

8937-943

# 不锈钢管道焊缝金属疲劳短裂纹行为的实验研究\*

## II. 裂纹萌生、扩展与交互作用

赵永翔<sup>1)</sup> 高庆<sup>1)</sup> 王金诺<sup>1)</sup>

1) 西南交通大学机械工程研究所, 成都 610031

2) 西南交通大学应用力学研究所, 成都 610031

**摘要** 基于“有效短裂纹准则”, 用复型研究了 1Cr18Ni9Ti 不锈钢管道焊缝金属光滑试样表面的短裂纹萌生、扩展与交互作用行为。结果表明: 有效短裂纹 (ESFCs) 萌生于  $\delta$  铁素体与奥氏体基体的交界处。ESFCs 扩展具有明显微观结构短裂纹 (MSC) 和物理短裂纹 (PSC) 两阶段特征。主导有效短裂纹 (DESFC) 行为是 ESFCs 交互作用的结果, 适于表征短裂纹行为。DESFC 扩展率的分散性与 ESFCs 密度的分散性有关, 说明 DESFC 裂尖前沿扩展条件的差异及其演化是 DESFC 随机扩展行为的本质原因。这一差异也是材料疲劳寿命和循环应力-应变响应存在分散性的本质原因。

**关键词** 不锈钢管道、焊缝金属、疲劳短裂纹、裂纹萌生

**中图分类号** TG405, O346.2 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2000)09-0937-07

TG404

## EXPERIMENTAL OBSERVATIONS ON THE SHORT FATIGUE CRACK BEHAVIOUR OF A STAINLESS STEEL PIPE-WELD METAL

TG457.6

### II. Crack Initiation, Growth and Interaction

ZHAO Yongxiang<sup>1)</sup>, GAO Qing<sup>2)</sup>, WANG Jinnuo<sup>1)</sup>

1) Institute of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031

2) Institute of Applied Mechanics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031

Correspondent: ZHAO Yongxiang, Tel: (028)7602465, Fax: (028)7609007,

E-mail: yz Zhao@home.swjtu.edu.cn

Manuscript received 1999-12-29, in revised form 2000-06-05

**ABSTRACT** Based on the effective short fatigue crack criterion presented in the part I, an experimental study on the initiation, growth and interaction of short fatigue cracks on the surfaces of the specimen made of 1Cr18Ni9Ti stainless steel pipe-weld metal is performed using a replica technique. The results reveal that the effective short fatigue cracks (ESFCs) always initiate from the boundaries between delta ferrite and austenitic matrix. Growth of these cracks exhibits the characters of the microstructural short crack (MSC) and physical short crack (PSC) stages. The dominant effective short fatigue crack (DESFC) behaviour resulting from the interaction between ESFCs shows a regular behaviour, and therefore, suits to describe the short crack behaviour. Dispersion of the DESFC growth rates is related to that of the densities of ESFCs indicating that the difference and evolution of the microstructural growth conditions ahead of the DESFC tips are the intrinsic causes of the random behaviour of DESFC growth, the scattered fatigue lives and cyclic stress-strain responses.

**KEY WORDS** stainless steel pipe, weld metal, short fatigue crack, crack initiation, crack growth

目前, 对短裂纹的行为机制还模糊不清。如

Hyspecky-Strnadell<sup>[1]</sup> 和 Polak<sup>[2-4]</sup> 观察到短裂纹密度在微观结构短裂纹 (MSC) 阶段较高且增加, 在 MSC 和物理短裂纹 (PSC) 两阶段交界点达到最大, 之后逐渐减小。直到试样失效。相反, Goto<sup>[5,6]</sup>, Suh<sup>[7]</sup> 和 Beretta-Clerici<sup>[8]</sup> 却发现短裂纹密度在整个寿命期恒增加。这难

\* 国防科委 95 预研项目资助 27.1.1

收到初稿日期: 1999-12-29, 收到修改稿日期: 2000-06-05

作者简介: 赵永翔, 男, 1963 年生, 副教授, 博士。

以解释短裂纹扩展率初期较高,后来逐渐趋于长裂纹,即群体影响逐渐减弱的现象。对于相同的观察结果, Beretta-Clerici 认为短裂纹密度不适于表征疲劳损伤;而 Suh 则认为短裂纹密度是重要参量。对这一矛盾结论,迄今尚无合理解释。又如,对 MSC 阶段短裂纹扩展率分散性较大且随着疲劳循环数增加而增加,在 MSC 和 PSC 两阶段分界点达到最大,之后逐渐下降并趋于饱和的现象<sup>[8-13]</sup>,也无合理解释。

