

## GC-4 高强度钢化学短裂纹特性研究

王 荣 路民旭 郑修麟

(西北工业大学 401 教研室, 西安, 710072)

### AN INVESTIGATION OF CHEMICAL SHORT CRACK CHARACTERISTICS IN GC-4 HIGH-STRENGTH STEEL

Wang Rong, Lou Minxu, Zhen Xiulin

(Faculty 401 of Northwestern Polytechnical University, Xi'an. 710072)

**摘 要** 采用恒  $\Delta K$  法对 GC-4 钢在 3.5%NaCl 溶液中化学短裂纹特性进行了试验研究。结果表明:恒  $\Delta K$  时裂纹扩展的  $da/dN$ - $a$  曲线存在临界裂纹尺寸  $a^*$ 。当  $a < a^*$  时,显示化学短裂纹效应。 $a^*$  值几乎不受加载频率、应力比和  $\Delta K$  水平的影响;化学短裂纹特征扩展速率与长裂纹扩展速率之比是各种力学参量的弱函数。依据分析给出化学短裂纹扩展速率与裂纹尺寸之间的关系。

**关键词** 应力强度因子, 化学性质 - 短裂纹, 临界点 - 裂纹几何形状, 裂纹扩展

**中图分类号** V252.1, TG142.41, O346.21

**Abstract** A method of constant  $\Delta K$  value is applied experimentally to investigate chemical short crack characteristics in GC-4 high-strength steel in 3.5% NaCl solution. experimental results show that there is a critical crack size  $a^*$  on  $da/dN$ - $a$  curve of the crack propagation at constant  $\Delta K$  value. When crack size  $a < a^*$ , chemical short crack effect appears. Loading frequency, stress ratio and  $\Delta K$  value almost have no effect on  $a^*$  value. The ratio of characteristic crack propagation rate of chemical short crack to that of long crack is a weak function of loading frequency, stress ratio and  $\Delta K$  value. Based on the analysis, the relation between the short crack propagation rate and crack size has been put forward.

**Key words** stress intensity factors, chemical properties short cracks, critical point-crack geometry, crack propagation

金属在腐蚀性环境中呈现显著的化学短裂纹现象<sup>[1-3]</sup>,这种效应导致短裂纹比长裂纹具有较高的裂纹扩展速率。在一定的裂纹尺寸范围内,受化学驱动力的作用,裂纹扩展比长裂纹扩展加速,并且短裂纹尺寸也受其影响。其大小可由自由腐蚀的 1.8mm 到锌阳极耦合的 12mm<sup>[2]</sup>。这就意味着,在腐蚀性环境中仅用长裂纹估算构件腐蚀疲劳裂纹扩展寿命往往会得出危险的估计。因此,开展化学短裂纹研究十分必要。

本文基于 Nakai<sup>[2,3]</sup> 将力学驱动力和化学驱动力分离的思想,即恒定力学驱动力,探索了一套化学短裂纹试件制备与测试的新方法,并对经 B300 热处理的 GC-4 钢在 3.5%NaCl 溶液中的化学短裂纹特性进行了实验研究。

### 1 实验原理及方法

实验用 GC-4(40CrMnSiMoVA) 超高强度钢。原材料为电弧炉-电渣重溶钢棒,改锻后

1992年8月3日收到,1993年2月17日收到修改稿

国家自然科学基金资助课题

沿 L-T 取向加工成  $123 \times 25 \times 8\text{mm}^3$  的四点弯曲试件。试件的热处理工艺为 B300(900 C 等温 20min, 300 C 等温 1h, 200 C 20h 除氢处理)。

短裂纹试件制备过程为: 试件线切割 3mm, 疲劳预裂 1mm, 然后用光学磨磨去 3.65mm, 剩余的初始裂纹长度为 0.35mm, 见图 1。

在 EHF- EA-10T 疲劳试验机上进行实验, 腐蚀液为 3.5% NaCl 中性溶液。试件的裂纹扩展段浸在自制的有机玻璃腐蚀槽内。裂纹长度用电位法微机测试系统<sup>[4]</sup>监测, 电位函数由边界元法计算给出。采用恒定  $\Delta K$  间隔  $\Delta(\Delta K)$  以保证  $\Delta K$  基本恒定, 则每次变动载荷的裂纹扩展间隔  $\Delta a$  由设定的  $\Delta K$  间隔和裂纹长度  $a$  决定,  $\Delta a$  可由  $\Delta(\Delta K)$  和  $a$  联合二分法编程计算给出

$$\Delta a = g[\Delta(\Delta K), a] \quad (1)$$

测定与计算表明,  $\Delta a$  随裂纹长度  $a$  的增加而增加。

## 2 实验结果与分析

化学短裂纹存在一个临界裂纹尺寸  $a^*$ 。为便于数据分析, 取当裂纹扩展速率  $da/dN$  汇入到长裂纹  $da/dN$  对应裂纹长度作为化学短裂纹尺寸限  $a^*$ ; 同时定义化学尺寸效应引起裂纹扩展的加速比  $r$  为短裂纹扩展速率  $[da/dN]_{\text{csc}}$  与长裂纹扩展速率  $[da/dN]_{\text{clc}}$  之比

$$r = [da/dN]_{\text{csc}} / [da/dN]_{\text{clc}} \quad (2)$$

各种力学条件下的  $a^*$  和短裂纹扩展稳定后峰值  $r_{\text{max}}$  列于表 1 中。

表 1 GC-4 钢在盐水中的  $a^*$  和  $r_{\text{max}}$  值(三角波加载)

