

2017-08-25

Influence of Typical Anions in Seawater Environments on Corrosion Behaviors of 5083 Aluminum Alloy

Yang-fan TU

Li-ming FENG

Zhi-gang FANG

Hai-tao LIU

Ming-hua JING

Yong GUAN

Naval Academy of Armament, Beijing 100161, China; Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning, China; yguan@imr.ac.cn

Recommended Citation

Yang-fan TU, Li-ming FENG, Zhi-gang FANG, Hai-tao LIU, Ming-hua JING, Yong GUAN. Influence of Typical Anions in Seawater Environments on Corrosion Behaviors of 5083 Aluminum Alloy[J]. *Journal of Electrochemistry*, 2017 , 23(4): 466-472.

DOI: 10.13208/j.electrochem.160614

Available at: <https://jelectrochem.xmu.edu.cn/journal/vol23/iss4/11>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electrochemistry. It has been accepted for inclusion in Journal of Electrochemistry by an authorized editor of Journal of Electrochemistry.

DOI: 10.13208/j.electrochem.160614

Artical ID:1006-3471(2017)04-0466-07

Cite this: *J. Electrochem.* 2017, 23(4): 466-472

Http://electrochem.xmu.edu.cn

海水环境中典型阴离子对 5083 铝合金腐蚀行为的影响

涂扬帆^{1,3}, 冯立明¹, 方志刚², 刘海涛³, 井明华³, 管勇^{2,3*}

(1. 山东建筑大学材料科学与工程学院, 山东 济南 250101; 2. 海军装备研究院, 北京 100161;

3. 中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 采用析因分析试验及动电位极化曲线、电化学阻抗谱(EIS)等测试方法,研究了海水环境因素中的典型阴离子(Cl^- 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-})交互作用对 5083 铝合金耐蚀性的影响. 结果表明,三种阴离子中, Cl^- 、 HCO_3^- 对铝合金点蚀起促进作用. Cl^- 与 HCO_3^- 交互作用时,在 Cl^- 浓度一定的情况下,随着 HCO_3^- 浓度的增加,5083 铝合金耐蚀性呈现出上升→下降→再上升的趋势,在 $70 \sim 90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时耐蚀性能明显降低;在 HCO_3^- 浓度一定的情况下, Cl^- 浓度较低时 5083 铝合金耐蚀性比 Cl^- 浓度较高时差. 在 Cl^- 、 HCO_3^- 浓度较低情况下, SO_4^{2-} 具有抑制腐蚀的作用;当 Cl^- 、 HCO_3^- 浓度较高时, SO_4^{2-} 抑制腐蚀的作用不明显.

关键词: 5083 铝合金;耐蚀性;电解质效应;海水环境

中图分类号: O646.6

文献标识码: A

5XXX 铝镁系合金因其质轻、力学性能优良以及具有较好的耐腐蚀性能,作为结构材料已广泛应用于船舶等领域,其中又以 5083 铝合金最为常用^[1]. 铝镁系合金的耐腐蚀性能与其在自然环境中于合金表面自发形成的氧化层有关,然而该氧化层较薄且不均匀,通常存在微观缺陷,在海水中一旦被破坏即会使铝合金遭受点蚀^[2].

海水环境因素中溶解氧以及 pH 值等对铝合金腐蚀行为有重要影响. 其中,溶解氧的含量直接影响铝合金的氧化过程,通常随着溶解氧含量的降低,铝合金的钝化膜更易遭到破坏,引起点蚀等局部腐蚀;而 pH 值不仅影响铝合金的腐蚀速度,而且还影响着铝合金的点蚀形貌. 海水环境因素中典型阴离子(主要包括 Cl^- 、 HCO_3^- 以及 SO_4^{2-} 等阴离子)对铝镁系合金的腐蚀规律也具有显著影响. 1980 年, Dexter 等^[3]在研究 $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$ 体系对铝合金腐蚀的影响机制时发现,与天然海水相比较,模拟海水所使用的 3.5wt% NaCl 溶液由于缺少 HCO_3^- ,而使 5052 铝合金的自腐蚀电位明显正移,这一现象被 Dexter 等人称为铝合金海水腐蚀行为的电解质效应. 但对于此效应具体作用机制作者

并没有给出进一步阐述.

