

文章编号: 1000-8055(2008)04-0730-07

TC11 钛合金焊接接头低周疲劳分形损伤演化研究

武 奇¹, 邱惠清¹, 郭海丁²

(1. 同济大学 机械工程学院, 上海 201804; 2. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 基于损伤力学和分形理论, 在金属材料疲劳断口的形貌特征具有统计自相似性的基础上建立了表征焊接接头断口损伤的面分形损伤演化模型. 利用 TC11 合金低周疲劳试验后所得到的断口测得其面分维数, 结合试验数据拟合获得该材料损伤演化方程参数; 从而建立了 TC11 合金焊接接头三级载荷下的疲劳损伤演化方程; 同时将该模型与基于断口表面裂纹扩展的线分形损伤演化模型加以比较.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 焊接接头; 损伤演化; 分维; 疲劳断口

中图分类号: V351.11

文献标识码: A

Studying for low2cycle fatigue fractal damage evolution on TC11 Ti alloy welded joint

WU Qi¹, QIU Hu2qing¹, GUO Ha2ding²

(1. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. College of Eenergy and Power Engineering,

Nanjing University Aeronautics and Astronautics, Nanjing 200016, China)

Abstract: Based on damage mechanics and fractal theory, a damage evolution equation of welded joints is built up which it involves surface factal characteristics of fatigue fracture surface based on statistical selfsimilarity of surface profiler of fatigue fracture surface. Two dimensional fractal dimension and Parameters in damage evolution equations of fracture surface in Titanium alloy T26. 5A23. 5Mo21. 5Zr20. 3Si(TC11) is obtained according to the related experimental data. So damage evolution equations of low2cycle fatigue life under three levels loads in TC11 is established and these models are compared with damage evolution equations abased on line fractal characteristic in fracture surface.

Key words: aerospace propulsion system; welded joint; damage evolution; fractal dimension; fatigue fracture surface

目前航空发动机压气机及风扇已开始试验应用一种称为/整体叶盘0或简称/叶盘0的结构, 它采用电子束焊或扩散焊先进的制造工艺, 将工作叶片和轮盘连成一体, 省去了连接用的榫头和榫槽, 减少了零件数目, 使结构大为简化, 重量减轻 30%~40%, 免除了榫槽损伤等潜在故障. 然而发动机在起飞2飞行2降落周期中, 叶盘受到交变载荷作用. 叶盘连接处焊接接头往往会由于疲劳裂

纹的萌生而最终导致断裂.

TC11 钛合金作为国内多种发动机压气机盘的主要材料, 其疲劳焊接性能受到重视, 近年来研究该材料微裂纹萌生及其演化发展的损伤力学已被引入. 文献[1]依据材料损伤演化具有分形性质的基本事实, 结合损伤力学与分形理论, 提出了一种兼顾损伤细观特征描述和宏观损伤力学分析需要的分形损伤变量 X_d , D (D 为测量码尺, d 为

收稿日期: 200703224; 修订日期: 200710222

作者简介: 武奇(1972), 男, 山西大同人, 博士生, 研究方向是结构疲劳与断裂及可靠性.

分维数), 并推导出了分形损伤演化律和分形损伤本构关系的表达式. 文献[2]将研究材料微裂纹萌生及其演化发展规律的损伤力学理论引入焊接接头疲劳性能研究中, 利用电子显微镜和图像处理技术把加载过程中焊接接头的疲劳性能变化同损伤演化联系起来, 实现了宏观与微观的结合. 然而目前的研究多集中在裂纹扩展路径或微裂纹的分布上, 是一种基于分形曲线的线分形研究, 而基于焊接接头整个断口面形貌特征的分形损伤演化鲜有研究, 本文的研究可补充以往研究的不足.

