

文章编号: 1008-1542(2022)06-0571-08

# 正交试验法优化超轻 LA141 镁锂合金 表面植酸处理工艺研究

刘 刚<sup>1</sup>, 方 诚<sup>1</sup>, 朱 磊<sup>2</sup>, 黄青娜<sup>1</sup>, 解 芳<sup>1</sup>

(1. 南阳理工学院智能制造学院, 河南南阳 473004; 2. 河南工业职业技术学院机械工程学院, 河南南阳 473000)

**摘要:** 为了改善 LA141 镁锂合金的耐腐蚀性能, 采用正交试验法对厚度为 3 mm 的 LA141 镁锂合金表面进行植酸化学转化处理, 借助电化学工作站等设备对植酸化学转化处理不同工艺参数条件下的自腐蚀电流密度进行对比研究, 并探讨植酸化学转化液浓度、转化时间、pH 值对 LA141 镁锂合金植酸化学转化处理耐腐蚀性能的影响, 通过优化找出最佳植酸化学转化处理工艺参数。结果表明, LA141 镁锂合金植酸化学转化处理的工艺参数影响程度大小为 pH 值 > 转化时间 > 转化液浓度; 当植酸质量浓度为 20 g/L, 转化时间为 10 min, pH 值为 6 时, LA141 镁锂合金植酸化学转化处理后的耐腐蚀性能最佳, 此时自腐蚀电流密度最小, 为  $2.818 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ , 与植酸处理前相比, 自腐蚀电流密度下降了 1 个数量级, 耐腐蚀性能得到较大提升。因此, 植酸化学转化处理可改善 LA141 镁锂合金的耐腐蚀性能, 为其他镁锂合金表面防腐提供了参考。

**关键词:** 金属材料其他学科; LA141 镁锂合金; 植酸处理; 正交试验; 耐腐蚀性能

中图分类号: TG178

文献标识码: A

DOI: 10.7535/hbkd.2022yx06001

## Optimization of phytic acid treatment process on the surface of ultra-light LA141 magnesium-lithium alloy by orthogonal experiment

LIU Gang<sup>1</sup>, FANG Cheng<sup>1</sup>, ZHU Lei<sup>2</sup>, HUANG Qingna<sup>1</sup>, XIE Fang<sup>1</sup>

(1. School of Intelligent Manufacturing, Nanyang Institute of Technology, Nanyang, Henan 473004, China; 2. School of Mechanical Engineering, Henan Polytechnic Institute, Nanyang, Henan 473000, China)

**Abstract:** In order to improve the corrosion resistance of LA141 magnesium-lithium alloy, the surface of LA141 magnesium-lithium alloy with a thickness of 3 mm was treated with phytic acid chemical conversion by orthogonal experiment. The self-

收稿日期: 2022-05-25; 修回日期: 2022-09-20; 责任编辑: 冯 民

基金项目: 国家自然科学基金(51701026, 51605230); 河南省高等学校重点科研项目(20A430020, 21A460021); 南阳理工学院博士科研启动项目(510109); 南阳理工学院交叉科学研究项目(520067)

第一作者简介: 刘 刚(1982—), 男, 湖北荆州人, 讲师, 博士, 主要从事轻合金塑性成型及连接技术方面的研究。

通讯作者: 解 芳教授。E-mail: xiefang811222@163.com

刘刚, 方诚, 朱磊, 等. 正交试验法优化超轻 LA141 镁锂合金表面植酸处理工艺研究[J]. 河北科技大学学报, 2022, 43(6): 571-578.

LIU Gang, FANG Cheng, ZHU Lei, et al. Optimization of phytic acid treatment process on the surface of ultra-light LA141 magnesium-lithium alloy by orthogonal experiment[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2022, 43(6): 571-578.

corrosion current density of different process parameters of phytic acid chemical conversion was studied by electrochemical workstation. The effects of concentration of phytic acid chemical conversion solution, treatment time and pH value on the corrosion resistance of LA141 magnesium-lithium alloy were discussed. The optimum parameters of phytic acid chemical conversion were obtained by optimization. The results show that the influence of process parameters on phytic acid chemical conversion of LA141 magnesium lithium alloy is pH value > conversion time > concentration of conversion solution. When the phytic acid concentration is 20 g/L, the conversion time is 10 min and the pH value is 6, the corrosion resistance of LA141 magnesium lithium alloy after phytic acid chemical conversion is the best. At this time, the self-corrosion current density is the minimum, which is  $2.818 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ . Compared with that before phytic acid conversion, the self corrosion current density decreases by one order of magnitude, and the corrosion resistance is greatly improved. Phytic acid chemical conversion can improve the corrosion resistance of LA141 magnesium lithium alloy, which has some reference for the surface corrosion protection of other magnesium lithium alloys.

