

铝合金预腐蚀剩余寿命的分形维数预测方法

张 川¹ 姚卫星²

1. 南京航空航天大学飞行器先进设计技术国防重点学科实验室, 南京, 210016

2. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京, 210016

摘要: 试验得到在 EXCO 溶液中预腐蚀不同时间的 LC4CS 光滑试件的腐蚀表面轮廓线和剩余疲劳寿命。分析了预腐蚀剩余寿命和断口附近轮廓线分形维数随预腐蚀时间的变化规律, 针对该规律选取分形维数为预腐蚀剩余寿命损伤参量。试验结果表明: 断口附近腐蚀表面轮廓线的分形维数受腐蚀形貌分散性的影响较小, 与剩余寿命呈线性关系且与载荷无关, 由分形维数计算得到的剩余寿命处于二倍分散带之内。

关键词: 预腐蚀; 损伤参量; 分形维数; 剩余寿命

中图分类号: TG146. 21; TG115. 9

DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-132X. 2013. 17. 013

Prediction of Residual Life of Pre-corrosion Aluminum Alloy with Fractal Dimension

Zhang Chuan¹ Yao Weixing²

1. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense—advanced Design Technology of Flight Vehicle, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016

2. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016

Abstract: Several smooth specimens of aluminum alloy LC4CS soaked in EXCO solution for different time were measured to obtain corrosion surface profiles and then tested to obtain residual life. The relationship between pre-corrosion residual life and fractal dimension of profile near fracture for different pre-corrosion time were discussed. Fractal dimension was selected as pre-corrosion damage parameter on residual life. The results show that fractal dimension of corrosion surface profile near fracture is influenced little by dispersion of corrosion surface, and there is a linear relationship between fractal dimension and residual life, which is not related with loading. The residual lives calculated by fractal dimensions are in twice scatter band.

Key words: pre-corrosion; damage parameter; fractal dimension; residual life

0 引言

腐蚀损伤形貌直接影响遭受腐蚀损伤的铝合金结构的剩余寿命, 因此腐蚀形貌是计算剩余寿命的物理出发点, 损伤参量多为腐蚀形貌的某个几何参数。文献[1-3]使用腐蚀深度描述表面腐蚀形貌; 文献[4-6]使用表面腐蚀面积率描述表面腐蚀形貌; 文献[7-8]使用蚀坑的长宽比等参数描述腐蚀表面形貌。然而这些参数都只描述了腐蚀形貌的一个方面, 无法整体上反映腐蚀形貌。文献[9-10]给出了腐蚀表面形貌的分形维数, 认为分形维数可以从整体上表征腐蚀表面形貌复杂程度, 但是并未研究分形维数与剩余寿命之间的关系。

本文以实测腐蚀表面形貌轮廓线为基础, 对垂直于载荷方向的腐蚀表面轮廓线的分形维数进

行了研究。定义分形维数为铝合金预腐蚀后剩余寿命所遭受损伤的表征参量, 得到了铝合金分形维数和剩余寿命之间的关系。

1 试验

1.1 试件

试验材料为 LC4CS 铝板材, 厚度为 2mm。试件尺寸见图 1。试件夹持段及过渡段用硅胶保护, 试验段使用乙醇清洁表面。

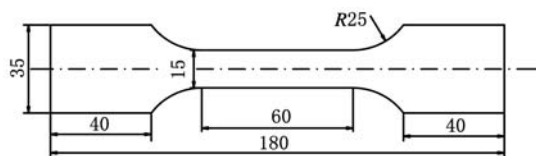


图 1 试件尺寸(mm)

1.2 EXCO 溶液

按航标 HB5455-90 配制 EXCO 溶液, 配方为: NaCl (234g/L)、KNO₃ (50g/L)、HNO₃ (6.5g/L)、H₂O(余量)。

收稿日期: 2013-05-18

基金项目: 江苏省“青蓝工程”科技创新团队资助项目(1001-YPB11001); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