1 焊接接头低周疲劳的分形损伤演化模型

大量实测表明^[3], 疲劳裂纹的扩展路径通常是不规则的, 疲劳裂纹扩展的断口表面形貌特征虽不是严格意义的分形结构, 但与分形结构极为相似, 具有统计自相似性. 国内外学者依据该事实, 提出了新的损伤变量) 分形损伤变量来表达^[4]

$$D_f(d, N) = DN^{d_{de}} \tag{1}$$

式中 D_f 为考虑分形效应的损伤变量; D 为表观损伤即欧氏空间损伤变量; N 为无量纲码尺, $N = D/a$. D 为量纲度量码尺, a 为被度量区域的特征尺寸; d, d_e 分别为典型域维数(即欧氏维数)和损伤域维数.

依据损伤力学和分形理论, 文献[1]指出焊接接头疲劳损伤分形演化方程为

$$D_f = D_c \left[1 - \left(1 - \frac{N}{N_f} \right)^{\frac{1}{b+1}} \right] \tag{2}$$

式中 N 为疲劳低周循环寿命; N_f 为疲劳低周循环失效寿命; A 为材料常数. D_c 为试件疲劳断裂时分形损伤变量临界值.

考虑初始损伤 D_0 , $D_f - D_0 / D_c - D_0$ y D_f / D_c , 得

$$D_f - D_0 = (D_c - D_0) \left[1 - \left(1 - \frac{N}{N_f} \right)^{\frac{1}{b+1}} \right] \tag{3}$$

把(1)式代入(3)式, 得

$$DN^{d_{de}} - D_0 = (D_c - D_0) \left[1 - \left(1 - \frac{N}{N_f} \right)^{\frac{1}{b+1}} \right] \tag{4}$$

目前针对金属材料断口形貌特征的分形维数, 多集中在断口裂纹扩展方向上的分形曲线的分维. 而实际的断口面如图 1 所示其表面凹凸不平, 断裂经历裂纹的萌生、形成、扩展直至最终破断等不同阶段, 甚至存在多个断裂部位, 断裂过程

的不同阶段相互交织, 异常复杂, 这些过程的每一阶段都会在断口上留下相应的痕迹与形貌特征. 因此实际上断口面是一个空间异常不规则曲面, 它具有统计自相似性. 有学者指出: 从材料静动态断裂的物理机制考虑, 正确的测量对象应是断口表面的面分形维数. 在材料已定的条件下, 断口形貌本身决定了使材料破断所需的能量^[5]. 断口面作为一空间曲面存在于整个空间区域中, 欧氏维数 d_e 取 3. 这样考虑面分维、初始损伤的焊接接头分形损伤演化方程为

$$DN^{d_3} - D_0 = (D_c - D_0) \left[1 - \left(1 - \frac{N}{N_f} \right)^{\frac{1}{b+1}} \right] \tag{5}$$

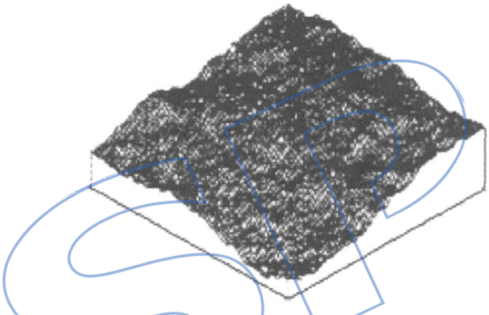


图 1 金属断裂面形态
Fig. 1 Schematic of fracture surface of metal

2 表观损伤面和分形维数的测定

在式(5)中, 分形维数 d 和表观损伤 D 可由试验测定. 因为试验研究试验 TC11 焊接接头的低周疲劳特性, 故采用应变疲劳试验方案, 试验载荷为拉伸正弦波, 应变比为 0.1. 用 TC11 钛合金板材电子束焊方法制备试件, 具体的试样尺寸和试验加载条件可参见文献[6].

