

基于分形理论的6A02铝合金腐蚀损伤评估

李旭东, 穆志韬, 刘治国, 朱武峰

(海军航空工程学院 青岛校区, 山东 青岛 266041)

摘要: 铝合金在环境中会被腐蚀, 对其使用寿命造成影响。基于数字处理技术, 利用分形理论对腐蚀试件表面图像进行处理, 得到了腐蚀试件表面孔蚀率。涉及的方法具有一定的操作性和工程价值。

关键词: 分形维度; 腐蚀损伤评估; 孔蚀率; 铝合金

中图分类号: TG171; V252 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2012)04-0027-04

Evaluation of Corrosion Damage for 6A02 Aluminum Alloy Based on Fractal Theory

LI Xu-dong, MU Zhi-tao, LIU Zhi-guo, ZHU Wu-feng

(Qingdao Branch of Naval Aeronautical Academy, Qingdao 266041, China)

Abstract: Aluminum alloy suffers from corrosion damage in natural environment, which greatly reduces the service life. With the aid of digital image processing technology, fractal theory was introduced to evaluate the corrosion damage parameter, pitting ratio of specimen surface. The proposed method is practical and of engineering value.

Key words: fractal dimension; corrosion damage evaluation; pitting ratio; aluminum alloy

铝本身对于氧元素有强烈的亲和性, 在空气或者水中能与氧结合形成氧化铝膜, 表现出优良的抗腐蚀性。然而, 某些离子, 尤其是卤元素离子, 会侵入铝合金表面的氧化层, 造成腐蚀, 因此在沿海以及工业发达的酸雨区、高温潮湿地区, 铝合金结构件极易遭受腐蚀^[1]。

飞机外场服役寿命很长, 第三代战机的服役年限甚至超过 30 a。实验室条件下短时间内加速模拟腐蚀过程成为航空材料腐蚀疲劳研究中十分关键的问题。穆志韬等^[2-3]建立了我国沿海部分机场的当

量加速试验环境谱, 利用该环境谱可以在实验室条件下加速模拟飞机服役所受到的腐蚀损伤。

1 试验

试验材料为航空用锻造铝合金 6A02。6A02 铝合金属于 Al-Mg-Si-Cu 系, 具有中等强度以及良好的塑性, 在飞机结构中多以板材的形式出现, 因此试验中所用的试件也均为板材。

腐蚀加速试验是在 ZJF-45G 周期浸润环境试验

收稿日期: 2012-03-08

作者简介: 李旭东(1984—), 男, 辽宁丹东人, 硕士, 讲师, 主要从事材料腐蚀疲劳评估以及材料防护研究。

箱中完成的。腐蚀环境要素通常指结构件所承受的介质、温度、湿度、应力和时间等环境因素的联合作用,以及每种因素的强度、持续时间、发生频率及其联合作用的结果。根据加速试验环境谱^[2],环境箱中每一次干-湿交变包括浸泡 5 min,烘烤 10 min。干湿交变 255 次循环,累计试验时间为 61 h,等于自然腐蚀 1 个日历年^[3]。对试件分别腐蚀不同的年限,共加速腐蚀到 30 a,每加速腐蚀 1 a 取 3 个试验件。预腐蚀试件的几何形状尺寸由 ZJF-45G 周期浸润环境试验箱的试件搁架确定,尺寸如图 1 所示。

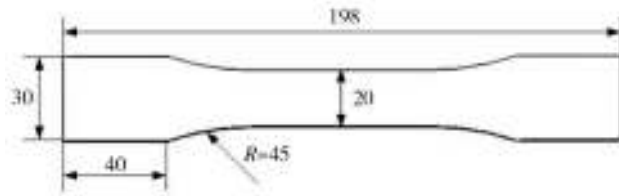


图 1 试件外形尺寸
Fig. 1 Dimension of specimen

2 基于分形理论的腐蚀损伤评估

2.1 孔蚀率的获取

腐蚀后的试件表面出现了大量的点蚀与剥蚀损伤,描述和评价腐蚀损伤程度的参数,如腐蚀深度、腐蚀面积、孔蚀率、腐蚀等级等。腐蚀损伤造成试件表面形貌极其复杂,蚀坑分布呈现不均匀的状态,即便是单独一个蚀坑,其微观形状也是极度不规则的,如图 2a 和 2b 所示。如果简化成椭球等规则形状,与实际表面结构差距过远,无法反应腐蚀损伤的真实情况。工程实践亟需寻找一种简单实用的方法来获得反应腐蚀损伤的定量参数。

