铝合金的实验室盐雾试验腐蚀行为图像特征提取

张琪, 汪笑鹤, 孟超

(中国华阴兵器试验中心 环境模拟室,陕西 华阴 714200)

摘要:目的 提取铝合金材料在盐雾箱试验中可以表征腐蚀程度的表面形貌图像特征量。方法 首先,对采 集于表面化学清洗过的试样原始图像进行图像增强等预处理,突出腐蚀部位;其次,基于数字图像处理的 分形和小波分解方法提取出分形维数和小波能量特征值。结果 与以质量损失量为基础的腐蚀深度特征值进 行相关性对比,基于图像分析的特征提取法的准确度和精度比较高。结论 该方法可以应用于对试样的腐蚀 程度进行定性和定量分析,判断并预测试样的腐蚀速度。

关键词:铝合金腐蚀形貌;特征提取;分形理论;小波分解

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2018.02.015

中图分类号: TJ07 文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2018)02-0079-05

Image Feature Extraction of Corrosion of Aluminum Alloy Laboratory Salt Spray Test

ZHANG Qi, WANG Xiao-he, MENG Chao (Department of Environment Simulation, Huayin Ordinance Test Centre, Huayin 714200, China)

ABSTRACT: Objective To extract surface morphology and image characteristics of aluminum alloy in salt spray box test. **Methods** Firstly, the samples collected from the original image surface were cleaned for image enhancement preprocessing and outstanding corrosion; secondly, digital image processing and fractal wavelet decomposition method were used to extract fractal dimension and wavelet energy. **Results** The accuracy and precision of the feature extraction method based on image analysis were relatively high. **Conclusion** This method can be applied to qualitative and quantitative analysis of the corrosion degree of specimens as well as judge and prediction of corrosion rate of samples.

KEY WORDS: corrosion morphology of aluminum alloy; feature extraction; fractal theory; wavelet decomposition

武器装备在大气环境服役过程中发生化学或电 化学反应而产生大气腐蚀失效,相比于其他类型的环 境腐蚀,大气腐蚀更加普遍。每年都有大量的金属构 件和装备因腐蚀而报废,据统计,由大气腐蚀造成的 损失占全部腐蚀的一半。因而,开展武器装备的大气 腐蚀规律研究对准确掌握装备使用性能和防护涂层 相关研究具有重要意义。关键结构件是以铝合金为典 型材料的沿海部署装备雷达,在运输贮存和工作期间 长期耐受海洋大气腐蚀。文中针对沿海部署雷达装备 主要功能部件的铝合金天线,从腐蚀失重法和表面形 貌图像分析两个方面出发,对模拟加速临海大气环境 条件下的早期腐蚀行为作了研究。

确定大气腐蚀速度的重要方法是传统的基于质 量检测的失重法,此方法测得的结果为一段时间内的 平均值,不具有连续性,不能反映金属材料在某一时 刻的动态腐蚀过程。特别是金属材料大气腐蚀早期质 量损失量很少,测量误差相对比较大,实际状态难以 测得。金属腐蚀程度的评估也可以通过分析腐蚀形貌 图像定性地判断,对于这类腐蚀早期质量损失量少的 试样,图像分析法能减少失重法测量中产生的误差, 提高腐蚀评估的精确度^[1-4]。文中所建立的基于图像 分形和小波分析的铝合金天线早期腐蚀行为图像分

收稿日期: 2017-09-07; 修订日期: 2017-10-19 作者简介: 张琪(1984—), 女,硕士,主要研究方向为环境模拟试验。

析思路如图1所示。



图 1 腐蚀产物表面形貌图像分析流程

整个过程可以分为三步:首先对腐蚀试样进行形 貌图像采集和预处理;第二步,对预处理后的腐蚀形 貌图像提取特征,分别通过 DBC 计盒维数法提取分 形维数和小波分解提取子图像能量值;最后分析图像 特征值与腐蚀失重之间的关系,有利于进一步应用于 试样的腐蚀程度进行定性和定量分析,判断并预测试 样的腐蚀速度。