国内的诸多研究也表明,不同海域海水对铝镁合金显示出不同的腐蚀性,其中,厦门海域海水对铝镁系合金的腐蚀最为严重^[4]. 厦门海域海水环境因素的重要特征是海水盐度较低^[5]. 2002 年,黄桂桥等^[6-8]总结了铝及铝合金在我国各海域海水腐蚀试验站的不同区带暴露 16 年的腐蚀结果. 结果表明,铝及铝合金在我国各海域耐蚀性能相差悬殊. 其中,以 LF6M(5A06 O)为代表的铝镁系合金在厦门海域的腐蚀最为严重. 然而,该研究虽把不同海域腐蚀状况存在差异的原因也归结为电解质效应,但同样没有给出该效应对铝镁系合金在低盐度海水中腐蚀机制的明确阐述.

综上所述,目前对于铝镁系合金在多种阴离子交互作用下的腐蚀行为影响机制尚不明确,并且缺乏定量描述. 对此,本文采用析因分析试验、动电位极化曲线以及电化学阻抗谱等方法,研究了海水环境因素中典型阴离子(Cl^- 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-})单因素及多因素交互作用时对典型铝镁系合金—5083 铝合金腐蚀行为的交互影响机制,以从环境因素

角度研究铝镁系合金海水电解质效应的作用机制。

1 实验

1.1 样品制备

腐蚀电化学测试用电极材料为 5083-H116 铝合金,化学成分(质量百分比)见表 1。电极工作面积为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$,用环氧树脂封装后并用砂纸逐级打磨至 2000#,以无水乙醇及蒸馏水冲洗并冷风吹干后备用。

表 1 5083 铝合金化学成分表

Tab. 1 Chemical composition of 5083 aluminum alloy

Element	Mg	Mn	Fe	Si	Cu	Al
Content/%	4.9	0.5 ~ 0.8	0.4	0.4	0.02	Bal.

1.2 析因分析试验

前期工作中,取宁德、舟山、青岛三个海域一年中四个月的实海海水进行离子浓度分析,分析结果如表 2。依据实际测量值,将三种典型阴离子的浓度变化范围扩展为 $\text{Cl}^-:5000 \sim 20000\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{HCO}_3^-:50 \sim 200\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}:500 \sim 3000\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,并取浓度范围大小极值确定三种典型阴离子多因素交互作用析因分析试验取值。取分析纯 NaCl 、 NaHCO_3 、 Na_2SO_4 分别配制不同离子浓度的电解液进行腐蚀电化学测试。

1.3 腐蚀电化学测试

采用经典三电极体系,工作电极为 5083-H116 铝合金,辅助电极为铂电极,参比电极为饱和甘汞电极(SCE)。腐蚀电化学测试使用 Reference 600 电化学工作站(美国 Gamry 公司)。待铝合金在去气溶液中自腐蚀电位稳定以后进行试验,温度均为室

温,pH 值约为 8.0。动电位极化曲线扫描速度为 $1\text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$,扫描范围为 $-200 \sim 400\text{ mV}$ (vs. OCP),采用 Gamry Echem Analyst 软件进行拟合分析。电化学阻抗谱频率范围为 $10^5 \sim 10^2\text{ Hz}$,扰动幅值为 10 mV ,采用 ZView 软件进行数据解析。

2 结果与讨论

2.1 动电位极化曲线

为研究 5083 铝合金在三种典型阴离子交互作用下的腐蚀电化学特性,测试 5083 铝合金在八种不同浓度电解液中的动电位极化曲线,并拟合出自腐蚀电位 E_{corr} 、自腐蚀电流 I_{corr} 以及击穿电位 E_b ,每种电解液做两次试验,极化曲线测试结果如图 1,拟合结果如表 3 所示。

