

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.06.001

荷叶提取物对 AZ31 镁合金耐蚀性能研究

梁汉优^{1*}, 刘星禹^{2,3}, 刘 刚^{2,3*}

(1. 湖南应用技术学院 机电工程学院, 湖南 常德 415100; 2. 南阳理工学院 河南省增材制造航空材料工程研究中心, 河南 南阳 473004; 3. 南阳理工学院 南阳市增材制造技术与装备重点实验室, 河南 南阳 473004)

摘要: 采用荷叶作为提取物对 AZ31 镁合金试样进行了耐蚀性能的研究, 借用光学显微镜、激光共聚焦显微镜、电化学工作站、X 射线衍射仪(XRD)、接触角测试仪等设备, 对不同工艺参数条件下生成吸附膜的表面形貌、物相、电化学阻抗谱和动电位极化曲线和成膜效果进行了测试与分析。结果表明: 荷叶提取物对 AZ31 镁合金生成吸附膜耐蚀性能的工艺参数影响大小为: 浸泡时间>温度>浓度。在 3.5 wt.% NaCl 溶液中浸泡下, 最佳工艺参数为提取剂浓度 5 g L⁻¹, 浸泡时间 1 h, 实验温度 20 °C, 该条件下 AZ31 镁合金表面形成致密的絮状结构。在此工艺条件下测得 AZ31 镁合金的自腐蚀电流密度为 4.43×10⁻⁶ A cm⁻², 与未处理试样的 1.97×10⁻⁵ A cm⁻² 相比, 明显降低了近一个数量级。

关键词: AZ31 镁合金; 荷叶提取物; 吸附膜; 耐蚀性能

中图分类号: TG178

文献标识码: A

Study on corrosion resistance of lotus leaf extract to AZ31 magnesium alloy

Liang Hanyou^{1*}, Liu Xingyu^{2,3}, Liu Gang^{2,3*}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan Applied Technology University, Changde 415100, China; 2. Engineering Research Center of Additive Manufacturing Aeronautical Materials of Henan Province, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China; 3. Nanyang Key Laboratory of Additive Manufacturing Technology and Equipment, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China)

Abstract: The corrosion resistance of AZ31 magnesium alloy samples was studied by using lotus leaf as extract. The optical microscope, laser confocal microscope, electrochemical workstation, X-ray diffractometer (XRD), contact angle tester and other equipment were used. The surface morphology, phase, electrochemical impedance spectroscopy, potentiodynamic polarization curve and film forming effect of adsorbed films were measured and analyzed under different process parameters. The results showed that the influence of lotus leaf extract on the corrosion resistance of AZ31 magnesium alloy was as follows: soaking time > temperature > concentration. Under the condition of 3.5 wt.% NaCl immersion,

收稿日期: 2024-07-18

修回日期: 2024-09-24

通信作者: 梁汉优(1979—), 女, 工学学士, 副教授, 研究方向为轻合金连接技术, email: 112875807@qq.com;

刘刚(1982—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为轻合金连接技术及表面处理, email: liugang@nyist.edu.cn

基金项目: 湖南省教育厅科学研究项目(24C1151); 常德市科技创新指导性项目(2023ZD27); 河南省重点研发与推广专项(科技攻关)(232102230049)

引用信息: 梁汉优, 刘星禹, 刘刚. 荷叶提取物对 AZ31 镁合金耐蚀性能研究[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(6): 1-8, 43.

Liang Hanyou, Liu Xingyu, Liu Gang. Study on corrosion resistance of lotus leaf extract to AZ31 magnesium alloy[J]. Plating and Finishing, 2025, 47(6): 1-8, 43.

the optimal process parameters were extraction concentration of 5 g/L, soaking time of 1 h, and experimental temperature of 20 °C. Under these conditions, a dense flocculent structure was formed on the surface of AZ31 magnesium alloy. The self-corrosion current density measured under this process condition was $4.43 \times 10^{-6} \text{ A cm}^{-2}$, which was significantly reduced by nearly one order of magnitude compared with $1.97 \times 10^{-5} \text{ A cm}^{-2}$ of untreated samples.

Keywords: AZ31 magnesium alloy; lotus leaf extract; adsorption film; corrosion resistance

镁以其密度低、比强度高、减震性能好、易于加工回收等优良特性,在军事、航空航天、飞行器制造和汽车工业等多个领域^[1-3]被广泛应用。然而,由于镁的化学性质活泼,易被腐蚀,因此需要采用物理或者化学方法以提高其耐蚀性能^[4-7]。目前,常见的防腐方法可以归纳为3类:合金化、表面处理、添加缓蚀剂^[8-10]。

