

# 盐水环境下高强铝合金暴露面积对腐蚀行为的影响

## Effects of Exposed Area on Corrosion Behavior of High Strength Aluminum Alloys in Salt Water

徐火平<sup>1</sup>, 刘慧丛<sup>1</sup>, 朱立群<sup>1</sup>, 刘建中<sup>2</sup>, 叶序彬<sup>2</sup>, 胡本润<sup>2</sup>

(1 北京航空航天大学 材料科学与工程学院 空天材料与服役

教育部重点实验室, 北京 100191; 2 北京航空材料研究院, 北京 100095)

XU Huo-ping<sup>1</sup>, LIU Hui-cong<sup>1</sup>, ZHU Li-qun<sup>1</sup>, LIU Jian-zhong<sup>2</sup>, YE Xu-bin<sup>2</sup>, HU Ben-run<sup>2</sup>

(1 Key Laboratory of Aerospace Materials and Performance (Ministry of Education),

School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

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

**摘要:** 对 2A12 和 7B04 两种高强铝合金在不同暴露面积时的点腐蚀特征进行了研究, 并引入表面腐蚀损伤度对铝合金的腐蚀损伤进行量化表征, 通过图像处理得到的腐蚀形貌二值图来计算其腐蚀损伤度。结果表明: 在 3.5% (质量分数) NaCl 盐水浸渍实验环境中, 这两种铝合金材料发生点腐蚀与其暴露面积有关, 而且存在着一个发生点腐蚀的暴露面积临界值。随着试样暴露面积的增大, 铝合金的表面腐蚀损伤度呈增加趋势; 当暴露面积小于发生点腐蚀的暴露面积临界值时, 则没有明显的点腐蚀特征; 另外, 铝合金材料不同该暴露面积临界值也不同。

**关键词:** 腐蚀; 暴露面积临界值; 图像处理; 铝合金; 损伤度

中图分类号: TG146.2+1; TG172 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2010)05-0041-06

**Abstract:** The corrosion characteristics of high strength aluminum alloys (2A12 and 7B04) with different exposed areas by 3.5% (mass fraction) NaCl salt water immersion test were investigated. The corrosion damage ratio was calculated through the binary image that obtained from image processing. The results indicate that the size of exposed area of the specimens can affect the pit corrosion of both 2A12 and 7B04 aluminum alloys in salt water immersion condition. No obvious pitting characteristic can be observed when the exposed area is smaller than a certain value, which is termed as the critical area of pitting corrosion. The pitting corrosion damage ratio improves with increase of exposed area. In addition, the difference of the critical areas between 2A12 and 7B04 aluminum alloys shows that the components of the aluminum alloys can affect the critical value.

**Key words:** corrosion; critical area; image processing; aluminum alloy; damage ratio

高强铝合金具有密度小、比强度高优点, 广泛应用于航空航天等结构零件。其中 Al-Cu-Mg (2XXX) 和 Al-Zn-Mg-Cu (7XXX) 是高强铝合金常用的两个主要系列, 而 2A12 和 7B04 是这两个系列中的典型高强铝合金材料。

铝合金材料构件在海洋大气环境服役过程中不可避免地会遭受不同程度的腐蚀损伤, 主要腐蚀形式有点腐蚀、应力腐蚀等。点腐蚀会造成高强铝合金构件的疲劳性能下降, 引起断裂等事故的发生<sup>[1]</sup>。这主要是由于腐蚀损伤加速了表面疲劳源的产生和疲劳裂纹的扩展, 进而缩短了飞机结构部件的疲劳寿命及其剩余强度<sup>[2]</sup>。已有很多学者研究了铝合金材料在海洋大气环境中的点腐蚀、应力腐蚀特征和规律, 这些为航空

等工业应用高强铝合金材料提供了设计依据。

在研究铝合金材料的腐蚀中, 大量的工作是针对铝合金所处的环境(温度、湿度、介质成分等)与腐蚀规律、铝合金的腐蚀类型及机理等, 而铝合金材料的面积因素对点腐蚀的影响规律研究得较少。

