

LZ91 镁锂合金化学镀镍工艺

郭晓光^{1,2}, 解海涛^{1,2}, 刘旭贺^{1,2}, 肖阳^{1,2}, 姚玮¹

(1. 郑州轻金属研究院 金属材料研究所, 郑州 450041;

2. 郑州轻研合金科技有限公司, 郑州 450041)

摘要: 目的 为了改善 LZ91 镁锂合金的耐蚀性能, 以扩大其适用范围。方法 在前期试验的基础上, 通过正交实验探索不同镀镍配方及工艺对 LZ91 镁锂合金化学镀镍过程, 及镍磷合金镀层形貌、孔隙率、自腐蚀电流密度等的影响。结果 优化工艺条件为: 主盐乙酸镍 20 g/L, 还原剂次亚磷酸钠 20 g/L, 络合剂柠檬酸 6 g/L, 氟化氢铵 20 g/L, 氢氟酸 12 mL/L, 氨水少量, 温度 85 °C, pH=7.4。采用优化后的工艺镀镍得到镀层的厚度为 5~7 μm, 表面孔隙率较低, 自腐蚀电位为 -0.3806 V, 较未处理 Mg-Li 合金正移 1.356 V, 自腐蚀电流密度为 1.97×10^{-7} A/cm², 较未处理 Mg-Li 合金降低两个数量级, 96 h 盐雾测试性能符合军工标准。结论 采用优化后工艺所得的镀层能够起到改善合金耐蚀性能的作用。

关键词: 镁锂合金; 腐蚀; 化学镀; 自腐蚀电位; 孔隙率; 盐雾

中图分类号: TG174.441 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)12-0043-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.12.007

Electroless Nickel Plating Process of LZ91 Magnesium-Lithium Alloy

GUO Xiao-guang^{1,2}, XIE Hai-tao^{1,2}, LIU Xu-he^{1,2}, XIAO Yang^{1,2}, YAO Wei¹

(1. Zhengzhou Light Metals Research Institute of CHALCO, Zhengzhou 450041, China;

2. Zhengzhou Light Metals Research Institute for Alloy Technology, Zhengzhou 450041, China)

ABSTRACT: The work aims to improve corrosion resistance and expand application scope of LZ91 Mg-Li alloy. Based on pre-experiments, the effects of different formulations and processes of nickel plating on the process of electroless nickel plating, morphology, porosity, corrosion current density of Ni-P alloy coating were studied by means of orthogonal experiment. Optimized process conditions of nickel plating were confirmed: primary nickel acetate of 20 g/L, reducing hypophosphite of 20 g/L, complexing agent citric of 6 g/L, ammonium hydrogen fluoride of 20 g/L, hydrofluoric acid of 12 mL/L, a small amount of ammonia, temperature of 85 °C and pH=7.4. Admirable nickel coating was obtained in the optimized process conditions with the thickness of 5~7 μm, low surface porosity, self-corrosion potential of -0.3806 V (increased by 1.356 V compared with untreated Mg-Li alloy) and self corrosion current density of 1.97×10^{-7} A/cm² (decreased by two orders of magnitudes). Owing to protection by the coating, the sample passed 96 h-salt spray test successfully and met military standards. Corrosion resistance of Mg-Li

收稿日期: 2016-02-15; 修订日期: 2016-04-28

Received: 2016-02-15; Revised: 2016-04-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51371161); 国家国际科技合作专项 (2015DFR0020)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51371161); International S&T Cooperation Program of China (IS-TCP)(2015DFR0020)

作者简介: 郭晓光 (1989—), 男, 硕士, 研究方向为轻金属材料研究。

Biography: GUO Xiao-guang(1989—), Male, Master, Research focus: metal materials corrosion and protection.

通讯作者: 肖阳 (1975—), 男, 博士, 高工, 研究方向为金属材料研究。

Corresponding author: XIAO Yang(1975—), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: metal materials research.

alloy can be improved by the coating made by taking advantage of optimized process.

