

环境效应与防护

不同表面状态 2024-T3 铝合金腐蚀行为及 DFR 退化规律

陈跃良, 吴省均, 张勇, 卞贵学, 张柱柱, 张杨广

(海军航空大学 青岛校区, 山东 青岛 266041)

摘要: **目的** 研究阳极氧化膜破损的航空铝合金试件在实验室加速腐蚀条件下的腐蚀行为和疲劳性能退化规律, 并和阳极氧化膜完好的试件进行对比。 **方法** 以不同表面状态的 2024-T3 铝合金试件为研究对象, 进行不同时间的实验室加速腐蚀试验和与加速腐蚀后的 DFR 试验。通过观察腐蚀形貌, 测量腐蚀坑深度和孔蚀率来观测腐蚀行为, 通过计算腐蚀后的 DFR 来研究 DFR 退化规律。 **结果** 阳极氧化膜完好、破损的 2024-T3 铝合金试件分别在加速腐蚀 180、36 h 后出现点蚀坑, 平均点蚀坑深度与加速腐蚀时间符合幂函数关系。试件在实验室加速腐蚀条件下, DFR 的退化规律符合指数函数关系。 **结论** 与阳极氧化膜完好试件相比, 阳极氧化膜破损会导致 2024-T3 铝合金试件的耐腐蚀性降低, 加速试件疲劳性能退化的速率。

关键词: 2024-T3 铝合金; 加速腐蚀试验; 腐蚀行为; 细节疲劳额定值

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.06.008

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2020)06-0044-07

Corrosion Behavior and DFR Degradation Law of 2024-T3 Aluminium Alloy in Different Surface State

CHEN Yue-liang, WU Xing-jun, ZHANG Yong, BIAN Gui-xue, ZHANG Zhu-zhu, ZHANG Yang-guang
(Qingdao Campus of Naval Aviation University, Qingdao 266041, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the corrosion behavior and fatigue deterioration law of aeronautical aluminium alloy specimens with damaged anodic oxide film under accelerated corrosion conditions in laboratory, and to compare with specimens with intact anodic oxide film. 2024-T3 aluminium alloy specimens with different surface states were studied, accelerated corrosion tests of different time lengths and DFR experiments after accelerated corrosion were carried out. Corrosion behavior was observed by observing corrosion morphology, measuring pit depth and pitting corrosion rate. Degradation law of DFR was studied by calculating the DFR after corrosion. Corrosion pits appeared in 2024-T3 aluminium alloy specimens with intact and damaged anodic oxide film after 180 h and 36 h of accelerated corrosion, respectively. The average corrosion pit depth and accelerated corrosion time coincided with power function relations. The degradation laws of DFR of the specimen with intact anodic oxide film and damaged anodic oxide film under accelerated corrosion in laboratory coincided with exponential function. Compared with the specimens with intact anodic oxide film, the damage of anodic oxide film would reduce the corrosion resistance of 2024-T3 aluminium alloy specimens and accelerate the degradation rate of fatigue property of specimens.

收稿日期: 2019-12-29; 修订日期: 2020-01-14

Received: 2019-12-29; Revised: 2020-01-14

基金项目: 山东省高等学校“青创科技计划”资助项目 (2020KJA014)

Fund: “Green Innovation Science and Technology Plan” of Colleges and Universities in Shandong Province

作者简介: 陈跃良 (1962—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为飞机结构强度、腐蚀与防护。

Biography: CHEN Yue-liang (1962—), Male, Doctor, Professor, Research focus: aircraft structural strength, corrosion and protection.

KEY WORDS: 2024-T3 aluminium alloy; accelerated corrosion test; corrosion behavior; detail fatigue rating (DFR)

铝合金因其比强度高、比刚度、塑性好、易于成型等诸多优点，在现代航空工业中作为飞机主要的结构材料而得到广泛的应用^[1]。铝合金材料常发生腐蚀损伤，如果不经过表面处理就应用于飞机结构上，则难以适应飞机结构复杂严酷的使用环境。阳极氧化工艺使铝合金表面形成一层致密的薄膜层，可以提高铝合金的耐蚀性，保持表面精度，而且该工艺对铝合金机体疲劳性能的损伤较小，是常用的表面改性技术^[2]。

于美等^[3]通过对铝合金进行疲劳试验，对比研究了硫酸阳极化、铬酸阳极化和添加己二酸的硫酸阳极化对铝合金疲劳性能的影响。陈跃良等^[4-5]对表面铬酸阳极氧化 2024-T3 铝合金进行实验室加速腐蚀后的 DFR 试验，研究了其 DFR 退化规律，并分析了疲劳断口形貌。周松等^[6]通过分析腐蚀形貌、腐蚀坑开口面积、腐蚀深度、点蚀坑数量等变化，研究了 2xxx 铝合金在不同腐蚀环境中的腐蚀行为。