**Keywords:** other disciplines of metal materials; LA141 magnesium-lithium alloy; phytic acid conversion; orthogonal experiment; corrosion resistance

镁锂合金作为目前应用中“最轻的金属结构材料”，具有密度小、高比刚度和比强度，同时拥有良好的导电导热性能、机械加工性能和优异的电磁屏蔽性能等特点<sup>[1-2]</sup>，被广泛应用于航空航天、军工、汽车、医疗、电子等各种领域<sup>[3-8]</sup>。镁锂合金作为一种具有良好应用前景的理想轻质结构材料，受到学者的广泛关注<sup>[9-15]</sup>。但是由于其化学活性高、易被腐蚀，严重限制了其在各领域中的应用<sup>[16-18]</sup>。

镁合金表面生成一层化学转化膜是提高镁合金耐腐蚀性能的有效措施<sup>[19]</sup>。传统镁合金表面化学转化处理工艺中最为成熟和常用的是铬酸盐转化处理，该工艺操作和设备简单。但是铬酸盐转化处理液中含有有毒的六价铬，不仅危害人类健康而且污染环境<sup>[20]</sup>。为了改变这种状况，研究人员正致力于开发无铬化学转化技术。植酸(化学名称为环己六醇六磷酸酯)是从植物种子中提取的一种环保绿色、无毒、有机磷类物质，可与金属离子发生络合反应，在合金基体表层形成致密的膜层，可以有效阻止腐蚀介质与基体接触，改善合金的防腐蚀性能<sup>[21-22]</sup>。因此，镁锂合金表面植酸处理是化学转化处理中一种有效且较为理想的防腐制备方法。崔秀芳等<sup>[23]</sup>以 AZ91D 镁合金为实验试样，在 AZ91D 镁合金表面制备植酸转化膜，研究植酸处理溶液的 pH 值对镁合金植酸化学转化膜生长速率和耐蚀性能的影响，最佳成膜工艺参数是处理温度为 20 °C，植酸浓度为 5 g/L，处理时间为 15 min，pH 值为 8，此时转化膜的生长速率最快，致密度、完整度和耐蚀性均为最佳。CUI 等<sup>[24]</sup>探究植酸质量浓度对转化膜的影响，发现植酸质量浓度为 5 g/L 时生成的转化膜具有良好的耐腐蚀性能。郑润芬等<sup>[25]</sup>以 AZ91D 镁合金为实验试样，在其表面进行植酸转化处理，得到了致密且有网状裂纹的膜层，形成植酸盐覆盖在基体表面，金属基体耐蚀性得到提高。邓磊等<sup>[26]</sup>以双相 Mg-8% (质量分数，下同) Li 铸态合金为实验试样，在不同植酸质量浓度的 2 种转化液中分别制备了植酸转化膜，通过对比电化学实验、析氢实验和腐蚀形貌，得出合金在植酸质量浓度为 30 g/L 的转化条件下所形成转化膜的腐蚀防护能力较优。目前，国内外关于植酸处理对镁合金腐蚀性能的影响以及转化膜的制备研究较为广泛，但针对 LA141 镁锂合金植酸表面处理的工艺参数优化研究较少。

本文通过正交试验获得最优的 LA141 镁锂合金植酸表面处理工艺参数，为 LA141 镁锂合金防腐提供工艺参考，进一步扩大 LA141 镁锂合金在工业领域中的应用范围。

## 1 材料和方法

### 1.1 实验材料

选用厚度为 3 mm 的商用 LA141 镁锂合金板材(成分如表 1 所示)为实验试样，通过线切割加工将其切割成 10 mm×10 mm 的试样若干。

表 1 LA141 镁锂合金的成分

Tab.1 Chemical composition of LA141 magnesium-lithium alloy

化学成分 质量分数/%	Li	Al	Na	K	Ni	Cu	Mg
	13.0~15.0	0.8~1.5	0.005	0.005	0.005	0.004	余量

### 1.2 实验方法

试样预处理:先将切割好的 LA141 镁锂合金表面氧化物用金相砂纸打磨清理,然后用丙酮超声清洗 5 min 进行脱脂处理,随后在 55 °C 的 10 g/L NaOH+10 g/L Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 混合溶液中碱洗 5 min,无水乙醇清洗吹干后再将试样放入 25 °C 的 15 g/L H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>+15 g/L Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 溶液中酸洗 30 s,然后用去离子水清洗吹干后待用。

将植酸和去离子水配置不同植酸浓度的植酸处理溶液,再加入三乙醇胺调节植酸处理液 pH 值,预处理后的试样采用浸渍法进行植酸化学转化膜处理,表面植酸处理后的样品采用型号为 FEI Quanta 650 FEG 的电子扫描显微镜观察不同植酸处理参数下的化学转化膜形貌,再采用 NOVO2 电化学工作站进行电化学测试,以铂片作为辅助电极,饱和甘汞电极(SCE)作为参比电极,待测试样 LA141 镁锂合金为工作电极,测试试样样品在 3.5% NaCl 溶液中的极化曲线,测试扫描速度为 0.5 mV/s,扫描时间为 600 s,电位扫描范围为 -1.85~-1.35 V(vs.SCE)。

### 1.3 正交试验设计

通过单因素实验可知,植酸浓度、转化时间和 pH 值对 LA141 镁锂合金植酸转化膜自腐蚀电流密度的影响较为显著。因此选取植酸浓度(A)、转化时间(B)和 pH 值(C)作为正交试验因子的 3 个因素,各因素选取 3 个水平,各因素的 3 水平依次为植酸质量浓度 15, 20, 25 g/L;转化时间 5, 10, 15 min;pH 值 4, 6, 8。以自腐蚀电流密度值作为实验评价指标,选用 L9(3<sup>3</sup>) 进行正交试验,各因素及水平取值见表 2。