上述问题的存在是因为没有充分考虑疲劳损伤的局部性和区别微裂纹尺度、位置的不同对疲劳损伤贡献的差异<sup>[14-16]</sup>。为克服这一缺陷,本文第 I 部分提出了“有效短裂纹准则”的研究方法,观测了 1Cr18Ni9Ti 不锈钢管道焊缝金属的微观结构,该准则说明, DESFC 扩展路径上的 ESFCs 的萌生、合并与扩展对疲劳损伤作出直接贡献。基于这一准则,本文研究材料表面短裂纹萌生、合并与扩展行为,材料与实验情况参见第 I 部分<sup>[17]</sup>。

## 1 微裂纹萌生与 MSC 阶段扩展

复型观察表明,有效短裂纹(ESFCs)萌生于试样表面  $\delta$  铁素体与奥氏体基体的界面处,该区域位于与管道内外表面一致的试样表面的  $D_A$  区域<sup>[17]</sup>之一,微观结构是柱状晶亚结构,一些较长微裂纹可能首先出现在试样表面的  $D_B$  区域<sup>[17]</sup>之一,可能原因有:

(1) 由于微观硬度差异很大,  $\delta$  铁素体与基体的结合力较低,因此,微裂纹一般萌生在  $\delta$  铁素体与奥氏体基体的界面。

(2)  $D_B$  区域富  $\delta$  铁素体带尺度较长且与加载轴夹角约为  $30^\circ-50^\circ$ ,取向基本与 Schmid 滑移系一致,相反,  $D_A$  区域的  $\delta$  铁素体分布很不规则且尺度较短,一些取向与应力轴垂直,近似垂直或与加载轴夹角约为  $30^\circ-50^\circ$  的  $\delta$  铁素体易于与基体分离,但当裂尖遇到基体时较难扩展,因此,疲劳初期,  $D_A$  区域的微裂纹较  $D_B$  区域短。

(3)  $D_A$  区域裂纹的驱动力始终约为加载拉应力  $\sigma$ ,  $D_B$  区域的最大驱动力仅为加载应力的二分之一左右,即  $\sigma/2$ ,当其裂尖遇到较厚基体时,很难克服滑移阻力继续扩展,趋于止裂,相反,  $D_A$  区域的微裂纹在较大驱动力作用下最终将克服微观结构障碍的约束,合并扩展形成 DESFC,对疲劳损伤做出直接贡献。

图 1 是典型试样 ESFCs 萌生处  $D_A$  区域之一的复型照片,从图中可知:

(1) 比较图 1b 和图 1a,疲劳循环数  $N=100$  cyc 时,  $\delta$  铁素体与奥氏体基体分离形成 ESFCs 的现象,  $N=300$  cyc 时, ESFCs 尺度 ( $2a$ ) 约  $30\ \mu\text{m}$  (图 1c),而此时在  $D_B$  区域上可观察到长约  $200\ \mu\text{m}$  的微裂纹,该裂纹由取向一致的两条相邻富  $\delta$  铁素体带合并而成,

之前它们被较薄基体隔离<sup>[14]</sup>。

(2) 随着疲劳循环数增加,  $D_A$  区域的 ESFCs 尺度缓慢增加(图 1c-d),约在  $N=1500$  cyc 时,某些 ESFCs 达到这样的尺度(约  $30-50\ \mu\text{m}$ ),继续扩展将发生初始连接(图 1e-f),形成一条后来使试样失效的 DESFC,而  $D_B$  区域较长的微裂纹尺度增加较少,并发生止裂<sup>[14]</sup>。

(3) ESFCs 的取向和扩张路径存在较大的不规则性,基本由相关  $\delta$  铁素体的原始取向决定,图 2 是典型试样 MSC 阶段 ESFCs 尺度 ( $2a$ ) 与疲劳寿命分数 ( $N/N_f$ ) 的关系,该阶段 ESFCs 没有合并现象(图 2a),但行为没有规律性,一些起初较长的裂纹,可能因裂尖遇到较强障碍,而后来较短,为了定量描述这一行为,有必要引入一个尺度等于复型时刻 ESFCs 尺度均值的虚拟裂纹,即 MSC 阶段 DESFC 的概念,如图 2b 所示, DESFC 的尺度 ( $2a$ ) 稳定增加。

## 2 ESFCs 合并与 PSC 阶段扩展

图 3 是典型试样 PSC 阶段的复型照片,结合 MSC 阶段复型照片(图 1)可知:

