

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2021.01.010

2A12 铝合金电化学腐蚀行为研究

王业东, 蹇海根, 杨孝梅, 肖可谋, 雷新蕾

(湖南工业大学 冶金与材料工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 采取正交试验方法, 利用极化曲线和电化学阻抗谱 (EIS) 等电化学方法研究了 2A12 铝合金在不同溶液浓度、pH 值以及温度的 NaCl 溶液中的腐蚀行为。试验结果表明, 溶液浓度、pH 值以及温度对 2A12 铝合金在 NaCl 溶液中耐腐蚀行为的影响依次为: pH 值、温度、溶液浓度。2A12 铝合金的耐腐蚀性能随着 NaCl 溶液浓度的增加而变差; NaCl 溶液温度越高, 腐蚀电流密度 I_{corr} 越大, 合金耐腐蚀性能下降; 溶液中性条件下, 合金耐腐蚀性能最强, 碱性条件下耐腐蚀性能最差; 酸性条件下腐蚀电流密度 I_{corr} 随 pH 值的降低而增大, 合金耐腐蚀性能减弱。

关键词: 2A12 铝合金; 极化曲线; 电化学阻抗谱; 腐蚀电流密度

中图分类号: TG172

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2021)01-0069-07

引文格式: 王业东, 蹇海根, 杨孝梅, 等. 2A12 铝合金电化学腐蚀行为研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2021, 35(1): 69-75.

Electrochemical Corrosion Behavior of 2A12 Aluminum Alloy

WANG Yedong, JIAN Haigen, YANG Xiaomei, XIAO Kemou, LEI Xinlei

(College of Metallurgy and Material Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: A research has been conducted on the electrochemical behavior of 2A12 aluminum alloy in NaCl solutions with different concentration, pH value and temperature by adopting electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and electrochemical impedance spectroscopy (EIS). The results show that the influence of solution concentration, pH value and temperature on corrosion resistance of 2A12 aluminum alloy in NaCl solutions follows the following order: pH value, temperature, concentration. The corrosion resistance of 2A12 aluminum alloy deteriorates with the increase of NaCl concentration. The corrosion resistance of 2A12 aluminum alloy decreases with the increase of NaCl solution concentration; the higher the NaCl solution temperature is, the higher the corrosion current density I_{corr} will be, with the corrosion resistance of 2A12 aluminum alloy decreasing as well. The corrosion resistance of the alloy is the strongest under the neutral solution condition, while the worst under the alkaline condition. The corrosion current density I_{corr} increases with the decrease of pH value under the acid condition, with the corrosion resistance of the alloy decreasing simultaneously.

Keywords: 2A12 aluminum alloy; polarization curve; electrochemical impedance spectroscopy; corrosion current density

收稿日期: 2020-04-14

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2018JJ4060), 湖南省创新型省份建设专项科普专题基金资助项目 (2020ZK4023), 湖南省教育厅科学研究基金资助重点项目 (20A147)

作者简介: 王业东 (1989-), 男, 湖南邵阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为铝合金电化学腐蚀与防护, E-mail: 1204197225@qq.com

通信作者: 蹇海根 (1980-), 男, 湖南衡阳人, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要从事铝合金焊接, 铝合金腐蚀与防护方面的教学与研究, E-mail: jianhaigen2001@163.com

1 研究背景

2A12 铝合金的密度低、加工性能良好、导电性能优良,同时具备高的比强度和硬度,是一种优质的结构材料,在航空航天、电力传送、交通运输等方面应用广泛^[1-3]。2A12 铝合金属于 Al-Cu 系合金,可以进行热处理强化,该系列铝合金经固溶时效处理后会在晶界处析出 CuAl_2 、 CuMgAl_2 以及 Al_6Mg 等强化相,从而获得更高的强度和硬度。但是, CuAl_2 等相属于阳极性成分,在复杂的服役环境下往往优先溶解,造成晶间腐蚀,甚至发展成为剥蚀,这对材料防腐是极其不利的^[4-6]。因此,探究 2A12 铝合金在复杂服役环境下的腐蚀行为及其机理就具有重要的现实意义。

