环境试验与评价

基于对数正态分布的腐蚀损伤预测方法

王强¹,钟勇²,吴帅²,苏艳²

(1. 成都飞机设计研究所,成都 610091; 2. 西南技术工程研究所,重庆 400039)

摘要:目的 针对铝合金结构展开腐蚀预测方法研究,为飞机铝合金结构腐蚀损伤经济修理提供支撑。方法 采用基于对数正态分布的统计学方法,开展飞机铝合金结构服役环境下的腐蚀损伤分布规律研究,并在此 基础上进一步开展基于概率的腐蚀损伤预测方法。结果 使用对数正态分布对腐蚀损伤分布进行描述是可行 的,基于对数正态分布的概率腐蚀损伤预测方法在不同可靠度下精度有所差异。结论 基于对数正态分布所 建的腐蚀损伤预测模型可以实现对腐蚀损伤的预测。服役环境下,飞机铝合金结构腐蚀深度、体积及面积 的扩展速率随时间的增长逐渐减缓。

关键词:对数正态分布;飞机铝合金结构;腐蚀损伤

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.11.005

中图分类号: V252.2 文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)11-0025-05

Method for Prediction of Corrosion Damage Based on Log-normal Distribution

WANG Qiang¹, ZHONG Yong², WU Shuai², SU Yan²
(1. Chengdu Aircraft Design & Research Institute, Chengdu 610091, China;
2. Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: Objective To study a method for prediction of corrosion damage in aircraft aluminum alloy structure and provide support for the economic repair of the aircraft structure. Methods The statistical method based on log-normal distribution was applied to study the distribution rule of corrosion damage of aircraft aluminum alloy structure in service and build a probability-based prediction method for corrosion damage on this basis. Results The corrosion damage distribution can be described through log-normal distribution, and the probability prediction method based on log-normal distribution had different accuracy under different reliability. Conclusion The corrosion damage prediction method, which is based on log-normal distribution, could predict the corrosion damage. As time goes by, the propagation rates of corrosion depth, area and volume of aircraft aluminum alloy structure in service slow down.

KEY WORDS: log-normal distribution; aircraft aluminum alloy structure; corrosion damage

铝合金由于比强度、比刚度高和在常规环境下具有良好的稳定性,在现役飞机结构中获得了广泛的应用,特别是在一些关键承力结构中大量使用。铝合金在环境的腐蚀介质的作用下易发生腐蚀,从而影响飞行安全。迄今为止,我国军机的重大腐蚀故障主要发

生在铝合金结构中^[1]。孔蚀发生在腐蚀初始阶段,针对铝合金孔蚀发展情况进行研究,可为腐蚀早期防护与控制,以及外场飞机经济修理提供支撑。已有文献^[2-4]针对飞机蚀坑深度和蚀坑面积数据,分别采用威布尔分布、对数正态分布、Gumbell 第一极值分布、

收稿日期: 2019-08-16; 修订日期: 2019-09-21

基金项目: 技术基础科研项目(JSHS2015209C002)

作者简介:王强(1987-),男,硕士,工程师,主要研究方向为飞机疲劳强度设计。

通讯作者:苏艳(1972-),女,硕士,研究员级高级工程师,主要研究方向为装备环境试验与环境适应性评价。

Logistic 模型和 Weibull 分布进行对比研究,验证了 蚀坑深度和面积随时间呈指数关系,而在蚀坑发展模 型研究方面的报道还相对较少。文中通过分析飞机蚀 坑深度、体积和面积发展规律,建立了基于对数正态 分布的腐蚀损伤预测模型。

1 分布特征统计

1.1 数据整理

文献[2,5]给出了5个不同日历年限的某飞机铝合金翼梁缘条腐蚀数据,见表1。文中基于此数据开展腐蚀损伤规律研究。

1.2 腐蚀损伤

假设蚀坑开口面积形状为椭圆形,体积为半椭球形,则体积计算公式为:

$$V = \left(\frac{4}{3}\pi \frac{a}{2} \frac{b}{2} d\right) \times \frac{1}{2} \tag{1}$$