众多学者对于航空铝合金在不同条件下的腐蚀行为及疲劳性能已有了深入的研究，但是其研究对象主要是含包铝层的铝合金，而在实际工况中，铝合金结构阳极氧化膜被打磨掉（比如机身蒙皮要经过铣、镜像铣及局部减薄等加工，机身上的承重结构及机框等都经过数控加工而成，因而飞机上存在去包铝层的铝合金^[7]）或破损的情况也确实存在。因此，对比研

究阳极氧化膜完好与破损两类不同表面状态的 2024-T3 铝合金的腐蚀行为、疲劳性能退化规律对于飞机材料的选取与防护、结构疲劳寿命评估具有实际意义。

文中制备含阳极氧化膜和去阳极氧化膜两种 2024-T3 铝合金试件，进行不同时间的实验室加速腐蚀试验和腐蚀后的细节疲劳额定值（Detail Fatigue Rating, DFR）实验。通过观察腐蚀形貌，测量点蚀坑深度和孔蚀率，对两种不同表面状态的 2024-T3 铝合金在实验室加速腐蚀条件下的腐蚀行为进行了对比研究。通过计算 DFR，对 DFR 的退化规律也进行了对比研究。

1 试验

1.1 材料

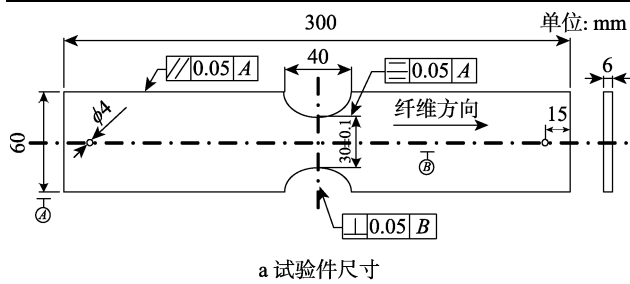
试验材料选取飞机上广泛用到的 2024-T3 铝合金，试件由轧制板材加工而成，其主要成分见表 1。

将 2024-T3 铝合金薄板（表面铬酸阳极氧化，平均膜厚为 8.4 μm）加工成尺寸如图 1 所示的试件。一部分试件保留表面阳极氧化膜，另一部分试件依次使用 240#、800#、1200# 砂纸打磨掉阳极氧化膜，以模拟实际服役过程中阳极氧化膜破损的情况。

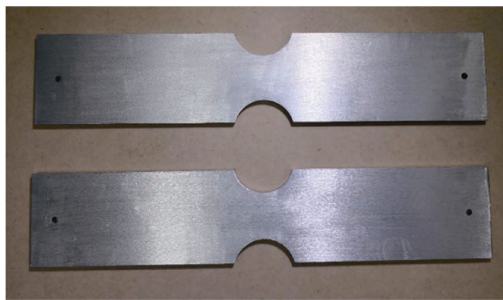
表 1 2024-T3 铝合金主要化学成分

Tab.1 Chemical composition of 2024-T3 aluminium alloy

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Other Impurities		Al
								Single	Total	
Content	0.35	0.45	3.8~3.9	0.5~0.8	1.5~1.7	0.10	0.20	0.05	0.15	Bal.



a 试验件尺寸



b 试验件照片

图 1 试验件

1.2 周期浸润加速腐蚀试验

干湿交替是导致电化学腐蚀发生的主要原因之一^[8]。大量试验研究表明，周期浸润腐蚀试验方法可以很好地再现外场服役条件下金属材料出现的腐蚀损伤。众多文献表明^[8-9]，如图 2 所示的预腐蚀试验

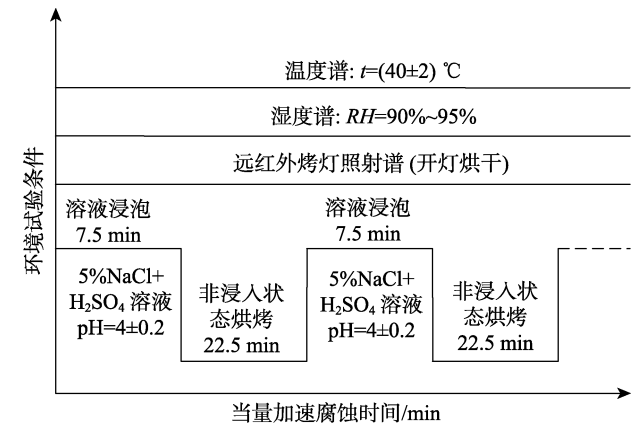


图 2 预腐蚀试验谱

Fig.1 Test pieces: a) test piece size; b) photos of test pieces

Fig.2 Pre-corrosion test spectrum

谱能很好地再现疲劳关键件在外场出现的腐蚀损伤。周期浸润腐蚀试验一个周期的构成如下所述。

1) 试件在腐蚀溶液中浸泡 7.5 min。腐蚀溶液是质量分数为 5% 的 NaCl 溶液，滴加稀 H₂SO₄ 调节溶液 pH 在 4~4.5 之间，溶液温度为 40 ℃。