目前,国内外对于 2A12 铝合金腐蚀行为的研究,大多采用室内加速腐蚀实验模拟铝合金在真实大气环境或海水盐雾环境下的腐蚀过程,以此探究铝合金材料在不同服役环境下的腐蚀行为及其规律。K. H. Na 等^[7]研究了 2A12 铝合金在中性氯化物水溶液中的点蚀敏感性;Wang Z. Y. 等^[8]研究了在大气污染环境对 2A12 铝合金腐蚀行为的影响;李慧艳等^[9]研究了 2A12 铝合金在吐鲁番干热大气环境中的腐蚀行为规律;李一等^[10]模拟了 2A12 铝合金在盐雾环境下的腐蚀行为,得出海洋大气环境下 2A12 铝合金的腐蚀规律及机理;韩德盛等^[11-12]研究了温度、海洋大气湿度对 2A12 铝合金初期腐蚀行为的影响;李涛等^[13]则研究了 Cl^- 浓度对 2A12 铝合金电化学行为的影响。上述研究都是在一个特定的环境下,研究单一因素的变化对 2A12 铝合金腐蚀行为的影响,而铝合金材料真实的服役环境远比实验室模拟的环境要复杂和多变。所以,本研究拟采用正交试验方法,运用现代电化学测试技术,研究不同溶液浓度、pH 值以及温度对 2A12 铝合金腐蚀行为的影响,并进一步揭示多重因素共同作用下 2A12 铝合金的腐蚀行为机理及其变化规律。

2 实验材料与方法

2.1 试样的制备

实验材料为 15 mm 厚 T4 态 2A12 铝合金板材,其化学成分见表 1。将实验板材用 CD-100 型线切割机切割成 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 的试样,选用其中一个面作为工作面,其余面用自凝型义齿基托树脂密封。用金相砂纸将工作面逐级打磨至 2 000 #砂纸,再经酒精和丙酮除油、去离子水清洗干燥后,置于试样袋中备用。

表 1 2A12 铝合金的化学成分

Table 1 Chemical components of 2A12 aluminum alloy

成分	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Mn	Ti
质量分数 /%	余量	3.8~4.9	1.2~1.8	≤ 0.5	≤ 0.3	0.3~0.9	≤ 0.15

2.2 溶液的配制

通过正交试验的方法综合考察溶液浓度、pH 值以及温度对 2A12 铝合金腐蚀行为的影响。采用 NaCl (分析纯)和去离子水配置不同浓度的 NaCl 溶液,并用 NaOH 溶液和 H_2SO_4 溶液调配 NaCl 溶液的 pH 值,电化学测试过程中用电子恒温不锈钢水浴锅控制溶液的温度。根据 NaCl 溶液浓度、pH 值和温度 3 个因素,选取四水平进行试验,其具体的三因素四水平正交试验方案如表 2 所示。

表 2 2A12 铝合金电化学腐蚀行为正交试验因素水平表

Table 2 Orthogonal experimental factor level table of electrochemical corrosion behavior of 2A12 aluminum alloy

因素水平	NaCl 质量分数 /%	pH 值	温度 / $^{\circ}\text{C}$
I	0.5	3	25
II	2.0	5	35
III	3.5	7	45
IV	5.0	10	55

2.3 电化学实验

分析设备使用 MUL TI AUTOLAB M204 型电化学工作站,测试时选用传统的三电极体系,辅助电极为铂电极,参比电极为饱和甘汞电极 (saturated calomel electrode, SCE),工作电极为 2A12 铝合金。极化曲线的扫描范围相对开路电位 $-0.8\sim 0.8\text{ V}$,扫描速率为 1 mV/s ;在开路电位下 (open circuit potential, OCP) 进行电化学阻抗谱的测量,正弦扰动幅值为 10 mV ,扫描频率为 $0.01\sim 100\ 000\text{ Hz}$ 。实验过程中的腐蚀介质为已经调配好特定浓度和 pH 值的 NaCl 溶液,用电子恒温不锈钢水浴锅控制溶液的温度。

3 实验结果与分析

3.1 极化曲线

测定腐蚀金属电极的极化曲线是探究金属腐蚀行为规律及其机理的常用方法。在极化曲线的强极化区,采用 Tafel 外推法,可以求得腐蚀金属电极的自腐蚀电流密度 I_{corr} 和自腐蚀电位 E_{corr} 等关键性的电化学参数,这些参数对于金属材料的防腐保护具有重要的意义^[14]。图 1 为实验所得 2A12 铝合金在不同浓度 NaCl 溶液中的极化曲线。以 0.5%~3~25 为例,0.5% 代表溶液中 NaCl 的质量分数,3 代表溶液 pH 值,25 代表溶液温度。

