

三种有机物对 LY12CZ 铝合金在酸性溶液中的缓蚀行为研究

Three Organic Corrosion Inhibitors on LY12CZ
Aluminum Alloy in Acid Solution

刘建华, 盛 华, 李 明, 李松梅, 于 美

(北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100191)

LIU Jianhua, SHEN G Hua, LI Ming, LI Song-mei, YU Mei

(School of Materials Science and Engineering, Beihang

University, Beijing 100191, China)

摘要: 本工作选取了 2-巯基苯并噻唑(MBIH)、苯并三氮唑(BTA)和 8-羟基喹啉(8Q)等几种典型的缓蚀剂, 研究了其对 LY12CZ 铝合金在酸性溶液中的缓蚀效果及机理。通过腐蚀失重法研究了三种缓蚀剂对 LY12CZ 铝合金在酸性溶液中腐蚀动力学的影响。利用光学显微镜(OM)、场发射扫描电子显微镜(FE-SEM)及能谱(EDS)等对合金组织和腐蚀形貌进行观察; 利用动电位极化、交流阻抗谱(EIS)等研究了铝合金在含有这三种缓蚀剂溶液中的电化学特性, 并对其缓蚀机理进行了探讨。结果表明: 三种有机物均能在酸性溶液中对 LY12CZ 铝合金起到缓蚀作用; 缓蚀效果 $MBIH > BTA > 8Q$ 。MBIH 和 BTA 能够选择性地吸附在 LY12CZ 铝合金表面 S 相残留物及杂质相颗粒表面, 形成难溶物, 抑制腐蚀反应的阴极过程, 从而为 LY12CZ 铝合金在酸性溶液中的腐蚀提供良好的保护。8Q 能够吸附在整个铝合金的表面, 但随着阳极溶解的进行, 吸附层遭到破坏, 从而影响了缓蚀效果。

关键词: LY12CZ 铝合金; 缓蚀剂; 酸性溶液; 腐蚀动力学; 选择性吸附

中图分类号: TG174.42 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2011)05-0041-07

Abstract: The inhibiting effect of three organic compounds on the corrosion of LY12CZ aluminum alloy in 0.5M H_2SO_4 solution was investigated. The organic compounds are 2-mercaptobenzoxazole (MBIH), benzotriazole (BTA) and 8-hydroxy-quinoline (8Q). The inhibiting effect to the corrosion dynamics of LY12CZ aluminum alloy in 0.5M H_2SO_4 solution was evaluated by using mass loss method and the corrosion morphology was observed by using optical microscopy (OM), scanning electron microscopy coupled with energy dispersive spectroscopy (SEM/EDS). Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and potentiodynamic polarization were used to study the inhibiting mechanism. The results show that MBIH, BTA and 8Q all provide anticorrosion protection for LY12CZ aluminum alloy by forming a thin organic layer of insoluble complexes on the surface of the alloy. Their inhibitive properties are given by the following order: $MBIH > BTA > 8Q$. MBIH and BTA provide anticorrosion protection by absorbing selectively on the corrosion active intermetallic zones and suppressing the cathode processes of corrosion reaction. The whole surface of the alloy was absorbed by 8Q to form chelate 8Q complexes, but the absorbed layer was destroyed as the anode dissolution.

Key words: LY12CZ aluminum alloy; inhibitor; acid solution; corrosion dynamics; selective adsorption

近年来随着航空工业的蓬勃发展, 对航空铝合金的耐蚀性能提出了更高的要求。LY12CZ 铝合金由于其高比强度而广泛应用于航空工业^[1,2]。然而, 这种铝合金由于含有大量的 Cu, Mg 等合金元素以及 Fe, Si 等杂质元素而非常容易发生点蚀、晶间腐蚀等局部腐蚀^[3-5]。相关研究表明^[6], LY12CZ 铝合金的点蚀一般起始于粗大的 S 相 (Al_2MgCu) 颗粒。S 相在腐蚀

性介质中首先发生 Mg 和 Al 的优先溶解, 形成奶酪状的 Cu 残留物; 该残留物发生重构, 覆盖在铝合金表面, 显著扩大了阴极表面积, 加速了周围 Al 的溶解, 从而对局部腐蚀的进一步发展起到了促进作用。因此, 如果能对 S 相的阴极作用进行抑制, 就能有效抑制 LY12CZ 铝合金的局部腐蚀。

