

文章编号: 1000-6893(2002)03-0249-03

服役条件下飞机结构腐蚀损伤概率模型研究

陈跃良^{1,2}, 吕国志¹, 段成美²

(1 西北工业大学 飞机系, 陕西 西安 710072)

(2 海军航空工程学院青岛分院 飞机教研室, 山东 青岛 266041)

A PROBABILITY MODEL FOR THE CORROSION DAMAGE OF AN AIRCRAFT STRUCTURE IN SERVICE ENVIRONMENT

CHEN Yue-Liang^{1,2}, LU Guo-zhi¹, DUAN Cheng-mei²

(1 Department of Aircraft Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2 Aircraft teaching group, Naval Aeronautical Engineering Academy Qingdao Branch, Qingdao 266041, China)

摘要: 从现役飞机结构腐蚀损伤外场调研数据入手, 对飞机结构主要材料 LY12CZ 的腐蚀特征量进行了统计分析。结果表明, 给定时间下腐蚀损伤深度服从 Weibull 分布; 给定可靠度下, 腐蚀深度 (d) 随时间的变化符合 Sigmoid 曲线规律; 在较为恶劣环境下某型机内部件防腐涂层的有效期约为 2.5 年。

关键词: 铝合金; 局部腐蚀; 点蚀; 最大腐蚀深度; 统计分析

中图分类号: V214; O346.2⁺1 **文献标识码:** A

Abstract: The corrosion depth of LY12CZ aluminum alloy was obtained by investigation in the service condition. A statistical study of corrosion characteristic quantity (CCQ) for these aluminum alloys was carried out. The results show that the corrosion depth is in conformity with Weibull distribution in given time. Corrosion depth (d_m) was fitted to Sigmoid function curve of the service time which included exposure to the environment and flying time. The period of validity of the anticorrosion layer is about 2.5 years in severe service environments.

Key words: aluminum alloy; localized corrosion; pitting corrosion; maximum corrosion depth; statistical analysis

通过调研, 归纳整理了主要结构或构件在实际使用环境/飞行载荷联合作用下的腐蚀损伤数据。它真实地反映了飞机结构在使用环境下(停放—飞行—停放—飞行反复循环), 结构产生的腐蚀—腐蚀疲劳—腐蚀而引起的损伤程度。研究发现, 在环境/载荷的联合作用下, 结构表面的防护层容易产生微小裂纹, 腐蚀溶液进入到金属基体产生电化学反应, 进而出现点蚀、晶间腐蚀、剥蚀。腐蚀坑的出现时间 (t) 以及腐蚀特征量 (Corrosion Characteristic Quantity 简称为 CCQ) (如长、宽、深) 的大小取决于环境、材料、载荷、防护层质量等因素。以上因素是随机的, 因此 t 和 CCQ 也是随机的。本文采用随机变量累积分布函数的方法来描述 t 和 CCQ。

1 给定时间下腐蚀特征量 (CCQ) 累积分布函数

(1) 腐蚀特征量 (CCQ) 腐蚀特征量表示腐蚀严重程度的尺度。一般用三维尺度如长、宽、深

描述腐蚀严重程度。根据不同腐蚀形态可以用不同的 CCQ 去描述, 如孔蚀 (Pitting), 一般用最大深度来描述, 严重剥蚀一般用腐蚀面积来描述。对受力构件而言, 剖面面积的削弱, 取决于腐蚀深度和宽度; 在构件宽度方向上, 腐蚀宽度相同时, 构件剖面的削弱, 仅取决于腐蚀深度。由于腐蚀坑形成过程一般分点蚀的形成、发展, 相邻点蚀区联合从而变成蚀坑。考虑到腐蚀深度是影响结构寿命和结构功能的主要因素, 故本文以腐蚀深度 d 作为腐蚀特征量 (CCQ)。

(2) 腐蚀数据统计分析 某型飞机服役条件下前梁下缘条腐蚀损伤数据, 表 1 为服役 7a (1a 表示服役 1 年, 以下类同) 的腐蚀数据。

文献 [1] 认为坑蚀深度分布服从 Gumbell 第 1 极值分布, 文献 [2] 认为孔蚀深度更好地服从 Logistic 模型。本文认为飞机的使用特点是环境与载荷的联合作用, 故腐蚀深度的分布应有其自身的特点。为此本文用 Gumbell 第 1 极值分布、Logistic 模型和 Weibull 分布作对比研究。其结果如图 1 所示。

表1 服役7a腐蚀数据

Table 1 Corrosion damage data, servicing 7a

| 序号 | d/mm | 序号 | d/mm | 序号 | d/mm |
|----|------|----|------|----|------|
| 1 | 0.5 | 12 | 1.0 | 23 | 1.6 |
| 2 | 0.5 | 13 | 1.1 | 24 | 1.7 |
| 3 | 0.6 | 14 | 1.1 | 25 | 1.7 |
| 4 | 0.6 | 15 | 1.2 | 26 | 1.8 |
| 5 | 0.7 | 16 | 1.2 | 27 | 1.9 |
| 6 | 0.8 | 17 | 1.3 | 28 | 1.9 |
| 7 | 0.8 | 18 | 1.4 | 29 | 2.0 |
| 8 | 0.8 | 19 | 1.5 | 30 | 2.2 |
| 9 | 0.9 | 20 | 1.5 | 31 | 2.3 |
| 10 | 0.9 | 21 | 1.6 | 32 | 2.4 |
| 11 | 1.0 | 22 | 1.6 | | |