2) 用远红外灯在温度为 40 ℃、相对湿度为 95% 的条件下烘烤试件 22.5 min，保证试件在临近浸入腐蚀溶液前可被烘干。

1.3 DFR 试验

预腐蚀试验完成后，将试件在 MTS810 电液伺服疲劳试验机上进行 DFR 试验。在实验室空气环境中，分别进行应力比 $R=0.06$ 、频率 $f=10$ Hz、加载波形为 Sine 波的等幅 DFR 试验，补偿方式为 PVC 补偿。

1) 每组试验先用 1 个试件进行静力标定和载荷调试，选择材料强度极限的 60%~70% 作为初始应力水平。

2) 在初始应力水平下进行 DFR 试验，如果断裂

时疲劳寿命小于 10^5 或大于 5×10^5 次循环，则后续试件适当降低或提高应力水平。

3) 重复该过程，直到所有试件试验结束。

1.4 腐蚀形貌表征

依据 GB/T 16545—2015 《去除腐蚀产物的化学和电解清洗方法》去除试样表面腐蚀产物后，使用 KH-7700 三维体式显微镜观察试件表面腐蚀形貌，并使用三维功能测量试件的点蚀坑深度。

2 腐蚀行为对比研究

2.1 腐蚀形貌

经过不同腐蚀时长的两类不同表面状态的 2024-T3 铝合金试件的腐蚀形貌如图 3 所示。可以看出，阳极氧化膜完好试件经过 72 h 的预腐蚀后，试件表面阳极氧化膜开始失色，Al 基体的银灰色开始显现出来。直到预腐蚀 180 h 后，试件表面才发生