试件号	$f/\text{Hz}$	$R$	$\Delta K/\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$	$a^*/\text{mm}$	$r_{\text{max}}$
1	1	0.6	16.0	2.44	1.203
2	1	0.3	28.0	2.54	1.192
3	0.1	0.3	28.0	2.55	1.300
4	1	0.3	16.0	2.53	1.247

恒  $\Delta K = 16\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$  时 GC-4 钢两种应力比的  $da/dN$ - $a$  曲线见图 2。由图 2 可见, 应力比为 0.3 的裂纹扩展速率稍低于应力比为 0.6 的, 应力比对长、短裂扩展影响的规律基本一致。两种应力比下都存在临界裂纹尺寸  $a^*$ 。当  $a < a^*$  时,  $(da/dN)_{a < a^*} > (da/dN)_{a > a^*}$ , 呈现化学短裂纹效应。两种应力比下的  $a^*$  和  $r_{\text{max}}$  值差别不大。由此可见, 应力比对化学短裂纹的特征值无明显的影响。

恒  $\Delta K = 28\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$  时两种频率的  $da/dN$ - $a$  曲线见图 3。随着加载频率的降低, 裂纹扩展速率升高,  $(da/dN)_{0.1\text{Hz}} \approx 3(da/dN)_{1\text{Hz}}$ 。可见降低加载频率加剧腐蚀介质与裂尖材料元的交互作用, 导致裂纹扩展加速。与图 2 类似, 也存在  $a^*$  值, 显示化学短裂纹效应。两种加载频率的  $a^*$  值近似相等, 但  $r_{\text{max}}$  却随加载频率降低略有升高。

两种  $\Delta K$  水平的  $da/dN$ - $a$  曲线见图 4。随着  $\Delta K$  水平的降低裂纹扩展速率亦降低。两种

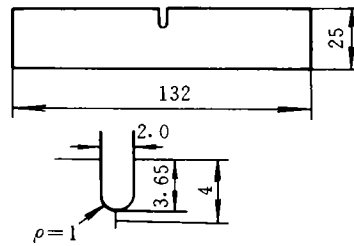


图 1 短裂纹试件(试样厚度  $B=8$ )

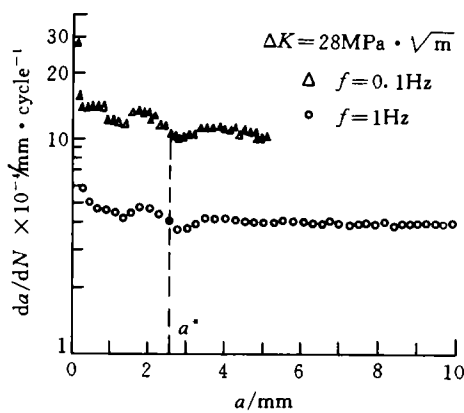
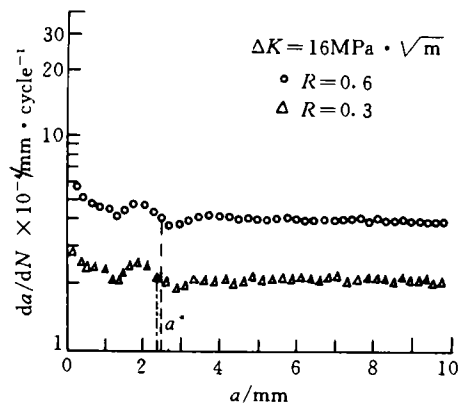


图2 两种应力比的 da/dN - a 曲线

$\Delta K$  水平的  $a^*$  值近似相等,但低  $\Delta K$  水平具有稍高的  $r_{max}$  值。

综上所述,在各种力学条件,当  $a < a^*$  时的 da/dN-a 曲线形状十分相似。当化学短裂纹扩展速率汇入长裂纹扩展速率时,由于裂纹扩展驱动力的突变,da/dN-a 曲线呈现“马槽”形状,但很快达到稳定。化学短裂纹尺寸限  $a^*$  几乎不受加载频率、应力比和  $\Delta K$  水平的影响。应力比对  $r_{max}$  无显著影响;但随加载频率或  $\Delta K$  水平降低; $r_{max}$  略有升高。