(1) 若干较长 ESFCs 一旦连接,标志着进入 PSC 阶段,形成一条在后续扩展中起主导作用,最终导致试样失效的 DESFC。

(2) 扩展路径因受微观结构取向影响具有不规则性,由于逐渐脱离微观结构约束, DESFC 尺度增加,其取向主要由加载方向决定,趋于与应力轴垂直,图 4 是典型试样近整个寿命期 ESFCs 尺度和 DESFC 尺度随疲劳寿命分数的变化行为 ( $2a > 1000\ \mu\text{m}$  时进入长裂纹阶段),由图可知:

(i) ESFCs 和 DESFC 尺度变化具有明显 MSC 和 PSC 两阶段特征。

(ii) 当一些较长 ESFCs 尺度超过某一临界值(约  $40\ \mu\text{m}$ )或疲劳循环到一定寿命分数(约 0.3)时,将发生初始连接,形成一条最长的 ESFCs,标志着进入 PSC 阶段,较长 ESFCs 即为 DESFC。

(iii) PSC 阶段, DESFC 始终起主导作用,其尺度因 ESFCs 参与连接和自身扩展迅速增加(图 4b),期间, ESFCs 行为仍然不规则(图 4a),靠近 DESFC 裂尖参与连接时,尺度迅速增加;离 DESFC 裂尖较远时,伴随偶尔相互连接,尺度缓慢增加,直到与 DESFC 连接,伴随 DESFC 尺度增加和屏蔽萌生新裂纹效应,合并频率逐渐减小, DESFC 行为的不规则性减小,因此, DESFC 尺度稳定增长,其行为逐渐趋于长裂纹。

这里, DESFC 与 Polak<sup>[2-4]</sup>的“当量裂纹”概念相似, DESFC 的形成过程与 Gao<sup>[18]</sup>观察到的主导裂纹形成过程相似。