2.1 表观损伤的测定

在式(1)和式(5)中 D 为表观(宏观)损伤变量, 是在欧氏空间中定义的损伤变量, 文中用循环响应法定义表观损伤变量表达

$$D = 1 - \frac{\$R}{\$R^*} \tag{6}$$

式中 $\$R^*$ 是假设初始损伤为 D_0 时塑性应变幅 $\$E_p$ 对应的应力幅值; $\$R$ 是循环 N 次的应力幅值. $\$R^*$ 和 $\$R$ 均可由疲劳试验测定. 在疲劳试验过程, 当循环达到稳定时, 测出迟滞回线得到循环稳定后的应力幅值 $\$R^*$. 然后每隔一定循环数记录下相对应的迟滞回线, 获得对应循环数下的应力幅 $\$R$ 从而计算每个试件表观损伤变量. 式(6)宏观地反映材料或结构内部的疲劳损伤程度. 图

2 是 $\epsilon_{\max} = 0.55\%$ 载荷下一组试件的表观损伤量 D 随疲劳循环寿命比值的变化情况.

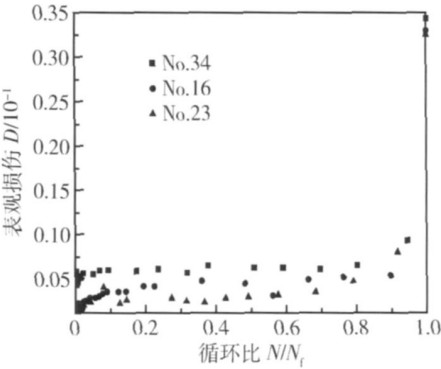


图 2 $\epsilon_{\max} = 0.55\%$ 的表观损伤变量与疲劳循环寿命比值的关系

Fig. 2 Relationship between macrodamage variable and fatigue life with $\epsilon_{\max} = 0.0055$

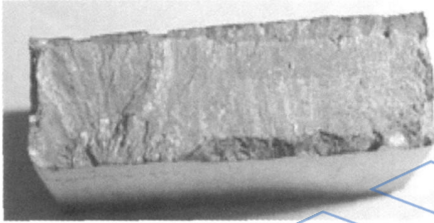


图 3 扫描电子显微镜下的样品断面

Fig. 3 The fracture of the sample observed under scanning electron microscopy

2.2 面分形维数测定

断口表面的微观形貌分形特征借助扫描电子显微镜完成. 将疲劳试验后的拉断 TC11 合金试件进行切割处理成尺寸为 $20\text{ mm} @ 10\text{ mm} @ 6\text{ mm}$ 的样品, 如图 3 共计 12 件, 对其断口采用二次电子扫描法, 试验设备采用日本电子公司生产的 JSM26460LV 扫描电子显微镜, 该设备可直接输出 8 位的 bmp 格式图像. 断口表面图像采集要注意放大倍数、分辨率、成像对比度和亮度的选取, 做到拍摄每个样品时这些系统参数完全一致, 以减少不必要的系统误差. 图 4 是在分辨率 $640 @ 480$, 放大倍率为 1 000 倍条件下拍摄的.

面分形维数采用计盒维数法^[7], 把 TC11 合金试件断口扫描后得到的图像转化成 8 位灰度图像后, 将此图像看作是三维空间的点集, 该点的第一维和第二维由像素点所在的平面位置决定. 第三维由每一像素点的灰度值给出, 这样就形成一空间点集. 如图 5 所示, A 为该点集的直观表现, 也即断口不规则面的直观表现, 于是对于给定尺度 D 可将