2.2 因子效应分析

根据析因设计方法的因子效应分析过程^[9],由公式 1-3 计算得出因子 A、AB 以及 ABC 交互作用效应值,其余效应公式以此类推。交互作用以 AB 为例,表示在 A 因子高、低浓度水平上的 B 浓度效应之差(等价于在 B 因子高、低浓度水平上的 A 浓度效应值之差。本文中 A 表示 Cl^- 效应, B 表示 HCO_3^- 效应, C 表示 SO_4^{2-} 效应,其余表示对应因子两两交互或三因子交互作用效应,如表 4 所示:

$$A = \frac{1}{4n}(a+ab+ac+abc-1-b-c-bc) \quad (1)$$

$$AB = \frac{1}{4n}(-a-b+c+ab-bc-ac+abc+1) \quad (2)$$

$$ABC = \frac{1}{4n}(a+b+c-ab-bc-ac+abc-1) \quad (3)$$

n 表示每一种水平组合下测量 n 次实验值, a 、 b 、 c 分别表示因子 A、B、C 为高水平的实验值; ab 、 bc 、 ac 分别表示因子 A 和 B、B 和 C、A 和 C 为高水平的实验值; abc 为三个因子都为高水平的实验

表 2 宁德、舟山和青岛海域海水环境因素

Tab. 2 Main environmental factors of ND, ZS and QD seawater areas

Time	Sea area factors/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)								
	ND			ZS			QD		
	Cl^-	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	HCO_3^-	SO_4^{2-}
Jan.	6369	70.52	766.48	15876	150.65	1858.60	17010	144.24	2710.00
Apr.	8431	76.93	1019.61	16438	147.45	1902.80	18414	141.04	2263.82
Jul.	12493	102.57	1466.96	14204	144.24	1731.00	18633	137.83	2196.79
Oct.	13166	129.54	1587.00	13165	107.01	1537.00	18154	140.80	2128.00

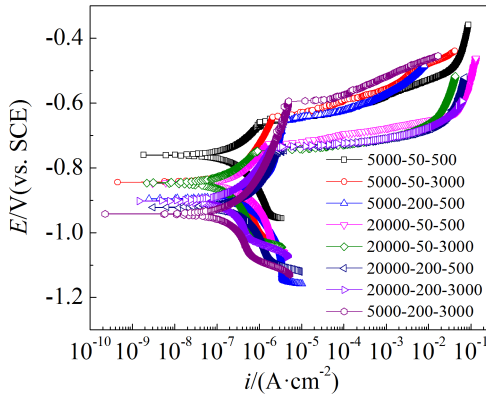


图 1 5083 铝合金在不同浓度 Cl^- 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 条件下的极化曲线, 顺序为 Cl^- - HCO_3^- - $\text{SO}_4^{2-}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$

Fig. 1 Polarization curves of AA5083 aluminum alloy in different concentrations of Cl^- , HCO_3^- and SO_4^{2-} . The sequence is Cl^- - HCO_3^- - $\text{SO}_4^{2-}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$

值; 1 表示因子 A、B、C 都为低水平的实验值。

根据显著性分析过程^[10], 计算出自腐蚀电位、自腐蚀电流和击破电位因子效应方差分析结果并引入 P 作为检验标准, $P(F > F_{\alpha}(1, n^3(n-1))) = \alpha$, 其

中, α 为检验水平, 为使数据区分具有明显显著性, 取检验水平 $\alpha = 0.01$, 经查询 F 检验表可知, $F_{0.01}(1, 8) = 11.25$, 当 $F > 11.25$ 、 $P < 0.01$ 时表示因子效应影响显著, 当 $F < 11.25$ 、 $P > 0.01$ 时表示因子效应影响不显著。其中, 因子效应图中正数表示该因子为正影响, 即使自腐蚀电位和击破电位正移、自腐蚀电流增大, 反之则为负影响。因子效应和显著性分析结果如图 2-4 所示。

据图 2, 对自腐蚀电位影响最为显著的五种因子依次为: B(单一 HCO_3^- , 负向)、AC(Cl^- 与 SO_4^{2-} 交互, 正向)、AB(Cl^- 与 HCO_3^- 交互, 正向)、C(单一 SO_4^{2-} , 正向)、A(单一 Cl^- , 负向), 其余因素及交互作用为不显著。当 Cl^- 和 SO_4^{2-} 维持在低浓度时, 随着 HCO_3^- 浓度的增加, 自腐蚀电位显著负移。当 Cl^- 与 HCO_3^- 交互作用时, 自腐蚀电位正移。当 SO_4^{2-} 与 Cl^- 交互作用时, 自腐蚀电位正移, 表明 SO_4^{2-} 对于铝合金腐蚀具有一定抑制作用。