EXCO 溶液体积与试样试验面积之比为 20mL/cm²。由于腐蚀时间较长,每隔 48h 检查一次溶液浓度,适量添加 HNO₃使溶液的 pH 值保持在 0.4。

1.3 LC4CS 腐蚀过程描述

试件浸入 EXCO 溶液后,表面有气泡生成并有轻微变色及腐蚀,但由于钝化膜的保护,没有出现点蚀和剥蚀现象。当金属自腐蚀电位达到其破裂电位时,钝化膜破坏,试样表面出现不连续点蚀,蚀坑边缘有轻微鼓起。点蚀孔向四周和深度方向发展,互相连接的腐蚀坑形成锯齿状。初期由于蚀坑较浅,反应介质充足,腐蚀速度较快;随着浸泡时间的延长,腐蚀速度减慢,试样表面出现少量鼓泡,继而破裂,鼓泡破裂后的试样表面有轻微剥落层;当腐蚀到一定时间后,腐蚀扩展到基体内部,试样表面严重变色,剥蚀严重,从腐蚀形态来看,表层金属已完全脱落,锯齿状不明显(图 2)。

1.4 表面轮廓线

使用 VHX-1000 三维显微镜对试样表面腐蚀形貌进行测量得到横截面轮廓线,测量间距为 1mm,见图 3。轮廓线上每个像素点代表实际尺寸约为 0.4μm。

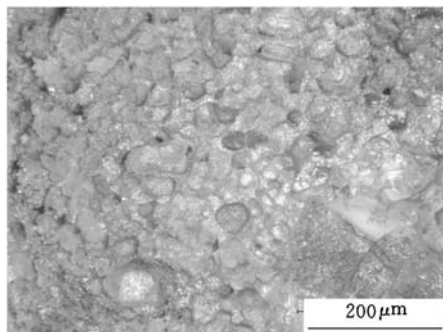


图 2 LC4CS 试件局部表面腐蚀形貌

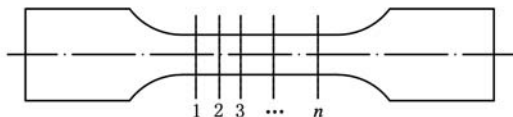


图 3 轮廓线测量示意图

1.5 疲劳试验

室温条件下,对预腐蚀时间分别为 0、50h、100h、150h 和 500h 的试验件进行疲劳加载,采用轴向等幅加载方式,载荷应力比为 0,加载频率为 10Hz。最大加载应力分为两种,其中最大加载应力为 156.53MPa 的有效试验件为 14 件,最大加载应力为 313.03MPa 的有效试验件为 16 件。试件编号及剩余寿命见表 1。

表 1 试件编号及剩余寿命

腐蚀时间 (h)	最大载荷:156.53MPa		最大载荷:313.03MPa	
	试件编号	剩余寿命	试件编号	剩余寿命
0	LC4_2,LC4_3,LC4_20	196026,139449,192616	LC4_13,LC4_14	22997,20752
50	Erofex_3,Erofex_4, Erofex_7	94396,61640,117148	Erof_18,Erof_19, Erof_20,Erof_21,Erof_22	8670,6440,5939 11433,9476
100	Erof_49,Erof_52	95636,62949	Erof_41,Erof_42,Erof_43	7777,4150,6947
150	Erof_71,Erof_72,Erof_73	84983,108014,117211	Erof_65,Erof_66, Erof_67,Erof_81,	6424,7038 4118,7241
500	Erof_87,Erof_88,Erof_89	79925,47381,36920	Erof_92,Erof_93	7339,6063

表 2 腐蚀深度

腐蚀时间 (h)	最大载荷:156.53MPa		最大载荷:313.03MPa	
	平均腐蚀 深度(μm)	最大腐蚀 深度(μm)	平均腐蚀 深度(μm)	最大腐蚀 深度(μm)
0	22.29	28.95	32.75	40.90
50	64.29	82.33	88.34	118.2
100	59.37	91.70	83.12	126.3
150	53.63	89.66	79.01	123.3
500	101.6	116.2	83.04	116.7

