

文章编号: 1007-7294(2025)11-1746-11

# 不同应力比对 HTS-A 钢低温疲劳裂纹 扩展速率的影响与预报

罗广恩<sup>1</sup>, 刘家奇<sup>1</sup>, 姜金辉<sup>2</sup>

(1. 江苏科技大学 船舶与海洋工程学院, 江苏 镇江, 212003; 2. 上海船舶运输研究所有限公司 航运技术与安全国家重点实验室/航运技术交通行业重点实验室, 上海 200135)

**摘要:** 为研究不同应力比对低温环境下 HTS-A 钢疲劳裂纹扩展的影响, 本文开展了在应力比( $R$ )为 0.1 和 0.3 时 HTS-A 钢 CT 试件的低温疲劳裂纹扩展试验。试验结果表明, 随着温度的降低, 裂纹扩展速率降低, 疲劳寿命增加; 同时, 随着应力比的增大, 疲劳裂纹扩展速率也相应地增大, 但随着温度的降低, 应力比对疲劳裂纹扩展速率的影响越来越小。在试验的基础上, 本文提出了考虑温度和应力比影响的改进 McEvily 模型, 该模型能够预报不同低温、不同应力比条件下的 HTS-A 钢疲劳裂纹扩展速率, 并与试验结果进行了对比验证。该预报模型可为低温环境下海洋装备的疲劳寿命评估打下基础。

**关键词:** 疲劳裂纹扩展速率; HTS-A 钢; 应力比; 低温; 疲劳试验

中图分类号: O346.1 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1007-7294.2025.11.008

## Effect of different stress ratios on fatigue crack growth rate of HTS-A steel at low temperature and prediction for crack growth

LUO Guang-en<sup>1</sup>, LIU Jia-qi<sup>1</sup>, JIANG Jin-hui<sup>2</sup>

(1. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China; 2. State Key Laboratory of Navigation and Safety Technology/Key Laboratory of Marine Technology Ministry of Communications, Shanghai Ship and Shipping Research Institute Co. Ltd., Shanghai 200135, China)

**Abstract:** In order to study the effect of different stress ratios on the fatigue crack growth of HTS-A steel in low temperature environment, low-temperature fatigue crack growth tests of HTS-A steel CT specimens at stress ratios of 0.1 and 0.3 were carried out. The test results show that with decreasing temperature, the crack growth rate decreases and the fatigue life increases. At the same time, with the increase of the stress ratio, the fatigue crack growth rate also increases accordingly. However, with the decrease of temperature, the effect of stress ratio on fatigue crack growth rate becomes smaller and smaller. On the basis of experiments, an improved McEvily model considering the effects of temperature and stress ratio was proposed in this paper. The model can predict the fatigue crack growth rate of HTS-A steel under different low temperatures and different stress ratios. The predicting results were compared with the experimental data. This prediction

收稿日期: 2025-05-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52171312); 水路交通控制全国重点实验室开放课题资助项目(QZ2022-Y012)

作者简介: 罗广恩(1980-), 男, 博士, 副教授, 通讯作者, E-mail: luoge@just.edu.cn;

刘家奇(1996-), 男, 硕士研究生; 姜金辉(1977-), 女, 研究员。

model lays a foundation for the fatigue life assessment of marine equipment in low temperature environment.

**Key words:** fatigue crack growth rate; HTS-A steel; stress ratio; low temperature; fatigue test

## 0 引 言

近年来,随着极地航道和极地资源的进一步开发与利用,低温环境下船舶与海洋结构物的安全性引起了广泛的关注。极地船舶与深海潜水器在极地低温海域航行和作业时,会受到低温环境和外部载荷对结构造成的影响<sup>[1-2]</sup>。低温环境、波浪载荷、冰载荷等不同载荷类型共同作用,会给船舶与海洋结构物的安全带来威胁,有可能引发各种灾难事故,因此,准确评估结构的强度和疲劳寿命是结构安全性评估的重要工作。HTS-A 钢是一种船舶与海洋装备常用的高强度钢,研究其在不同应力比和不同低温环境下的疲劳裂纹扩展性能,对于 HTS-A 钢在极地装备上的应用及其结构安全性的评估具有重要意义。