据图 3, 对自腐蚀电流影响最为显著的六种因子依次为: C(单一 SO_4^{2-} , 负向)、ABC(Cl^- 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 交互, 正向)、AB(Cl^- 、 HCO_3^- 交互, 负向)、B(单一 HCO_3^- , 正向)、BC(HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 交互, 负向)、AC

表 3 动电位极化曲线拟合结果

Tab. 3 The fitting results based on the potentiodynamic polarization curves

Concentration/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)			Parameter					
Cl^-	HCO_3^-	SO_4^{2-}	$E_{\text{corr}}/\text{mV}$		$I_{\text{corr}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$		E_b/mV	
5000	50	500	-761	-769	0.728	0.887	-644	-646
5000	50	3000	-844	-834	0.575	0.604	-640	-648
5000	200	500	-896	-908	6.36	5.69	-655	-652
5000	200	3000	-942	-945	0.650	0.718	-595	-585
20000	50	500	-846	-851	2.61	3.29	-725	-714
20000	50	3000	-847	-835	0.635	0.605	-748	-735
20000	200	500	-922	-916	1.35	1.73	-738	-744
20000	200	3000	-902	-906	1.09	0.984	-740	-741

表 4 各因子及其交互作用效应值

Tab. 4 The data of all factors and their interaction effects

Parameter	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
E_{corr}	-15.8	-93.8	23.3	27.0	34.5	10.0	-6.3
I_{corr}	-0.490	1.080	-2.098	-1.576	0.682	-0.824	1.738
E_b	-102.5	6.3	10.8	-16.5	-21.5	21.3	-16.5

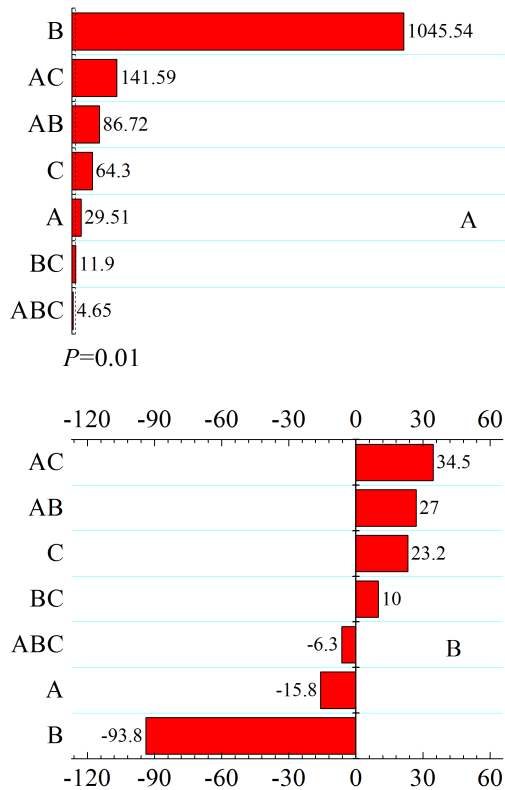


图 2 自腐蚀电位因子效应及显著性分析结果: A. 显著性结果; B. 因子效应值
Fig. 2 The analysis results of significance for corrosion potentials (A) and factorial effects (B)