缓蚀剂具有操作简单、成本低,不改变金属本身性质,能高效提高耐蚀性等特点,成为当前工业生产中广泛应用的防腐技术之一^[11]。目前,缓蚀剂主要分为有机缓蚀剂、无机缓蚀剂、离子液体缓蚀剂、复配缓蚀剂和植物提取物缓蚀剂等^[12-16]。Dinodi等^[17]研究了硬脂酸盐、棕榈酸盐和肉豆蔻酸盐对ZE41镁合金的耐蚀性能,发现硬脂酸盐在0.1 mol/L NaCl和0.2 mol/L Na_2SO_4 溶液中的缓蚀效率可达88%。Kharitonov等^[18]研究了钼酸盐作为WE43镁合金腐蚀抑制剂的机理,当钼酸盐浓度达到100 mmol/L时,可以提供高达91%~99%的腐蚀抑制效率。张一帆等^[19]研究了两种咪唑类双阳离子液体 $\text{C}_6(\text{m}_2\text{im})_2\text{-I}$ 和 $\text{C}_6(\text{m}_2\text{im})_2\text{-PF}_6$ 在0.5% NaCl溶液中

AZ31B镁合金的防腐作用,发现当缓蚀剂浓度分别为0.5和0.3 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, $\text{C}_6(\text{m}_2\text{im})_2\text{-I}$ 和 $\text{C}_6(\text{m}_2\text{im})_2\text{-PF}_6$ 的最佳缓蚀效率分别为84.19%和89.67%。Liu等^[20]研究表明二乙基二硫代氨基甲酸钠(SDDTC)和乙酸钠(NaAc)复配后对AZ31B镁合金镀后缓蚀效率可达90%。目前,镁合金缓蚀剂的研究大多集中在有机、无机等材料。然而,针对植物等天然材料缓蚀剂的研究却鲜见报道。

本文采用植物型提取物荷叶为研究对象,通过正交试验获得影响因素大小分析结果,通过单一变量实验获得最优工艺参数,为AZ31镁合金防腐提供方法参考,并进一步扩大植物型提取物在AZ31镁合金缓蚀剂领域的应用范围。

1 材料和方法

1.1 实验材料

选用厚度为3 mm的AZ31镁合金作为主要研究对象,成分见表1,采用激光切割将试样切成15 mm×15 mm的规格。

表1 AZ31 镁合金化学成分

Tab.1 Chemical composition of AZ31 magnesium alloy

化学成分	含量范围	Al	Zn	Mn	Si	Cu	Ni	Fe
含量/(wt.%)	Min	2.5	0.6	0.2	—	—	—	—
	Max	3.5	1.4	1.0	0.1	0.05	0.005	0.005

1.2 实验方法

使用的荷叶均来自于南阳理工学院,通过回流提取法提取。将荷叶洗净、烘干,放置烘烤箱,研磨至粉末,选择无水乙醇作为提取剂,运用索氏提取剂,通过蒸馏并冷却回流得到荷叶提取物,当提取物颜色由深绿色变为浅绿色,停止加热。烘干后得到黏稠的荷叶提取物。将切割后AZ31镁合金样品进行打磨和超声清洗以去除样品表面的氧化膜和油膜,然后用去离子水清洗吹干后待用。

用荷叶提取物和3.5 wt.% NaCl溶液配制浓度分

别为5.0、7.5和10.0 g/L的荷叶提取剂,将处理后的AZ31镁合金试样浸入不同浓度的荷叶提取剂溶液中,待试样表面产生稳定的吸附膜后取出。采用Olympus光镜与激光共聚焦显微镜对荷叶缓蚀剂处理后的试样表面进行吸附膜形貌观察,之后采用Nova电化学工作站进行电化学测试,选用铂片(CE)作为对电极,饱和甘汞电极(SCE)作为参比电极,待测试样AZ31镁合金为工作电极,测试样品在3.5 wt.% NaCl溶液中的极化曲线和电化学阻抗谱,测试范围 $10^{-2} \sim 10^5 \text{ Hz}$,交流电压频率范围10 mV,电压

范围 $\pm 1\text{ V}$, 扫描速度 1 mV/s 。

1.3 正交实验

通过单一变量实验得知三因素A(温度)、B(荷叶缓蚀剂浓度)以及C(浸泡时间)对荷叶提取剂浸泡后的镁合金自腐蚀电流密度影响较深, 基于这3个因素构建了实验设计表, 每个因素设定3个不同的水平。具体实验设计见下表2。

表 2 实验设计表

Tab.2 Table of experimental design

水平	因素 A/ $^{\circ}\text{C}$	因素 B/ $(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	因素 C/h
1	20	5.0	3
2	30	7.5	6
3	40	10.0	9

2 结果与讨论

2.1 单一变量实验

2.1.1 不同浸泡时间处理

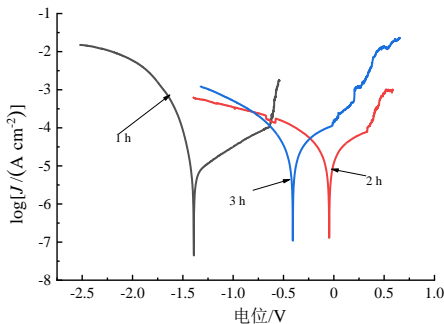
为了深入研究不同时间对耐蚀性的影响, 设计单一变量实验。实验的具体工艺参数如表3所示, 同时进行电化学实验, 绘制极化曲线和阻抗谱如下图1所示。

