

文章编号: 1004 - 0609(2004)09 - 1483 - 06

## 钛合金焊缝表面疲劳短裂纹的扩展行为<sup>①</sup>

回 丽<sup>1, 2</sup>, 董广成<sup>1</sup>, 谢里阳<sup>1</sup>, 何雪宏<sup>1</sup>, 刘建中<sup>3</sup>

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 沈阳 110004; 3. 北京航空材料研究院, 北京 100095;

2. 沈阳航空工业学院 机械工程系, 沈阳 110034;)

**摘 要:** 对 TC2 钛合金焊缝金属疲劳表面短裂纹扩展行为进行了实验研究, 表明裂纹的扩展过程是多裂纹系统的演化过程。基于实验结果, 考虑到短裂纹扩展过程中的合并、干涉作用等因素, 用应力松弛区模糊化的方法, 建立了仿真模型, 对疲劳短裂纹演化的物理过程进行了数值模拟。将短裂纹演化行为模拟结果与短裂纹扩展复型的实验结果比较, 可以看出两者吻合较好, 表明所建立的准则合理、实用。

**关键词:** 钛合金; 焊缝金属; 疲劳短裂纹; 数值仿真

中图分类号: TG 111.8

文献标识码: A

## Propagation behaviours of short fatigue cracks of titanium alloy-weld

HUI Li<sup>1, 2</sup>, DONG Guang-cheng<sup>1</sup>, XIE Li-yang<sup>1</sup>, HE Xue-hong<sup>1</sup>, LIU Jian-zhong<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical Engineering and Automation,

Northeastern University, Shenyang 110004, China;

2. Mechanical Engineering Department,

Shenyang Institute of Aeronautical Industry, Shenyang 110034, China;

3. Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**Abstract:** The propagation behaviour on surface short fatigue cracks of TC2 titanium alloy-weld was investigated according to the experiment. The results show that the process of crack propagation is a multi crack system. Based on the experimental results, the simulation model was developed by using the method of the fuzzed relaxation regions. The effects of junction and interaction in the short crack propagation process were taken into account. And the simulation for the process of the short fatigue crack propagation and junction was realized. The results indicate that the method make more accurate to set out the process of the short fatigue crack evolution.

**Key words:** titanium alloy; weld; short fatigue crack; simulation

在构件的疲劳失效中, 短裂纹阶段的寿命有时可占总寿命的 80%。通常将不满足线弹性断裂力学有效性条件的裂纹统称为短裂纹, 具体地又可以分为微观结构短裂纹(MSC)和物理短裂纹(PSC)<sup>[1-3]</sup>。疲劳短裂纹由于其行为的特殊性而受到广泛重视, 研究者们对短裂纹的扩展特性进行了大量研究, 提出了一些描述短裂纹扩展行为的模型, 较典型的有

Brown-Hobson 模型<sup>[2]</sup>、Navarro-Rios 模型<sup>[4]</sup>等, 但这些都涉及短裂纹的研究大多集中在对个别裂纹行为的问题上。一般而言, 各个裂纹的行为差异很大, 相应的实验点分散, 又难于计入裂纹之间的相互作用, 因而只研究单条裂纹行为具有很大的局限性。从大量实验中观察到, 对材料损伤过程的影响是全体裂纹共同作用的结果, 这在短裂纹阶段尤为明

① 基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G19990650)

收稿日期: 2004-02-01; 修订日期: 2004-05-28

作者简介: 回 丽(1965-), 女, 副教授, 博士研究生。

通讯作者: 回 丽, 电话: 024-86809920; E-mail: syhuili@126.com

显,因此必须对裂纹的群体行为进行研究。目前,随着计算机运算能力的提高,利用计算机进行裂纹演化过程仿真成为该研究领域的一个重要手段。许多研究者对疲劳短裂纹的行为进行了数值模拟<sup>[5~8]</sup>,并得到了较好的模拟结果。

本文作者综合以往研究模型中短裂纹扩展的各个影响因素,根据疲劳短裂纹的实验分析,基于应力松弛区域模糊化这一新的思想,建立一个综合考虑短裂纹扩展、合并、干涉行为的仿真模型,并加以实验验证。