1 实验数据采集累积和腐蚀规律研究

1.1 实验过程

铝和铝合金以其优良的导电性能广泛应用于雷达结构中的天线、机箱、机柜、馈线中。该试验选取1060 纯铝、5A06Al-Mg、6061Mg2Si、2A12 高强度硬铝等四种铝合金材料为研究对象,依据 GJB 150.11A—2009 采用中性盐雾试验方法,推荐使用每周期 24 h喷雾、24 h干燥两种状态干湿交替的试验 程序,进行了 5 个周期的实验室盐雾箱试验。喷雾阶段以试验箱温度为 35 ℃,盐雾沉降率为(1~3) mL/ (80 cm²·h)的条件进行连续喷雾^[5]。

1.2 腐蚀形貌图像的采集与预处理

对 20 个规格约为 4 cm×5 cm 的试样,记录与分析 了试验后样本图像原貌,采用扫描电镜分别采集了原始 大小,500,1000 倍的放大图像,并采用能谱仪分析了 成分结构。为了减少腐蚀产物的影响,采用化学法清洗 试件,用单反相机采集了去除腐蚀产物后的表面形貌图 像。用电子天平分别称取了清洗前后的样本质量。

1.3 铝合金的腐蚀动力学

1060 铝合金样品在盐雾箱内暴露不同时间的腐蚀 深度(由质量损失量换算得出)见表1。可以看出,随 着暴露时间的延长,腐蚀深度增加呈幂指数变化趋势。

表 1 1060 铝合金在盐雾箱暴露不同时间的腐蚀深度

暴露时间/h	48	96	144	192	240
腐蚀深度/μm	1.6899	3.5728	4.1505	5.057	6.815

由腐蚀失重法测得腐蚀速率变化趋势如图 2 所 示^[6]。可以看出,平均腐蚀速率在 80 h 内腐蚀速率持 续快速降低; 80~150 h 内腐蚀速率增加; 150 h 以后 又开始逐渐降低,最后趋于平缓。这是因为前 80 h 表面直接接触腐蚀大气,腐蚀加剧;第二个阶的腐蚀 速率逐渐减缓,表明锈层的形成有效阻碍了腐蚀性离 子渗入到基体表面;第三个阶段腐蚀趋势又增加,说 明锈层和基体之间发生氧化还原反应,电化学反应阻 力减小,锈层的保护性降低。



图 2 1060 铝合金盐雾箱暴露的腐蚀速率曲线

2 腐蚀图像表面形貌特征值提取

数字图像处理技术作为计算机视觉的一种实用工 具,已广泛应用于科学研究的各个领域,大到卫星遥感 进行全球环境气候监测,小到指纹识别实现安全防护。 同时,现代数学理论的发展成熟也使数字图像处理技术 日益完善。分形理论和小波分解是近些年来得到迅速发 展并在图像处理领域得到广泛应用的数学理论^[7]。

由于腐蚀形貌图像自身的特殊性,目前还没有专门的针对腐蚀形貌图像的处理软件和标准。为此,在Windows环境下,应用MATLAB软件编写了腐蚀形貌图像处理程序。

为有效抑制图像中的噪声信息而准确提取图像 特征,对腐蚀形貌原始图像进行预处理。首先对单反 相机采集的照片信息,进行灰度转换,并依次进行中 值滤波、模糊增强预处理突显目标,最后二值化图像, 将图像中的有用信息提取出来,使发生点蚀或缝隙等 腐蚀的部位明显显现。

2.1 提取表面形貌图像分形特征——分维 指标

分形理论通过复杂随机现象的表面来揭示其内

在深层规律。将二值化图进行最常用的盒记数法分形 分析。把分形维数这一参数作为腐蚀表面形貌特征, 用于后面的分析识别。

分形维数是腐蚀形貌图像表面不规则程度的一种 度量,反映了腐蚀形貌图像灰度曲面的粗糙程度。n 维欧氏空间中的任一有界集合具有分形特性,通过分 形维数可以描述和测量其分形特性。常用 Richardson 定律来估计分形维数 FD。

$$N_{\varepsilon} = K \varepsilon^{-rD} \tag{1}$$

式中: *ε* 为分割盒子的边长与图像大小的比值; *N_e*为该尺度下的盒子总数; *K* 为分形系数。为了便于 计算,对式(1)两边取对数,有:

$$lg(N_{\varepsilon}) = lg(K) + FD lg(1/\varepsilon)$$
(2)
对试样图像的分析结果见表 2。

2.2 提取小波分解子图像能量特征——灰 度指标

将原始图像转换为灰度图像。离散化后的图像可 以用 **f**(x,y)二维矩阵表示,矩阵中每一个元素就是图 像对应该点的像素。像素值越小,越暗(黑),反之, 图像越亮(白)。小波变换的目的是将图像的能量尽 量集中在少量系数上,从而最大程度地去除原始图像

