

基于神经网络的飞机结构腐蚀损伤统计研究

郝大照¹ 陈跃良^{2,3} 段成美³

(1.海军航空工程学院研究生一队 烟台 264001; 2.西北工业大学航空学院 西安 710072;
3.海军航空工程学院青岛分院 青岛 266041)

摘要: 运用 LY12CZ 的腐蚀实验数据, 根据高强铝合金的失效模式(点蚀-晶间腐蚀-剥蚀), 建立了对最大腐蚀深度分类的概率神经网络模型, 输出结果与实验数据比较吻合. 在此基础上, 对分类后的最大腐蚀深度的统计研究表明, 高强铝合金点蚀的最大腐蚀深度服从 Gumbel 第一型极值分布, 晶间腐蚀阶段服从正态分布和三参数威布尔分布, 发生剥蚀后的最大腐蚀深度服从三参数威布尔分布. 对高强铝合金的最大腐蚀深度, 应用三种或两种分布类型, 而非单一分布来表征其分布规律.

关键词: 铝合金 最大腐蚀深度 概率神经网络 统计分析

中图分类号: TG171; V252 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-4537(2006)01-0019-03

1 引言

高强铝合金(如 LY12 和 LC4)在飞机上得到广泛的应用. 由于飞机的特殊服役环境, 如盐雾、高温、高湿、污染严重等, 这些结构材料表面和搭接部位出现广布的腐蚀坑, 并成为疲劳裂纹源, 给结构的安全带来很大的危害. 特别是随着大量飞机的服役年限超过其设计寿命, 腐蚀损伤对铝合金结构的完整性影响越来越引起人们的重视.

高强铝合金的腐蚀是一种局部腐蚀, 腐蚀的发生是随机的, 其实验数据往往分散性大, 重复性差, 给腐蚀损伤的统计研究带来很大的困难^[1], 以至不同学者在把最大腐蚀深度作为腐蚀损伤衡量指标进行研究时, 对腐蚀损伤的统计规律得出不同的结果. 综合起来, 腐蚀损伤最大深度分布形式有正态分布^[2]、Gumbel 第一型极值分布^[3,4]、Gamma 分布^[5]、威布尔分布^[6,7]等. 本文将根据铝合金材料的失效机理和失效模式, 用概率神经网络模型对最大腐蚀深度进行分类, 然后对每组数据进行统计分析, 以获得尽可能反映真实腐蚀损伤的分布特征, 为腐蚀损伤可靠性评估奠定基础.

2 最大腐蚀损伤深度的分类

2.1 铝合金腐蚀的动力学特性

一般来说, 总体样本服从什么分布与失效机理和失效模式有很大的关系. LY12 和 LC4 等高强铝

合金在大气环境中的腐蚀失效模式是点蚀-晶间腐蚀-剥蚀, 其腐蚀规律和机理与单一腐蚀类型有很大的不同. 点蚀发展成的腐蚀深度往往差异很大, 且最大腐蚀深度随时间增长很快. 在晶间腐蚀过程中, 腐蚀沿晶界扩展, 在晶界形成连续的阳极通道, 由于腐蚀产物的体积膨胀, 在晶界发生“楔入效应”而产生张应力, 导致沿晶界裂纹的形成和发展. 对具有平行于表面、有高度方向性的扁平晶粒结构的高强铝合金来说, 沿晶裂纹很容易沿着与表面平行的方向扩展, 从而使表面层的金属发生层状开裂和剥落, 即剥蚀^[8,9], 此时沿深度方向的腐蚀速率减慢. 可见, 飞机结构腐蚀损伤的发展规律随时间而变化, 其分布规律也许更适合于用多个分布函数来表征, 而非单一分布函数.

其实通过对实验数据的统计分析, 也表明用单一分布函数不能精确地表征腐蚀损伤的分布规律. 对文献^[2,3]中的试验数据分析处理后所得的累积分布规律见图1, 可知, 很难用一个合适的分布函数来

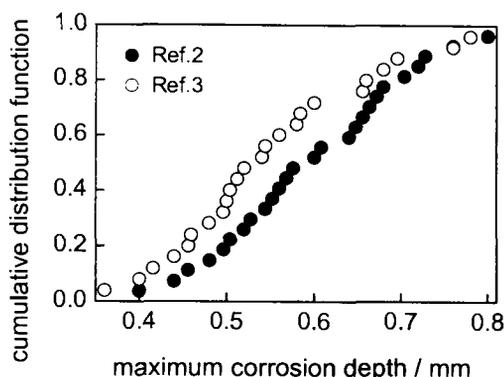


Fig. 1 Cumulative distribution of maximum corrosion depth based on experimental data

定稿日期: 2005-05-21

作者简介: 郝大照, 男, 1976年生, 山东鄒城人, 博士生, 主要从事飞机结构腐蚀疲劳可靠性和多损伤研究

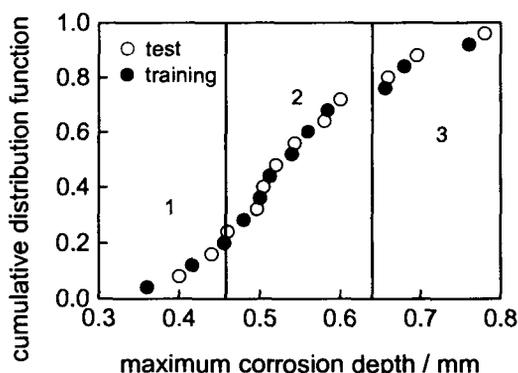


Fig. 2 Probabilistic neural network results of training and testing for experimental data

描述全部数据的分布特性. 只有把腐蚀损伤分成几组, 才有可能得到更精确的分布.