表 2 各因素及水平取值

Tab.2 Values for various factors and levels

水平	植酸质量浓度/(g · L <sup>-1</sup> )	转化时间/min	pH 值
1	15	5	4
2	20	10	6
3	25	15	8

## 2 结果与讨论

### 2.1 正交试验结果

图 1 为不同工艺参数下 LA141 镁锂合金植酸处理后试样的极化曲线,表 3 为正交试验工艺参数和自腐蚀电流密度结果。自腐蚀电流密度值越小,表明材料的耐腐蚀性能越好。由表 3 可知,5 号试样的自腐蚀电流密度值最小,生成的植酸化学转化膜耐腐蚀性能最好,对基体的保护效果最佳。

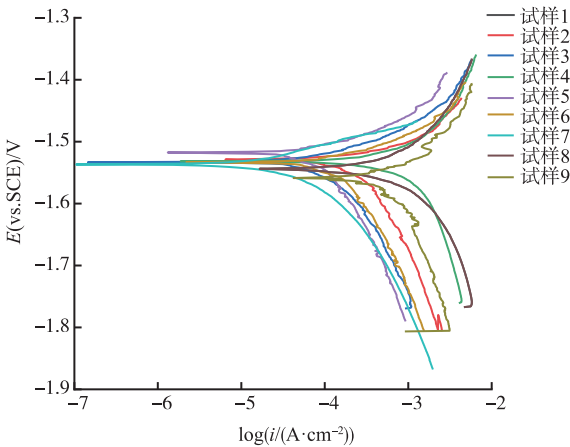


图 1 不同工艺参数下 LA141 镁锂合金的极化曲线

Fig.1 Polarization curve of LA141 magnesium-lithium alloy at different process parameters

表 3 正交试验结果

Tab.3 Orthogonal experimental results

试样编号	植酸质量浓度/(g · L <sup>-1</sup> )	转化时间/min	pH 值	自腐蚀电流密度/(A · cm <sup>-2</sup> )
1	15	5	4	1.408 × 10 <sup>-4</sup>
2	20	10	4	1.092 × 10 <sup>-4</sup>
3	25	15	4	1.375 × 10 <sup>-4</sup>
4	15	10	6	1.051 × 10 <sup>-4</sup>
5	20	15	6	3.154 × 10 <sup>-5</sup>
6	25	5	6	2.322 × 10 <sup>-4</sup>
7	15	15	8	2.067 × 10 <sup>-4</sup>
8	20	5	8	4.336 × 10 <sup>-4</sup>
9	25	10	8	3.308 × 10 <sup>-4</sup>

### 2.2 极差分析

植酸化学转化法正交试验所求得的自腐蚀电流密度值极差分析结果见表 4。表 4 中数据为各水平因素对应的自腐蚀电流密度值, K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, K<sub>3</sub> 分别代表水平因素 1、水平因素 2、水平因素 3 的自腐蚀电流密度值, k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub>, k<sub>3</sub> 分别代表处理溶液植酸质量浓度、转化时间、pH 值 3 个水平因素自腐蚀电流密度的平均值。由表 4 可知,植酸质量浓度、转化时间、pH 值极差 R 分别为 8.26, 8.70, 20.08, 极差 R 越大,说明该因素的影响程度

就越大,因此转化液的 pH 值对自腐蚀电流密度值影响程度最大,其次是转化时间,最后是植酸质量浓度。

直接对比 9 组实验测得的自腐蚀电流密度值大小,可以看出最佳实验条件为  $A_2B_3C_2$ , 实验中涉及 3 个水平因素,可产生 27 个实验条件,由于正交表的正交性,这 9 个条件均匀地分散在这 27 个实验条件中,它们有很强的代表性,所以从表 3 中可以看出自腐蚀电流密度值最小的工艺参数为  $A_2B_3C_2$ , 在全部 27 个实验条件中的效果是最佳的。因此,将此方案的工艺参数再进行 3 组单一因素变量实验,确定其中的最佳工艺参数对应的自腐蚀电流密度值,与正交试验中的最佳工艺参数对应的自腐蚀电流密度值进行对比,最终确定植酸转化膜最佳成膜工艺参数。

2.3 单一因素变量实验

图 2、图 3 和图 4 分别为不同 pH 值、不同转化时间和不同植酸质量浓度的 3 组单一变量实验对应的极化曲线。表 5 为不同 pH 值、不同转化时间和不同植酸质量浓度的 3 组变量实验工艺参数和电化学拟合参数结果。

表 4 评价指标自腐蚀电流密度值极差分析结果  
Tab.4 Analysis results of corrosion current density value of evaluation index

极差分析	植酸质量浓度/ ( $g \cdot L^{-1}$ )	转化时间/ min	pH 值
$K_1(10^{-5})$	45.26	80.66	38.75
$K_2(10^{-5})$	57.43	54.51	36.88
$K_3(10^{-5})$	70.05	65.96	97.11
$k_1(10^{-5})$	15.09	26.87	12.92
$k_2(10^{-5})$	19.14	18.17	12.29
$k_3(10^{-5})$	23.35	21.98	32.37
$R(10^{-5})$	8.26	8.70	20.08

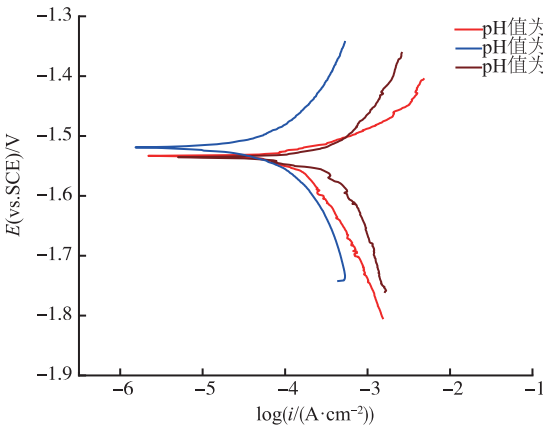


图 2 不同 pH 值处理的 LA141 镁锂合金极化曲线

Fig.2 Polarization curve of LA141 magnesium-lithium alloy treated at different pH values

