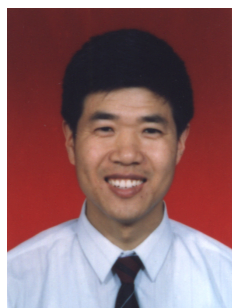


# 铝合金蚀坑损伤参量评述<sup>1)</sup>

孙 辽\* 姚卫星<sup>†,2)</sup>

\*(飞行器先进设计技术国防重点学科实验室, 南京航空航天大学, 南京 210016)

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



姚卫星, 南京航空航天大学教授、博士生导师, 飞行器系主任和飞行器先进设计技术国防重点学科实验室主任. 于西北工业大学飞机设计专业获得学士、硕士和博士学位, 1988~1990 年为清华大学机械工程系博士后, 1990 起在南京航空航天大学任教, 1997~1998 年以高级访问学者身份公派德国. 一直从事飞行器综合设计和结构设计理论和技术的教学和研究工作, 已发表学术论文 200 多篇, 著作 2 部, 教材 2 部. 获省部级科技进步奖 6 项.

**摘要** 将蚀坑损伤参量分成 4 类: 尺寸、形状、统计和试验参数, 回顾了蚀坑深度、投影面积、长宽比、矩形比、表面腐蚀率、分形维数、预腐蚀系数等影响剩余寿命的主要损伤参量, 总结了蚀坑等效成初始裂纹的方法.

**关键词** 蚀坑形貌, 剩余疲劳寿命, 损伤参量, 蚀坑等效

中图分类号: TG171, O346.2+1, V221 文献标识码: A DOI: 10.6052/1000-0879-12-385

## A SURVEY ON DAMAGE PARAMETERS OF ALUMINUM ALLOY CORROSION PIT<sup>1)</sup>

SUN Liao\* YAO Weixing<sup>†,2)</sup>

\*(Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense-Advanced Design Technology of Flight Vehicle, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

†(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract** This paper sorts pit damage parameters into four categories: size, shape, statistical and test parameters, reviews the key damage parameters that affect the residual fatigue life most such as pit depth, projection area, aspect ratio, rectangular ratio, corrosion area ratio, fractal dimension and pre-corrosion coefficient, and summarizes the methods to equal pit as an initial crack.

**Key words** pit morphology, residual fatigue life, damage parameters, pit equivalence

### 引 言

铝合金在航空结构中被广泛应用, 点蚀、剥蚀是其最主要也是最危险的腐蚀失效形式<sup>[1-5]</sup>. 腐蚀加速了结构中疲劳裂纹萌生, Hoepfner 等<sup>[6-9]</sup>,

Muller<sup>[10]</sup>, Goto 等<sup>[11]</sup>, Lindley 等<sup>[12]</sup> 和 Kondo<sup>[13]</sup> 在研究中都发现疲劳裂纹多起始于蚀坑. Pao 等<sup>[14-15]</sup> 对 7000 系列铝合金的试验发现蚀坑导致应力强度因子门槛值和裂纹起始寿命降低 50%

2012-10-16 收到第 1 稿, 2013-03-31 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金项目 (51275241) 和江苏省优势学科建设项目资助.

2) E-mail: wxyao@nuaa.edu.cn

以上, Sankaran 等<sup>[16]</sup>对 7075-T6 的研究发现蚀坑引起剩余强度降低 40% 左右. 腐蚀严重影响了结构安全, Budnick<sup>[1]</sup>, Cole 等<sup>[17]</sup>, Shekhter 等<sup>[18]</sup>和 Mills 等<sup>[19]</sup>的报告中详尽分析了波音 737, F/A-18, P-3, C-130, F5 和 F-111A 等飞机在服役或试验过程中因腐蚀引起的事故. Hoepfner 等<sup>[6]</sup>对美国国家运输安全委员会、瑞典民航局等机构关于固定翼和直升机飞行事故的调查报告分析发现其中有 10%~16% 的事故与腐蚀有关. 有报告称, 截止到 2000 年 64% 的美国产飞机已经超过了设计寿命<sup>[20]</sup>, 机队日常检修维护和老旧飞机延寿迫切需要根据使用环境对其剩余寿命和耐久性重新评估.

在铝合金腐蚀早期主要以点蚀为主, 许多学者围绕蚀坑形貌开展了广泛的研究. 为了对腐蚀状况定量描述, 研究者首先通过超声波<sup>[21-22]</sup>、光散射<sup>[23]</sup>、白光干涉显微照相<sup>[24-25]</sup>、涡流<sup>[26]</sup>、X 射线显微照相<sup>[21,26]</sup>等无损检测手段得到蚀坑形貌. 数字图像处理是蚀坑形貌分析的主要手段, 通过灰度增强、边缘检测、图像分割、二值化的处理过程可以清晰地将蚀坑从背景中分离出来, 常用的处理软件有 Image-Pro Plus, UTHSCSA Image Tool 2.00 alpha 3, Image Tool 和 Matlab. DuQuesnay 等<sup>[3]</sup>, Sankaran 等<sup>[16]</sup>, 韦丽金<sup>[27]</sup>, Walde 等<sup>[28]</sup>用蚀坑深度、投影面积、长宽比等参数描述蚀坑的几何尺寸, Birt 等<sup>[26]</sup>, Silva 等<sup>[29]</sup>用矩形度成功对蚀坑形貌分类, Codaro 等<sup>[30]</sup>, Guillaumin 等<sup>[31]</sup>对描述蚀坑几何形貌的参量进行了总结和分类. 张玮<sup>[32]</sup>, 许成龙等<sup>[33]</sup>在腐蚀形貌分析中引入分形理论, 发现腐蚀表面的分形维数与预腐蚀时间、剩余疲劳寿命都成线性关系. 试验方面, 陈群志等<sup>[34]</sup>, 贺小帆等<sup>[35]</sup>定义腐蚀件和未腐蚀件剩余疲劳寿命的比值为预腐蚀系数, 从而对现有的 S-N 曲线修正. 目前, 以一个或多个损伤参量将蚀坑等效成初始裂纹, 然后用断裂力学方法计算裂纹扩展寿命是分析结构环境耐久性的主要方法. 如何通过无损检测方法及时发现腐蚀损伤, 用什么损伤参量对腐蚀状况定量评定, 以及怎样分析

剩余寿命和剩余强度是研究的重点.

材料、腐蚀介质、腐蚀条件不同, 蚀坑形貌复杂多样, 难以用统一的参量描述腐蚀状况. 本文将常用的蚀坑损伤参量分成尺寸参数、形状参数、统计参数和试验参数 4 类. 尺寸参数和形状参数反映了单个蚀坑在某个方向的大小和不规则程度, 是初始裂纹等效的重要参数. 统计参数刻画了整体平均的腐蚀损伤情况, 试验参数直接反映腐蚀对疲劳寿命的缩减. 本文对蚀坑深度、投影面积、长宽比、矩形比、表面腐蚀率、分形维数、预腐蚀系数等影响剩余寿命的主要损伤参量进行了回顾, 总结了初始裂纹等效的方法, 以及各参数与剩余寿命的关系.