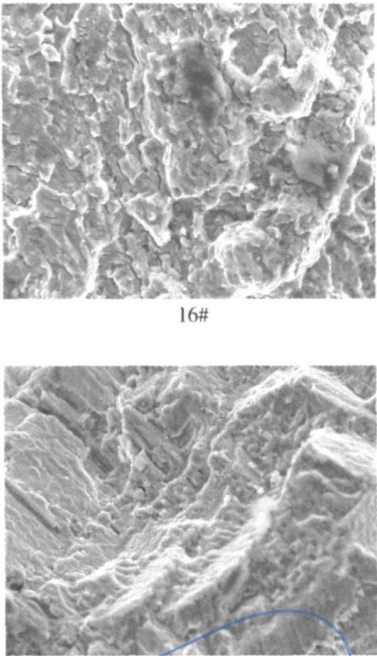


图 4 16# 和 34# 试件断口微观形貌

Fig. 4 Fracture micro-appearance of No. 16 and No. 34 specimens

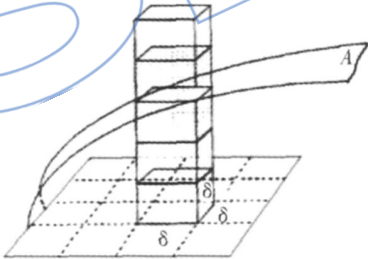


图 5 断面灰度图像测量原理

Fig. 5 Metrical principle of gray scale images of fracture

空间分割为边长分别为 $D @ D @ D$ 的盒子. 如果图像尺度为 $\$L @ \$L$, 尺度递减率 $r = D / \$L$.

这样分形图像的分形维数由下式可得到^[7]

$$d = \frac{\lg N_{SL}}{\lg \left(\frac{1}{r} \right)} = \frac{\lg N_{SL}}{\lg \left(\frac{\$L}{D} \right)} \tag{7}$$

其中: N_{SL} 表示至少含有一个空间点的盒子数. 借助数字图像处理技术和 VC++ 的 MFC 类库编程实现分形维数的测量与分析功能. 表 1 是各试件断口分形维数的测量值. 试验中测量码尺 D 取 30 像素单位, 尺度递减率 $r = 30 / 640 = 0.046875$.

在测得 TC11 合金试件的表观损伤 D 和试件断口的面分形维数 d 后, 由式(1)可得到断口损伤随循环次数的演化过程, 式中无量纲码尺 N 即为尺寸缩减率 r . 图 6 和图 7 分别是 1# 和 34#

试件的表观损伤 D 和分形损伤 D_f 随疲劳寿命 N 的损伤演化图, 可以看到: 1) 分形损伤和表观损伤的演化趋势是一致的. 2) 分形损伤一般比表观损伤大, 这与实际情况相符合, 因为分形损伤是建立在不规则断面的表观长度是测量单元尺寸函数的基础上, 是表观损伤的 $N^{2/3}$ 倍, 且 $N^{2/3} > 1$. 3) 损伤的

过程可以分为三个部分: 一个是初始阶段, 该阶段在疲劳寿命的前数百个循环内损伤急剧增加; 二是稳定发展阶段, 该阶段的主要特征是损伤增长缓慢, 占疲劳寿命的主要部分; 三是临界失效阶段, 试样在临界损伤附近材料性能急剧劣化, 损伤增加明显, 最终达到临界损伤, 迅速被拉断失效.

表 1 试件疲劳断口分维数测量结果

Table 1 Measuring results of fatigue fracture fractal dimension on welded specimens

最大应变载荷/ %	编号	疲劳寿命 N/ cycle	面分维数 d	线分维数 d
0.495	27	21 304	2.476 95	1.490 62
	30	21 355	2.513 98	1.505 94
	13	28 069	2.494 3	1.512 91
0.405	34	42 370	2.526 16	1.594 73
	16	44 628	2.531 54	1.515 22
	23	55 852	2.546 66	1.588 70
0.360	1	55 942	2.504 2	1.544 26
	7	57 744	2.545 72	1.562 69
	33	64 608	2.557 09	1.562 30
	19	66 607	2.582 36	1.635 56
	37	70 012	2.572 68	1.581 79

注: 表第 5 列数据取自文献[6]

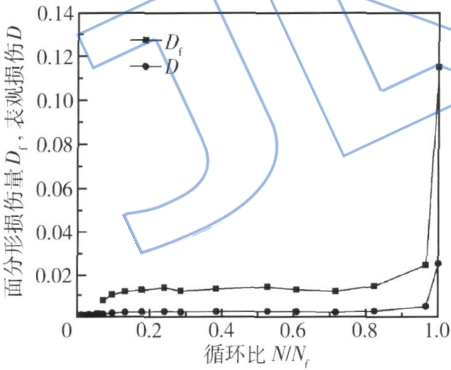


图 6 1# 试件宏观及面分形损伤随疲劳寿命的变化
($\Delta \epsilon=0.36\%$)