KEY WORDS: Mg-Li alloy; corrosion; electroless plating; self-corrosion potential; porosity; salt spray

Mg-Li 合金是目前最轻的金属结构材料,密度一般为 $1.35\sim 1.65\text{ g/cm}^3$,是发展超轻高强合金最具潜力的镁合金系之一^[1],其质量是普通镁合金的 $2/3\sim 3/4$,是铝合金的 $1/2\sim 2/3$ 。它具有比强度高、比刚度高和优良的抗震性能及抗高能粒子穿透能力等优点,是兵器工业、核工业、汽车、医疗器械等领域最理想的结构材料之一^[2-3],在航空航天和电子等工业更受人们的青睐^[4-5]。镁锂合金的耐蚀性较差^[6],导致其难以在工作环境中长期保持高强度,极大地限制了它的应用。镁锂合金防腐处理对其应用十分重要。

相对于其他表面处理方式^[7-10],化学镀具有镀层厚度均匀、孔隙率低、耐磨性和耐腐蚀性好、硬度高和操作方便等优点^[11-12]。国内外对镁合金化学镀镍工艺的研究有很多^[13],由于锂元素的加入,镁锂合金的化学活性明显高于 AZ31、AZ91 等镁合金,对应的镀镍工艺也需进行调整,不同化学镀镍工艺对化学镀过程及镀层性能有很大的影响,文中采用正交实验对镁锂合金化学镀工艺进行优化。

1 实验

1.1 材料

选用 LZ91 镁锂合金,合金主要成分(以质量分数计)为:Li 9.31%,Zn 0.45%,Al 0.26%,Mg 余量。采用真空炉熔炼合金,将铸锭经挤压、轧制成 3 mm 厚的板材,加工成 $40\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ 的试样。为便于悬挂,在试样上钻直径为 2 mm 的孔,将试样依次用 150[#]、600[#]、1000[#]和 1500[#]水性砂纸打磨后,经无水乙醇清洗备用。

1.2 方法

1.2.1 前处理

酒精超声清洗:将磨好的试样在无水乙醇中超声清洗 10~15 min。

碱洗:NaOH 30 g/L, Na_2CO_3 24 g/L, Na_3PO_4 16 g/L,温度 80 ℃,搅拌 10 min。

酸洗: H_3PO_4 (质量分数为 70%)2 mL/L, HNO_3

(质量分数为 65%) 10 mL/L,为降低酸液对合金试样的腐蚀,添加 1 g/L 的 NaF 作为缓蚀剂,反应条件为室温 5~30 s。

活化: NH_4HF_2 200 g/L,室温 1~5 min。

1.2.2 化学镀镍

根据基础试验所得特征值,对主盐浓度、还原剂浓度、络合剂浓度、温度及 pH 值等 5 个因素各取 4 个水平,按 $L_{16}(4^5)$ 进行正交试验,镀液其他成分有氟化氢铵 20 g/L,氢氟酸 12 mL/L,氨水少量,浸镀 30 min。

1.3 性能检测

采用日本电子公司的 JSM-6360 LV 型扫描电子显微镜(SEM)对镀镍后试样进行分析,观察镀层表面及截面状态,并用其附带的能谱仪(EDS)对试样特定位置成分进行分析。采用日本理学仪器生产的 Ultima IV 型 X 射线衍射分析仪(XRD)对镀镍后试样表面物相进行分析。采用 RST5200 电化学工作站测试镀镍样品的极化曲线,通过数据拟合,得到样品自腐蚀电位及自腐蚀电流密度。用金相显微镜观察镀镍后试样剖面,以确定镀层厚度。采用贴滤纸法对镀层孔隙率进行测试,测试溶液: $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 10 g/L,NaCl 20 g/L。根据 GJB 150.11A—2009 对试样进行处理,测试条件为:5%NaCl 溶液,周期 96 h。

2 结果与讨论

2.1 正交试验及结果分析

实验条件及对应指标值见表 1,对应结果分析见表 2。结合实验现象可知,主盐浓度过低会导致镀镍过程缓慢,浓度过高会使镀液稳定性降低,温度低会使镀镍反应缓慢,温度高也会导致镀液过快分解。

对于镀层厚度, $R_C > R_A > R_E > R_B > R_D$,所以络合剂浓度对镀层厚度的影响最大,依次为主盐浓度、pH、还原剂浓度,而温度的影响相对较小。对于镀层厚度, C1A3E3B2D4 为优化水平。