蚀坑是腐蚀表面的重要特征,表明了腐蚀损伤的状况。描述蚀坑在腐蚀试件上的分布多采用两个参量:孔蚀率 α (描述试件表面腐蚀损伤程度的参量)和平均深度(描述试样表面腐蚀损伤深入母材程度的参量)。

孔蚀率 α 定义如下^[3]:

$$\alpha = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^n S_i \times 100\% \quad (1)$$

式中: n 为腐蚀表面上蚀坑数量; S 是试件表面

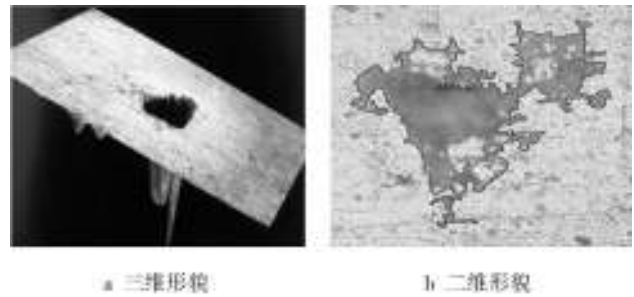


图 2 腐蚀试件表面三维形貌与二维形貌
Fig. 2 Three-dimensional and two-dimensional topography of the corroded specimen surface

的总投影面积; S_i 代表试件表面第 i 个腐蚀坑的投影面积。

根据式(1),通过直接测量腐蚀表面每个腐蚀坑面积来获取试件表面孔蚀率 α 几乎是办不到的。因为蚀坑形状过于复杂,单个蚀坑的面积难以利用传统测量手段获得。因此笔者基于 MATLAB 软件,利用数字图像处理技术结合分形理论对获得的腐蚀图像进行处理,获得试件表面孔蚀率。

直接由显微镜采集到的试件表面图像是真彩图像,真彩图像不能直接被计算机识别和处理,需要对其进行数字化处理,转换成灰度图像。该过程中,首先将连续的真彩图像在空间上离散,将其分解为被称为像素的离散点的集合;然后将真彩图像中连续变化的色调变成整数表示的图像中每个像素点的灰度值,灰度值依据腐蚀图像的亮度或灰度进行量化得到。数字化最终的目的就是将真彩图像转化为 $M \times N$ 像素点阵 F ,像素点阵中每个点 $f(i,j)$ 的数值代表 (i,j) 处像素点的灰度值,其中: $i=0,1,\dots,M-1$; $j=0,1,\dots,N-1$ ^[5]。

$$F = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \dots & f(0,N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \dots & f(1,N-1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f(M-1,0) & f(M-1,1) & \dots & f(M-1,N-1) \end{bmatrix}_{M \times N}$$

腐蚀图像数字化后,像素点的数量与原始图像的空间分辨率相关,灰度值范围与数字化的质量相关。实验中每幅腐蚀图像具有 8 位位深,则灰度值有 2^8 个量级,即灰度值范围为 0~255。灰度值为 0 表示全黑,灰度值为 255 表示全白。图 3b 为数字化处理的铝合金灰度腐蚀图像局部数据矩阵,图中微小

区域被数字化为 13×7 的矩阵,矩阵中每个元素代表数字化后灰度图像中对应像素点灰度值,取值范围均在 0~255 之间。其中最小值为 67,表示该区域颜色最深处的色值,是蚀坑区域;最大值为 254,表示该区域颜色最浅处的色值,是基体材料。腐蚀图像灰度值的分布体现了铝合金材料表面腐蚀的状况。