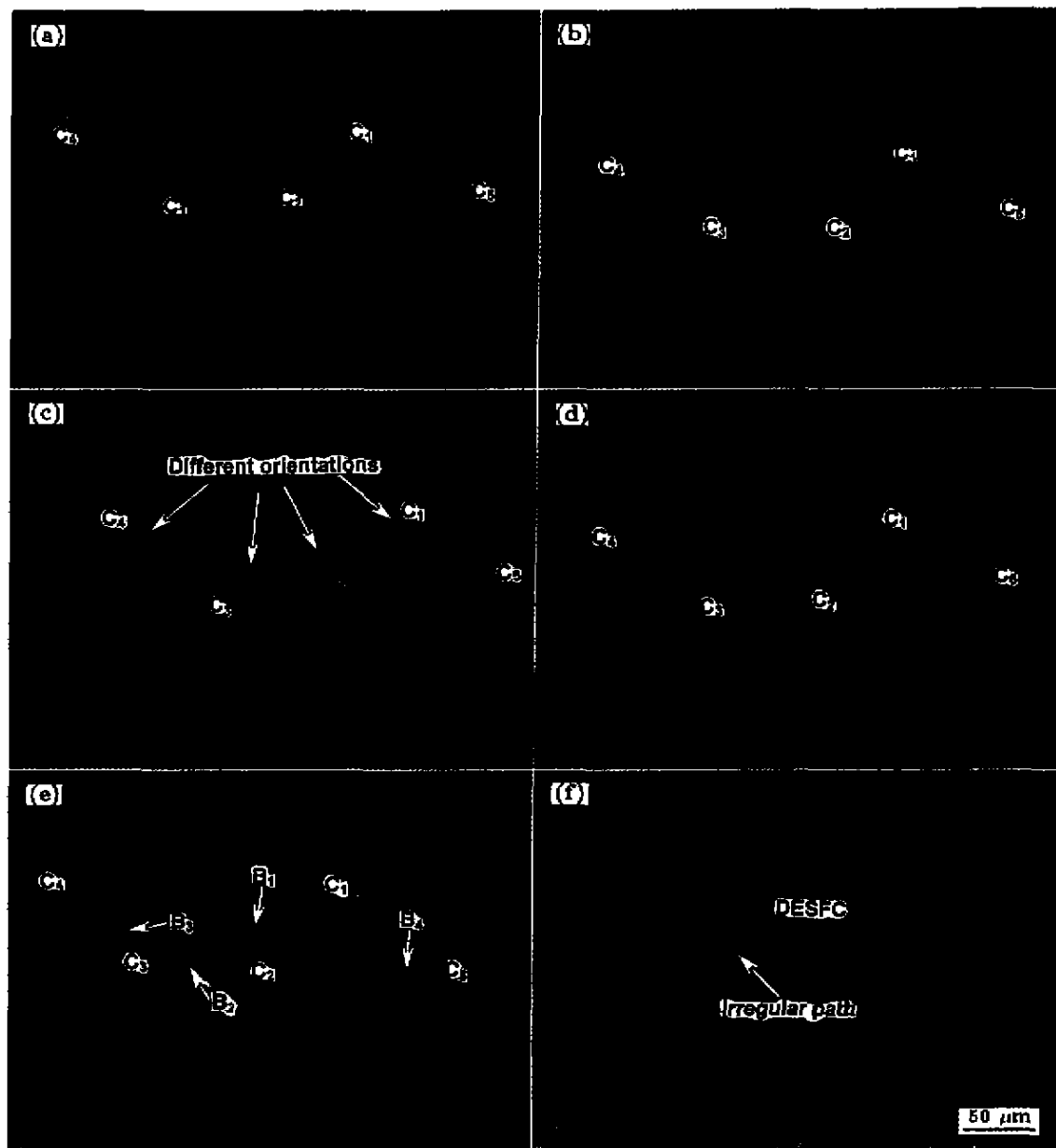


图 1 典型试样表面  $D_A$  区域中 ESFCs 萌生和 MSC 阶段扩展的复型照片

Fig.1 Replica photographs for one of the  $D_A$  surface districts showing the initiation and growth of ESFCs in the MSC stage of a typical specimen ( $C_i$  —  $i$ -th linked ESFC,  $i$  — ordinal of the orderly linked ESFCs;  $B_j$  —  $j$ -th matrix fence,  $j$  — ordinal of the orderly broken matrix fences)  
 (a)  $N=0$  (b)  $N=100$  (c)  $N=300$  (d)  $N=500$  (e)  $N=1500$  (f)  $N=2000$

图 5 是典型试样近整个寿命期 ESFCs 和 DESFC 的扩展率随 DESFC 尺度增加的变化行为。从图中可知：

(1) ESFCs 和 DESFC 扩展率变化具有明显 MSC 和 PSC 两阶段特点。

(2) MSC 阶段，ESFCs 扩展率初始较高，随着疲劳循环的增加而下降的趋势，很不规则，而 DESFC 扩展率则表现出稳定下降。这一现象与现有低周疲劳的实验结果<sup>[2-4]</sup>不同，类似于高周疲劳行为。可能原因是  $\delta$  铁素

体与奥氏体基体微观硬度的巨大差异。

(3) PSC 阶段，初始合并结束，直接参与合并的 ESFCs 扩展率突然升高，未参与合并时则增加非常缓慢，行为不规则性有所减小。DESFC 扩展率恒增加，初期，因合并加速效应和自身扩展，增加很快，伴随着合并频率下降，逐渐趋于长裂纹行为。

19 个试样统计表明：短裂纹萌生、合并与扩展期约占材料疲劳寿命的 70%—80%。MSC 和 PSC 两阶段转

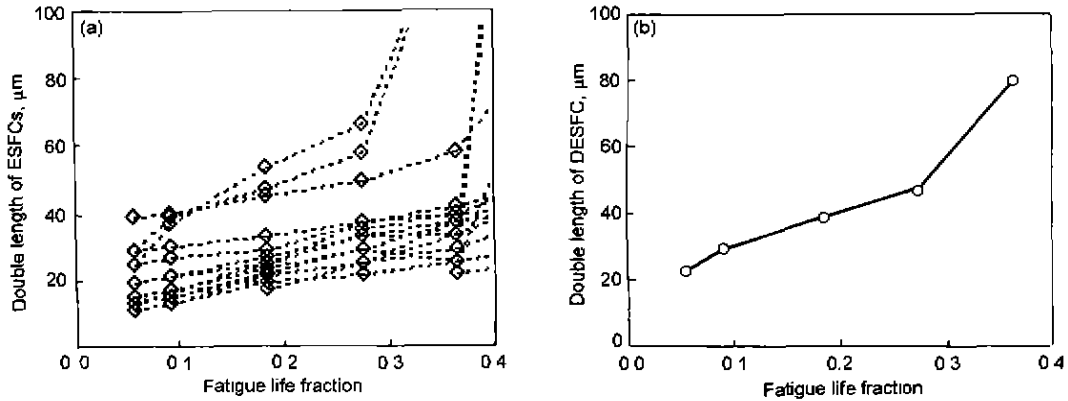


图 2 典型试样 MSC 阶段的 ESFCs 尺度-疲劳寿命分数和 DESFC 尺度-疲劳寿命分数关系

Fig.2 Relationships of the lengths of ESFCs-fatigue life fraction (a) and the length of DESFC-fatigue life fraction (b) for a typical specimen fatigued during the MSC stage