## 1 实验及结果分析

### 1.1 实验

实验用材料为 2.5 mm 厚度的 TC2 钛合金轧制板材,其化学成分(质量分数,%)为: Al 4.09, Mn 1.66, Fe < 0.10, Si < 0.10, Zr < 0.05, C 0.005, 余量为 Ti。将板材进行手工钨极氩弧对焊,焊缝方向垂直于母材的轧制方向;焊接按 HB/Z120-87 标准进行,焊缝质量按 HB5376-87 标准(I级)进行检验,焊接后进行真空退火热处理。焊接工艺参数为:焊接层数 1,焊丝尺寸 2.5 mm × 1.6 mm(由 TC2 板材裁制),氩气导入量 812 mL/min,坡口形式 45°,焊接电压 10 V,焊接电流 85 A,焊接速度 1214 mm/min;真空热处理温度 560 °C,保温时间 3 h。试样为单边圆缺口型式,缺口在焊缝部位,半径为 5 mm。

实验设备: Schenck PC 160M 疲劳实验机。实验条件:空气、室温、载荷控制,轴向正弦拉-压波形,应力比  $R = -0.2$ ,实验频率 5 Hz;选用中寿命区(疲劳寿命在  $10^4 \sim 10^5$  之间)所对应的两级应力水平,分别为 420 MPa 和 380 MPa。裂纹监测方法采用复型法。

### 1.2 结果与分析

不同位置、尺度的短裂纹对疲劳损伤的贡献不同<sup>[9]</sup>。规定最终导致试样失效的裂纹为主裂纹,主裂纹形成过程中,其发展路径上的所有裂纹为有效短裂纹。因此,有效短裂纹对疲劳损伤将会做出直接贡献。本实验则针对有效短裂纹的扩展、合并与干涉行为进行了观测分析。

图 1 给出了在  $\sigma_{\max} = 420$  MPa 应力水平下,一典型试样在主裂纹扩展路径上,短裂纹扩展、合并

阶段的复型照片,该试样的疲劳断裂寿命为 11 030 次循环。从图中可知:

1) 循环次数  $N = 4\ 800$  次时,在试样表面某一区域内明显可见 A、B、C、D 4 条短裂纹,并呈随机分布(图 1(a))。

2) 随着循环次数的增加,裂纹萌生与扩展同时进行。裂纹数量在增加,原有裂纹继续扩展,短裂纹的取向和扩展路径存在较大的不规则性,行为没有规律。当循环次数  $N = 6\ 400$  次时,该区域上又萌生 E、F 裂纹, A、B、C、D 4 条单一裂纹缓慢增加,未出现裂纹合并现象(图 1(b))。

3) 单一裂纹的扩展,使裂纹长度增加,当裂纹间距达到临界值时,将发生合并现象。当循环次数  $N = 7\ 000$  次左右时, B、F 两条裂纹产生合并。一经合并裂纹长度迅速增长,形态不断变化,裂纹的扩展方向会受到很大的影响。此时,在主裂纹扩展路径上,裂纹萌生受到屏蔽抑制,不再萌生新的裂纹(图 1(c))。

4) 随着裂纹长度不断增长,裂纹合并现象占主导,逐步形成一条最终导致试样失效的主裂纹。主裂纹取向主要由加载方向决定,其行为的不规则性减小,之后主裂纹稳定增长(图 1(d))所示。

5) 在裂纹扩展、合并的同时,伴随着明显的裂纹干涉效应。如图 1(d) 所示,由于主裂纹的形成,在其周围产生明显的裂纹松弛区域,受其影响,该区域内的裂纹不再扩展,图中裂纹 A 的右端裂纹扩展速率接近于零(图 1(d))。

对所有试样复型图片的观察分析可知,裂纹的扩展过程是多裂纹系统的演化过程。其中包含裂纹长度的演化、裂纹数量的演化及多裂纹间的相互作用等。

图 2 和 3 分别为该试样裂纹扩展速率、裂纹数量随裂纹尺度增加的变化曲线。从图中可知:

1) 短裂纹扩展速率及裂纹数量的变化都具有明显的微观结构短裂纹(MSC)和物理短裂纹(PSC) 2 个阶段特征,分界点大约在疲劳寿命分数 0.65 左右。

2) MSC 阶段。裂纹扩展受微观组织结构的影响较严重,测得的裂纹扩展数据波动较大,裂纹扩展速率较低,为  $10^{-5} \sim 10^{-4}$  mm/cycle 量级;在裂纹合并之前,裂纹扩展速率呈下降的趋势,在分界点处出现最低值(图 2);这一阶段裂纹数量逐渐增加,在两阶段分界点达到最大值(图 3)。