总之, 无论是基于材料的失效机理和失效模式, 还是实验数据的分布特点, 为了得到有效的腐蚀损伤分布, 都需要对其进行细分, 然后针对分类后的腐蚀损伤进行统计研究. 本文采用概率神经网络模型来完成腐蚀损伤的分类任务.

2.2 概率神经网络模型

概率神经网络(PNN)是一种适合于模式分类的径向基网络. 其原理是: 输入数据后, 网络首先计算输入矢量与训练矢量之间的距离, 并产生一个矢量, 来表征输入矢量和训练矢量之间的接近程度; 然后网络总结输入矢量对各类的贡献程度, 输出一个表征概率的矢量, 最后网络用竞争传递函数选择一个最大的概率, 对适合的类输出为 1, 其它的类输出为 0^[10].

概率神经网络可以把声音、图像、信号和谱等信息映射成“类别号”, 以实现对其特定类别的识别. 它已成功地应用于军事、医学、工业等多个领域, 如心电图的正常或非正常划分、基于声纳信号的船体识别和基于光谱的钻石鉴别等. 本文用 MATLAB 的 PNN 函数来建立对腐蚀损伤分类的概率神经网络模型.

把最大腐蚀损伤深度作为训练对象, 输入和输出目标矢量都是单行矩阵, 这两个矩阵输入到 NEWPNN 函数中进行训练.

根据材料的失效模式: 点蚀-晶间腐蚀-剥蚀, 可把最大腐蚀深度分为三组, 从图 1 也可看出分为三组是合理的, 并分别用数字 1~3 表示. 以文献^[3]中的数据为研究对象(图 1 中黑点表示的数据). 该数据经历了点蚀-晶间腐蚀-剥蚀, 它以点蚀为主, 局部的剥蚀是在点蚀的基础上发展起来的. 用一半

的数据进行网络训练, 输出为分类代号 1~3. 最大腐蚀深度的网络训练结果见图 2, 可见概率神经网络能够很好地对最大腐蚀深度进行分类. 由于数据有限, 该模型精度有待进一步验证.

3 最大腐蚀深度的概率分布

所选数据来自于高强铝合金的腐蚀实验, 为了剔除材料对分布的影响, 本文基于目前对高强铝合金 LY12CZ 腐蚀损伤分布的研究结果: 正态分布^[2]、Gumbel 第一型极值分布^[3]、威布尔分布^[7], 分别对分类后的数据进行对比分析, 以找出适合各组数据的最佳分布.

经过统计处理, 各种分布针对各组数据的相关系数见表 1. 可知, 对第一组数据, 最佳分布为 Gumbel 第一型极值分布, 正态分布和三参数威布尔分布都比较适合第二组数据, 第三组数据最佳分布为三参数威布尔分布. 这说明, 高强铝合金点蚀的最大腐蚀深度服从 Gumbel 第一型极值分布, 晶间腐蚀阶段服从正态分布和三参数威布尔分布, 发生剥蚀后的最大腐蚀深度服从三参数威布尔分布. 由此可见, 对高强铝合金的最大腐蚀深度, 特别当数值范围较大时, 应对其进行分类并分别加以研究, 采用三种或两种分布来表征其分布规律, 而非单一分布, 图 3 给出了分别应用 Gumbel 分布、正态分布和三参数威布尔对 1~3 类数据的累积分布. 文献^[2,3,7]的数据

Table 1 Correlation coefficient of fit model

group	correlation coefficient of fit model r		
	normal	Gumbel	Weibull
1	0.9854	0.9965	0.9862
2	0.9909	0.9700	0.9926
3	0.9479	0.9117	0.9869

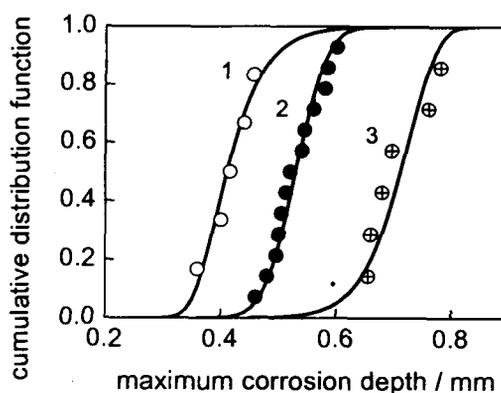


Fig. 3 Cumulative distribution of maximum corrosion depth based on classified data