## 1 损伤参量分类

铝合金的腐蚀是材料与介质发生一系列电化学反应的结果, 材料性能和腐蚀介质不同导致蚀坑形貌复杂多变, 轮廓线很不规则, 难以用统一的参量表征所有的腐蚀状况. Codaro 等<sup>[30]</sup>对蚀坑宽度等几何细节参数进行了总结, Guillaumin 等<sup>[31]</sup>对长宽比等描述蚀坑形状的参量进行了分类, ASTM (american society of testing material)<sup>[36]</sup>和 ISO (international organization for standardization)<sup>[37]</sup>对蚀坑密度等反应整体腐蚀状况的统计学参量进行了总结. 研究者分析了所有可测的蚀坑几何参数对结构剩余寿命的影响, 总结出与剩余寿命有关的损伤参量主要有蚀坑深度、投影面积、长宽比、矩形比、表面腐蚀率、分形维数.

本文将描述蚀坑损伤的参量分为尺寸参数、形状参数、统计参数和试验参数 4 类, 如表 1 所示. 尺寸参数表征了蚀坑在某个方向的大小, 形状参数反映了蚀坑的不规则程度, 这两者都是针对单个蚀坑而言, 主要反映了腐蚀损伤的局部特征. 统计参数针对整个腐蚀表面, 主要刻画了整体的腐蚀损伤情况, 反映了腐蚀的平均水平. 前 3 者都是基于对蚀坑形貌的分析或测量而得到的损伤参量, 试验参数忽略过程与细节, 直接反映腐蚀对疲劳寿命的缩减.

表 1 损伤参量分类

类别	损伤参量
尺寸参数	深度 $h$ 、投影面积 $A_p$ 、宽度 $w$ 、面积 $A_s$ 、蚀坑总面积 $A_T$ 、坑口面积 $A_m$ 周长 $p$ 、凸蚀坑周长 $p_c$ 、坑口半径 $r_m$ 、最大坑半径 $r_M$
形状参数	长宽比 $A_R$ 、矩形比 $A_B$ 、圆度 $R$ 、等高线异常 $H$ 、延伸率 $E$
统计参数	表面腐蚀率 $\alpha$ 、分形维数 $D$ 、粗糙度 $R_z$ 、蚀坑密度 $p_d$
试验参数	预腐蚀系数 $C(t)$

蚀坑损伤参量是分析腐蚀后结构剩余疲劳寿命的重要参数. 结构损伤容限和环境耐久性分析时常将腐蚀件在循环载荷下疲劳断裂过程看成是半椭圆或半圆形裂纹的扩展 (图 1, 其中,  $c$  和  $a$  分别为半椭圆裂纹的短轴和长轴), 然后用断裂力学的方法计算裂纹扩展寿命, 尺寸参数和形状参数是初始裂纹等效时的主要参数, 选用不同的参数组合得到不同的初始裂纹尺寸 (图 2). 其中, 统计参数一般与剩余疲劳寿命成某种关系, 对腐蚀形貌分析得到统计参数后通过剩余寿命的经验公式能直接预测寿命. 试

验参数通过大量的腐蚀和疲劳试验可以得到预腐蚀系数与腐蚀时间的关系, 即  $C(t)$  曲线, 从而对常规 S-N 修正得到任意预腐蚀时间下的剩余疲劳寿命.

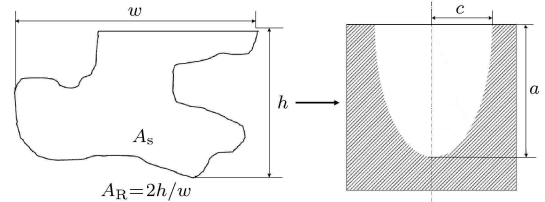


图 1 单蚀坑初始裂纹等效示意图

$$\left. \begin{array}{l} \text{蚀坑} \xrightarrow{\substack{\text{初始裂纹} \\ \text{等效}}} \text{表面裂纹} \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{半圆形裂纹}(r) \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} A_s : r = \sqrt{2A_s/\pi} \\ h : r = h \\ w : r = w/2 \end{array} \right. \\ \text{半椭圆形裂纹}(a, c) \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} h + w : a = h, c = w/2 \\ A_s + h : a = h, c = 2A_s/\pi h \\ A_s + A_R : a = \sqrt{2A_R A_s/\pi}, c = \sqrt{2A_s/(\pi A_R)} \\ h + A_R : a = h, c = h/A_R \end{array} \right. \end{array} \right\} \end{array} \right.$$

图 2 单蚀坑初始裂纹等效的参数计算

## 2 尺寸参数

对蚀坑形貌不同角度的测量得到反映蚀坑大小的尺寸参数, 宽度和深度分别反映了腐蚀在横向和纵向的发展, 周长和面积刻画了包络轮廓的二维特征, 曲率半径是反映蚀坑尖锐程度的细节参数. 用断裂力学方法分析腐蚀剩余寿命时, 由于蚀坑形貌很不规则 (如锐角), 若直接将蚀坑作为初始裂纹将不满足断裂力学的基本假设, 必须对蚀坑进行等效, 蚀坑深度、宽度和投影面积都是裂纹等效时的重要蚀坑损伤参量.

### 2.1 蚀坑深度 $h$

许多学者对点蚀过程的观察都发现, 蚀坑向着重力方向生长更快, 因而蚀坑的表面尺寸一般等于或小于深度方向的尺寸 [36-37]. 但 Silva 等 [29] 对 2024-T3 铝合金在 3.5% 人工海水的腐蚀试验发现, 随着腐蚀时间的增加, 蚀坑将更倾向于沿着试件表面生长, 蚀坑宽度大于深度. 无论蚀坑生长的方向如何, 对预腐蚀试验或现役飞机的外场数据的统计分析都发现, 蚀坑深度随预腐蚀时间单调增加, 可以用指数函数来表示 (式 (1)), 但腐蚀速率单调降低 [38-40]. Walde 等 [28] 对 2024-T3 预腐蚀件的试验发现, 平均腐蚀深度不仅随腐蚀时间增加而增大, 而且与试件的材料方向有关, LT 方向试件的平均蚀

坑深度大于 L 方向试件, 最大腐蚀深度在两种材料方向上都随腐蚀时间增加而减小.

$$H = kt^m \quad (1)$$

式中,  $k$  和  $m$  为材料与环境决定的常数,  $1/3 < m < 1$ ,  $t$  为腐蚀时间.

蚀坑沿厚度方向的生长严重减小结构的截面积, 引起应力集中, 加速了疲劳裂纹的形成. DuQuesnay 等 [3] 认为应将最大深度作为预测剩余疲劳寿命的损伤参量, 但许多学者对预腐蚀后疲劳断口的分析都发现疲劳裂纹不一定起源于最深蚀坑, 他们认为应该用平均腐蚀深度表征腐蚀损伤, 因为各腐蚀损伤深度在平均深度附近分布密度最大, 可以较为合理表征各处的损伤情况. 初始裂纹等效时不同学者选用了不同的深度值, DuQuesnay 等 [3] 分别选择最大蚀坑深度和平均危险蚀坑深度, Hoepfner 等 [6], Sankaran 等 [16], 陈跃良等 [41], 任克亮等 [42], Xiang 等 [43-44], Dolley 等 [45], Crawford 等 [46] 选用平均蚀坑深度, 预测的剩余寿命和试验值都符合得很好.