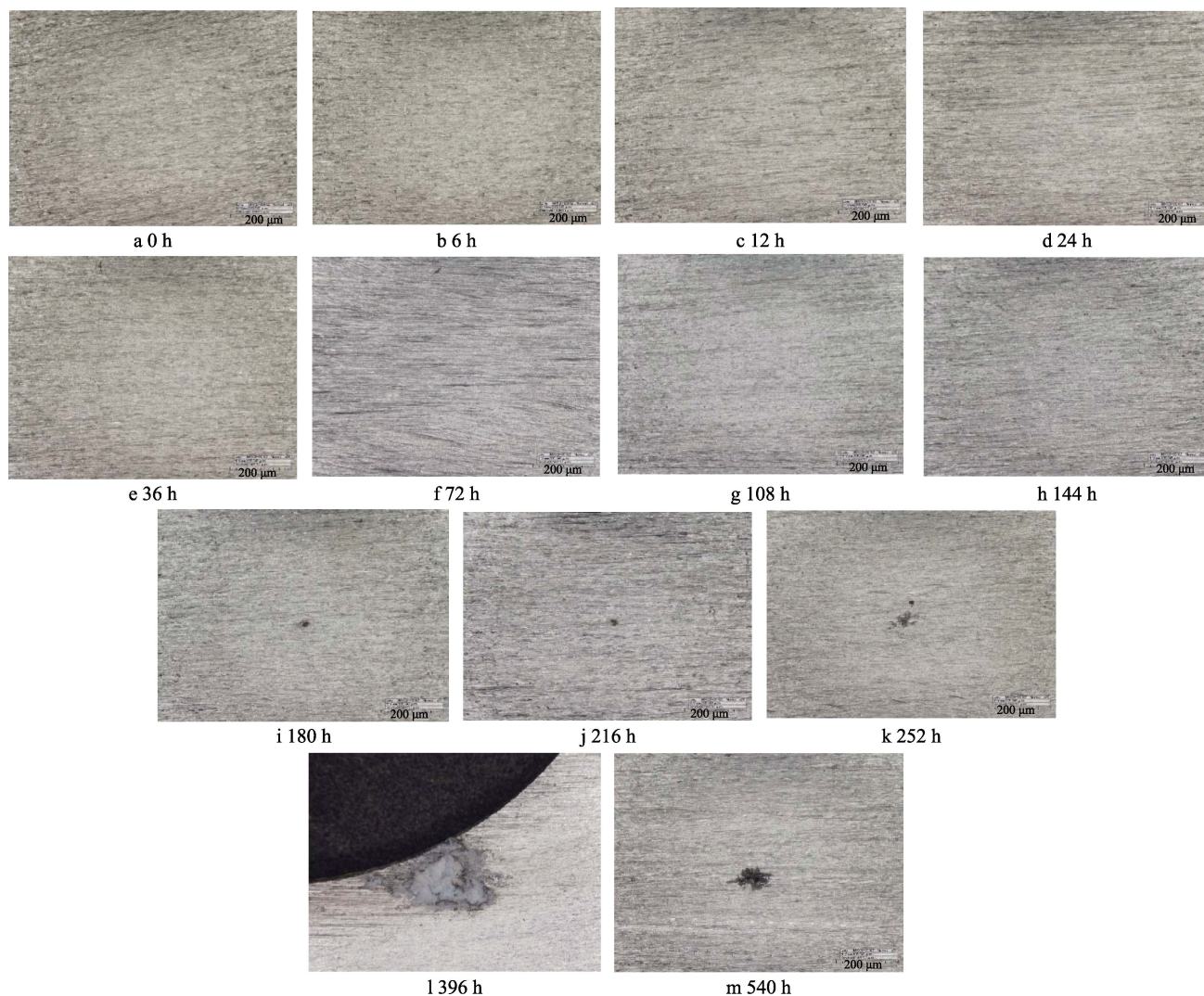


图 3 不同腐蚀时长下阳极氧化膜完好试件的腐蚀形貌

Fig.3 Corrosion morphology of anodic oxide film intact specimen under different corrosion time

局部腐蚀，出现一两个点蚀坑。随着腐蚀时间的增长，点蚀坑变宽、变深，但是数量增加缓慢。预腐蚀 396 h 试件在边缘处出现鼓泡现象，鼓泡内部呈灰色。

阳极氧化膜破损试件在不同腐蚀时长下的腐蚀

形貌如图 4 所示。阳极氧化膜破损试件在预腐蚀 36 h 后即开始局部腐蚀，随着腐蚀时间的增加，点蚀坑变宽变深变多。预腐蚀 108 h 后，试件表面发生轻微剥蚀。和阳极氧化膜完好试件相比，阳极氧化膜破损试件的腐蚀损伤出现早，扩展快。

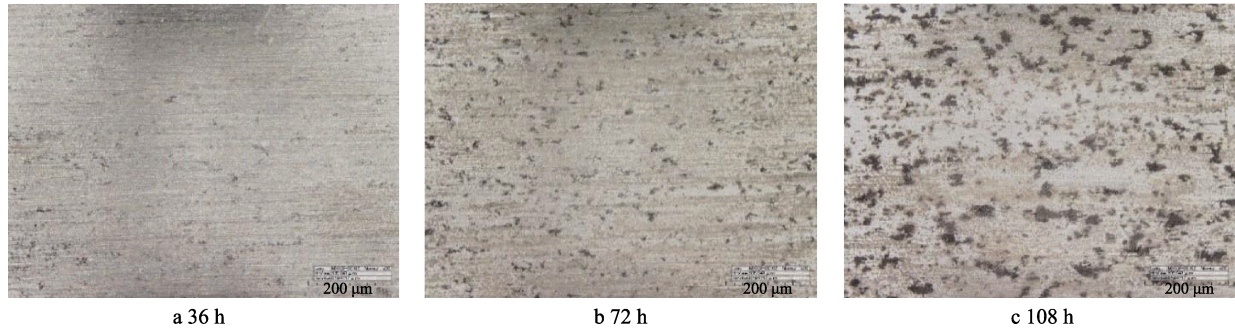


图 4 不同腐蚀时长下阳极氧化膜破损试件的腐蚀形貌

Fig.4 Corrosion morphology of anodic oxide film damaged specimen under different corrosion time

2.2 平均点蚀坑深度

点蚀坑深度是表征试件在一定时间内腐蚀损伤度的重要参量之一，通过点蚀坑的深度、面积等信息可判断腐蚀损伤度的大小和腐蚀速率的快慢。借助 KH-7700 三维显微镜对清洗后的两类试件进行拍照，利用三维功能测量每个点蚀坑深度，以求客观系统地表现腐蚀深度的变化规律。由于阳极氧化膜破损试件点蚀坑太多，为方便起见，随机选取 5 个区域测量点蚀坑深度。将记录结果分别列于表 2、表 3。