表 1 正交实验检测结果
Table1 Results of orthogonal experimental test

	Factors					Test results		
	A(Nickel salt)/(mol·L ⁻¹)	B(Reducing agent)/(mol·L ⁻¹)	C(Complexing agent)/(mol·L ⁻¹)	D(Temperature)/°C	E(pH)	Coating thickness/μm	Corrosion current density/(10 ⁻⁷ A·cm ⁻²)	Porosity /(count·cm ⁻²)
1	10(1)	10(1)	6(1)	75(1)	6(1)	1.72	13.5	1.99
2	10(1)	15(2)	9(2)	80(2)	6.7(2)	3.87	9.32	4.41
3	10(1)	20(3)	12(3)	85(3)	7.4(3)	4.27	5.08	0.22
4	10(1)	25(4)	15(4)	90(4)	8.1(4)	3.51	4.72	0.66
5	15(2)	10(1)	9(2)	85(3)	8.1(4)	6.00	12.3	1.32
6	15(2)	15(2)	6(1)	90(4)	7.4(3)	10.42	6.10	0.44
7	15(2)	20(3)	15(4)	75(1)	6.7(2)	2.45	3.39	2.43
8	15(2)	25(4)	12(3)	80(2)	6(1)	3.35	2.10	2.50
9	20(3)	10(1)	12(3)	90(4)	6.7(2)	4.80	11.6	3.31
10	20(3)	15(2)	15(4)	85(3)	6(1)	3.33	6.31	3.01
11	20(3)	20(3)	6(1)	80(2)	8.1(4)	8.85	3.54	3.31
12	20(3)	25(4)	9(2)	75(1)	7.4(3)	8.16	9.94	0.66
13	25(4)	10(1)	15(4)	80(2)	7.4(3)	3.37	9.95	4.63
14	25(4)	15(2)	12(3)	75(1)	8.1(4)	6.70	6.91	3.31
15	25(4)	20(3)	9(2)	90(4)	6(1)	7.04	4.33	0.81
16	25(4)	25(4)	6(1)	85(3)	6.7(2)	7.67	6.86	0.29

表 2 正交实验数据处理
Tab.2 Data processing table of orthogonal experiment

		Nickel salt	Reducing agent	Complexing agent	Temperature	pH
Coating thick- ness/μm	K1	13.39	15.91	28.69	19.05	15.46
	K2	22.24	24.34	25.08	19.46	18.82
	K3	25.16	22.63	19.14	21.28	26.23
	K4	24.80	22.72	12.67	25.79	25.08
	k1	3.35	3.98	7.17	4.76	3.86
	k2	5.56	6.08	6.27	4.87	4.71
	k3	6.29	5.66	4.79	5.32	6.56
	k4	6.20	5.68	3.17	6.45	6.27
	R	2.94	2.11	4.00	1.69	2.69
	Optimization result	A3	B2	C1	D4	E3
Corrosion cur- rent density/ (10 ⁻⁷ A·cm ⁻²)	K1	32.7	47.4	30	33.8	26.3
	K2	23.9	28.6	35.9	24.9	31.2
	K3	31.4	16.3	25.7	30.5	31.1
	K4	28	23.6	24.4	26.8	27.5
	k1	8.16	1.18	7.51	8.45	6.57
	k2	5.97	7.16	8.97	6.23	7.79
	k3	7.85	4.09	6.43	7.63	7.77
	k4	7.01	5.9	6.09	6.69	6.87
	R	-2.19	-7.76	-2.87	-2.219	-1.2
	Optimization result	A2	B3	C4	D2	E1
Porosity /(ind·cm ⁻²)	K1	7.28	11.25	6.03	8.38	8.31
	K2	6.69	11.18	7.21	14.85	10.44
	K3	10.29	6.76	9.34	4.85	5.96
	K4	9.04	4.12	10.74	5.22	8.60
	k1	1.82	2.81	1.51	2.10	2.08
	k2	1.67	2.79	1.80	3.71	2.61
	k3	2.57	1.69	2.33	1.21	1.49
	k4	2.26	1.03	2.68	1.31	2.15
	R	0.90	1.76	1.18	2.50	1.12
	Optimization result	A2	B4	C1	D3	E3

