

# 7B04 铝合金应力腐蚀敏感性研究

## Research on the Properties of Stress Corrosion Crack for 7B04 Alloy

刘远勇<sup>1</sup>, 张晓云<sup>2</sup>, 裴和中<sup>1</sup>, 陆 峰<sup>2</sup>, 高 健<sup>2</sup>

(1 昆明理工大学, 昆明 650093; 2 北京航空材料研究院, 北京 100095)

LIU Yuan-yong<sup>1</sup>, ZHANG Xiaoyun<sup>2</sup>, PEI He-zhong<sup>1</sup>, LU Feng<sup>2</sup>, GAO Jian<sup>2</sup>

(1 Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2 Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**摘要:** 利用慢应变速率拉伸应力腐蚀实验方法研究 7B04 铝合金的应力腐蚀开裂敏感性。研究温度、腐蚀介质、电化学极化对应力腐蚀敏感性的影响, 结果表明: 随温度的升高 7B04 铝合金的应力腐蚀开裂敏感性增强; 溶液的腐蚀性越强, 7B04 铝合金的应力腐蚀开裂敏感性越大; 无论是阳极极化还是阴极极化都会增加 7B04 铝合金的应力腐蚀开裂敏感性。  
**关键词:** 7B04 铝合金; 应力腐蚀开裂 SCC; 慢应变速率拉伸实验

中图分类号: TB304      文献标识码: A      文章编号: 1001-4381(2010)02-0033-04

**Abstract:** The susceptibility of 7B04 Aluminum alloy to Stress Corrosion Crack (SCC) was investigated using the Slow Strain Rate Test (SSRT). The effect of temperature, corrosion medium and the polarization were also analyzed. The results showed that the susceptibility of 7B04 aluminum alloy to SCC is enhanced with the growth of temperature; the higher causticity of solution, and the stronger of polarization. The microstructure was also observed by Scanning Electron Microscopy (SEM) after the SSRT.  
**Key words:** 7B04 alloy; stress corrosion crack (SCC); slow strain rate test (SSRT)

7B04 铝合金是 Al-Zn-Mg-Cu 系高强铝合金, 它是在 7A04 的基础上进一步纯化发展而来的, 即通过对铁和硅等杂质元素的控制, 提高其断裂韧性等性能, 特点是强度高屈服强度接近于拉伸强度, 塑性较低, 抗应力腐蚀性能较差<sup>[1]</sup>。本工作研究了 7B04 铝合金的应力腐蚀开裂性能, 温度、腐蚀介质、电化学等因素对 7B04 铝合金的应力腐蚀开裂敏感性的影响。

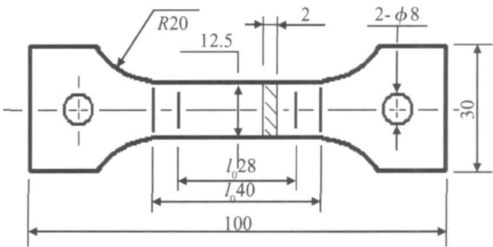


图 1 试样的尺寸

Fig. 1 Sample size

### 1 实验

#### 1.1 实验材料

实验材料为 2mm 厚的 7B04 铝合金板材, 热处理状态为 T6, 化学成分见表 1。试样表面保持原始的状态, 经机械加工成标准试样 (见图 1)。试样在 10% (质量分数, 下同) 的 NaOH 溶液中进行去包铝处理, 采用 30% 的  $\text{HNO}_3$  溶液进行化学抛光处理。

表 1 7B04 合金化学成分(质量分数/%)

Table 1 The chemical composition of 7B04 alloy (mass fraction/%)

Alloying element				Impurity	
Zn	Mg	Cu	Mn	Cr	Fe
6.81	2.05	1.85	0.35	0.25	0.18

#### 1.2 实验方法及条件

按照 HB7235-95 慢应变速率应力腐蚀试验方法<sup>[2]</sup>的要求在 LITRY 实验机上进行, 采用的应变速度为  $1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 。用 M378 电化学系统对拉伸试样施加不同电位进行极化, 参比电极为饱和甘汞电极, 辅助电极为石墨棒。