表 3 不同浸泡时间电化学参数

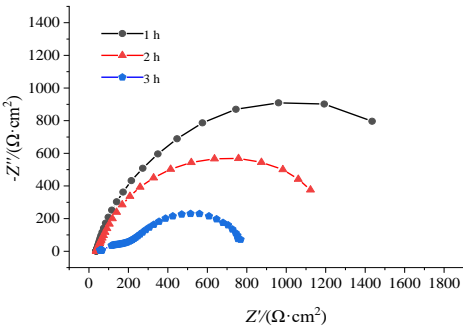
Tab.3 Electrochemical parameters of different soaking time

试样	时间/h	浓度/ $(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	温度/ $^{\circ}\text{C}$	$J_{\text{corr}}/(\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$
10 [#]	1	5	20	4.43×10^{-6}
11 [#]	2	5	20	6.29×10^{-6}
12 [#]	3	5	20	8.06×10^{-6}

通过表3及图1可知在不同时间条件下, 1[#]试样展现了最低的自腐蚀电流密度, 其值为 $4.43\times 10^{-6}\text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$, 同时, 根据图1所示, 1 h的阻抗谱半径明显大于2 h和3 h, 这与极化曲线和自腐蚀电流密度相符。相应的实验条件为: 时间1 h, 温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 浓度 5 g/L 。



(a) 极化曲线



(b) 阻抗谱

图 1 不同浸泡时间处理的极化曲线与阻抗谱

Fig.1 Polarization curves and impedance spectra of different soaking time

图2为试样10[#]、11[#]、12[#]在不同时间($t=1\text{ h}, 2\text{ h}, 3\text{ h}$)下对AZ31镁合金表面的形貌分析。由图2可知, 不同时间条件下金属基体表面均生成了黑色絮状吸附膜。然而, 由于处理时间的不同, 吸附膜的覆盖程度存在差异。当浸泡时间为1 h时(图2(a)), 金属基体暴露很少, 试样表面形成了密集的絮状吸附膜, 暴露出的金属基体表面保持良好, 没有出现点蚀或其他腐蚀现象。当浸泡时间为2 h时(图2(b)), 基体表面已被密集的絮状吸附膜完全覆盖。但在高倍

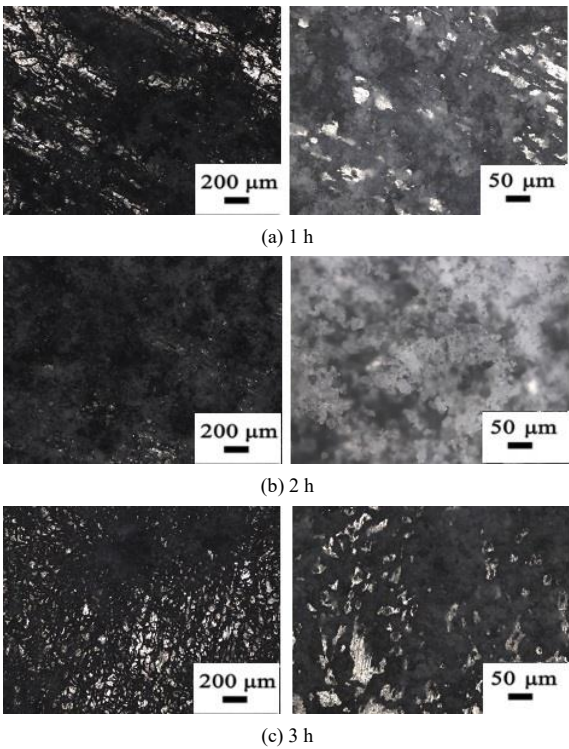


图 2 不同浸泡时间下 AZ31 镁合金表面形貌

Fig.2 Surface morphology of AZ31 magnesium alloy under different soaking time

镜下观察到金属基体表面出现了NaCl结晶现象,并伴随着明显的腐蚀痕迹。当处理时间达到3 h时(图2(c)),试样表面再次产生了密集的絮状吸附膜,但并未完全覆盖金属基体,暴露了更多的金属表面。在高倍镜下观察,暴露的金属基体部分区域发生了点蚀。

随着时间的增长,金属基体表面的吸附膜受到3.5 wt.% NaCl溶液的腐蚀,无法迅速生成吸附膜,导致金属基体与3.5 wt.% NaCl直接反应,从而产生腐蚀现象。这可能是由于在浸泡过程中,氯离子(Cl^-)因其较小的半径能够穿透吸附膜,并与膜层中的镁发生反应。随着时间的推移,氯离子继续腐蚀吸附膜,导致许多腐蚀孔洞的形成。随着时间的进一步增加,这些蚀孔数量增多,吸附膜逐渐被溶解。

2.1.2 不同浸泡温度处理

为了探究最佳实验条件,继确定最佳浸泡时间后,接下来探究最佳温度。根据表4及图3所示,20 °C条件下的自腐蚀电流密度显著低于30 °C和40 °C。达到了 $4.43 \times 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。随着温度升高,吸附膜因高温而分解或失活,导致自腐蚀电流密度升高,此外,20 °C的阻抗谱半径明显优于30 °C与40 °C,与极化曲线和自腐蚀电流密度相符。