P. M. Aziz 等人<sup>[3]</sup>指出铝合金点蚀出现概率随试样面积的减小而减小, 当试样面积减少到一定值后铝合金将不发生点蚀。飞机在长期使用的过程中防护涂层不同程度的脱落、划痕及零件接合部位的磨损都会使铝合金材料产生不同面积的暴露, 这会影响铝合金结构件的腐蚀行为。因此研究高强铝合金材料在盐水环境下的暴露面积对点腐蚀行为的影响以及腐蚀规律就显得更为重要, 这对于有效避免高强铝合金材料构件

的点腐蚀引起的腐蚀疲劳断裂, 延长高强铝合金构件在海洋环境条件下的服役使用寿命具有重要的意义。

因此, 本工作以 2A12, 7B04 两种高强铝合金材料为研究对象, 探讨在 3.5% (质量分数, 下同) NaCl 盐水浸渍实验环境下的腐蚀特征和规律, 同时引入表面腐蚀损伤度的概念对铝合金材料的腐蚀损伤进行量化表征<sup>[4-7]</sup>, 并通过图像处理得到的腐蚀形貌二值图计算腐蚀损伤度。为这两种高强铝合金材料构件在海洋大气环境中的服役寿命预测提供理论依据。

表 1 2A12 铝合金成分(质量分数/%)

Table 1 Component of 2A12 aluminum alloy(mass fraction/%)

Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Ti	Ni	Others	Al
3.8-4.9	1.2-1.8	0.3-0.9	< 0.5	< 0.5	< 0.30	< 0.15	< 0.1	< 0.15	Bal

表 2 7B04 铝合金成分(质量分数/%)

Table 2 Component of 7B04 aluminum alloy(mass fraction/%)

Zn	Mg	Cu	Mn	Fe	Si	Ni	Cr	Ti	Al
6.23	2.88	1.58	0.31	0.15	0.048	< 0.01	0.16	0.025	Bal

别近似为 0.5mm × 0.5mm, 1mm × 1mm, 2mm × 2mm, 5mm × 5mm, 10mm × 10mm, 20mm × 20mm, 其余部分用氯丁橡胶密封。

1.2 腐蚀实验条件

在海洋大气环境中, 铝合金构件的点蚀现象比较普遍, 其中湿度大和 Cl<sup>-</sup> 的存在是金属材料易腐蚀的重要因素<sup>[9-11]</sup>。因此采用盐水浸渍实验对 2A12 和 7B04 铝合金进行加速腐蚀。

盐水浸渍实验条件: 3.5% NaCl 溶液, 温度 25℃ ± 5℃。腐蚀时间为 48h, 腐蚀结束后用去离子水煮沸试样 2h, 去除残留腐蚀液和腐蚀产物。

1.3 腐蚀评价

应用表面腐蚀损伤度量化表征铝合金的腐蚀损伤, 并以此为评价标准, 研究试样暴露面积对铝合金材料点蚀行为的影响。表面腐蚀损伤度定义为腐蚀损伤区域内所有腐蚀坑表面积之和与腐蚀损伤区面积的比例, 其定义式如式(1)<sup>[4]</sup>所示:

$$\alpha = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n A_{pi} \times 100\% \tag{1}$$

式中: α 为腐蚀损伤度; n 为腐蚀坑的数目; A<sub>pi</sub> 为第 i 个腐蚀坑的平面投影面积; A 为腐蚀区的表面积。

采用 GE5 数码王观察试样腐蚀形貌, 根据腐蚀形貌图中腐蚀坑部位的灰度值和材料表面的灰度值差别, 将腐蚀形貌图进行图像处理。先将图像转换为 8 位灰度图, 再依次进行二值化和中值滤波得到对应的黑白二值图像, 二值图像中点腐蚀坑灰度值为 255, 其

1 实验

1.1 试样

实验材料为 2A12 和 7B04 铝合金板材, 化学成分分别见表 1 和表 2。去除表面包铝层, 表面机械处理依次采用 No. 180, No. 400, No. 800 水砂纸打磨, 然后用 50g/L NaOH 溶液去除表面氧化层, 并在 3% (体积分数) HNO<sub>3</sub> 溶液中出光<sup>[8]</sup>。