对于镀层自腐蚀电流密度, $R_B > R_C > R_D > R_A > R_E$, 所以还原剂浓度对自腐蚀电流密度的影响最大, 其次是络合剂浓度、温度、主盐浓度, 而 pH 的影响最小。对于镀层自腐蚀电流密度, B3C4D2A2E1 为优化水平。

对于镀层孔隙率, $R_D > R_B > R_C > R_E > R_A$, 所以温度对镀层孔隙率的影响最大, 其次是主盐浓度、络合剂浓度、pH, 而还原剂浓度的影响较小。对于镀层孔隙率, D3B4C1E3A2 为优化水平。

以上三项指标单独分析出的优化条件不一致, 必须根据因素极差的大小, 综合分析, 选出最优工艺条件。

对于主盐浓度(因素 A), 其对镀层厚度的影响排在第二位, 对其他指标的影响均排在后几位, 因此主盐浓度取 A3 水平, 即 20 g/L。

对于还原剂浓度(因素 B), 其对镀层自腐蚀电流密度的影响排在首位, 此时取 B3; 其对孔隙率的影响排在第二位, 此时取 B3; 对镀层厚度的影响均排在第四位, 所以因素 B 取 B3, 即还原剂浓度取 20 g/L。

对于络合剂浓度(因素 C), 其对镀层厚度的影响排在首位, 此时取 C1; 其对自腐蚀电流密度的影响排在第二位, 此时取 C4; 对孔隙率的影响排在第三位, 综合考虑, 因素 C 取 C1, 即络合剂浓度取 6 g/L。

对于温度(因素 D), 其对镀层孔隙率的影响排在首位, 为主要因素, 此时取 D3; 其对自腐蚀电流密度的影响排在第二位, 此时取 D2; 对镀层厚度的影响排在最后, 所以因素 D 取 D3, 即温度取 85℃。

对于 pH 值(因素 E), 其对镀层厚度的影响排在第三位, 此时取 E3; 对其他因素的影响排在后几位, 所以因素 E 取 E3, 即 pH 取 7.4。

经综合比对各因素对指标值的影响程度, 优化水平组合为 A3B3C1D3E3, 从而得出镀液的最优配方及工艺条件为: 主盐乙酸镍 20 g/L, 还原剂次亚磷酸钠 20 g/L, 络合剂柠檬酸 6 g/L, 温度 85℃, pH=7.4。

2.2 优化后工艺试验及检测

采用优化后的工艺对合金试样进行镀镍, 反应 30 min 所得镍磷合金形貌见图 1。可见镍磷合金胞

体尺寸约为 5~10 μm, 紧密堆积, 胞体间不存在孔隙。采用扫描电镜附带的能谱仪对所得镍磷合金成分进行分析见图 2, 可以看出 Ni 的质量分数为 94.63%, P 的质量分数约为 5.37%, 为低磷合金镀层。