许多学者针对常温条件的钢材疲劳裂纹扩展性能进行了研究<sup>[3]</sup>。但是,在不同应力比和低温环境下,针对钢材的疲劳裂纹扩展性能方面的研究还比较少。秦闯<sup>[4]</sup>对 EH36 钢在不同温度下的疲劳裂纹扩展速度进行了研究,结果表明不同的温度对疲劳裂纹扩展速度有一定的影响。随着温度的下降, EH36 钢的屈服和抗拉强度有一定程度的提高,而且疲劳裂纹扩展速率低于常温。张浩辉<sup>[5]</sup>测定了 DH36 钢三种标准件在两种应力水平下的 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温疲劳寿命,通过 DH36 钢材焊接节点低温疲劳性能试验分析得出 T 字型在 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温下疲劳性能良好, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温环境下疲劳寿命比常温环境下的疲劳寿命长。廖小伟等<sup>[6]</sup>研究了 Q345qD 钢裂纹扩展特性,结果表明随应力比增大,裂纹扩展速率略有增加。许赞<sup>[7]</sup>研究了在低温和常温下 Q355NHC 钢在不同应力比下的疲劳行为,发现低温 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下 Q355NHC 钢的疲劳寿命整体高于室温条件下疲劳寿命。Moore 等<sup>[8]</sup>研究了低温环境下铝合金的疲劳裂纹扩展行为,表明低温会增强铝合金抵抗疲劳和裂纹扩展的能力,延长疲劳寿命。现有研究主要集中在金属疲劳裂纹扩展特性的试验研究上,同时考虑不同应力比和低温环境影响的研究较少,许多研究提出的裂纹扩展速率公式往往只适用于单一的试验场景,无法对不同应力比和不同低温环境下的疲劳裂纹扩展速率进行预报。另外,针对低温环境下,不同应力比的 HTS-A 钢的疲劳裂纹扩展行为的研究则更少。

本文为研究不同应力比对低温环境下 HTS-A 钢疲劳裂纹扩展的影响,开展 HTS-A 钢 CT 试件低温疲劳裂纹扩展速率试验,得到不同应力比下的低温疲劳裂纹扩展速率曲线,并分析应力比对低温环境下 HTS-A 钢疲劳裂纹扩展速率的影响。在试验研究的基础上,对 Cui 等<sup>[9-11]</sup>提出的改进 McEvily 模型做进一步改进,提出考虑应力比和低温影响的新的改进 McEvily 模型。对不同应力比下 HTS-A 钢的低温疲劳裂纹扩展速率进行预报,并将预报结果与试验结果进行对比,以此验证疲劳裂纹扩展速率模型的有效性。

## 1 疲劳裂纹扩展速率试验基本情况

本次试验的对象为 HTS-A 钢 CT 试件,钢材的基本力学性能见表 1。

表 1 HTS-A 钢基本力学性能

Tab.1 1 The basic mechanical properties of HTS-A steel

屈服强度 $\sigma_y$ /MPa	极限强度 $\sigma_u$ /MPa	弹性模量 $E$ /MPa	泊松比 $\nu$
850	900	$2.0 \times 10^5$	0.34

CT 试件板厚  $B=25\text{ mm}$ , 宽度  $W=100\text{ mm}$ , 初始切口  $a_0=30\text{ mm}$ , 试件依据 GB/T 6398-2000《金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法》加工制备。试件的尺寸如图 1 所示。

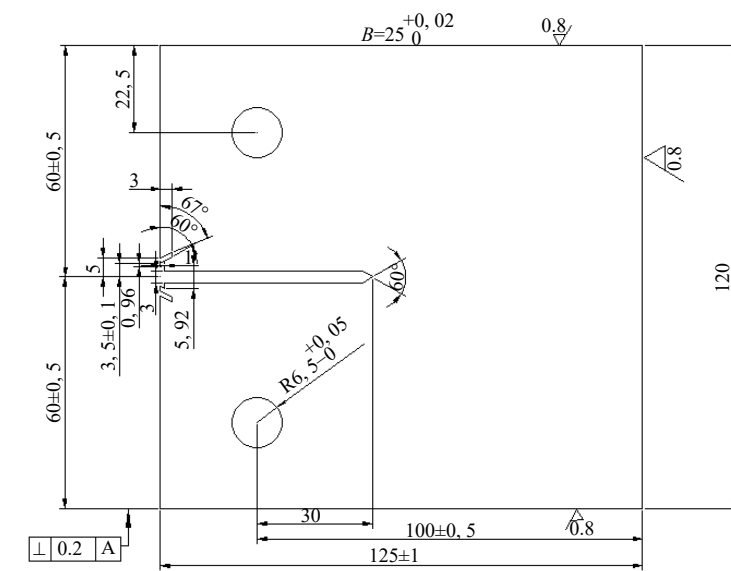


图1 试件尺寸

Fig.1 Specimen size

在低温环境下, 试验研究两种不同的应力比  $R$  (0.1 和 0.3) 对 HTS-A 钢疲劳裂纹扩展速率的影响。疲劳裂纹扩展试验的环境温度分别设定为 20 °C、-20 °C、-40 °C 和 -60 °C 这四个温度。