腐蚀实验的试样暴露形状为正方形, 暴露尺寸分

余部分灰度值为 0, 通过该图像灰度值为 255 的像素所占的比例可以计算各试样的点腐蚀坑面积百分比, 即表面腐蚀损伤度。

2 腐蚀形貌和特征

图 1 为 2A12 和 7B04 铝合金在 3.5% NaCl 盐水浸渍实验环境中不同暴露面积试样的腐蚀形貌照片。可以看出, 2A12 铝合金在试样暴露面积小于 1mm<sup>2</sup> 时表面没有出现点腐蚀坑, 暴露面积大于等于 4mm<sup>2</sup> 时则有明显的点蚀现象; 而 7B04 铝合金出现明显点蚀现象的暴露面积是 100mm<sup>2</sup> 和 400mm<sup>2</sup>。另外, 由试样腐蚀形貌可以发现, 2A12 铝合金的腐蚀坑开口面积明显大于 7B04 铝合金的腐蚀坑开口面积, 由此可见, 2A12 铝合金的腐蚀坑横向扩展速度要远大于 7B04 铝合金。

3 腐蚀损伤度分析

图像处理中将物体与背景分离的方法称为二值化处理。二值化是数字图像处理中一项最基本的变换方法, 通过非零取一、固定阈值、双固定阈值等不同的阈值化变换方法, 使一幅灰度图变成黑白二值图像, 将所需的目标部分从复杂的图像背景中脱离出来。采用固定阈值法, 即为灰度图像(灰度值范围为 0~ 255)设定一个阈值 T (取 T = 70), 把图像中灰度值小于给定阈