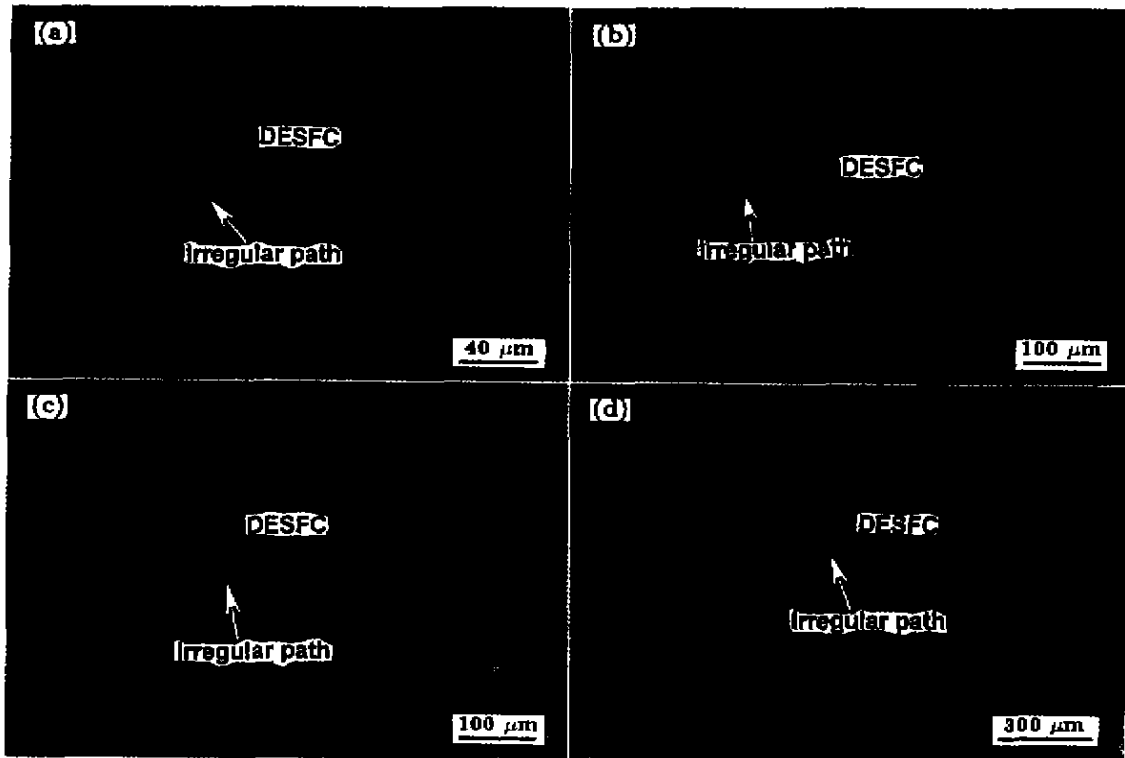


图 3 试样表面  $D_A$  区域 PSC 阶段的复型照片

Fig.3 Replica photographs for one of the  $D_A$  surface districts that reflects mainly the growth of DESFC in the PSC stage of the specimen

(a)  $N=2000$  (b)  $N=3000$  (c)  $N=3500$  (d)  $N=4000$

折点处的疲劳寿命分数约为 0.3。这时，DESFC 尺度 ( $2a_T$ ) 数据的均值、均方差和变异系数分别为 41.46、4.72  $\mu\text{m}$  和 0.1138。与材料柱状晶中相邻富  $\delta$  铁素体带间距离  $d$  数据具有良好一致性。只是  $2a_T$  数据的变异系数稍大。可能原因是微观结构障碍的不均匀性。类似  $d$  数据的分析<sup>[11]</sup>，通过比较 7 种常用统计分布对  $2a_T$  数据的

总体拟合效果。得出极大值分布是描述  $2a_T$  数据的良好假设分布。可表示为：

$$P_T(2a_T) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{2a_T - \mu}{\theta}\right)\right] \quad (1)$$