稀土元素是一类对含 Cu 铝合金非常有效的缓蚀

剂^[6-11]。Ce³⁺ 和 La³⁺ 在含有氯离子的中性溶液中能够与 S 相形成难溶的氢氧化物, 不仅缓冲了局部 pH 值, 而且阻碍了氯离子的入侵, 从而发挥较好的缓蚀作用。以 8Q 为代表的喹啉类物质对含 Cu 铝合金的缓蚀作用近年来受到广泛关注, Garrigues 等研究了 8Q 对纯铝的缓蚀作用^[12], Li 等研究了 8Q 对 LY12CZ 铝合金在中性氯离子溶液中的缓蚀作用^[13], 研究表明 8Q 能够在铝合金表面的 S 相上富集, 与 Cu 形成螯合物, 也可以与 Mg 和 Al 形成螯合物。三唑及噻唑衍生物作为重要的 Cu 及其合金的缓蚀剂^[13-17], 对含 Cu 铝合金中的缓蚀作用也开始引起国内外的关注, 它们能吸附在 Cu 的表面, 与 Cu 原子形成链状聚合物, 阻挡活化区域的暴露, 从而发挥缓蚀的效果。

综上所述, 铝合金缓蚀研究主要集中在含氯离子

的中性腐蚀环境中, 铝合金在酸性环境中的缓蚀研究报道较少, 本工作研究了以 2-巯基苯并噻唑(MBIH)、苯并三氮唑(BTA) 及 8-羟基喹啉(8Q) 作为缓蚀剂的 LY12CZ 铝合金在酸性溶液中的缓蚀行为。

1 实验

1.1 试样制备

试样制备所用的 LY12CZ 铝合金的成分如表 1 所示。所有的试样都经过碱洗(50g/L NaOH 溶液, 30min, 60℃), 出光, 去离子水冲洗, 干燥箱中烘干。用于表观腐蚀程度观察、交流阻抗法和电化学极化的试样用 500, 800, 1500# 的砂纸打磨, 丙酮超声清洗, 擦洗; 用于扫描电镜、能谱测试的试样用 500, 800, 1500# 的砂纸打磨, 抛光, 丙酮超声清洗, 擦洗。

表 1 LY12CZ 铝合金成分(质量分数/ %)

Table 1 Composition of the LY12CZ aluminum alloy (mass fraction / %)

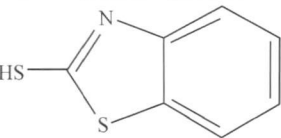
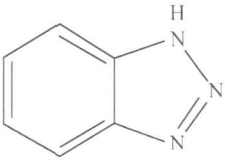
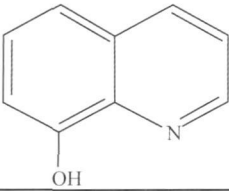
Element	Cu	Mg	Fe	Mn	Si	Zn	Ti	Cr	Other	Al
Content	3. 8 4. 9	1. 2-1. 8	0. 50	0. 30 0. 90	0. 50	0. 25	0. 15	0. 10	0. 15	Balan ce

1.2 实验及测试方法

用全浸腐蚀失重法研究 2-巯基苯并噻唑、苯并噻唑、8-羟基喹啉三种有机物对 LY12CZ 铝合金在酸性溶液中腐蚀动力学行为的影响, 这三种缓蚀剂的中英文名称、结构、缩写如表 2 所示。将 28 片试样分为 4 组, 每组 7 片, 称重后分别浸泡在 0. 5mol/L H₂SO₄ 溶液(体系 A)、含有 2-巯基苯并噻唑(饱和, 因为其在酸中的溶解度很小, 体系 B)、含有苯并三氮唑(2g/L, 体

表 2 所选用缓蚀剂分子结构

Table 2 Structures of the studied inhibitors

Structure	Name	Abbreviation
	2-mercaptobenzoxazole	MBIH
	Benzotriazole	BTA
	8-hydroxy-quinoline	8Q

系 C) 及含有 8-羟基喹啉(2g/L, 体系 D) 的 0. 5mol/L H₂SO₄ 溶液中, 浸泡时间分别为 1, 2, 4, 10, 20, 30h 和 40h, 分别编号为 A1~ A7, B1~ B7, C1~ C7, D1~ D7。浸泡温度为 25℃。浸泡后用 30% 的硝酸溶液去除腐蚀产物, 用自来水、去离子水反复冲洗, 烘干, 用电子天平精确称重。

电化学测试在电化学工作站(Parstat 2273, Princeton Application Research) 上进行, 采用传统三电极体系, LY12CZ 铝合金为工作电极, 工作面积为 7cm², 饱和甘汞电极为参比电极, 铂电极为辅助电极。测试温度为 25℃。采用动电位极化法测量这三种缓蚀剂溶液中的极化曲线, 扫描速率为 25mV/s, 扫描范围为比开路电位- 250mV~ 1V。采用振幅为 5mV 的正弦交流电扰动三电极体系测量交流阻抗谱(EIS), 测试频率范围为 10⁵~ 10⁻²Hz。采用光学显微镜(OLYMPUS)、场发射扫描电子显微镜(Hitachi S-4800 SEM) 及能谱(Hitachi S-530, Oxford Link2SISI) 观察腐蚀及电化学测试前后 LY12CZ 铝合金试样的表面形貌、合金相颗粒, 从而探讨缓蚀机理。