HTS-A 钢 CT 试件裂纹扩展速率试验在江苏科技大学结构力学实验室完成。使用的仪器为 Instron8802 高低温试验机, CT 试件及试验仪器如图 2 和图 3 所示。



图2 试验试件

Fig.2 Specimen for the test



图3 试验仪器

Fig.3 Test equipment

试验程序包括疲劳预裂纹阶段和裂纹扩展阶段。为消除试件裂纹前部形状对后续裂纹扩展速率数据带来的影响, 在疲劳裂纹扩展试验前采用等  $K$  法预制初始疲劳裂纹, 预制长度 2.5 mm。疲劳试验中, 我们采用的是保证最大载荷不变, 改变应力比的方式。试验过程中的应力比、最大载荷、最小载荷和环境温度等具体参数见表 2。

表 2 试验工况

Tab.2 Test loading conditions

应力比 $R$	最大载荷 $P_{\max}$ /kN	最小载荷 $P_{\min}$ /kN	试验频率 $f$ /Hz	环境温度 /°C
0.1	30	3	10	20, -20, -40, -60
0.3	30	9	10	20, -20, -40, -60

## 2 不同应力比条件下的疲劳裂纹扩展速率试验结果与分析

### 2.1 裂纹扩展速率试验结果

按照表 2 的试验工况开展试验, 试验过程及试验后试件照片如图 4 和图 5 所示。



图 4 低温箱中的试件

Fig.4 Specimen in the cryostat



图 5 完成后的试件

Fig.5 Specimen after test

试验过程中, 通过 CT 试件开口处安装的引伸计来实时检测裂纹张开位移, 反馈至 Instron8802 型疲劳试验机后, 系统根据张开位移自动确定实时的裂纹尺寸, 当试件裂纹扩展到一定程度或试件断裂时, 引伸计能自动脱离试件, 疲劳试验机自动停止。试验结束后, 从疲劳试验机配套的计算机中输出试验结果。将各工况下的疲劳裂纹扩展试验结果绘制成曲线, 得到不同温度、同一应力比条件下的裂纹扩展  $a-N$  曲线和裂纹扩展速率曲线, 如图 6~9 所示。整理得到的各试验工况下的最终裂纹尺寸和循环次数见表 3。

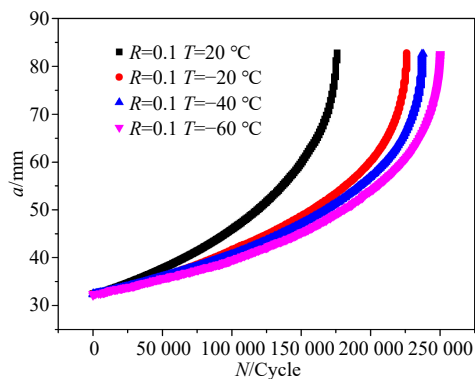


图 6 不同温度下裂纹扩展  $a-N$  曲线 ( $R=0.1$ )

Fig.6 Crack propagation  $a-N$  curve under different temperature ( $R=0.1$ )

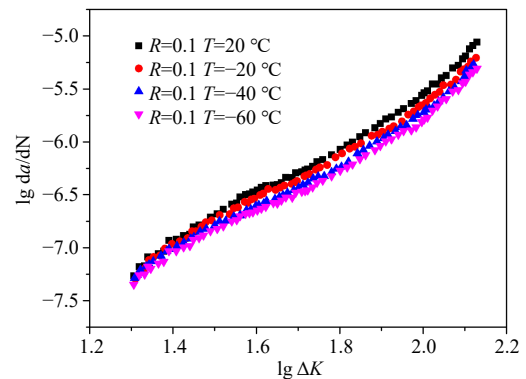


图 7 不同温度下裂纹扩展速率曲线 ( $R=0.1$ )

Fig.7 Crack growth rate curve under different temperature ( $R=0.1$ )

从图 6 和图 8 可以看出, 在应力比  $R$  不变的条件下, 疲劳裂纹扩展寿命均随着温度的降低而增加。从图 7 和图 9 可以看出, 在应力比  $R$  不变的条件下, 疲劳裂纹扩展速率均随着温度的降低而减小。从表 3 中可以看出, 每次试验都是由于 CT 试件裂纹张开位移达到一定值(对应于最终裂纹尺寸达到 82.6 mm 左右)时, 引伸计的自动弹开而机器自动终止试验。表 3 结果也表明当温度达到  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, HTS-A 钢仍然保持有较好的力学性能, 没有出现低温脆断的现象。