表 2 表征粗糙度的分形维数

铝合金类别	分形维数	铝合金类别	分形维数	
1060-1	2.0000	6061-1	1.9804	
1060-2	1.9998	6061-2	1.9788	
1060-3	2.0000	6061-3	1.8229	
1060-4	1.9999	6061-4	2.0000	
1060-5	1.8352	6061-5	1.9798	
5A06-1	1.8435	2A12-1	2.0000	
5A06-2	1.7402	2A12-2	2.0000	
5A06-3	1.8253	2A12-3	2.0000	
5A06-4	0	2A12-4	2.0000	
5A06-5	0	2A12-5	2.0000	

数据中的相关性[8-10]。

用 db1 小波进行 2 层分解, 获取第二层的近似系数(42)和细节系数(水平方向 H2、垂直方向 V2、对角线方向 D2), 处理输入结果如下。

*E*_{H1}, *E*_{H2}, *E*_{V1}, *E*_{V2}以及 *E*_{D1}, *E*_{D2}分别为水平方向、垂直方向和对角方向进行 1, 2 层小波变换后的子图像的能量值。λ 是第二层小波分解得到的子图像能量值差异的最大值:

 $\lambda = \max\left\{ |E_{H2} - E_{V2}|, |E_{H2} - E_{D2}|, |E_{V2} - E_{D2}| \right\}$ (3)

表 3 铝合金试样腐蚀形貌图像特征值

试样编号	E_{H1}	E_{V1}	E_{D1}	E_{H2}	E_{V2}	E_{D2}	λ
1060-1	0.073	0.0729	0.0043	0.2	0.1669	0.0313	0.1687
1060-2	0.0666	0.0462	0.0045	0.145	0.0908	0.0236	0.1214
1060-3	0.0651	0.0701	0.0049	0.1466	0.1382	0.0258	0.1208
1060-4	0.0505	0.0527	0.0043	0.1244	0.1055	0.0225	0.1019
1060-5	0.0073	0.0087	0.0009	0.0128	0.0145	0.0046	0.0099
6061-1	0.0334	0.0685	0.003	0.1122	0.1916	0.0213	0.1703
6061-2	0.0071	0.0148	0.0005	0.0269	0.0454	0.0035	0.0419
6061-3	0.0028	0.0026	0.0005	0.0099	0.0077	0.001	0.0089
6061-4	0.016	0.022	0.0007	0.0543	0.0696	0.0068	0.0628
6061-5	0.0435	0.0891	0.0034	0.1103	0.1925	0.0281	0.1644
5A06-1	0.0568	0.1119	0.0041	0.1235	0.2673	0.0286	0.2387
5A06-2	0.0058	0.0169	0.0005	0.0177	0.0468	0.0032	0.0436
5A06-3	0.0028	0.0025	0.0005	0.0099	0.0076	0.001	0.0089
5A06-4	0.022	0.0892	0.002	0.0552	0.2071	0.0152	0.1919
5A06-5	0.0185	0.0636	0.0016	0.0461	0.1442	0.0118	0.1324
2A12-1	0.0424	0.0178	0.0013	0.0992	0.0478	0.0116	0.0876
2A12-2	0.0153	0.0067	0.0005	0.0451	0.0243	0.0033	0.0418
2A12-3	0.049	0.0171	0.0015	0.1041	0.0477	0.014	0.0901
2A12-4	0.0252	0.0083	0.0008	0.0584	0.024	0.0065	0.0519
2A12-5	0.0438	0.015	0.0015	0.0905	0.0385	0.0122	0.0783

