

# X52 管线钢的低循环频率疲劳裂纹扩展试验

帅 健

(石油大学 北京昌平 102200)

**摘 要** 为了研究输气管线在实际服役状况下的疲劳裂纹扩展,预测管线的使用寿命,采用较低的载荷循环频率,对 API X52 管线钢做疲劳裂纹扩展试验。实验中摄取了断口的显微照片,表明了非金属夹渣在裂纹疲劳扩展中的作用。对试验数据进行了统计分析,得到了试件的 Paris 常数的统计参数。

**主题词** 管线钢管 疲劳裂纹 裂纹扩展 统计分析 断裂力学

## 1 引 言

输气管线受需方市场规律的影响,内压波动的频率非常低,例如按城市居民的生活需求,内压在一天之内约波动两次,变化的频率约为  $10^{-4}$ 。采用低循环频率更接近于管道的实际工作状况,获得的数据资料更为可信。特别是研究裂纹扩展过程中的微观组织变化,可以给出裂纹扩展机理的重要线索。因此采用低循环频率是必要的。

同时,管材的疲劳裂纹扩展速率试验,是管道使用寿命评估分析的基础和依据。本文提出了试验数据的统计分析方法,得到了相应的统计参数。

## 2 试件及试验方法

试件取自于直径 320mm 壁厚 7mm 的冷轧直缝钢管,材质 X52,这种材质按 API 5L 规范制造。

钢材的化学成分(重量比)和常温下的机械性能如下: C- 0.17, Mn- 1.32, Si- 0.28, P- 0.017, S- 0.016, Cr- 0.02, Mo- 0.01, Ni- 0.03, Al- 0.046, Cu- 0.03, Nb- 0.027, V- 0.0077;  $\sigma_s = 415\text{MPa}$ ,  $J_{1C} = 50\text{kJ/m}^2$ ,  $K_{1C} = 107\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  (平面应变), 平均铁素体晶粒直径  $7-10\mu\text{m}$ 。

试件采用 CT 型试件,加工试件的裂纹

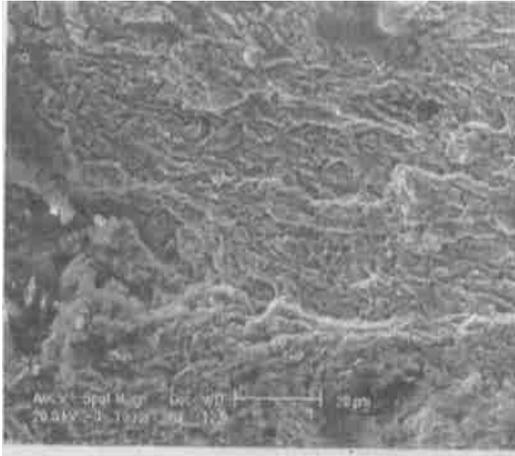
方向在管道轴向。试验在室温、空气环境下和 MTS 液压伺服试验机上完成。预制裂纹后,设定载荷比  $R = P_{\min}/P_{\max}$  保持不变。试件的加载频率为 0.01Hz,载荷比 0.6,扩展的裂纹长度用测量显微镜直读记录。试验中保证了载荷变化幅度  $\Delta P$  恒定。因此,在试验中,随着疲劳循环周次  $N$  增大,裂纹尺寸  $a$  增大,裂纹尖端应力强度因子  $\Delta K$  也增大,直至最后断裂。