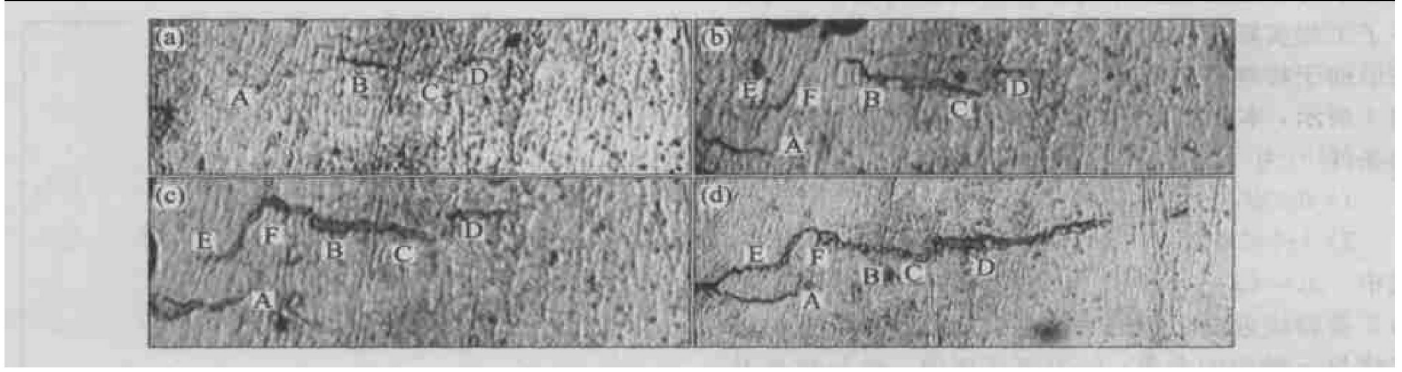


图 1 典型试样的短裂纹扩展复型照片

Fig. 1 Replica of short fatigue crack propagation  
(a)  $-N=4800$ ; (b)  $-N=6400$ ; (c)  $-N=7000$ ; (d)  $-N=8400$

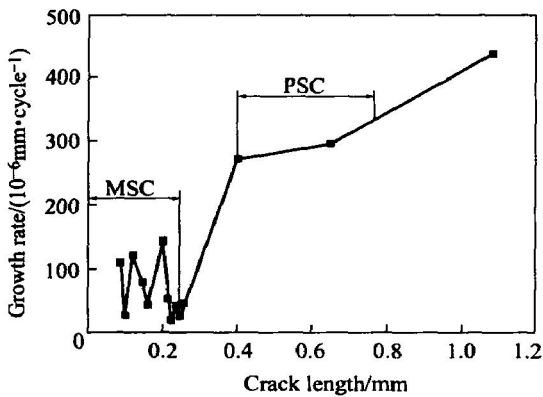


图 2 裂纹扩展速率与裂纹长度的关系

Fig. 2 Relationship between crack growth rate and crack length

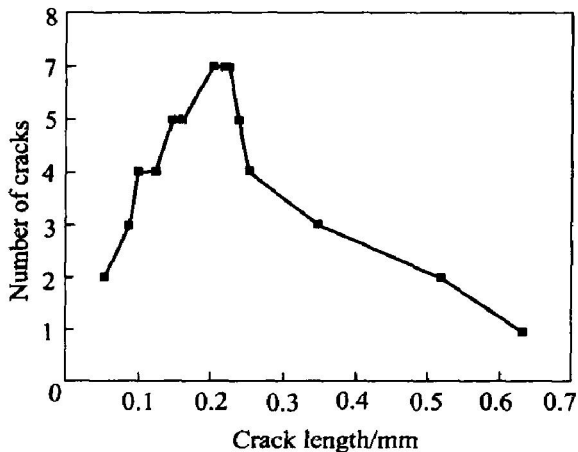


图 3 裂纹数量与裂纹长度的关系

Fig. 3 Relationship between crack number and crack length

## 2 裂纹生长的模拟准则

疲劳短裂纹扩展是一个随机过程, 因此学者们建立了多种随机模型, 如马尔可夫链模型<sup>[10]</sup>, 微裂纹数密度分布函数<sup>[11]</sup>, 微裂纹长大的随机方程等<sup>[12]</sup>。这些模型往往复杂不易理解, 相比之下物理模型则更为直观。将数学模型和物理模型结合用以描述短裂纹扩展的随机行为, 并借助计算机直观再现疲劳损伤过程的物理特征, 成为该研究领域的一个方向。本文作者试图在大量的实验观测的基础上, 基于这一思想建模, 对短裂纹的演化过程进行可视化再现, 并对模拟结果进行分析, 探讨所建立模型的有效性。

