

文章编号:1000-8055(2011)02-0355-07

TC11 焊接接头高周疲劳分形损伤模型

刘小刚¹, 郭海丁¹, 汪邦中¹, 李晋伟², 吴冰²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 北京航空制造工程研究所 高能束流加工技术重点实验室, 北京 100024)

摘 要: 根据金属疲劳断口具有几何分形特征, 将 Chaboche 高周疲劳损伤模型推广到分数维空间, 建立了综合考虑断口细观特征的高周疲劳分形损伤演化模型. 针对 TC11 钛合金电子束焊接接头, 以载荷控制的疲劳试验为基础研究其高周疲劳性能; 采用扫描电镜法 (SEM) 对断口微观特征进行定量分析, 计算得到了各级载荷下疲劳断口的分形维数; 通过对试验数据拟合, 得到了疲劳损伤演化模型中的相关材料参数, 从而建立了 TC11 焊接接头各级载荷下的分形损伤演化方程.

关 键 词: 焊接接头; 高周疲劳; 分形; 分形损伤; 损伤演化

中图分类号: V351.11

文献标识码: A

Study on high cycle fatigue fractal damage model of TC11 alloy welded joint

LIU Xiao-gang¹, GUO Hai-ding¹, WANG Bang-zhong¹,
LI Jin-wei², WU Bing²

(1. College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Key Laboratory of High Energy Density Beam Processing Technology,
Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

Abstract: Based on the fractal characteristic of the metal fatigue fracture surface, Chaboche's high-cycle fatigue (HCF) damage model was extended to fractional dimension space. An HCF fractal damage evolution model considering internal micro damage mechanism was built up in the present paper. By the stress-controlled test, HCF properties of TC11 alloy welded joint were measured; and fractal dimension of the fracture surface was calculated through its scan electron microscope (SEM) picture. The key parameters of damage evolution model mentioned above were obtained through experimental data fitting, and fractal damage evolution equation of TC11 alloy welded joint under each loading level was found thereof.

Key words: welded joint; high cycle fatigue; fractal; fractal damage; damage evolution

钛合金以其比强度高、抗疲劳破坏能力好、热稳定和热加工工艺性好等优点, 已成为航空制造业中的重要结构材料. TC11 是其中一种典型的

$\alpha+\beta$ 型钛合金, 该合金因具有良好的可焊性, 而广泛用于焊接机匣、焊接式整体叶盘、盘鼓连接等发动机构件. 随着钛合金焊接结构使用范围的逐步

收稿日期: 2009-12-28; 修订日期: 2010-08-13

基金项目: 南京航空航天大学青年科技创新基金 (NS2010041)

作者简介: 刘小刚 (1977-), 男, 湖北松滋人, 副教授, 博士, 主要从事结构强度与疲劳断裂方面的研究.

扩大,其焊接接头的疲劳寿命预测也越来越受到关注。

焊接接头具有应力集中、微观组织和力学性能不均匀等特点,与母材相比影响接头疲劳寿命的因素更多,其疲劳失效行为也更为复杂。以往研究者们多采用传统的强度理论,直接根据材料的疲劳特性曲线如应力-寿命(S-N)曲线、应变-寿命(ϵ -N)曲线等来评估焊接构件的疲劳寿命,这种方法难以反映焊缝接头实际破坏区域的疲劳损伤过程。考虑到焊接构件裂纹大多萌生于焊缝处,也有研究者采用断裂力学方法以 Paris 公式来描述构件疲劳裂纹扩展行为,而该方法只能预测构件的扩展寿命。近年来,随着损伤力学的发展,国内外大量学者将该领域的研究成果应用于焊接结构件的疲劳寿命研究,通过定义一个损伤变量来描述材料的疲劳演化过程,并取得了较好的效果^[1-3]。已有的研究表明,在一定尺度范围内,焊接接头中裂纹扩展路径具有分形特征^[4-6],因此结合损伤力学理论和几何分形理论,建立一个综合考虑材料宏观细观特征的损伤演化模型可以更为精确地描述焊接接头的疲劳损伤演化过程,并为焊接构件疲劳寿命研究提供一条新思路^[7-9]。

本文以 TC11 钛合金电子束焊接接头高周疲劳试验为基础,研究其疲劳断口的细观特征,以分形损伤变量来定量描述焊接接头疲劳发展过程,并结合损伤力学理论建立其高周疲劳分形损伤演化方程。