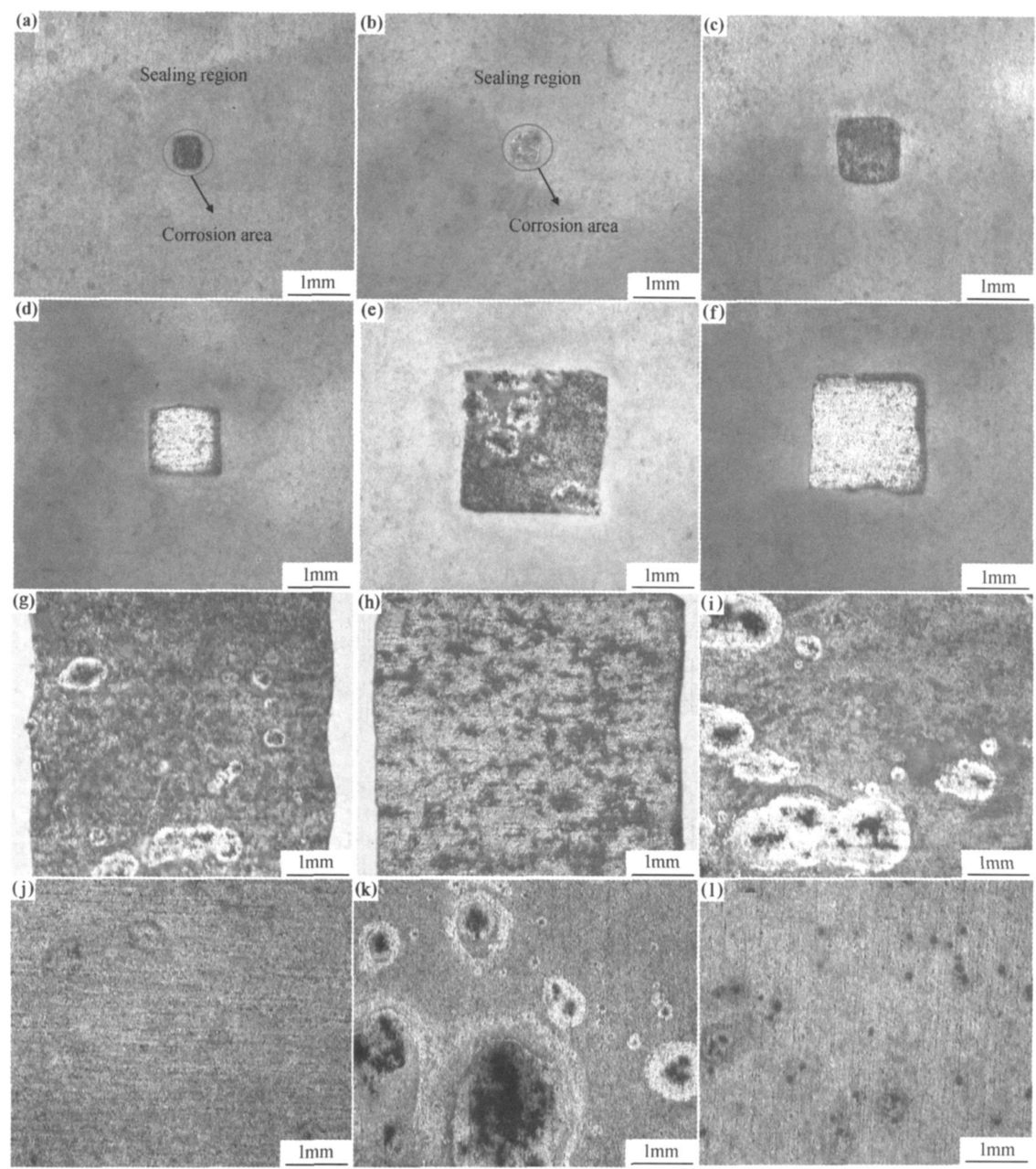


图 1 2A12 和 7B04 铝合金在 3.5% NaCl 盐水浸渍实验环境中不同暴露面积试样腐蚀形貌照片

(a) 2A12, 0.25mm<sup>2</sup>; (b) 7B04, 0.25mm<sup>2</sup>; (c) 2A12, 1mm<sup>2</sup>; (d) 7B04, 1mm<sup>2</sup>; (e) 2A12, 4mm<sup>2</sup>; (f) 7B04, 4mm<sup>2</sup>;  
(g) 2A12, 25mm<sup>2</sup>; (h) 7B04, 25mm<sup>2</sup>; (i) 2A12, 100mm<sup>2</sup>; (j) 7B04, 100mm<sup>2</sup>; (k) 2A12, 400mm<sup>2</sup>; (l) 7B04, 400mm<sup>2</sup>

Fig.1 The corrosion photographs of 2A12 and 7B04 aluminum alloys with different exposed areas by 3.5% NaCl salt water immersion test

(a) 2A12, 0.25mm<sup>2</sup>; (b) 7B04, 0.25mm<sup>2</sup>; (c) 2A12, 1mm<sup>2</sup>; (d) 7B04, 1mm<sup>2</sup>; (e) 2A12, 4mm<sup>2</sup>; (f) 7B04, 4mm<sup>2</sup>;  
(g) 2A12, 25mm<sup>2</sup>; (h) 7B04, 25mm<sup>2</sup>; (i) 2A12, 100mm<sup>2</sup>; (j) 7B04, 100mm<sup>2</sup>; (k) 2A12, 400mm<sup>2</sup>; (l) 7B04, 400mm<sup>2</sup>

值  $T$  的像素置为 255, 大于阈值  $T$  的像素置为 0<sup>[12]</sup>。

铝合金材料的腐蚀形貌图像中点腐蚀坑处的灰度值较小, 而其他部分灰度值较大, 因此可以通过二值化处理使点腐蚀坑分离出来。经过阈值处理得到的二值图像中白色区域(灰度值为 255)为腐蚀坑, 黑色区域(灰度值为 0)为材料表面, 处理结果如图 2(b) 所示。可以看到, 图 2(b) 中还存在大量的小白点, 这是由于

铝合金进行腐蚀实验后表面不平整, 有较多的细小凹坑, 它们在腐蚀图像中灰度值同样较小。这使得二值图像中噪声较多, 影响损伤度计算结果, 因此要对图像进行平滑处理, 去除这些噪声。