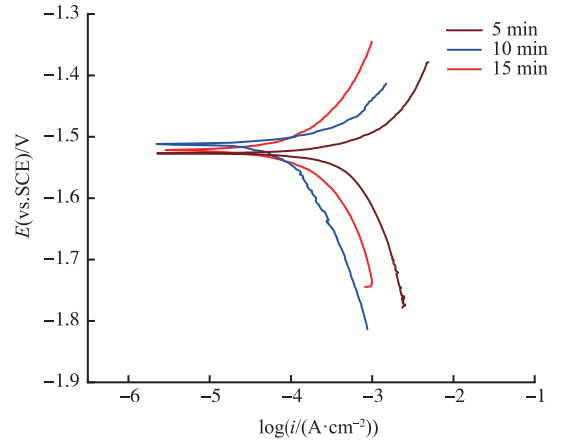


图 3 不同转化时间处理下 LA141 镁锂合金的极化曲线

Fig.3 Polarization curve of the LA141 magnesium-lithium alloy treated at different conversion times

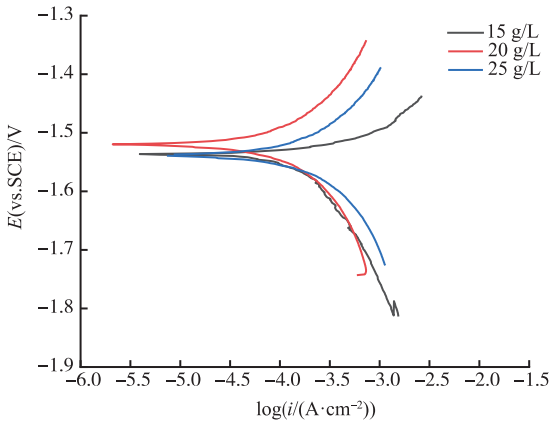


图 4 不同植酸质量浓度处理的 LA141 镁锂合金极化曲线

Fig.4 Polarization curve of LA141 magnesium-lithium alloy treated with different phytic acid concentrations

表 5 不同工艺参数植酸处理下 LA141 镁锂合金的电化学拟合参数

Tab.5 Electrochemical fitting parameters of LA141 magnesium-lithium alloy treated with phytic acid under different process parameters

试样编号	植酸质量浓度/ ( $g \cdot L^{-1}$ )	转化时间/ min	pH 值	自腐蚀电流密度/ ( $A \cdot cm^{-2}$ )
10	20	15	4	$1.635 \times 10^{-4}$
11	20	15	6	$3.154 \times 10^{-5}$
12	20	15	8	$1.302 \times 10^{-4}$
13	20	5	6	$6.839 \times 10^{-5}$
14	20	10	6	$2.818 \times 10^{-5}$
15	20	15	6	$3.154 \times 10^{-5}$
16	15	15	6	$1.246 \times 10^{-4}$
17	20	15	6	$3.154 \times 10^{-5}$
18	25	15	6	$8.868 \times 10^{-5}$

由图 2 和表 5 中不同 pH 值对 LA141 镁锂合金植酸表面处理试样的极化曲线和自腐蚀电流密度值大小可以看出,随着 pH 值的不断增大,自腐蚀电流密度值先减小再增大;由图 3 和表 5 中不同转化时间对 LA141 镁锂合金植酸表面处理试样的极化曲线和自腐蚀电流密度值大小可知,随着转化时间的不断增加,自腐蚀电流密度值先降低后上升;由图 4 和表 5 中不同植酸质量浓度对 LA141 镁锂合金植酸表面处理试样的极化曲线和自腐蚀电流密度值大小可知,随着植酸质量浓度的不断增大,自腐蚀电流密度值同样呈现出先减小后增大的趋势。

图 5 所示为试样在处理液 pH 值分别为 4, 6 和 8 条件下获得的 LA141 镁锂合金植酸转化膜形貌的 SEM 扫描电镜照片。当 pH 值为 4 时(见图 5 a)),溶液呈酸性,植酸溶液与镁锂合金反应最为剧烈,且试样周围产生大量气泡并逸出,气体逸出时破坏了镁锂合金表面形成的植酸转化膜,造成转化膜表面的裂纹又宽又深。当 pH 值为 6 时(见图 5 b)),合金基体表面形成的转化膜完整度最好,这主要是因为此时处理溶液接近中性,试样反应剧烈程度比较平缓,在转化膜层的慢慢堆积过程中,试样只有少量的氢气放出,所形成的膜层裂纹最为细小。当 pH 值为 8 时(见图 5 c)),处理溶液中  $H^+$  含量很低,溶液中生成的自由金属阳离子很少,可以和植酸根离子螯合的自由金属阳离子很少,使转化膜的生成速度变得很慢,生成的膜层厚度非常薄。