开口面积计算公式为:

$$S = \pi \times \frac{a}{2} \times \frac{b}{2} \tag{2}$$

式中: a 代表长度; b 代表宽度; d 代表深度; V 代表体积; S 代表面积。据此可计算出每个日历年所统计的 17 个蚀坑的体积和面积。

表 1 不同日历年限的蚀坑尺寸值

mm

	6 a			7 a			8.5 a			10 a			12.5 a	
长	宽	深	长	宽	深	长	宽	深	长	宽	深	长	宽	深
90	26	1.7	55	20	0.8	66	21	0.9	150	20	1.8	106	21	1.1
41	21	0.6	95	25	1.2	96	33	1.9	120	20	1.7	56	28	0.8
30	10	0.3	55	16	0.7	110	34	2.1	120	20	1.5	134	26	2.0
40	18	0.6	86	22	1.1	135	25	2.2	100	20	1.8	170	22	1.9
79	21	1.3	113	21	1.7	77	26	1.4	60	28	1.0	122	23	1.7
36	12	0.4	125	25	1.9	120	22	1.6	100	25	1.6	168	32	3.0
85	24	1.5	95	23	1.3	126	28	2.0	200	15	1.4	98	34	1.8
47	27	0.9	180	21	2.4	143	25	2.4	200	20	1.3	96	31	1.6
14	23	0.3	90	30	1.6	66	24	1.2	50	10	0.6	56	30	1.8
40	12	0.2	90	24	1.4	115	35	2.9	200	20	2.6	150	34	2.9
18	20	0.4	65	18	0.9	120	25	2.0	170	20	2.4	200	25	3.0
80	10	0.6	70	17	0.8	33	14	0.6	160	15	1.2	58	32	0.9
71	30	1.2	150	12	1.0	88	21	1.0	60	20	0.8	90	29	1.2
33	12	0.4	95	26	1.6	54	24	0.9	105	30	1.8	155	30	2.8
60	16	0.7	90	24	1.6	59	18	0.8	155	25	2.4	140	29	2.3
90	12	0.8	75	18	0.9	83	33	1.8	140	40	3.0	188	32	3.1
41	21	0.7	60	28	1.0	89	30	1.9	200	30	3.0	117	37	2.7

1.3 腐蚀损伤分布特性

将蚀坑深度 $d_i(i=1,\dots,17)$ 、蚀坑体积 $V_i(i=1,\dots,17)$ 及蚀坑面积 $S_i(i=1,\dots,17)$ 变量从小到大排序,则其对应的概率均为 $P_i=i/18^{[6]}$ 。

假设蚀坑深度、蚀坑体积、蚀坑面积服从对数正态分布,对数正态自变量 x 与标准正态分布分位点 u_{ni} 有如下关系:

$$\lg x_i = \mu + u_{pi}\sigma \tag{3}$$

以第6年腐蚀数据为例,统计结果见表2。

1.4 分布参数估计

将历年的腐蚀数据(u_{pi} , $\lg x_i$)(i=1,…,17)绘于图 1, 并采用概率坐标回归方法^[7]估计得到各日历年腐蚀损伤特征量的对数正态分布参数,见表 3。根据参数估计的结果,第 6 年的腐蚀深度、体积和面积的分布如图 2 所示。

表 2 第 6 年的腐蚀数据整理

u_{pi}	$\lg d_i$	$\lg V_i$	$lg S_i$
-1.5932	-0.6990	1.9743	2.3722
-1.2206	-0.5229	2.0023	2.5763
-0.9674	-0.5229	2.0050	2.4029
-0.7647	-0.3979	2.1784	2.4514
-0.5895	-0.3979	2.2198	2.4928
-0.4307	-0.3979	2.2576	2.5306
-0.2822	-0.2218	2.6555	2.7524
-0.1397	-0.2218	2.7013	2.7982
0.0000	-0.2218	2.7332	2.8301
0.1397	-0.1549	2.8001	2.8301
0.2822	-0.1549	2.8474	2.8774
0.4307	-0.0969	2.9565	2.9285
0.5895	-0.0458	3.0777	2.9986
0.7647	0.0792	3.3538	3.1149
0.9674	0.1139	3.4276	3.2235
1.2206	0.1761	3.5058	3.2047
1.5932	0.2304	3.6197	3.2643

表 3	分布参数估计
₹ .≾	分析容别占订

	7C O	77 11 2 X IA VI	
时间/a	参数	对数平均值 μ	标准差 σ
	深度 d	-0.2034	0.2977
6	体积 V	2.7245	0.6153
	面积 S	2.8029	0.3235
	深度 d	0.0848	0.1703
7	体积 V	3.3798	0.3619
	面积 S	3.1700	0.1939
	深度 d	0.1730	0.2144
8.5	体积 V	3.5332	0.4749
	面积 S	3.2353	0.2627
	深度 d	0.2074	0.2167
10	体积 V	3.6478	0.4733
	面积 S	3.3154	0.2720
	深度 d	0.2736	0.2068
12.5	体积 V	3.8137	0.4031
	面积 S	3.4152	0.2034