图3 腐蚀15 a试件灰度图像及其数字矩阵

Fig. 3 Gray-scale image and digital matrix of specimen exposed for 15 years

灰度图像的灰度值虽然体现了试件表面腐蚀状况,但是还无法直接获得孔蚀率等腐蚀参量,需要将其进一步转化为二值图像。二值图像只有纯黑和纯白,通过二值化处理,使铝合金表面孔蚀图像数字矩阵每个元素的取值只能是0或1。元素值为0的像素点是纯黑的像素点,表示该像素点位于蚀坑位置。元素值为1则是纯白的像素点,表示铝合金基体上的像素点。图3a给出了腐蚀15 a试件表面局部的二值化图像。灰度值为0的像素点数量与图像中像素点总数之比值即可作为该图像的孔蚀率值 α 。

二值化方法很多,文中采用相对简单的阈值确定法。设腐蚀图像中,腐蚀区域的灰度阈值分别为 k , $g(i, j)$ 为图像中位置为 (i, j) 处的像素点的二值化灰度,则在二值化图像过程中令:

$$g(i, j) = \begin{cases} 1, & f(i, j) \geq k \\ 0, & f(i, j) < k \end{cases} \quad (2)$$

统计图像中 $g(i, j)=0$ 的像素的数量。这个数值与图像的总像素比值就是该腐蚀图像所代表的腐蚀

试件表面的孔蚀率 α 。

利用式(2)进行二值化处理的关键问题就是阈值参数 k 的选取,不同的 k 将会导致计算出来的孔蚀率发生变化。阈值参数过大或过小,都会导致计算结果失真。为了选择合适的阈值参数,需要应用分形理论^[6]。

2.2 基于分形理论计算灰度阈值

由 Mandelbrot B^[7]于1975年提出的分形理论,是20世纪70年代诞生的新兴学科,它是用“分维”(Fractal dimension)来刻画大自然中的复杂几何形貌。分形的特征是整体和局部有严格的或统计意义下的自相似性^[8]。描述分形的自相似性的定量参数为分形维度,简称分维。计算分形维度的方法很多,如相似维数、Hausdorff维数、计盒维数(Box dimension)、拓扑维数(Topological dimension)、标尺法(Ruler law)、周长和面积法(Circumference and area method)等,需要随研究对象的改变来选择^[6-7]。

文中采用计盒维数(Box dimension)方法来计算分形维度 D ^[8-10]。将尺寸为 $\delta \times \delta$ 的正方形盒子分别覆盖原始试件表面图像和二值处理后的图像, δ 是可变参数。编写程序自动获取不同取值下盒子的计数 N 。按照式(3)的形式,对获得的 δ 与 N 进行拟合^[8-9]。

$$N = \alpha \delta^{-D} \quad (3)$$

对式(3)作对数变换得到式(4):