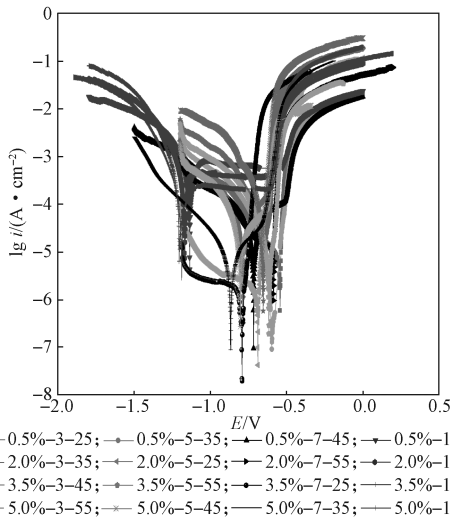


图 1 2A12 铝合金在不同浓度 NaCl 溶液中的极化曲线

Fig. 1 Polarization curves of 2A12 aluminum alloy in different NaCl solutions

由图 1 可以得知, 在酸性和中性溶液条件下, 2A12 铝合金在腐蚀溶液中的极化曲线形状存在一定的相似性, 没有明显的钝化区域, 即在浸泡初期存在着相同的腐蚀过程, 表现为金属在活性区的阳极溶解, 其阳极溶解过程可以简单地表示为: $Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$ 。而在碱性条件下, 2A12 铝合金在腐蚀溶液中的极化曲线存在明显的钝化区域, 这表明 2A12 铝合金在碱性腐蚀溶液中的阳极溶解动力学模型跟酸性和中性溶液条件下的阳极溶解动力学模型并不一样。2A12 铝合金在碱性溶液条件下的阳极溶解过程可以分为 3 个阶段: 第一阶段是离子电流电阻很大的氧化膜生成过程, 总的电极反应为 $Al + 2H_2O \rightarrow AlOOH + 3H^+ + 3e^-$; 第二阶段是阳极氧化膜的化学溶解过程, 电极反应为 $AlOOH + OH^- \rightarrow Al(OH)_4^-$; 第三阶段, 随着电极电位继续正移, 又一电极反应 $Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$ 开始, 电流密度急剧上升, 点蚀电位和腐蚀电位明显分离^[15]。从图 1 可以看出, 与酸性和中性腐蚀溶液相比, 碱性条件下 2A12 铝合金的腐蚀电位出现明显的负移。

同时还可以发现, 在碱性条件下, 无论溶液温度在 25~55 °C 区间内如何变化, 2A12 铝合金在腐蚀溶液中的极化曲线都存在明显的钝化区域。而酸性和中性条件下, 温度的变化并没有引起钝化现象。即 NaCl 溶液温度在 25~55 °C 区间内, 温度的变化不会改变 2A12 铝合金在腐蚀溶液中的阳极溶解动力学规律。同样, NaCl 溶液质量浓度在 0.5%~5% 区间内, 浓度的变化也不会改变 2A12 铝合金在腐蚀溶液中的阳极溶解动力学规律。

3.2 电化学阻抗谱 (EIS)

利用电化学阻抗谱和等效电路研究材料在溶液

中的腐蚀行为的方法比较直观^[16]。同时利用 Zsimp Win 软件对 2A12 铝合金在不同 NaCl 溶液条件下的电化学阻抗谱进行拟合。图 2 所示为 2A12 铝合金在不同 NaCl 溶液中的电化学阻抗谱。其中, 图 2b、2c 分别为图 2a、2b 中虚线方框区域的局部放大图。