1.5 假设检验

采用相关系数检验法对该分布进行检验[8],记 $(u_{pi}, \lg x_i)(i=1,\cdots,17)$ 为 (x_i,y_i) 。根据样本观测数据 $(x_i,y_i)(i=1,2,\dots,17)$, 针对一元线性回归直线方程为:

$$\hat{y} = \hat{a} + \hat{b}x \tag{4}$$

令:

$$r = \frac{L_{xy}}{\sqrt{L_{xx}L_{yy}}}\tag{5}$$

此统计量称为相关系数。其中:

$$L_{xx} = \sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2 = \sum_{i=1}^{n} x_i^2 - n\overline{x}^2$$
 (6)

$$L_{xy} = \sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})(y_i - \overline{y}) = \sum_{i=1}^{n} x_i y_i - n\overline{x} \cdot \overline{y}$$
 (7)

$$L_{yy} = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \overline{y})^2 = \sum_{i=1}^{n} y_i^2 - n\overline{y}^2$$
 (8)

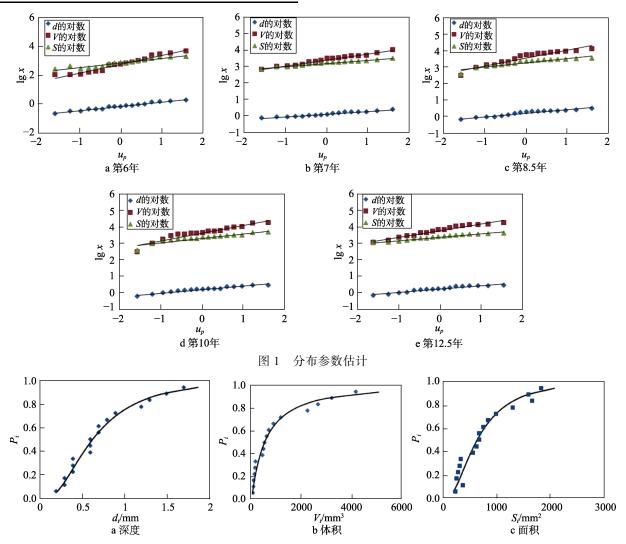


图 2 第6年腐蚀损伤特征量分布

对于给定的显著性水平 α, 查相关系数临界值 表,可得临界值 $r_a(n-2)$ 。当计算出各分布的 r 大于 $r_a(n-2)$ 时,表明在显著性水平 α 下, x 与 y 服从线 性关系。

取显著水平 α =0.05, 查相关系数检验表, $r_{0.05}(15)$ =0.482, 通过式(4)计算得各 r 见表 4。显然深度 d、体积 V 及体积 S 与 u_{pi} 在显著水平 α =0.05 下满足式(3)的线性关系,则可接受深度 d、体积 V 及体积 S 服从对数正态分布的假设。

表 4 各日历年腐蚀损伤特征量与 山州相关系数

时间/a		相关系数 r	
րդ լոյ/ գ	d	V	S
6	0.9900	0.9793	0.9602
7	0.9881	0.9910	0.9843
8.5	0.9695	0.9525	0.9290
10	0.9793	0.9489	0.9338
12.5	0.9649	0.9808	0.9838

2 腐蚀损伤扩展预测模型

通过 $6\sim10$ 年的各参数分布,计算得到 50%、90% 和 95%三种可靠度下的深度、体积、面积取值,见表 5。

表 5 三种可靠度下的参数值

参数	可靠度/%	6 a	7 a	8.5 a	10 a
	50	0.6	1.2	1.5	1.6
d/mm	90	1.5	2.0	2.8	3.1
	95	1.9	2.3	3.4	3.7
	50	530.3	2 397.7	3 413.5	4 444.3
V/mm^3	90	3 258.7	6 975.8	13 862.4	17 965.7
	95	5 452.6	9 442.6	20 623.5	26 688.9
	50	635.2	1 479.1	1 719.1	2 067.3
S/mm^2	90	1 650.1	2 621.2	3 732.3	4 613.1
	95	2 162.8	3 082.8	4 649.6	5 791.8