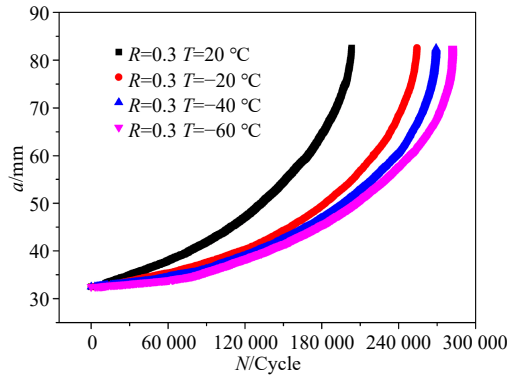


图 8 不同温度下裂纹扩展  $a-N$  曲线 ( $R=0.3$ )  
Fig.8 Crack propagation  $a-N$  curve under different temperature ( $R=0.3$ )

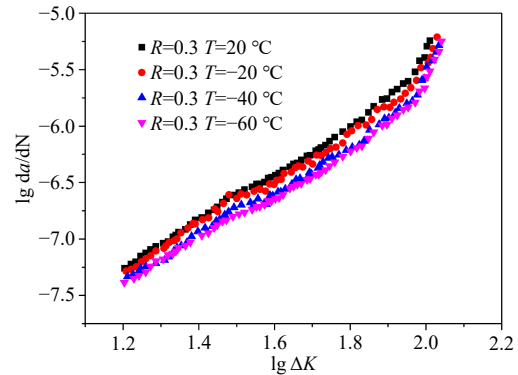


图 9 不同温度下裂纹扩展速率曲线 ( $R=0.3$ )  
Fig.9 Crack growth rate curve under different temperature ( $R=0.3$ )

表 3 各试验工况下的最终裂纹尺寸和循环次数表

Tab.3 Test data of final crack sizes and fatigue cycles in different fatigue cases

环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	循环次数 $N$ /cycles		最终裂纹尺寸 $a$ /mm	
	$R=0.1$	$R=0.3$	$R=0.1$	$R=0.3$
20	175 730	203 295	82.80	82.52
-20	226 220	254 311	82.83	82.58
-40	237 534	269 200	82.62	82.48
-60	250 228	282 083	82.62	82.49

2.2 不同应力比  $R$  对疲劳裂纹扩展速率的影响分析

对试验结果进一步分析,分析不同应力比对疲劳裂纹扩展速率的影响。在相同的温度环境下,对比分析  $R=0.1$  和  $0.3$  时的裂纹扩展  $a-N$  曲线和裂纹扩展速率曲线,分别见图 10~17。

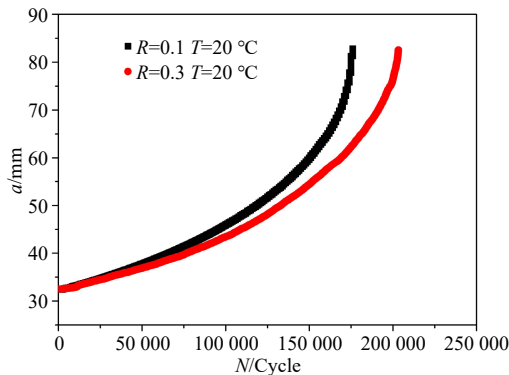


图 10 不同应力比下  $a-N$  曲线图 ( $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )  
Fig.10  $a-N$  curves for different stress ratios ( $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

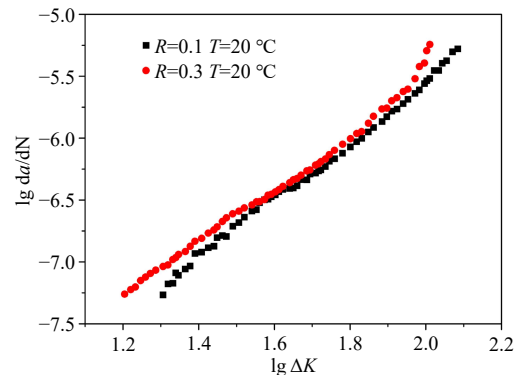


图 11 不同应力比下裂纹扩展速率曲线 ( $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )  
Fig.11 Crack growth rate curve for different stress ratios ( $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