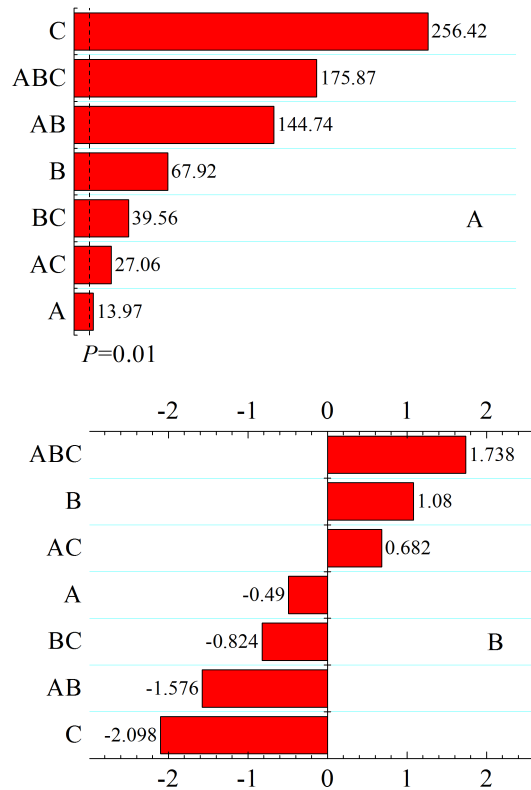


图 3 自腐蚀电流因子效应及显著性分析结果: A. 显著性结果; B. 因子效应值
Fig. 3 The analysis results of significance for corrosion current densities (A) and factorial effects (B)

(Cl⁻与 SO₄²⁻交互,正向),其余因素及交互作用为不显著.在 Cl⁻与 HCO₃⁻都为低水平时,SO₄²⁻能显著降低自腐蚀电流密度,即减缓腐蚀速率.然而,当三者交互作用时,自腐蚀电流将增大,SO₄²⁻对铝合金腐蚀抑制作用不再体现.Cl⁻、HCO₃⁻交互作用时,可显著降低铝合金自腐蚀电流密度.当 Cl⁻和 SO₄²⁻维持在低浓度时,随着 HCO₃⁻浓度的增加,自腐蚀电流显著增大.

据图 4,对击破电位影响最为显著的四种因子依次为:A(单一 Cl⁻,负向)、AC(Cl⁻与 SO₄²⁻交互,负向)、BC(HCO₃⁻、SO₄²⁻交互,正向)、AB(Cl⁻、HCO₃⁻交互,负向),其余因素及其交互作用不显著.随着 Cl⁻浓度的升高,击破电位显著负移,钝化膜更易被击破使基体遭受点蚀^[11].但当有 HCO₃⁻或 SO₄²⁻存在时,反而会降低 5083 铝合金的点蚀敏感性.

与 Dexter 研究结果类似,HCO₃⁻的增加会导致自腐蚀电位负移.当 HCO₃⁻浓度高、Cl⁻浓度低时,自腐蚀电位显著负移,自腐蚀电流增大,但当 Cl⁻与 HCO₃⁻交互作用时,可使自腐蚀电位正移,自腐

蚀电流减弱.由此可见,Cl⁻与 HCO₃⁻交互作用下铝合金的腐蚀机制尚需进一步研究.

2.3 电化学阻抗谱

宁德海域海水盐度较低(表 2),其中 Cl⁻浓度在 5000 ~ 15000 mg·L⁻¹间,HCO₃⁻浓度在 50 ~ 180 mg·L⁻¹间.因此,为进一步研究 Cl⁻与 HCO₃⁻交互作用下 5083 铝合金腐蚀的影响机制,尤其是 Cl⁻浓度较低时的影响机制,采用电化学阻抗谱测试 Cl⁻浓度分别在 5000 mg·L⁻¹以及 15000 mg·L⁻¹、并将 HCO₃⁻浓度扩展为 50 ~ 300 mg·L⁻¹范围内铝合金的腐蚀行为.

如图 5 是 5083 铝合金在不同电解质溶液条件下的电化学阻抗谱图.等效电路如图 6^[12],拟合结果见表 4. R_s为溶液电阻,Q_f和 Q_d分别表示考虑电极表面弥散效应后的氧化层电容以及双电层电容,R_f表示氧化膜电阻,R_{ct}表示电荷转移电阻.从表 4 中可以看出,Q_f和 Q_d整体趋向于增加,可能是由于随着离子浓度增加,电极表面产生的腐蚀产物(即腐蚀面积)增多^[13].Q_f的增加意味着氧化层

