

环境对高强度铝合金应力腐蚀行为的影响

张晓云 孙志华 刘明辉 汤智慧 李 斌
(北京航空材料研究院 北京 100095)

摘要: 利用 C 型环试样、单轴加载的拉伸试样和预制裂纹的试样研究了高强度铝合金在大气环境下的应力腐蚀性能,并与实验室加速试验结果进行对比。施加应力后的试样分别暴露于北京、团岛、万宁 3 个不同的大气试验站,同时在实验室进行了 C 型环试样在 3.5% NaCl 溶液中周期浸润腐蚀试验、单轴拉伸试样在 3% NaCl + 0.5% H₂O₂ 溶液中的拉伸应力腐蚀试验和预制裂纹的试样在 3.5% NaCl 溶液中腐蚀试验。结果表明,高强度铝合金在不同环境中产生应力腐蚀的敏感性不同,在海洋性环境下应力腐蚀性较高;在海洋性环境下 2A12 铝合金的应力腐蚀的敏感性比 7A04 铝合金高,在暴露期间未开裂的 2A12 铝合金 C 环试样发生严重剥落腐蚀,未开裂的 7A04 铝合金 C 环试样则遭受严重点蚀;3.5% NaCl 溶液中周期浸润腐蚀试验和 3% NaCl + 0.5% H₂O₂ 溶液中的拉伸应力腐蚀试验作为高强铝合金 SCC 敏感性判定方法,模拟海洋大气腐蚀过程,与户外的试验结果具有较好的相关性。

关键词: 海洋环境 大气腐蚀 加速试验 应力腐蚀

中图分类号: TC172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-4537 (2007) 06-0354-09

1 前言

高强度铝合金具有优良的强度/重量比在航空工业得到广泛的应用,成为飞机的主要结构材料。Al-Cu-Mg 系和 Al-Zn-Mg-Cu 的超硬铝合金大量用于飞机的承力部件,如蒙皮、隔框、翼肋、翼梁和骨架等。众所周知,高强度铝合金对环境致脆敏感,含有适量可溶性合金元素,主要是 Cu、Mg、Si 和 Zn 的高强度铝合金对应力腐蚀非常敏感^[1]。

高强度铝合金抗应力腐蚀性能的数据通常是在实验室中使用 3.5% NaCl 溶液得到的,虽然这种试验方法可以在短时间内获得试验结果,但试验所使用的腐蚀介质并不能反映飞机的实际服役环境,因此有必要进行实际大气环境下的应力腐蚀试验(SCC),并与那些在实验室获得的材料的抗应力腐蚀性能数据进行比较,从而综合评价材料在不同环境下抗应力腐蚀的能力。综合考虑实用环境与应力的共同作用的高强度铝合金的大气应力腐蚀研究在国外已相当的系统化,为建立高效准确的性能评定方法奠定了坚实的基础^[2-5]。从报道的文献来看,国内对应力腐蚀大多是实验室内加速试验^[6-9],很少研

究实用环境中高强度铝合金的应力腐蚀。

本文通过 C 型环应力腐蚀试样、单轴加载的拉伸应力腐蚀试样和预裂纹双悬臂梁(简称 DCB)试样在典型大气环境下的应力腐蚀试验,获得典型材料 2A12 和 7A04 铝合金的抗应力腐蚀开裂试验数据,与实验室加速应力腐蚀试验结果对比,研究户内外应力腐蚀试验的相关关系,并通过断口的微观形貌观察探讨其开裂模式。

2 试验方法

实验中所使用的 4 种铝合金的化学成分及其机械性能分别列于表 1 和表 2。其中 2A12 和 7A04 铝合金 C 型环应力腐蚀试样按照 GB/T 15970.5 “金属和合金的腐蚀 应力腐蚀试验 第 5 部分: C 型环试样的制备和应用”分别取自 $\phi 30$ mm 和 $\phi 40$ mm 的棒材的短横向;单轴加载拉伸应力腐蚀试样按照 GB/T 15970.4 “金属和合金的腐蚀 应力腐蚀试验 第 4 部分: 单轴加载拉伸试样的制备和应用”取自相同规格与热处理条件的棒材的长向;施加的应力水平分别为 $\sigma_{0.2}$ 的 60%、70%、80% 和 90%。2D12 和 7B04 的预制裂纹的 DCB 试样按照 GB/T 15970.5 “金属和合金的腐蚀 应力腐蚀试验 第 6 部分: 预裂纹试样的制备和应用”分别取自 30 mm 和 40 mm 的厚板,取样方向为 S-L 方向,其中 S 为施加应力的方向,L 为裂纹扩展的方向。所有在大气环境进行的应力腐蚀试验的应力水平与实验室进行的加速试验的应力水平相同,以便于比较。

定稿日期: 2007-02-12

基金项目: 国家基础研究发展规划项目(G1999065)、国防科工委技术基础项目(H052001A001)、国家自然科学基金重大项目(50499331)

作者简介: 张晓云,女,1967 年生,研究员,研究方向为材料的腐蚀与防护

具有不同应力水平的 C 型环应力腐蚀试样、单轴加载的拉伸应力腐蚀试样以及加载后的预制裂纹的应力腐蚀试样在北京、青岛团岛、海南万宁 3 个不同的典型环境下进行暴露试验,3 个试验站的气象、污染物分别见表 3 和表 4。3 个试验站的环境条件:北京为南温带亚湿润区半乡村大气,青岛为南温带湿润区半工业海洋大气,海南为北热带湿润海洋大气。

当 C 型环应力腐蚀试样出现裂纹时取下试样,单轴加载的拉伸应力腐蚀试样发生断裂时取下试样并保护断口;对预制裂纹的应力腐蚀试样定期监测裂纹扩展速率,当裂纹扩展的速率连续监测不再变化时,试验结束。测定试样断面上 25%、50%、75% 厚度处的裂纹长度,并保护断口。