采用中值滤波去除腐蚀图像中的噪声, 它是一种非线性处理方法。在中值滤波中, 设定像点的邻域, 图像中值滤波后各像点的输出等于该像点邻域中所有像素灰度

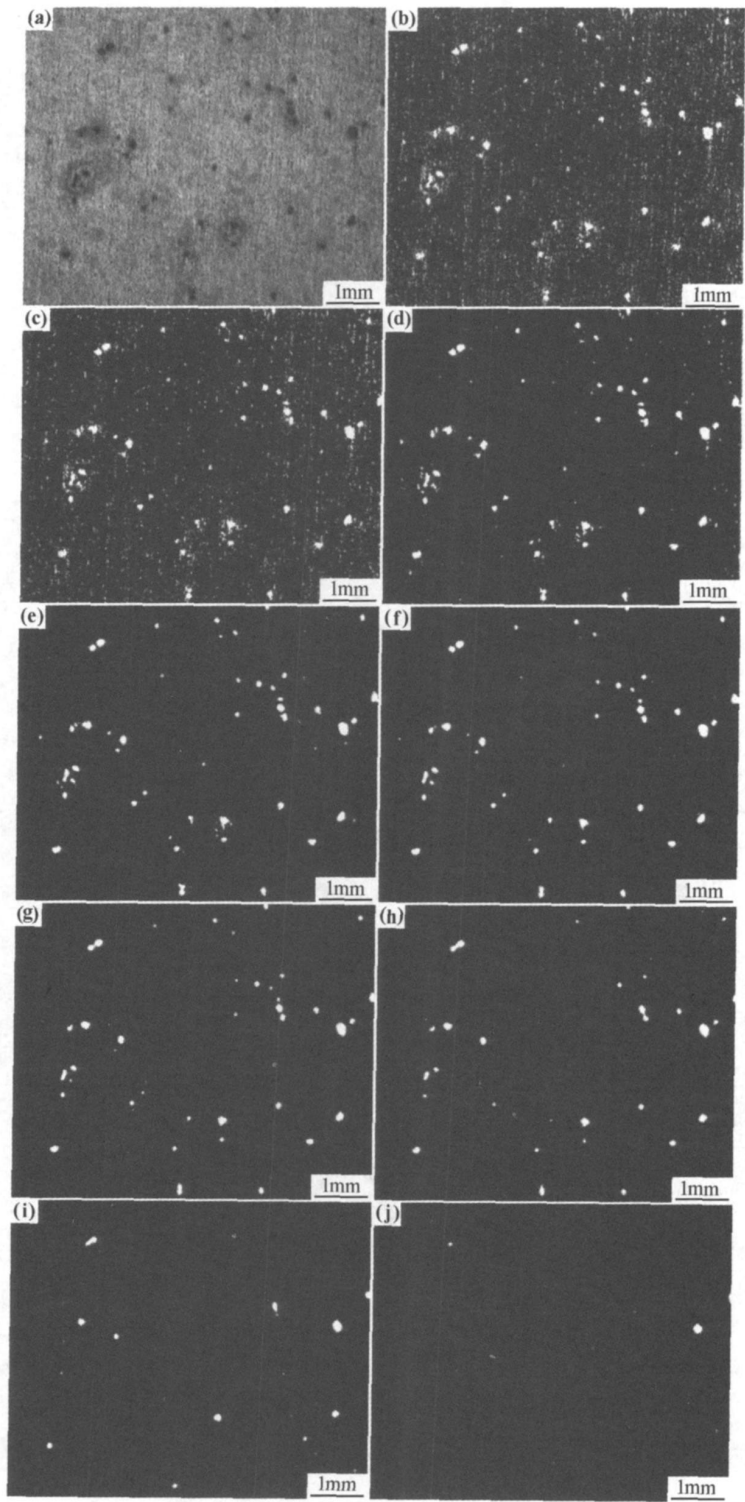


图 2 7B04 铝合金的腐蚀形貌图经不同图像处理后的二值图像

(a) 原图; (b)  $r = 0$ ; (c)  $r = 1$ ; (d)  $r = 3$ ; (e)  $r = 5$ ; (f)  $r = 7$ ; (g)  $r = 9$ ; (h)  $r = 11$ ; (i)  $r = 15$ ; (j)  $r = 20$