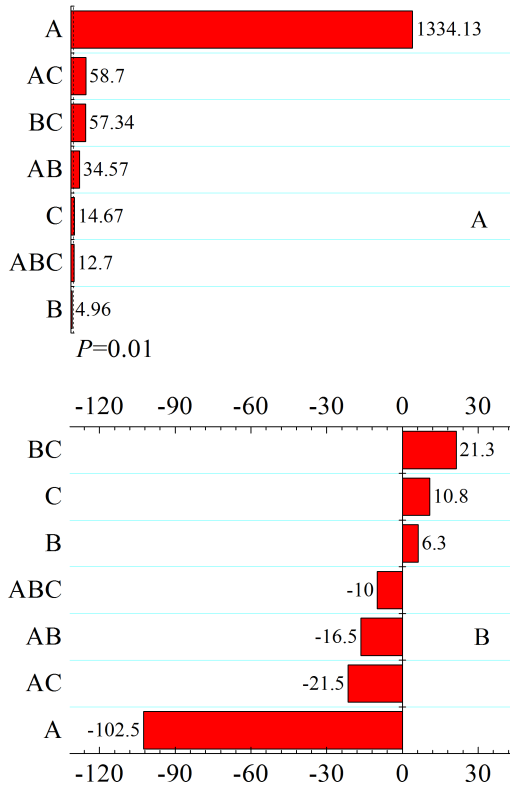


图 4 击破电位因子效应及显著性分析结果:A. 显著性结果;B. 因子效应值
Fig. 4 The analysis results of significance for breakdown potentials (A) and factorial effects (B)

厚度减小,而 Q_{dl} 的增加意味着点蚀敏感性增加^[14]. 通过对比得出 Cl^- 浓度对 R_f 影响不大. 而 Cl^- 浓度不变时, R_f 随 HCO_3^- 浓度增加而减小,表明氧化膜

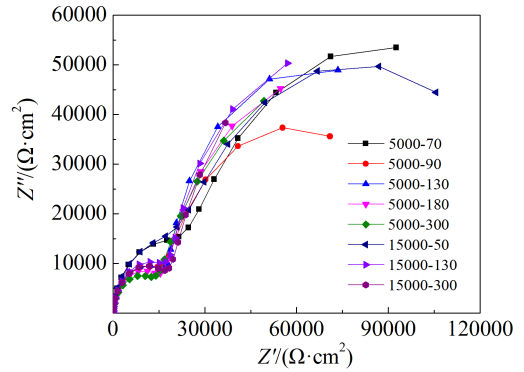


图 5 5083 铝合金在不同电解质条件下的 Nyquist 图, 顺序为 $Cl^-HCO_3^-/(mg \cdot L^{-1})$
Fig. 5 Nyquist plots of AA5083 aluminum alloy obtained in different electrolytes. The sequence is $Cl^-HCO_3^-/(mg \cdot L^{-1})$

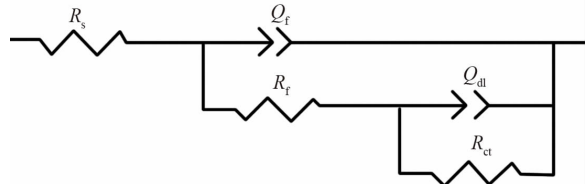


图 6 等效电路图^[12]
Fig. 6 Equivalent circuit used for fitting the EIS data^[12]

电阻减小,点蚀敏感性增加. HCO_3^- 浓度不变时, Cl^- 在低浓度时的电荷转移电阻 R_{ct} 小于高浓度时的 R_{ct} , 表明 Cl^- 浓度低时腐蚀速率更快. 而对比上文极化曲线测试结果(表 3),在存在 SO_4^{2-} 条件下 Cl^-

表 5 等效电路拟合数值
Tab. 5 EIS fitting parameters for different electrolytes^a

Factor/($mg \cdot L^{-1}$)	$R_s/(\Omega \cdot cm^2)$	$Q_f/(\mu F \cdot cm^2)$	$R_f/(k\Omega \cdot cm^2)$	$Q_{dl}/(\mu F \cdot cm^2)$	$R_{ct}/(k\Omega \cdot cm^2)$
5000-50	4.873	9.15	32.94	64.36	104.48
5000-70	9.300	9.44	29.70	75.48	123.18
5000-90	7.184	9.35	20.17	104.34	80.72
5000-130	6.092	10.07	21.30	140.37	93.75
5000-180	8.728	10.60	18.80	157.46	105.21
5000-300	7.153	10.49	16.20	142.63	121.44
15000-50	1.683	9.08	29.38	51.46	111.14
15000-130	2.222	10.01	22.25	111.09	106.03
15000-300	3.705	10.25	20.68	166.10	138.94