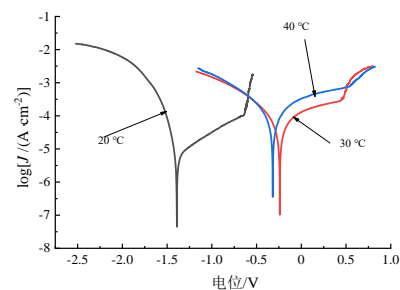
表4 不同温度电化学参数

Tab.4 Electrochemical parameters at different temperatures

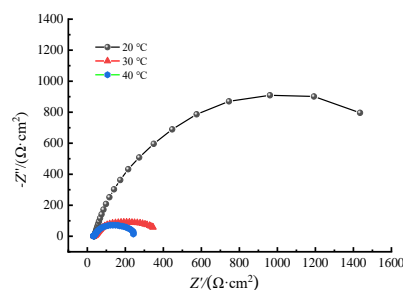
试样	温度/°C	浓度/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	时间/h	$J_{\text{corr}}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$
13 [#]	20	5	1	4.43×10^{-6}
14 [#]	30	5	1	1.76×10^{-5}
15 [#]	40	5	1	2.68×10^{-5}

图4为试样13[#]、14[#]、15[#]在不同温度(20、30和40 °C)下对AZ31镁合金表面的形貌分析。由图可知AZ31镁合金表面吸附膜基本将基体完全覆盖,但表面有部分白色结晶。在20 °C(图4(a)),观察表面生成绵密絮状吸附膜无再结晶颗粒覆盖,在高倍显微镜下观察表面虽然有小部分结晶现象,但膜层仍然完整,没有出现点蚀。在30 °C(图4(b)),表面未观察到裸露区域,絮状吸附膜覆盖完整,但膜层上已经出现了明显的点蚀现象。在高倍显微镜下观察基体表面形成了大量由NaCl晶体构成的结晶层。在40 °C(图4(c)),观察基体表面有金属的裸露,并且吸附膜上伴随大量晶体结晶。膜层上出现点蚀。在高倍显微镜下观察,金属表面出现了更大规模的晶体结晶,部分结晶直接在金属基体上形成。温度越高,

提取剂作用效果越不明显,覆盖后的成膜效果越差。这是由于温度升高导致缓蚀剂失活或挥发,提取剂吸附膜无法完全覆盖基体,基体表面发生腐蚀不再平滑,提取剂吸附膜再次覆盖困难。



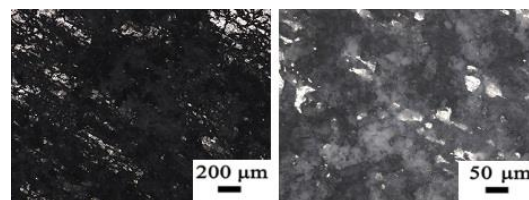
(a) 极化曲线



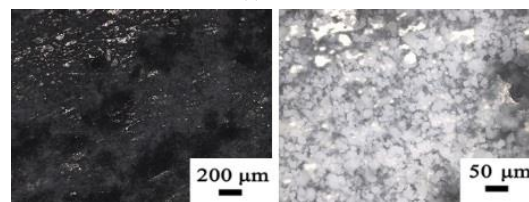
(b) 阻抗谱

图3 不同温度处理的极化曲线与阻抗谱

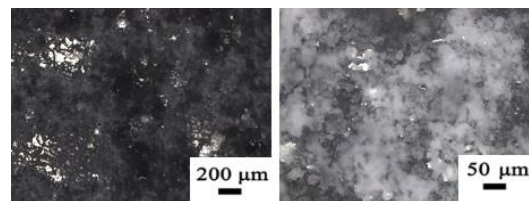
Fig.3 Polarization curves and impedance spectra at different temperatures



(a) 20 °C



(b) 30 °C



(c) 40 °C

图4 不同温度条件下 AZ31 表面形貌

Fig.4 The surface morphology of AZ31 at different temperatures

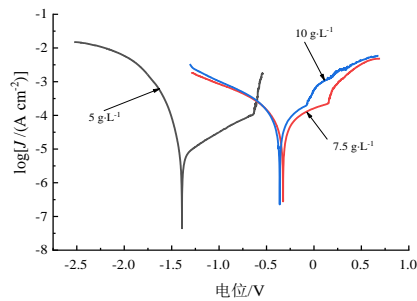
2.1.3 不同提取剂浓度处理

在确定了最佳的浸泡时间和温度之后,继续研究最佳的提取剂浓度,根据表5及图5所示,相较于7.5 g/L和10 g/L,浓度5 g/L条件下AZ31镁合金展现出更小的自腐蚀电流密度,达到了 $4.43\times 10^{-6} \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。随着提取剂浓度的增加,其耐蚀效果并未提升,反而有所降低。这可能归因于荷叶缓蚀剂分子的体积远大于水分子,导致在高浓度下,缓蚀剂分子的聚集性变差。当浓度提高时,原本有序的聚集变为无序聚集,影响了荷叶提取剂对AZ31镁合金表面的吸附能力,从而使得耐蚀效果明显下降。同时阻抗谱也印证了这一观察结果,5 g/L的提取剂浓度相比7.5 g/L和10 g/L,其阻抗谱半径更大,与极化曲线和自腐蚀电流密度相符。