## 3 试件断口的显微观察

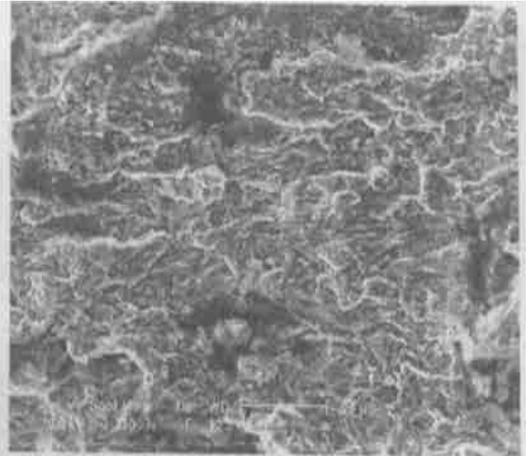
在试验过程中,随着裂纹逐渐扩展,试件的承载面积越来越小,剩余断面上承受的应力值会越来越大,裂纹扩展的机理出现变化。沿试件断口,间隔 1~2mm,摄取了 300 倍和 1000 倍的断口形貌扫描电镜照片共 28 张(限于篇幅,未全部刊登),这些照片显示了可以将断裂过程分为三个阶段。在第一阶段,裂纹预制阶段,如图 1(a)、1(b),表面呈现出明显的疲劳条纹状,且这些条纹具有较好的连续性,说明材料有较好的韧性;在第二阶段,如图 1(c)、1(d),仍可看到疲劳条纹,但照片上有明显的长形阴影,此处的 EDX 分析表明是 MnS 夹渣(图 2),这是因为在这一阶段,截面承受较大的应力。由于夹渣物与基体的弹性和塑性性能的差异,断裂首先起始于

存在夹渣物的地方;第三阶段,如图 1(e) 1 (f),出现了韧窝,不能观察到韧性疲劳裂纹,这是典型的塑性断裂特征,随后试件很快断

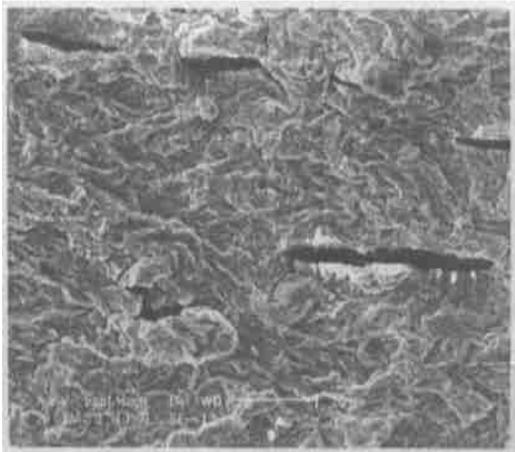
裂。从这一试验可以看出 MnS 夹渣在裂纹扩展过程中发挥重要作用。



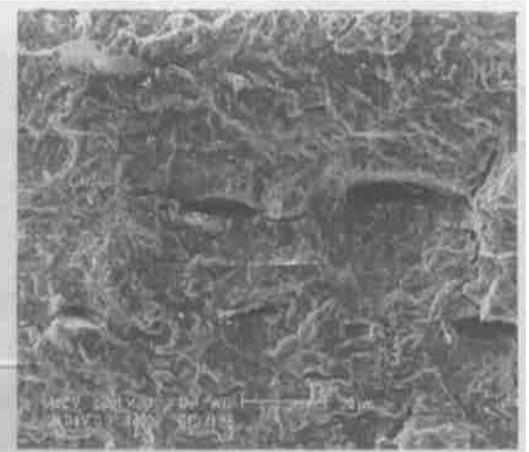
(a)  $\Delta K = 23.0 \text{ MPa m}^{1/2}$ , 裂尖处



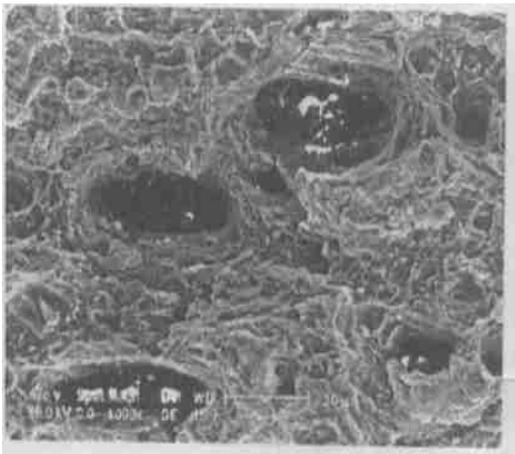
(b)  $\Delta K = 25.0 \text{ MPa m}^{1/2}$ ,  $\Delta a = 1.5 \text{ mm}$ , 预制裂纹