a. Sequence is $Cl^-HCO_3^-/(mg \cdot L^{-1})$

浓度为 $20000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时击穿电位比 Cl^- 浓度为 $5000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时更负,可能是由于三种阴离子交互作用以及 Cl^- 浓度在超过 $15000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以后对点蚀敏感性影响更大.因此,5083 铝合金在不存在 SO_4^{2-} 条件下的低盐度海水环境下更容易发生点腐蚀.

图 7 为 Cl^- 浓度保持 $5000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,不同 HCO_3^- 浓度下的 R_{ct} 对比图.从图中可以看出,随 HCO_3^- 浓度增加, R_{ct} 呈现出增大→减小→再增加的趋势,在 $90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度时达到最小值.考察宁德海域四月到七月海水离子浓度(表 2),可以发现, Cl^- 浓度较低, HCO_3^- 浓度在 $90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,而其他海域 Cl^- 以及 HCO_3^- 浓度均较高.因此,5083 铝合金在宁德海域海水环境下容易发生点腐蚀.

3 结论

1) 海水环境中的三种典型阴离子中, HCO_3^- 浓度的增大会使 5083 铝合金自腐蚀电位负移,反之亦然,是 5083 铝合金电解质效应的最主要影响因素.同时, Cl^- 浓度增大会使击穿电位负移. SO_4^{2-} 能降低自腐蚀电流密度,但当三种离子交互作用时, SO_4^{2-} 抑制腐蚀的作用不明显.

2) 在没有加入 SO_4^{2-} 条件下, Cl^- 与 HCO_3^- 交互作用时,在 Cl^- 浓度一定的情况下,随着 HCO_3^- 浓度的增加,5083 铝合金耐蚀性呈现出上升→下降→再上升的趋势, HCO_3^- 浓度在 $90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时耐蚀性能最差;在 HCO_3^- 浓度一定的情况下, Cl^- 浓度较低时 5083 铝合金耐蚀性比 Cl^- 浓度较高时变差,此即海水环境因素对铝镁系合金电解质效应的主要影响方式.

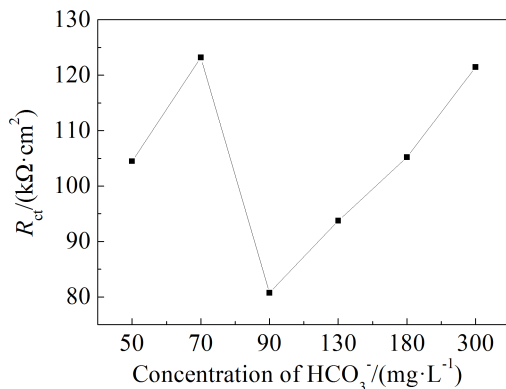


图 7 Cl^- 为 $5000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时不同 HCO_3^- 浓度的 R_{ct} 对比图
Fig. 7 Variation of R_{ct} with concentration of HCO_3^- in $5000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl solution

3) 宁德海域海水 Cl^- 浓度较低, HCO_3^- 浓度可达到 $90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,由此使 5083 铝合金在该海域点蚀加速.

参考文献 (References):