在大气暴露试验的同时,在实验室进行相同应力水平和载荷的应力腐蚀加速试验。其中 C 型环应

力腐蚀按照 HB 5259-83“铝合金 C 环试样应力腐蚀试验方法”进行;单轴加载的拉伸应力腐蚀按照 HB 5254-83“变形铝合金拉伸应力腐蚀试验方法”进行;加载的预制裂纹的应力腐蚀按照 GB/T 15970.6-1998“金属和合金的腐蚀 应力腐蚀 第 6 部分 预裂纹试样的制备和应用”在 3.5% NaCl 溶液中进行。

3 结果与讨论

3.1 暴露于大气环境下的 2A12 和 7A04 铝合金 C 型环试样的应力腐蚀试验

应力腐蚀开裂涉及裂纹的起始和扩展两个阶段。2A12 和 7A04 铝合金的 C 型环试样在 3 个不同环境中的试验结果列于表 5。可知,高强度铝合金在不同的环境中产生应力腐蚀的敏感性不同:在海洋性环境下(团岛、万宁),决大多数试样在 1 a 之内

Table 1 Chemical compositions of aluminium alloys (mass%)

alloys	Cu	Mg	Mn	Cr	Al	Fe	Si	Zn	Ni	Ti	Fe+Ni	others
2A12	3.8~4.8	1.2~1.8	0.3~0.9	-	bal.	≤0.50	≤0.50	≤0.30	≤0.10	≤0.15	≤0.50	≤0.10
7A04	1.4~2.0	1.8~2.8	0.2~0.6	0.10~0.25	bal.	≤0.50	≤0.50	5.0~7.0	-	-	-	≤0.10
2D12	4.41	1.48	0.52	-	bal.	0.15	0.7	-	-	<0.05	-	-
7B04	1.68	2.51	0.26	0.15	bal.	0.20	0.06	5.75	-	-	-	-

Table 2 Mechanical properties of aluminium alloys

alloys	identity	tensile strength / MPa	yield strength / MPa	elastic modulus / GPa	elongation / %
2A12	φ30 mm bar, T4	549	416	72	15.5
7A04	φ40 mm bar, T6	587	587	68	13.2
2D12	30 mm plate, T4	69.4	458	312	18.4
7B04	40 mm plate, T741	-	507	437	-

Table 3 Environmental parameters of different atmospheric stations in 2003

	T / °C			relative humidity / %		rainfall / mm	days of rain / d	sunny time / h	wind speed / m·s ⁻¹
	average	max.	min.	average	min.				
Beijing	9.6	37.5	-17.0	71.0	53.0	387	57	1854	2.4
Qingdao	12.6	30.0	-8.2	77.0	30.4	717	86	-	5.0
Hainan*	25.3	31.1	19.1	85.0	65.0	1452	105	2646	1.4

* Data measured at marine platform in Wanning

Table 4 Concentration of different atmospheric corrosion pollutant in 2003

	continuous method / mg·dm ⁻¹ ·d ⁻¹					rain analysis / mg·m ⁻³			natural dust / g·cm ⁻² ·month ⁻¹	
	NO ₂	H ₂ S	rate of sulphate	ammonia	sea salt	pH	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	water soluble	water insoluble
Beijing	0.0471	0.0671	0.5040	0.0415	0.0047	6.60	13456	2608	3.0356	7.1100
Qingdao	0.1142	0.0725	0.0417	0.0189	1.2182	6.80	70800	19998	3.7020	2.1962
Hainan*	0.0125	0.0372	0.0718	0.0146	3.3128	4.94	8073	9282	676.74	18.514

* Data measured at marine platform in Wanning

都产生了应力腐蚀开裂;在北京地区暴露 4 a 多,试样表面轻微腐蚀,其中只有 7A04 的 4 个试样开裂;在海洋性环境下(团岛、万宁),2A12 铝合金的应力腐蚀的敏感性比 7A04 铝合金高,在 3 d~51 d 产生应力腐蚀开裂,而 7A04 铝合金在 10 d 以后发生开裂,绝大多数在 1 个月到 1 a 产生应力腐蚀开裂。未开裂的 2A12 铝合金 C 环试样产生严重的剥落腐蚀,而未开裂的 7A04 铝合金 C 环试样则产生严重的点腐蚀。因此,高强度铝合金在海洋性环境下具有较高的应力腐蚀敏感性;在海洋性环境下,对于高强铝合金的应力腐蚀性能的评价,2A12 铝合金可以在 2 个月内得出结果,而 7A04 铝合金则需在 1 a 内得到试验结果。

图 1 是暴露于团岛的 2A12 铝合金 C 环试样的断口微观形貌照片。可见,为沿晶断裂,有少量二次裂纹(图中箭头所示)。随应力水平的增加,一次裂

纹越大。二次裂纹均不太多。

图 2 是暴露于团岛的 7A04 铝合金 C 环试样的微观形貌照片。可见,当应力值低于 70% $\sigma_{0.2}$ 时,为沿晶断裂特征,伴有粗大的二次裂纹(图 2a);应力值为 90% $\sigma_{0.2}$ 时,以穿晶断裂为主,沿晶裂纹和二次裂纹均较少(图 2b)。

暴露于万宁的 2A12 和 7A04 铝合金 C 环试样的断口微观形貌照片(图 3、图 4)显示,两者为沿晶断裂,并伴有少量二次裂纹。

3.2 暴露于大气环境下的 2A12 和 7A04 铝合金的拉伸应力腐蚀试验

用自研制的便携式拉伸应力腐蚀试验器^[10,11]对单轴拉伸试样施加恒定的载荷,加载后将试验器水平放置于大气环境下进行暴露试验。施加不同载荷的拉伸应力腐蚀试样在 3 个不同环境中的试验结果见表 6。在长达 4 a 的暴露期间,暴露于北京和