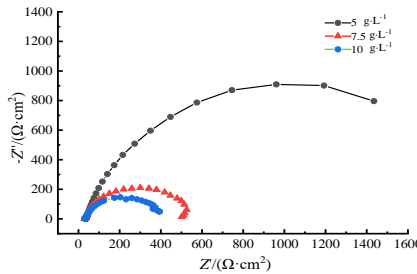
表 5 不同提取剂浓度的电化学参数

Tab.5 Electrochemical parameters of different extractant concentrations

试样	浓度/(g·L ⁻¹)	温度/°C	时间/h	$J_{\text{corr}}/(\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$
16 [#]	5	20	1	4.43×10^{-6}
17 [#]	7.5	20	1	1.69×10^{-5}
18 [#]	10	20	1	2.17×10^{-5}



(a) 极化曲线



(b) 阻抗谱

图 5 不同提取剂浓度处理的极化曲线与阻抗谱

Fig.5 Polarization curves and impedance spectra of different extractant concentrations

图6为试样16[#]、17[#]、18[#]在不同浓度(5、7.5和10 g/L)下的AZ31镁合金表面形貌。由图6可知,在

5 g/L浓度(图6(a)), AZ31表面几乎完全被绵密的絮状吸附膜覆盖,没有再结晶颗粒出现,在高倍显微镜下观察虽然有小部分结晶现象但膜层整体仍然完整,没有点蚀现象。在7.5 g/L浓度(图6(b)),观察到金属表面有大量裸露区域,有少量的丝状和絮状吸附膜覆盖,基体表面无腐蚀或点蚀现象。在高倍显微镜下观察,可以看到仅有零星的丝状吸附膜覆盖在部分金属表面,大部分金属裸露在外,但仍未观察到明显的腐蚀迹象。在10 g/L浓度(图6(c)),观察表面有绵密的丝状吸附膜覆盖,但仍有大量金属基体裸露在外,露出的金属基体表面无金属光泽。在高倍显微镜下观察,尽管仍有丝状吸附膜尝试覆盖金属表面,但裸露的金属区域却有明显的腐蚀痕迹,并伴随着大量的NaCl结晶,这表明保护膜层已经被破坏,基体上也出现了显著的腐蚀现象。

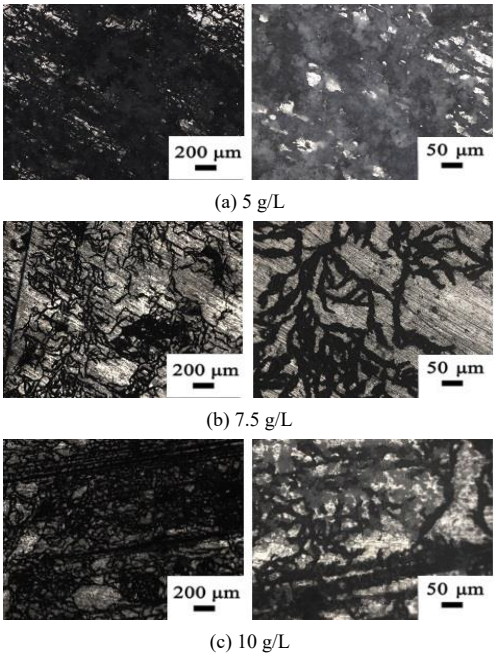


图 6 不同缓蚀剂浓度条件下 AZ31 表面形貌

Fig.6 Surface morphology of AZ31 under different concentrations of corrosion inhibitors

随着浓度的增加,提取剂分子的体积增多,这导致它们在相同条件下比水分子更难聚集在金属表面上,从而减弱了对金属的吸附效果。同时,由于3.5 wt.% NaCl溶液中的Cl⁻活性过高,可能与提取剂发生反应,使得缓蚀剂在能够形成完整的保护层之前就已经被消耗。因此,随着浓度的提升,耐蚀效果反而降低。

2.2 正交试验结果

表6为正交试验工艺参数和自腐蚀电流密度

(J), 图7为AZ31镁合金试样的极化曲线, 通常情况下, 自腐蚀电流密度越低, 抗腐蚀性能越好。由表6和图7结合可知1[#]试样自腐蚀电流密度最低, 生成的荷叶提取剂吸附膜耐蚀性能最好, 对材料保护效果最佳。

表6 正交试验结果

Tab.6 Results of orthogonal experiment

试样	A/°C	B/(g·L ⁻¹)	C/h	$J/(10^{-5} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2})$
1 [#]	20	5.0	3	0.81
2 [#]	20	7.5	6	3.10
3 [#]	20	10.0	9	2.58
4 [#]	30	5.0	6	4.50
5 [#]	30	7.5	9	2.51
6 [#]	30	10.0	3	1.35
7 [#]	40	5.0	9	3.15
8 [#]	40	7.5	3	9.11
9 [#]	40	10.0	6	1.45