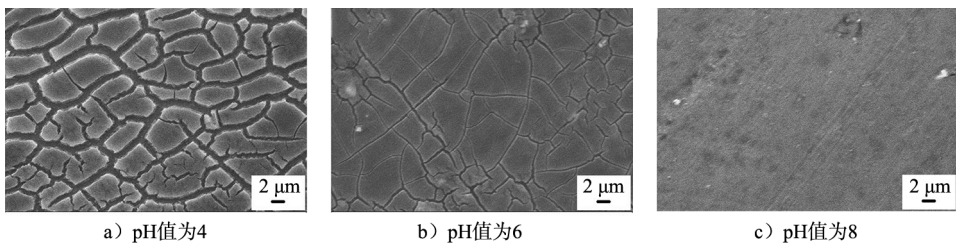


图 5 不同 PH 值植酸处理 LA141 镁锂合金表面形貌图

Fig.5 Surface morphology of LA141 magnesium-lithium alloy treated with phytic acid at different PH values

当 pH 值为 4 时,由于合金的快速溶解,大量气泡的产生搅动溶液使得膜层无法完整形成,此外,在较低的 pH 值下,植酸和金属离子形成的配合物膜层会发生溶解,使得膜层存在很明显的裂纹,出现龟裂状;在 pH 值为 8 时,合金溶解缓慢,溶液中存在的金属离子少,植酸膜层生成缓慢,虽然膜层裂纹小或者几乎无裂纹,但是其厚度很小,防护效果有限。综上所述,当处理溶液的 pH 值为 6 时,处理液与试样的反应速度适中,形成的膜层质量和完整性最好,对合金基体的耐蚀防护性能最佳,这与图 2 所示对 LA141 镁锂合金植酸表面处理试样自腐蚀电流密度值先减小后增大的变化趋势相一致。

图 6 所示为试样在转化时间分别为 5 min 和 10 min 条件下获得的 LA141 镁锂合金植酸转化膜形貌的 SEM 扫描电镜照片。当转化时间为 5 min 时(见图 6 a)),转化时间过短,此时合金表面生成的植酸转化膜很薄,并出现少量的龟裂纹。当转化时间为 10 min 时(见图 6 b)),形成的转化膜完全覆盖合金表面,此时转化膜厚度增加,表面存在一些细小的裂纹,且形成的转化膜上生成白色颗粒状物质。当转化时间为 15 min 时(见图 5 b)),处理时间很长,裂纹变深。

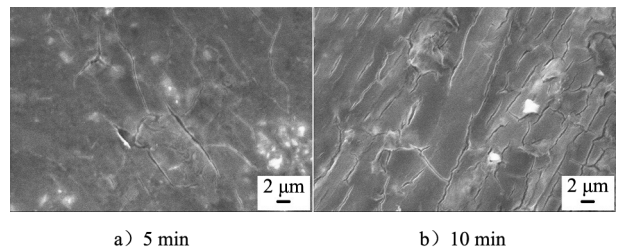


图 6 不同转化时间植酸处理 LA141 镁锂合金表面形貌图

Fig.6 Surface morphology of LA141 magnesium-lithium alloy treated with phytic acid at different conversion time

转化时间相对短时,由于植酸膜层还来不及形成,导致膜层覆盖不完全,或者形成的膜层相对比较薄,防护效果差;而当时间过长时,膜层中水分增加,在干燥过程中,其脱水的程度大,导致膜层之间的应力大,使得转化膜层之间裂纹增多、裂纹宽度增大,也会使得植酸转化膜层的耐蚀性逐渐降低。综上所述,从转化膜的表面形貌来看,最佳的植酸处理转化时间为 10 min,这与图 3 所示对 LA141 镁锂合金植酸表面处理试样自腐蚀电流密度值结果相一致。

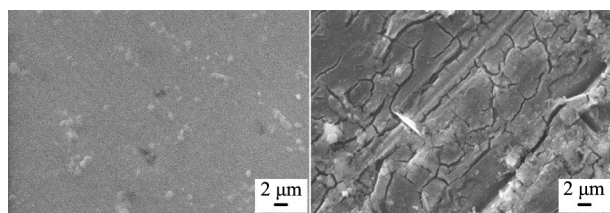
图 7 所示为试样在植酸质量浓度分别为 15 g/L 和 25 g/L 条件下获得的 LA141 镁锂合金植酸转化膜形貌的 SEM 扫描电镜照片。当植酸质量浓度为 15 g/L 时(见图 7 a)),形成的膜层很薄,且基本上没有龟裂纹产生。当植酸质量浓度为 20 g/L 时(见图 5 b)),植酸转化膜完整度较好,膜层表面出现细小龟裂纹。当

植酸质量浓度为 25 g/L 时(见图 7 b)),膜层完整度不高且表面出现宽而深的龟裂纹。

植酸质量浓度为 15 g/L 时,溶液中反应物少,植酸与合金反应不够剧烈,转化膜生成的速度相对比较慢,因此其形成的膜层厚度较薄,而当植酸溶液的质量浓度进一步增大时,溶液中反应物增多,此时反应速度快,沉积在合金上的转化膜层也相对比较厚,但当植酸质量浓度为 25 g/L 时,反应过快,形成的氢气迅速增多且速度加快,逸出时容易导致膜层开裂。因此,在本次实验条件下植酸化学膜最适合的植酸质量浓度为 20 g/L,这与图 4 所示处理 LA141 镁锂合金试样表面得到的自腐蚀电流密度值结果相一致。

