

文章编号:1000-6893(2007)01-0142-04

不同环境下 LY12-CZ 铝合金表面腐蚀损伤演化规律研究

张有宏¹, 吕国志¹, 任克亮^{1,2}, 石伯妹¹, 李 仲¹

(1. 西北工业大学 航空学院, 陕西 西安 710072)

(2. 宁夏大学 物理与电气信息工程学院, 宁夏 银川 750021)

The Evolution Rhythm of Surface Corrosion Damage of LY12-CZ Aluminum in Varied Environments

ZHANG You-hong¹, LU Guo-zhi¹, REN Ke-liang^{1,2}, SHI Bo-mei¹, LI Zhong¹

(1. School of Aeronautics, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Department of Physics and Electrical Information, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

摘要: 对不同腐蚀温度、不同腐蚀时间作用下铝合金的表面腐蚀损伤形态进行试验研究。腐蚀损伤在实验室中由人工产生。在光学显微镜下测量得到不同腐蚀环境下试验件的表面腐蚀损伤度数值,并对这些数值进行详细的统计分析。研究表明,腐蚀损伤度随腐蚀时间和温度的增加而增大很快,腐蚀损伤度的概率分布符合逻辑分布。

关键词: 腐蚀; 损伤度; 统计分析; 铝合金; 演化规律

中图分类号: V216.5; O212.1 **文献标识码:** A

Abstract: The surface corrosion damage configuration of aluminum alloy was experimentally investigated in the corrosive environments of different temperatures and durations. The corrosion damage was artificially produced in the lab. The data sets of values of the surface corrosion damage ratio of specimens were measured using the optical microscope and then the statistical analysis was carried out. The conclusion can be drawn that the Logistic distribution is acceptable for the data sets of values of the surface corrosion damage ratio and rise of temperature or prolonging of corrosion time and the surface corrosion damage ratio become larger.

Key words: corrosion; corrosion damage ratio; statistical analysis; aluminum alloy; evolution rhythm

沿海使用的铝合金结构在服役过程中会遭受不同程度的腐蚀损伤,在有腐蚀损伤存在的情况下,铝合金结构件更容易提前失效断裂。因此,对存在预腐蚀损伤的铝合金结构进行剩余强度和寿命评估是一项极其重要的工作。而要开展这项工作的前提便是要对预先存在的腐蚀损伤形态及其演化规律进行深入的研究。腐蚀在铝合金结构上造成的损伤便是产生大量的腐蚀坑、斑。以往对腐蚀损伤的研究主要集中在对单个腐蚀坑的研究上,很多的文献^[1-3]对单个坑深度的扩展演化进行了很好的研究。试验表明:在遭受腐蚀损伤的铝合金试验件中,相当一部分试验件是从多个腐蚀损伤源处形成裂纹并逐步扩展的^[2],而对多处腐蚀损伤的分布和演化规律到目前还没有被完全的理解^[4],文献^[5]提到可以用粗糙度来描述铝合金结构上初始的多处腐蚀损伤,并指出了开展这样工作的重要性。可见,非常有必要对初始腐蚀损伤形态进行一个量化处理,以便更加准确地估算遭受腐蚀损伤铝合金结构的寿命。本文以试验为基础,引入表面腐

蚀损伤度的概念,研究了腐蚀损伤度在不同试验条件下演化发展的规律,为进一步完整准确地评价腐蚀对结构剩余强度的影响打下良好的基础。

1 试验过程

对铝合金结构常用的 LY12-CZ 铝合金进行了腐蚀试验,在试验件的指定位置产生圆形的腐蚀损伤区域^[6]。对腐蚀试验的腐蚀温度和腐蚀作用时间进行了控制,温度分为 20℃, 40℃, 60℃ 3 个档次,而腐蚀作用时间分为 10 d, 20 d 和 31 d 3 个时间段。腐蚀后的试验件表面产生了大量腐蚀坑,不同腐蚀环境下腐蚀坑的密度和分布情况是不同的,图 1 是典型的腐蚀坑分布情况示意图。