2 结果与讨论

2.1 不同缓蚀剂的酸性溶液中的腐蚀行为分析

图 1 是浸泡在不同体系中 LY12CZ 铝合金的腐

蚀失重随时间的变化曲线。可以看出随浸泡时间的延长,失重不断增加。浸泡 10h 之后,各体系中的试样均开始发灰发暗,这主要是由于随着腐蚀的进行,试样表面堆积了杂质粒子及腐蚀产物。浸泡 20h 后,如图 2 所示,试样明显变黑,但是缓蚀剂体系中试样的发黑程度明显低于空白体系中的情况。

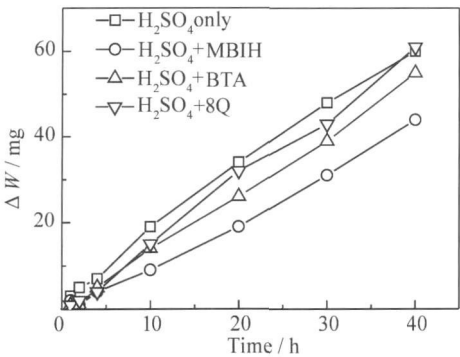


图 1 浸泡在不同体系中的 LY12CZ 铝合金失重 ΔW 与时间的关系曲线

Fig. 1 Evolution of ΔW of the LY12CZ aluminum alloy in blank H_2SO_4 solution or inhibitors-containing H_2SO_4 solution

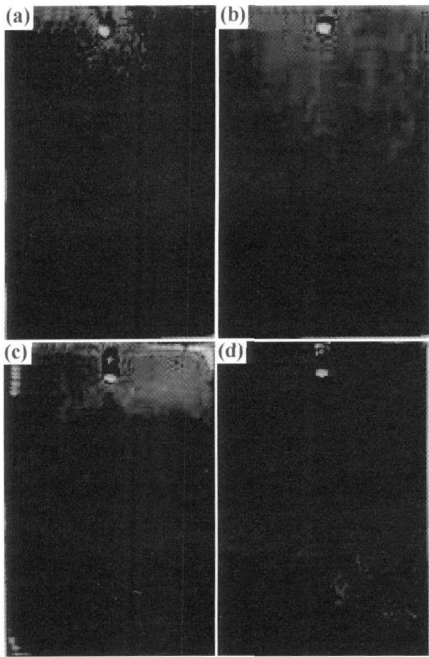


图 2 浸泡在不同体系中 20h 后 LY12CZ 铝合金试样的表面形貌 (a)空白硫酸溶液;(b)MBIH;(c)BTA;(d)8Q

Fig. 2 Photos of the LY12CZ samples immersed for 20h in blank H_2SO_4 solution or inhibitors-containing H_2SO_4 solution (a)blank H_2SO_4 solution;(b)MBIH;(c)BTA;(d)8Q

腐蚀速率 $\rho_{WL}(g \cdot h^{-1} \cdot cm^{-2})$ 可用公式(1)计算:

$$\rho_{WL} = \Delta W / A t \tag{1}$$

式中: A 是表面积(cm^2); t 是腐蚀时间(h)。腐蚀速率

ρ_{WL} 随时间的变化曲线如图 3 所示,可见与空白体系相比,缓蚀剂体系中腐蚀速率都有所降低,尤其在浸泡初期(4h 内),腐蚀速率的降低尤为明显。所有体系中的腐蚀速率都在浸泡初期迅速降低,随后趋于稳定,这是由于腐蚀产物在试样表面堆积造成的。空白体系及 8Q 体系中铝合金的腐蚀速率分别在 10h 及 4h 后趋于稳定,BTA 体系及 MBIH 体系中铝合金的腐蚀速率均在 2h 后便能趋于稳定的较低值,这说明 MBIH 及 BTA 能在较短的时间发挥缓蚀剂的作用。

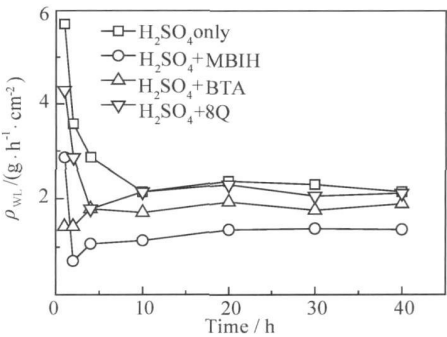


图 3 浸泡在不同体系中的 LY12CZ 铝合金腐蚀速率 ρ_{WL} 与时间的关系曲线

Fig. 3 Evolution of ρ_{WL} of the LY12CZ aluminum alloy in blank H_2SO_4 solution or inhibitors-containing H_2SO_4 solution