表 2 不同腐蚀时长下阳极氧化膜完好试件的点蚀坑深度
Tab.2 Depth of corrosion pits of anodic oxide film intact specimen under different corrosion time

Pre-corrosion time/h	Depth of corrosion pit/ μm				Average depth of corrosion pit/ μm
144	0				0
180	6.621				6.621
216	10.154				10.154
252	23.69	12.533			18.111
396	60.002	40.576	38.588	5.968	36.283
540	166.448	208.68	41.562	111.943	90.366
	35.673	48.249	54.893	64.563	81.285

表 3 不同腐蚀时长下阳极氧化膜破损试件的点蚀坑深度
Tab.3 Depth of corrosion pits of anodic oxide film damaged specimen under different corrosion time

Pre-corrosion time/h	Depth of corrosion pit/ μm					Average depth of corrosion pit/ μm
0	0					0
36	15.342	10.752	12.433	11.175		12.426
72	27.869	18.241	19.547	23.224	25.901	22.970
		28.006	19.753	24.450	19.742	
	58.205	33.753	42.224	30.744	37.649	
108	33.925	50.319	39.963	36.558	36.608	39.127
	41.137	42.404	36.918	36.526	29.973	

文献[10]指出点蚀坑深度 D 与腐蚀时间 t 符合幂函数关系：

$$D=At^b \tag{1}$$

式中： A 、 b 为拟合常数。

利用幂函数模型分别对两类试件的平均点蚀坑深度进行拟合（阳极氧化膜完好试件出现点蚀坑之前的腐蚀时间不计），阳极氧化膜完好试件 $D_{\text{intact}}=0.010 t^{1.5164}$ ，拟合精度 R^2 为 0.9698；阳极氧化膜破损试件 $D_{\text{damage}}=0.2016 t^{1.1219}$ ，拟合精度 R^2 为 0.9928，拟合曲线如图 5 所示。可见，阳极氧化膜可以推迟局部腐蚀发生的时间，减缓点蚀坑数量的增加和面积的扩展速率，但是一旦出现点蚀坑，无法控制点蚀坑向基体内部的发展。

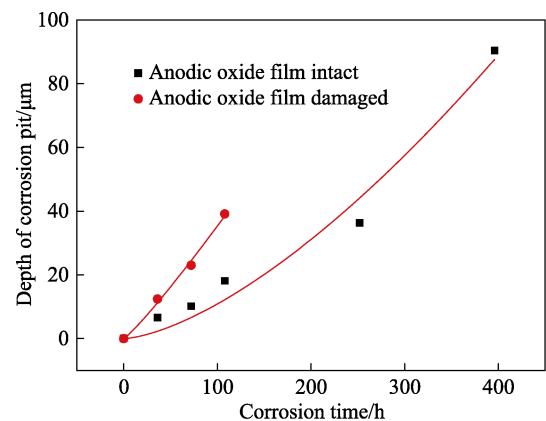


图 5 平均点蚀坑深度变化曲线

Fig.5 Changing curve of average corrosion pitting depth

2.3 孔蚀率

孔蚀率是指腐蚀区域内所有腐蚀坑表面积之和与腐蚀区域总面积的比值，是一种对腐蚀程度进行量化更为精确的研究手段^[11]。孔蚀率的定义为：

$$\alpha = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n A_{pi} \times 100\% \quad (2)$$

式中： A 为总的测试面积； n 为腐蚀坑数量； A_{pi} 为第*i*个腐蚀坑的平面投影面积。

由于腐蚀坑形状的不规则性，传统计量方法的计算结果难以满足精确计算的需要。因此，为了满足精度要求，通常采用 Matlab 软件对腐蚀形貌图进行二值化处理的方法，对不同灰度点数进行统计得到孔蚀率^[12]。

由于阳极氧化膜完好试件表面点蚀坑数量太少，无法计算孔蚀率，故此处只计算阳极氧化膜破损试件的孔蚀率，计算结果见表4。目前国内外对铝合金孔蚀率与腐蚀时间的关系尚未有公认的经验公式，但是文献[10]表明，通常孔蚀率 α 与腐蚀时间*t*符合指数函数关系：

$$\alpha = Ae^{bt} \quad (3)$$

表4 不同腐蚀时间下阳极氧化膜破损试件的孔蚀率
Tab.4 Pitting corrosion rate of anodic oxide film damaged specimen under different corrosion time

Pre-corrosion time/h	Pitting rate/%
0	0
36	6.84
72	11.12
108	22.13

表5 不同预腐蚀时长下阳极氧化膜完好试件的疲劳实验结果

Tab.5 Results of fatigue test of anodic oxide film intact specimen under different pre-corrosion time