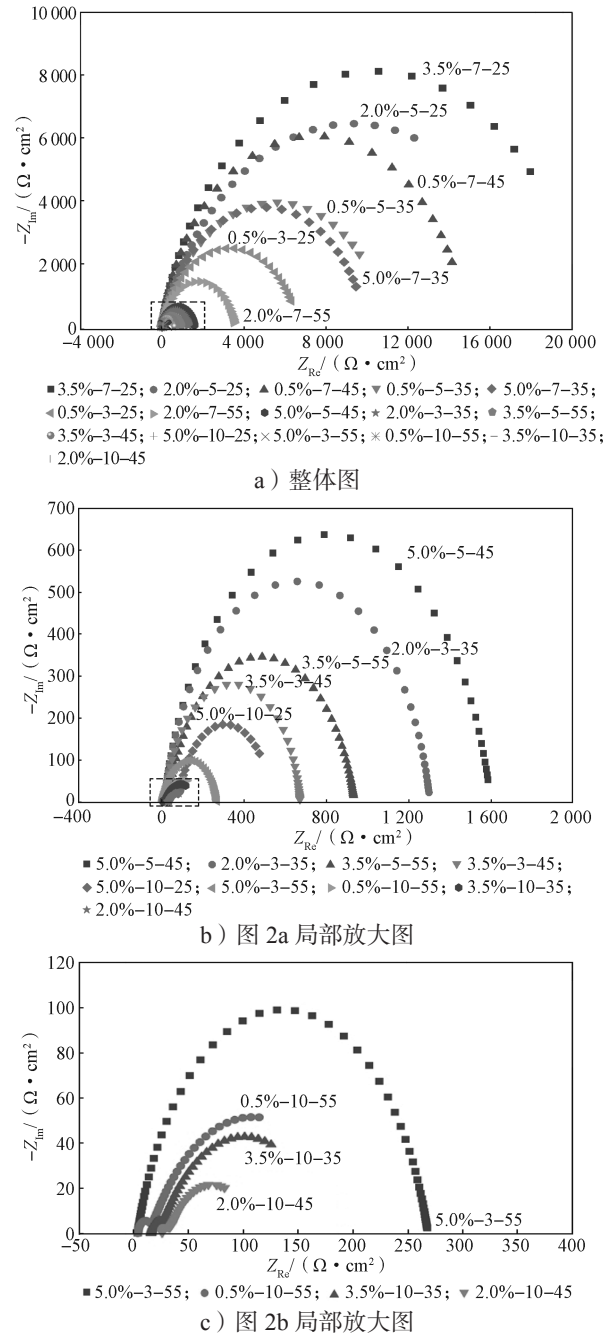


图 2 2A12 铝合金在不同 NaCl 溶液中的电化学阻抗谱

Fig. 2 Electrochemical impedance spectroscopy of 2A12 aluminum alloy in different NaCl solutions

由图 2 可知, 溶液在酸性和中性条件下, 其阻抗图谱只在高频区出现一个容抗弧, 代表的是金属基体与溶液之间的双电层行为, 相对应的是 2A12 铝合金金属基体的溶解过程。当溶液 pH 值为 10 时, 其阻抗图谱中出现了两个容抗弧, 高频下对应的是氧化膜与溶

液之间的双电层行为，中低频的容抗弧对应的是氧化膜层下基体金属的溶解过程。碱性条件下，无论溶液温度和浓度如何变化，其阻抗图谱中均会出现两个容抗弧，而在酸性和中性条件下，不管溶液温度和浓度如何变化都只出现一个容抗弧。上述结果表明：电化学阻抗图谱所得到结果与极化曲线得到的结果具有一致性。

经拟合得到 2A12 铝合金在不同 NaCl 溶液中的两个有效电路，如图 3 所示，图中 R_s 为溶液电阻， Q 为常相位角元件， Q 有两个参数，一个是 Y_0 ，其量纲 $S \cdot cm^{-2} \cdot s^{-n}$ ，另一个是 n ，为无量纲的指数，具体拟合参数见表 3。其中， Q_1 为高频容抗弧对应的常相位角元件， Q_2 为低频容抗弧对应的常相位角元件。 Q_1 对应的两个参数分别为 Y_0^1 和 n_1 ， R_1 为高频容抗弧对应的等效极化电阻；而 Q_2 对应的两个参数分别为 Y_0^2 和 n_2 ， R_2 为低频容抗弧对应的等效极化电阻。

表 3 2A12 铝合金在不同 NaCl 溶液中的电化学阻抗谱拟合结果
Table 3 EIS fitting results of 2A12 aluminum alloy in different NaCl solutions

溶液条件	$R_s/(\Omega \cdot cm^2)$	$R_1/(\Omega \cdot cm^2)$	$Y_0^1/(S \cdot cm^{-2} \cdot s^{-n})$	n_1	$R_2/(\Omega \cdot cm^2)$	$Y_0^2/(S \cdot cm^{-2} \cdot s^{-n})$	n_2
0.5%-3-25	9.72	6 661	1.74E-4	0.819			
0.5%-5-35	7.83	11 090	2.20E-4	0.789			
0.5%-7-45	6.27	14 890	1.14E-4	0.869			
0.5%-10-55	9.93	11.36	4.55E-4	0.889	186.9	2.54E-2	0.641
2.0%-3-35	11.45	1 290	1.56E-4	0.871			
2.0%-5-25	27.38	18 650	2.49E-4	0.770			
2.0%-7-55	25.28	3 515	1.19E-4	0.874			
2.0%-10-45	25.95	6.831	8.34E-4	0.785	77.39	2.683E-2	0.647
3.5%-3-45	16.44	654	1.73E-4	0.905			
3.5%-5-55	26.04	908.9	1.71E-4	0.829			
3.5%-7-25	8.808	20 710	1.52E-4	0.846			
3.5%-10-35	5.864	8.707	1.28E-3	0.881	152.6	2.11E-2	0.651
5.0%-3-55	3.822	264.5	2.94E-4	0.819			
5.0%-5-45	11.68	1 585	2.41E-4	0.863			
5.0%-7-35	34.69	9 980	1.44E-4	0.828			
5.0%-10-25	5.874	76.51	2.02E-4	0.812	452.4	7.95E-3	0.872