### 2.2 投影面积 $A_s$

腐蚀坑减小了结构的截面积, 可以看成是在试件表面形成了多个缺口, 引起应力集中, 导致疲劳裂纹的过早形成. Crawford 等 [46] 建立了剩余疲劳

寿命和载荷大小、应力比、蚀坑深度、投影面积、宽度之间的多元线性回归模型, 从统计学的角度分析了各损伤参量对剩余疲劳寿命的影响程度, 结果表明蚀坑投影面和剩余寿命的相关性最高。

Murakami<sup>[47]</sup> 采用体力法分别求解了半椭圆、矩形、三角形表面裂纹的 I 型应力强度因子  $K_I$ 。他们通过研究金属夹杂物 ( $< 10 \text{ mm}$ ) 的投影面积和表面裂纹应力强度因子的关系表明, 虽然不同形状表面裂纹的 I 型应力强度因子最大值  $K_{I_{\max}}$  的出现位置不同, 但  $K_{I_{\max}}$  与裂纹面积存在一定关系<sup>[48-50]</sup>。韦丽金<sup>[27]</sup> 将局部的腐蚀损伤看成缺口, 根据 Murakami 提出的基于缺口投影面积的缺口件疲劳极限解得到了点蚀坑疲劳缺口系数

$$K_f = \frac{\sigma_{-1} A_s^{1/12}}{1.43 C_L (H\nu + 120)} \quad (2)$$

式中,  $A_s$  为蚀坑投影面积,  $C_L$  为疲劳强度的载荷类型修正系数,  $H\nu$  为 Vickers 硬度,  $\sigma_{-1}$  为疲劳极限。

### 2.3 基于尺寸参数的蚀坑当量方法

腐蚀表面有许多蚀坑, 形貌各异, 但试验发现疲劳裂纹多起源于危险蚀坑, 而非同时在多处萌生, 工程中常将腐蚀件在疲劳载荷下的断裂过程看成是单裂纹的扩展 (图 1)。何卫平等<sup>[51]</sup> 分别采用了 3 种蚀坑当量方法: 以平均蚀坑深度和宽度当量成半椭圆表面裂纹、以危险蚀坑深度和宽度当量为半椭圆表面裂纹、面积相等当量为半圆表面裂纹, 预测的结果表明以两种半椭圆表面裂纹与半圆表面裂纹分别计算得到的裂纹扩展寿命基本相当。Shekhter 等<sup>[18]</sup> 认为, 蚀坑当量时不同的材料选用的损伤参量组合也不同, 如 7010-T7651( $A_s$ )<sup>[18]</sup>, D6ac steel( $h$ )<sup>[19]</sup> 和 7050 ( $h + A_R$ )<sup>[52]</sup>。

随着预腐蚀时间的增长, 常在大的蚀坑底部有次级蚀坑出现。尤其是对于剥蚀, 试件表面层脱落后次级蚀坑会继续生长。一些学者提出将这种情况看成是厚度均匀减小和局部损伤的共同作用, 厚度的均匀减小导致截面积变小而引起名义应力增大, 次级蚀坑等局部损伤造成应力集中而促进裂纹的萌生或扩展<sup>[53]</sup>。

将测量的蚀坑大小直接作为初始裂纹尺寸, 计算得到的裂纹扩展寿命一般小于疲劳试验的结果, 预测结果偏保守<sup>[42]</sup>。一些学者根据裂纹扩展公式将预腐蚀后的剩余疲劳寿命反推得到等效初始裂纹长度 (equivalent initial flaw size, EIFS), 该尺寸一般小于蚀坑的直接测量值。Shekhter 等<sup>[18]</sup>, Mills

等<sup>[19]</sup> 定义了裂纹当量系数 (crack metric ratio:  $\text{CMR} = \text{EIFS}/\text{measured pit size}$ ),  $\text{CMR}$  符合对数正态分布。

将蚀坑等效成单个裂纹没有考虑蚀坑间的相互影响, 而事实上各蚀坑之间相互耦合, 裂纹的萌生和扩展总是沿着结构最薄弱的承载路径发展。研究者在 2024-T3<sup>[54]</sup>, 7075<sup>[15-16]</sup> 和 7475<sup>[55]</sup> 的预腐蚀疲劳试验中都观察到了萌生于多个蚀坑的裂纹, DuQuesnay 等<sup>[3]</sup> 对 7075-T6511 的研究发现在温和与严峻的腐蚀损伤处萌生多处裂纹的可能性是相同的。Walde 等<sup>[56]</sup> 采用多处损伤 (multiple site damage, MDS) 的分析方法对萌生于 2024-T3 蚀坑的多裂纹扩展进行了研究, 萌生裂纹的危险蚀坑同时扩展得到的预测寿命与实验值最接近。Walde 等<sup>[28]</sup> 后来对萌生于 2024-T3 蚀坑的多裂纹扩展提出了新见解: 任意两个蚀坑同时扩展, 所有组合中最短的计算寿命结果与试验寿命最接近。

## 3 形状参数

对预腐蚀件的疲劳断口分析发现, 疲劳裂纹多起源于蚀坑, 裂纹扩展驱动力在裂尖的分布主要取决于蚀坑形状。但实际结构的蚀坑形状很不规则, 形状参数反映了形状的畸变程度。

### 3.1 蚀坑长宽比 $A_R$

蚀坑破坏了结构的连续性, 常常引起应力集中。Cerit 等<sup>[57]</sup>、谭晓明等<sup>[58]</sup> 建立一系列的三维半椭圆形蚀坑的有限元模型, 研究蚀坑长宽比 ( $A_R = h/2w$ ) 对蚀坑附近应力分布的影响, 得到了应力集中系数和长宽比的经验公式 (式 (3)), 理论应力集中系数  $K_t$  随长宽比的增大而增大, 最大应力多出现在蚀坑底部或蚀坑口稍微靠下的位置。

$$K_t = \frac{1+6.6(h/2w)}{1+2(h/2w)} \quad (3)$$

式中,  $h$  和  $2w$  分别为蚀坑深度和宽度。

工程中常将蚀坑等效成半椭圆形表面裂纹, 进而分析剩余疲劳寿命。应力强度因子 (stress intensity factor, SIF) 一般采用 Newman 等<sup>[59]</sup> 利用有限元方法给出的表面裂纹前缘点的应力强度因子解。

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi \frac{a}{Q}} F \left( \frac{a}{t}, \frac{a}{c}, \frac{c}{b}, \varphi \right) \quad (4)$$

式中,  $\sigma$  为远端应力,  $Q$  为裂纹形状参数,  $a$  和  $c$  分别为椭圆裂纹长、短轴,  $t$  和  $b$  分别为试件的厚度和宽度,  $F$  为裂纹形状修正因子,  $\varphi$  为椭圆积分函数。

由式(4)可以得出, 蚀坑的长宽比影响了蚀坑附近应力强度因子的分布. 对于表面裂纹, 当  $a/c < 0.6$  时, 最大的 SIF 出现在裂纹与试件表面的交点处; 当  $a/c > 0.6$  时, 最大的 SIF 出现在裂纹底部. 裂纹在深度和宽度方向的扩展速率不同, 椭圆裂纹的长宽比影响了裂纹的扩展方向. 谭晓明等<sup>[58]</sup> 建立半球形和半球形的三维有限元模型分析 LY12CZ 试件表面蚀孔的应力分布, 得到半椭圆形蚀孔比半球形对飞机安全构成的潜在危害性更大的结论. Walde 等<sup>[28]</sup> 对 2024-T3 的预腐蚀试验发现, 平均蚀坑长宽比随腐蚀时间增加而减小, 大蚀坑的长宽比是影响疲劳性能的重要参数. 因此在蚀坑等效成裂纹时, 常将蚀坑的长宽比直接作为椭圆裂纹的长宽比.