Fig. 2 The binary images of corrosion morphology of 7B04 aluminum alloy under different image processing parameters

(a) initial image; (b)  $r = 0$ ; (c)  $r = 1$ ; (d)  $r = 3$ ; (e)  $r = 5$ ; (f)  $r = 7$ ; (g)  $r = 9$ ; (h)  $r = 11$ ; (i)  $r = 15$ ; (j)  $r = 20$

的中值,即存在一个滑动的窗口,窗口内所有像素灰度的中值作为窗口中被滤波的像点处理后的灰度<sup>[13]</sup>。  
二维中值滤波的窗口形状和尺寸设计对滤波的效

果影响较大。窗口的形状决定在什么样的几何空间取元素求中值,窗口的大小决定在多少个数值中求中值。对二维图像,窗口的形状可以是矩形、圆形、十字形、线

条、圆环等<sup>[13]</sup>。使用圆形窗口,窗口尺寸分别选取半径  $r$  为 1, 3, 5, 7, 9, 11, 15, 20, 单位为像素。图 2 为 7B04 铝合金在 3.5% NaCl 盐水浸渍实验环境中暴露面积为  $400\text{mm}^2$  时的腐蚀形貌图经图像处理后的二值图像,其中图 2(a) 为腐蚀形貌灰度图,图 2(b) 为二值化处理后的二值图像,图 2(c)~(j) 为不同参数进行中值滤波得到的二值图像。由图可知,随着窗口半径的增大,图像的噪声减少,但是当窗口半径过大时,很多小蚀坑也被当作噪声去除,且点腐蚀坑的边缘棱角有部分被去除,使得腐蚀有效信息大幅降低。

计算采用不同窗口半径进行中值滤波所得二值图像的腐蚀损伤度,结果如图 3 所示。由图 3 曲线可知,腐蚀损伤度计算值随着窗口半径的增大而减小,在半径为 1~3 时腐蚀损伤度计算值变化较快,当半径大于 5 时则变化较慢。这是因为腐蚀后材料表面凹坑相对较小,当半径小于 3 时大部分都能去除,这就造成损伤度计算值的快速降低,但是当半径大于 5 时,中值滤波处理不仅把这些凹坑除去,同时还把点腐蚀坑边缘的棱角给去除,腐蚀损伤度计算值则继续缓慢下降,二

值图像的有效信息量降低。因此中值滤波的窗口半径应选取 3~5 较好,本实验取 3。

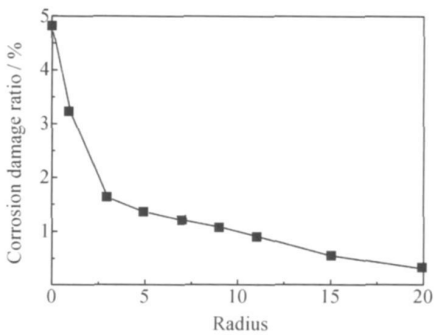


图 3 腐蚀损伤度计算值与半径的关系曲线  
Fig. 3 Change of the corrosion damage ratio with the radius

图 4 为 2A12 和 7B04 铝合金在 3.5% NaCl 盐水浸渍实验环境下暴露面积为  $100\text{mm}^2$  时的腐蚀形貌经图像处理后的二值图像,可以看出 2A12 铝合金的腐蚀损伤度明显大于 7B04 铝合金。计算各试样腐蚀损伤度,结果如表 3 所示。

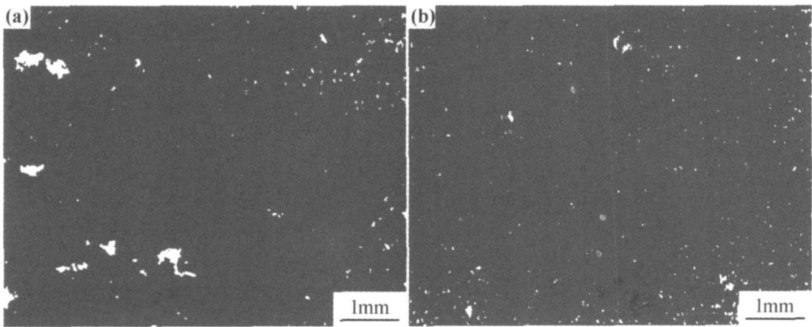


图 4 2A12 和 7B04 铝合金腐蚀形貌二值图 (a) 2A12; (b) 7B04  
Fig. 4 The binary images of corrosion morphology of 2A12 and 7B04 aluminum alloys (a) 2A12; (b) 7B04