$$\lg N = -D \lg \delta + \lg \alpha \quad (4)$$

由式(4)可以看出,在双对数坐标下对 $\delta-N$ 进行线性拟合,如图4所示,分形维度 $D=1.897$ 。

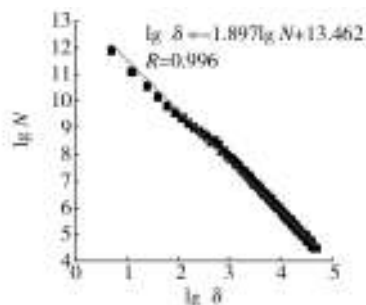


图4 腐蚀15 a试件二值图像的分形维度

Fig. 4 Fractal dimension for a binary image of specimen exposed for 15 years

对于一幅灰度图像,给定一个灰度阈值 k ,就可以获得一个二值图像,根据式(4)就可以得到相对应

的分形维度。因此分形维度 D 与灰度阈值 k 存在函数关系。

图5给出了腐蚀15 a 试件表面图像分形维度随着灰度阈值的变化曲线,拟合关系见式(5)。

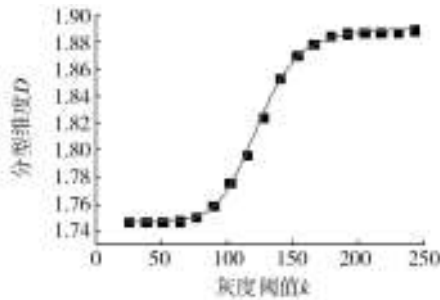


图5 腐蚀15 a 试件图像分形维度 D 与灰度阈值 k 的关系
 Fig. 5 Relation between fractal dimension D and gray-scale threshold value k for specimen exposed for 15 years

$$D = 1.8904 + \frac{1.7478 - 1.8904}{1 + \left(\frac{k}{123.5245}\right)^{7.9271}} \quad (5)$$

最佳的灰度阈值通过式(6)确定:

$$\begin{cases} dD/dk = 0 \\ d^2D/dk^2 < 0 \end{cases} \quad (6)$$

求解式(6),得到最佳的灰度阈值为160,此时对应的分形维度为1.89。对于每一个腐蚀年限的试件,可以获得相应最佳灰度阈值以及所对应的分形维度,得到不同腐蚀年限下的孔蚀率参数,计算结果如图6所示。利用Origin软件中的 Boltzmann 增长模型进行拟合,见式(7)。

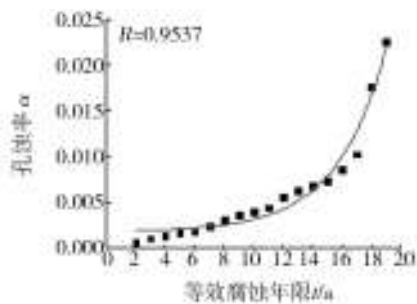


图6 不同腐蚀年限下孔蚀率曲线
 Fig. 6 Variation of pitting ratio with exposure time

$$\alpha = 570.6231 + \frac{0.0018 - 570.62309}{1 + e^{(t-53.07618)/3.3229}} \quad (7)$$

式中: t 为日历腐蚀年限。

所对应的分形维度随着腐蚀年限的变化亦有规

律可循,如图7所示。分形维度随着腐蚀年限近似呈线性递减关系。

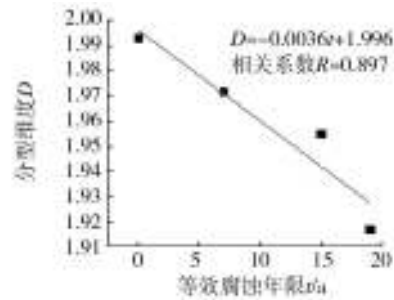


图7 分形维度随着腐蚀年限的变化曲线
 Fig. 7 Variation of fractal dimension with exposure time

3 结论

1) 提出了一种基于分形理论结合计算机数字图像处理技术获得反映试件表面腐蚀情况的重要参数、孔蚀率的方法,对于铝合金试件腐蚀评级具有重要的意义,具有比较强的操作性和实际应用价值。

2) 基于文中的腐蚀环境谱,试件表面图像的分形维度随着腐蚀年限的变化近似呈线性递减关系。这说明分形维度的变化也在分形维度这个角度反映了腐蚀表面形貌的变化。

参考文献:

- [1] 王玲,宣卫芳,牟献良. 2A11 铝合金/碳钢偶接件在强化自然环境条件下的腐蚀特性[J]. 表面技术, 2011, 40(5): 8—11.
- [2] 穆志韬. 海军飞机结构腐蚀损伤规律及使用寿命研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2001.
- [3] 吕胜利. 铝合金结构腐蚀损伤与评价[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2009: 47—48.
- [4] 朱做涛,穆志韬,苏维国,等. 基于图像处理技术的铝合金腐蚀等级评定方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(3): 383—386.
- [5] ZUO Jian-ping, WANG Xi-shu. A Novel Fractal Characteristic Method on the Surface Morphology of Electrochemically Synthesized Polythiophene Films with Self-organized Nanostructure[J]. Physica E-low-dimensional Systems & Nanostructures, 2005, 28(1): 7—13.
- [6] 刘莹,胡敏,余桂英,等. 分形理论及其应用[J]. 江西科学, 2006, 24(2): 205—209.