结合失重、腐蚀速率及光学显微镜分析,可见与空白 H_2SO_4 溶液中相比,三种有机物的添加都使铝合金试样的失重有所减小,腐蚀速率有所降低,试样的发黑程度有所减轻,说明三种有机物都对 LY12CZ 铝合金在酸性溶液中的腐蚀有一定抑制作用。其中 MBIH 缓蚀效果最好,其次是 BTA,再次是 8Q,8Q 体系中在 40h 时失重已经与空白 H_2SO_4 溶液中相近。

为了研究三种有机物对 LY12CZ 铝合金在酸性溶液中的缓蚀行为,通过动电位极化进行了不同体系中浸泡不同时间的腐蚀电位 E_{corr} 及腐蚀电流 i_{corr} 的测量。

从图 4 在不同体系中浸泡 10h 的动电位极化曲线可以看出,阳极极化部分电流差别较小,阴极极化部分电流差别较大,由此推测缓蚀剂为阴极控制机理。

从图 5 中各个体系 LY12CZ 铝合金试样的 E_{corr} 值随时间的变化可以看出,各体系中的 E_{corr} 值都在浸泡初期迅速正移,这是由于铝合金表面形成了钝化膜,抑制了阳极反应的进行;随后随着腐蚀产物的堆积, E_{corr} 值逐渐稳定并略有上升。缓蚀剂的加入导致试样的 E_{corr} 值相比于空白 H_2SO_4 溶液,明显向阴极方向移动,这是因为缓蚀剂吸附在电位较正的阴极 Cu 的表

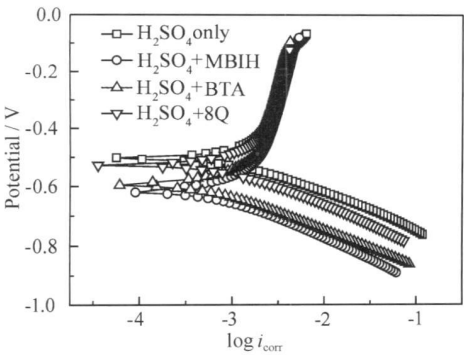


图 4 LY12CZ 铝合金在不同体系中浸泡 10h 的极化曲线

Fig. 4 Potentiodynamic polarization curves for LY12CZ aluminum alloy immersed for 10h in blank H₂SO₄ solution or inhibitors containing H₂SO₄ solution

面,抑制了阴极反应的进行,这与极化曲线的分析结果相同。其中 MBIH 体系中试样 E_{corr} 值下降最多,说明对阴极反应的抑制作用最强,其次是 BTA,再次是 8Q。

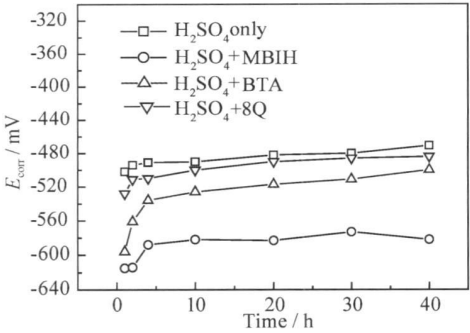


图 5 浸泡在不同体系中的 LY12CZ 铝金属蚀速率 E_{corr} 与时间的关系曲线

Fig. 5 Evolution of E_{corr} of the LY12CZ aluminum alloy in blank H₂SO₄ solution or inhibitors containing H₂SO₄ solution

通过极化曲线及腐蚀电位,获得腐蚀电流 i_{corr} 值。缓蚀效率 IE_i 可通过公式(2)算出:

$$IE_i = (1 - \frac{i_{corr}}{i_{corr}^0}) \times 100\% \tag{2}$$

其中 i_{corr}^0 代表不含缓蚀剂体系中的腐蚀电流。所得的腐蚀电流 i_{corr} 及缓蚀效率 IE_i 值如表 3 所示。

从表 3 中能够看出,缓蚀剂的加入使 i_{corr} 值明显降低,说明对 LY12CZ 铝合金在酸性溶液中的腐蚀起到了抑制作用。其中 MBIH 体系中 i_{corr} 值降低最为明显,在浸泡 2h 内腐蚀电流仅是空白 H₂SO₄ 溶液中的 1/3,其次是 BTA,再次是 8Q。随着腐蚀产物的堆积,三种缓蚀剂的缓蚀效率都随着浸泡时间的延长呈下降趋势,相同腐蚀时间下,MBIH 缓蚀效率最高,其次是 BTA,再次是 8Q。

表 3 不同体系中 LY12CZ 铝合金试样的 i_{corr} 及 IE_i
Table 3 The values of i_{corr} and IE_i of the LY12CZ aluminum alloy in blank H₂SO₄ solution or inhibitors containing H₂SO₄ solution