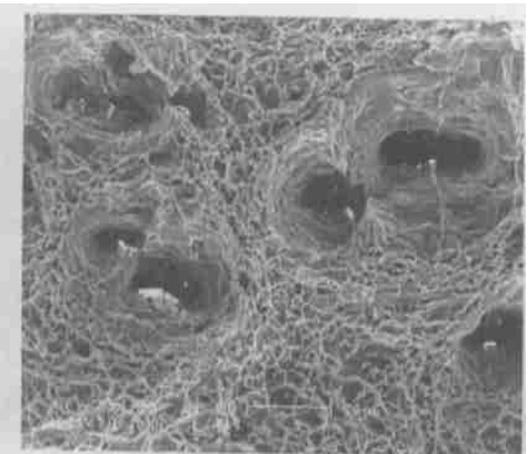
(c)  $\Delta K = 16.2 \text{ MPa m}^{1/2}$ ,  $\Delta a = 5.5 \text{ mm}$



(d)  $\Delta K = 24.1 \text{ MPa m}^{1/2}$ ,  $\Delta a = 10.5 \text{ mm}$



(e)  $\Delta K = 36.3 \text{ MPa m}^{1/2}$ ,  $\Delta a = 14.5 \text{ mm}$



(f) broken,  $\Delta a = 18.5 \text{ mm}$

图 1 断口扫描电镜照片 (图中  $\Delta a$  为距裂尖处的距离)

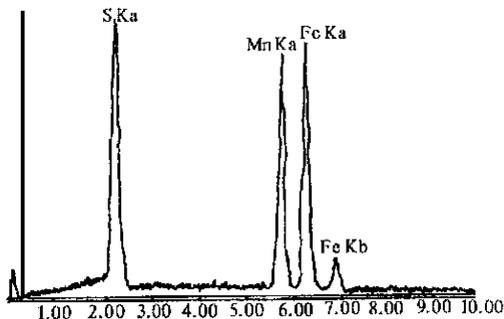


图 2 EDX图

### 4 试验数据

图 3是试验得到的裂纹扩展长度  $a$  与循环次数  $N$  的关系曲线 对  $N - a$  曲线上的各

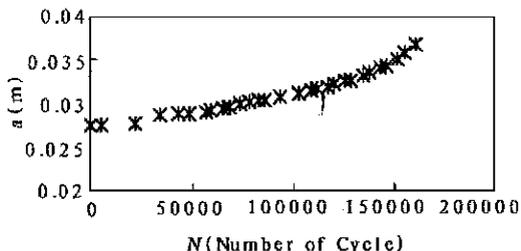


图 3 裂纹扩展试验数据

点求斜率,即可得出各裂纹长度  $a_i$  的裂纹扩展速率  $\left(\frac{da}{dN}\right)_i$ ;同时由  $a_i$  也可求出相应的  $\Delta K_i$  为此采用递增多项式方法对  $N - a$  曲线进行局部拟合求导,确定疲劳裂纹扩展速率和裂纹长度的拟合值

应力强度因子变程  $\Delta K$  按下列数学表达式计算<sup>[1]</sup>:

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B} \frac{T}{W} \frac{(2+T)}{(1-T)^{3/2}} (0.886 + 4.64T^2 + 13.32T^3 + 14.72T^4 - 5.6T^5) \quad (1)$$

式中  $T$ 为形状系数 ( $T = a/W$ ,  $a$  为裂纹深度),  $\Delta P$  为载荷变化幅度,  $W$  为试样厚度,  $B$  为试样宽度。