### 3.2 矩形度 $A_B$

为了对蚀坑形貌的规则程度定性描述, 有学者<sup>[28-30,60]</sup> 定义了矩形度  $A_B$ .  $A_B$  将蚀坑分成圆锥形 ( $A_B = 1/2$ )、半球形 ( $A_B = \pi/4$ ,  $A_R < 2$ (闭合型),  $A_R > 2$ (张开型))、圆柱形 ( $A_B = 1$ ). 在圆锥形、半球形与圆柱形之间的过渡区, 蚀坑形状主要取决于原始缺陷(如夹杂、微裂纹、沉淀物等), 这种蚀坑将向稳定的蚀坑转变. Walde 等<sup>[28]</sup> 对 2024-T3 的研究发现,  $A_B$  值多集中在 0.5 附近, 表明蚀坑多为圆锥形. 许多学者对腐蚀件截面轮廓的分析结果表明, 用矩形度对蚀坑形状分类是十分有效的.

$$A_B = \frac{A_s(V_p)}{S_r(V_c)} \quad (5)$$

式中,  $A_s$ ,  $V_p$  分别为蚀坑截面面积和体积,  $S_r$ ,  $V_c$  分别为包围蚀坑的最小矩形面积和最小六面体体积.

## 4 统计参数

尺寸参数和形状参数都是针对单个蚀坑, 只能反映局部的损伤状况. 腐蚀时间越长, 结构被腐蚀区域越大, 整体承载能力下降, 局部损伤参量很难准确描述大面积的腐蚀情况. 统计参量描述了局部细节与整体的相对关系, 反映了腐蚀的平均水平.

### 4.1 表面腐蚀率 $\alpha$

铝合金经腐蚀后在试件表面产生了大量蚀坑, 不同腐蚀环境下蚀坑的密度和分布不同, 腐蚀时间越长表面蚀坑面积越大, 表面腐蚀率反映了腐蚀的严重程度, 其定义为

$$\alpha = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n A_{s_i} \times 100\% \quad (6)$$

式中,  $n$  为蚀坑的数目,  $A_{s_i}$  为第  $i$  个蚀坑的平面投影面积,  $A$  为腐蚀区的表面积.

张有宏等对 LY12CZ 的腐蚀试验发现表面腐蚀率的概率分布符合 Logistic 分布<sup>[61]</sup>, 表面腐蚀率和疲劳剩余寿命符合指数关系<sup>[62-63]</sup>, 即

$$N_f = c_1 e^{-c_2 \alpha} \quad (7)$$

式中,  $c_1$  和  $c_2$  均为拟合参数,  $N_f$  为预腐蚀剩余寿命.

### 4.2 分形维数 $D$

蚀坑形貌局部和整体的不规则性以及自相似性使其具有分形的特征. 张玮等<sup>[32,64]</sup>、许成龙等<sup>[33]</sup>、卞贵学等<sup>[65]</sup> 用盒子维法、小岛法计算了腐蚀形貌二维灰度图像的分形维数, 分维值越大腐蚀图像表面越不规则、越粗糙, 分维值越小则越趋于平坦光滑, 分维值可定量描述腐蚀过程中试件表面的凹凸起伏和不规则程度. 许述剑等<sup>[66-67]</sup>、穆志韬等<sup>[68]</sup> 通过对蚀坑分布分维值和腐蚀图像的二维、三分维值的计算发现, 腐蚀图像二维分维值和三分维值在数值上分别相当于蚀坑直径和深度分布分维.

研究表明, 腐蚀图像的分形维数和预腐蚀时间、剩余疲劳寿命之间呈线性关系<sup>[64-68]</sup>. 图 3 为 LC4CS 铝合金经 EXCO 溶液腐蚀后, 截面轮廓线的分形维数与剩余疲劳寿命的曲线, 两者呈高度线性关系<sup>[69]</sup>.

许多学者的研究表明, 统计参数与剩余疲劳寿命之间存在某种关系, 如表面腐蚀率与分形维数和剩余寿命分别成指数与线性关系, 可以通过试验得到统计参数和剩余寿命的经验公式. 分析腐蚀后剩

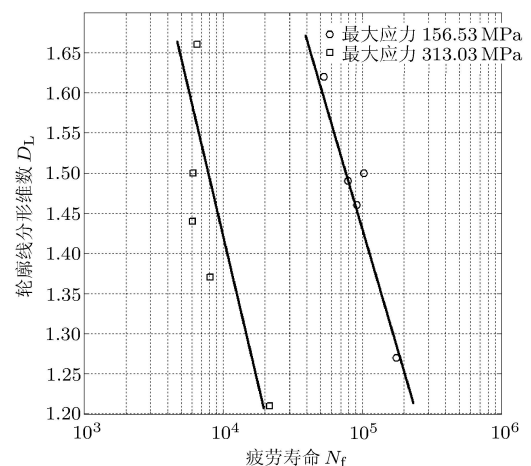


图 3 截面轮廓线分形维数和疲劳剩余寿命关系<sup>[69]</sup>

余寿命时只需要通过腐蚀形貌分析得到以上统计参量, 利用经验公式就可以直接预测剩余疲劳寿命。

### 5 试验参数

腐蚀情况非常复杂, 在目前的条件下要得到清晰准确的腐蚀形貌图像十分困难, 图像处理、测量过程与操作者的试验水平和熟练程度有很大的关系, 带有较大的主观性和不可重复性。刘文斑等 [34-35,70-71] 定义了预腐蚀系数 (又称腐蚀影响系数)  $C(t)$ , 忽略腐蚀的过程和细节, 直接考虑腐蚀对剩余疲劳寿命的缩减

$$C(t) = N_{50}(t)/N_{50}(0) \quad (8)$$

其中,  $N_{50}(t)$  和  $N_{50}(0)$  分别是构件预腐蚀  $t$  时间后、未经预腐蚀在使用载荷下的剩余寿命均值。

$N_{50}(0)$  可由常规名义应力法估算得到。  $N_{50}(t)$  可根据预腐蚀 S-N 曲线通过名义应力法估算得到, 也可通过使用载荷下的疲劳试验直接得到, 如图 4。