### 2.1 短裂纹扩展模型

有关裂纹的生长过程, 前人已经做出了大量的研究<sup>[25, 13]</sup>, 尤其在裂纹的扩展速率方面。基于实验观测, 本文采用分段函数的数学模型描述短裂纹扩展方式:

$$\frac{da}{dN} = \begin{cases} A(\Delta\gamma)^\alpha (d_s - a) & (\text{MSC 阶段}) \\ k(\Delta\gamma)^\alpha - D & (\text{PSC 阶段}) \end{cases}$$

式中  $A$ 、 $\alpha$ 、 $k$  为材料常数, 指数不随构件的形状和载荷性质而改变;  $\Delta\gamma$  为剪应变范围;  $d_s$  为细观组织第一门槛值, 该值是一个统计量, 由实验观测统计确定;  $a$  为裂纹长度;  $D$  为细观组织第二门槛值, 亦由实验确定。

### 2.2 短裂纹连接准则

多裂纹合并现象直接影响着疲劳短裂纹演化行为, 主裂纹的形成与其密切相关。以往的研究主要从数学模型和物理模型两个方面进行, 数学模型的解析解一直是研究的主要方向<sup>[14]</sup>, 但到目前为止,

3) PSC 阶段。初始合并结束, 此时裂纹扩展速率迅速增加, 裂纹数量由于合并而减少。随着合并的进行, 某个短裂纹的尺度迅速增加, 形成一条主裂纹。

能够求得多裂纹相互作用解析解的情况很少，满足不了工程实际应用的需要。所以在模拟过程中，往往借助于物理模型唯象反映多裂纹的连接问题。如图4所示，本文在数值仿真中使用的两条裂纹连接的条件<sup>[15]</sup>为

- 1)  $0 < l/a_0 < l_c$ ;
- 2)  $|r| < \pi/2$

式中  $a_0 = (a_1 + a_2)/2$  为2条裂纹的平均长度;  $l$  为2条裂纹近端之间的垂直距离;  $r$  为2条裂纹连接线与  $x$  轴向的夹角;  $l_c$  为连接阈值, 是与载荷及材料性能相关的参量。

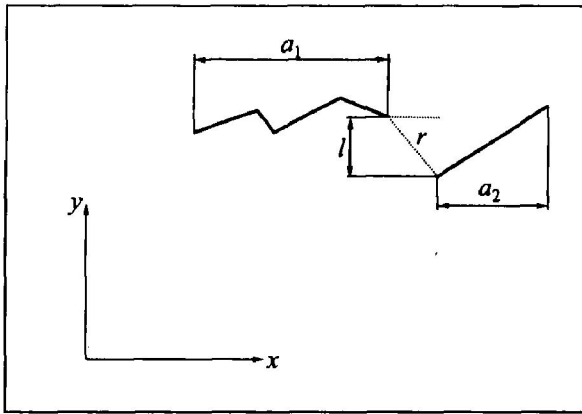


图4 裂纹连接模型  
Fig. 4 Cracks linkage model

### 2.3 短裂纹干涉准则

为了更接近实际地描述多裂纹之间的干涉行为, 用应力松弛区域模糊化的方法建立多裂纹干涉准则。具体步骤如下(如图5所示):

首先, 在受到某条裂纹  $L$  影响的所有点当中, 确定距裂纹  $L$  端点最远的某一点  $M$ , 并定义  $M$  点与裂纹  $L$  端点的距离为  $l_{min}$ ; 再确定任意一点  $X(i, j)$  为研究对象,  $i, j$  为对应模拟区域内的行列位置,  $X$  点与裂纹  $L$  相应端点的距离为  $l$ 。定义  $a_{ij} = l_{min}/l$ ,  $a_{ij}$  为判断  $X$  点是否在应力松弛区域内的模糊度。如果  $a_{ij}$  大于 1, 那么取  $a_{ij} = 1$ , 则  $X$  点一定在应力松弛区域内; 如果  $a_{ij}$  小于 1, 则可通过定义的阈值  $l_c$ , 判断  $X$  点是否在应力松弛区域内; 若  $a_{ij}$  大于  $l_c$ , 则  $X$  点在应力松弛区域内, 同时可通过改变模糊度的阈值来改变应力松弛区域的范围。