Table 5 The SCC results of C-ring specimens exposed to different environments

alloys	applied stress according to percentage of yield strength / %	Beijing		Qingdao		Wanning	
		F / N*	time / d	F / N*	time / d	F / N*	time / d
2A12	60	0/5	-	3/6	21, 7, 51	4/5	3, 3, 7, 7
	70	0/5	-	7/8	14, 21, 31, 7, 18, 18, 23	3/5	3, 7, 3
	80	0/5	-	8/8	14, 14, 31, 7, 7, 18, 51, 7	4/5	3, 7, 7, 7
	90	0/5	-	6/8	14, 31, 14, 7, 18, 7	5/5	3, 7, 7, 7, 7
7A04	60	0/5	-	2/5	320, 42	1/5	372
	70	0/5	-	5/7	103, 159, 18, 42, 18	3/5	143, 372, 372
	80	2/5	474, 486	5/7	103, 272, 298, 51, 51	2/5	372, 282
	90	2/5	474, 248	3/7	51, 10, 51	1/5	282

* F-number of the fracture sample; N-number of the total sample

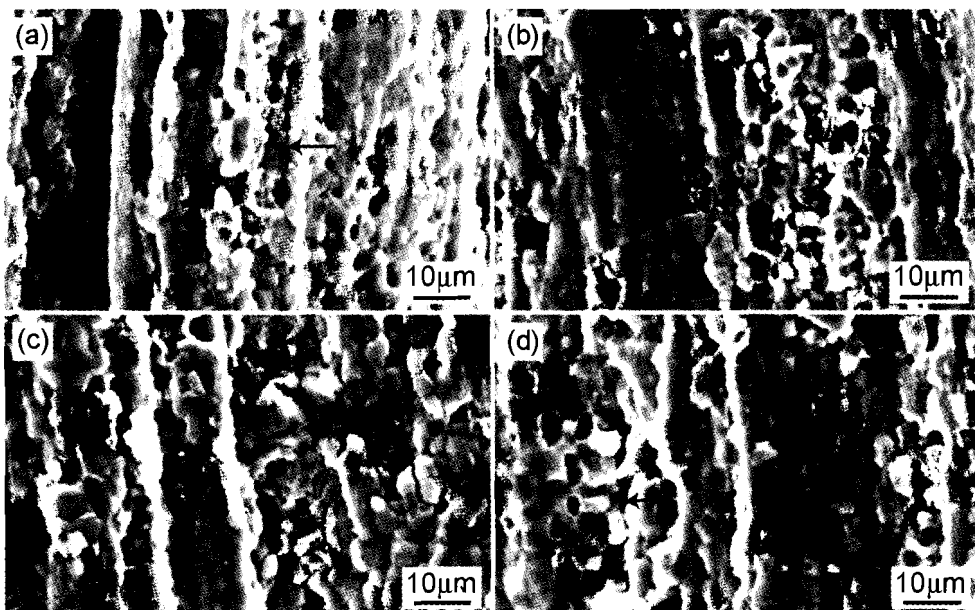


Fig.1 The fracture microstructure of 2A12 alloys exposed in Tuandao island station applied stress according to percentage of yield strength (a) 60%, (b) 70%, (c) 80%, (d) 90%

团岛的试样无一断裂,暴露于万宁的试样也只有施加应力为 $80\% \sigma_{0.2}$ 和 $90\% \sigma_{0.2}$ 的几个试样断裂。一般地说,高强度铝合金在短横向上应力腐蚀开裂的敏感性要比纵向大,因为试验所用的拉伸应力腐蚀试样均取自棒材的纵向,目前为止尚未得到最终的试验结果。

3.3 暴露于大气环境下的 2D12 和 7B04 铝合金预裂纹试样的应力腐蚀试验

2D12 和 7B04 预裂纹的应力腐蚀试样加载后,放置于 45° 角的暴露试验架上进行大气环境下的暴露试验,用读数显微镜定期观察试样上裂纹的扩

展,根据裂纹扩展的长度及速率计算产生应力腐蚀的临界应力门槛值,以此来评价材料在大气环境下的抗应力腐蚀性能。两种高强铝合金暴露在不同大气环境下的预裂纹的应力腐蚀试验结果见表 7。可见,在海洋性环境下,2D12 铝合金的应力腐蚀的敏感性比 7B04 铝合金高,在北京暴露的试样虽然已经持续进行了近 3 a,但裂纹扩展缓慢,至今尚未得到最终的试验结果。众所周知,温度、湿度是影响大气腐蚀的主要环境因素, Cl^- 对高强度铝合金的应力腐蚀起着重要的作用。万宁常年处于高温、高湿的环境,大气中的 Cl^- 浓度也比较高,因而导致了