Pre-corrosion time/h	σ_{max}/MPa	Fatigue life/cycle									
0	79.167	—	180 234	256 215	338 403	226 975	283 179	320 868	345 753	—	—
6	83.333	271 578	242 203	224 739	210 985	232 365	307 302	251 470	213 698	—	—
12	83.333	226 352	195 730	179 856	163 617	180 966	252 703	200 471	168 369	—	—
24	83.333	177 247	206 357	200 769	213 705	205 506	202 346	139 726	200 871	276 336	—
36	83.333	185 654	145 790	185 220	191 913	193 395	152 228	166 336	211 232	144 314	—
72	83.333	—	162 013	159 312	143 303	158 114	166 835	181 593	175 558	—	—
108	79.167	—	249 853	201 717	141 005	195 836	223 363	175 093	—	—	—
144	79.167	—	226 215	148 403	265 113	206 975	183 179	179 093	—	—	—
180	75.000	—	270 234	246 215	188 403	226 975	193 179	140 868	—	—	—

表6 不同预腐蚀时长下阳极氧化膜破损试件的疲劳实验结果

Tab.6 Results of fatigue test of anodic oxide film damaged specimen under different pre-corrosion time

Pre-corrosion time/h	σ_{max}/MPa	Fatigue life/cycle				
0	75	256 945	214 453	195 369	306 975	223 179
6	75	156 849	264 540	179 977	220 996	191 796
12	70.983	210 242	272 081	184 040	159 930	237 898

3.2 DFR 退化规律

根据 HB 7710-94 《金属材料细节疲劳额定强度

式中： A 、 b 为拟合常数。

利用指数函数模型对数据进行拟合，拟合结果为 $\alpha=2.555e^{0.02t}$ ，拟合精度 R^2 为0.9470，拟合曲线如图6所示。

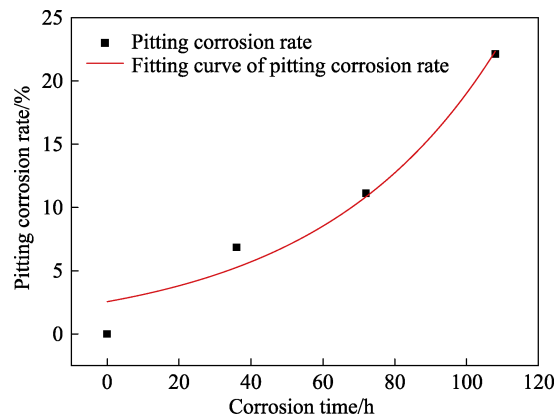


图6 孔蚀率变化曲线

Fig.6 Changing curve of pitting corrosion rate

3 DFR 退化规律对比研究

3.1 DFR 试验结果

根据文献[13]给出的方法去除粗大误差后，两类试件的 DFR 试验结果见表5、表6。

截止值(DFR_{cutoff})试验方法》给出的步骤处理试验数据，计算结果见表8、表9。

1) 按双参数 Weibull 分布求出各组试验数据的

特征寿命 β :

$$\beta = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i^\alpha \right]^{-\frac{1}{\alpha}} \quad (4)$$

式中：铝合金 $\alpha=4$

2) 求可靠度 $R=95\%$ ，置信度 $C=95\%$ 的寿命：

$$N_{95/95} = \frac{\beta}{S_T \cdot S_R \cdot S_C} \quad (5)$$

式中：标准试样 $S_T=1$ ；铝合金可靠度系数 $S_R=2.1$ ；铝合金置信度 $C=95\%$ 的置信度系数 S_C 见表 7。

表 7 置信度系数
Tab.7 Confidence interval

n	2	3	4	5	6	7	8	9
S_C	1.24	1.195	1.175	1.16	1.15	1.13	1.125	1.12

3) 将一组 $N_{95/95}$ 的数据代入式 (6) 中的计算 DFR:

$$DFR = \frac{0.94\sigma_{m_0}}{\sigma_{max} \left[0.94\sigma_{m_0} S^{(5-\lg N)} - (0.47S^{(5-\lg N)} - 0.53) - (0.0282S^{(5-\lg N)} + 0.0318) \right]} \quad (6)$$

式中：对于铝合金， $S=2$ ， $\sigma_{m_0}=310$ MPa。

表 8 不同腐蚀时长下阳极氧化膜完好试件的 DFR 值

Tab.8 DFR of anodic oxide film intact specimen under different corrosion time

Pre-corrosion time/h	$\sigma_{max}/$ MPa	Characteristic life/cycle	$N_{95/95}/$ cycle	DFR/MPa
0	79.167	294 219	123 986	83.703
6	83.333	250 162	105 888	84.571
12	83.333	202 397	85671	80.061
24	83.333	210 917	89675	81.016
36	83.333	179 287	76227	77.663
72	83.333	165 027	69543	75.821
108	79.167	206 204	85384	75.967
144	79.167	211 621	87628	76.485
180	75.0	222 511	94605	73.915
216	75.0	249 961	106 276	76.206