1. Gumbel distribution function; 2. normal distribution function; 3. three parameters Weibull distribution function

是包括了点蚀、晶间腐蚀和剥蚀在内的总深度。由于腐蚀环境的不同,导致了 LY12CZ 铝合金的腐蚀失效形式不同,各自主要发生的是晶间腐蚀和剥蚀、点蚀。他们都用优势数据掩盖了弱势数据的信息,从而得出不同的结论,不过这也从侧面验证了本文结论的正确性。

4 结论

(1)材料的失效模式和失效机理决定着腐蚀损伤的分布类型,高强铝合金的失效模式:点蚀-晶间腐蚀-剥蚀,决定了在对其腐蚀损伤的统计规律研究时,特别当腐蚀损伤数据范围较大时,应根据失效模式划分为三组,用多个分布类型而非单一分布类型来表征腐蚀损伤的分布特性。

(2)建立的神经网络模型能很好地对最大腐蚀深度进行分类,为腐蚀损伤的可靠性评估奠定了基础。由于训练数据有限,在进一步应用该模型前,还需大量的数据对其进行训练,以提高其精度。

(3)对 LY12CZ 铝合金的腐蚀实验数据进行统计分析时,应分为三组进行研究;对其分组后的最大腐蚀损伤深度统计研究表明,高强铝合金点蚀的最大腐蚀深度服从 Gumbel 第一型极值分布,晶间腐蚀阶段服从正态分布和三参数威布尔分布,发生剥蚀后的最大腐蚀深度服从三参数威布尔分布。

参考文献:

[1] 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]. *Inter. J. Fatigue*, 2004, (26): 71

- 80
- [2] Xie W J, Li D, Hu Y L, Guo B L. Statistical study of corrosion kinetics law for LY12CZ and 7075T7351 aluminum alloy in EXCO solution [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1999, 20(1): 34 - 38
(谢伟杰, 李获, 胡艳玲, 郭宝兰. LY12CZ 和 7075T7351 铝合金在 EXCO 溶液中腐蚀动力学的统计规律 [J]. *航空学报*, 1999, 20(1): 34 - 38)
- [3] 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
(胡艳玲, 李获, 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(Sup.): S53 - S57)
- [4] Ren H, Feng Y S, Wang C. The corrosion failure model and reliability of Y - 7 aircraft wing [J]. *Corros. Sci. Prot. Technol.*, 1998, 10(4): 212 - 216
(任和, 冯元生, 王琛. 运七机翼腐蚀失效模型及其可靠性分析 [J]. *腐蚀科学与防护技术*, 1998, 10(4): 212 - 216)
- [5] Pidaparti R M, Jayanti S, Sowers C A. Classification, distribution, and fatigue life of pitting corrosion for aircraft materials [J]. *Journal of Aircraft*, 2002, 39(3): 486 - 492
- [6] Osama M Alyousif. Corrosion and corrosion fatigue of aluminum alloys [D]. Lehigh University, April, 2002
- [7] 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: 249 - 251
(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: 249 - 251)
- [8] Xie W J. Study on corrosion fatigue life prediction of LY12CZ and 7075T7351 aluminum alloy [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1998
(谢伟杰. LY12CZ 和 7075T7351 铝合金耐腐蚀寿命预测的探讨 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 1998)
- [9] Li D, Zuo S Z, Guo B L. Study on exfoliation corrosion behavior for LY12CZ [J]. *J. Chin. Soc. Corros. Prot.*, 1995, 15(3): 203 - 209
(李获, 左尚志, 郭宝兰. LY12 铝合金剥蚀行为的研究 [J]. *中国腐蚀与防护学报*, 1995, 15(3): 203 - 209)
- [10] Demuth H, Beale M. *Neural Network Toolbox: For Use With MATLAB, User's Guide* [M]. USA: Mathworks. Inc., Jan, 1998

STATISTICAL STUDY ON CORROSION DAMAGE DISTRIBUTION OF AIRCRAFT STRUCTURE BASED ON NEURAL NETWORK

YU Dazhao¹, CHEN Yueliang^{2,3}, DUAN Chengmei³

(1. One Brigade of Graduate Student of Naval Aeronautical Engineering Academy, Yantai 264001;

2. Aeronautical Academy of Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072;

3. Naval Aeronautical Engineering Academy, Qingdao Branch, Qingdao 266041)

Abstract: Make use of available experimental data of LY12CZ aluminum alloy, a probabilistic neural network was developed to classify the maximum corrosion depth ranges based on the material failure mode. The output is in good agreement with experiment result. Statistical study on classified corrosion damage was carried out. The results show that maximum pitting corrosion depth for aluminum alloy conforms to Gumbel distribution. The normal distribution and three parameters Weibull distribution fit well with period of intergranular corrosion and the maximum exfoliation corrosion depth is consistent with the three parameters Weibull distribution law. It may be necessary to use several distribution functions rather than a single distribution to represent corrosion damage characteristics due to the large distribution of maximum corrosion depth on aircraft materials.

Key words: aluminum alloy, maximum corrosion depth, probabilistic neural network, statistical analysis