1 焊接接头高周疲劳宏观细观损伤演化模型

1.1 宏观损伤变量

材料在循环载荷作用下从裂纹萌生直至最终破坏这个过程可视为损伤逐渐累积的过程。近年来,大量学者采用损伤力学理论来研究材料的疲劳问题^[10-11]。从工程角度而言,损伤是指材料的受损程度,表现为材料性能的劣化;从金属学角度而言,损伤是位错源的开动、滑移带的产生,微孔洞及裂纹的形核、长大和聚集等一系列的发展过程,是一个不可逆的耗散过程。当材料内部结构状态劣化到一定程度,构件便丧失了承载能力而破坏。

采用损伤力学方法研究焊接结构的疲劳,一个关键问题在于确定适当内变量作为损伤变量,这个损伤变量既要能反映材料性能逐渐恶化的过程,又要便于试验测量。目前,实践中常采用的损

伤变量有弹性模量的变化,应力、应变幅值的变化,塑性应变能的变化等。

本文研究焊接接头的高周疲劳性能,参考文献[12]以循环加载过程中应变幅值变化来描述材料的宏观损伤,其表达式如式(1)

$$D = 1 - \Delta\epsilon^*/\Delta\epsilon \quad (1)$$

其中 D 为宏观损伤变量, $\Delta\epsilon^*$ 为循环稳定时的应变幅值, $\Delta\epsilon$ 为加载过程中对应于某一循环的应变幅值。

上述宏观损伤变量虽然物理意义明确而且简单易测,但其测量往往存在不足,测量结果通常反映出的是试件在较大区域范围内性能恶化的平均效果,而不能反映疲劳发生的局部性特征。实际试验中,疲劳损伤往往集中于局部区域,疲劳裂纹源区域的力学性能参量会有显著的变化,而试验测得的只是一定测量范围内宏观损伤的平均变化。测量所得的疲劳损伤变化趋势往往并不明显,尤其是在疲劳裂纹扩展阶段,难以反映局部损伤实际的演化过程。一方面,由于事先难以准确预测疲劳源的位置,另一方面疲劳源附近的力学参量变化梯度很大,上述问题很难通过试验的手段直接得到解决。因此,本文从疲劳断口细观特征定量分析的角度,对宏观损伤变量进行修正。

已有的研究表明,焊接接头的疲劳断口形貌具有统计意义上的自相似性,可以视作分形结构,因此断口的细观损伤可以在分数维空间用一个新的参量——分形损伤变量来描述^[7]

$$D_f(d, \xi) = D\xi^{d-d_E} \quad (2)$$

式中 $D_f(d, \xi)$ 为分形损伤变量, ξ 为无量纲度量码尺, d 为分形维数, d_E 为欧氏空间维数,对于金属断口其典型域为三维空间,即 d_E 取值为 3。

分形维数 d 是分形大小的度量,表征了分形体不规则性的程度。对金属断口而言,分形维数能定量的描述损伤区表面的粗糙程度。维数值小,则表征表面平直、光滑,损伤消耗的能量少;反之则越粗糙,消耗的能量也越多。根据分形维数几何含义,其取值范围为 $0 < d \leq d_E$ 。

无量纲码尺由 $\xi = \delta/L$ 确定,其中 δ 为测量时选用的有量纲度量码尺, L 为测量区域边长。当 δ 由大变小时,观测到的微细观结构增多,分形损伤 $D_f(d, \xi)$ 增大。这类似于在测量海岸线长度时所选用的尺规越小,则得到的测量结果越大。可见,考虑分形效应时,分形损伤变量 $D_f(d, \xi)$ 会随度量码尺的变化而变化,这也表明分形损伤变量反

映了材料微细观结构对损伤量的影响. 数学意义上, $0 < \xi \leq 1$, 由式(2)可见, 当度量码尺无限细分时, 分形损伤量会趋于无穷大. 然而在物理意义上, 损伤是一种有标度域的分形, 因此度量码尺存在下限值. 下限取决于材料微细观结构, 由所研究问题的最小特征尺度确定.