Sample	$i_{corr}/(mA \cdot cm^{-2})$	$IE_i/\%$
A-1	0.166	-
A-2	0.150	-
A-3	0.144	-
A-4	0.113	-
A-5	0.107	-
A-6	0.100	-
A-7	0.099	-
B-1	0.053	68.09
B-2	0.056	65.99
B-3	0.097	33.36
B-4	0.094	16.13
B-5	0.093	14.23
B-6	0.083	11.36
B-7	0.086	6.11
G-1	0.079	52.71
G-2	0.103	31.70
G-3	0.107	26.53
G-4	0.100	11.88
G-5	0.099	8.83
G-6	0.096	4.82
G-7	0.097	1.45
D-1	0.113	31.36
D-2	0.109	27.78
D-3	0.106	26.82
D-4	0.100	11.66
D-5	0.099	8.13
D-6	0.096	3.30
D-7	0.099	0.19

2.2 三种缓蚀剂在酸性溶液中的缓蚀机理

通过腐蚀失重及腐蚀电流 i_{corr} 的变化,得知所选择的三种有机物都能对 LY12CZ 铝合金在酸性溶液中的腐蚀起到抑制作用,并推测为阴极控制机理。为了研究 LY12CZ 铝合金在不同缓蚀剂体系中的缓蚀机理,进行了交流阻抗谱(EIS)测试。图 6 为 LY12CZ 铝合金在不同体系中浸泡 10h 的 Nyquist 图,可见在高频下出现一个较大的容抗弧,低频下出现一个较小的感抗弧,随后在低频下又出现了一个容抗弧。相同浸泡时间下,空白 H₂SO₄ 溶液中试样的高频容抗弧最小,低频感抗弧不明显,MBIH 体系中的高频容抗弧及低频感抗弧的半径最大,其次是 BTA 体系,再次是 8Q 体系。图 7 为在 MBIH 体系中不同浸泡时间的 Nyquist 图,可见随着浸泡时间的延长,高频容抗弧逐渐缩小,低频感抗弧也逐渐缩小直至消失,逐步变为由高频及低频两个容抗弧组成图谱。

在本工作研究的测试体系中,高频容抗弧与铝合金钝化膜及缓蚀剂吸附层的性质有关^[18,19],高频容抗

弧的大小能够反映钝化膜及缓蚀剂吸附层的耐蚀性能。低频容抗弧反映的是铝合金基体的活化溶解或钝化膜生成反应。感抗行为与表面钝化膜的诱导溶解过程有关^[20, 21]。图 6 中缓蚀剂体系中高频容抗弧增大, 说明缓蚀剂的加入导致铝合金钝化膜及缓蚀剂膜层的耐蚀性增大, 并能够对钝化膜的破坏起到一定的抵制和修复作用, 使铝合金基体的活化溶解降低。随着浸泡时间的延长, 图 7 中所示的变化, 说明铝合金钝化膜及缓蚀剂膜层耐蚀性变差, 钝化膜诱导溶解加重, 铝合金基体的活化溶解加重, 这与前文所述光学照片中浸泡一段时间后试样表面发黑可以对应。

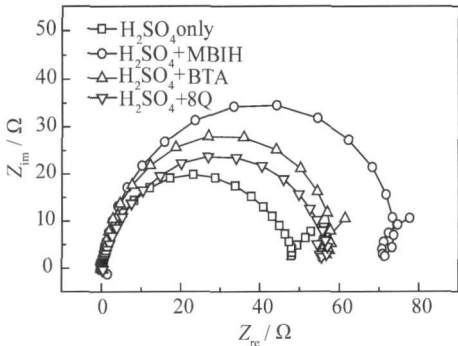


图 6 LY12CZ 铝合金在不同体系中浸泡 10h 的 Nyquist 图

Fig. 6 Nyquist plots for LY12CZ aluminum alloy immersed for 10h in blank H₂SO₄ solution or inhibitors-containing H₂SO₄ solution

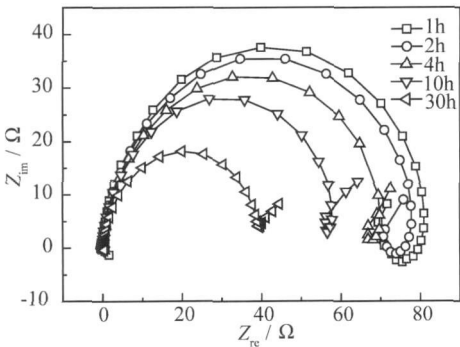


图 7 LY12CZ 铝合金在 MBIH 体系中不同浸泡时间的 Nyquist 图

Fig. 7 Nyquist plots for LY12CZ aluminum alloy immersed for different time in MBIH-containing H₂SO₄ solution