#### 2.4 LA141 镁锂合金最佳的成膜工艺

图 8 为植酸转化膜成膜影响因素与自腐蚀电流密度的关系曲线,由图 8 并结合上述分析可知,温度为 25 °C 的条件下,处理溶液 pH 值为 6、转化时间为 10 min、转化液植酸质量浓度为 20 g/L,在此条件下( $A_2B_2C_2$  组合)自腐蚀电流密度值最小,其转化膜的耐腐蚀性能最好,此时自腐蚀电流密度为  $2.818 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ 。相比于正交试验中最佳工艺参数下(5 号试样, $A_2B_3C_2$  组合)对应的腐蚀电流密度值  $3.154 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$  更小。因此 LA141 镁锂合金植酸处理化学转化膜的最佳工艺参数组合为  $A_2B_2C_2$ ,即在 25 °C 的温度下,pH 值为 6,转化时间为 10 min,植酸转化液质量浓度为 20 g/L。



a) 15 g/L

b) 25 g/L

图 7 不同转化液质量浓度植酸处理 LA141 镁锂合金表面形貌图

Fig.7 Surface morphology of LA141 magnesium-lithium alloy treated with phytic acid at different conversion solution concentration

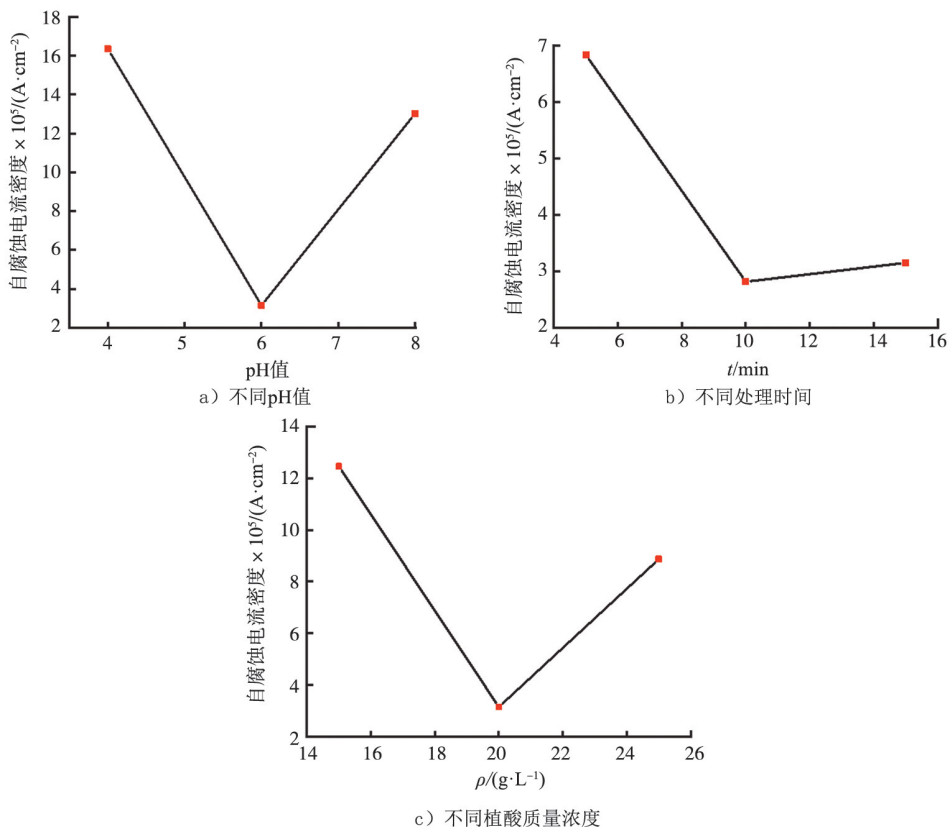


图 8 转化膜成膜影响因素与自腐蚀电流密度值的关系

Fig.8 Relationship between conversion film formation and self-corrosion current density

#### 2.5 植酸处理前后的耐腐蚀性能

表 6 为不同条件下对应试样的自腐蚀电流密度值,图 9 为最佳工艺参数下处理 LA141 镁锂合金试样与未植酸处理试样的极化曲线。由图 9 和表 6 可知,未经植酸处理的 LA141 镁锂合金的自腐蚀电流密度为  $5.051 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$ ,最佳工艺参数处理后 LA141 镁锂合金试样的自腐蚀电流密度为  $2.818 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ ,与未经过植酸处理的 LA141 镁锂合金相比,植酸处理后试样的自腐蚀电流密度值下降了 1 个数量级。表明经过植酸处理后的合金表面形成植酸化学转化膜可以明显提高合金基体的耐腐蚀性能。

表 6 植酸处理 LA141 镁锂合金前后的电化学拟合参数

Tab.6 Electrochemical fitting parameters of LA141 magnesium-lithium alloy before and after phytic acid treatment

试样	植酸质量浓度/ (g · L <sup>-1</sup> )	转化时间/ min	pH 值	自腐蚀电流密度/ (A · cm <sup>-2</sup> )
LA141		未处理		5.051 × 10 <sup>-4</sup>
植酸处理	20	10	6	2.818 × 10 <sup>-5</sup>

### 3 结 论

1)利用正交试验对 LA141 镁锂合金植酸处理的结果进行分析可知,工艺参数对植酸处理 LA141 镁锂合金后耐腐蚀性能的影响程度为 pH 值>转化时间>植酸质量浓度。