式(2)表明分形损伤变量 $D_f(d, \xi)$ 与损伤域分形维数 d 和度量码尺 ξ 相关. 分形损伤变量分别通过分形维数 d 和分形度量码尺 ξ 定量反映了损伤演化的不规则性及材料微细观结构对损伤量的影响, 它是宏观损伤变量在考虑损伤分形效应时的推广.

根据式(2), 如果能间接测量出欧式空间内的宏观损伤量 D 及断口的分形维数 d , 就可以通过计算得到分数维空间下的损伤量 D_f .

1.2 高周疲劳分形损伤演化方程

根据损伤力学理论, 国内外学者提出了许多损伤累积模型, 这些模型研究了不同材料从低周到高周的损伤演变情况. 对于高周疲劳问题, Chaboche J 认为, 其损伤演化一般形式可表示为

$$\frac{\partial D}{\partial N} = \left[\frac{\sigma_a}{b(1-D)} \right]^\beta f(D) \quad (3)$$

式中 $f(D)$ 是损伤度的函数可由下式表达:

$$f(D) = [1 - (1-D)^{1+\beta}]^\alpha \quad (4)$$

其中 α, β 和 b 均为材料参数; σ_a 为应力幅值.

将式(3)推广到分数维空间里, 可得到以分形损伤变量 D_f 表示的分形损伤演变方程

$$\frac{\partial D_f}{\partial N} = [1 - (1-D_f)^{1+\beta}]^\alpha \left[\frac{\sigma_a}{b(1-D)} \right]^\beta \quad (5)$$

利用初始条件 $N=0$ 时, $D_f=0$ 和破坏条件 $N=N_f, D_f=1$ 积分式(5), 得到

$$D_f = 1 - \left[1 - \left(\frac{N}{N_f} \right)^{\frac{1}{1+\beta}} \right]^{1+\beta} \quad (6)$$

式中疲劳寿命 N_f 可表示为

$$N_f = \left[(1+\beta)(1-\alpha) \left(\frac{\sigma_a}{b} \right)^\beta \right]^{-1} \quad (7)$$

考虑到构件或材料失效时, 其实际临界损伤 D_c 并不为 1, 往往比 1 小, 而损伤破坏一般都以损伤值 1 为校准; 此外材料经过焊接后, 相对于母材来说微观组织和宏观力学性能发生了变化, 势必会产生初始损伤, 初始损伤记为 D_0 . 对上述的损伤变量采取归一化处理, 即以 $\frac{D_f - D_0}{D_c - D_0}$ 取代 D_f , 从而得到

$$D_f - D_0 = (D_c - D_0) \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{N}{N_f} \right)^{\frac{1}{1+\beta}} \right]^{1+\beta} \right\} \quad (8)$$

式(8)即为考虑焊接接头分形特征、初始损伤、临界损伤的高周疲劳损伤演化方程.

2 TC11 焊接接头高周疲劳试验

2.1 疲劳试验

试样为 TC11 合金电子束焊接接头平板件, 尺寸参照焊接接头疲劳试验相关标准设计, 具体几何尺寸如图 1 所示.

试验在 MTS-809 液压伺服材料疲劳试验机上进行, 采用应力控制的试验. 以正弦波形式加载, 应力比 $R=0.1$, 试验频率为 5~15 Hz, 试验温度为室温. 共进行了四级载荷下的试验, 以强度极限 σ_b 为参考, 载荷等级分别为: 75%, 65%, 55%, 50%. 此外, 试验时采用标距为 25 mm 的夹式引伸计来测量焊缝附近有效段的应变, 用以宏观损伤量计算.

选取在焊缝处断裂的试验数据为有效数据, 并将得到的有效试验数据处理后, 在双对数坐标系下描出, 结果如图 2 所示. 由试验数据可见, 在设定载荷下试样的疲劳寿命在 $10^4 \sim 10^5$ 范围内, 此时疲劳寿命与应力水平在对数范围内存在线性关系, 故可用双对数线性回归模型来表达该焊接接头的 S-N 曲线, 通过拟合计算最终得到其高周疲劳寿命曲线为