根据以上分析, 采用 ZsimpWin 软件对交流阻抗谱进行拟合, 根据感抗弧是否存在可获得两种等效电路, 分别如图 8 (a), (b) 所示。其中, R_{sa} 代表溶液阻抗, R_f 代表钝化膜、缓蚀剂膜层及所有吸附层阻抗, Q 是常相位元件, R_p 代表电荷转移阻抗, C_{dl} 代表双电层电容。 L 代表表面钝化膜诱导溶解等过程引起的电感, R_L 为此过程引起的阻抗。根据此等效电路, 对图

6 中浸泡在不同体系 10h 后 LY12CZ 铝合金的交流阻抗谱进行解析, 获得电化学参数列于表 4 中。

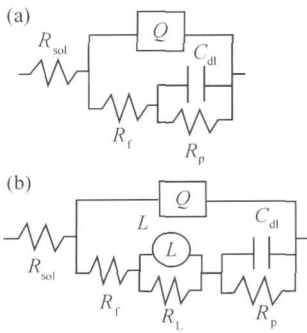


图 8 LY12CZ 铝合金在不同体系中浸泡不同时间的等效电路
(a) 不含感抗弧; (b) 含有感抗弧

Fig. 8 The equivalent circuit models used for fitting experimental spectra for specimen without (a) and with (b) inductive loop

表 4 由等效电路获得的浸泡在不同体系中 10h 后 LY12CZ 铝合金的电化学参数

Table 4 Electrochemical parameters obtained from EIS measurements of the LY12CZ aluminum alloy in blank H ₂ SO ₄ solution or inhibitors containing H ₂ SO ₄ solution				
Parameter	A	B	C	D
R_{sol}/Ω	0.0022	0.0050	0.0077	0.0700
R_f/Ω	39.6	60.7	58.8	45.3
C_Q/F	0.0029	0.0025	0.0013	0.0018
N	0.87	0.85	0.85	0.82
L/H	—	9.96	7.46	2.83
C_{dl}/F	0.90	0.76	0.78	0.98
R_p/Ω	17.9	24.2	24.0	20.5
Goodness of fit	1.7E-4	7.99E-4	7.46E-4	1.26E-3

从表 4 可以看出, 缓蚀剂体系中, 铝合金表面钝化膜及吸附层的阻抗 R_f 明显增加, 电荷转移电阻 R_p 也有所增加, 说明铝合金耐蚀性增强; 浸泡 10h 后, 空白 H₂SO₄ 溶液中几乎没有电感存在, 缓蚀剂体系中均存在电感, 其中 MBIH 体系中电感最大, BTA 次之, 8Q 中最小, 说明缓蚀剂能够对钝化膜起到保护及修复作用。

为了研究这三种有机物对 LY12CZ 铝合金在酸性溶液中的缓蚀机理, 进行了 SEM/EDS 分析。图 9 显示了高倍显微镜下 LY12CZ 铝合金中的主要析出相。一种是粗大且颜色较浅的相, 形状为多边形(如图 9 中“1”所指), 经成分面扫描可知其为富含 Fe, Si 的杂质相, 由于比铝基体电位正, 一般不会氧化。另一种为尺寸较小且颜色较深的相(如图 9 中“2”所指), 经成分面扫描及铝合金金相图谱分析, 其富含 Cu, 为 S 相 (CuMgAl₂) 或 θ 相 (CuAl₂) 与 α (Al) 的共晶相, 它们在铝合金的腐蚀过程中都起阴极作用。

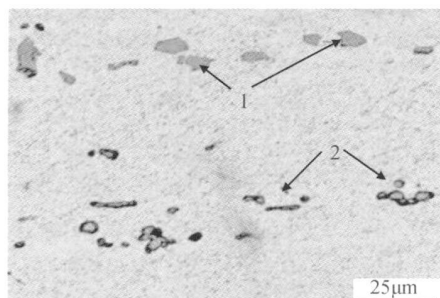


图 9 LY12CZ 铝合金表面的 SEM 照片

Fig. 9 SEM micrograph of the LY12CZ aluminum alloy surface

图 10 显示了在三种缓蚀剂体系中浸泡 2h 后, LY12CZ 铝合金表面上 S 相的微观形貌。可以看到, MBIH 体系中 S 相上的吸附物非常致密, 像一块整体覆盖在颗粒表面, EDS 分析得此物质含有 N, 应

