

# 铝合金材料腐蚀形貌及裂纹扩展分析

叶彬<sup>1</sup>, 朱做涛<sup>2</sup>, 穆志韬<sup>2</sup>

(1. 洪都集团650所, 南昌 330000; 2. 海军航空工程学院 青岛分院, 山东 青岛 266041)

**摘要:** 通过加速腐蚀试验, 利用QUESTAR 三维光学显微镜观察, 将蚀坑看作是椭球形, 其深度及宽度都符合幂函数的形式, 都随腐蚀时间的增加而增加, 但增加的速率都降低; 腐蚀能显著降低试件的疲劳寿命, 是疲劳裂纹形成的主要原因; AFGROW 软件较好地拟合了腐蚀试件的裂纹扩展寿命, 拟合误差较低, 且所得的裂纹扩展寿命及临界裂纹长度比实际试验值都偏保守。

**关键词:** 腐蚀坑; 腐蚀形貌; 疲劳寿命; 疲劳裂纹; 裂纹扩展

**中图分类号:** TG172.3; V216.3      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2011)04-0054-05

## Corrosion Morphology and Crack Growth Analysis of Aluminum Alloy Material

YE Bin<sup>1</sup>, ZHU Zuo-tao<sup>2</sup>, MU Zhi-tao<sup>2</sup>

(1. 650 Research Institute of Hongdu Group, Nanchang 330000, China;

2. Qingdao Branch of Naval Aeronautical Engineering Academy, Qingdao 266041, China)

**Abstract:** Aluminum alloy was tested with accelerated corrosion method. The corrosion pits were seen as ellipse balls and examined with QUESTAR three-dimensional optics microscope. The results showed that the depth and width of corrosion pits increasing with corrosion time and in according with power function, but the acceleration decrease; Corrosion can reduce the fatigue life of the materials significantly and is the main cause of fatigue crack formation and growth; AFGROW software can simulate crack growth life well and the error is low; the crack growth life and critical crack length obtained by AFGROW simulation are conservative than experiment values.

**Key words:** corrosion pits; corrosion morphology; fatigue life; fatigue crack; crack growth

飞机在服役期间必然受到腐蚀环境和载荷的共同作用, 一方面飞机在停放时受到环境的作用导致基体受到腐蚀, 另一方面飞机在飞行状态下, 腐蚀环境和载荷的共同作用加速了飞机结构的腐蚀损伤, 飞机结构件在交变应力和腐蚀环境的交互作用下, 疲劳性能明显降低, 疲劳寿命显著缩短<sup>[1]</sup>。因此, 基

收稿日期: 2011-03-01

作者简介: 叶彬(1963—), 男, 江苏吴县人, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为飞机结构强度。

于飞机的使用环境,有必要对飞机的使用寿命进行重新评估。研究表明,腐蚀坑是导致疲劳裂纹形成并扩展的重要原因<sup>[2-10]</sup>。

AFGROW 由美国空军开发,是目前计算裂纹扩展的一种有效分析软件。波音公司在对 KC-135 飞机的腐蚀疲劳寿命评估中采用了该软件,文献[11—14]也对该软件计算结果与试验结果进行了对比,都验证其有较高的精度。文献[15]分别使用了 FASTRAN 和 AFGROW 对 7075-T651 铝合金试件和 7075-T7351 铝合金试件进行了裂纹扩展预测,并进行了分析比较,所得结果也表明在 2 种软件中 AFGROW 的估算更为准确。笔者将蚀坑看作是半椭球形,其长半轴为  $a$ ,深度为  $c$ ,并利用 AFGROW 软件,对不同腐蚀时间下的疲劳裂纹扩展进行研究。

## 1 加速腐蚀试验及蚀坑形貌

### 1.1 加速腐蚀试验

采用 LD2 铝合金试验件,试验件形状如图 1 所示(试件厚度为 3 mm),其材料组成及力学性能见表 1。加速腐蚀试验采用 ZJF-45G 周期浸润箱进行,浸泡 14.8 min,烘烤 3.6 min,加速腐蚀 340 个循环相当于外场腐蚀 1 a。分别腐蚀不同的年限,共加速腐蚀 10 a,每年取 3 个试验件,利用 QUESTAR 三维光学显微镜对不同腐蚀时间下的最大腐蚀深度及蚀坑宽度进行测量(如图 2 所示),并取平均值作为该腐蚀年限下的最大腐蚀深度及蚀坑宽度。