以 6061-1 号试样为例,图 3 是盐雾试验箱 2 个 循环试验后 4 个试样 (大小约为 5 cm×4 cm)进行小 波变换前后的结果。可以看出,腐蚀形貌图像中的特 征细节已经被提取出来了,变换的目的是分离低频信



原始图像

高频图像A2

垂直高频图像V2

高频图像A2

垂直高频图像V2

息与高频信息。A2 可以看到概貌图, 而从其他子图 中能看到边缘和点等细节。随着盐雾试验时间的延 长, 蚀点和裂缝数目增多, 铝合金表面腐蚀产物形貌 颜色变暗,能量减小,如图4所示。

低频图像A2 水平高频图像H2 垂直高频图像V2 对角线高频图像D2 图 3 原始图像与小波分解子图像 水平高频图像H2 高频图像A2 水平高频图像H2 对角线高频图像D2 垂直高频图像V2 对角线高频图像D2 b 144 h 水平高频图像H2 高频图像A2 水平高频图像H2 对角线高频图像D2 垂直高频图像V2 对角线高频图像D2 d 240 h

c 192 h

a 96 h

图 4 1060 铝合金暴露不同时间后的表面图像小波分解

图像分析法与失重法的相关性分析 3

将特征值 λ 对腐蚀深度作图, 拟合结果如图 5 所 示, 拟合的关系见式 (4)。

(4) $D_m = 7.495 - 30.98\lambda$ ($R^2 = 89.004\%$) 由图 5 和式(4)可以看出,在大气腐蚀初期,试样 腐蚀形貌特征值λ与试样腐蚀深度之间有较高的相关 系数,可以用归纳的铝合金试样大气腐蚀数据识别以 及预测[11-13]。



图 5 1060 铝合金腐蚀产物表面形貌特征值与 腐蚀深度的关系

4 结语

文中运用分形理论和小波变换从模糊图像增强 后的铝合金金属腐蚀表面图像中提取出特征值,作为 腐蚀程度的表征。与以质量损失量为基础的腐蚀深度 特征值进行了相关性对比,得出基于图像分析的特征 提取法的准确度和精度比较高,可以用于沿海装备铝 合金材料大气腐蚀早期行为识别研究。

参考文献:

- [1] 宋诗哲,王守琰,高志明,等.图像识别技术研究有色 金属大气腐蚀早期行为[J].金属学报,2002,38(8): 893-896.
- [2] 王守琰, 高志明, 宋诗哲. 实海试样腐蚀形貌图像特征

提取及分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2001, 13(增刊): 461-463.

- [3] 宋诗哲,王守琰,高志明,等.小波图像分析研究有色 金属大气腐蚀早期行为[C]// 全国腐蚀电化学进展与应 用学术研讨会论文集.昆明:中国腐蚀与防护学会, 2000.
- [4] 徐忠营, 王伟, 孟松鹤, 等. 数字图像相关技术在高温 热膨胀系数测量中的应用[J]. 装备环境工程, 2016, 13(3): 37-42.
- [5] 王金栋, 陈定海, 姜晓明, 等. 铝合金表面腐蚀损伤面 积等效方法分析[J]. 装备环境工程, 2016, 13(1): 33-38.
- [6] 金涛,何卫平,廖圣智,等. 2420-T62 铝合金涂层外场 腐蚀环境下电化学性能研究[J]. 装备环境工程, 2016, 13(1): 8-13.
- [7] 周珊珊, 柴金广. 图像预处理的滤波算法研究[J]. 科学 技术与工程, 2009, 13(9): 3831-3832.
- [8] 张淑玲, 邹复民. 基于小波分析的人脸图像特征提取[J]. 科学技术与工程, 2002,12(6): 1719-1721.
- [9] 李荣, 徐燕华. 基于视觉信息的图像特征提取算法研究[J]. 电子设计工程, 2016, 24(9): 188-190.
- [10] 赵健. 小波与分形理论在图像处理中的应用[D]. 西安: 西北工业大学, 2003:56-123.
- [11] 李晓刚, 董超芳. 西沙海洋大气环境下典型材料腐蚀/ 老化行为与机理[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [12] 翁永基, 李相怡. 腐蚀预测和计量学基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011.
- [13] 赵海滨. Matlab 应用大全[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.