不同温度下的实验在 3.5% NaCl 溶液进行, 温度分别为 25, 35, 45  $^{\circ}\text{C}$  和 55  $^{\circ}\text{C}$ 。

不同介质的实验, 环境温度均为 35  $^{\circ}\text{C}$ , 实验介质分别为硅油、3.5% NaCl 和含有不同浓度  $\text{H}_2\text{O}_2$  的 3.5% NaCl 水溶液。

电化学极化实验在 35  $^{\circ}\text{C}$  的 3.5% NaCl 溶液中进行, 极化电位分别为 -500, -600, -1200mV 和

- 1500mV。

2 实验结果

2.1 温度的影响

不同温度下 7B04 铝合金的 SSRT 实验结果见表 2。可见, 温度升高, 断裂时间、抗拉强度、延伸率和面缩率都降低, 铝合金更容易发生断裂, 7B04 铝合金的应力腐蚀开裂敏感性随温度升高而增加。图 2 为不同温度下的应力-应变曲线, 可明显看出随着实验溶液温度的提高, 断裂强度下降。

图 3 为 7B04 铝合金试样的断口 SEM 照片。可见断口上覆盖有腐蚀产物, 断口起始于试样周边表面, 在裂纹源处有部分晶粒腐蚀溶解; 腐蚀主要是沿晶界发生, 断口表现为沿晶断裂。在 25℃ 的时候未发生明显腐蚀, 随着温度的升高, 外层腐蚀加剧, 发生溶解的晶粒更多, 腐蚀向内延展更深, 说明在应力腐蚀开裂中发生了阳极溶解。

2.2 腐蚀介质的影响

表 3 为不同的腐蚀介质作用下 7B04 铝合金的 SSRT 实验结果。由于  $H_2O_2$  溶液更具有强腐蚀性,

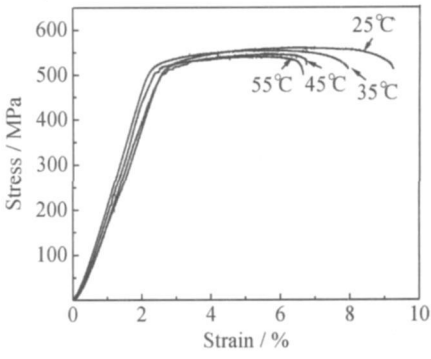


图 2 7B04 铝合金在不同温度 NaCl 溶液中的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of 7B04 alloy in NaCl solution at different temperatures

表 2 不同温度下 7B04 合金 SSRT 实验结果

Table 2 The SSRT results of 7B04 alloy at different temperatures

Temperature/ °C	Time/ h	$\sigma_b$ / MPa	$\delta$ %	$\psi$ %
25	26.5	561	8.2	25.3
35	23.5	556	8.1	24.2
45	21.5	544	7.3	17.2
55	20.6	533	7.0	15.8

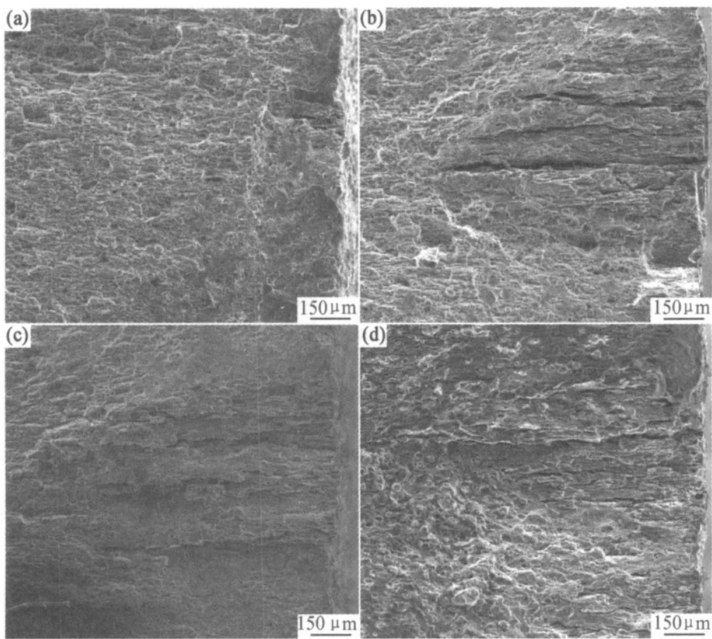


图 3 7B04 铝合金在不同温度的 3.5% NaCl 溶液中的断口形貌

(a) 25℃; (b) 35℃; (c) 45℃; (d) 55℃

Fig. 3 The fracture morphology of 7B04 alloy at different temperatures of 3.5% NaCl solution