- [1] Ezuber H, El-Houd A, El-Shawesh F. A study on the corrosion behavior of aluminum alloys in seawater[J]. Materials and Design, 2008, 29: 801-805.
- [2] Burstein G T, Liu C, Souto R M. Origins of pitting corrosion[J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2004, 39(1): 25-30.
- [3] Rowland H T, Dexter S C. Effect of sea water carbon dioxide system on the corrosion of aluminum[J]. Corrosion, 1980, 36(9): 458-467.
- [4] Lin L Y (林乐耘), Zhao Y H (赵月红). Severe corrosivity and its electrochemical mechanism of seawater in Xiamen sea area to Al-Mg alloys[J]. Journal of Electrochemistry (电化学), 2003, 9(3): 299-307.
- [5] Mu Z J (穆振军), Lin Z J (林志坚), Zhuang Y (庄焱), et al. Corrosion behavior of aluminum-magnesium alloy in sea areas and its electrolyte effect in Xiamen sea area[J]. Development and application of materials (材料开发与应用), 2007, 22(5): 20-24.
- [6] Huang G Q (黄桂桥). Corrosion of aluminium alloys in marine environment (I)-a summary of 16 years exposure testing in seawater full immersion zone[J]. Corrosion & protection (腐蚀与防护), 2002, 23(1): 18-23
- [7] Huang G Q (黄桂桥). Corrosion of aluminium alloys in marine environment (II)-a summary of 16 years exposure testing in seawater full immersion zone[J]. Corrosion & protection (腐蚀与防护), 2002, 23(2): 47-50.
- [8] Huang G Q (黄桂桥). Corrosion of aluminium alloys in marine environment (III)-a summary of 16 years exposure testing in seawater full immersion zone[J]. Corrosion & protection (腐蚀与防护), 2003, 24(2): 47-57.
- [9] Box G E P, Hunter J S, Hunter W G. Statistics for experimenters: Design, innovation, and discovery, second edition [M]. (Zhang R C, Liu M Q, Yang J F, et al, Trans.). Beijing: China Machine Press (机械工业出版社), 2009: 105.
- [10] Chen K. Design and analysis of experiments[M]. Beijing: Tsinghua University Press (清华大学出版社), 2005: 61.
- [11] Kim S J, Jang S K, Kim J I. Investigation on optimum corrosion protection potential of Al alloy in marine environment[J]. Materials Science-Poland, 2008, 26(3): 779-785.
- [12] Juttner K. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) of corrosion processes on inhomogeneous surface[J]. Elec-

trochemical Acta, 1990, 35: 1501.

[13] Peng W C(彭文才), Hou J(侯健), Guo W M(郭为民), et al. Effect of temperature and dissolved oxygen on corrosion performance of alloy 5083 in seawater[J]. Equipment Environment Engineering(装备环境工程), 2010, 7(3):

22-26.

[14] Moreto J A, Marino C E B, Filho W W B. SVET, SKP, and EIS study of the corrosion behaviour of high strength Al and Al-Li alloys used in aircraft fabrication[J]. Corrosion Science, 2014, 84: 31-41.

Influences of Typical Anions in Seawater Environments on Corrosion Behaviors of 5083 Aluminum Alloy

TU Yang-fan^{1,3}, FENG Li-ming¹, FANG Zhi-gang², LIU Hai-tao³,
JING Ming-hua³, GUAN Yong^{2,3*}

(1. Department of Materials Science and Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, Shandong, China; 2. Naval Academy of Armament, Beijing 100161, China; 3. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning, China)

Abstract: The interaction effects of typical anions, namely, Cl^- , HCO_3^- and SO_4^{2-} , presented in seawater environments on corrosion resistance behaviors of AA5083 aluminum alloy have been studied. The corrosion resistances of the 5083 aluminum alloy in different simulated seawater environments were tested by factorial analysis method. The polarization curves, the corrosion potentials, corrosion current densities and the breakdown potentials were examined in different concentrations of Cl^- , HCO_3^- and SO_4^{2-} . The corrosion behavior was analyzed by electrochemical impedance spectroscopy (EIS). The results showed that both Cl^- and HCO_3^- could accelerate the pitting corrosion. When the concentration of Cl^- remained constant, the corrosion resistance of AA5083 aluminum alloy increased initially with an increase in the concentration of HCO_3^- , and then dropped dramatically at $70 \sim 90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, which displayed the best corrosion resistance performance. Afterwards, the corrosion resistance increased again. The corrosion current density of AA5083 aluminum alloy was not significantly affected by SO_4^{2-} when the concentrations of Cl^- and HCO_3^- became larger. Meanwhile, when the concentration of HCO_3^- was fixed, the charge-transfer resistance of AA5083 aluminum alloy at a lower Cl^- concentration was smaller than that at a higher Cl^- concentration, and the corrosive ions could easily penetrate the native oxide film by a redox reaction with the matrix.

Key words: 5083 aluminum alloy; corrosion resistance; electrolyte effect; seawater environment