式中， $a_T$  为 DESFC 尺度； $\mu$  和  $\theta$  分别为极大值分布的位置和尺度参量。本文材料  $\mu, \theta$  值分别为 39.14  $\mu\text{m}$  和

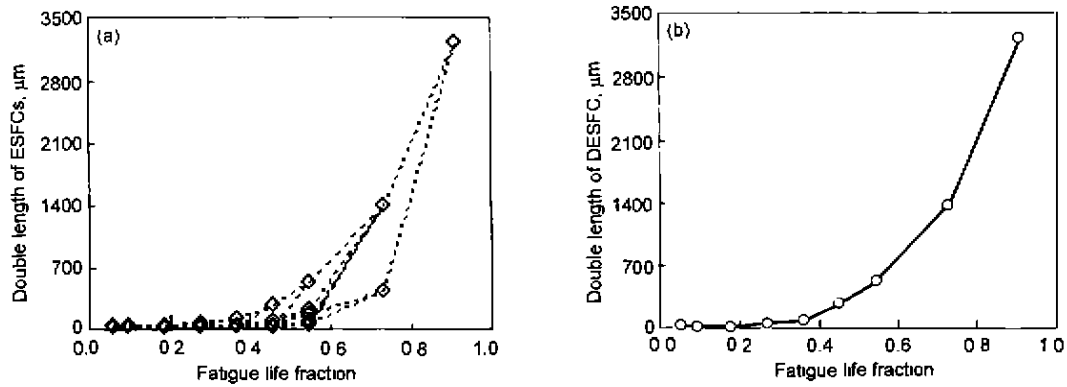


图 4 典型试样近整个寿命期 ESFCs 和 DESFC 尺度随疲劳寿命分数的变化

Fig.4 Variations in sizes of the ESFCs (a) and the DESFC (b) with fatigue life fraction for a typical specimen during almost perfect life

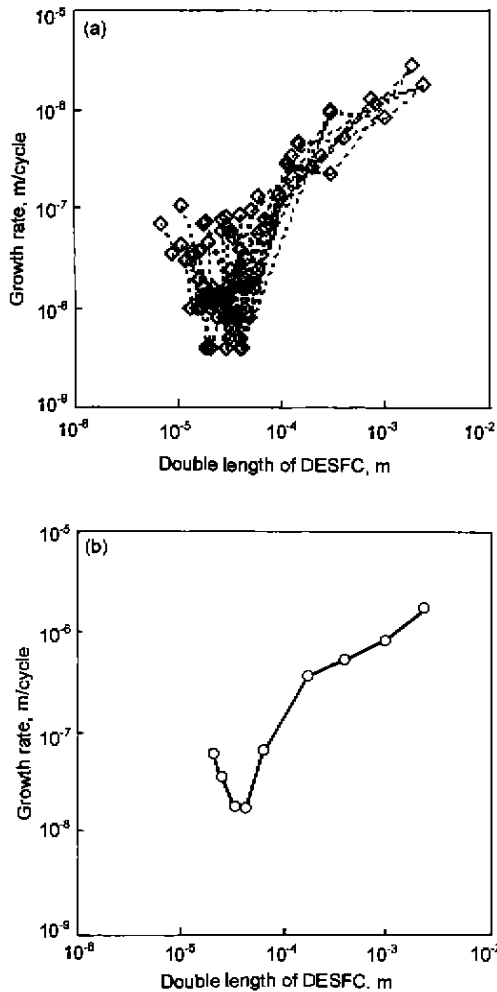


图 5 典型试样近整个寿命期 ESFCs 和 DESFC 扩展率随 DESFC 尺度的变化行为  
Fig.5 Variations in growth rates of the ESFCs (a) and the DESFC (b) with double DESFC length for a typical specimen during almost perfect life

4.2844  $\mu\text{m}$ .

### 3 短裂纹交互作用

基于“有效短裂纹准则”，短裂纹作用以 ESFCs 密度的形式，通过影响 DESFL 的行为表现出来。图 6 是典型试样 ESFCs 密度随 DESFC 尺度增加的演化行为。与扩展率演化相对照(图 5),ESFCs 密度演化也有 MSC 和 PSC 两阶段特征。MSC 阶段，ESFCs 处于试样表面最弱区域，易于萌生微裂纹，密度较高。由于微观结构障碍效应，密度随着循环数增加而增加，在 MSC 和 PSC 两阶段分界点达到最大。与此同时，DESFC 扩展率初期较高，随着循环数增加而下降，在交界点达到最低(图 5)。PSC 阶段，由于自身扩展与合并加速作用，DESFC 尺度迅速增加，将屏蔽萌生新裂纹，密度迅速下降，DESFC 尺度大于 1000  $\mu\text{m}$  时趋于饱和。与此同时，DESFC 扩展率迅速增加，随着 ESFCs 密度下降，合并频率降低，