(a) 25℃; (b) 35℃; (c) 45℃; (d) 55℃

结果表明, 溶液的腐蚀性加强, 断裂时间、抗拉强度、延伸率和面缩率都降低, 使得铝合金更容易发生断裂, 加

大了 7B04 铝合金的应力腐蚀开裂敏感性。图 4 为不同腐蚀介质时的应力-应变曲线, 可明显看出随着实验

溶液腐蚀性的提高, 断裂强度下降。

表 3 不同腐蚀介质中 7B04 合金 SSRT 实验结果

Table 3 The SSRT results of 7B04 alloy at different corrosive media

Corrosive media	t/h	$\sigma_b$ /MPa	$\delta$ /%	$\psi$ /%
Silicone oil	27.8	562	9.5	28.8
3.5% NaCl	23.5	556	8.1	24.2
3.5% NaCl+ 0.1% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	20.9	552	7.2	14.6
3.5% NaCl+ 0.5% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	19.2	542	6.6	13.1
3.5% NaCl+ 1% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	15.8	522	5.4	9.8

图 5 为 7B04 铝合金试样在 35℃时不同腐蚀介质中的断口 SEM 照片。在硅油中的断口, 边缘为平滑的剪切断口, 瞬断区为等轴韧窝形貌, 韧窝中有质点。在加入强腐蚀介质 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 溶液中, 断裂源区都发生阳

极溶解, 并且随着浓度增加, 晶粒溶解越严重, 而裂纹源区变短, 致使试样更容易发生断裂。

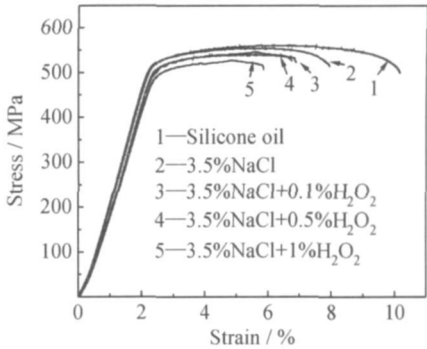


图 4 7B04 铝合金在不同腐蚀介质中的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of 7B04 alloy in the different corrosive media