2 预腐蚀剩余疲劳寿命损伤参量

2.1 断口附近形貌与分形维数

试验件断裂破坏后,从图 3 中测得的轮廓线中选取最靠近断口两侧的轮廓线,每个试验件选取 5 条,共 150 条,然后测量每条轮廓线上的腐蚀深度,得到不同预腐蚀时间下轮廓线的平均腐蚀深度和最大腐蚀深度,见表 2。其中,轮廓线编号为试件编号加轮廓线数,如 LC4_2 试件的第 3 条轮廓线编号为 LC4_2_3。图 4 给出了不同预腐蚀时间下试验剩余寿命均值随预腐蚀时间的变化规律。

文献[1-3]中对于预腐蚀剩余寿命评估大多采用腐蚀深度作为损伤参量,然而由图 4 可知,随着时间的延长,剩余寿命基本呈单调下降趋势,而表 2 中腐蚀深度却呈现明显波动性,可见腐蚀深度无法很好地表征预腐蚀对于剩余寿命的影响。

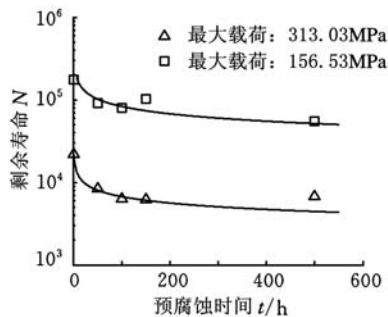


图4 剩余疲劳寿命-预腐蚀时间变化规律

本文用圆规维数描述断口附近腐蚀表面轮廓线。用半径尺寸为 ϵ 的圆规从曲线一端作圆弧和曲线相交,以交点为圆心作下一个圆弧,重复此操作,直至得到曲线总长度为 $L(\epsilon)$ 。减小 ϵ 后测量得到更大的 $L(\epsilon)$ 。当 ϵ 足够小时,可以得到腐蚀表面轮廓线的真实长度。该真实长度包含了蚀坑等腐蚀形貌的完整信息,可以用来描述腐蚀形貌特征。标尺 ϵ 由腐蚀表面轮廓线投影长度逐渐减小到图像可分辨的最小尺寸,作 $\lg L \sim \lg \epsilon$ 图后得到斜率为负的直线,则存在如下幂函数关系:

$$L(\epsilon) = \epsilon^{1-D} \tag{1}$$

式中, D 为腐蚀表面轮廓线的分形维数。

由 $\lg L \sim \lg \epsilon$ 图中直线部分斜率 ($\alpha = 1 - D$) 可计算得到分形维数 D 。计算断口附近 150 条腐蚀表面轮廓线的圆规维数,图 5 给出了 LC4_3_1 轮廓线的 $\lg L \sim \lg \epsilon$ 图,其余轮廓线 $\lg L \sim \lg \epsilon$ 图与其类似。

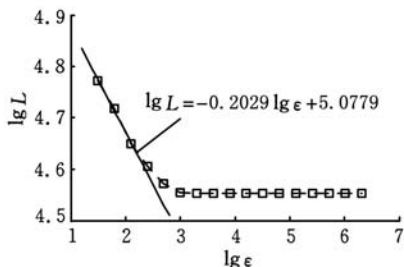


图5 LC4_3_1 轮廓线 $\lg L \sim \lg \epsilon$ 图

腐蚀表面轮廓线为不规则分形,其自相似性是近似的或统计意义上的,这种自相似性只存在于标度不变区域,因此圆规维数的标尺范围也应该在该标度不变区域范围之内。图 5 中 $\lg L \sim \lg \epsilon$ 曲线在一定标度内呈一条直线,其标度不变性是有限的,由该直线斜率可以计算得到分形维数。根据计算得到的五种不同预腐蚀时间下 30 件试验件腐蚀表面轮廓线的分形维数,可求得同一预腐蚀时间下的轮廓线分形维数均值。图 6 给出分形维数均值随预腐蚀时间的变化规律,由图 6 可见,随着腐蚀时间的延长,分形维数有所增大,但渐趋平缓。