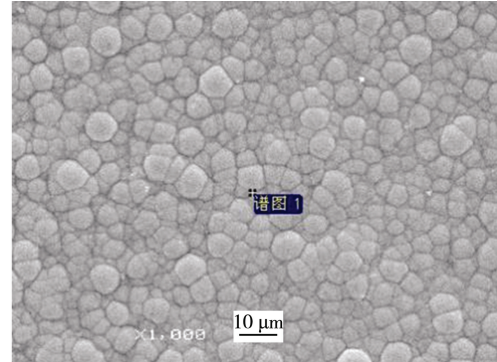


图 1 镍磷镀层显微形貌
Fig.1 Microstructure of Ni-P coating

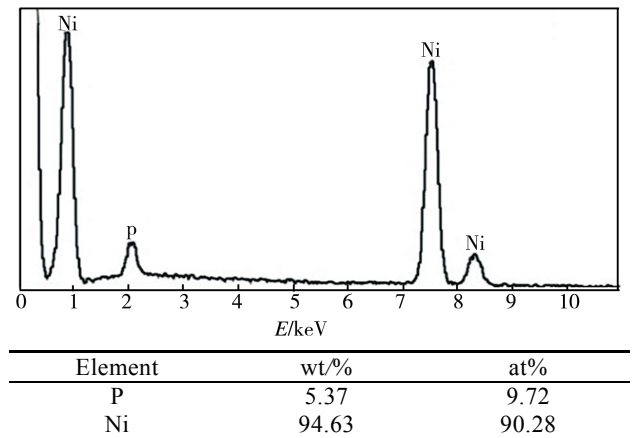


图 2 镍磷合金镀层能谱图
Fig.2 EDS of Ni-P coating

图 3 为镀层截面显微组织, 可见镍磷镀层厚度均匀, 与基体结合致密, 界面不存在间隙。

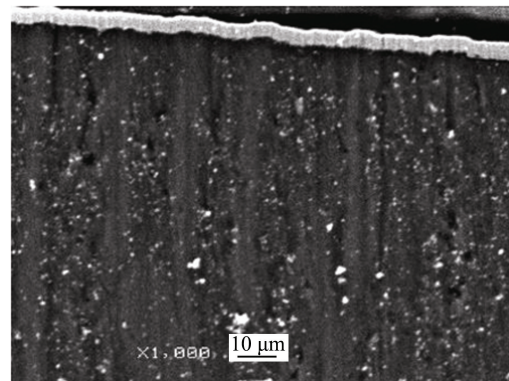


图 3 镍磷合金镀层截面显微形貌
Fig.3 Cross section morphology of Ni-P coating

镍磷合金镀层与未处理 Mg-Li 合金极化曲线

见图 4，可以看出镀镍后试样的自腐蚀电位为 -0.3806 V ，未处理 Mg-Li 合金的自腐蚀电位为 -1.7366 V ，处理后正移 1.356 V 。使用电化学工作站自带的分析软件对数据进行拟合处理，得到试样的自腐蚀电流密度，未处理 Mg-Li 的自腐蚀电流密度为 $3.49\times 10^{-5}\text{ A/cm}^2$ ，镀镍后的自腐蚀电流密度为 $1.97\times 10^{-7}\text{ A/cm}^2$ ，降低了两个数量级。

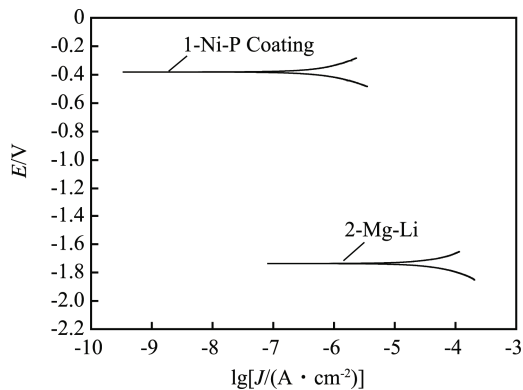


图 4 镍磷合金与 Mg-Li 合金极化曲线
Fig.4 Polarization curves of Ni-P coating and magnesium-lithium alloy

对所得镍磷合金镀层进行 XRD 分析见图 5。镍磷合金的特征峰在 45° 角出现“馒头”峰，表明镀层属于非晶态结构，这种非晶结构没有晶界、位错及成分偏析等现象，在腐蚀介质中不易形成腐蚀微电池，化学镀 Ni-P 涂层的显微结构为其提供了优异的耐蚀性能。

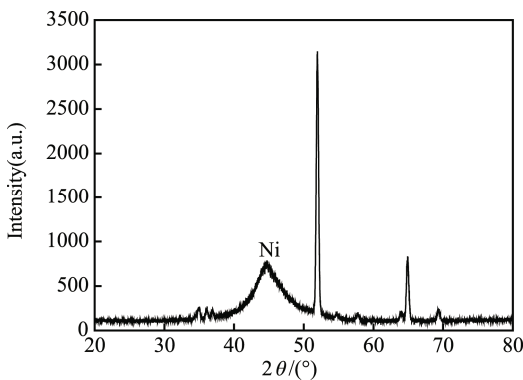


图 5 镍磷合金 XRD 图谱
Fig.5 XRD of Ni-P coating on magnesium-lithium alloy

为反应镀层与基体界面结合力的强弱，将镀件固定在工作台上，用刮刀在试样表面划间隔 2 mm 横纵相交的直线。结果发现：镀层与基体镁合金之间的划痕明显，未发现镀层与基体间存在开裂、起皮的现象，说明镀层与基体之间的结合力良好，划痕形貌见图 6。将镀件置于电加热炉中加热至