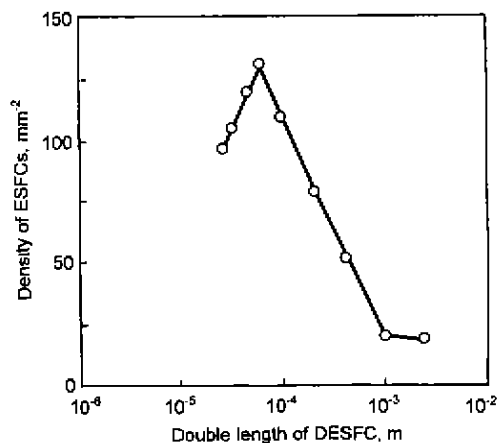


图 6 典型试样在总应变范围 0.01 下 ESFCs 密度随 DESFC 长度增加的演化行为  
Fig.6 Variation of the density of ESFCs with increasing of the DESFC length for a typical specimen fatigued under a total strain range of 0.01

群体影响力逐渐减小, DESFC 的行为趋于单条长裂纹(图 5).

图 7 是一组典型试样在应变范围 0.01 下的 DESFC 扩展率均值  $G_m$ 、均方差  $G_s$  和变异系数  $C_{vg}$  统计演化曲线. 扩展率的分散性(变异系数  $C_{vg}$ )MSC 阶段较大并随着 DESFC 尺度增加而增加, MSC 和 PSC 两阶段交界点达到最大, PSC 阶段则随着 DESFC 增加而下降. 与 Dowling<sup>[8]</sup>, Akiniwa<sup>[9]</sup> 和 Goto<sup>[10]</sup> 等人的试验结果类似.

图 8 是该组试样的 ESFCs 密度均值  $D_m$ 、均方差  $D_s$  和变异系数  $C_{vd}$  的统计演化曲线. ESFCs 密度的分散性与前面 DESFC 扩展率的分散性具有一致性, 说明 DESFC 裂尖前沿扩展条件的差异及其演化, 是 DESFC 随机扩展行为的本质原因. 这一差异也是材料疲劳寿命和循环应力-应变响应存在分散性<sup>[14]</sup> 的本质原因.

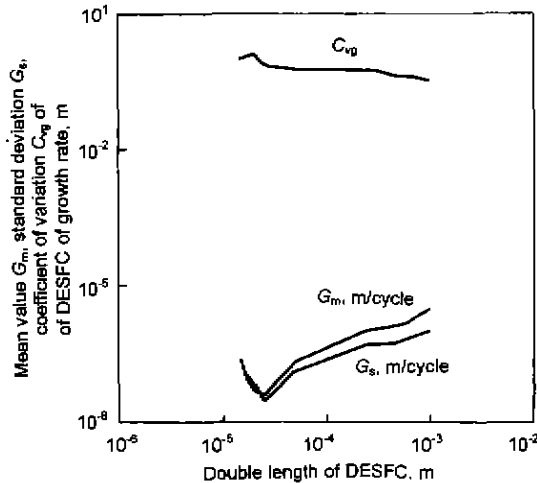


图 7 一组典型试样在总应变范围 0.01 下的 DESFC 扩展率随 DESFC 长度的演化行为

Fig.7 Variations of the growth rate of DESFC with increasing of the DESFC length for a typical group of specimens fatigued under a total strain range of 0.01 ( $G_m$ —average value,  $G_s$ —standard deviation,  $C_{vg}$ —coefficient of variation)

### 4 结论

基于“有效短裂纹准则”, 复型观察了 1Cr18Ni9Ti 不锈钢管道焊缝金属光滑试样表面的短裂纹萌生、扩展与交互作用行为, 结果表明:

(1) ESFCs 萌生、合并与扩展过程约占材料疲劳寿命的 70—80%. ESFCs 萌生于试样表面与管道内外表面一致区域之一中  $\delta$  铁素体与基体的界面, 其行为具有明显微观结构短裂纹 (MSC) 和物理短裂纹 (PSC) 两阶段特征. 转折点处 DESFC 尺度约为 40  $\mu\text{m}$ . 与柱状晶结构中相邻富  $\delta$  铁素体带间距离具有良好一致性. 相应的疲