表 3 2A12 和 7B04 铝合金在不同暴露面积时的腐蚀损伤度

Table 3 The corrosion damage ratio of 2A12 and 7B04 aluminum alloys with different exposed areas

Exposed area/mm <sup>2</sup>	0.25	1	4	25	100	400	
Damage ratio/ %	2A12	0.00	0.00	1.45	2.34	5.37	5.49
	7B04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.95	1.51

表 3 数据表明随着暴露面积的增大,2A12 和 7B04 铝合金在 3.5% NaCl 盐水浸渍实验环境中的腐蚀损伤度都不断增加,而当暴露面积较小时,试样以全面腐蚀为主,无明显的点腐蚀特征,该结果与试样腐蚀形貌特征相吻合。这说明在 3.5% NaCl 盐水浸渍实验环境下,一定时间内铝合金发生点腐蚀存在暴露面积临界值,当暴露面积小于该值时合金主要发生全面腐蚀,当

暴露面积大于该值时合金腐蚀程度则随暴露面积的增大而增大。由实验可得 2A12 和 7B04 铝合金在盐水浸渍实验环境下腐蚀 48h 出现点蚀的暴露面积临界值分别为  $1\text{mm}^2$  和  $25\text{mm}^2$ 。

铝合金结构遭受腐蚀损伤的部位是薄弱的部位之一,容易形成应力集中,疲劳裂纹也是在这些部位最容易同时也是最早产生。因此腐蚀会造成结构疲劳性能降低,极大地降低机体寿命。疲劳寿命和腐蚀损伤度呈负指数关系<sup>[5]</sup>,应用腐蚀形貌二值图像计算腐蚀损伤度,对铝合金的腐蚀损伤进行量化表征,并作为参数引入疲劳公式。合金腐蚀损伤度越大,其疲劳寿命降低幅度也越大。在 3.5% NaCl 盐水浸渍实验环境中,相同腐蚀时间内铝合金的腐蚀损伤度随暴露面积的增

大而增大,则该材料疲劳寿命随暴露面积的增大而减小。当材料暴露面积小于其临界值时,试样主要发生全面腐蚀,这时铝合金的疲劳寿命受到的影响较小。

## 4 结论

(1) 在 3.5% NaCl 盐水浸渍实验环境中, 2A12 (Al-Cu-Mg) 铝合金的腐蚀坑开口面积远大于 7B04 (Al-Zn-Mg-Cu) 铝合金的腐蚀坑开口面积, 即 2A12 铝合金的腐蚀坑横向扩展速度远大于 7B04 铝合金。

(2) 采用表面腐蚀损伤度可以对铝合金腐蚀损伤进行量化表征, 通过图像处理腐蚀形貌二值图像计算得到腐蚀损伤度, 计算结果与试样腐蚀特征相吻合。腐蚀试样表面小凹坑会使二值图像产生噪声, 影响腐蚀损伤度计算值, 采用中值滤波处理可以去除这些噪声, 使用圆形窗口, 窗口半径最佳值在 3~5 之间。

(3) 在 3.5% NaCl 盐水浸渍实验环境中, 随着试样暴露面积的增大, 2A12 和 7B04 铝合金的腐蚀损伤度呈增加趋势, 腐蚀程度逐渐增大。这两种铝合金都存在一个发生点腐蚀的暴露面积临界值, 当暴露面积小于该值时材料表面没有明显的点腐蚀特征。根据实验结果可初步推断, 2A12 和 7B04 铝合金腐蚀 48h 出现点蚀的暴露面积临界值分别为  $1\text{m}^2$  和  $25\text{m}^2$ 。

### 参考文献

- [1] 秦剑波, 王生楠, 刘亚龙. LY12CZ 铝合金预腐蚀及疲劳损伤研究[J]. 材料工程, 2006, (3): 14-17.
- [2] ASTM STP 1298, pitting corrosion and fatigue crack nucleation, effects of the environment on the initiation of crack growth[S].
- [3] AZIZ P M, GODARD H P. Influence of specimen area on the pit-

ting probability of aluminum[J]. Electrochem Soc, 1955, 102 (10): 577-579.