以 6~10 年的腐蚀数据为基础,建立腐蚀损伤预测模型。

蚀坑深度预测模型:

$$\begin{cases} t = 4.2717 \times \exp(0.4799 \times d_{P=50\%}) \\ t = 3.7508 \times \exp(0.3085 \times d_{P=90\%}) \\ t = 3.6497 \times \exp(0.2664 \times d_{P=95\%}) \end{cases}$$
(9)

蚀坑体积预测模型:

$$\begin{cases} t = 5.4249 \times \exp(0.000131 \times V_{P=50\%}) \\ t = 5.4316 \times \exp(0.000034 \times V_{P=90\%}) \\ t = 5.4447 \times \exp(0.000023 \times V_{P=95\%}) \end{cases}$$
 (10)

蚀坑面积预测模型:

$$\begin{cases} t = 4.6275 \times \exp(0.00035 \times S_{P=50\%}) \\ t = 4.4850 \times \exp(0.00017 \times S_{P=90\%}) \\ t = 4.4998 \times \exp(0.00014 \times S_{P=95\%}) \end{cases}$$
 (11)

使用 12.5 年的数据对所建模型精度进行验证,

结果见表 6。

表 6 模型预测精度验证

特征量	可靠度 /%	准确值	预测值	误差/%
	50	1.9	2.2	15.79
d/mm	90	3.5	3.9	11.43
	95	4.1	4.6	12.20
	50	6 511.8	6 372.0	- 2.15
V/mm^3	90	21 397.7	24 514.6	14.57
	95	29 975.0	36 134.2	20.55
	50	2 601.4	2 839.2	9.14
S/mm^2	90	4 741.1	6 029.4	27.17
	95	5 620.5	7 297.83	29.84

结构基材的腐蚀发生在涂层失效之后^[9],根据式(9)—(11)可知:在可靠度为50%时,根据深度模型计算出的涂层失效时间为4.3年,根据腐蚀体积反推的涂层失效时间为5.4年,根据面积失效反推得到的涂层失效时间为4.6年。涂层体系和服役环境的差异,会导致涂层的失效时间存在差异,文中方法反推出的涂层失效时间,介于文献[4]的2.5年和文献[10]的12年之间。

3 结论

通过对服役飞机不同日历年限的腐蚀数据进行 统计学分析,结合腐蚀损伤扩展规律分析,可得到以 下结论。

- 1) 文中的腐蚀损伤数据,使用对数正态分布对 蚀坑深度、体积及面积进行描述是合理可行的。
- 2)通过预测模型的曲线可以看出,斜率随着时间逐渐降低,表明蚀坑深度、体积及面积的扩展速度随时间的增长逐渐减缓。
- 3)通过模型反推涂层失效时间也验证了模型的 合理性。

参考文献:

- [1] 刘文珽, 李玉海. 飞机结构日历寿命体系评定技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2004.
- [2] 穆志韬, 李荻. LY12CZ 铝合金型材构件腐蚀失效 动力学规律研究[J] 机械工程材料, 2003, 27(8): 18-20.
- [3] 李玉海,贺小帆,陈群志,等. 铝合金试件蚀坑深度分布特性及变化规律研究[J]. 北京: 北京航空航天大学学报,2002,28(1):98-101.
- [4] 陈跃良, 吕志国, 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.

- [5] MACDONALD D D, URQUIDI-MACDONALD M. Corrosion Damage Function-interface between Corrosion Science and Engineering [J]. Corrosion, 1992, 45(5): 354-367.
- [6] 周国强, 王雪青, 刘锐. 基于改进广义极值分布的核管 道最大腐蚀深度预测[J]. 中南大学学报, 2013, 44(5): 1926-1931.
- [7] 刘文珽. 结构耐久性与概率断裂力学/损伤容限[M]. 北

- 京: 北京航空航天大学出版社, 1998.
- [8] 贺小帆, 王强, 刘文珽. 基于 Fokker 27 飞机过载超越数曲线族的严重谱超越数包线选取[J]. 航空学报, 2013, 34(4): 840-845.
- [9] 张福泽. 飞机日历首翻期与总日历寿命确定方法和计算公式[J]. 航空学报, 2005, 26(4): 458-460.
- [10] 张福泽. 金属涂层的日历寿命计算公式和试验方法[J]. 航空学报, 2016, 37(2): 390-396.