$$\lg \sigma = 3.6903 - 0.1928 \lg N_f \quad (9)$$

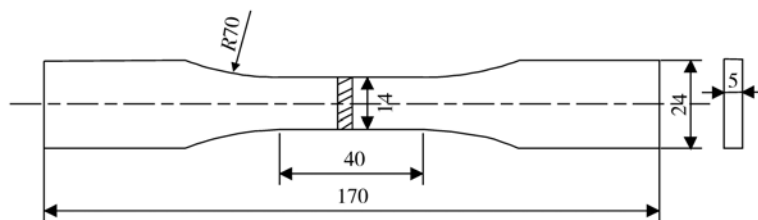


图1 TC11 焊接接头试样

Fig. 1 TC11 welded joint piece

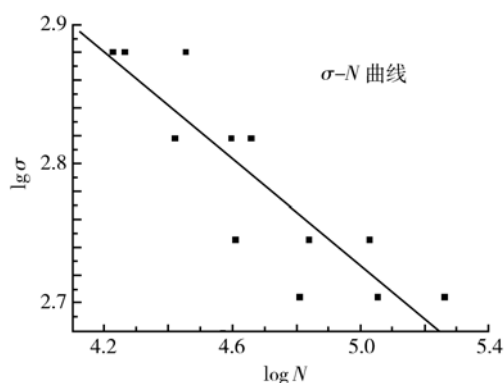


图 2 TC11 焊接接头 S-N 曲线

Fig. 2 S-N curve of TC11 welded joint

2.2 宏观损伤量的确定

试验过程中,通过引伸计采集得到各循环时刻的应变情况,当循环达到稳定时(约几十至几百个循环),测出应变的峰值和谷值,得到初始稳定的 $\Delta\epsilon^*$;其后,每隔一定的循环数,提取应变的峰值和谷值,获得对应循环数下的 $\Delta\epsilon$ 。将获得的上述参量带入公式(1)即可得到相应的宏观损伤量 D 。图 3 即为得到 TC11 焊接接头试件不同载荷下的宏观损伤变量 D 的演变历程。