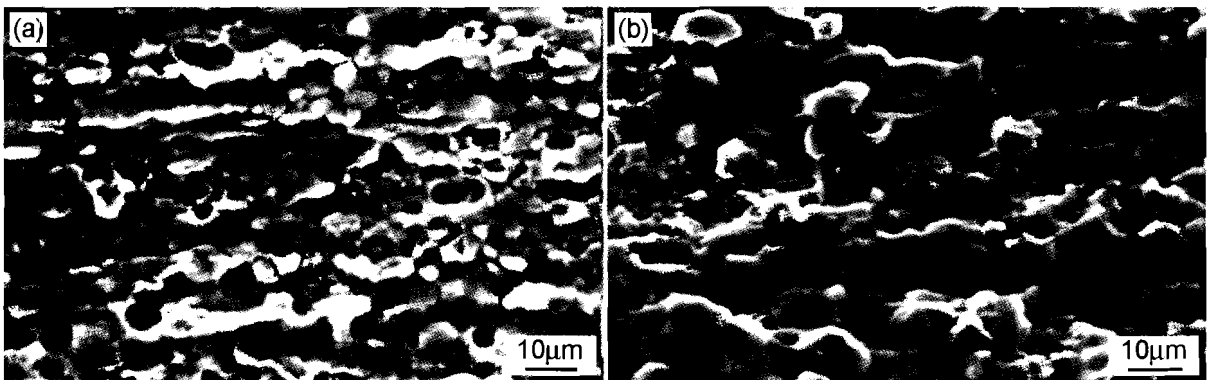


Fig.2 The fracture microstructure of 7A04 alloys exposed in Tuandao island station applied stress according to percentage of yield strength (a) 70%, (b) 90%

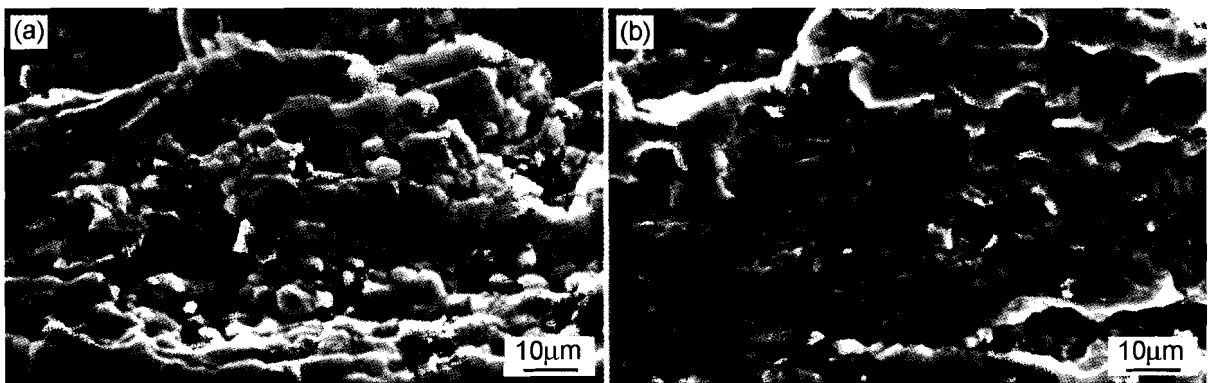


Fig.3 The fracture microstructure of 2A12 alloys exposed in Wanning station applied stress according to percentage of yield strength (a) 70%, (b) 90%

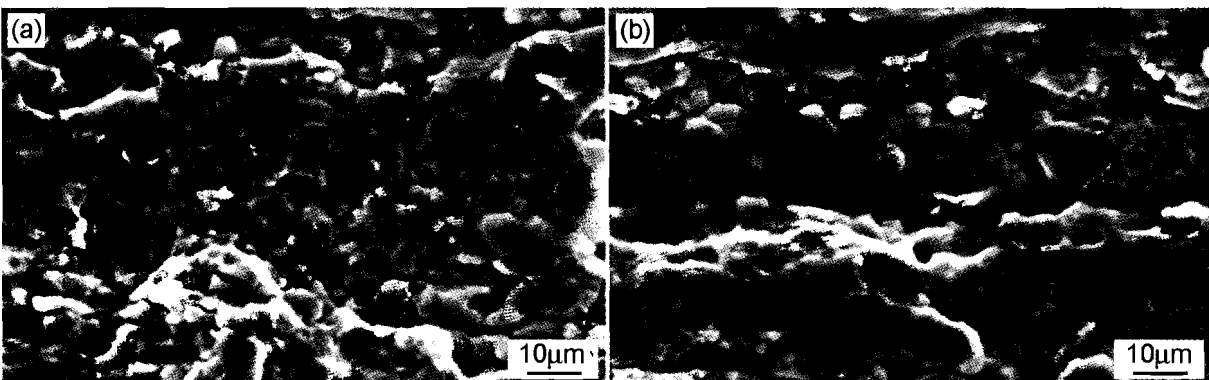


Fig.4 The fracture microstructure of 7A04 alloys exposed in Wanning station applied stress according to percentage of yield strength (a) 70%, (b) 80%

Table 6 The SCC results of direct tension specimens exposed to different environment

alloys	applied stress according to percentage of yield strength / %	average time to failure / d		
		Beijing**	Qingdao**	Wanning**
2A12	60			no cracking
	70			
	80	no cracking	no cracking	1017(3/5*)
	90			1166(4/5*)
7A04	60			no cracking
	70			
	80	no cracking	no cracking	
	90			814 (4/5*)

*F-number of the fracture sample; N-number of the total sample. ** Specimens with 60% $\sigma_{0.2}$ and 80% $\sigma_{0.2}$ were exposed on June 1st, 2001, and with 70% $\sigma_{0.2}$ and 90% $\sigma_{0.2}$ were exposed on Nov.20, 2002 in Qingdao and Beijing respectively. Specimens with different stresses were exposed in Wanning on Nov. 8, 2002

2D12和 7B04 铝合金在较低的应力和较短的时间发生应力腐蚀; 团岛属于工业海洋性大气环境, 大气中的 Cl^- 浓度虽然高于万宁, 但温度、湿度却低于万宁, 因而铝合金在团岛的应力腐蚀敏感性低于万宁; 而北京属于半乡村大气, 温度、湿度、污染物以及 Cl^- 浓度都很低, 因而铝合金的应力腐蚀敏感性最低。