3.3 正交试验结果分析

正交试验的因素及其水平确定以后，由 Minitab 17 软件自动生成正交试验表格。腐蚀电位是腐蚀过程作用的结果，它本身并不是一个热力学参数，一般来说，腐蚀电位的高低同腐蚀速度之间并无一定的关系^[14]。因此，为了科学地评价 2A12 铝合金在不同 NaCl 溶液中耐腐蚀性能的好坏，本课题组选择腐蚀电流密度作为评价指标对其进一步进行了研究。在极化曲线上的强极化区采用 Tafel 外推法，可以求得其腐蚀电流密度，电极系统的极化电阻 R_p 可以由电化学阻抗谱拟合的参数求得。本研究中正交试验表格以及试验结果如表 4 所示。由表 4 中的数据可以得知，腐蚀电流密度越大，阻抗拟合的极化电阻 R_p 就越小。

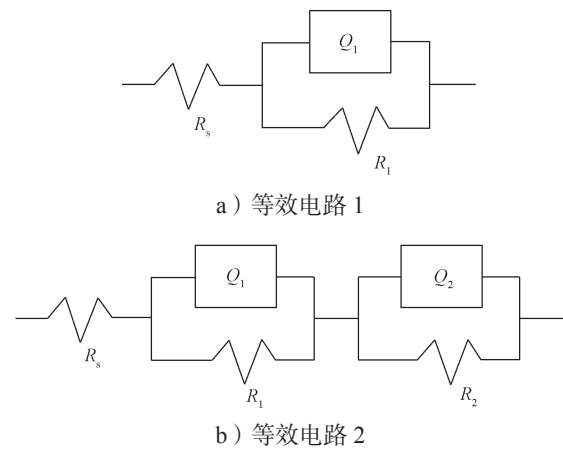


图 3 2A12 铝合金在不同 NaCl 溶液中对应的两种不同的等效电路

Fig. 3 Two corresponding equivalent circuits of 2A12 aluminum alloy in different NaCl solutions

表 4 正交试验结果表

Table 4 Results of orthogonal experiments

实验号	因素					$R_p/\Omega \cdot cm^2$
	NaCl 质量分数 /%	pH 值	温度 / $^{\circ}C$	$I_{corr}/(A \cdot cm^{-2})$		
1	0.5	3	25	1.82E-5	6 661	
2	0.5	5	35	2.72E-6	11 090	
3	0.5	7	45	2.22E-6	14 890	
4	0.5	10	55	1.80E-4	198.26	
5	2.0	3	35	2.86E-5	1 290	
6	2.0	5	25	1.61E-6	18 650	
7	2.0	7	55	2.19E-5	3 515	
8	2.0	10	45	2.04E-4	84	
9	3.5	3	45	5.78E-5	654	
10	3.5	5	55	3.39E-5	908	
11	3.5	7	25	1.51E-6	20 710	
12	3.5	10	35	2.02E-4	161	
13	5.0	3	55	1.79E-4	264	
14	5.0	5	45	2.50E-5	1 585	
15	5.0	7	35	9.95E-6	9 980	
16	5.0	10	25	1.21E-4	528	

对正交试验结果进行比较分析,其结果如表5所示。比较腐蚀电流密度 I_{corr} 对应于同一因素水平的极差 R 的大小,可得 $R_{\text{pH值}} > R_{\text{温度}} > R_{\text{浓度}}$,说明溶液 pH 值的变化对 2A12 铝合金在 NaCl 溶液中腐蚀电流密度的影响最大,温度次之,浓度的影响最小。所以,这 3 个因素对腐蚀电流密度指标影响的主次依序是: pH 值 - 温度 - 浓度。同样,比较极化电阻 R_p 对应于同一因素水平的极差 R ,可得 3 个因素对极化电阻指标影响的主次依序是: pH 值 - 温度 - 浓度。上述结果表明,极化测试所得结果与电化学阻抗谱测试所得结果具有良好的一致性。

表 5 2A12 铝合金电化学腐蚀行为正交试验结果分析表

Table 5 Analysis of orthogonal experiment results of electrochemical corrosion behavior of 2A12 aluminum alloy

均值	I_{corr}			R_p		
	浓度	pH 值	温度	浓度	pH 值	温度
I	5.08E-5	7.09E-5	3.56E-5	8 210	2 217	11 637
II	6.40E-5	1.58E-5	6.08E-5	5 885	8 058	5 630
III	7.38E-5	8.90E-6	7.23E-5	5 609	12 274	4 303
IV	8.37E-5	1.77E-4	1.04E-4	3 090	243	1 222
极差 R	3.30E-5	1.68E-4	6.81E-5	5 120	12 031	10 416