由图可见,在疲劳断裂初期损伤是个累积的过程,而且损伤量并不是很大,即试样在疲劳加载的前期损伤变化基本平稳,等到损伤达到一定程

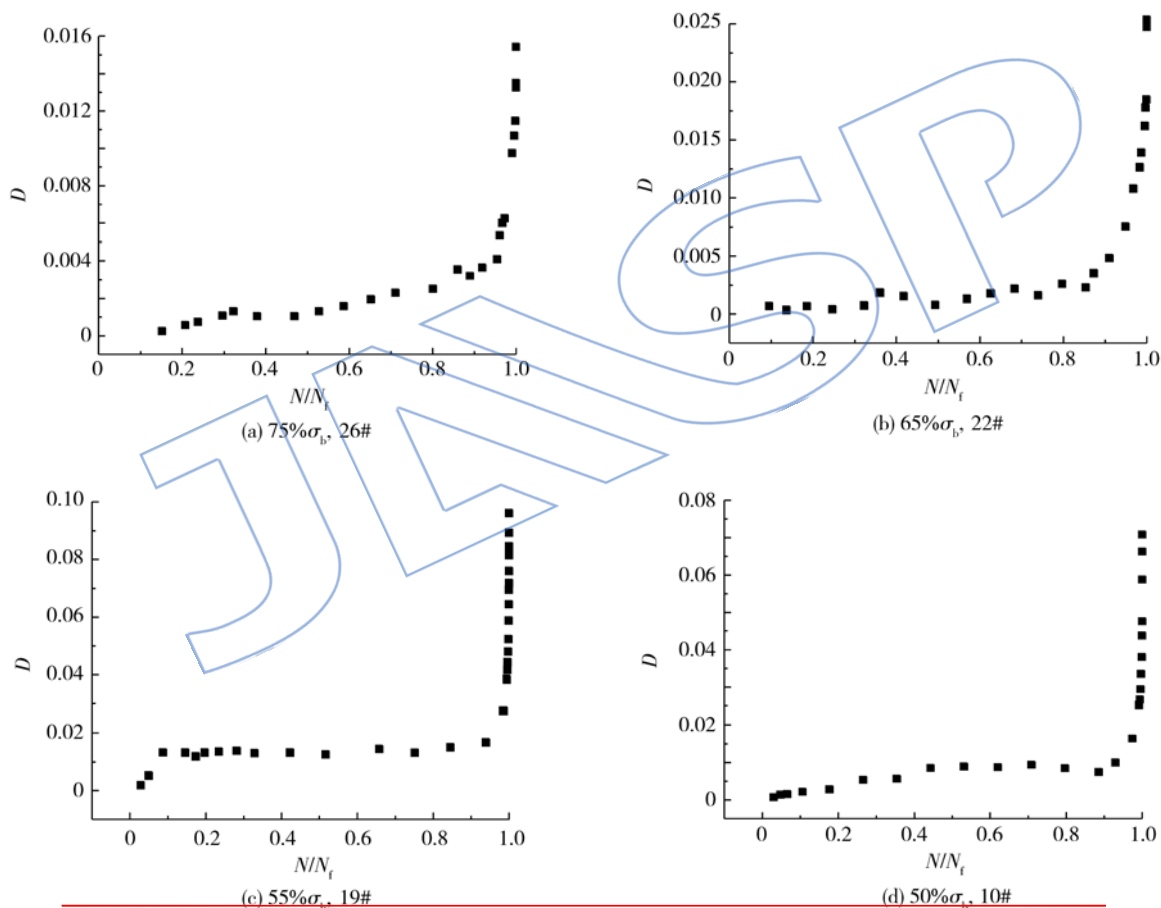


图 3 试件宏观损伤演变

Fig. 3 Macroscopic damage evolution of samples

度后,接近断裂时损伤量明显增大,直到某个临界范围,试件突然断裂,宏观表现为脆性断裂。

3 TC11 焊接接头分形损伤演化模型的建立

3.1 焊接接头分形维数

在分形空间中,金属材料断口表面的粗糙程

度可以近似的用分形维数 d 来描述。目前,金属断口分形维数的测量方法主要有:小岛法、垂直截面法、谱分析法、二次电子图像扫描法等。本文基于二次电子图像扫描法(SEM),利用计盒维数法对焊接接头断口形貌 SEM 图像进行处理,计算分形维数。

从疲劳试验后断裂的试件上取样,在扫描电

镜下观察其断口微观特征. 先在低倍下观察, 找到裂纹源, 然后在高倍下拍摄裂纹源附近的 SEM 图片. 图 4 为放大 1000 倍时典型试件裂纹源附近的 SEM 图片, 由图可以清楚地看到裂纹源位置和放射状的扩展脊线. 随载荷级的降低, 疲劳条带之间间距变小, 扩展脊线更密集, 断口微观形貌更加粗糙.