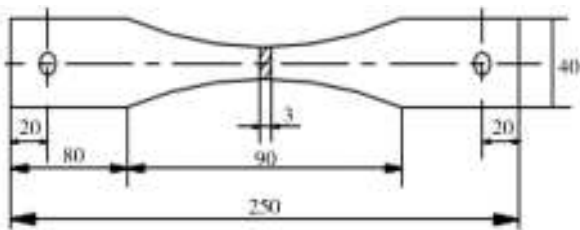


图1 试验件形状示意

Fig. 1 The sketch map of the samples

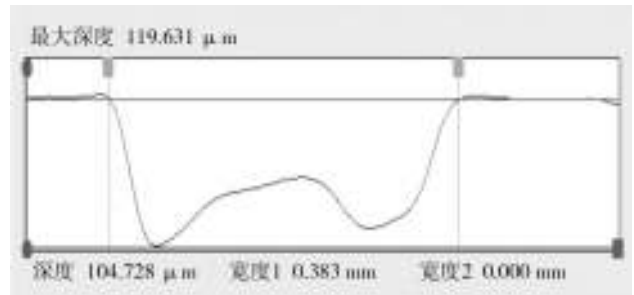


图2 蚀坑深度及宽度测量

Fig. 2 The width and depth of corrosion pits

### 1.2 蚀坑形貌

利用 QUESTAR 三维光学显微镜对腐蚀坑进行观察,发现蚀坑形貌大部分呈椭球形如图 3 所示,其疲劳断面的蚀坑形貌如图 4 所示。因此,可以将蚀坑看作是椭球形状,其深度为  $a$ ,长半轴为  $c$ ,如图 5 所示。



图3 蚀坑形状示意

Fig. 3 The 3D shape of corrosion



图4 疲劳断面蚀坑形状

Fig. 4 The corrosion pit of rupture plane

表1 LD2 铝合金材料组成及力学性能

Table 1 The mechanical character and material component of LD2 aluminum alloy

$\omega(\text{Si})/\%$	$\omega(\text{Fe})/\%$	$\omega(\text{Cu})/\%$	$\omega(\text{Mn})/\%$	$\omega(\text{Mg})/\%$	$\omega(\text{Zn})/\%$	$\omega(\text{Ti})/\%$	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\sigma_b/\text{MPa}$
0.15~1.2	0.5	0.2~0.6	0.15~0.35	0.45~0.9	0.2	0.15	260	290

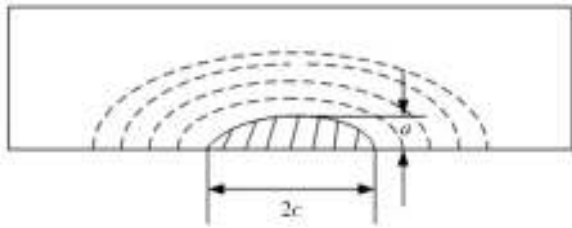


图5 蚀坑疲劳断面形状示意

Fig. 5 The sketch map of the corrosion pit

### 2 腐蚀数据统计

对不同腐蚀时间下的最大蚀坑深度及对应的蚀坑宽度进行测量,每个试验件测量3个点,取其平均值作为该试验件的最大蚀坑深度及蚀坑宽度,测量后的腐蚀试验件在 ATM-800 疲劳试验机上做疲劳试验,最大应力为 15.2 kN,应力比为 0.06,记录其疲劳寿命,见表 2。

从表 2 可以看出,蚀坑的存在大大降低了试件的疲劳寿命,不同腐蚀时间下的蚀坑深度及宽度变化曲线如图 6 所示。可以看出,蚀坑深度及宽度都随着腐蚀时间的增加而增加,增加的速率均降低,符合幂函数的形式,其函数关系式为: $y=a \times (1-e^{-bx})$ ,这与文献 [16—17] 是一致的。

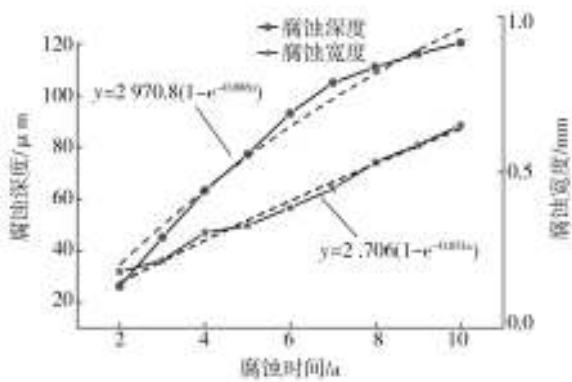


图6 不同腐蚀年限下的蚀坑深度及宽度变化曲线

Fig. 6 The corrosion depth and width curve with corrosion time

### 3 AFGROW 裂纹扩展分析

运用 AFGROW 软件对不同腐蚀年限下不同蚀坑深度及宽度的裂纹扩展寿命进行分析,计算得到不同腐蚀年限下的裂纹扩展寿命见表 3,试验及软件分析所得的疲劳寿命拟合曲线如图 7 所示。