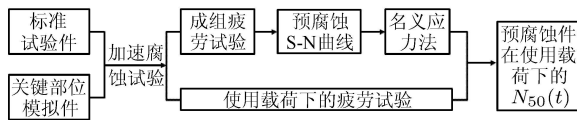


图 4 预腐蚀结构在使用载荷下的剩余寿命

#### 5.1 加速腐蚀试验

预腐蚀试验时为了加快腐蚀, 并再现结构在服役环境中的损伤过程, 需要根据环境谱进行加速腐蚀试验。腐蚀溶液成分和浓度、酸度、温度、是否搅拌等都是影响腐蚀进程的重要因素, 加速腐蚀谱通过改变环境谱中某些因素从而使得腐蚀加速, 但腐蚀进程与环境谱一致, 仅仅减少腐蚀时间。对于不同加速腐蚀谱, 最关键的技术是定义和计算加速腐蚀因子, 使得加速腐蚀谱与实际服役的环境谱相对应。加速腐蚀因子通常指达到相同腐蚀量时不同环境下腐蚀时间的对应关系, 可以表达为

$$K_p = \frac{T}{t} \Big|_{D_p=d_p} \quad (9)$$

式中,  $T, t$  分别为加速度腐蚀谱和环绕腐蚀谱造成相同损伤的时间;  $D_p$  和  $d_p$  分别为加速腐蚀谱和环境谱造成的损伤。

贺小帆等 [72-78] 通过不同的腐蚀损伤评价指标给出了多种加速腐蚀因子计算方法, 如表 2。

表 2 加速腐蚀因子

加速腐蚀因子	评价指标
$K_p = \frac{T}{t} \Big _{N_p(T)=N_p(t)}$	疲劳寿命 [72-73]
$K_p = \frac{T_p}{t_p} \Big _{C(T)=C(t)}$	预腐蚀影响因子 [74]
$K_p = \frac{T}{t} \Big _{DFR(T)=DFR(t)}$	DFR 值 [75]
$K_p = \left(\frac{a}{A}\right)^{1/\alpha}$	腐蚀深度 [76-77]
$K_p = \frac{T}{t} \Big _{\sigma_{F,P}(T)=\sigma_{F,P}(t)}$	疲劳强度 [78]

#### 5.2 $C(t)$ 曲线

通过成组的预腐蚀和疲劳试验可得到不同腐蚀时间  $t$  对应的  $C(t)$ , 对有限的试验数据拟合即可得到  $C(t)$  曲线。根据预腐蚀系数的定义,  $C(t)$  应满足 3 个条件:  $t = 0$  时,  $C(0) = 1$ ;  $t = \infty$  时,  $C(\infty) = 0$ ;  $C'(t) < 0$ 。许多学者通过试验研究, 给出了  $C(t)$  曲线的不同拟合表达式, 如表 3。陈群志等 [34], 贺小帆等 [35] 对实验数据的统计结果表明预腐蚀系数  $C(t)$  与应力水平和载荷谱无关, 具有很好的通用性。

表 3  $C(t)$  曲线表达式

作者	$C(t)$ 曲线表达式
陈群志等 [34]	$C(t) = 1 + \lambda t$
贺小帆等 [35]	$C(t) = 10^{bt}$
赵海军等 [79-80]	$C(t) = e^{\alpha t} S^{\beta t}$
张蕾等 [81]	$C(t) = 1 - \beta t^\alpha$

注:  $\lambda, b, \alpha, \beta$  均为拟合参数,  $S$  为应力。

腐蚀环境多种多样, 不同腐蚀环境中的  $C(t)$  曲线不同, 针对不同的环境都要通过实验拟合得到  $C(t)$  曲线, 导致试验工作量巨大。刘文斑等 [82] 针对空中弱腐蚀环境影响的分离化处理办法, 能够在一定程度上减少工作量, 假设环境包含  $i = 0, 1, \dots, q$  共  $(q + 1)$  种介质成分, 每种成分所占百分比为  $y_i$ , 单一介质成分的预腐蚀疲劳影响系数为

$$\xi_{ij} = N_{ij}/N_0 \quad (10)$$

其中,  $N_{ij}$  为在第  $i$  种腐蚀介质中经与第  $j$  个时间间隔后的疲劳寿命,  $N_0$  为标准实验室环境下的疲劳寿命。

多种介质的腐蚀环境下的预腐蚀系数为

$$C = \sum_{i=0}^q \xi_{ij} y_i \quad (11)$$

### 5.3 常规 S-N 曲线修正

用  $C(t)$  曲线修正常规 S-N 曲线就得到不同预腐蚀时间下的 S-N 曲线, 然后采用名义应力法等疲劳寿命估算方法就可以估算结构件在不同预腐蚀时间下的疲劳寿命。

但是预腐蚀系数法不关注腐蚀疲劳发展的过程, 缺少理论的支持, 而且需要大量的试验才能得到  $C(t)$  曲线, 试验周期长, 费用高。

## 6 结束语

环境腐蚀促进了疲劳裂纹的萌生, 减小了结构的疲劳寿命。蚀坑形貌复杂多变, 很不规则, 难以用统一的损伤参量描述腐蚀状况。尺寸参数、形状参数和统计参数刻画了局部和整体腐蚀损伤情况, 不同的腐蚀情况应选用不同的损伤参量。

结构环境耐久性分析时, 选用不同的损伤参量和不同的裂纹等效方法得到的剩余疲劳寿命预测值不同, 不同材料应选用不同的损伤参量和裂纹等效方法。

材料和腐蚀环境不同, 铝合金发生的腐蚀情况也多种多样, 点蚀只是其中常见的一种。实际服役结构常常是多种腐蚀相互促进, 对腐蚀形貌的分析和损伤参量的描述比点蚀更复杂。