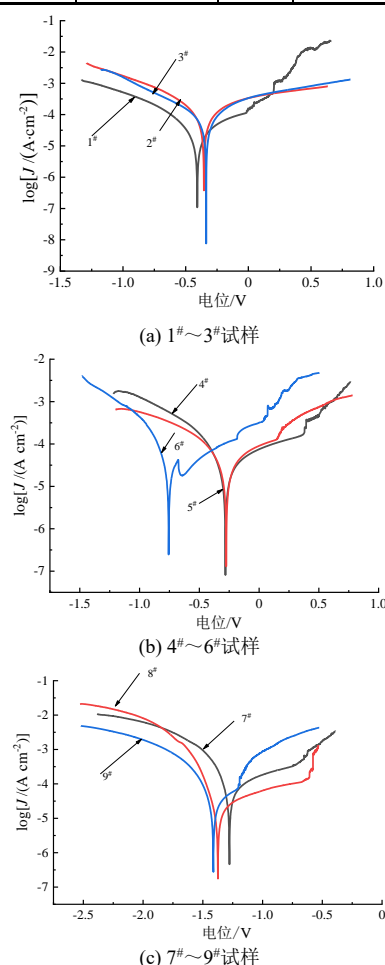


图7 正交试验的AZ31镁合金的极化曲线

Fig.7 Polarization curve of AZ31 magnesium alloy by orthogonal experiment

2.3 影响因素分析

通过正交试验测得的自腐蚀电流密度极差分析见表7, 在该表中, K_1 、 K_2 、 K_3 分别代表不同水平因素下的自腐蚀电流密度; 而 k_1 、 k_2 、 k_3 则分别表示温度、提取剂浓度、时间这3个水平因素测得的平均值。极差(R)为 k_1 、 k_2 、 k_3 中最大值与最小值之差, 直接反映了相应因素的影响程度: 极差越大, 表明该因素的影响越大, 相反, 极差越小, 表明该因素的影响越小。由表4可知温度的极差为14.85, 浓度的极差为10.26, 时间的极差为19.95, 由此得出时间因素的极差最大, 其次是温度, 最后是浓度。

表7 自腐蚀电流密度值极差分析

Tab.7 Range analysis of self-etching current density

分析	A/°C	B/(g·L ⁻¹)	C/h
$K_1(\times 10^{-6})$	39.04	84.59	30.65
$K_2(\times 10^{-6})$	83.60	65.21	90.49
$K_3(\times 10^{-6})$	55.18	53.82	82.48
$k_1(\times 10^{-6})$	13.01	28.19	10.22
$k_2(\times 10^{-6})$	27.86	21.73	30.16
$k_3(\times 10^{-6})$	18.39	17.94	27.49
$R(\times 10^{-6})$	14.85	10.26	19.95

实验设计采取了正交表 $L_9(3^3)$ 涉及3个水平3个因素, 通过表7得出的正交试验自腐蚀电流密度, 可得出自腐蚀电流密度值最小的工艺参数为 $A_1B_1C_1$ 。即在27个实验条件中 $A_1B_1C_1$ 条件对镁合金的耐蚀效果最佳。在由正交试验得出的最优实验条件 $A_1B_1C_1$ 基础上设计单一变量实验, 探究各水平因素的最小自腐蚀电流密度, 最终确定荷叶提取物吸附膜最佳成膜工艺参数。同时, 由于正交的3 h实验组自腐蚀电流密度远低于6 h、9 h实验组, 差距接近一个数量级, 因此, 最佳浸泡时间均不超过3 h。

2.4 荷叶提取剂对AZ31镁合金最佳实验条件

图8为在温度(20 °C)、提取剂浓度(5 g/L)、浸泡时间(1 h)的最佳实验参数条件下, 在不同倍率下观察的吸附膜表面状况。由图8(a)可以看出, 经过荷叶提取剂浸泡后的样品表面会出现绵密的絮状黑色吸附膜, 吸附膜基本覆盖了合金表面的大部分区域。由图8(b)和图8(c)可以看出吸附膜表面凹凸不平, 但膜层覆盖严密, 此外, 吸附膜表面有白色沉淀物质出现, 这些是化学反应后的结晶颗粒。由于3.5 wt.% NaCl溶液中的 Cl^- 具有高度的反应活性, 加入的缓蚀剂在Mg合金表面与 Cl^- 反应, 产生了这些

固体结晶。同时在50倍的显微镜下也可看出,吸附膜均匀覆盖在基体表面,无明显分界现象,且吸附膜基体表面固定紧密,存在吸附膜的位置无腐蚀现象,这表明荷叶提取剂对AZ31镁合金有明显的缓蚀作用。