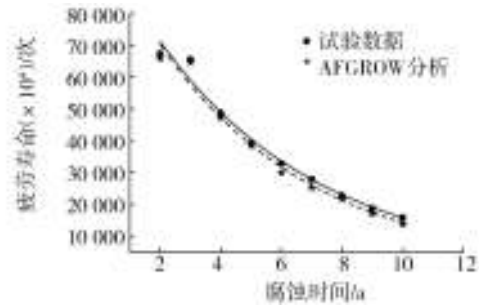


图7 试验及 AFGROW 分析所得的疲劳寿命

Fig. 7 The fatigue life of AFGROW analysis and experiment

可以看出,AFGROW 能较好地拟合腐蚀试件的裂纹扩展寿命,拟合误差较低且偏保守。因此,可以利用 AFGROW 软件来分析计算腐蚀试件的裂纹扩展寿命。

图 8 为利用 AFGROW 软件分析所得的加速腐蚀 6 a 后的疲劳寿命及临界裂纹长度。图 9 为加速腐蚀 6 a 后 39# 试验件观察到的裂纹,用 QUESTAR 三维光学显微镜测量裂纹长度后,继续做疲劳试验,160 次循环后试件断裂,因此可以将所观察到的裂纹长度视为试件的临界裂纹长度。从图 8,9 可以看出,利用 AFGROW 软件分析所得的临界裂纹长度也与试验所得的临界裂纹长度大致相当。

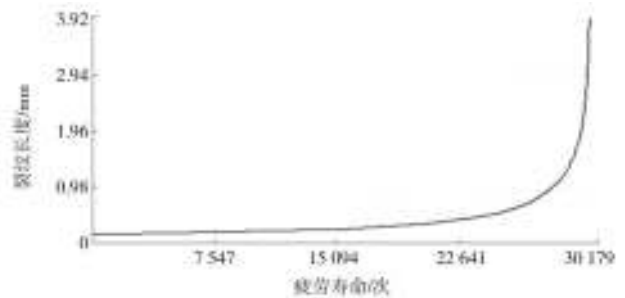


图8 AFGROW 软件计算的裂纹长度

Fig. 8 The crack length with the computation of AFGROW software

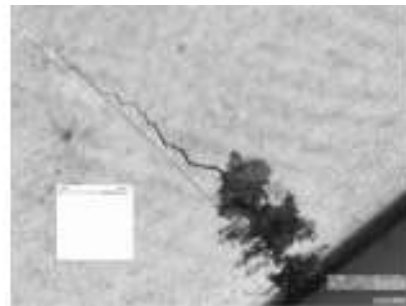


图9 利用 QUESTAR 三维光学显微镜测量的临界裂纹长度

Fig. 9 The critical crack length observed with optics microscope

表2 不同腐蚀年限下的腐蚀数据  
Table 2 The corrosion data of different corrosion years

腐蚀时间/a	试件编号	腐蚀深度/ $\mu\text{m}$	平均深度/ $\mu\text{m}$	腐蚀宽度/mm	平均宽度/mm	疲劳寿命/次	平均寿命/次
0	1#	—	—	—	—	100 689	135 658
	2#	—	—	—	—	157 218	
	3#	—	—	—	—	149 067	
2	1#	21.916	26.009	0.127	0.179	63 024	67 277
	17#	25.790		0.193		68 378	
	23#	31.078		0.217		70 419	
3	13#	43.714	45.007	0.223	0.215	65 782	65 449
	34#	42.096		0.208		63 848	
	58#	49.785		0.214		66 716	
4	9#	62.573	63.097	0.317	0.305	47 237	48 683
	23#	61.619		0.298		49 317	
	37#	65.100		0.301		49 494	
5	5#	79.118	77.176	0.321	0.328	37 859	39 186
	10#	73.573		0.337		39 464	
	31#	78.836		0.325		40 236	
6	25#	83.051	93.085	0.383	0.386	32 888	32 807
	39#	104.724		0.374		30 320	
	47#	90.630		0.403		35 214	
7	38#	102.779	104.911	0.445	0.447	29 327	27 835
	56#	106.35		0.446		25 699	
	17#	105.604		0.45		28 479	
8	16#	98.823	110.899	0.479	0.532	23 140	22 747
	29#	114.774		0.457		24 318	
	44#	119.410		0.502		20 784	
9	19#	104.765	116.019	0.536	0.587	18 283	18 668
	33#	119.236		0.554		19 676	
	60#	124.057		0.585		18 045	
10	8#	127.571	120.321	0.594	0.652	15 487	15 795
	48#	115.260		0.615		17 298	
	24#	118.132		0.628		14 601	

表3 AFGROW分析所得不同腐蚀年限下的疲劳寿命  
Table 3 The fatigue life of different corrosion time by AFGROW software analysis