Fig. 6 Macrodamage and surface area fractal damage versus fatigue life for No. 1 specimen ($\Delta \epsilon=0.36\%$)

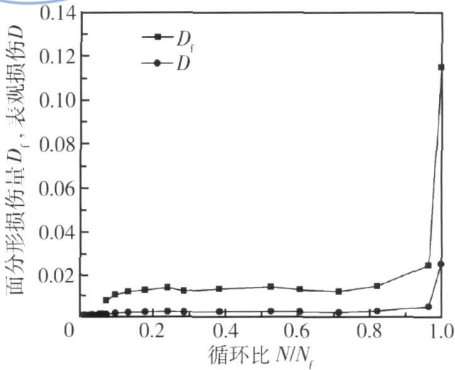


图 7 34# 试件宏观及面分形损伤随疲劳寿命的变化
($\Delta \epsilon=0.405\%$)

Fig. 6 Macrodamage and surface fractal damage versus fatigue life for No. 34 specimen ($\Delta \epsilon=0.405\%$)

3 焊接接头断口的疲劳分形损伤演化方程

3.1 损伤参数的拟合

根据式(5)进行曲线拟合, 其中待拟合的参数为 D_0 , $A=1/(1+A)$, 因变量为 D_f , 自变量为 N/N_f , D_c 为已知. 拟合得到有效的 12 根试件的损伤

演化曲线, 图 8 和图 9 是 1# 和 34# 试件的损伤演化曲线. 表 2 列出了各试件在三级载荷下的拟合参数值.

3.2 面分维损伤和线分形损伤的比较

下面给出了其中 8 个试件采用面分形损伤演化过程和线分形损伤演化过程(线分形损伤演化方程见文献[6])的比较, 如图 10~ 图 17 所示. 可

以看到对试件的断面进行面分形测量,图形的形状没有明显差异,各试件的损伤演化趋势走向相近;对试件的断面进行线分形测量,从 27# 和 30# 相对其它试件的损伤演化走势来看,由于选择不同方向的曲线或即使同一方向但不同地点导致测量结果也有所不同,即线分维具有较大的随机

性,结果不稳定,仅仅依据某一方向的损伤演化过程不能很好地说明断口真实的损伤演化过程.可见选择断口面的分形特征进行测量,由于考虑整个断面的分形形貌特征,所以较全面地反映了断面的几何分形形貌特征.

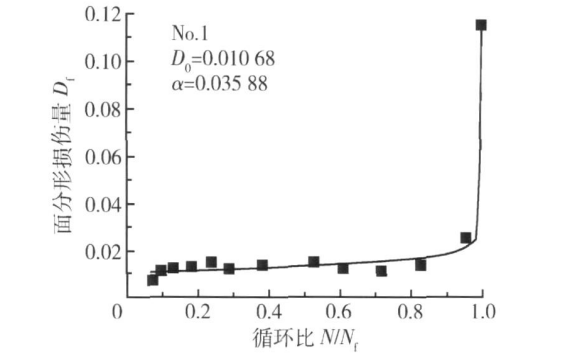


图 8 1# 试件面分形损伤演化曲线($\Delta\epsilon=0.36\%$)
Fig.8 Surface fractal damage evolution versus fatigue life for No.1 specimen ($\Delta\epsilon=0.36\%$)

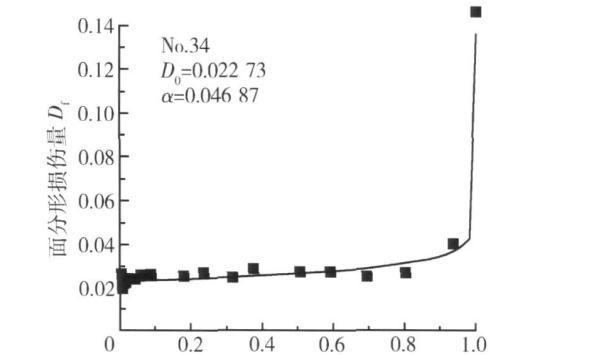


图 9 34# 试件面分形损伤演化曲线($\Delta\epsilon=0.405\%$)
Fig.9 Surface fractal damage evolution versus fatigue life for No.1 specimen ($\Delta\epsilon=0.405\%$)