$250\text{ }^\circ\text{C}$ ，并保温 1 h 后，取出急冷，反复 5 次，镀层完好，也说明镀层与基体的结合力良好。

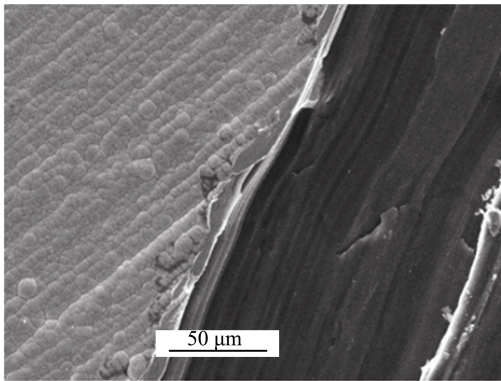


图 6 镍磷合金镀层划痕形貌
Fig.6 Microstructure of scratch on Ni-P coating

为更好地预测镀层在实际环境中的耐蚀性能，选用中性盐雾（NSS）实验，将镀镍样品，未处理 Mg-Li 合金样品称量后同时放入盐雾箱中，采用国家标准规定的 96 h 间歇喷雾方式（喷雾 24 h —干燥 24 h —喷雾 24 h —干燥 24 h ）进行处理。处理后采用 200 g/L 的 CrO_3 溶液去除试样表面的腐蚀产物，称量腐蚀后质量，计算腐蚀速率见表 3。未处理 Mg-Li 试样盐雾处理不同时间及去除腐蚀产物后宏观形貌见图 7。

表 3 盐雾腐蚀速率
Tab.3 Corrosion rate by salt spray

Item	Initial mass/g	Mass after treatment/g	Corrosion rate/($\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$)
Mg-Li	6.8426	6.817(96 h)	0.2667
Ni-P coating	6.7135	6.7104(96 h)	0.0323

从图 7a 可以看出，盐雾处理 12 h 试样表面的颜色已经整体变暗。从图 7c 可以看到一些细小的白点，表明当反应进行到 48 h 时，已有点蚀出现。图 7d 中点蚀产生白点更加明显。对于整个盐雾过程，Mg-Li 合金表面腐蚀均匀，局部产生微弱点蚀现象，腐蚀速率较低。

化学镀镍试样盐雾处理不同时间及去除腐蚀产物后宏观形貌见图 8。从图 8a 可以看出，处理 12 h 后，试样上有少量盐雾沉积。从图 8b 可以看出，盐雾进行 24 h 后，试样表面依然光洁，没有出现点蚀。从图 8c 可以看出，干燥处理 24 h 后，试样表面沉积的盐雾水分已经挥发，试样表面微微变黄，未发生明显腐蚀。从图 8d 可以看出，盐雾进行 72 h 后，试样表面没有腐蚀痕迹。从图 8e 可