试验参数忽略腐蚀的过程和细节, 通过有限的试验对现有的 S-N 曲线修正, 简单易行, 但是周期长费用高。

## 参考文献

- Budnick J. NAVAIR air vehicle corrosion challenges. In: Tri-Service Corrosion Conference, Las Vegas, 2003
- 杨晓华. 腐蚀累积损伤理论研究与飞机结构日历寿命分析. [博士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2002 (Yang Xiaohua. Study on corrosion cumulative damage rules and the calendar life of aircraft structures. [PhD Thesis]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2002 (in Chinese))
- DuQuesnay DL, Underhill PR, Britt HJ. Fatigue crack growth from corrosion damage in 7075-T6511 aluminum alloy under aircraft loading. *International Journal of Fatigue*, 2003, 25(5): 371-377
- 张有宏, 吕国志, 陈跃良. LY12-CZ 铝合金预腐蚀及疲劳损伤研究. *航空学报*, 2005, 26(6): 779-782 (Zhang Youhong, Lü Guozhi, Chen Yueliang. Predicting fatigue life from pre-corroded LY12-CZ aluminium test. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2005, 26(6): 779-782 (in Chinese))
- 沈海军. 铝合金腐蚀疲劳机理与腐蚀疲劳寿命分析方法综述. *飞机工程*, 2006, (2): 32-35 (Shen Haijun. Corrosive fatigue mechanism and life analysis of aluminum alloy. *Aircraft Engineering*, 2006, (2): 32-35 (in Chinese))
- Hoepfner DW, Chandrasekaran V, Taylor AMH. Review of pitting corrosion fatigue models. In: *Structural Integrity for the Next Millennium: Proceedings of the 20th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue*, Dayton, 1999
- Hoepfner DW, Mann W. Fracture mechanics based modeling of corrosion fatigue process. In: *Corrosion Fatigue: Proceedings of the 52nd meeting of the AGARD Structural and Materials Panel*, Turkey, 1981
- Hoepfner DW. Model for prediction of fatigue lives based upon a pitting corrosion fatigue process. STP359175, 1979
- Kimberli J, Hoepfner DW. Pit-to-crack transition in pre-corroded 7075-T6 aluminum alloy under cyclic loading. *Corrosion Science*, 2005, 47(9): 2185-2198
- Muller M. Theoretical considerations on corrosion fatigue crack initiation. *Metallurgical and Materials Transactions*, 1982, 13(4): 649-655
- Goto M, Nisitani H. Crack initiation and propagation behavior of a heat treated carbon steel in corrosion fatigue. *Fatigue Fracture Engineering Material Structure*, 1992, 4(15): 353-363
- Lindley TC, McIntyre P, Trant PJ. Fatigue crack initiation at corrosion pits. *Metals Technology*, 1982, 9(3): 135-142
- Kondo Y. Prediction of fatigue crack initiation life based on pit growth. *Corrosion Science*, 1989, 45(1): 7-11
- Pao PS, Feng CR, Gill SJ. Corrosion-fatigue crack initiation in 7000-series Al alloys. In: *The Proceedings of Second Joint NASA/FAA/DoD Conference on Aging Aircraft*. Langley, 1999
- Pao PS, Gill SJ, Feng CR. On fatigue crack initiation from corrosion pits in 7075-T7351 aluminum alloy. *Scripta Materialia*, 2000, 43(5): 391-396
- Sankaran KK, Perez R, Jata KV. Effects of pitting corrosion on the fatigue behavior of aluminum alloy 7075-T6: Modeling and experimental studies. *Materials Science and Engineering*, 2001, 297(1-2): 223-229
- Cole GK, Clark G, Sharp PK. The implications of corrosion with respect to aircraft structural integrity. DSTO-RR-0102, 1997
- Shekhter A, Loader C, Hu W, et al. Assessment of the effect of pitting corrosion on the safe life prediction of the P-3C. DSTO-TR-2080, 2007
- Mills T, Sharp PK, Loader C. The incorporation of pitting corrosion damage into F-111 fatigue life modeling. DSTO-RR-0237, 2002
- Pitt S, Jones R. Multiple-site and widespread fatigue damage in aging aircraft. *Engineering Failure Analysis*, 1997, 4(4): 237-257
- Shell E. Prediction of residual fatigue life from NDE of corroded components. [PhD Thesis]. Dayton: University of Dayton, 2002
- Scheuring JN, Grandt AF. Quantification of corrosion damage utilizing a fracture mechanics based methodology. In:

- The Proceedings of Third Joint FAA/DOD/NASA Conference on Aging Aircraft. Albuquerque, New Mexico, 1999
- 23 Zhao YP, Cheng CF, Wang GC, et al. Characterization of pitting corrosion in aluminum films by light scattering. *Applied Physics Letters*, 1998, 73(17): 2432-2434
- 24 Frantziskonis GN, Simon LB, Woo J, et al. Multiscale characterization of pitting corrosion and application to an aluminum alloy. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 2000, 19(2): 309-318
- 25 Borge H, Otto L. Characterization of pitting corrosion by white light interferometry. *Corrosion Science*, 2007, 49(2): 391-401
- 26 Birt EA, Jones LD, Nelson LJ, et al. NDE corrosion metrics for life prediction of aircraft structures. *Insight*, 2006, 48(3): 139-143
- 27 韦丽金. 点蚀疲劳寿命估算的投影面积法. [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2008 (Wei Lijin. Projected area approach for pitting corrosion fatigue life prediction. [Master Thesis]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008 (in Chinese))
- 28 Walde K, Hillberry BM. Characterization of pitting damage and prediction of remaining fatigue life. *International Journal of Fatigue*, 2008, 30(1): 106-118
- 29 Silva JWJ, Bustamante AG, Codaro EN, et al. Morphological analysis of pits formed on Al 2024-T3 in chloride aqueous solution. *Applied Surface Science*, 2004, 236(1-4): 356-365
- 30 Codaro EN, Nakazato RZ, Horovistiz AL, et al. An image processing method for morphology characterization and pitting corrosion evaluation. *Materials Science and Engineering*, 2002, 334(1-2): 298-306
- 31 Guillaumin C, Gueriau J. Quantitative measurement and shape characterization of pits with an image analyzer. In: Proceedings of the International Metallography Conference, Colmar, France, 1995
- 32 张玮. 金属腐蚀形貌特征提取用于腐蚀诊断的研究. [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2004 (Zhang Wei. Characteristics extraction of metallic corrosion morphology for corrosion diagnosis. [PhD Thesis]. Da Lian: Dalian University of Technology, 2004 (in Chinese))
- 33 许成龙, 吕胜利, 王振果等. 铝合金表面腐蚀形态演化规律的分形几何表征. *机械科学与技术*, 2011, 30(2): 233-236 (Xu Chenglong, Lü Shengli, Wang Zhenguo, et al. Characteristics of the fractal geometry in the evolution rhythm of surface corrosion morphology of aluminum alloy. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2011, 30(2): 233-236 (in Chinese))
- 34 陈群志, 刘文斑, 齐贤德等. 预腐蚀后飞机结构疲劳 S-N 曲线研究. 见: 疲劳与断裂: 第十届全国疲劳与断裂学术会议论文集. 北京: 气象出版社, 2000 (Chen Qunzhi, Liu Wenting, Qi Xiande, et al. Study on fatigue S-N curves of aircraft structures after corrosion. In: Fatigue & Fracture: The Proceedings of 10th National Fatigue and Fracture Academic Conference, Beijing: China Meteorological Press, 2000 (in Chinese))
- 35 贺小帆, 刘文斑, 王忠波等. 疲劳寿命预腐蚀影响系数曲线通用性研究. *机械强度*, 2004, 26(1): 101-104 (He Xiaofan, Liu Wenting, Wang Zhongbo, et al. Research on the generality of the pre-corrosion influence coefficient curve of fatigue. *Journal of Mechanical Strength*, 2004, 26(1): 101-104 (in Chinese))
- 36 ASTM G 46-94 Standard guide for examination and evaluation of pitting corrosion. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 1999
- 37 ISO 11463 Corrosion of metals and alloys evaluation of pitting corrosion. Geneva, Switzerland: ISO, 1995
- 38 王逾涯, 韩恩厚, 孙祚东等. LY12CZ 铝合金在 EXCO 溶液中的腐蚀行为研究. *装备环境工程*, 2005, 2(1): 20-24 (Wang Yuya, Han Enhou, Sun Zuodong, et al. Studies of corrosion behavior of LY12CZ aluminum alloy in EXCO solution. *Metal Forming Technology*, 2005, 2(1): 20-24 (in Chinese))
- 39 黄桂桥, 郁春娟. 金属材料在海洋飞溅区的腐蚀. *材料保护*, 1999, 32(2): 31-33 (Huang Guiqiao, Yu Chunjuan. Corrosion of metal materials at sea water splashing zone. *Materials Protection*, 1999, 32(2): 31-33 (in Chinese))
- 40 谢伟杰, 李荻, 胡艳玲等. LY12CZ 和 7075-T7351 铝合金在 EXCO 溶液中腐蚀动力学的统计研究. *航空学报*, 1999, 20(1): 35-39 (Xie Weijie, Li Di, Hu Yanling, et al. Statistical study of corrosion kinetics law for LY12CZ and 7075-T7351 aluminum alloy in EXCO solutions. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 1999, 20(1): 35-39 (in Chinese))
- 41 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. *航空学报*, 2002, 23(3): 249-251 (Chen Yueliang, Lü Guozhi, Duan Chengmei. A probability model for the corrosion damage of aircraft structure in service environment. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2002, 23(3): 249-251 (in Chinese))
- 42 任克亮, 吕国志, 张有宏. 老龄结构分析中腐蚀坑与等效裂纹间的量化关系. *强度与环境*, 2006, 3(2): 50-57 (Ren Kelian, Lü Guozhi, Zhang Youhong. The correlation between corrosion pit with equivalent initial surface crack. *Structure & Environment Engineering*, 2006, 3(2): 50-57 (in Chinese))
- 43 Xiang YB, Liu YM. EIFS-based crack growth fatigue life prediction of pitting-corroded test specimens. *Engineering Fracture Mechanics*, 2010, 77(8): 1314-1324
- 44 Xiang YB, Lu ZZ, Liu YM. Crack growth-based fatigue life prediction using an equivalent initial flaw model. Part I: Uniaxial loading. *International Journal of Fatigue*, 2010, 32(2): 341-349
- 45 Dolley EJ, Lee B, Wei RP. The effect of pitting corrosion on fatigue life. *Fatigue & Fracture of Engineering Material & Structures*, 2000, 23(7): 555-560
- 46 Crawford BR, Loader C, Ward AR, et al. The EIFS distribution for anodised and pre-corroded 7010-T7651 under constant amplitude loading. *Fatigue & Fracture of Engineering Material & Structures*, 2005, 28(9): 795-808
- 47 Murakami Y. Analysis of stress intensity factors of mode I, II and III for inclined surface cracks of arbitrary shape. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 22(1): 101-114