表 2 面分形损伤演化方程拟合参数值
Table2 Parameters in surface fractal damage evolution equation obtained by experimental data

最大应变 载荷/%	试件	疲劳寿命 N/ 循环	$D_f = D_0 = (D_c - D_0) \left[1 - \left(1 - \frac{N}{N_f} \right)^A \right]$		
			D_0	D_c	A
0.495	27	21 304	0.013 26	0.173 03	0.050 58
	30	21 355	0.021 44	0.121 94	0.074 38
	13	28 069	0.017 53	0.150 00	0.074 71
	均值	23 576	0.017 41	0.148 33	0.066 60
0.405	34	42 370	0.022 73	0.130 86	0.046 87
	16	44 628	0.011 50	0.137 78	0.036 75
	23	55 852	0.007 62	0.130 09	0.069 41
	均值	47 617	0.013 95	0.132 91	0.051 01
0.360	1	55 942	0.010 68	0.115 75	0.035 88
	7	57 744	0.007 06	0.064 95	0.091 41
	33	64 608	0.005 37	0.134 04	0.043 72
	19	66 607	0.004 11	0.134 14	0.037 57
	37	70 012	0.003 12	0.233 99	0.017 99
	均值	62 983	0.006 07	0.136 57	0.045 31

3.3 各级载荷的分形损伤演化

一般地材料的表观初始损伤、临界损伤与载荷无关.考虑了分形效应后,所得到的分形初始损伤、分形临界损伤与载荷状态有关.还可进一步求

得三个载荷下的 $\overline{D_0}$, $\overline{D_c}$. 从表 2 可以得到各级载荷下的拟合参数的平均值,由此确定了各级载荷的分形损伤演化方程,图 18 显示了三级载荷分形损伤演化过程.