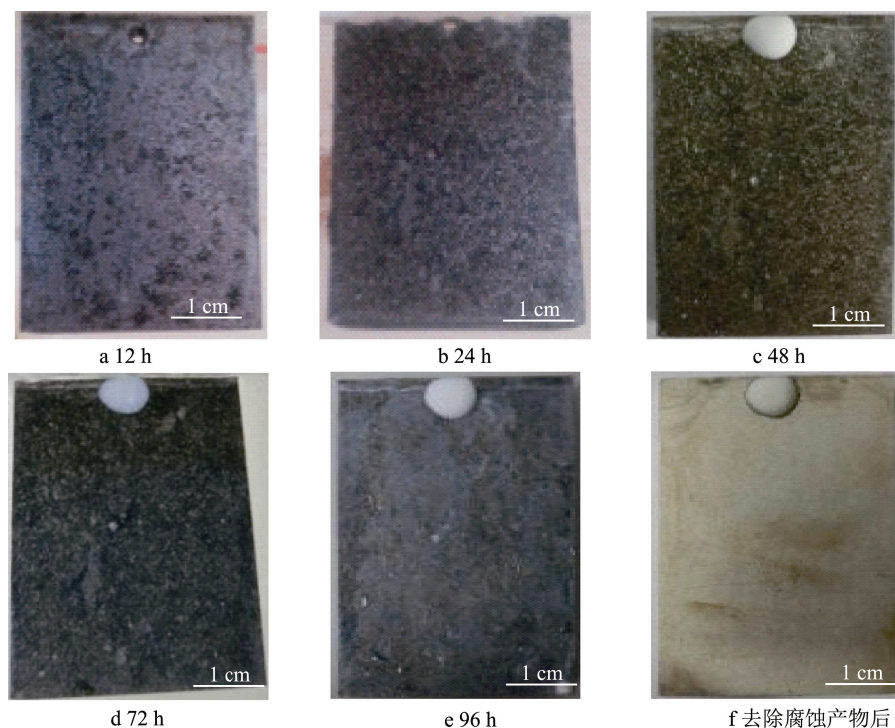


图 7 镁锂合金样品盐雾处理不同时间形貌
Fig.7 Mg-Li processed in salt fog for different time

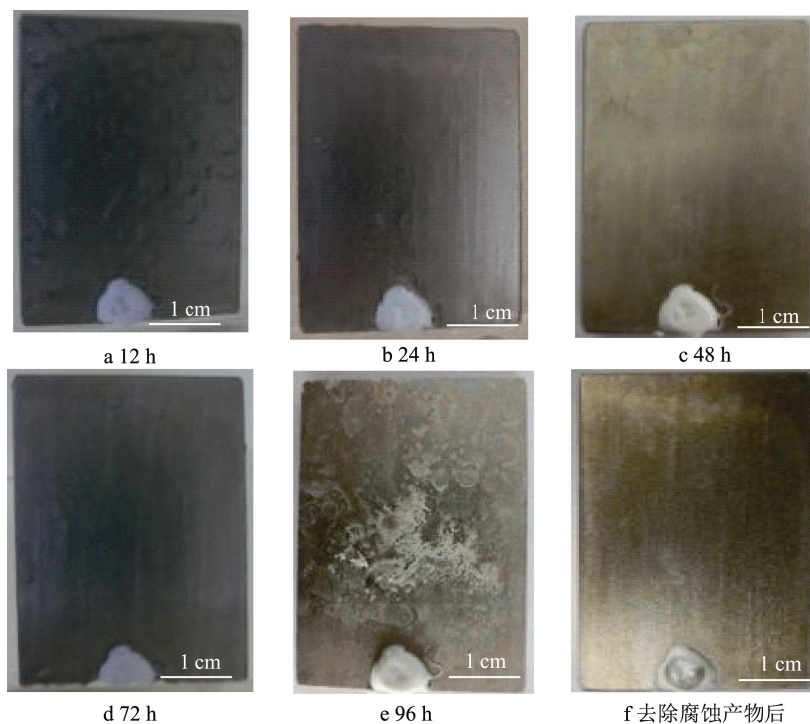


图 8 镀镍样品盐雾处理不同时间形貌
Fig.8 Topography of nickel sample processed in salt fog for different time

以看出,试样表面沉积的盐雾水分已经挥发,盐分析出在试样表面,未发生明显腐蚀。从图 8f 可以看出,试样清洗过后,表面完整,颜色较盐雾前少有变黄,不存在点蚀,符合国家军工标准。直接化学镀镍可以提高 LZ91 镁锂合金的耐蚀性。

3 结语

1) 通过正交试验及分析,优化后的工艺条件为:主盐乙酸镍 20 g/L,还原剂次亚磷酸钠 20 g/L,

络合剂柠檬酸 6 g/L, 氟化氢铵 20 g/L, 氢氟酸 12 mL/L, 氨水少量, 温度 85 °C, pH=7.4。

2) 采用优化后工艺得到的镀层镍磷胞体排列致密, 镀层厚度约为 5 μm , 表面孔隙率低, 试样自腐蚀电位为 -0.3806 V, 较未处理 Mg-Li 合金正移 1.356 V, 试样的自腐蚀电流密度为 $1.97 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, 较未处理降低两个数量级, 性能优异, 能够对合金起到保护作用。