Table 7 The SCC results of pre-cracked specimens exposed to different atmospheric environments

alloys	test data	Beijing	Tuandao	Wanning
		7B04	$K_{ISCC} / MPa \cdot m^{-1/2}$	
	$(da/dt) II / m \cdot s^{-1}$	testing	1.03×10^{-9}	3.26×10^{-10}
2D12	$K_{ISCC} / MPa \cdot m^{-1/2}$		14.0	2.40
	$(da/dt) II / m \cdot s^{-1}$		2.64×10^{-9}	2.21×10^{-9}

图 5 是暴露于团岛和万宁的两种铝合金的 DCB 试样的裂纹扩展速率和应力强度因子的关系曲线, 曲线上分出两个区域。区域 I 中, 裂纹扩展速度强烈依赖应力强度因子, 是在裂纹扩展后期, 应力强度减小的阶段; 区域 II 中, 裂纹扩展速度和应力强度因子无关。

图 6 是 2D12 和 7B04 铝合金暴露于团岛和万宁的 DCB 试样断口微观形貌。7B04 在团岛暴露表现为穿晶断裂 (图 6a), 在万宁暴露表现为沿晶断裂, 也有混合断裂, 很少见到二次裂纹 (图 6b); 2D12 铝合金在团岛和万宁暴露均表现为沿晶断裂 (图 6c, 图 6d)。

3.4 2A12 和 7A04 铝合金 C 型环试样的周期浸润应力腐蚀试验

按照 HB 5259-83 “铝合金 C 环试样应力腐蚀试验方法” 进行两种铝合金 C 型环试样实验室加速应力腐蚀试验, 实验结果见表 8。可知, 7A04 铝合金

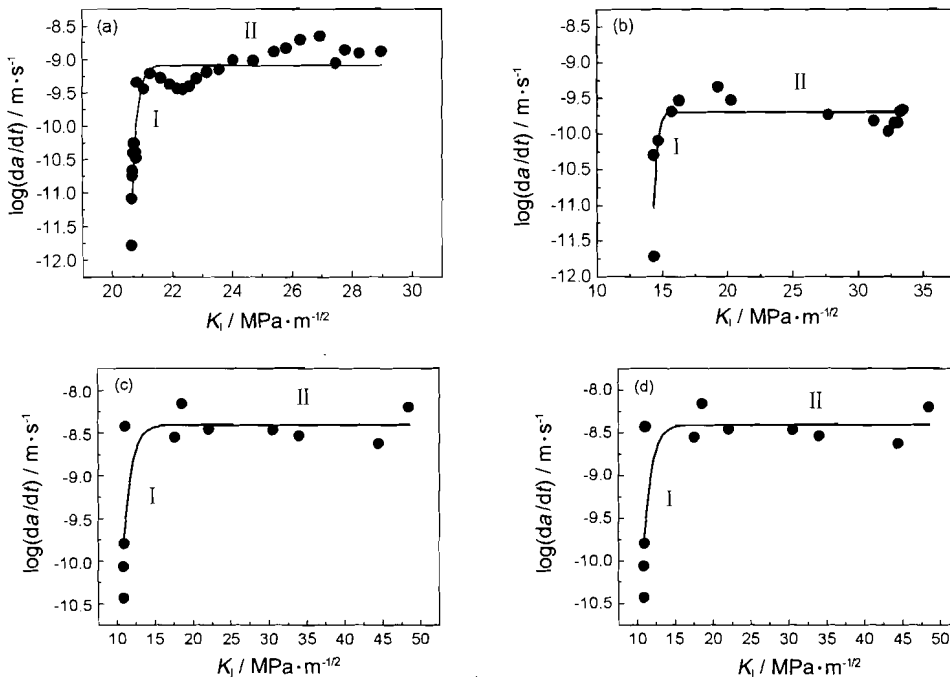


Fig.5 The curves of crack propagation rate vs. stress intensity factor (a) 7B04 in Tuandao, (b) 7B04 in Wanning, (c) 2D12 in Tuandao, (d) 2D12 in Wanning

抗应力腐蚀性能明显高于 2A12 铝合金,多数 2A12 铝合金在一周之内产生应力腐蚀开裂,7A04 铝合金在一个月之后出现开裂,而未开裂的试样则产生严重的点腐蚀。说明周期浸润腐蚀试验可作为高强度铝合金 SCC 敏感性判定方法,模拟海洋大气腐蚀过

Table 8 The SCC result of C-ring specimens alternative immersed in 3.5% NaCl

alloys	applied stress according to percentage of yield strength / %	F / N	time / d
2A12	60	1/10	3.8
	70	4/10	3.8, 3.8, 3.8, 54
	80	3/10	3.8, 3.8, 43
	90	3/10	3.8, 3.8, 3.8
	60	5/10	8, 41, 41, 51, 51
7A04	70	4/10	51, 51, 51, <90
	80	4/10	4, 8, 8, 35
	90	5/10	50, 50, 50, 43, <90

程,2A12 铝合金在一周之内可得出结果,7A04 铝合金在两个月之内得出结果。由 2A12 和 7A04 铝合金断口微观形貌(图 7 和图 8)可见,裂纹形式主要为大、小角度晶界断裂特征,并且应力值越大,小角度晶界越多,裂纹面积越大。与暴露于万宁和团岛的 2A12 和 7A04 铝合金的断口微观形貌(图 1~图 4)具有相似的特征。

3.5 2A12 和 7A04 实验室拉伸应力腐蚀试验

按照 HB 5254-83 “变形铝合金拉伸应力腐蚀试验方法”进行了两种铝合金试样的实验室加速拉伸应力腐蚀试验,试验结果见表 9。可知,2A12 铝合金的应力腐蚀敏感性比 7A04 高。所有 2A12 的试样均在 1 周内断裂,但对于 7A04 铝合金试样只有施加 90% $\sigma_{0.2}$ 应力的试样是在 1 周内断裂的,施加 60% $\sigma_{0.2}$ 和 70% $\sigma_{0.2}$ 应力的试样则没有断裂,而表面发生严重腐蚀。表明高强度铝合金的应力腐蚀性能可以在 3% NaCl + 0.5% H_2O_2 溶液中进行评