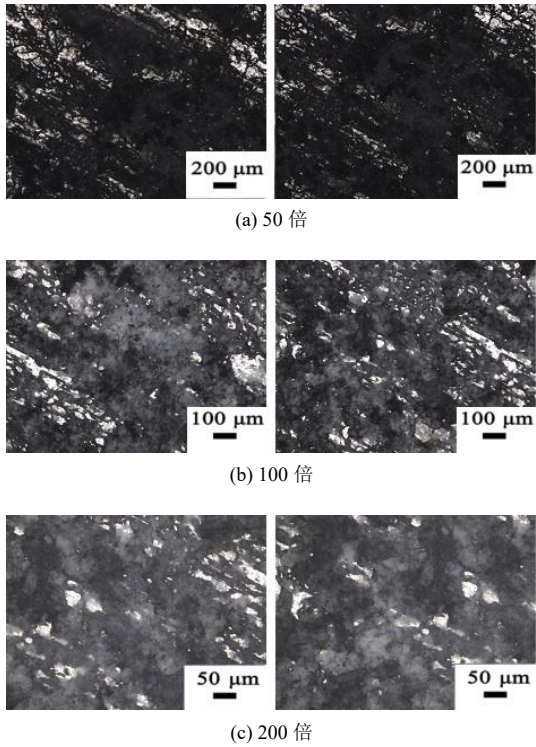


图 8 AZ31 镁合金在最佳实验条件下吸附膜形貌
Fig.8 Adsorption film morphology of AZ31 magnesium alloy under optimal experimental conditions

2.5 荷叶提取剂处理前后的耐腐蚀性能

表8列出了在同等条件下,加入荷叶提取剂前后试样的自腐蚀电流密度,由图9和表8可明显观察到加入缓蚀剂后自腐蚀电流密度低于同等条件下未加入缓蚀剂的试样。未加缓蚀剂的试样自腐蚀电流为 $1.97\times 10^{-5}\text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$,而缓蚀剂加入后的试样自腐蚀电流密度为 $4.43\times 10^{-6}\text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$,两者相差一个数量级。从阻抗谱数据可知,添加缓蚀剂后,阻抗谱半径明显大于未添加的,与极化曲线和自腐蚀电流密度相符。

表 8 加入荷叶提取剂前后电化学参数

Tab.8 Electrochemical parameters before and after adding lotus leaf extract

试样	浓度/(g·L ⁻¹)	温度/°C	时间/h	$J_{\text{corr}}/(\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$
19 [#]	5	20	1	4.43×10^{-6}
20 [#]	未处理	20	1	1.97×10^{-5}

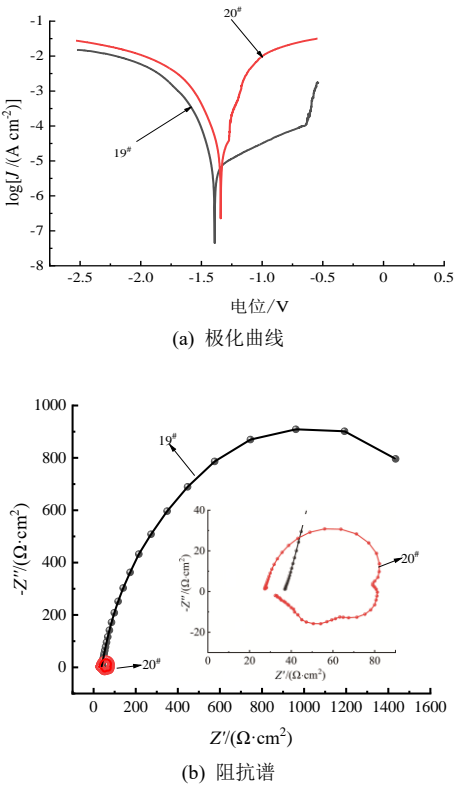
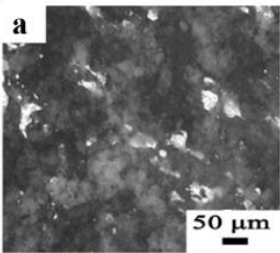


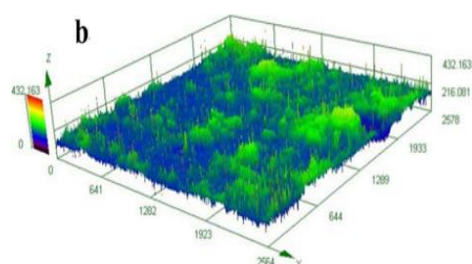
图 9 加入荷叶提取剂前后的极化曲线和阻抗谱

Fig.9 Polarization curve and impedance spectrum before and after adding lotus leaf extract

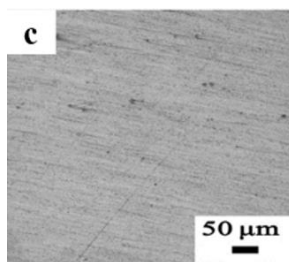
图10是通过经过提取剂处理前后的试样,由图10(a)、图10(c)可知经过提取剂处理过的试样表面被一层绵密的絮状吸附膜覆盖,这层吸附膜基本隐藏了母材表面的亮银色,有效地隔离了大部分3.5 wt.% NaCl的腐蚀作用,导致3.5 wt.% NaCl溶液仅能在形成的膜层上发生结晶,从而保护了下面的金属基体免受腐蚀。由图10(b)、图10(d)三维形貌发现,处理后的试样表面更为粗糙,在最佳实验参数下进行三次表面粗糙度的测量并取平均值,结果显示处理后的试样表面粗糙度为 $9.78\text{ }\mu\text{m}$,而未处理的试样表面粗糙度为 $6.43\text{ }\mu\text{m}$,可见试样经过处理后确实有膜层的覆盖导致粗糙度增加,同时通过共聚焦显微镜测量缓蚀膜厚度大约为 $25\text{ }\mu\text{m}$ 。