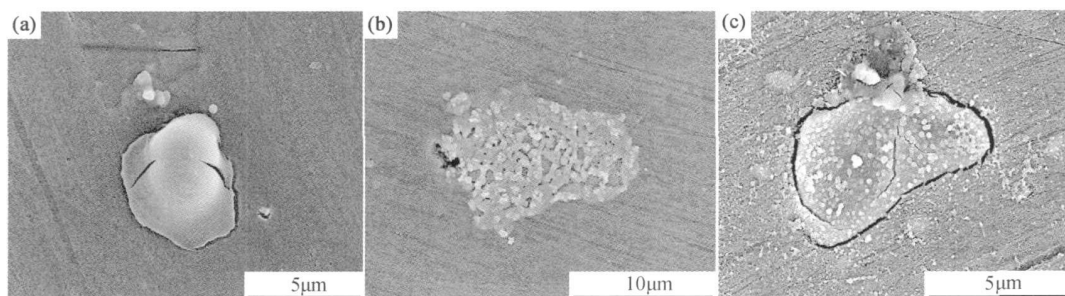


图 10 浸泡在三种缓蚀剂体系中 2h 后 LY12CZ 铝合金表面颗粒处 SEM 照片

(a) MBIH; (b) BTA; (c) 8Q

Fig. 10 SEM micrographs of the particles of the LY12CZ aluminum alloy immersed for 2h in H_2SO_4 solution

(a) MBIH; (b) BTA; (c) 8Q

3 结论

(1) 2-巯基苯并噻唑、苯并三氮唑及 8-羟基喹啉均能够抑制 LY12CZ 铝合金在酸性溶液中的腐蚀, 缓蚀效果为 2-巯基苯并噻唑 > 苯并三氮唑 > 8-羟基喹啉。但随着浸泡时间的延长, 缓蚀效率有所下降。

(2) 2-巯基苯并噻唑和苯并三氮唑能够选择性吸附在 LY12CZ 铝合金表面 S 相残留物及杂质相表面, 形成难溶物, 抑制腐蚀反应的阴极过程, 从而为 LY12CZ 铝合金在酸性溶液中的腐蚀提供良好的保护。8-羟基喹啉能够吸附在整个铝合金的表面, 但随着阳极溶解的进行, 吸附层遭到破坏, 从而影响了其缓蚀效果。

参考文献

[1] LIU Z, CHONG P H, BUTT A T, et al. Corrosion mechanism of laser-melted AA 2014 and AA 2024 alloys[J]. Applied Surface

Science, 2005, 247(1-4): 294-299.

[2] BUCHHEIT R G, GRANT R P, HLAVA P F, et al. Local dissolution phenomena associated with S phase (Al_2CuMg) particles in aluminum alloy 2024-T3[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1997, 144(8): 2621-2644.

[3] SZKLARSKA-SMIALOWSKA Z. Pitting corrosion of aluminum[J]. Corrosion Science, 1999, 41(9): 1743-1767.

[4] CAMPESTRINI P, WESTING E P M VAN, ROOIJEN H W VAN, et al. Relation between microstructural aspects of AA2024 and its corrosion behaviour investigated using AFM scanning potential technique[J]. Corrosion Science, 2000, 42(11): 1853-1861.

[5] CAMPESTRINI P, TERRY N H, HOVESTAD A. Formation of a cerium based conversion coating on AA2024: relationship with the microstructure[J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 176(3): 365-381.

[6] YASAKU KIRYL A, ZHELUDKEYVICH MIKHAIL L. Mechanism of corrosion inhibition of AA2024 by rare earth compounds[J]. Journal of Physical Chemistry, 2006, 110(11): 5515-5528.