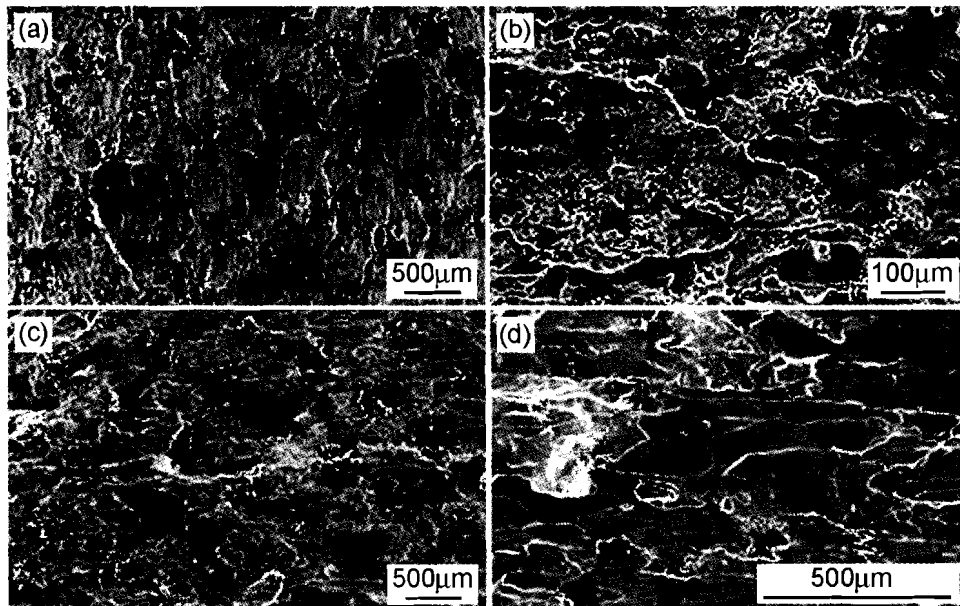


Fig.6 The fracture microstructure of aluminum alloys exposed in Tuandao and Wanning (a) 7B04 in Tuandao, (b) 7B04 in Wanning, (c) 2D12 in Wanning, (d) 2D12 in Tuandao

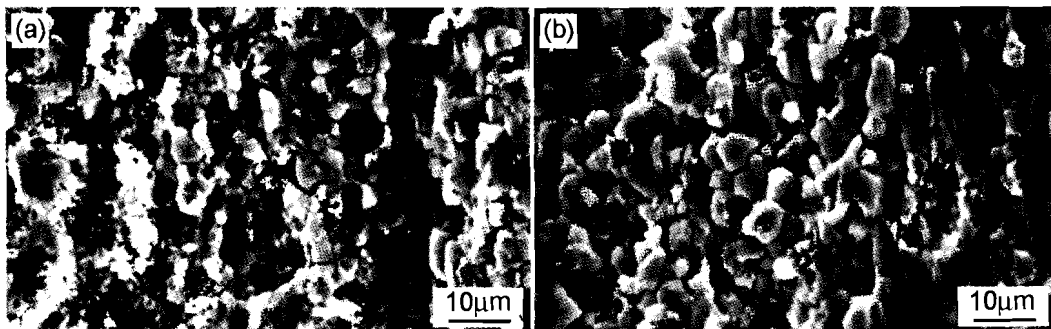


Fig.7 The fracture microstructure of 2A12 alloys alternately immersed in 3.5% NaCl applied stress according to percentage of yield strength (a) 70%, (b) 90%

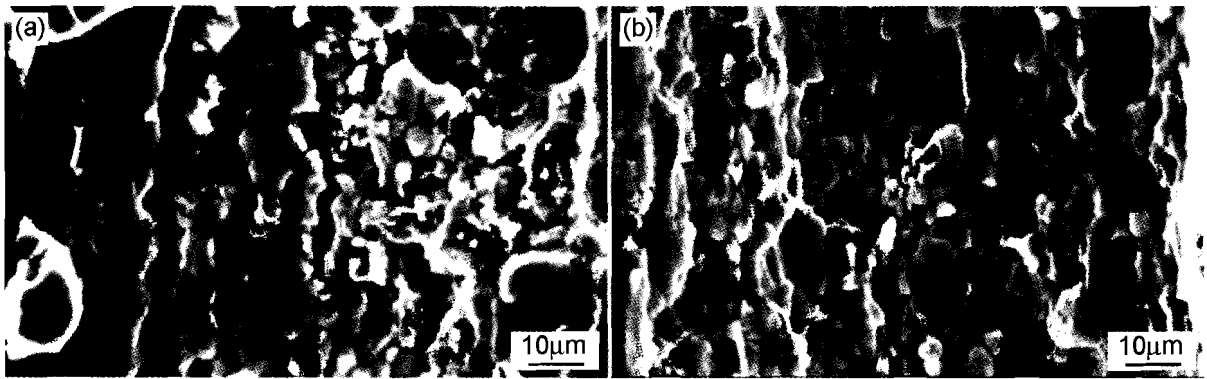


Fig.8 The fracture microstructure of 7A04 alloys alternately immersed in 3.5% NaCl applied stress according to percentage of yield strength (a) 60%, (b) 80%