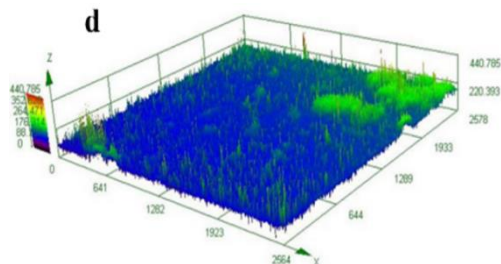
(a) 加入荷叶提取剂的表面形貌



(b) 加入荷叶提取剂的三维形貌



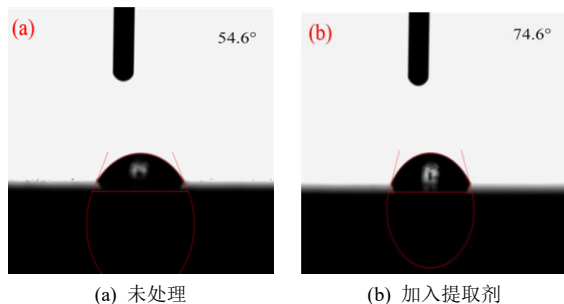
(c) 未加入荷叶提取剂的表面形貌



(d) 未加入荷叶提取剂的三维形貌

图 10 加入荷叶提取剂前后试样的表面形貌与三维形貌**Fig.10 Surface morphology and three-dimensional morphology of the samples before and after adding lotus leaf extract**

图11为经过加入荷叶提取剂前后AZ31镁合金表面接触角，测得的打磨光滑的镁合金表面接触角为 54.6° ，而滴过荷叶缓蚀剂的镁合金表面达到了 74.6° ，说明加入荷叶提取剂的镁合金表面展现比原镁合金表面更好的疏水性，减少了水溶性腐蚀物对AZ31镁合金表面的侵蚀。



(a) 未处理

(b) 加入提取剂

图 11 AZ31 镁合金加入荷叶提取剂前后表面接触角**Fig.11 Surface contact Angle of AZ31 magnesium alloy before and after adding lotus leaf extractants**

3 结论

(1) 正交试验结果表明，影响荷叶提取剂耐蚀性的因素程度大小为：浸泡时间>温度>荷叶提取剂浓度。

(2) 随着浸泡时间的增加，金属基体表面的吸附膜会被3.5 wt.% NaCl溶液腐蚀，导致无法快速形成保护膜。随着温度的升高，提取剂可能会失活或挥发，而浓度增加时，提取剂体积占比增大，难以在金属表面聚集，降低了吸附作用。

参考文献

- [1] 陈娇, 赵超宇, 刘冬. 耐热镁合金在航空航天工业的应用[J]. 热加工工艺, 2024(22): 11-14.
- [2] 胡家乐, 周超群, 王巧玉, 等. 汽车用轻量化材料的研究进展[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2024, 34(1): 25-33.
- [3] 李科. 国防科技工业涉及哪些金属材料和军工材料[J]. 中国军转民, 2018(4): 47-51.
- [4] 杨欣宇, 杨云天, 卢小鹏, 等. 镁合金缓蚀剂研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2022, 42(3): 435-440.
- [5] 夏先朝, 潘玥, 袁杏, 等. 镁合金表面腐蚀防护技术研究进展[J]. 表面技术, 2023, 52(5): 37-50, 70.
- [6] 邓迎诚, 秦卫华, 王飞, 等. 镁合金在大气环境中腐蚀行为及表面处理技术的研究进展[J]. 机械工程材料, 2023, 47(3): 1-6, 54.
- [7] 陈雅薇, 周济, 刘勇, 等. 镁合金腐蚀机制与调控研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(10): 3152-3170.
- [8] 孙丽, 崔晓明, 白朴存, 等. 合金化对AZ91镁合金组织与性能影响的研究进展[J]. 粉末冶金工业, 2022, 32(2): 77-83.
- [9] 赖心翹, 刘宁华, 易爱华, 等. 镁合金高耐蚀表面处理技术的研究进展[J]. 电镀与涂饰, 2024, 43(1): 87-97.
- [10] 楚天舒, 万闪, 廖伯凯, 等. 植物提取物缓蚀剂的研究进展[J]. 材料研究与应用, 2023, 17(6): 1078-1086.
- [11] 石磊, 刘莹, 姚山强, 等. 环境友好型缓蚀剂的研究进展[J]. 全面腐蚀控制, 2024, 38(1): 103-109.
- [12] 于立冬, 李惠静, 吴彦超. 有机杂环缓蚀剂的研究进展[J]. 现代化工, 2022, 42(7): 56-59.
- [13] 王丽, 顾威, 郭荣, 等. 环保型无机缓蚀剂对AZ91D镁合金的缓蚀效果[J]. 电镀与精饰, 2020, 42(4): 18-22.
- [14] 姜志阳, 郝鑫. 离子液体缓蚀剂的研究现状[J]. 材料保护, 2022, 55(5): 142-148.

下转 43 页