基于应力松弛区域模糊化这一建模思想, 发展了传统模型中对于应力松弛区域的对称性和规则性的描述。由于裂纹本身具有不规则性, 所以将应力松弛区域模糊化, 来描述短裂纹的干涉行为更具有真实性。

## 3 模拟流程及结果分析

基于以上模型, 在 VC6.0 开发环境下, 以图形化方式, 连续动态仿真再现表面疲劳短裂纹扩展及合并、干涉的发展过程, 形象化揭示了短裂纹的演化特征与规律, 图6所示为仿真程序流程框图。

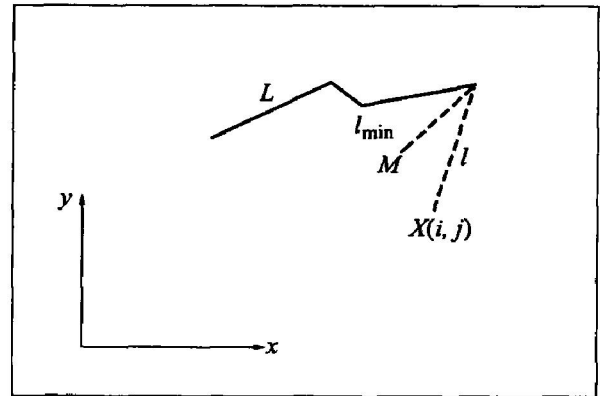


图5 裂纹干涉模型  
Fig. 5 Cracks interference model

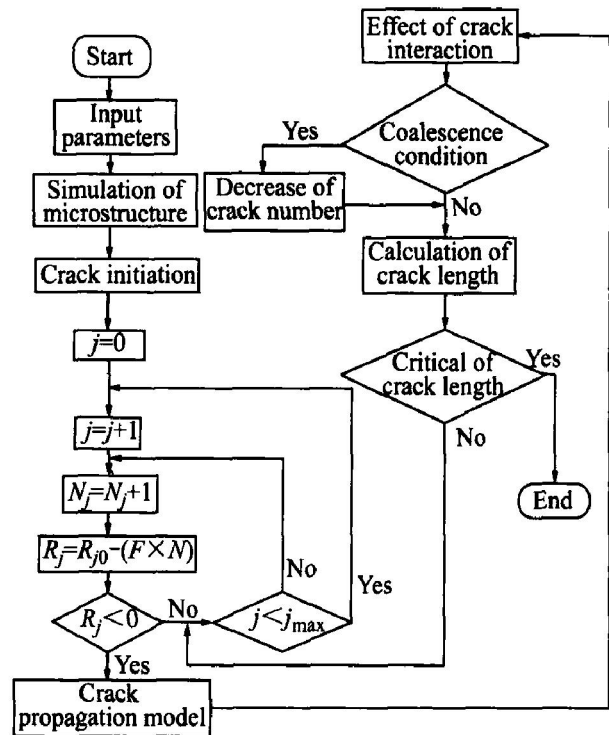


图6 疲劳短裂纹扩展仿真程序流程框图  
Fig. 6 Simulation program flowsheet for short fatigue crack propagation

图7所示为根据一次样本的实验条件模拟的结果。在图7(a)中区域 A-1, A-2 内各有 3 条微裂纹, 随着循环次数的增加裂纹不断扩展, 区域 A-1 中的 2 条裂纹发生了合并, 如图 7(b) 所示。图 7(c)

中在假设模糊松弛准则成立的条件下, 由于裂纹的干涉作用, 区域 A-1 内上方的裂纹左端扩展速率为零; 区域 A-2 内的裂纹进一步扩展而连接, 可能成为最终的主裂纹。模拟结果显示了裂纹演化过程中的扩展、合并及干涉行为, 与实际情况相吻合。