3.3.1 溶液浓度对合金电化学腐蚀行为的影响

根据表 5 的结果,考察溶液浓度对 2A12 铝合金板材电化学腐蚀行为的影响,绘制因素 - 效果图,如图 4 所示。由图可知,腐蚀电流密度随溶液浓度的增加而变大,而极化电阻随溶液浓度的增加而变小。

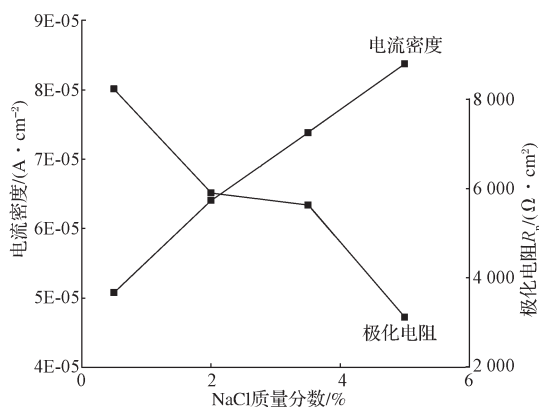


图 4 溶液浓度与 2A12 铝合金电化学腐蚀性能的关系曲线
Fig. 4 Relationship between the concentration of solution and the electrochemical corrosion behavior of 2A12 aluminum alloy

由极化曲线图(图 1)得知,2A12 铝合金在酸性和中性溶液条件下,极化曲线形状相似,且没有明显的钝化区,在浸泡初期存在着相同的腐蚀过程。去极化剂的阴极还原反应为: $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$, 电位继续负移到一定程度后,析氢反应开始。氯化物溶液中, Cl^- 本身是特性吸附极强的离子,它极易吸

附在金属表面活性较高的位置,参与铝的阳极溶解过程,阳极极化反应如下:



根据电极反应动力学关系式,可知随着 Cl^- 浓度的增大,电极反应速率加快,腐蚀电流密度增大,极化电阻变小。

在碱性条件下,由极化曲线图(图 1)得知,2A12 铝合金的阳极溶解可以分为两个过程。首先,是阳极氧化膜的生成和溶解的过程,总的电极反应式为 $\text{Al} + 4\text{OH}^- \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_4^- + 3\text{e}^-$,当电极电位正移到一定程度后, Cl^- 参与的铝的阳极溶解反应开始,此时电流密度急剧增大,即发生反应(I¹)、(II¹)和(III¹),故 Cl^- 浓度越大,铝合金受到的腐蚀越严重,其耐腐蚀性能下降。

3.3.2 溶液 pH 值对合金电化学腐蚀行为的影响

根据表 5 的结果,考察溶液 pH 值对 2A12 铝合金板材电化学腐蚀行为的影响,绘制因素 - 效果图,如图 5 所示。由图可知,酸性条件下,腐蚀电流密度随溶液 pH 值的降低而增大,极化电阻随 pH 值的降低而变小。pH 值为 7 时腐蚀电流密度最小,极化电阻最大。碱性条件下,两者变化相反, pH 值为 10 时腐蚀电流密度最大,而极化电阻最小。

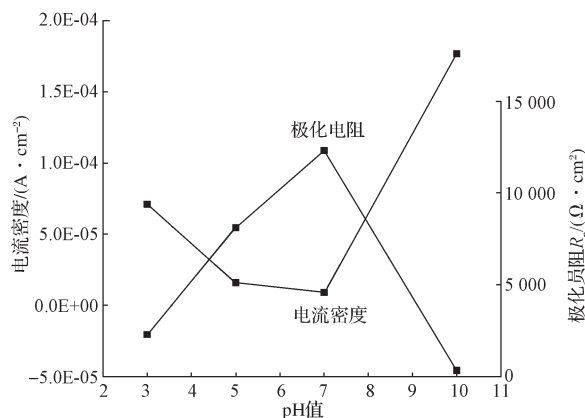
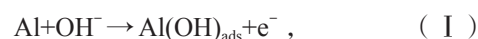


图 5 溶液 pH 值与 2A12 铝合金电化学腐蚀性能的关系曲线
Fig. 5 Relationship between the pH value of solution and the electrochemical corrosion behavior of 2A12 aluminum alloy

酸性条件下,阴极去极化剂的还原反应为 $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$,随着 H^+ 浓度的增加,阴极还原反应速度加快,与之耦合的阳极溶解反应速度也加快,故溶液 pH 值越低,腐蚀电流密度越大,极化电阻越小。

在碱性条件下,2A12 铝合金表面的阳极反应机理^[17]如下:





反应式 (I)、(II) 是氧化膜的生成过程, 反应式 (III) 是氧化膜的化学溶解过程, 从上述过程可以得出, 2A12 铝合金在碱性环境下的电化学腐蚀行为存在两个过程: 一是氧化膜的生成过程; 另一个是氧化膜的快速化学溶解过程, 即氧化膜在碱性环境下, 快速溶解的过程。

整体来看, 2A12 铝合金在碱性环境下, 耐腐蚀性能最差, 在中性环境下耐腐蚀性能最强, 在酸性环境下, 耐腐蚀性能随着 pH 值的降低而减弱。

3.3.3 溶液温度对 2A12 铝合金板材电化学腐蚀行为的影响

根据表 5 的结果, 考察溶液温度对 2A12 铝合金板材电化学腐蚀行为的影响, 绘制因素-效果图, 如图 6 所示。由图可知, 腐蚀电流密度随温度的升高而变大, 而极化电阻随温度的升高而变小。

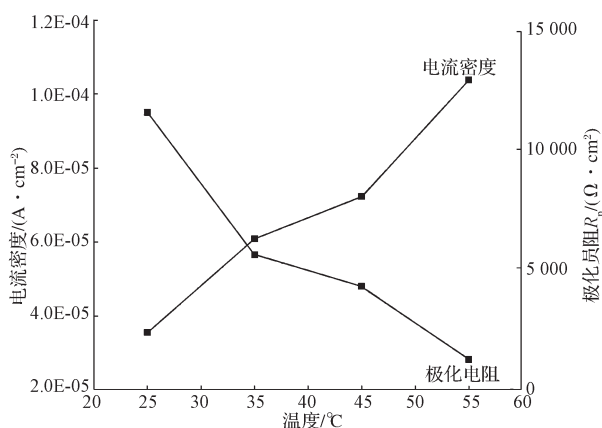


图 6 溶液温度与 2A12 铝合金电化学腐蚀性能的关系曲线
Fig. 6 Relationship between the temperature of solution and the electrochemical corrosion behavior of 2A12 aluminum alloy

温度升高, OH^- 、 Cl^- 等吸附性阴离子扩散速度加快, 活性吸附增强, 反应速率常数 K 增大, 根据电极反应动力学关系式, 电化学反应速率增大, 加快了铝合金的阳极溶解速度, 腐蚀电流变大, 极化电阻变小。

4 结论

1) 溶液浓度、pH 值以及温度对 2A12 铝合金在 NaCl 溶液中电化学腐蚀行为的影响依次为 pH 值-温度-溶液浓度。即 pH 值的变化对 2A12 铝合金在 NaCl 溶液中腐蚀行为的影响最大, 温度次之, 溶液浓度的影响最小。

2) 2A12 铝合金的耐腐蚀性能随 NaCl 溶液浓度

的增加而变差; 溶液温度越高, 腐蚀电流密度越大, 腐蚀速度加快; 中性条件下, 合金的耐腐蚀性能最强, 碱性条件下耐腐蚀性能最差, 酸性条件下合金的耐腐蚀性能随 pH 值的降低而变差。

参考文献:

- [1] 张伟, 魏刚, 肖新科. 2A12 铝合金本构关系和失效模型[J]. 兵工学报, 2013, 34(3): 276-282.
ZHANG Wei, WEI Gang, XIAO Xinke. Constitutive Relation and Fracture Criterion of 2A12 Aluminum Alloy[J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(3): 276-282.
- [2] 张娟娟, 董继峰, 候强胜, 等. 大规模 2A12 铝合金圆锭疏松缺陷产生的原因及控制措施[J]. 有色冶金节能, 2017, 33(4): 16-19.
ZHANG Juanjuan, DONG Jifeng, HOU Qiangsheng, et al. Causes Analysis on the Porosity Defect of Large-Size 2A12 Aluminium Alloy Round Ingot and Its Control Measures[J]. Energy Saving of Non-Ferrous Metallurgy, 2017, 33(4): 16-19.
- [3] 张晓盼, 赵作福, 霍宝阳, 等. 热处理对 2A12 铝合金组织性能影响的研究进展[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2018, 38(2): 121-124, 131.
ZHANG Xiaopan, ZHAO Zuofu, HUO Baoyang, et al. Research Progress of Heat Treatment on Microstructure and Properties of 2A12 Aluminum Alloy[J]. Journal of Liaoning Institute of Technology (Natural Science Edition), 2018, 38(2): 121-124, 131.
- [4] 周春华, 郑居正, 王洪涛, 等. 2A12-T4 铝合金板硬质阳极氧化试验[J]. 轻合金加工技术, 2008, 36(9): 40-42.
ZHOU Chunhua, ZHENG Juzheng, WANG Hongtao, et al. Experiments of Hardening 2A12-T4 Al Alloy Sheet Through Anodization[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2008, 36(9): 40-42.
- [5] 曹歆昕, 李吉丹, 张晶, 等. 2A12 铝合金硬质阳极氧化工艺研究[J]. 电镀与精饰, 2017, 39(9): 38-41.
CAO Xinxin, LI Jidan, ZHANG Jing, et al. Technical Study on Hard Anodic Oxidation of 2A12 Aluminum Alloy[J]. Plating & Finishing, 2017, 39(9): 38-41.
- [6] 钱建刚, 李荻, 郭宝兰, 等. LC4 高强铝合金的腐蚀性能研究[J]. 腐蚀与防护, 2002, 23(8): 340-343.
QIAN Jiangan, LI Di, GUO Baolan, et al. Corrosion Behavior of High-Strength Aluminum Alloy LC4[J]. Corrosion & Protection, 2002, 23(8): 340-343.
- [7] NA K H, PYUN S I. Comparison of Susceptibility to Pitting Corrosion of AA2024-T4, AA7075-T651 and AA7475-T761 Aluminium Alloys in Neutral Chloride Solutions Using Electrochemical Noise Analysis[J]. Corrosion Science, 2008, 50(1): 248-258.