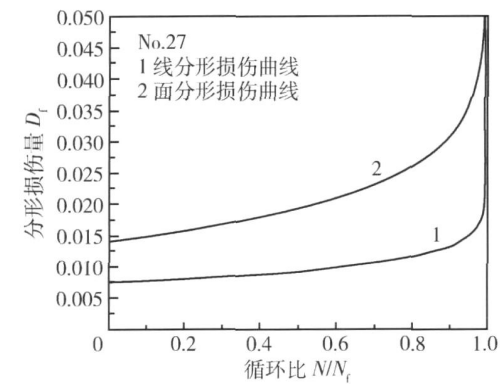


图 10 27 # 试件线、面损伤分形损伤演化曲线

Fig. 10 Line and area fractal damage evolution curves for No. 27 specimen

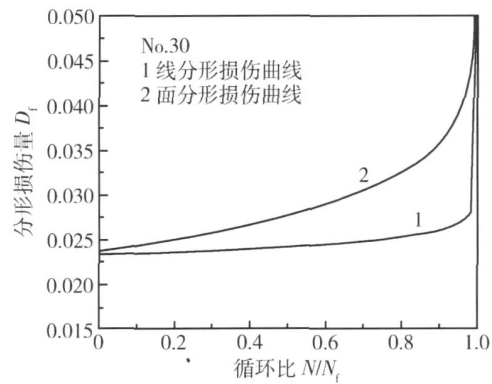


图 11 30 # 试件线、面损伤分形损伤演化曲线

Fig. 11 Line and area fractal damage evolution curves for No. 30 specimen

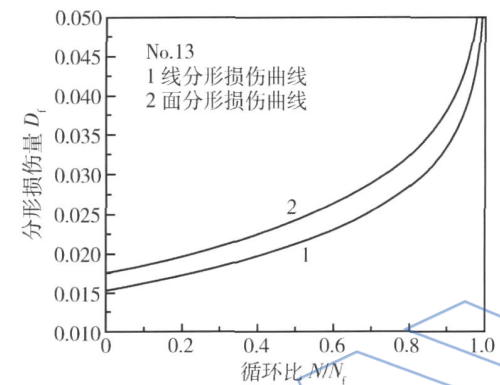


图 12 13 # 试件两种分形损伤演化曲线

Fig. 12 Line and area fractal damage evolution curves for No. 13 specimen

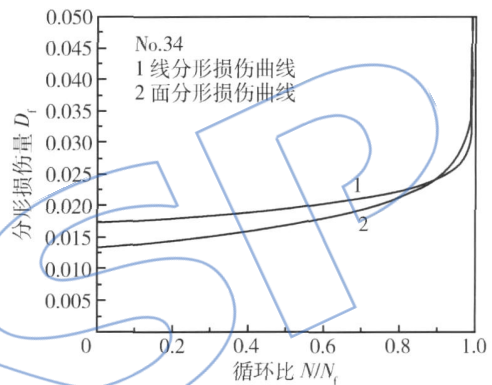


图 13 34 # 试件两种分形损伤演化曲线

Fig. 13 Line and area fractal damage evolution curves for No. 34 specimen

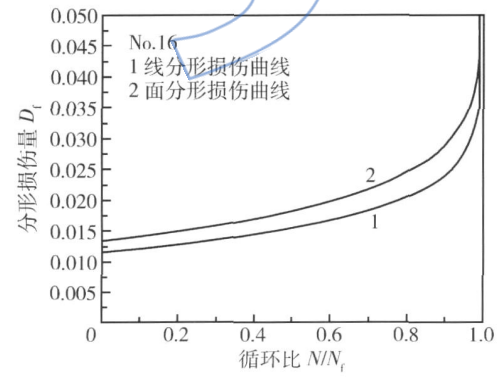


图 14 16 # 试件两种分形损伤演化曲线

Fig. 14 Line and area fractal damage evolution curves for No. 16 specimen

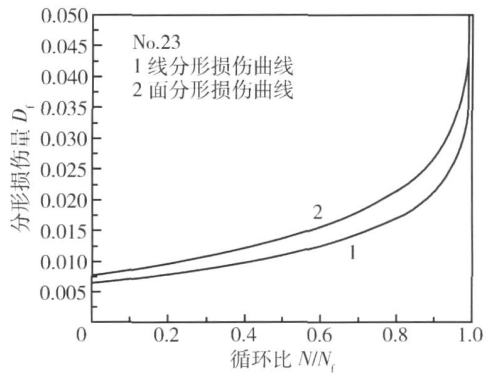


图 15 23 # 试件两种分形损伤演化曲线

Fig. 15 Line and area fractal damage evolution curves for No. 23 specimen

$$\begin{aligned} \text{\$E} &= 01495\% & D_f &= 0101753 + 0113080 \left[1 - \left(1 - \frac{N}{24687} \right)^{0106660} \right] \\ \text{\$E} &= 01405\% & D_f &= 0101190 + 0112423 \left[1 - \left(1 - \frac{N}{47617} \right)^{0105101} \right] \end{aligned}$$

$$SE=0.360\% \quad D_f=0.00607+0.13040\left[1-\left(1-\frac{N}{62983}\right)^{0.04531}\right]$$

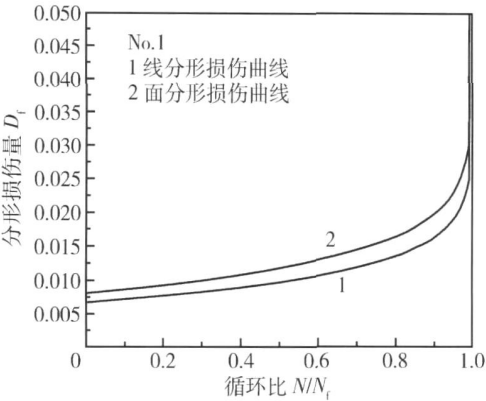


图 16 1# 试件两种分形损伤演化曲线
Fig. 16 Line and area fractal damage evolution curves for No. 1 specimen