- 48 Murakami Y, Endo M. Effects of defects, inclusions and inhomogeneities on fatigue strength. *International Journal of Fatigue*, 1994, 16(3): 163-182
- 49 Murakami Y, Beretta S. Small defects and inhomogeneities in fatigue strength: Experiments, models and statistical implications. *Extremes*, 1999, 2(2): 123-147
- 50 Murakami Y. *Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions*. Amsterdam: Elsevier, 2002
- 51 何卫平, 陈勃, 曹定国. 铝合金腐蚀损伤规律及蚀坑当量化技术研究. 航空标准化与质量, 2011, (2): 10-13 (He Weiping, Chen Bo, Cao Dingguo. Study on corrosion damage law and pit equivalent technology of aluminum alloy. *Aeronautic Standardization & Quality*, 2011, (2): 10-13 (in Chinese))
- 52 Sharp PK, Barter SA, Clark G. Localized life extension specification for the F/A-18 Y470 X19 pocket. DSTO-TN-0279, 2000
- 53 Doerfler MT, Grandt AF, Bucci RJ, et al. A fracture mechanics based approach for quantifying corrosion damage. Tri-Service Corrosion Conference, Orlando, Florida, 1994
- 54 Zamber JE. A probabilistic approach to predicting fatigue lives of corroded 2024-T3 aluminum. *AIAA Journal*, 1999, 37(10): 1311-1317
- 55 Medved JJ, Breton M, Irving PE. Corrosion pit size distributions and fatigue lives—a study of the EIFS technique for fatigue design in the presence of corrosion. *International Journal of Fatigue*, 2004, 26(1): 71-80
- 56 Walde K, Brockenbrough JR, Craig BA, et al. Multiple fatigue crack growth in pre-corroded 2024-T3 aluminum. *International Journal of Fatigue*, 2005, 27(10-12): 1509-1518
- 57 Cerit M, Genel K, Eksi S. Numerical investigation on stress concentration of corrosion pit. *Engineering Failure Analysis*, 2009, 16(7): 2467-2472
- 58 谭晓明, 陈跃良, 段成美. 孔蚀对老旧飞机搭接件结构完整性的影响. 机械强度, 2005, 27(6): 821-824 (Tan Xiaoming, Chen Yueliang, Duan Chengmei. Influence of pitting corrosion on the structural integrity of lap joints in aging aircraft. *Journal of Mechanical Strength*, 2005, 27(6): 821-824 (in Chinese))
- 59 Newman JC, Raju IS. An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack. *Engineering Fracture Mechanics*, 1981, 15(1): 185-192
- 60 Codaro EN, Nakazato RZ, Horovistiz AL, et al. An image analysis study of pit formation on Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering*, 2003, 341(1-2): 202-210
- 61 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. 航空学报, 2007, 28(1): 142-145 (Zhang Youhong, Lü Guozhi, Ren Keliang, et al. The evolution rhythm of surface corrosion damage of LY12-CZ aluminum in varied environments. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2007, 28(1): 142-145 (in Chinese))
- 62 张有宏, 常新龙, 张世英等. 铝合金结构腐蚀损伤性能评价指标. 试验技术与试验机, 2007, (4): 5-7 (Zhang Youhong, Chang Xinlong, Zhang Shiyang, et al. Assessment metric study on corrosion damage character of aluminum alloy structure. *Test Technology and Testing Machine*, 2007, (4): 5-7 (in Chinese))
- 63 张有宏, 吕国志, 陈跃良等. 铝合金腐蚀损伤的形态学研究. 腐蚀科学与防护技术, 2007, 19(4): 272-274 (Zhang Youhong, Lü Guozhi, Cheng Yueliang, et al. Morphological study on corrosion damage of aluminum alloy. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2007, 19(4): 272-274 (in Chinese))
- 64 张玮, 梁成浩. 金属材料表面腐蚀形貌分形特征提取. 大连理工大学学报, 2003, 43(1): 61-64 (Zhang Wei, Liang Chenghao. Extracting fractal characteristics from corrosion surface of metallic materials. *Journal of Dalian University of Technology*, 2003, 43(1): 61-64 (in Chinese))
- 65 卞贵学, 陈跃良, 俞品仕等. 基于分形理论的铝合金腐蚀损伤研究. 强度与环境, 2009, 36(1): 39-44 (Bian Guixue, Chen Yueliang, Yu Pinshi, et al. Research of corrosion damage of aluminum alloy based on the fractal theory. *Structure & Environment Engineering*, 2009, 36(1): 39-44 (in Chinese))
- 66 许述剑, 翁永基, 李相怡. 图像分维对腐蚀坑分布特征的表征. 中国腐蚀与防护学报, 2007, 27(2): 109-113 (Xu Shujian, Weng Yongji, Li Xiangyi. Characterization for corrosion pitting distribution by using fractal dimension of image. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2007, 27(2): 109-113 (in Chinese))
- 67 翁永基, 许述剑, 边丽. 腐蚀和腐蚀模型研究中的分形方法. 中国腐蚀与防护学报, 2006, 26(5): 315-320 (Weng Yongji, Xu Shujian, Bian Li. Fractal methods in study corrosion and corrosion model. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2006, 26(5): 315-320 (in Chinese))
- 68 穆志韬, 王国才, 朱做涛. 基于图像处理技术的铝合金腐蚀分形特征. 海军航空工程学院学报, 2011, 26(1): 33-35 (Mu Zhitao, Wang Guocai, Zhu Zuotao. Corrosion fractal character of aluminum alloy based on image processing technique. *Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University*, 2011, 26(1): 33-35 (in Chinese))
- 69 张川. 腐蚀损伤金属材料剩余寿命与剩余强度研究. [博士论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2013 (Zhang Chuan. Research on residual life and residual strength of metallic materials with corrosion damage. [PhD Thesis]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013 (in Chinese))
- 70 刘文斑, 杨洪源, 贺小帆. 腐蚀条件下民机结构疲劳寿命评定方法研究. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(8): 753-756 (Liu Wenting, Yang Hongyuan, He Xiaofan. Evaluation of fatigue lives for civil aircraft structures under corrosive condition. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2004, 30(8): 753-756 (in Chinese))
- 71 李玉海, 刘文斑. 腐蚀条件下飞机结构疲劳寿命评定技术研究. 飞机设计, 2002, (4): 1-10 (Li Yuhai, Liu Wenting. Study on assessing fatigue of aircraft structures under corrosion environment. *Aircraft Design*, 2002, (4): 1-10 (in Chinese))
- 72 贺小帆, 刘文斑, 杨洪源. 基于 Weibull 分布的疲劳加速腐蚀因子分析. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(2): 154-158 (He Xiaofan, Liu Wenting, Yang Hongyuan. Acceleration corrosion factor analysis for fatigue critical components based on the Weibull distribution. *Journal of Beijing University*