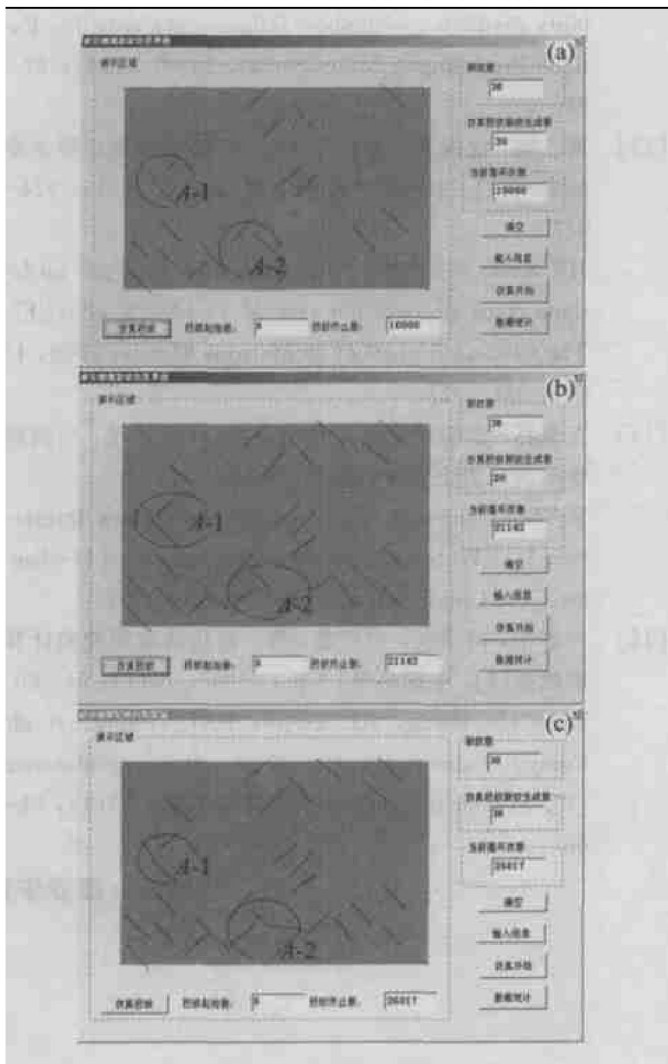


图 7 多裂纹演化特征模拟

Fig. 7 Simulation of multi-crack evolutionary characters

图 8 所示为一次样本的仿真结果与实验结果的比较。应力水平为  $\sigma_{\max} = 380 \text{ MPa}$ 。由实验得其疲劳断裂寿命为 25 210 次循环, 疲劳裂纹萌生寿命为 16 600 次循环, 大约在疲劳寿命分数 0.65 左右。其模拟值为: 疲劳断裂寿命为 26 100 次循环, 疲劳裂纹萌生寿命为 16 200 次循环, 大约在疲劳寿命分数 0.62 左右。由结果比较可以看出, 模拟值与实验值吻合较好。

## 4 结论

### 1) TC2 钛合金焊缝金属表面疲劳短裂纹行为

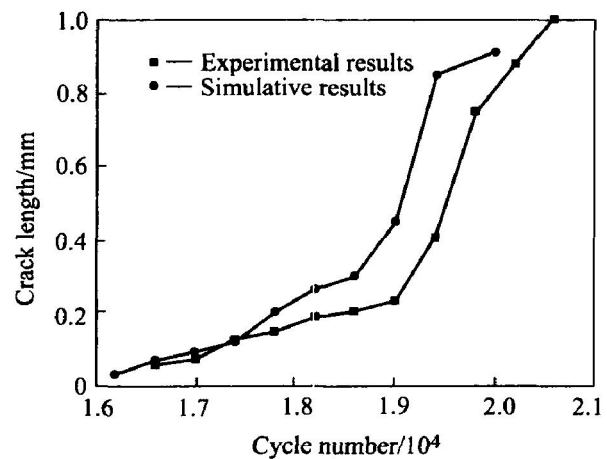


图 8 裂纹长度随循环次数的变化

Fig. 8 Variation of crack length with cycle number

具有 MSC 和 PSC 2 个阶段特征, 分界点大约在疲劳寿命分数 0.65 左右; MSC 阶段裂纹扩展速率出现振荡, 裂纹数量逐渐增加; 进入 PSC 扩展阶段, 裂纹扩展速率迅速增加, 裂纹数量由于合并而逐渐减少。