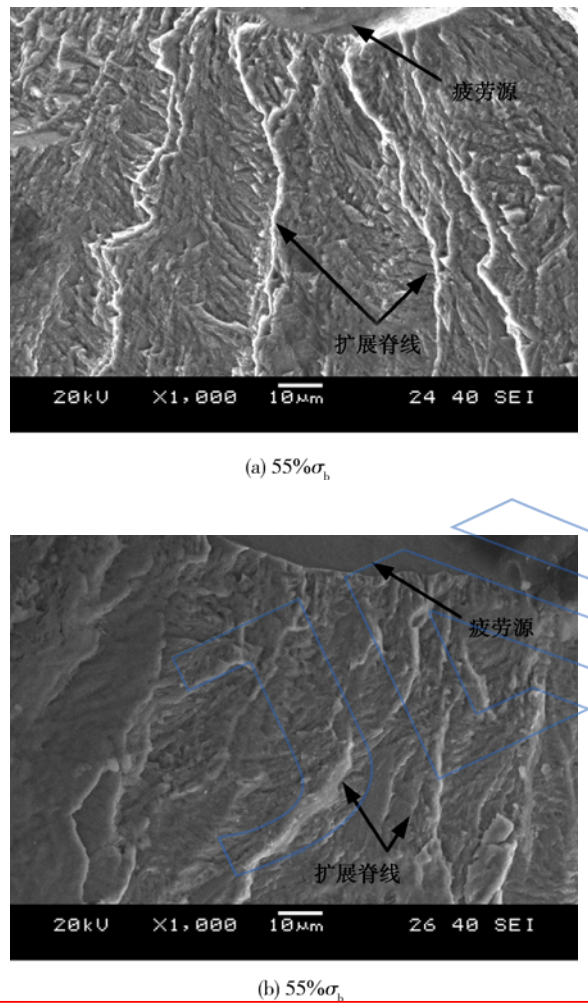


图 4 典型试件断口微观形貌

Fig. 4 Fracture micro appearance of typical samples

将试验得到的各试样 SEM 图像按统一的标准处理, 对图像进行定量分析, 测量码尺范围取 10~20, 计算得到各试样的分形维数, 对同一载荷下的结果取平均值得到表 1. 由表中数据可见, 随着载荷降低, 疲劳寿命增大, 分形维数亦逐渐增加. 分形维数随疲劳寿命增加而增加可理解为: 随着循环数的增加, 裂纹逐渐向外扩展, 在微观上表现为裂纹台阶的层状结构的外推, 从而断面粗糙度不断增加, 故分形维数也随之增加.

表 1 各载荷水平下的分形维数

Table 1 Fractal dimensions of fracture surface on every loading level

最大应力 σ/MPa	循环寿命 N_f	平均分形维数 d
759	15 921	2.376 7
658	33 445	2.396 9
556	79 547	2.426 7
506	130 422	2.447 7

3.2 分形损伤演化方程

计算分形维数 d 后, 结合上文得到的宏观损伤量 D , 代入公式(2)即可得到试件各循环次数的分形损伤量 D_f . 式中无量纲码尺 $\xi = \delta/L$, L 为所测图片边界值, 由图片像素确定, 文中为 490. δ 为测量选用的码尺, 在计算断口分形维数时, 设置码尺范围为 10~20 像素, 衡量分形损伤时码尺大小可以定为 $\delta = 15$, 故无量纲码尺 $\xi = 0.0306$.

图 5 即为计算得到的试件宏观损伤量 D 与分形损伤量 D_f 随循环数增加时的演化曲线. 由图可知分形损伤和宏观损伤的演化趋势完全一致, 损伤的过程可以分为三个阶段: 一是初始阶段, 此阶段在疲劳寿命的前数百个循环内, 损伤显著增加; 二是稳定发展阶段, 该阶段损伤增长缓慢, 占疲劳寿命的主要部分; 三是临界失效阶段, 试件在临界损伤附近材料性能急剧劣化, 损伤明显增加, 最终达到临界损伤断裂失效. 相比而言, 分形损伤量考虑了材料断口的微观特征, 更能反映疲劳裂纹扩展的微观本质; 此外, 从数值上来看, 分形损伤变量相当于宏观损伤变量放大了 ξ^{d-3} (约 8~10) 倍, 因此反映出的损伤演化现象更为明显, 也可以从一定程度上避免宏观损伤测量误差导致的影响.

根据得到的各试件分形损伤演变曲线, 按公式(8)进行拟合, 其中 N/N_f 为自变量, D_f 为因变量, D_0 , $\alpha_1 = 1/(1-\alpha)$ 及 $\beta_1 = 1/(1+\beta)$ 为待拟合参数, D_c 由试验结果确定 (取试件断裂瞬间突变值前一循环的记录). 最终得到各参数变化范围分别为: $D_c(0.1 \sim 0.8)$, $D_0(0.01 \sim 0.06)$, $\alpha_1(1 \sim 40)$, $\beta_1(0.1 \sim 0.6)$.

对同一载荷级下的拟合参数通过取平均值, 进而得到各级载荷下的分形损伤演化方程

$$\sigma = 759 \text{ MPa}$$

$$D_f = 0.0132 + 0.0929 \times \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{N}{15921} \right)^{6.5050} \right]^{0.3116} \right\} \quad (10)$$

$$\sigma = 658 \text{ MPa}$$

$$D_f = 0.0115 + 0.1306 \times \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{N}{33445} \right)^{1.4903} \right]^{0.1432} \right\} \quad (11)$$

$$\sigma = 556 \text{ MPa}$$

$$D_f = 0.0456 + 0.4714 \times \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{N}{79547} \right)^{32.6995} \right]^{0.4412} \right\} \quad (12)$$

$$\sigma = 506 \text{ MPa}$$

$$D_f = 0.0203 + 0.2161 \times \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{N}{130422} \right)^{15.3822} \right]^{0.2976} \right\} \quad (13)$$