2)随着 pH 值或转化时间或植酸质量浓度的增加,LA141 镁锂合金植酸处理的自腐蚀电流密度均呈现先减小、后变大的趋势。

3)LA141 镁锂合金植酸转化膜最佳工艺参数如下:温度为 25 ℃,植酸转化溶液 pH 值为 6,转化时间为 10 min,植酸质量浓度为 20 g/L。

采用单一的植酸转化处理技术对 LA141 镁锂合金进行防腐的效果仍比较有限,未来可探讨通过化学转化复合工艺进一步改善 LA141 镁锂合金的耐腐蚀性能。

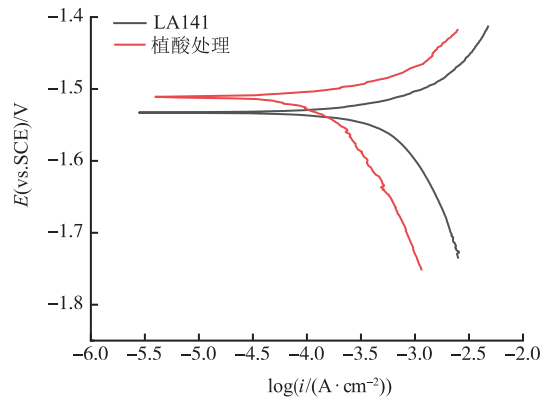


图 9 植酸处理前后的 LA141 镁锂合金极化曲线

Fig.9 Polarization curves of LA141 magnesium-lithium alloy before and after phytic acid treatment

### 参考文献/References:

[1] 圣冬冬,施颖杰,王茜茜,等.超轻镁锂合金的研究现状与发展趋势[J].轻合金加工技术,2021,49(8):8-12.  
SHENG Dongdong,SHI Yingjie,WANG Qianqian,et al.The research status and trend of ultra-light Mg-Li alloy[J].Light Alloy Fabrication Technology,2021,49(8):8-12.

[2] WANG X J,XU D K,WU R Z,et al.What is going on in magnesium alloys?[J].Journal of Materials Science & Technology,2018,34(2):245-247.

[3] 李瑞红,蒋斌,陈志军,等.Y 和 Sr 对 Mg-14Li-1Al 合金组织及力学性能的影响[J].热加工工艺,2016,45(14):67-70.  
LI Ruihong,JIANG Bin,CHEN Zhijun,et al.Effects of Y and Sr on microstructure and mechanical properties of Mg-14Li-1Al alloy[J].Hot Working Technology,2016,45(14):67-70.

[4] ISLAM R,HADADZADEH A,WELLS M,et al.Characterization and analysis of hot compression behaviors of an ultralight Mg-Li-Al alloy[J].International Journal of Lightweight Materials and Manufacture,2019,2(3):217-226.

[5] 李慧,徐荣正,侯艳喜,等.镁锂合金的焊接技术及其在航天领域的应用[J].热加工工艺,2019,48(1):1-4.  
LI Hui,XU Rongzheng,HOU Yanxi,et al.Welding technology of Mg-Li alloy and its application in aerospace field[J].Hot Working Technology,2019,48(1):1-4.

[6] 王志虎,张菊梅,白力静,等.AZ91 镁合金表面微弧氧化与化学镀铜复合处理层的微观组织与性能[J].中国腐蚀与防护学报,2018,38(4):391-396.  
WANG Zhihu,ZHANG Jumei,BAI Lijing,et al.Microstructure and property of composite coatings on AZ91Mg-alloy prepared by micro-arc oxidation and electroless Cu-layer[J].Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection,2018,38(4):391-396.

[7] 冯凯,李丹明,何成旦,等.航天用超轻镁锂合金研究进展[J].特种铸造及有色合金,2017,37(2):140-144.  
FENG Kai,LI Danming,HE Chengdan,et al.Progress in superlight Mg-Li alloys for aerospace industry[J].Special Casting & Nonferrous Alloys,2017,37(2):140-144.

[8] 彭翔,刘文才,吴国华.镁锂合金的合金化及其应用[J].中国有色金属学报,2021,31(11):3024-3043.  
PENG Xiang,LIU Wencai,WU Guohua.Alloying and application of Mg-Li alloys:A review[J].The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2021,31(11):3024-3043.

[9] 苑晨晨,蒋健博,李慧,等.超轻双相 LZ91 镁锂合金搅拌摩擦搭接焊接技术研究[J].有色金属工程,2020,10(7):26-31.  
YUAN Chenchen,JIANG Jianbo,LI Hui,et al.Study on friction stir lap welding of ultraligh dual-phase LZ91 Mg-Li alloy[J].Nonferrous Metals Engineering,2020,10(7):26-31.

[10] 张婧,封小松,张成聪,等.镁锂合金搅拌摩擦焊接工艺特性分析[J].焊接学报,2017,38(4):119-123.  
ZHANG Jing,FENG Xiaosong,ZHANG Chengcong,et al.Investigation on friction stir welding of Mg-Li alloy[J].Transactions of the China Welding Institution,2017,38(4):119-123.

[11] 刘文辉,姚玮,刘旭贺,等.冷轧变形对 LZ91 镁锂合金显微组织及力学性能的影响[J].有色金属工程,2016,6(6):24-28.