2) 采用分段函数数学模型描述短裂纹扩展速率, 同时考虑裂纹之间的合并和干涉作用, 以应力松弛区域模糊化方法对其干涉行为加以实现, 建立了描述钛合金焊缝表面疲劳短裂纹演化过程的综合模型。

3) 通过自行开发的仿真软件, 再现了疲劳短裂纹的生长过程。经对比实验验证, 结果吻合较好。可以用于精确预测钛合金焊接结构的疲劳全寿命。

## REFERENCES

- [1] Miler K J. The behaviour of short fatigue cracks and their initiation[J]. *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, 1987, 10(2): 93 - 113.
- [2] Angelova D, Akid R. A note on modelling short fatigue crack behaviour[J]. *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, 1998, 21(1): 771 - 779.
- [3] 洪友士, 方 飙. 疲劳短裂纹萌生和发展的细观过程和理论[J]. *力学进展*, 1993, 23(4): 468 - 485.  
HONG You-shi, FANG Biao. Process and theory of short fatigue crack initiation and propagation[J]. *Advances in Mechanics*, 1993, 23(4): 468 - 485.
- [4] Navarro A, de Los Rios E R. A model of short fatigue crack propagation with an interpretation of the short-long crack transition[J]. *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, 1987, 10(2):

- 169 - 186.
- [5] Kitagawa H, Fujita T, Miyazawa K. Small randomly distributed cracks in corrosion fatigue [J]. *Astm Stp*, 1978, 642: 98 - 114.
- [6] Suh C M, Lee J J, Kang Y G, et al. A simulation of the crack process in type 304 stainless steel at 538 °C [J]. *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, 1992, 15(7): 671 - 684.
- [7] 洪友士, 顾子晏, 方 飙. 疲劳短裂纹的损伤特征和计算机模拟[J]. *机械强度*, 1995, 25(1): 54 - 60.  
HONG Your shi, GU Zi yan, FANG Biao. Damage characteristics and computer simulation of short fatigue cracks [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 1995, 25(1): 54 - 60.
- [8] 孙道恒, 孙训芳, 刘先斌, 等. 光滑试样表面疲劳裂纹演化的数值仿真[J]. *固体力学学报*, 2002, 23(1): 66 - 71.  
SUN Dao heng, SUN Xun fang, LIU Xian bin, et al. Numerical simulation on the smooth surface's fatigue cracks evolution [J]. *Acta Mechanica Solide Sinic*, 2002, 23(1): 66 - 71.
- [9] 赵永翔, 高 庆, 王金诺. 不锈钢管道焊缝金属疲劳短裂纹行为的实验研究[J]. *金属学报*, 2000, 36(9): 931 - 943.  
ZHAO Yong xiang, GAO Qing, WANG Jin nuo. Experimental observations on the short fatigue crack behaviour of a stainless steel pipe-weld metal [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2000, 36(9): 931 - 943.
- [10] Cox B N, Morris W L. A probabilistic model of short fatigue crack growth [J]. *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, 1987, 10(5): 419 - 428.
- [11] HONG Your shi, QIAO Yu. An analysis on overall crack-number density of short-fatigue cracks [J]. *Mechanics of Materials*, 1999, 31(4): 525 - 534.
- [12] Wilson S P, Taylor D. Statistical analysis and reliability prediction with short fatigue crack data [J]. *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, 1999, 22(3): 67 - 76.
- [13] 何 晓, 沈保罗. 氢对 Ti-4Al-2V 疲劳裂纹扩展速率的影响 [J]. *中国有色金属学报*, 2003, 13(4): 924 - 927.  
HE Xiao, SHEN Bao-luo. Effects of hydrogen on fatigue crack propagation rate of Ti-4Al-2V alloy [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2003, 13(4): 924 - 927.
- [14] 王庚荪. 多裂纹的相互作用研究 [D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 1992.  
WANG Geng-sun. Research on Multi-crack Interaction [D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Science, 1992.
- [15] 卢春生, 柯孚久, 白以龙, 等. 演化诱致突变的计算机模拟 [J]. *中国科学(A辑)*, 1995, 25(1): 54 - 60.  
LU Chun sheng, KE Fu jiu, BAI Yi long, et al. Computer simulation of break prevailed on evolvement [J]. *Science in China(Series A)*, 1995, 25(1): 54 - 60.

(编辑 陈爱华)