表 9 不同腐蚀时间下阳极氧化膜破损试件的 DFR 值

Tab.9 DFR of anodic oxide film damaged specimen under different corrosion time

Pre-corrosion time/h	$\sigma_{max}/$ MPa	Characteristic life/cycle	$N_{95/95}/$ cycle	DFR/MPa
36	75.0	249 229	102 310	75.451
72	75.0	212 992	87435	72.397
108	70.983	223 330	91679	69.368

从表 8 和表 9 中可以看出，随着腐蚀时间的增长，两类试件的 DFR 整体都呈下降趋势。文献[14]给出了

DFR 的退化规律模型：

$$DFR = DFR_0 [\lg(t+10)]^n \quad (7)$$

式中： DFR_0 为未腐蚀试件的 DFR 值； n 为拟合常数； t 为腐蚀时间。

拟合得到阳极氧化膜完好与破损两类试件的 DFR 随腐蚀时间的变化曲线分别为：

$$DFR_{intact} = 83.703 [\lg(\tau+10)]^{-0.1271} \quad (8)$$

$$DFR_{damage} = 83.703 [\lg(\tau+10)]^{-0.2334} \quad (9)$$

拟合精度 R^2 分别为 0.8506、0.9736，拟合曲线如图 7 所示。

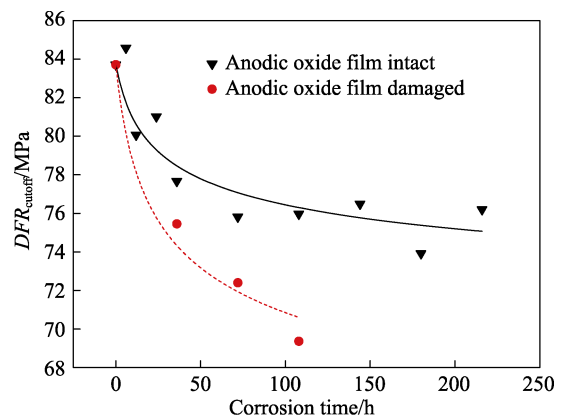


图 7 2024-T3 铝合金 DFR 变化曲线

Tab.7 Changing curve of DFR of AA2024-T3

4 结论

1) 阳极氧化膜破损试件预腐蚀 36 h 即发生局部腐蚀，预腐蚀 108 h 后出现轻微剥蚀，最大点蚀坑深度为 58.205 μm ，最大点蚀坑深度 D 和孔蚀率 α 与腐蚀时间 t 的关系曲线为 $D_{damage} = 0.2016 t^{1.1219}$ 、 $\alpha = 2.555 e^{0.02t}$ ；而阳极氧化膜完好试件经过 180 h 的预腐蚀才出现一个点蚀坑，预腐蚀 540 h 后试件表面出现 9 个点蚀坑，最大点蚀坑深度为 208.68 μm ，最大点蚀坑深度 D 与腐蚀时间的关系曲线为 $D_{intact} = 0.0101 t^{1.5164}$ 。阳极氧化膜可以推迟局部腐蚀的形成时间，减缓腐蚀损伤的扩展速率，但是一旦出现点蚀坑，无法控制点蚀坑向基体内部的发展。

2) 通过多组不同时长的周期浸润加速腐蚀试验及腐蚀后的 DFR 试验，得到了阳极氧化膜完好和破损两类不同表面状态 2024-T3 铝合金试件在不同腐蚀时长下的 DFR。拟合得到两类试件的 DFR 退化规律分别为 $DFR_{intact} = 83.703 [\lg(\tau+10)]^{-0.1271}$ 、 $DFR_{damage} = 83.703 [\lg(\tau+10)]^{-0.2334}$ 。

参考文献：

[1] 陈跃良. 海军飞机结构腐蚀控制及强度评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 150-151.