参考文献

- [1] 张密林. 镁锂超轻合金[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1—16.
ZHANG Mi-lin. Super light Magnesium Lithium Alloy [M]. Beijing: Science Press, 2010: 1—16.
- [2] AGHION E, BRONFIN B. Magnesium Alloys Development towards the 21st Century[J]. Material Science Forum, 2000, 350: 19—28.
- [3] HAFERKAMP H, NIEMERYER M, BOEHM R, et al. Development, Processing and Applications Range of Magnesium Lithium Alloys[J]. Material Science Forum, 2000, 31: 350—351.
- [4] 仲志国, 卢志文, 赵亚忠. 镁锂合金的研究进展[J]. 热加工工艺, 2012(4): 76—79.
ZHONG Zhi-guo, LU Zhi-wen, ZHAO Ya-zhong. Progress in Research on Mg-Li Alloy[J]. Journal of Hot Working Technology, 2012 (4): 76—79.
- [5] 陈刚, 董天顺, 刘金海, 等. Mg-Li 合金研究现状及发展方向[C]//2013 中国铸造活动周论文集. 济南: 中国机械工程学会, 2013.
CHEN Gang, DONG Tian-shun, LIU Jin-hai, et al. Research Status and Development Trend of Mg-Li Alloy[C]// 2013 Proceedings of China Foundry Action Week. Jinan: Chinese Mechanical Engineering Society, 2013.
- [6] 杨黎晖, 李言涛, 蔡国伟, 等. 镁锂合金表面防护的最新研究进展[J]. 电镀与涂饰, 2014(7): 302—305.
YANG Li-hui, LI Yan-tao, CAI Guo-wei, et al. The Latest Research Progress of Mg-Li Alloy Surface Protection [J]. Electroplating Finishing, 2014(7): 302 —305.
- [7] CAO D, CAO X, WANG G L. Electrochemical Discharge Performance of Mg-Li Based Alloys in NaCl Solution[J]. Solid State Electrochem, 2010, 14: 851—855.
- [8] 曾迎, 蒋斌, 李瑞红, 等. 合金元素对 Mg-Li 合金组织及性能的影响[J]. 铸造, 2012(3): 275—279.
ZENG Ying, JIANG Bin, LI Rui-hong, et al. Alloying Elements Affect the Organization and Performance of Mg-Li Alloy[J]. Foundry, 2012(3): 275—279.
- [9] 迟毅, 杨萍, 林秀峰. 具有阳极氧化膜的镁合金电极性能的研究[J]. 电化学, 1997(1): 83—89.
CHI Yi, YANG Ping, LIN Xiu-feng, et al. Electrode Performance Research of Mg Alloy with Anodic Oxide Film[J]. Electrochemistry, 1997(1): 83—89.
- [10] Sharma A K, Rani R U. Galvanic Black Anodizing on Mg-Li Alloys[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 1993, 23: 502—507.
- [11] MAHALLAWY N, BAKKAR A, SHOEIB M. Electroless Ni-P Coating of Different Magnesium Alloys[J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202(21): 5151—5157.
- [12] 李俊刚, 吕迎, 李慕勤, 等. 镁锂合金表面处理技术研究现状及展望[J]. 材料保护, 2011, 44(7): 38—42.
LI Jun-gang, Lyu Ying, LI Mu-qin, et al. Status and Prospect of Research on Magnesium-Lithium Alloy Surface Treatment Technology[J]. Journal of Materials Protection, 2011, 44(7): 38—42.
- [13] 张冠军, 来维亚, 尹成先, 等. 金属表面 Ni-P 化学镀层研究现状[J]. 表面技术, 2016, 45(2): 8—16.
ZHANG Guang-jun, LAI Wei-ya, YIN Cheng-xian, et al. Research Status of Ni-P Electroless Plating on Metal Surface[J]. Surface Technology, 2016, 45(2): 8—16.