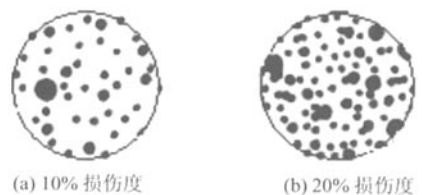


图 1 腐蚀坑分布图

Fig. 1 Pitting intensity diagrams

表面腐蚀损伤度由式(1)^[7]定义。

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

式中: n 为腐蚀坑的数目; A_{pi} 为第*i*个腐蚀坑的平面投影面积; A 为腐蚀区的表面积。依具体坑形状的不同,将腐蚀坑近似成圆形或者椭圆形:圆形腐蚀坑时, $A_{pi} = \pi d_r^2/4$, d_r 为坑的直径;椭圆腐蚀坑时, $A_{pi} = \pi a b_i/4$, a 为椭圆的长轴长, b 为椭圆的短轴长。

对预腐蚀后试验件上的腐蚀损伤区域在 U-NION DZ3 电子视频显微镜下进行仔细的观测,并随机选取若干区域进行拍照,将各个腐蚀坑依具体形状不同等效为椭圆形或者圆形进行测量计算,得到各试验件一系列的表面腐蚀损伤度数据。下文对指定腐蚀溶液温度(选取中等温度水平:40°)下不同天数,和指定腐蚀天数(选取中等腐蚀时间:20 d)不同腐蚀温度下的腐蚀损伤进行物理现象的对比分析和损伤度演化的概率分析。

2 腐蚀损伤形态的对比

腐蚀温度为40°C,腐蚀作用时间为10d,20d和31d的试验件表面腐蚀损伤形态图如图2所示。

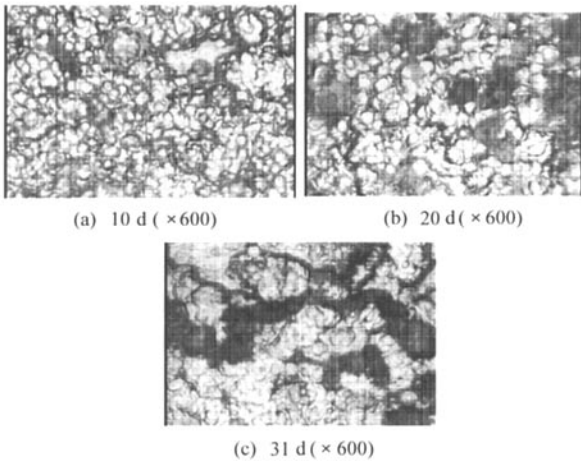


图2 相同腐蚀温度(40°C)的腐蚀损伤

Fig.2 Examples of corrosion damage using solution at the same temperature(40°C)

对比这3张图可以看出:在同样的腐蚀温度下,随着腐蚀天数的增加,腐蚀坑逐渐变深变大;晶间腐蚀逐渐明显,沿试验件表面方向和试验件横截面方向发展,且相互浸入交错,使得试验件表面产生了面积(体积)越来越大的剥离产物,表面腐蚀损伤度数值逐渐增大。腐蚀溶液温度均为40°C,腐蚀时间为10 d时,损伤度平均值为:11.252 14%;

20 d时为13.912 31%;31 d时为17.366 43%。

腐蚀天数为20 d水平下,随着腐蚀温度的升高,腐蚀损伤的现象基本和上述内容相同。腐蚀温度为20°C的时候,损伤度平均值为:8.416 15%;40°C时为13.912 31%;60°C时为23.303 75%。

其他腐蚀温度和腐蚀时间作用下的腐蚀损伤现象与上述内容是相似的。

3 表面腐蚀损伤度的统计分析

(1) 指定温度(40°C),不同腐蚀天数下的损伤度分析

对腐蚀温度为40°C,不同的腐蚀时间下的损伤度数值进行了统计分析,表1给出了各腐蚀天数下的损伤度测量值。

表1 不同腐蚀时间的损伤度(40°C)

Table 1 Corrosion damage ratios for different corrosion times (40°C)

时间/d	损伤度/%						
10	14.44	9.61	7.41	13.55	14.27	11.12	12.38
20	14.87	15.59	14.42	14.84	11.95	11.28	13.68
31	19.78	15.35	15.42	14.32	16.94	17.14	15.70
时间/d	损伤度/%						
10	9.39	14.03	12.38	9.39	14.03	7.23	8.30
20	12.26	12.50	17.93	12.50	16.43	12.61	—
31	16.38	22.24	19.55	16.98	16.36	20.24	16.73