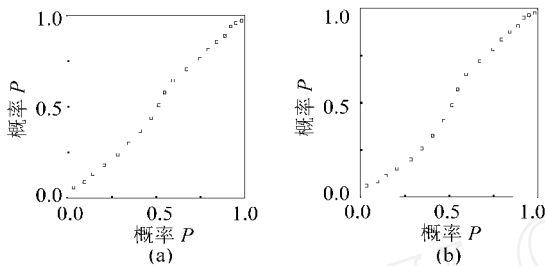


图1 腐蚀深度的P-P图

(a) Weibull分布; (b) Logistic分布

Fig. 1 The P-P plot of pit depth

从图1粗略看出Weibull分布比Logistic分布好。Gumbell第1极值分布在下面讨论。

(3) 分布形式的比较研究 本文采用Pearson相关系数法进行对比。Pearson相关系数 R_{xy} 的公式为

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]^{1/2}} \quad (1)$$

置信度为95%，计算结果如表2所示。

表2 各拟合模型的相关系数

Table 2 Relationship coefficient of fit model

| 服役时间/a | 拟合模型的 R_{xy} | | |
|--------|----------------|----------|---------|
| | Gumbell | Logistic | Weibull |
| 6 | 0.984 | 0.991 | 0.99 |
| 7 | 0.985 | 0.984 | 0.991 |
| 8.5 | 0.978 | 0.978 | 0.992 |
| 10 | 0.971 | 0.982 | 0.991 |
| 12.5 | 0.978 | 0.982 | 0.994 |

从表2知,除6a中的Logistic模型的 R_{xy} 大于Weibull分布的 R_{xy} 外,所有的Weibull分布的 R_{xy} 均比其它两种模型的 R_{xy} 都要大。因此,认为服役条件下的腐蚀深度服从Weibull分布。服役7a后该飞机前梁下缘条的腐蚀深度 d 的累积分布函数为

$$F(x < d) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (2)$$

其中: $\alpha = 2.1077$, $\beta = 0.94497$ 。

服役7a后的腐蚀深度 d 的累积分布规律与实际分布的关系如图2所示。

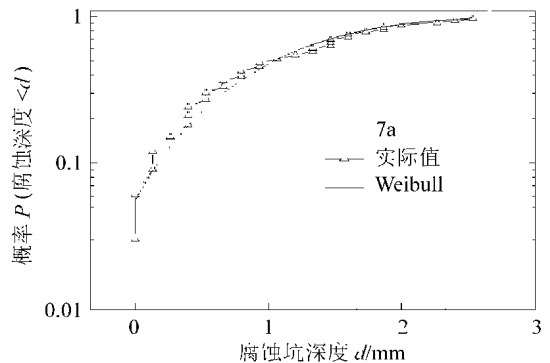


图2 服役7a腐蚀深度累积分布规律

Fig. 2 Cumulative distribution function of pit depth at servicing 7a

对全部数据的分析处理后所得累积分布规律如图3所示。

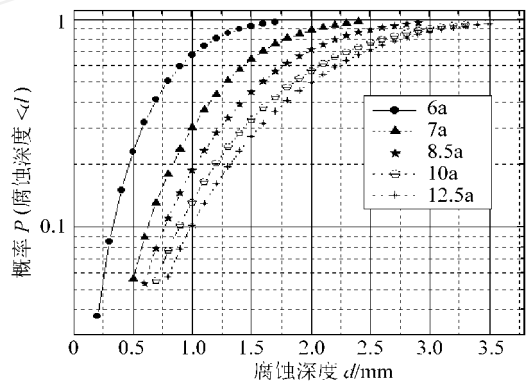


图3 5种服役时间的累积分布规律

Fig. 3 Cumulative distribution function of pit depth at different servicing time

(4) 给定概率下腐蚀深度 d 与服役时间 t 的关系 取 $P = 95\%$,其腐蚀深度随时间的变化如表3。

表3 腐蚀深度 d 与时间 t 关系数据

Table 3 Pit depth(d) and service time(t)

| t/a | d/mm |
|------|-------|
| 6 | 1.59 |
| 7 | 2.25 |
| 8.5 | 2.796 |
| 10 | 3.29 |
| 12.5 | 3.46 |

对表3的数据进行拟合,并进行 χ^2 检验。结果为 $\chi^2 = 0.01009$, $\chi^2_{(1-\infty)}(5-1) = 0.3$ ($\alpha = 0.01$),其拟合曲线类型为S型(Sigmoidal)。方程为

$$d = \frac{A_1 - A_2}{1 + \exp[(x - x_0)/dx]} + A_2 \quad (3)$$

式(3)的系数为 $A_1 = -2.36573$, $A_2 = 3.58172$, $x_0 = 4.65823$, $dx = 1.93553$ 。拟合结果如图4。