图3 两种加载频率的 da/dN-a 曲线

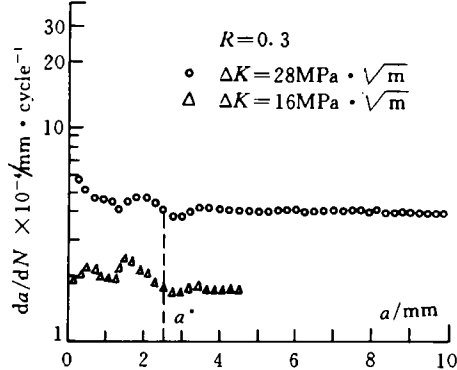


图4 两种  $\Delta K$  水平的 da/dN-a 曲线

这就意味着  $a^*$ 、 $r_{max}$  值是各种力学参量的弱函数。化学短裂纹扩展速率却随裂纹长度变化,根据 da/dN-a 曲线形状,恒定力学驱动力时化学短裂纹扩展速率可用下式表示

$$(da/dN)_{csc} = [(r_{max} - 1) \sqrt{1 - (a/a^*)^2} + 1](da/dN)_{clc} \tag{3}$$

### 3 讨论

Nakai 用恒  $\Delta K$  法研究了电化学条件和  $\Delta K$  水平对 HY-130 钢在盐水中化学短裂纹特性的影响<sup>[2]</sup>,其结果总结于表 2 中。由表 2 可见,不同电化学条件和  $\Delta K$  水平的  $a^*$  值有较大的差别,且  $a^*$  随  $\Delta K$  水平的提高而增加。而本文的实验结果表明  $a^*$  值几乎不受力学条件的影响。有关化学短裂纹现象的解释都基于氢脆机制。业已提出的氧缓蚀模型<sup>[5]</sup>和氢离子传输模型<sup>[6,7]</sup>都不能很好解释本文的实验结果,而且就不同  $\Delta K$  水平的化学短裂纹现象而言,这两种模型将得出相反的结果。从本文的结果来看, $a^*$  值主要取决于材料 / 环境组合体系的特性。因此,有关化学短裂纹的机制有待进一步研究。

表2 HY-130 钢在盐水中的  $a^*$ 、 $r_{\max}$  值<sup>[2]</sup>( $f = 0.1\text{Hz}$ ,  $R = 0.1$ )

试件号	腐蚀类型	极化电位/V	$\Delta K/\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$	$a^*/\text{mm}$	$r_{\max}$
1	自然腐蚀	-0.84	22	1.8	1.193
2	自然腐蚀	-0.84	35	3.8	1.204
3	锌阳极耦合	-1.33	22	5.2	1.117
4	锌阳极耦合	-1.33	35	12.7	1.348

由表1和表2可见,GC-4和HY-130钢的 $r_{\max}$ 值分布在1.1~1.4之间,而Gangloff用 $\Delta P$ 法对4130钢在盐水中试验结果表明<sup>[5]</sup>, $r_{\max}$ 值高达500,这与表1、表2中的结果相差很大。Nakai<sup>[2]</sup>把这种差别归结于4130钢具有较低的应力腐蚀应力强度因子门槛值 $K_{\text{ISCC}}$ ,但GC-4钢的 $K_{\text{ISCC}}$ 约为HY-130钢的1/6.5,而 $r_{\max}$ 值却相近。可见较高的静应力腐蚀裂纹扩展分量并非是 $r_{\max}$ 值大小的本质原因。因此,化学短裂纹现象是由化学裂纹尺寸效应造成,与各种力学参量及材料静腐蚀性能之间关系不大。

#### 4 结论

(1) 恒定 $\Delta K$ 时GC-4钢在盐水中 $da/dN$ - $a$ 曲线上存在临界裂纹尺寸 $a^*$ 。 $a < a^*$ 时显示化学短裂纹现象,具有较高的裂纹扩展速率即 $(da/dN)_{a < a^*} > (da/dN)_{a > a^*}$ 。

(2) 加载频率、应力比和 $\Delta K$ 水平对 $a^*$ 值无显著影响。

(3) 应力比对化学短裂纹扩展的加速比 $r$ 值无显著影响,但随加载频率或 $\Delta K$ 水平的降低 $r$ 值略有升高。

(4) 所提出的关系式(3)有希望作为处理化学短裂纹扩展问题的一种修正。

#### 参 考 文 献

- 1 Gangloff R P. The criticality of crack size on aqueous corrosion fatigue. Res Mech Lett, 1981;(1):299-306
- 2 Nakai Y. Tanaka K. Wei R P. Growth of short fatigue crack in HY-130 steel in 3.5% NaCl solution. Eng Fract Mech, 1985;21(2):293-305
- 3 Nakai Y. Alavi A. Wei R P. Effects of frequency and temperature on short fatigue crack and temperature on short fatigue crack growth in aqueous environments. Metall Trans, 1988;19A(3):543-548
- 4 路民旭,刘晓坤,王建军,郑修麟. 腐蚀疲劳裂纹扩展微机测试与分析. 航空学报,1990;11(12):B617-B621
- 5 Gangloff R P. Crack size effects on the chemical driving force for aqueous corrosion fatigue. Metall Trans, 1985;16A(5):953-969
- 6 Turnbull A. Thomax J G N. A model of crack electrochemistry for steels in the active state based on mass transport by diffusion and ion migration. J Electrochem Soc, 1982;129(7):1412-1422
- 7 Alkire R. Sutatri D. The location of cathodic reaction during localized corrosion. J Electrochem Soc, 1979; 126(1): 15-22