经过计算可以得到试件的  $da/dN - \Delta K$  曲线 为了比较不同频率的疲劳裂纹扩展试验的结果,在图 4中有意将不同频率下的试验结果放在一起,三个试件取自材质相同的一段管子,试件 1即为本次试验,试件 2 3的加载频率为 10Hz 载荷比为 0.1 从图中可以看出不同试验拟合的数据基本上在一条直线上,表明试验的加载频率不对试验的结果产生影响

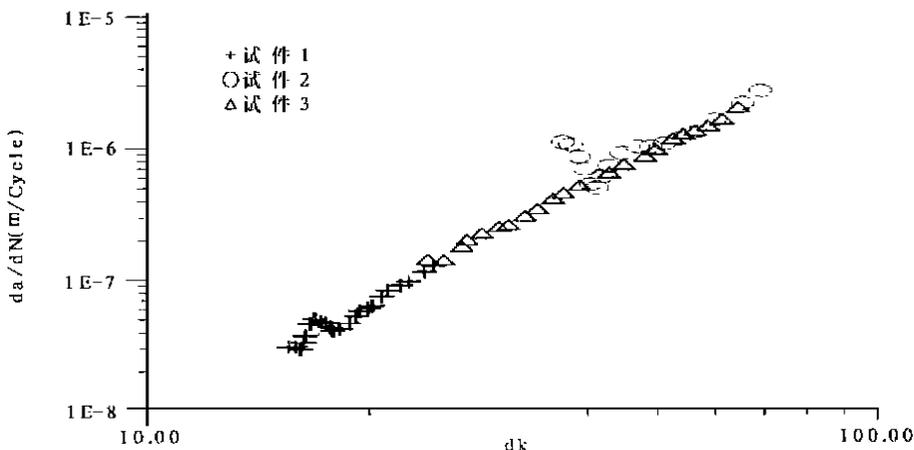


图 4 材料的  $da/dN - \Delta K$  曲线

### 5 参数拟合及统计分析

必须对  $da/dN$  和  $\Delta K$  数据进行线性回

归,才可得出 Paris 材料常数  $C$  和  $m$  的统计值。在此分别对  $\Delta K$  和  $da/dN$  取对数,得到  $n$  个数据点:  $P_1(x_1, y_1), P_2(x_2, y_2), \dots, P_n(x_n, y_n)$ ,为了表达上的方便,引入以下符号:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i,$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y}), \quad (2)$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2,$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2,$$

考虑二元线性回归的一般形式,可以解得  $m$  和  $C$  的估计量分别为<sup>[2]</sup>

$$\hat{m} = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad (3a)$$

$$\lg \hat{C} = \bar{Y} - \hat{m} \bar{X} \quad (3b)$$

可以证明  $m$  和  $\lg C$  服从正态分布,  $\hat{m}$  和  $\lg \hat{C}$  的标准差估计量为

$$e = \sqrt{\text{Var}(y_i)} \quad (4a)$$

$$S(\hat{m}) = \sqrt{\text{Var}(\hat{m}_i)} = \frac{e}{S_{xx}} \quad (4b)$$

$$S(\lg \hat{C}) = \sqrt{\text{Var}(\lg \hat{C}_i)} = e \sqrt{\left[ \frac{1}{n} + \frac{\bar{X}^2}{S_{xx}} \right]} \quad (4c)$$

在置信水平  $(1 - T)$  下,  $m$  和  $\lg C$  的置信区间分别为

$$\hat{m} \pm t_{2, n-2}^T S(\hat{m}) \quad (5a)$$

$$\lg \hat{C} \pm t_{2, n-2}^T S(\lg \hat{C}) \quad (5b)$$

有关  $t$  分布可参考教科书

按照上述方法编制了疲劳裂纹扩展速率试验数据的专用处理程序 PLC,经程序计算,本次试验的统计分析结果见表 1

表 1 材料常数  $C$  和  $m$

| lgC        |        | m       |        |
|------------|--------|---------|--------|
| 均值         | 变异系数   | 均值      | 变异系数   |
| - 11. 0252 | 0. 016 | 2. 9492 | 0. 075 |