2.2 预腐蚀剩余寿命损伤参量

由图 4 和图 6 可知,分形维数 D 和剩余寿命 N 都呈幂函数变化,两者之间应存在一一对应关

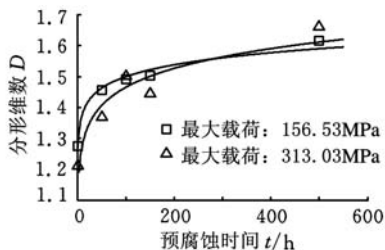


图6 分形维数-预腐蚀时间关系图

系。图 7 对比了不同预腐蚀时间下轮廓线分形维数均值和剩余寿命均值。由图 7 可知,剩余寿命和分形维数之间,具有良好的线性关系。虽然最大载荷不同,但是直线斜率相同。定义断口附近腐蚀表面轮廓线分形维数为预腐蚀剩余寿命损伤参量,图 7 表明预腐蚀剩余寿命损伤参量可以表征预腐蚀对于剩余寿命的影响,而这一参数不受施加载荷的影响。使用断口附近腐蚀表面轮廓线的分形维数作为预腐蚀剩余寿命损伤参量可以很好地描述不同载荷下试件的剩余寿命。

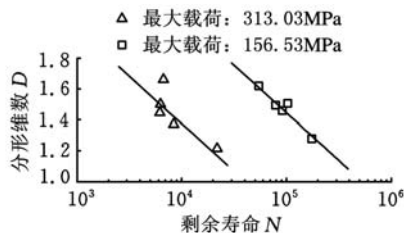


图7 分形维数-剩余寿命关系图

2.3 讨论

剩余寿命均值与分形维数均值之间存在线性关系,且在经受不同疲劳载荷下直线斜率相同,表明铝合金剩余寿命受预腐蚀影响可以用轮廓线分形维数表征且与载荷无关。直线的截距则由当前载荷下未腐蚀试件的剩余寿命决定。因此,预腐蚀试件的剩余寿命可以由轮廓线分形维数和未腐蚀试件疲劳寿命得到。

每条轮廓线都可以根据图 7 中的线性关系计算得到对应试件的剩余寿命。由每个试件的 5 条轮廓线可以得到该试件的计算寿命均值、最大值和最小值,见图 8。

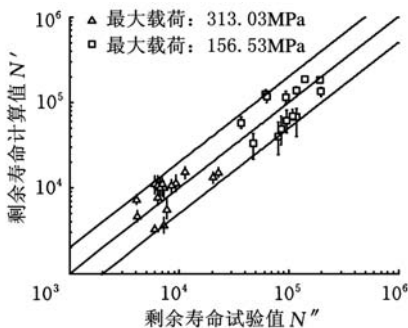


图8 试验剩余寿命-计算剩余寿命

每个试件的剩余寿命计算值均值都处于 2 倍分散带内,仅有部分试件的剩余寿命计算值的最大值或最小值超出 2 倍分散带。虽然轮廓线的选取具有一定的随机性和人为主观性,但无论选取那一条轮廓线,由其分形维数计算得到的剩余寿命大部分都处于 2 倍分散带内。表明腐蚀表面轮廓线分形维数受腐蚀形貌分散性的影响较小,可以很好地表征试件预腐蚀剩余寿命。然而试件剩余寿命不但受到表面腐蚀形貌的影响,同时也受到材料分散性影响。轮廓线分形维数虽然可以表征预腐蚀对剩余寿命的影响,但是无法表征单个试件的材料分散性,因此剩余寿命计算值仍有一定分散性。