- [4] PAIK J K, LEE J M, KO M J. Ultimate shear strength of plate elements with pit corrosion wastage[J]. Thin-Walled Structures, 2004, 42(8): 1161-1176.
- [5] 张有宏, 吕国志, 陈跃良, 等. 铝合金腐蚀损伤的形态学研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2007, 19(4): 272-274.
- [6] 张有宏, 吕国志, 任克亮, 等. 不同环境下 LY12-CZ 铝合金表面腐蚀损伤演化规律研究[J]. 航空学报, 2007, 28(1): 142-145.
- [7] 王慧, 吕国志, 王乐, 等. 金属表面腐蚀损伤演化过程的元胞自动机模拟[J]. 航空学报, 2008, 29(6): 1490-1496.
- [8] 朱立群, 谷岸, 刘慧丛, 等. 典型高强铝合金材料的点腐蚀坑前缘特征的研究[J]. 航空材料学报, 2008, 28(6): 61-66.
- [9] 韩德盛, 李荻. 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.
- [10] XU N X, ZHAO L Y, DING C H, et al. Laboratory observation of dew formation at an early stage of atmospheric corrosion of metals[J]. Corros Sci, 2002, 44: 163-170.
- [11] MORCILLO M, CHICO B, MARIACA L, et al. Salinity in marine atmospheric corrosion: its dependence on the wind regime existing in the site[J]. Corros Sci, 2000, 42: 91-104.
- [12] 杨淑莹. VC++ 图像处理程序设计[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 北京交通大学出版社, 2005. 58-98.
- [13] 孙即祥. 图像处理[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 162-164.

收稿日期: 2009-05-19; 修订日期: 2009-11-10

作者简介: 徐火平(1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 腐蚀与防护, 联系地址: 北京航空航天大学材料学院(100191), E-mail: xuhpshopping@126.com

通讯作者: 朱立群(1955-), 男, 教授, 从事腐蚀防护研究, 联系地址: 北京航空航天大学材料学院(100191), E-mail: zhulq@buaa.edu.cn

(上接第 40 页)

值, 这对于计算不同温度梯度场中座舱透明件的成型应力是非常必要的。根据条纹值的计算公式可以得出聚碳酸酯材料在常温下的条纹值为  $75.2\text{N}/\text{条} \times \text{cm}$ 。

## 3 结论

(1) PC 是一种光弹性敏感材料, 仅需要 40N 的载荷即可出现理想的条纹级次。

(2) PC 的应力响应时间对于条纹级次的判读有一定的影响, 在选定载荷下, 条纹级次达到稳定所需的时间最少为 3min。

(3) 挤出成型 PC 板材条纹图对加载方向有选择性, 虽然这对条纹图的级次数据无影响, 但为方便读数, 规范实验方法, 仍然需要对加载方向作出合理的选择, 以便呈现标准的条纹图。

(4) PC 的热光曲线与其温度-形变曲线的变化规律是一致的。

### 参考文献

- [1] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册第七卷[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [2] JAMES W DALLY, WILLIAM F RILEY. Experimental Stress Analysis[M]. New York: McGraw-Hill, 1978. 235-336.
- [3] 佟景伟, 伍洪泽. 实验应力分析[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1983. 185-243.
- [4] RAMESH K, PRAMOD B R. Digital image processing of fringe patterns in photomechanics[J]. Optical Engineering, 1992, 31: 1478-1498.

收稿日期: 2009-04-16; 修订日期: 2010-03-03

作者简介: 张博(1983-), 男, 硕士, 研究方向为透明材料性能及检测技术研究, 联系地址: 北京市 81 信箱 9 分箱(100095), E-mail: zhangbol117@163.com