一般来说,焊接接头的初始损伤与试件的焊接工艺密切相关,它是不随载荷的变化而发生变化,对于同一批次的试件可以认为初始损伤相同。因此,根据上述不同载荷下的结果,可以取其平均值作为初始损伤 $\bar{D}_0 = 0.0226$ 。 α 和 β 是与材料相关的参数,本文亦通过取其均值进行损伤方程的研究,得到 $\bar{\alpha} = 0.7699$, $\bar{\beta} = 2.9548$,进而得到 $\bar{\alpha}_1 = 4.3458$, $\bar{\beta}_1 = 0.2529$ 。临界损伤 D_c 与载荷之间存在定量关系,对试验数据按最小二乘法拟合得到 $D_c = 1.5881 - 0.0019\sigma$ 。

将上述参数和式(9)代入式(8),最终得到 TC11 焊接接头高周疲劳统一的分形损伤演化方程

$$D_f = 0.0226 + (1.5655 - 0.0019\sigma) \times \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{N}{10^{\frac{3.6904 - \lg \sigma}{0.1928}}} \right)^{4.3458} \right]^{0.2529} \right\} \quad (14)$$

式(14)反映了分形损伤变量 D_f 随载荷 σ 及循环周次 N 变化的演化过程。

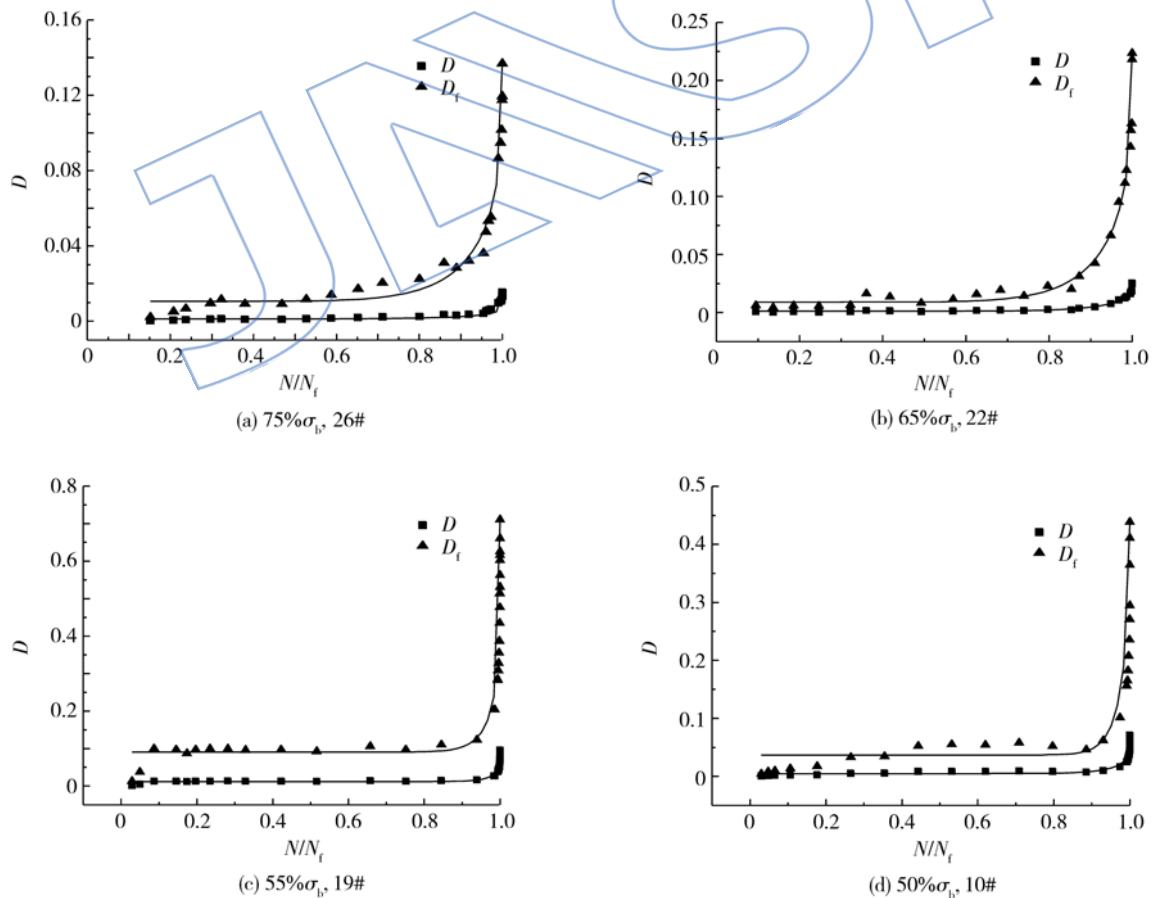


图5 试件分形损伤与宏观损伤演化

Fig. 5 Fractal damage and macroscopic damage evolution of samples

4 结 论

本文以 TC11 电子束焊接接头为研究对象,结合损伤力学理论和几何分形理论,研究其高周疲劳性能,并得到以下结论。

1) 根据控制应力的疲劳试验得到了 TC11 电子束焊接接头的 S-N 曲线

$$\lg \sigma = 3.6903 - 0.1928 \lg N$$

2) 基于断口的 SEM 图像,计算得到各试件断口的分形维数,结果表明断口的分形维数随试件疲劳寿命的增大而增大。

3) 分形损伤量与宏观损伤量变化趋势完全相同,而分形损伤量考虑了材料断口的微观特征,相当于将宏观损伤变量扩大了 ξ^{d-3} 倍,其结果更能反映出循环加载过程中损伤演化规律。

4) 根据试验数据进行拟合计算,确定了分形损伤演化方程中的各材料参数,从而建立各级载荷下焊接接头的分形损伤演化方程。方程综合考虑了断口的宏细观特征、初始损伤、临界损伤等因素,对钛合金焊接接头件的高周疲劳寿命预测有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] Cheng G X, Zuo J Z. Continue damage model of low cycle fatigue and fatigue damage analysis of welded joint [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1996, 55(1): 155-161.
- [2] 倪金刚, 陶春虎. 损伤力学教程[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
NI Jingang, TAO Chunhu. The course of damage mechanics [M]. Beijing: Science Press, 1996. (in Chinese)
- [3] 郭海丁, 郭华芝, 刘观日, 等. TC4 钛合金焊接接头疲劳损伤演变模型研究[J]. 航空动力学报, 2003, 18(2): 206-210.
GUO Haiding, WU Huazhi, LIU Guanri, et al. A research of fatigue damage evolution of TC4 alloy welded joint [J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(2): 206-210. (in Chinese)