- [8] WANG Z Y, MA T, HAN W, et al. Corrosion Behavior on Aluminum Alloy LY12 in Simulated Atmospheric Corrosion Process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17(2): 326-334.
- [9] 李慧艳, 方月华, 肖葵, 等. 7A04 和 2A12 铝合金在吐鲁番干热大气环境中的腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(11): 1098-1101, 1107.
LI Huiyan, FANG Yuehua, XIAO Kui, et al. Corrosion Behavior of 7A04 and 2A12 Aluminum Alloys in Hot and Dry Atmosphere Environment in Turpan[J]. Corrosion and Protection, 2014, 35(11): 1098-1101, 1107.
- [10] 李一, 林德源, 陈云翔, 等. 2A12-T4 铝合金在盐雾环境下的腐蚀行为与腐蚀机理研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2016, 28(5): 455-460.
LI Yi, LIN Deyuan, CHEN Yunxiang, et al. Corrosion Behavior of 2A12-T4 Al-Alloy in Salt-Spray Environment[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2016, 28(5): 455-460.
- [11] 韩德盛, 李获. 温度对 LY12 铝合金海洋大气初期腐蚀行为的影响[J]. 材料保护, 2007, 40(6): 7-8, 19.
HAN Desheng, LI Di. Influence of Temperature on Initial Corrosion of LY12 in Marine Atmosphere[J]. Journal of Materials Protection, 2007, 40(6): 7-8, 19.
- [12] 韩德盛, 李获. 海洋大气湿度对 LY12 铝合金初期腐蚀的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2007, 27(3): 134-136.
HAN Desheng, LI Di. Influence of Marine Atmosphere Humidity on Initial Corrosion of LY12[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2007, 27(3): 134-136.
- [13] 李涛, 吴立凡, 李相前, 等. Cl^- 浓度对 2A12 铝合金电化学行为的影响[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(4): 256-260, 296.
LI Tao, WU Lifan, LI Xiangqian, et al. Effect of Cl^- Concentration on the Electrochemical Behaviors of 2A12 Aluminum Alloy[J]. Corrosion and Protection, 2011, 32(4): 256-260, 296.
- [14] 曹楚南. 腐蚀电化学原理[M]. 3 版. 北京: 化学工业出版社, 2008: 5-15.
CAO Chunan. Principles of Electrochemistry of Corrosion[M]. 3rd ed, Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 5-15.
- [15] 杨少华, 刘增威, 林明, 等. 7075 铝合金在不同 pH 值 NaCl 溶液中的腐蚀行为[J]. 有色金属科学与工程, 2017, 8(4): 7-11.
YANG Shaohua, LIU Zengwei, LIN Ming, et al. Corrosion Behavior of 7075 Aluminum Alloy in NaCl Solutions with Different pH Values[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2017, 8(4): 7-11.
- [16] 曹楚南, 张鉴清. 电化学阻抗谱导论[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 20-36.
CAO Chunan, ZHANG Jianqing. An Introduction to Electrochemical Impedance Spectroscopy[M]. Beijing: Science Press, 2004: 20-36.
- [17] 吴茂永, 田继强, 曹立新, 等. 钨铝合金在不同 NaCl 溶液中的电化学腐蚀行为研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2015, 27(1): 25-30.
WU Maoyong, TIAN Jiqiang, CAO Lixin, et al. Electrochemical Corrosion Behavior of Tungsten-Aluminum Alloy in NaCl Solutions[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2015, 27(1): 25-30.

(责任编辑: 申剑)