- LIU Wenhui, YAO Wei, LIU Xuhe, et al. Effect of cold rolling on the microstructure and mechanical properties of LZ91 Mg-Li alloy[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2016, 6(6): 24-28.
- [12] 江雯, 蒋璐瑶, 黄伟九, 等. 退火处理对搅拌摩擦加工 LZ91 双相镁锂合金微观组织及力学性能的影响[J]. *材料导报*, 2020, 34(sup1): 307-311.
- JIANG Wen, JIANG Luyao, HUANG Weijiu, et al. Effect of annealing treatment on microstructure and mechanical properties of LZ91 dual-phase magnesium-lithium alloy processed by friction stir processing[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(sup1): 307-311.
- [13] 刘筱, 刘文辉, 罗号, 等. 冷轧中间退火对 LZ91 镁锂合金组织与性能的影响[J]. *兵器材料科学与工程*, 2017, 40(2): 91-95.
- LIU Xiao, LIU Wenhui, LUO Hao, et al. Effects of cold rolling intermediate annealing on microstructure and properties of LZ91 Mg-Li alloys[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2017, 40(2): 91-95.
- [14] 张振宇, 彭晓东, 颜磊, 等. 铸态 Mg-Li-Al-xSi 合金微观组织和力学性能(英文)[J]. *稀有金属材料与工程*, 2017, 46(8): 2055-2059.
- ZHANG Zhenyu, PENG Xiaodong, YAN Lei, et al. Microstructure and mechanical properties of as-cast Mg-Li-Al-xSi alloys[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(8): 2055-2059.
- [15] 邵红岩, 彭晓东, 谢卫东, 等. 铸态 Mg-9Li-xAl 合金的组织及力学性能[J]. *轻合金加工技术*, 2017, 45(6): 50-54.
- SHAO Hongyan, PENG Xiaodong, XIE Weidong, et al. Microstructure and properties of as-cast Mg-9Li-xAl alloy[J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2017, 45(6): 50-54.
- [16] WANG Baojie, LUAN Jiyu, XU Daokui, et al. Research progress on the corrosion behavior of magnesium-lithium-based alloys: A review[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2019, 32(1): 1-9.
- [17] 李岩, 章晴云, 卢小鹏, 等. 微弧氧化工艺参数对镁合金表面水滑石复合膜层耐蚀性的影响[J]. *表面技术*, 2021, 50(8): 327-336.
- LI Yan, ZHANG Qingyun, LU Xiaopeng, et al. Effect of process parameters on corrosion resistance of MAO/LDH composite coatings[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(8): 327-336.
- [18] 高晓辉, 李玉峰, 祝晶晶, 等. 镁锂合金的腐蚀机理及表面防护方法研究进展[J]. *化工进展*, 2017, 36(9): 3373-3379.
- GAO Xiaohui, LI Yufeng, ZHU Jingjing, et al. Corrosion mechanism and surface protection method for magnesium-lithium alloy[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2017, 36(9): 3373-3379.
- [19] 朱青. 化学转化膜在镁合金表面的研究进展[J]. *金属功能材料*, 2018, 25(3): 50-54.
- ZHU Qing. Study of chemical conversion film on the surface of magnesium alloy[J]. *Metallic Functional Materials*, 2018, 25(3): 50-54.
- [20] 陈梦瑶, 李焰, 齐建涛. 铬酸盐转化膜性能的研究进展[J]. *材料导报*, 2020, 34(21): 21026-21032.
- CHEN Mengyao, LI Yan, QI Jiantao. Research progress on chromate conversion coating properties[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(21): 21026-21032.
- [21] 刘刚, 赵亚忠, 赵柯, 等. 植酸处理对 LZ91 镁锂合金腐蚀性能的影响[J]. *电镀与精饰*, 2022, 44(5): 28-32.
- LIU Gang, ZHAO Yazhong, ZHAO Ke, et al. Effect of phytic acid treatment on corrosion properties of LZ91 magnesium lithium alloy[J]. *Plating & Finishing*, 2022, 44(5): 28-32.
- [22] 曾纪勇, 郭兴伍, 彭立明, 等. 镁合金植酸化学转化膜研究进展[J]. *材料保护*, 2019, 52(12): 124-128.
- ZENG Jiyong, GUO Xingwu, PENG Liming, et al. Research progress of phytic acid chemical conversion coatings on magnesium alloy[J]. *Materials Protection*, 2019, 52(12): 124-128.
- [23] 崔秀芳, 李庆芬. 镁合金表面植酸转化膜研究 I: 植酸转化膜成膜机理与耐蚀性研究[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2007, 19(3): 203-206.
- CUI Xiufang, LI Qingfen. Study on phytic acid conversion coatings for magnesium alloy I: Formation mechanism and corrosion resistance of phytic acid conversion coatings[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2007, 19(3): 203-206.
- [24] CUI Xiufang, LI Ying, LI Qingfen, et al. Influence of phytic acid concentration on performance of phytic acid conversion coatings on the AZ91D magnesium alloy[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2008, 111(2/3): 503-507.
- [25] 郑润芬, 梁成浩, 邵林. AZ91D 镁合金植酸转化膜组成与耐蚀性能研究[J]. *大连理工大学学报*, 2006, 46(1): 16-19.
- ZHENG Runfen, LIANG Chenghao, SHAO Lin. Study of composition and corrosion protection afforded by phytic acid conversion coatings applied to AZ91D magnesium alloy[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2006, 46(1): 16-19.
- [26] 邓磊, 赵志伟, 张曼, 等. 镁锂合金表面植酸转化膜制备及其腐蚀行为研究[J]. *辽宁化工*, 2020, 49(9): 1049-1051.
- DENG Lei, ZHAO Zhiwei, ZHANG Man, et al. Investigation of preparation of phytic acid conversion coatings on Mg-Li alloy and their corrosion behaviors[J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2020, 49(9): 1049-1051.