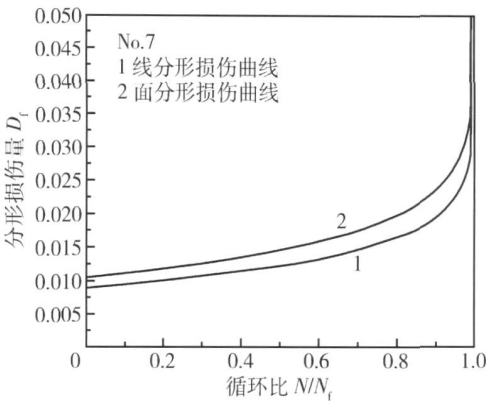


图 17 7# 试件两种分形损伤演化曲线
Fig. 17 Line and area fractal damage evolution curves for No. 7 specimen

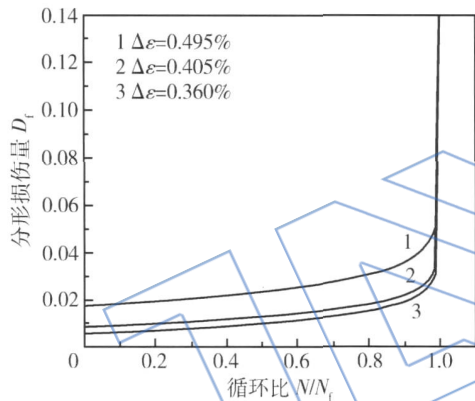


图 18 三级载荷分形损伤演化曲线
Fig. 18 Fractal damage evolution curve with three loads

4 结 论

- (1) 引入断口面的分形特征,得到了考虑初始损伤的焊接接头断面分形损伤演化方程.
- (2) 利用自编程序得到了 TC11 合金断口面的分形维数、分形损伤量和不同载荷作用下焊接接头的分形损伤演化方程的参数、演化曲线,确定了三级载荷作用下 TC11 钛合金焊接接头 断面分形损伤演化方程.
- (3) 把断口面分形损伤演化和线分形损伤演化进行比较,指出断口的面分形特征更能全面地反映断面的分形形貌特征.

参考文献:

[1] 郭华芝,郭海丁,高德平. 焊接接头低周疲劳损伤分形演化模型[J]. 焊接学报, 2003, 24(1): 8&290.

WU Huazhi, GUO Haiding, GAO Deping. Fractal damage evolution model of low2cycled fatigue in welded joint [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2003, 24 (1): 8&290.

[2] 左建政. GH 150 高温合金及其焊接结构的疲劳损伤与寿命预测[D]. 西安: 西安交通大学, 1996.

ZUO Jianzheng. Fatigut damage and life prediction of su2 peralloy GH150 and welded structure [D]. Xi an: Xi. an Jiaotong Unirersity, 1996. (in Chinese)

[3] Ganti S, Bhushan B. Generalized fractal analysis and its applications to engineering surfaces[J]. Wear, 1995, 180: 17234.

[4] 谢和平,鞠杨. 分数维空间中的损伤力学研究初探[J]. 力学学报, 1999, 31(3): 30&310.

XIE Heping, JU Yang. A study of damage mechanics the&2 ry in fractional dimensional space[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 1999, 31(3): 30&310.

[5] 董聪,酆正能. 疲劳断口分维测量原理及其物理机制[J] 北京航空航天大学学报, 1995, 21(2): 2&32.

DONG Cong, LI Zhengneng. Principle and mechanism of fractal dimension measuring of fatigue fracture surface[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronau&2 tics, 1995, 21(2): 2&32.

[6] 许开旺. TC11 钛合金焊接接头低周疲劳宏观损伤模型研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2004.

XU Kaiwang. An experimental study on low2cycle fatigue of TC11 alloy welded joints [D]. Nanjing: Nanjing Unirer&2 sity of Aeronautics and Astronautics, 2004. (in Chinese)

[7] Gagnepan J J, Roques2Carmes C. fractal approach to two dimensional and three dimensional surface roughness [J]. Wear, 1986: 109(11): 119&126.