从式(3)得,当 $d = 0$ 时, $t = 3.86a$

即起始腐蚀时间为 $3.86a$, 即约为 $4a$ 。从文献[1]的拟合公式

$$d = \frac{0.46032}{1 + \exp\left[\frac{t - 11.985}{2.2335}\right]} + 0.68537 \quad (4)$$

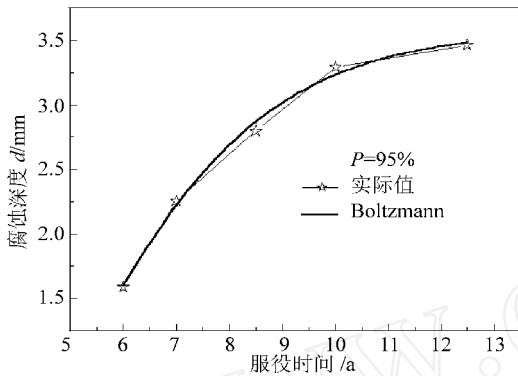


图4 $P = 95\%$ 条件下服役时间与腐蚀深度关系

Fig. 4 Relationship between service time and pit depth under $P = 95\%$

推算,当 $d = 0$ 时得, $t = 6$ 天。即LY12CZ铝合金全裸型材的起始腐蚀时间为6天(按文献介绍的环境试验)。那么在服役条件下(停—飞—停环境下)结构防护层的失效时间大约为多少呢?文献[3]给出了某北方机场在工业污染+盐雾($T = 40$ 、 $RH = 95\% \sim 100\%$ 、 $pH = 4$ 、 $[NaCl] = 3.5\%$ 条件下),铝件在该环境下腐蚀4d相当与实际环境下腐蚀 $1a$ 。某型飞机翼梁缘条的材料为高强度铝合金LY12CZ,表面经过阳极化处理并涂有H06-1012H底漆,据此推算防护层的失效时间为 $4 - (6/4) = 2.5a$ 。这与文献[4]的结论“我国军用飞机涂层的寿命一般为2~3年”吻合的很好,也证明本文所用数据的有效性 & 数据处理方法的科学性。

2 结论

由于局部腐蚀萌生、发展具有的内在的随机特性,以及飞机长期服役过程中结构材料本身、环境、载荷(飞—续—飞)等因素的随机作用,使得单一腐蚀缺陷具有随机特征,需用统计方法研究腐

蚀缺陷群体的演化分布规律。结果表明:

(1)服役条件下,用LY12CZ型材加工而成的飞机结构件,在工业污染+盐雾环境+飞行载荷作用下,其给定时间的腐蚀损伤缺陷群的深度服从Weibull分布。

(2)给定概率下,其腐蚀损伤缺陷群的深度随时间符合Sigmoidal型曲线规律。

(3)在较为严酷的环境下服役,由于载荷/环境的联合作用,防护涂层容易破坏,我国某型飞机翼梁缘条的材料为LY12CZ,表面经过阳极化处理并涂有H06-1012H航空环氧锌黄底漆,防护涂层的有效寿命大约为 $2.5a$ 。

致谢 本文获得黄玉珊先生基金资助

参 考 文 献

- [1] 胡艳玲,李荻,郭宝兰 LY12CZ铝合金型材的腐蚀动力学统计规律研究及日历寿命预测方法探讨[J].航空学报,2000,21(增刊):S53-S57.
(Hu Y L, Li D, Guo B L. Statistical study of corrosion dynamics law and method to predict calendar life for LY12CZ aluminum alloy[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2000, 21(Sup.): S53-S57.)
- [2] 张九渊,洪明庚,卢建树 孔蚀统计规律的对比研究[J].中国腐蚀与防护学报,1994,18(2):161-166.
(Zhang J Y, Hong M G, Lu J S, et al. Comparative study of statistic law of pitting[J]. Journal of Chinese Society For corrosion and Protection, 1994, 8(2): 161-166.)
- [3] 周希沅 中国飞机结构腐蚀分区和当量环境谱[J].航空学报,1999,20(3):230-233.
(Zhou X Y. Corrosion demarcation of airplane structures of China and equivalence environmental spectrum[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1999, 20(3): 230-233.)
- [4] 刘凤岭 腐蚀科学与防腐工程技术新进展[M].中国腐蚀与防护学会主编,北京:化学工业出版社,1999:570-573.
(Liu F L. New advanced of corrosion science and anti-corrosion engineering technology[M]. Chinese Society for corrosion and protection Beijing: Chemical Industry Press, 1999: 570-573.)

作者简介:



陈跃良(1962-)男,浙江省东阳市人,西北工业大学在读博士生,海军航空工程学院青岛分院副教授,主要研究方向为:腐蚀疲劳,飞机结构日历寿命。

(责任编辑:李铁柏)