通过P-P概率图粗略检验可知这些数据基本符合 Logistic 分布,Weibull 分布和 Lognormal 分布,之后利用这3种分布进行数据拟合,得到各概率分布条件下的相关系数的平方,如表2。

表2 不同腐蚀时间损伤度拟合相关系数平方(40°C)

Table 2 Square correlation coefficients of three different distributions for different corrosion times(40°C)

时间/d	R^2		
	Logistic	Weibull	Lognormal
10	0.966 15	0.960 53	0.964 60
20	0.978 87	0.951 50	0.978 83
31	0.967 85	0.927 09	0.967 81

取显著性水平 $\alpha=0.05$,利用显著水平 α 下满足假设分布的线性相关系数临界值计算公式

$$r_c = \frac{t_\alpha(n-2)}{\sqrt{(n-2) + t_\alpha^2(n-2)}} \quad (2)$$

可求得到各 r_c 值均小于表2计算得到的相关系数数值,因此3种概率分布均为高度相关。由此可以得出结论:表面腐蚀损伤度数据最好地符合 Logistic 分布。Logistic 分布函数为

$$F(x) = \frac{\exp\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)}{1 + \exp\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)} \quad (3)$$

式中： μ 为位置参数，它决定着曲线的位置； σ 为尺度参数， σ 越小，概率密度曲线分散程度也越小。

图3给出了40℃条件，3种腐蚀时间下损伤度的累积分布规律图，表3给出logistic分布中各参数的值。

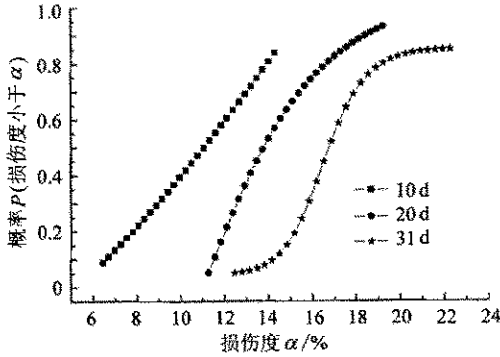


图3 不同腐蚀时间下损伤度的累积分布规律(40℃)

Fig. 3 Cumulative distribution rules of corrosion damage ratio for three different corrosion times(40℃)

表3 Logistic分布各参数值

Table 3 Values of Logistic distribution

时间/d	10	20	31
μ	11.333 94	13.777 68	17.107 29
σ	1.590 14	1.118 24	1.229 62

以腐蚀温度为40℃，腐蚀作用时间为31 d情况为例进行分析。从表3中可以看出：腐蚀损伤度为17.107 29%时概率密度是最大的，即在图3中31 d对应的曲线在这一点处其斜率最大，在这个位置处也最为陡峭；当腐蚀损伤度小于1.107 29%时，曲线随着腐蚀损伤度的增大逐渐变陡峭；当腐蚀损伤度大于17.107 29%时，曲线随着损伤度数值的持续增大而逐渐变缓。

(2) 指定腐蚀作用时间(20 d)，不同温度下的损伤度分析

在指定腐蚀作用时间(20 d)情况下，腐蚀温度分别为20℃，40℃和60℃时的损伤度数值如表4所示。各概率分布条件下的相关系数的平方值列于表5。

同样，各 r_c 值均小于表4计算得到的相关系数数值。由表4可以看出，损伤度数据也是符合Logistic分布最好。图4给出腐蚀20 d，3种腐蚀温度下损伤度的累积分布规律图，表6给出Logistic分布中各参数的值。

表4 不同温度下的损伤度值(腐蚀20 d)

Table 4 Corrosion damage ratios at different temperatures (20 d)

温度/℃	损伤度 α /%						
20	3.80	6.64	8.46	7.27	7.57	10.86	11.07
40	14.87	15.59	14.42	14.84	11.95	11.28	13.68
60	31.78	21.82	20.37	27.11	22.45	20.75	19.47

温度/℃	损伤度 α /%						
20	6.97	7.82	11.14	5.37	11.25	11.19	
40	12.26	12.50	17.93	12.50	16.43	12.61	
60	22.68						