### 5 讨论

通过试验,可以认为,疲劳裂纹扩展速率试验的加载频率不影响试验结果,尤其是对需要确定的 Paris 材料常数,可考虑用较高频率的试验代替,以节省试验时间。而管材中的非金属夹渣在裂纹扩展过程中发挥重要作用,但仍不能肯定加载频率等参数是否影响裂纹扩展过程中的微结构,还应该研究不同加载频率下裂纹扩展过程中的微组织结构的变化

### 参 考 文 献

- 1 GB6398- 86.金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法.北京:中国标准出版社,1980年
- 2 浙江大学数学系高等数学教研组编.概率论与数理统计.北京:高等教育出版社,1979年

### 致谢!

作者感谢法国 Ecole Centrale Paris 的 MSS- MAT 实验室的 Mahmoud Habashi 先生和胡瑞萍博士为本次试验提供的帮助。

(收稿日期: 2000- 05- 15)

Gas, and the environment factor and material factor which affect the HIC. The article propose to reduce the hydrogen content absorbed from surroundings to control the HIC, and improve the anti- HIC property of the hot rolled steel plate. In the end the article introduces the evaluation method of the HIC.

**Subject Terms** Pipeline Steel Hydrogen Induced Crack (HIC) Characteristic Measurement

*Shuai Jian*(20)

### **Fatigue Crack Growth X52 Steel At Low Frequency**

Fatigue crack growth experiment of API X52 at low frequency is conducted in order to research fatigue crack growth of gas pipeline in the actual service condition and to predict its service life. Electron micrographs are taken in the eaperiment im that the effects of the non- metal imclusions on crack growth are studied. The statistical analysis of eaperiment data is finished. Statistical parameters of Paris constant of the specimen are obtained.

**Subject Terms** Line Pipe Fatigue crack Crack propagation Statistical analysis Fracture mechanics

*Zhang Jian*(24)

### **Application of Ceramic Material in HF Welding**

This article describes the HFI welding principle. During the HFI welding , the guiding roller often heated, and affect the welding speed, increase power consumption, as well as affect pipe quality, the article points out to use guiding roller made by ceramic material, utilize the insulation characteristic of he ceramic material to prevent HFI current from circuiting on the guiding roller, so as to force the current to flow on the designated route, increase the welding speed, reduce the power waste, improve the product quality.

**Subject Terms** Welded Pipe High Frequency Welding ( HFW ) Principle Ceramics Material

*Yang Hailan, Li Zhouguo, Shi Zhongxian et al*(26)

### **Hydraulic Torque Variator Three Link Block MAG Welding Accuracy Positioning**

From the requirement of hydraulic torque variator three link block accuracy positioning, this article analysis the status of forcing, and gives out the single side flexible clamping design, discusses the welding point control process and its system, the designed engineering system realized the full auto welding , and met the requirement of process parameter more than 1.67 in production.

**Subject Terms** Hydraulic Torque Variator Positioning Positioning Welding Control System

*Li Kehai, He Defu*(29)

### **Computer Visual Inspection of Pulse TIG Welding Melting Pool Geometric Parameter**

Use the self- built pulse TIG welding melting pool geometric parameter inspection system based on computer vision, the clear melting pool image was pictured from the front through CCD sensor. Regarding to the characteristic of the melting pool image, the fast effective image disposal method was designed, and inspected the melting maximum width, half length, back area and back angle ect. geometric parameters. This paves the way for the next welding quality real time control.

**Subject Terms** TIG Welding Weld Seam Melting Pool Geometric Parameter Inspection Computer Image Disposal

*Yin Jingsheng*(33)

### **Discuss on the Specification of Protecting Waveform Girder Cold Bend Steel**

From the analysis of super high way protecting waveform girder section shape, dimensional tolerance , wave high distance, total width, the article points out the shortcoming of the protecting waveform girder cold bend steel inspecting specification ( YB4081- 92). The bending angle parameters a<sup>1</sup> a<sup>2</sup> and the tolerance