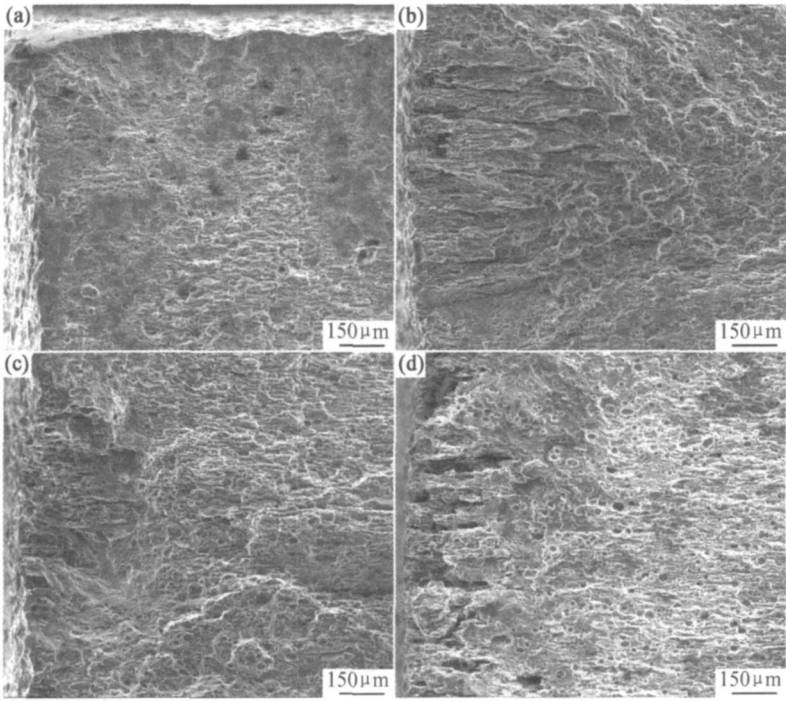


图 5 7B04 铝合金在不同腐蚀介质中的断口形貌

(a) 硅油; (b) 3.5% NaCl+ 0.1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; (c) 3.5% NaCl+ 0.5% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; (d) 3.5% NaCl+ 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

Fig. 5 The fracture morphology of 7B04 alloy at different corrosive media

(a) silicone oil; (b) 3.5% NaCl+ 0.1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; (c) 3.5% NaCl+ 0.5% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; (d) 3.5% NaCl+ 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

2.3 电化学极化的影响

极化作用对于 7B04 铝合金的应力腐蚀开裂的影响显著, 结果见表 4, 阳极极化时, 随着极化加强, 抗拉强度和延伸率降低, 而面缩率增加, 其应力腐蚀敏感性要比未加电位的时候大; 阴极极化时, 随着极化加强, 抗拉强度和延伸率降低, 而面缩率增加, 其应力腐蚀敏感性要比未加电位的时候大。阳极极化时, 极化电位

越高, 强度越低; 阴极极化时, 极化电位越低, 强度越低, 说明无论阳极极化还是阴极极化都会加强 7B04 铝合金的应力腐蚀开裂敏感性。图 6 为不同极化电位时的应力-应变曲线, 可明显看出随着实验极化, 断裂强度下降。阳极极化时的断裂强度的下降要比阴极极化时的显著, 说明阳极极化对 7B04 铝合金的 SCC 敏感性的影响更大。

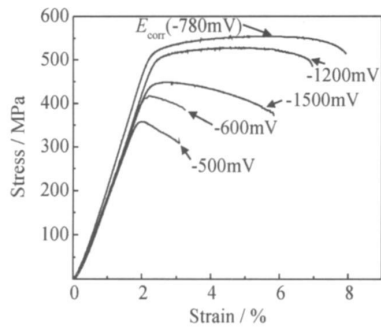


图 6 7B04 铝合金不同极化电位下的应力-应变曲线  
Fig. 6 Stress-strain curves of 7B04 alloy at different potential

图 7 为 7B04 铝合金试样在 35℃, 3.5% NaCl 介质中不同极化作用时的断口 SEM 照片。从图 7(a), (b) 可以看出, 当阳极极化时, 试样发生严重腐蚀, 阳极极化越大, 腐蚀越严重。图 7(a) 的腐蚀情况最为严重, 可见断口上覆盖有腐蚀产物, 晶粒细长, 裂纹主要沿晶界扩展。局部有塑性变形。在裂纹源处晶粒腐蚀

