 46(7): 111-115.
LI D Y, XIONG J L. Analysis and solution measures for the cause of gold bulging in aluminum alloy electroplating[J]. Plating & Finishing, 2024, 46(7): 111-115.

[6] 肖发新, 任永鹏, 申晓妮. 硫脲对低温碱性化学镀镍的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2013, 25(2): 138-142.
XIAO F X, REN Y P, SHEN X N. Influence of Thiourea on Electroless Ni Plating in Alkaline Bath at Low Temperature[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2013, 25(2): 138-142.

[7] 沈 伟. 铝件化学镀镍工艺[J]. 表面工程资讯, 2005(2): 36.
SHEN W. Chemical nickel plating process for aluminum parts[J]. Information of Surface Engineering, 2005(2): 36.

[8] 孙瑞雪. 镁合金化学镀镍沉积效率和次亚磷酸钠还原效率的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
SUN R X. Study of deposition efficiency of nickel and reduction efficiency of sodium hypophosphite in electroless nickel plating on magnesium alloy[D]. Changsha: Hunan University, 2014.

[9] 唐方宇, 湛延基, 王春霞, 等. 稳定剂对化学镀镍性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2024, 46(8): 30-35.
TANG F Y, ZHAN Y J, WANG C X, et al. Effect of stabilizers on the properties of electroless nickel plating[J]. Plating & Finishing, 2024, 46(8): 30-35.

[10] 张允诚, 胡如南, 向 荣, 等. 电镀手册[M]. 第四版. 北京: 国防工业出版社, 2011:693-694.
ZHANG Y C, HU R N, XIANG R, et al. Electroplating Handbook[M]. 4th Eds. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 693-694.

[11] 赵 涛, 张德忠, 毛祖国. 氯化钯实验评价化学镀镍溶

液稳定性的方法与优化[J]. 电镀与精饰, 2019, 41(10): 43-46.
ZHAO T, ZHANG D Z, MAO Z G. Method and Optimization of Palladium Chloride Test for Evaluating the Stability of Electroless Nickel Plating Solution[J]. Plating & Finishing, 2019, 41(10): 43-46.

[12] 孙 硕, 宋贡生, 马正华. 铝基化学镀镍浸镍前处理的研究进展[J]. 表面技术, 2015, 44(11): 21-28.
SUN S, SONG G S, MA Z H. Development of Nickel Immersion Pretreatment of Electroless Nickel Plating on Al Alloy Surface[J]. Surface Technology, 2015, 44(11): 21-28.

[13] 李 兵, 李 宁, 周保平, 等. 环保型低温快速化学镀镍磷合金新技术原理及研究进展[J]. 材料保护, 2019, 52(10): 116-126.
LI B, LI N, ZHOU B P, et al. New Technology Principle and Research Progress for Environmental Rapid Electroless Ni-P Plating at Low Temperature[J]. Materials Protection, 2019, 52(10): 116-126.

[14] 孙 硕, 宋贡生, 马正华. 预化学镀镍时间对铝基化学镀镍层性能的影响[J]. 表面技术, 2016, 45(1): 49-54.
SUN S, SONG G S, MA Z H. Effect of Electroless Nickel Pre-plating Time on Properties of Electroless Nickel on Aluminum[J]. Surface Technology, 2016, 45(1): 49-54.

[15] 朱 力, 丁 毅, 文江平. 铝合金表面碱性化学镀镍工艺研究[J]. 表面技术, 2008(2): 59-60.
ZHU L, DING Y, WEN J P. Study on Alkaline Electroless Nickel Plating Technology for Aluminum Alloys[J]. Surface Technology, 2008(2): 59-60.

[16] 崔国峰. 化学镀镍磷合金过程中磷的析出及其对镀层性能的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
CUI G F. The phosphorous incorporation process in electroless-deposition Ni-P alloy and its effect on properties of Ni-P coatings[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.

[17] 靳惠聪, 张林楠, 刘晓军. 铝合金表面化学镀镍-磷工艺与镀层结构研究[J]. 化学工程与装备, 2011(11): 30-33.
JIN H C, ZHANG L N, LIU X J. Research on the Chemical Nickel-Phosphorus Plating Process and Coating Structure on Aluminum Alloy Surfaces[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2011, (11): 30-33.

[18] 黄草明. 香豆素添加剂对低温碱性化学镀镍-磷的影响[J]. 材料保护, 2012, 45(5): 12-14.
HUANG C M. Influence of Coumarin Additive on Deposition Rate as well as Microstructure and Performance of Electroless Ni-P Alloy Coating in Alkaline Bath at Low Temperature[J]. Materials Protection, 2012, 45(5): 12-14.

[编校:陈 鸣]