- [4] Pande C S, Richards L R, Smith S. Fractal characteristics of fractured surfaces [J]. Journal of Mat. Sci. Letters, 1987, 6(1): 295-301.
- [5] Ganti S, Bhushan B. Generalized fractal analysis and its applications to engineering surfaces [J]. Wear, 1995, 180(1): 17-34.
- [6] Lu C, Mai Y W, Bai Y. Fractals and scaling in fracture induced by microcrack coalescence [J]. Philosophical Magazine Letters, 2005, 85(2): 67-75.
- [7] 谢和平, 鞠杨. 分数维空间中的损伤力学研究初探[J]. 应用力学学报, 1999, 31(3): 300-309.
XIE Heping, JU Yang. A study of damage mechanics theory in fractional dimensional space [J]. Acta Mechanica Sinica, 1999, 31(3): 300-309. (in Chinese)
- [8] 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. The research of low cycle fatigue macroscopic damage and microscopic damage evolution of TC11 alloy welded joint [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004. (in Chinese)
- [9] 武奇, 邱惠清, 郭海丁. TC11 钛合金焊接接头低周疲劳分形损伤演化研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(4): 730-736.
WU Qi, QIU Huiqing, GUO Haiding. Studying for low-cycle fatigue fractal damage evolution on TC11 Ti alloy welded joint [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(4): 730-736. (in Chinese)
- [10] 张国栋, 于慧臣, 何玉怀, 等. 损伤力学方法在材料低周疲劳试验中的应用研究[J]. 航空动力学报, 2007, 22(9): 1544-1549.
ZHANG Guodong, YU Huicheng, HE Yuhuai, et al. Application research of damage dynamics for low cycle fatigue test [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(9): 1544-1549. (in Chinese)
- [11] 沈为. 损伤力学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1995.
SHEN Wei. Damage mechanics [M]. Wuhan: The Huazhong University of Science and Technology Press, 1995. (in Chinese)
- [12] 李兆霞. 损伤力学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
LI Zhaoxia. Damage mechanics and its application [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)