(下转第 34 页)

蚀率标准偏差均值分别为0.67%和0.59%,远高于3 mm金属丝的腐蚀率标准偏差均值(0.21%)。江津站的数据也显示,金属丝直径越小,腐蚀率数据的偏差越大。

3 试验参数设计

3.1 设计原则

为实现快速评估,阳极金属丝应具有较高的腐蚀率,3个月的腐蚀率不应低于ISO 9223规定的标准金属法同种金属1 a的腐蚀率;为保证结果的精确性,偏差应尽可能小。

3.2 试验参数确定

1) 电偶材料种类。在万宁站,铜-铝电偶对金属丝腐蚀率最大,在江津站则是碳钢-锌电偶对腐蚀率最大。对万宁站的样品观察显示,阴极碳钢螺栓腐蚀非常严重,腐蚀产物已将铝丝部分掩埋。这说明,采用碳钢作为阴极螺栓会导致试验样品在腐蚀性很严酷的地区试验结果失真。因此,可选择T2铜和1100铝作为电偶材料。

2) 螺栓形状。试验显示,螺距约为金属丝直径2倍时,梯形螺纹螺栓与普通螺纹螺栓上的金属丝腐蚀率无明显差别。鉴于普通螺纹易加工,可选择螺距为金属丝直径2倍的普通螺纹螺栓。

3) 金属丝直径。直径为3 mm的铝丝腐蚀率虽然较1 mm和2 mm的铝丝低,但其试验结果偏差最

小。万宁站与江津站3个月的腐蚀率均超过了按ISO 9223试验方法同种金属1 a的腐蚀率。因此,选择直径为3 mm的铝丝能满足试验要求。

4 结论

1) 电偶材料对WOB试验结果有显著影响,但腐蚀率大小排序与电偶电位差大小排序并不完全一致。

2) 不同形状的螺栓与金属丝间的缝隙不同,在一定情况下会因为缝隙腐蚀的不同而影响试验结果。

3) 金属丝直径越小,腐蚀率越大,偏差也越大。

4) 为快速、准确、稳定地利用WOB技术评估我国大气腐蚀性,建议试验样品的电偶材料为T2铜和1100铝,铜螺栓为M25×6普通螺纹,铝丝长度为1 m、直径为3 mm。

参考文献:

- [1] ISO 9223—1992, Corrosion of Metals and Alloys—Corrosively of Atmospheres—Classification[S].
- [2] 唐其环, 万军, 张伦武. 国外Wire-on-bolt技术分级准则在我国的适用性研究[J]. 装备环境工程, 2006, 3(1): 85—88.
- [3] GB/T 16545—1996, 金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产物的清除[S].
- [4] 何建新, 秦晓洲, 易平, 等. Q235钢海洋大气腐蚀暴露试验研究[J]. 表面技术, 2006, 35(4): 26—28.
- [5] 文邦伟, 李继红. 铝及铝合金在热带海洋地区大气腐蚀[J]. 表面技术, 2004, 33(6): 23—25.

(上接第30页)

- [7] MANDELBROT B. Fractal Geometry of Nature[M]. San Francisco:Freeman, 1982.
- [8] MANDELBROT B. NESS J W. Fractional Brownian Motions, Fractional Noises and Applications[J]. SIAM Rev, 1968, 10(4):422—437.
- [9] GANGEPAIN J, ROQUES Carmes C. Fractal Approach to

Two Dimensional and Three Dimensional Surface Roughness[J]. Wear, 1986, 109: 119—126.

- [10] SARKAR N, CHAUDHURI B B. An Efficient Differential Box-counting Approach to Compute Fractal Dimension of Image[J]. IEEE Transaction on Systems Man and Cybernetics, 1994, 24(1): 115—120.