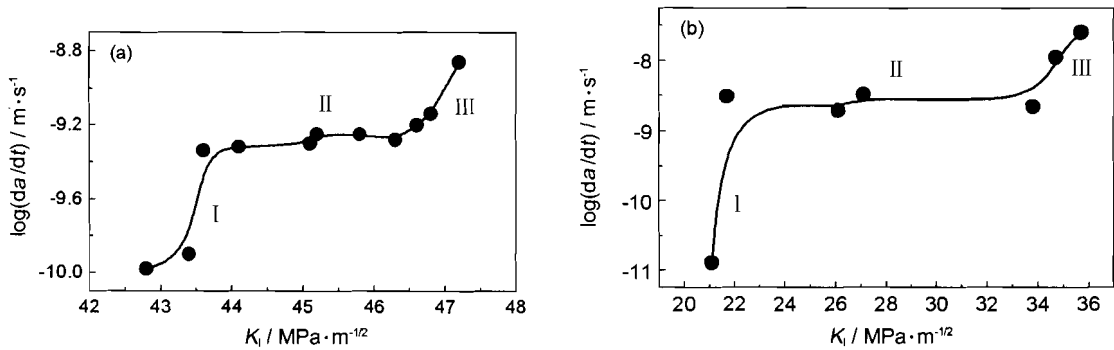


Fig.9 The curves of crack propagation rate vs. stress intensity factor in 3.5% NaCl, (a) 7B04, (b) 2D12

Table 9 The SCC result of direct tension specimens soak immersion in 3% NaCl+0.5% H₂O₂

alloys	applied stress according to percentage of yield strength / %	average time to failure / d
2A12	60	12.1
	70	11.0
	80	7.17
	90	5.19
	60	>90
7A04	70	>90
	80	3.13
	90	5.28

Table 10 The SCC results of pre-cracked specimens of aluminium alloys soak immersion in 3.5% NaCl solution

alloys	direction of applied stress and cracking	K _{ISCC} / MPa·m ^{-1/2}	(da/dt) II / m·s ⁻¹
7B04	S-L	29.0	4.5×10 ⁻¹⁰
	S-T	22.4	4.1×10 ⁻⁹
2D12	S-L	22.6	9.8×10 ⁻⁹
	S-T	27.1	1.5×10 ⁻⁸

图 9 为两种铝合金的裂纹扩展速率与应力强度因子的关系曲线,曲线上分出 3 个区域。区域 I (即低应力强度区), 裂纹扩展速度强烈依赖应力强度因子;区域 II 为较高应力强度区, 裂纹扩展速度和应力强度因子无关, 出现一平台;在区域 III 中, 在更高的应力强度区, 再次出现裂纹扩展速度强烈依赖应力强度因子。两种铝合金的断口为沿晶断裂形貌(图 10), 表现出典型的应力腐蚀脆性断裂特征。

3.7 讨论

高强度铝合金的应力腐蚀机理主要有 3 种^[4-7], 即阳极溶解理论、氢致断裂理论和钝化膜破裂理论。阳极溶解理论一般用来解释 Al-Cu-Mg 系合金的应力腐蚀开裂, 氢致断裂理论则用来解释 Al-Zn-Mg 系合金的应力腐蚀开裂。

价。在这种溶液中, 溶液的浸蚀性因为 H₂O₂ 分解产生更多的氧, 加速阴极反应而增强。

3.6 2D12 和 7B04 铝合金实验室预裂纹的应力腐蚀试验

按照 GB 15970.5-1998 “金属和合金的腐蚀 应力腐蚀试验 第 6 部分: 预裂纹试样的制备和应用” 施加载荷, 在 3.5% NaCl 溶液中进行了实验室加速应力腐蚀, 试验结果见表 10。可见, 3.5% NaCl 溶液中, 2D12 铝合金的应力腐蚀的敏感性与 7B04 无明显不同, 这与自然环境下的试验结果(表 7) 相差较大。

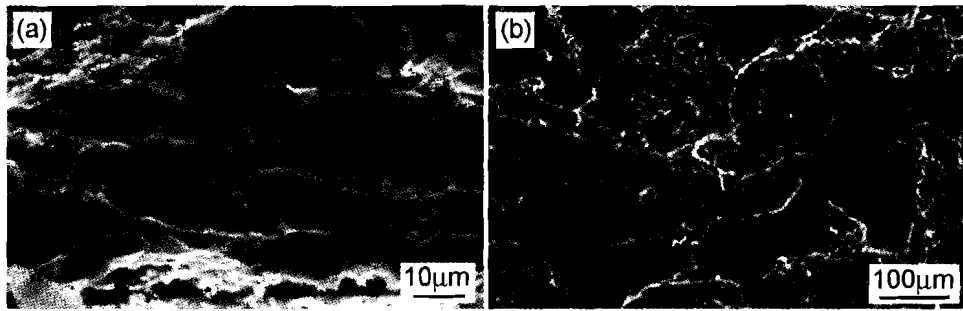


Fig.10 The fracture microstructure of aluminum alloys soak immersion in 3.5% NaCl, (a) 7B04, (b) 2D12

本文的研究更关注 2A12 和 7A04 铝合金在大气环境下的应力腐蚀性能,在此基础上,将试验结果与模拟大气环境的实验室加速试验获得的结果进行比较,从断裂时间、开裂模式等方面研究室内外试验的相关性。

研究表明,铝合金表面的水或水蒸汽是引起高强度铝合金产生应力腐蚀的关键环境因素,NaCl 和 SO₂ 是大气中影响金属腐蚀的主要污染物,特别是在海洋性大气环境下 Cl⁻ 对腐蚀具有加速作用,因此,在实验室加速试验中 Cl⁻ 常作为主要的环境因素,模拟海洋大气来进行加速模拟试验评价高强度铝合金的应力腐蚀敏感性。周期浸润试验主要模拟了大气环境的干湿交替过程,H₂O₂ 作为去极化剂加速阴极反应速度。