- CHEN Yue-liang. Corrosion Control and Strength Evaluation of Naval Aircraft Structure[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 150-151.
- [2] 刘建华, 刘洲, 于美, 等. 3种溶液体系下铝合金阳极氧化膜的性能[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(7): 2031-2039.
- LIU Jian-hua, LIU Zhou, YU Mei, et al. Properties of Aluminum Alloy Anodic Films Formed in Three Kinds of Solutions[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(7): 2031-2039.
- [3] 于美, 陈高红, 刘建华, 等. LY12CZ铝合金的己二酸硫酸阳极氧化[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(3): 363-367.
- YU Mei, CHEN Gao-hong, LIU Jian-hua, et al. Adipic-sulfuric Acid Anodizing for LY12CZ Aluminum Alloy[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(3): 363-367.
- [4] 陈跃良, 吴省均, 刘旭, 等. 腐蚀条件下基于 Gerber 模型的 DFR 推导及实测[J]. 航空材料学报, 2019, 39(2): 61-67.
- CHEN Yue-liang, WU Xing-jun, LIU Xu, et al. DFR Method Based on Gerber Model under Corrosion Conditions[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2019, 39(2): 61-67.
- [5] 陈跃良, 吴省均, 张勇, 等. 2024-T3 铝合金 DFR 退化规律及疲劳断口分析[J]. 海军航空工程学院学报, 2018, 33(4): 41-47.
- CHEN Yue-liang, WU Xing-jun, ZHANG Yong, et al. Degradation Law of DFR and Fatigue Fracture Analysis of AA2024-T3[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2018, 33(4): 41-47.
- [6] 周松, 许良, 回丽, 等. 不同腐蚀环境下高强铝合金腐蚀行为[J]. 中国机械工程, 2017, 28(16): 2000-2007.
- ZHOU Song, XU Liang, HUI Li, et al. Corrosion Behavior of High Strength Aluminum Alloy under Different Corrosion Environments[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(16): 2000-2007.
- [7] 周松, 谢里阳, 回丽, 等. 航空铝合金预腐蚀疲劳寿命退化规律[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(7): 969-973.
- ZHOU Song, XIE Li-yang, HUI Li, et al. Fatigue Life Degenerating Rule of Pre-corroded Aviation Aluminum Alloy[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2016, 37(7): 969-973.
- [8] 贺小帆, 刘文珽, 王忠波, 等. 预腐蚀对 30CrMnSiNi2A 连接件疲劳寿命影响的实验研究[J]. 机械强度, 2009, 31(4): 664-669.
- HE Xiao-fan, LIU Wen-ting, WANG Zhong-bo, et al. Pre-corrosion Degradation Influence on the Fatigue Life for 30CrMnSiNi2A Specimen[J]. Journal of Mechanical Strength, 2009, 31(4): 664-669.
- [9] 卞贵学, 陈跃良, 张丹峰, 等. 基于 IDS 的铝合金预腐蚀疲劳寿命研究[J]. 航空学报, 2008, 29(6): 1526-1530.
- BIAN Gui-xue, CHEN Yue-liang, ZHANG Dan-feng, et al. Study on Fatigue Life of Pre-corroded Aluminium Alloy Based Oil IDS[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2008, 29(6): 1526-1530.
- [10] 王辉, 万钺. 2B06 铝合金腐蚀动力学规律试验研究[J]. 科技信息, 2014(5): 65-67.
- WANG Hui, WAN Cheng. Research on Corrosion Damage Evolvement Rule of 2B06 Aluminum Alloy under Ocean Environment[J]. Science & Technology Information, 2014(5): 65-67.
- [11] 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.
- ZHANG You-hong, LYU Guo-zhi, REN Ke-liang, et al. The Evolution Rhythm of Surface Corrosion Damage of LY12-CZ Aluminum in Varied Environments[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2007, 28(1): 142-145.
- [12] 李晨钰, 朱立群, 刘慧丛, 等. 温度对 2A12 铝合金在模拟油箱积水环境中初期腐蚀行为的影响[J]. 航空学报, 2013, 34(6): 1493-1500.
- LI Chen-yu, ZHU Li-qun, LIU Hui-cong, et al. Influence of Temperature on Initial Corrosion Behavior of Aluminum Alloy 2A12 in Simulated Tank Water Environment[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2013, 34(6): 1493-1500.
- [13] 李宴宾, 陈莉, 董登科, 等. 结构细节疲劳额定值与结构细节数之间的关系研究[J]. 机械强度, 2012, 34(6): 934-938.
- LI Yan-bin, CHEN Li, DONG Deng-ke, et al. Research on the Relation between DFR and Structural Detail Numbers[J]. Journal of Mechanical Strength, 2012, 34(6): 934-938.
- [14] 薛景川, 郭定文, 邵闯. DFR、DCR 和 DSR 疲劳损伤分析体系综论[J]. 结构强度研究, 2006(1): 1-7.
- XUE Jing-chuan, GUO Ding-wen, SHAO Chuang. A Review of Fatigue Damage Analysis System of DFR, DCR and DSR[J]. Structural Strength, 2006(1): 1-7.