表5 不同温度下损伤度拟合相关系数平方(20 d)

Table 5 Square correlation coefficients of three different distributions at different temperatures(20 d)

温度/℃	R^2		
	Logistic	Weibull	Lognormal
20	0.959 84	0.955 10	0.959 14
40	0.978 98	0.951 50	0.978 83
60	0.978 36	0.853 63	0.977 07

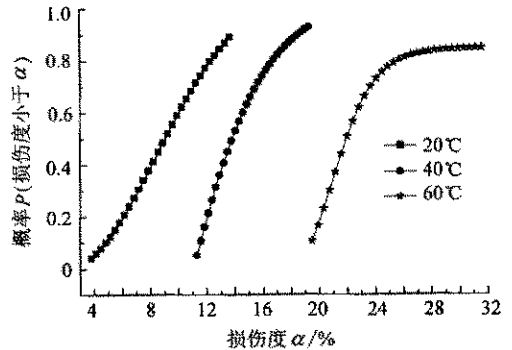


图4 不同腐蚀温度下损伤度的累积分布规律

Fig. 4 Cumulative distribution rules of corrosion damage ratio at three different temperatures

表6 Logistic分布各参数值

Table 6 Values of Logistic distribution

温度/℃	20	40	60
μ	8.446 08	13.777 68	22.616 14
σ	1.450 19	1.118 24	2.073 39

以腐蚀作用时间为20 d，腐蚀温度为60℃情况为例进行分析：从表6中可以看出：腐蚀损伤度为22.616 14%时概率密度最大；图4中60℃对应的曲线在这一点最为陡峭，在这一点之前，曲线随着损伤度的增大逐渐变陡，在这一点之后，曲线随着损伤度的增大逐渐变缓。

4 结论

(1) 对不同环境下LY-12 CZ铝合金的表面腐蚀损伤情况进行了研究，引入了表面腐蚀损伤

度的概念,并对其进行了定量分析。

(2) 随着腐蚀溶液温度的增加、腐蚀时间的延长,试验件的表面腐蚀损伤形态越来越严重,腐蚀损伤度增大很快。不同腐蚀温度和不同腐蚀时间下试验件损伤度的概率分布均符合 Logistic 分布。给出了最大概率密度时的腐蚀损伤度数值,叙述了表面腐蚀损伤的演化规律。

(3) 结合已有的对腐蚀坑深度研究的大量文献,将腐蚀坑深度和表面腐蚀损伤度结合起来,可以更准确地开展遭受腐蚀损伤铝合金结构的定寿问题。

致 谢

本文得到黄玉珊先生基金部分资助,特此感谢

参 考 文 献

- [1] 陈跃良,吕国志,段成美.服役条件下飞机结构腐蚀损伤概率模型研究[J].航空学报,2002,23(3):249-251.
Chen Y L, Lu G Z, Duan C M. A probability model for the corrosion damage of aircraft structure in service environment [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2002, 23 (3): 249-251. (in Chinese)
- [2] Alyousif O M. Corrosion and corrosion fatigue of aluminum alloys [D]. USA: Lehigh University, 2002.

- [3] Harlow D J, Wei R P. A probability model for the growth of corrosion pits in aluminum alloys induced by constituent particles [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1998, 59(3): 305-325.
- [4] Wei R P, Harlow D J. Corrosion enhanced fatigue and MSD [R]. AIAA-2002-1398, 2002.
- [5] Miedlar P C, Berens A P. USAF damage tolerant design handbook: guidelines for the analysis and design of damage tolerant aircraft structures [R]. AFRL-VA-WP-TR-2003-3002, 2002.
- [6] 张有宏,吕国志,陈跃良. LY-12 CZ 铝合金预腐蚀及疲劳损伤研究[J].航空学报,2005,27(6):779-782.
Zhang Y H, Lu G Z, Chen Y L. Predicting fatigue life from pre-corroded LY12-CZ aluminium test [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 27(6): 779-782. (in Chinese).
- [7] 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.

作者简介:



张有宏(1979—)男,博士研究生。主要研究方向:老龄飞机腐蚀损伤容限与有限元分析。E-mail:zyhnpu@hotmail.com.

(责任编辑:李铁柏)