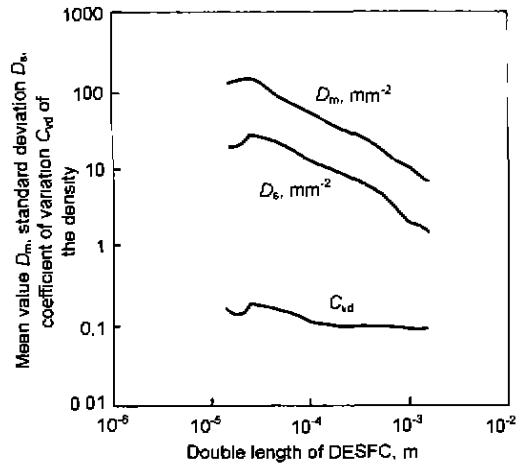


图 8 一组典型试样在总应变范围 0.01 下的 ESFCs 密度随 DESFC 长度的演化行为

Fig.8 Variations of the density of ESFCs with increasing of the DESFC length for a typical group of specimens fatigued under a total strain range of 0.01 ( $D_m$ —average value,  $D_s$ —standard deviation,  $C_{vd}$ —coefficient of variation)

劳寿命分数约为 0.3.

(2) ESFCs 的行为具有不规则性. MSC 阶段, ESFCs 扩展缓慢, 由于受微观结构的较大影响, 不规则性较大. 有必要引入尺度在 MSC 阶段等于 ESFCs 均值、PSC 阶段为最长 ESFCs 尺度的 DESFC 概念, 以便定量表征这一行为. DESFC 尺度在 MSC 阶段恒下降, PSC 阶段恒增加, 其行为是 ESFCs 交互作用的结果, 行为具有规律性, 适于描述短裂纹行为.

(3) 与现有实验结果不同, 由于微观结构较大的硬度差异, MSC 阶段 DESFC 扩展率在本文低周疲劳条件下仍然具有下降趋势.

(4) ESFCs 密度的分散性与 DESFC 扩展率的分散性具有一致性, 说明 DESFC 裂尖前沿扩展条件的差异及其演化, 是 DESFC 随机扩展行为的本质原因. 这一差异也是材料疲劳寿命和循环应力-应变响应存在分散性的本质原因.

四川省强度与振动重点实验室的蔡力助副教授、孙亚芳和何海鹰工程师及黄郁仲高工、西南交通大学材料系的车小莉工程师、王一戎教授等, 对本文实验工作给予了大力帮助, 特此感谢!

### 参考文献

[1] Hyspecky P, Strnadel B. *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, 1992; 15: 845  
 [2] Polak J, Liskutin P. *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, 1990; 13: 119  
 [3] Vasek A, Polak J. *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, 1991; 14: 193

- [4] Obrtlík K, Polak J, Hajek M, Vasek A. *Int J Fatigue*. 1997; 19: 471
- [5] Goto M. *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, 1991; 14: 833
- [6] Goto M, Knowles D M. *Eng Fract Mecha*. 1998; 60: 1
- [7] Suh C M, Lee J J, Kang Y G. *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, 1990; 13: 487
- [8] Beretta S, Clerici P. *Fatigue Fract Engng Mater Struct*. 1996; 19: 1107
- [9] Dowling N E. In: ASTM eds. *Cyclic Stress-Strain and Plastic Deformation Aspects of Fatigue Crack Growth*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1977: 97
- [10] Akiniwa Y, Tanaka K, Matsui E. *Mater Scie Engng*. 1988, 104A: 105
- [11] Goto M. *Fatigue Fract Engng Mater Struct*. 1994; 17: 635
- [12] Goto M. *Fatigue Fract Engng Mater Struct* 1992; 15: 953
- [13] Goto M. *Fatigue Fract Engng Mater Struct*. 1993; 16: 795
- [14] Zhao Y X. Ph.D thesis. Chengdu. Southwest Jiaotong University, 1998: 27  
(赵永翔. 博士学位论文 成都. 西南交通大学. 1998: 67)
- [15] Zhao Y X, Gao Q, Wang J N. *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, 1999; 22: 459
- [16] Zhao Y X, Gao Q, Wang J N. *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, 1999, 22: 469
- [17] Zhao Y X, Gao Q, Wang J N. *Acta Metall Sin*, 2000; 36: (赵永翔, 高庆, 王金诺 金属学报. 2000: 36: )
- [18] Gao N, Brown M W, Miller K J. *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, 1995; 18: 1423