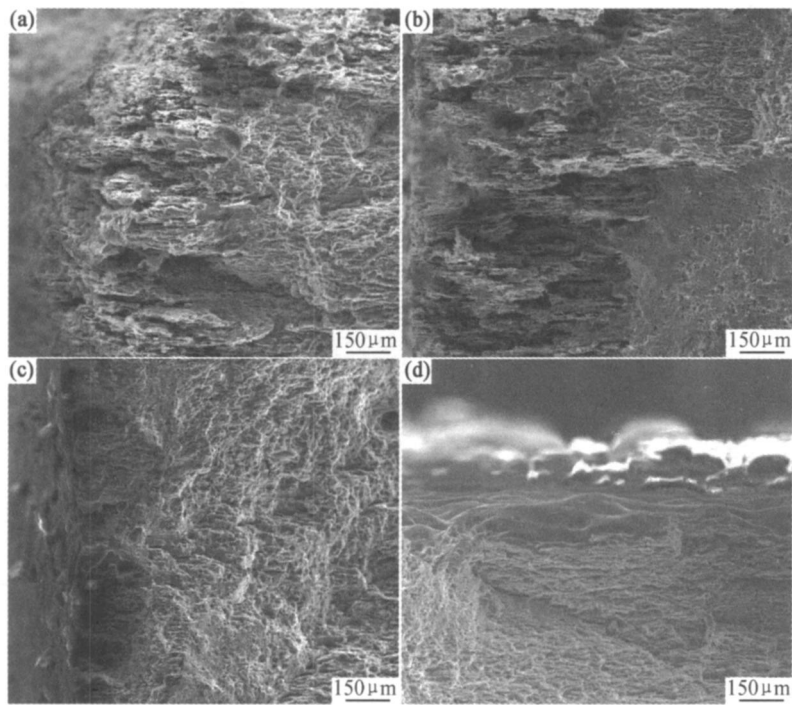


图 7 7B04 铝合金在不同极化电位下的断口形貌  
(a) - 500mV; (b) - 600mV; (c) - 1200mV; (d) - 1500mV  
Fig. 7 The fracture morphology of 7B04 alloy at different potential  
(a) - 500mV; (b) - 600mV; (c) - 1200mV; (d) - 1500mV

3 分析和讨论

在 HB 7235-95 中, 判断应力腐蚀断裂敏感性有两种方法, 一是比较断面收缩率, 即  $\phi_{conditions} / \phi_{inert\ environment} (\phi_c / \phi_i) < 95\%$  时就可以认为材料有应力

表 4 不同极化条件下 7B04 合金的 SSRT 实验结果  
Table 4 The SSRT results of 7B04 alloy at the different potential

Potential	t/h	$\sigma_b$ /MPa	$\delta$ %	$\phi$ %
- 500mV	9	339	3.1	8.2
- 600mV	10.8	425	3.7	5.3
$E_{corr} (-780mV)$	23.5	556	8.1	24.2
- 1200mV	19.3	526	6.6	6.5
- 1500mV	17	450	5.8	8.8

严重, 腐蚀主要沿晶界发生。图 7(c), (d) 为阴极极化时的断口 SEM 照片, 可见断口边缘光滑, 表层晶粒沿晶界开裂脱落, 断口处裂纹较少。由于阴极极化的时候溶液中会有部分氢产生, 氢渗透到晶界中, 压力变大, 从而产生裂纹。

从电化学极化实验结果及断口形貌来看, 电化学会加剧 7B04 铝合金 SCC 敏感性。阳极极化时其 SCC 机制以阳极溶解为主, 阴极极化时以氢致开裂为主。

腐蚀敏感性。二是将 SSRT 获得的各项力学性能指标加以处理, 得到的  $I_{SSRT}$  指数, 作为判据。

$$I_{SSRT} = 1 - \alpha_{\omega} \cdot (1 + \delta_{\omega}) / \alpha_A \cdot (1 + \delta_A)$$

式中:  $\sigma_{f\omega}$  为在环境介质中的断裂强度;  $\alpha_A$  为在惰性介

(下转第 41 页)

参考文献

[1] 徐滨士, 朱绍华. 表面工程的理论与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991. 540- 565.

[2] KWIE T N I E W S K I C, D O N G H, S T R O H A C K E R T, et al. Du-  
plex surface treatment of high strength T imetal 550 alloy towards  
high load bearing capacity[J]. Surface and Coatings Technology,  
2001, 139: 284- 292.

[3] W E I C Y, C H E N F S. Characterization on multi-layer fabricated  
by TRD and plasma nitriding[J]. Materials Chemistry and Phys-  
ics, 2005, 90: 178- 184.

[4] Z H A O C, L I C X, D O N G H, et al. Study on the active screen  
plasma nitriding and its nitriding mechanism[J]. Surface and  
Coatings Technology, 2006, 201: 2320- 2325.

[5] M E N T H E E, B U L A K A, O L F E J, et al. Improvement of me-  
chanical properties of austenitic stainless steel after plasma nitr-  
iding[J]. Surface and Coatings Technology, 2000, 133- 1134:  
259- 263.