- of *Aeronautics and Astronautics*, 2007, 33(2): 154-158 (in Chinese))
- 73 贺小帆, 刘文斑. 疲劳关键件加速腐蚀因子可靠性分析. 航空学报, 2005, 26(3): 315-319 (He Xiaofan, Liu Wenting. Reliability analysis of accelerated corrosion factor for fatigue critical components. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2005, 26(3): 315-319 (in Chinese))
- 74 贺小帆, 刘文斑, 向锦武. 基于 C-T 曲线的加速腐蚀因子分析. 机械强度, 2007, 28(6): 888-892 (He Xiaofan, Liu Wenting, Xiang Jinwu. Reliability analysis of acceleration corrosion factor for fatigue critical components based on the C-T curve. *Journal of Mechanical Strength*, 2007, 28(6): 888-892 (in Chinese))
- 75 贺小帆, 刘文斑, 向锦武. 基于 DFR 的疲劳加速腐蚀因子模型与分析. 应用力学学报, 2008, 25(3): 445-449 (He Xiaofan, Liu Wenting, Xiang Jinwu. Acceleration corrosion factor for fatigue critical components based on the DFR: Modeling and analysis. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2008, 25(3): 445-449 (in Chinese))
- 76 贺小帆, 刘文斑, 杨洪源. 铝合金加速腐蚀因子模型与分析. 航空材料学报, 2008, 28(3): 77-81 (He Xiaofan, Liu Wenting, Yang Hongyuan. Acceleration corrosion factor for aluminum alloys: Model and analysis. *Journal of Aeronautic Materials*, 2008, 28(3): 77-81 (in Chinese))
- 77 李玉海, 贺小帆, 陈群志等. 铝合金试件腐蚀深度分布特性及变化规律研究. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(1): 98-101 (Li Yuhai, He Xiaofan, Chen Qunzhi, et al. Investigation on distribution and variable rule for corrosion depth of aluminum alloy specimen. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2002, 28(1): 98-101 (in Chinese))
- 78 贺小帆, 杨洪源, 刘文斑. 预腐蚀疲劳退化加速因子研究. 航空动力学报, 2008, 23(7): 1328-1333 (He Xiaofan, Yang Hongyuan, Liu Wenting. Investigation of acceleration factor for pre-corrosion fatigue degradation: Model and analysis. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(7): 1328-1333 (in Chinese))
- 79 赵海军, 金平, 柳文林等. 预腐蚀疲劳寿命影响系数模型研究. 腐蚀科学与防护技术, 2006, 18(4): 265-267 (Zhao Haijun, Jin Ping, Liu Wenlin, et al. Research on a model of the influence coefficient for pre-corrosion fatigue life. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2006, 18(4): 265-267 (in Chinese))
- 80 赵学锋, 王富永, 赵海军. 预腐蚀疲劳寿命影响系数及 S-N 曲线研究. 机械强度, 2008, 30(6): 977-981 (Zhao Xuefeng, Wang Fuyong, Zhao Haijun. Research on the influence coefficient and S-N curve for the pre-corrosion fatigue life. *Journal of Mechanical Strength*, 2008, 30(6): 977-981 (in Chinese))
- 81 张蕾, 陈群志, 宋恩鹏等. 某型飞机典型疲劳关键件加速腐蚀条件下 C-T 曲线的测定. 机械强度, 2004, 26(z1): 55-57 (Zhang Lei, Chen Qunzhi, Song Enpeng, et al. C-T curve of the critical part of aircraft structure under corrosion condition. *Journal of Mechanical Strength*, 2004, 26(z1): 55-57 (in Chinese))
- 82 刘文斑, 李玉海, 贾国荣. 腐蚀条件下飞机结构使用寿命的评定与监控. 北京航空航天大学学报, 1996, 22(3): 259-263 (Liu Wenting, Li Yuhai, Jia Guorong. Evaluation and supervision of service life for aircraft structures under corrosive condition. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 1996, 22(3): 259-263 (in Chinese))

(责任编辑: 刘希国)

(上接第 9 页)

- 61 Kanzaki T, Ichikawa Y. Heat transfer in a stably stratified flow. In: Proc of the 11th Symp on Turbulent Shear Flows, Grenoble, 1997
- 62 Gerz T, Schumann U. A possible explanation of counter gradient fluxes in homogeneous turbulence. *Theoret Comput Fluid Dynamics*, 1996, 8: 169-181
- 63 Hanazaki H, Hunt JCR. Liner processes in unsteady stably stratified turbulence. *J Fluid Mech*, 1996, 318: 303-337
- 64 Komori S, Nagata K. Effects of molecular diffusivities on counter gradient scalar and momentum transfer in strongly stable stratification. *J Fluid Mech*, 1996, 326: 205-237
- 65 Komori S, Nagata K, Murakami Y. Heat and mass transfer in a stable thermally stratified flow. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 1996, 23(1-4): 235-245
- 66 Nagata K, Komori S. The difference in turbulent diffusion between active and passive scalars in stable thermal stratification. *J Fluid Mech*, 2001, 430: 361-380
- 67 Jackson PR, Rehmann CR. Kinematic effects of differential transport on mixing diffusively stable turbulent flow. *J Phy Oceanogr*, 2003, 33(1): 299-304
- 68 贾俊梅, 邱翔, 刘宇陆. 稳定分层流动中湍流动量逆梯度输运的数值研究. 水动力学研究与进展: A 辑, 2005, 20(4): 426-435 (Jia Junmei, Qiu Xiang, Liu Yulu. Numerical study of turbulent counter-gradient momentum transport in stable stratified flow. *Journal of Hydrodynamics*, Ser A, 2005, 20(4): 426-435 (in Chinese))
- 69 卢志明, 贾俊梅, 刘宇陆. 稳定分层剪切流动湍流特性的数值研究. 海洋学报 (中文版), 2006, 28(4): 145-152 (Lu Zhiming, Jia Junmei, Liu Yulu. Numerical study of turbulent characteristics in sheared stably stratified flows. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(4): 145-152 (in Chinese))
- 70 Iida O, Nagano Y. Effect of stable-density stratification on counter gradient flux of a homogeneous shear flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50: 335-347

(责任编辑: 胡漫)