3 结论

(1) 腐蚀表面纵向轮廓线的分形维数能够很好地描述腐蚀形貌随预腐蚀时间的变化,其值随预腐蚀时间延长单调上升,并且上升速率逐渐降低。

(2) 分形维数作为预腐蚀剩余寿命损伤参量与剩余寿命之间存在线性关系且与载荷无关。由腐蚀表面纵向轮廓线的分形维数可以预测预腐蚀试件的剩余寿命。

(3) 分形维数作为预腐蚀剩余寿命损伤参量可以减少测量随机性的影响,分析表明无论随机选取那条轮廓线,其计算剩余寿命大多都处于 2 倍分散带内。

参考文献:

[1] DuQuesnay D L, Underhill P R, Britt H J. Fatigue Crack Growth from Corrosion Damage in 7075-T6511 Aluminium Alloy under Aircraft Loading [J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25(5): 371-377.

[2] Sankaran K K, Perez R, Jata K V. Effects of Pitting Corrosion on the Fatigue Behavior of Aluminium Alloy 7075-T6: Modeling and Experimental Studies[J]. Materials Science and Engineering: A, 2001, 297(1/2): 223-229.

[3] 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]. International Journal of Fatigue, 2004, 26(1): 71-80.

[4] 张有宏, 吕国志, 任克亮, 等. 不同环境下 LY12-CZ 铝合金表面腐蚀损伤演化规律研究[J]. 航空学报, 2007, 28(1): 142-145.

Zhang Youhong, Lv Guozhi, Ren Keliang, et al. The Evolution Rhythm of Surface Corrosion Damage of LY12-CZ Aluminum in Varied Environ-

ments[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(1): 142-145.

- [5] 王慧, 吕国志, 张有宏. 铝合金腐蚀损伤演化数学模型[J]. 航空学报, 2007, 28(6): 1355-1358.
- Wang Hui, Lü Guozhi, Zhang Youhong. Corrosion Damage Evolution Model of Aluminum Alloy[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(6): 1355-1358.
- [6] 张有宏, 吕国志, 常新龙, 等. 预腐蚀温度对铝合金 LY12CZ 腐蚀损伤及疲劳性能的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2008, 20(4): 250-252.
- Zhang Youhong, Lü Guozhi, Chang Xinlong, et al. Effect of Pre-corrosion Temperature on Corrosion Damage and Fatigue Performance of Aluminum Alloy LY12CZ[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2008, 20(4): 250-252.
- [7] 张丹峰, 陈跃良. 当量加速试验条件下铝合金腐蚀形态演化规律[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(3): 340-342.
- Zhang Danfeng, Chen Yueliang. Corrosion Damage Evolvement Rule of Aluminum Alloy Under Equivalent Accelerated Condition[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(3): 340-342.
- [8] 张丹峰, 谭晓明, 马力, 等. 服役环境条件下飞机结构铝合金材料孔蚀规律研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(1): 93-96.
- Zhang Danfeng, Tan Xiaoming, Ma Li, et al. Aluminum Pitting Corrosion Damage Rule under Service Environment[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2010, 30(1): 93-96.
- [9] 翁永基, 许述剑, 边丽. 腐蚀和腐蚀模型研究中的分形方法[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2006, 26(5): 315-320.
- Weng Yongji, Xu Shujian, Bian Li. Fractal Methods in Studing Corrosion and Corrosion Model[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2006, 26(5): 315-320.
- [10] 许述剑, 翁永基, 李相怡. 图像分维对腐蚀坑分布特征的分形表征[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2007, 27(2): 109-113.
- Xu Shujian, Weng Yongji, Li Xiangyi. Characterization for Corrosion Pit Distribution by Using Fractal Dimension of Image[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2007, 27(2): 109-113.

(编辑 王艳丽)

作者简介: 张川, 男, 1985 年生。南京航空航天大学航空宇航学院博士研究生。主要研究方向为腐蚀疲劳。发表论文 6 篇。
姚卫星(通信作者), 男, 1956 年生。南京航空航天大学航空宇航学院教授、博士研究生导师。