[6] H E D A Y A T I M K, M A B H O U B I F, N I C K C H I T. Comparison of

conventional and active screen plasma nitriding of hard chromium  
electroplated steel[J]. Vacuum, 2009, 83(8): 1123- 1128.

[7] 郭绍义, 李兴俊, 杨秋合, 等. 激光熔覆 W-G-Ni/TiC 涂层的组织  
和摩擦磨损性能研究[J]. 材料工程, 2008, (6): 72- 75.

[8] 耿林, 孟庆武, 郭立新. 钛合金表面上两种镍基合金粉的激光熔  
覆研究[J]. 材料工程, 2005, (12): 45- 52.

[9] D O N G S Y, X U B S, W A N G Z J, et al. Laser remanufacturing  
technology and its applications[J]. Proceedings of SPIE, 2007,  
68251N: 1- 5.

基金项目: 国家自然科学基金中英合作项目(50711130231); 国家自然  
科学基金重点项目(50735006); 国家 973 计划资助项目(513270102)  
收稿日期: 2009-04-24; 修订日期: 2009-11-20  
作者简介: 徐滨士(1931—), 男, 教授, 中国工程院院士, 主要从事表面  
工程、再制造工程方面的研究, 联系地址: 北京丰台杜家坎 21 号再制造  
重点实验室(100072), E-mail: xubinshi@vip.sina.com  
通讯作者: 董世运, E-mail: syd422@vip.sohu.com

(上接第 36 页)  
质中的断裂强度;  $\delta_w$  为在环境介质中的断裂伸长率;  
 $\delta_A$  为在惰性介质中的断裂伸长率;  $I_{SSRT}$  从 0- 1 表示

应力腐蚀断裂敏感性渐增<sup>[2]</sup>。各实验的数据处理结果  
如表 5 所示。  
根据  $\phi_C / \phi_1$  的结果表明, 实验中所涉及的环境下

表 5 应力腐蚀敏感性判定  
Table 5 To determine the sensitivity of stress corrosion

Experimental environment	3. 5% NaCl				3. 5% NaCl, 35℃			3. 5% NaCl, 35℃			
	25℃	35℃	45℃	55℃	+ 0.1% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	+ 0.5% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	+ 1% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	- 500mV	- 600mV	- 1200mV	- 1500mV
( $\phi_C / \phi_1$ ) / %	88	84	60	55	51	45	34	28	18	23	31
$I_{SSRT}$	0.08	0.1	0.18	0.25	0.17	0.25	0.38	0.78	0.65	0.3	0.52

Note: inert environment is silicone oil

7B04 铝合金都具有应力腐蚀敏感性。温度的升高, 溶  
液的腐蚀性加强都会使  $\phi_C / \phi_1$  的值变小; 而阳(阴)极  
极化加强,  $\phi_C / \phi_1$  的值变大, 出现该结果有可能在极化实  
验中的试样腐蚀过于严重, 断面测量的误差产生较大。  
根据  $I_{SSRT}$  计算结果, 表明温度的升高, 溶液的腐  
蚀性加强都会使  $I_{SSRT}$  的值变大; 且阳(阴)极极化加  
强, 也会使  $I_{SSRT}$  的值变大, 应力腐蚀断裂敏感性增强。

4 结论

(1) 7B04T 651 状态下的铝合金具有一定的应力  
腐蚀敏感性; 溶液温度的升高、腐蚀性的增强都会加大  
7B04 铝合金的应力腐蚀敏感性。

(2) 电化学极化对 7B04 铝合金的 SCC 敏感性有  
显著的影响, 并且阳极极化的作用要比阴极极化要强。

参考文献

[1] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 第三  
卷, 第 2 版. 北京: 中国标准出版社, 2002.

[2] H B 7235- 95, 慢应变速率应力腐蚀实验方法[S].

收稿日期: 2008-12-25; 修订日期: 2009-08-20  
作者简介: 刘远勇(1982—), 男, 硕士研究生, 主要从事高强铝合金的腐  
蚀特性研究, 联系地址: 昆明理工大学莲华校区学生宿舍 6 栋 621 室  
(650093), E-mail: lyongp@qq.com