实验室加速试验结果表明,高强度铝合金在海洋性大气环境下的应力腐蚀性能可以通过在 3.5% NaCl 溶液中的周期浸润试验或在 3% NaCl + 0.5% H₂O₂ 溶液中的拉伸应力腐蚀试验进行评价。

4 结论

(1) 高强度铝合金在不同的环境中产生应力腐蚀的敏感性不同,在海洋性环境下具有较高的应力腐蚀敏感性。2A12 铝合金的应力腐蚀的敏感性比 7A04 铝合金高;未开裂的 2A12 铝合金 C 环试样产生严重的剥落腐蚀,未开裂的 7A04 铝合金 C 环试样产生严重的点腐蚀。

(2) 3.5% NaCl 溶液中周期浸润腐蚀试验和 3% NaCl + 0.5% H₂O₂ 溶液中的拉伸应力腐蚀试验作为高强铝合金 SCC 敏感性判定方法,模拟海洋大气腐蚀过程,与户外的试验结果具有较好的对应关系,均表现为 2A12 铝合金的应力腐蚀的敏感性比 7A04 高。

(3) 高强度铝合金断口微观形貌照片显示为沿晶断裂特征,有二次裂纹,并随着施加的应力值增大,二次裂纹增多。

参考文献

- [1] Edited by R. Winston Revie. Uhlig's Corrosion Handbook, Second Edition[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2000
- [2] TSAI T C, Chuang T H. Atmospheric stress corrosion cracking of a superplastic 7475 aluminum alloy[J]. Metall. Mater. Trans. A, 1996, 27A(9):2617-2627
- [3] Schra L, Hart W G J. Long-term outdoor stress corrosion testing of overaged 7000 series aluminum alloys[A]. NLR TR 88012U[C]. American, 1988
- [4] Humphries T S, Nelson E E. Seacoast stress corrosion cracking of aluminum alloys[A]. NASA TM-82393[C]. American, 1981
- [5] Schra L, Faber J. Influence of environments on constant displacement stress corrosion crack growth in high strength aluminum alloys[A]. N83-23446[C]. American, 1981
- [6] Liu J H, Li D, Guo B L. Investigation of stress corrosion cracking of 7xxx series aluminum alloys[J]. Corros. Sci. Prot. Technol., 2001, 13(4):218-221
(刘继华,李荻,郭宝兰. 7XXX 系列 Al 合金应力腐蚀开裂研究 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2001, 13(4):218-221)
- [7] Shen H J, Guo W L, Lu G Z. Stress corrosion cracking susceptibility of aluminum alloys LC9 in NaCl solution[J]. Corros. Prot., 2002, 23(5):190-201
(沈海军,郭万林,吕国志. NaCl 溶液中 LC9 铝合金应力腐蚀特性的试验研究[J]. 腐蚀与防护, 2002, 23(5):190-201)
- [8] Wang Y, Wang Z H, Fu Z L, et al. Effect of scandium on the stress corrosion cracking and exfoliation corrosion of Al-Mg alloys [J]. J. Chin. Soc. Corros. Prot., 2005, 25(4):218-221
(王月,王政红,付自来等. 含钪 Al-Mg 合金抗应力腐蚀和剥落腐蚀性能影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2005, 25(4):218-221)
- [9] Sun Z H, Liu M H, Zhang X Y, et al. Effect of tempered condition on the stress corrosion cracking of Al-Zn-Mg-Cu alloys [J]. J. Chin. Soc. Corros. Prot., 2006, 26(4):232-236
(孙志华,刘明辉,张晓云等. 时效制度对 Al-Zn-Mg-Cu 铝合金应力腐蚀敏感性的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2006, 26(4):232-236)
- [10] Zhang X Y, Guo Y H, Tao C H, et al. Study on the desk-top spring type stress corrosion cracking testing machine[J]. Equip. Environ. Eng., 2004, 1(2):18-22
(张晓云,郭玉海,陶春虎等. 便携式拉伸应力腐蚀试验器的研制[J]. 装备环境工程, 2004, 1(2):18-22)
- [11] Desk-Top Spring Type Stress Corrosion Cracking Testing Machine [P]. China, ZL 022941339, 2002
(便携式拉伸应力腐蚀试验装置[P]. 中国, ZL 022941339, 2002)

INFLUENCE OF DIFFERENT ENVIRONMENTS ON STRESS CORROSION CRACKING OF HIGH STRENGTH ALUMINUM ALLOYS

ZHANG Xiaoyun, SUN Zhihua, LIU Minghui, TANG Zhihui, LI Bin
(*Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095*)

Abstract: An investigation of the stress corrosion cracking resistance of high strength aluminum alloys 2A12 and 7A04 in different atmospheric environments were presented, results were compared with those obtained in laboratory accelerated tests. C-ring and direct tension stress corrosion specimens were taken from the short transverse grain and the longitudinal direction of aluminum alloy stick respectively, applied stress levels were 60, 70, 80 and 90 percent of the $\sigma_{0.2}$. The atmospheric stress corrosion tests were exposed to three different atmospheric test stations in China, one in Beijing, typical semi-rural atmosphere, others in coastal city, Qingdao (East of China) and Wanning (South of China). In the meantime, alternate immersion and direct tension stress corrosion immersion in salt solution were conducted in laboratory condition. The results showed that SCC performance of aluminum alloys could be evaluated within one year in marine atmospheric environment, otherwise, only exfoliation corrosion or pitting was observed. The alternate corrosion results showed that SCC of aluminum alloy was consistent with outdoor exposed samples in the marine atmospheric environment.

Key words: marine environments, atmospheric corrosion, accelerated tests, SCC