- [7] MISHRA AJIT KUMAR, BALASUBRAMANIAM R. Corrosion inhibition of aluminium by rare earth chlorides[J]. Materials Chemistry and Physics, 2007, 103(2- 3): 385- 393.
- [8] ALLACHI H, CJAOKET F, DRAOUI K. Corrosion inhibition of AA6060 aluminium alloy by lanthanide salts in chloride solution [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 475(1- 2): 300- 303.
- [9] BETHENCOURT M, BOTANA F J, CALVINO J J. Lanthanide compounds as environmentally-friendly corrosion inhibitors of aluminium alloys: a review [J]. Corrosion Science, 1998, 40(11): 1803- 1819.
- [10] BLIN F, KOUTSOUKOS P, KLEPETSANIS P, et al. The corrosion inhibition mechanism of new rare earth cinnamate compounds: electrochemical studies [J]. Electrochimica Acta, 2007, 52(21): 6212- 6220.
- [11] DAVO' B, DAMBORENEA DE J J. Use of rare earth salts as electrochemical corrosion inhibitors for an Al-Li-Cu (8090) alloy in 3.56% NaCl [J]. Electrochimica Acta, 2004, 49(27): 4957- 4965.
- [12] GARRIGUES L, PEBERE N, DABOSI F. An investigation of the corrosion inhibition of pure aluminum in neutral and acidic chloride solutions [J]. Electrochimica Acta, 1996, 41(7- 8): 1209- 1215.
- [13] LI Song mei, ZHANG Hong rui, LIU Jiar hua. Corrosion behavior of aluminum alloy 2024 T3 by 8 hydroxy quinoline and its derivative in 3.5% chloride solution [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17: 318- 325.
- [14] CARRON KEITH T, XUE GI, LEWIS MARY L. A surface enhanced Raman spectroscopy study of the corrosion-inhibiting properties of benzimidazole and benzotriazole on copper [J]. Langmuir, 1991, 7(1): 2- 4.
- [15] ZHELDUDKEVICH M L, YASAKAU K A, POZNYAK SK, et al. Triazole and thiazole derivatives as corrosion inhibitors for AA2024 aluminium alloy [J]. Corrosion Science, 2005, 47(12): 3368- 3383.
- [16] TAVAKOLI H, SHAHRABI T. Synergistic effect on corrosion inhibition of copper by sodium dodecylbenzenesulphonate (SD-BS) and 2-mercaptobenzoxazole [J]. Materials Chemistry and Physics, 2008, 109(2- 3): 281- 286.
- [17] SAYED S, ABD EL REHIM. The corrosion inhibition of aluminium and its copper alloys in 1.0M H₂SO₄ solution using linear sodium dodecyl benzene sulfonate as inhibitor [J]. Materials Chemistry and Physics, 2008, 112(3): 898- 906.
- [18] BESSONE J, MAYER C, LUTTNER K, et al. AC impedance measurements on aluminium barrier type oxide films [J]. Electrochimica Acta, 1983, 28(2): 171- 175.
- [19] WIT DE H J, WIJENBERGE C, CREVECOEUR C. Impedance measurements during anodization of aluminum [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1979, 126(5): 779- 785.
- [20] BESSONE J B, SALINAS D R, MAYER C, et al. An EIS study of aluminium barrier-type oxide films formed in different media [J]. Electrochimica Acta, 1992, 37(12): 2283- 2290.
- [21] LENDERINK H J W, LINDEN M V D, WIT DE H J. Corrosion of aluminium in acidic and neutral solutions [J]. Electrochimica Acta, 1989, 38(14): 1989- 1992.

收稿日期: 2009-07-20; 修订日期: 2010-07-20

作者简介: 刘建华(1957—),男,教授,从事材料腐蚀与防护方面研究工作,联系地址: 北京航空航天大学材料科学与工程学院 103 教研室 (100191), E-mail: liujh@buaa.edu.cn

(上接第 37 页)

(3) 1500℃疲劳断裂后, 3D-Cf/SiC 复合材料中 SiC/PyC 界面处的热解炭微晶片层变形明显, 由平直状变为卷曲状。

参考文献

- [1] HIROSHI KAYA. The application of ceramic matrix composites to the automotive ceramic gas turbine [J]. Composites Science and Technology, 1999, 59 (6): 861- 872.
- [2] WANG Z G, LAIRD C, HASHIN Z. The mechanical behavior of a cross weave ceramic matrix composite [J]. Mater Sci, 1991, 26 (19): 5335- 5341.
- [3] WINFRED L MORRIS. Fatigue mechanisms in graphite/SiC composites at room and high temperature [J]. J Am Ceram Soc, 1994, 77 (3): 792- 800.
- [4] SHULER S F, HOLMES J W, WU X. Influence of loading frequency on the room temperature fatigue of a carbon fiber/SiC composite [J]. J Am Ceram Soc, 1994, 76 (9): 2327- 2336.
- [5] 乔生儒, 杜双明. 3D C/SiC 复合材料的损伤机理 [J]. 机械强度, 2004, 26(3): 307- 312.
- [6] 杜双明, 乔生儒. 3D C/SiC 复合材料拉-拉疲劳模量和电阻的变化 [J]. 宇航材料工艺, 2002, 32(5): 38- 41.
- [7] DALMAZ A, ABBE F. Mechanical behavior and damage development during cyclic fatigue at high temperature of 2.5D C/SiC composites [J]. Science and Technology, 1998, 58 (5): 693- 699.
- [8] 杜双明, 乔生儒. 3D C/SiC 复合材料在室温和高温下的拉-拉疲劳行为 [J]. 材料工程, 2002, (9): 22- 25.
- [9] BOITIER G, VICENS J, CHERMANT J L. Understanding the creep behavior of a 2.5D C/SiC composite II: experimental specifications and macroscopic mechanical creep responses [J]. Mater Sci Eng, 2000, A289 (2): 265- 275.

收稿日期: 2010-03-11; 修订日期: 2011-03-05

作者简介: 杜双明(1963—),男,博士,副教授,主要从事超高温结构复合材料研究,联系地址: 西安市雁塔路中段 58 号西安科技大学材料学院 (710054), E-mail: shuangmingdu@163.com