腐蚀时间/a	2	3	4	5	6	7	8	9	10
疲劳寿命/次	66 034	64 765	47 396	38 653	30 179	25 487	21 921	17 258	14 037

### 4 结论

1) 蚀坑是疲劳裂纹形成的主要原因,腐蚀坑的存在大大降低了构件的疲劳寿命,可以将蚀坑看作

是半椭球形状。

2) 蚀坑深度及宽度均随着腐蚀时间的增加而增加,增加的速率均降低,符合幂函数的形式。

3) AFGROW 软件能较好地拟合腐蚀试件的裂纹扩展寿命,拟合误差较低,且所得的裂纹扩展寿命

及临界裂纹长度都偏保守。

参考文献:

[1] 张九渊. 孔蚀统计规律的对比研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1994, 8(2): 102—108.

[2] 曹楚南. 腐蚀试验数据的统计分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 1988.

[3] 牟致忠. 腐蚀可靠性分析模型及应用[C]//中国航空协会, 中国航空可靠性工程学会论文集. 青岛, 1999.

[4] 任和. 运7飞机腐蚀模型及可靠性分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1998, 10(4): 87—92.

[5] 高镇同. 疲劳应用统计学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986.

[6] 郝献超, 李晓刚, 董超芳. 不同暴露时间下不锈钢在典型地区大气腐蚀的灰色分析[J]. 北京科技大学学报, 2008: 30(5): 503—504.

[7] 裴和中, 雍歧龙, 金蕾. 金属材料大气腐蚀与环境因素的灰色关联分析[J]. 钢铁研究学报, 1999, 11(4): 53—54.

[8] 刘思峰, 党耀国, 方志耕. 灰色系统理论及其应用[M]. 第三版. 北京: 科学出版社, 2008: 50—96.

[9] ZHU Zuo-tao, MU Zhi-tao, CHEN Ding-hai. Research on Evaluation of Corrosion Grade Based on Image Processing Technique[C]//2009 international Conference on Manufact-

uring Science and Engineering. 2009: 178—184. (余不详)

[10] MANNING S D, YANG J N. Guidelines for Analysis and Design of Durable Aircraft Structures[K]. 1984. (余不详)

[11] MEDVED J J, BRETON M, IRVING P E. Corrosion Pit Size Distributions and Fatigue Lives—a Study of the EIFS Technique for Fatigue Design in the Presence of Corrosion [J]. International Journal of fatigue, 2004: (26): 71—80.

[12] OSAMA M. Corrosion and Corrosion Fatigue of Aluminum Alloys[D]. Lehigh: Lehigh University, 2002.

[13] DOLLEY E J, LEE B, WEI R P. The Effect of Pitting Corrosion on Fatigue Life[J]. Fatigue Fract Eng Mater Struct. 2000: (23)555—560

[14] 朱青云, 李曙林, 薛军, 等. 某机中央翼下壁板疲劳寿命扩展寿命估算[J]. 机械强度. 2004, 26(3): 234—236

[15] JAMES A. Comparison of contemporary FCG life prediction tools international of fatigue[J]. International Journal of Fatigue. 1999: 12(5)181—185

[16] ITZHAK D, DINSTEIN I, ZILBERBERG T. Pitting Corrosion Evaluation by Computer Image Processing [J]. Corrosion Science, 1981, 21(1): 17—22.

[17] WANHILL R J H, LUCEIA J J, RUSSLM T. The Fatigue in Aircraft Corrosion Testing Programme[R]. 1989, 2.

(上接第53页)

3) 将复杂的腐蚀系统进行简化, 定义了腐蚀疲劳寿命累积衰减函数与疲劳寿命衰减速率函数, 建立了寿命累积衰减模型, 在应力比、加载频率一定的情况下, 直接研究腐蚀对疲劳寿命的影响。

4) 用非线性神经网络与线性LMS的方法进行预测, 通过与实验结果对比, 误差满足工程上的要求, 非线性求解的结果更理想。

参考文献:

[1] 穆志韬. 直升机结构疲劳[M]. 北京: 国防工业出版社,

2003: 371—372.

[2] ZHU Zuo-tao, MU Zhi-tao, CHEN Ding-hai. Research on Evaluation of Corrosion Grade Based on Image Processing Technique[C]//2009 International Conference on Manufacturing Science and Engineering. 2009: 178—184.

[3] 史峰, 王小川. MATLAB神经网络30个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010: 183—187.

[4] 谢伟杰, 李获. LY12CZ和7075T7351铝合金在EXCO溶液中腐蚀动力学的统计研究[J]. 航空学报, 1999, 20(1): 34—38.

[5] 张德丰. MATLAB神经网络应用与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 134—156.