从图 10、图 12、图 14 和图 16 和表 3 中可以看出,各试验工况最终裂纹尺寸均为  $82.6\text{ mm}$  左右;应力比  $R=0.1$  所对应的疲劳裂纹扩展寿命小于  $R=0.3$  条件下的疲劳寿命,这是因为在试验过程中仪器的最大载荷不变,始终为  $30\text{ kN}$ (具体见表 2),这样当应力比  $R$  增大时,最小载荷相应增大,载荷和应力变化范围则变小,因此  $R=0.3$  的疲劳寿命变长。

进一步将  $a-N$  曲线试验数据转换成对应的裂纹扩展速率曲线,见图 11、图 13、图 15 和图 17 所示,可以看出各试验工况下的  $R=0.3$  对应的裂纹扩展速率曲线高于相应的  $R=0.1$  时的扩展速率曲线,说明在相同的环境温度条件下,随着应力比  $R$  的增加,裂纹扩展速率增大。从这些图中还可以进一步看出,随着温度的降低,应力比  $R$  对裂纹扩展速率的影响程度在逐渐降低,表现为相同温度环境下  $R=0.1$  和  $R=0.3$  的扩展速率曲线越来越接近,当  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,  $R=0.1$  和  $R=0.3$  的扩展速率曲线在中部的线性段部分区域接近重合。

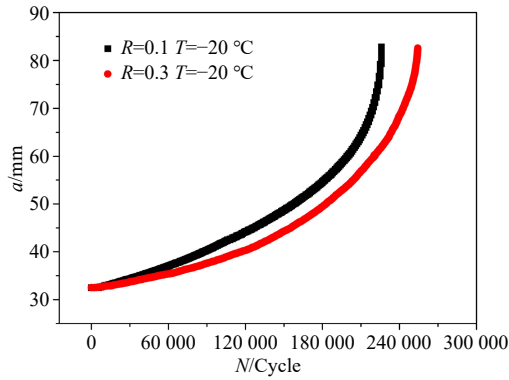


图 12 不同应力比  $a-N$  曲线图 ( $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Fig.12  $a-N$  curves for different stress ratios ( $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

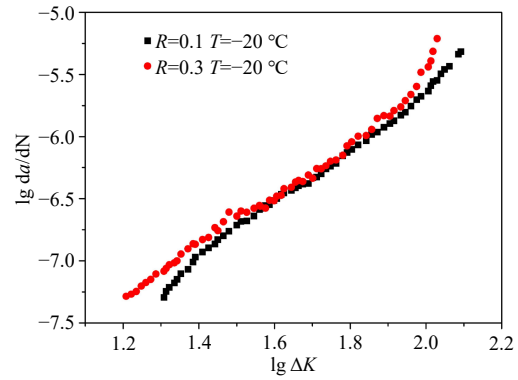


图 13 不同应力比下裂纹扩展速率曲线 ( $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Fig.13 Crack growth rate curve for different stress ratios ( $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

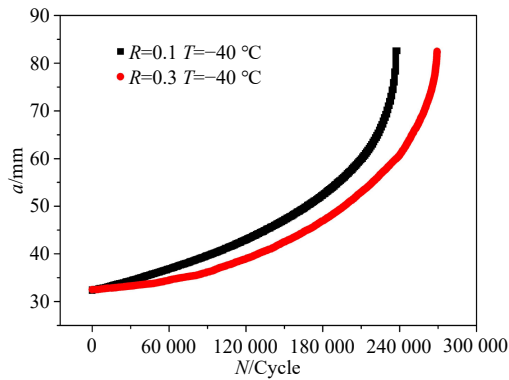


图 14 不同应力比  $a-N$  曲线图 ( $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Fig.14  $a-N$  curves for different stress ratios ( $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

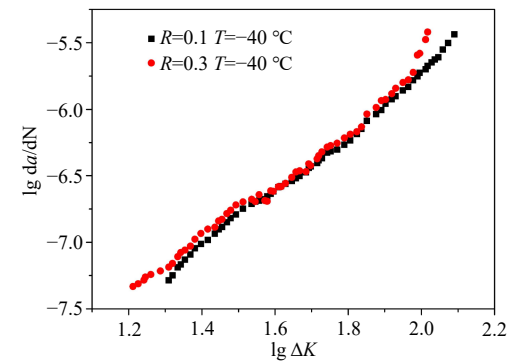


图 15 不同应力比下裂纹扩展速率曲线 ( $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Fig.15 Crack growth rate curve for different stress ratios ( $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

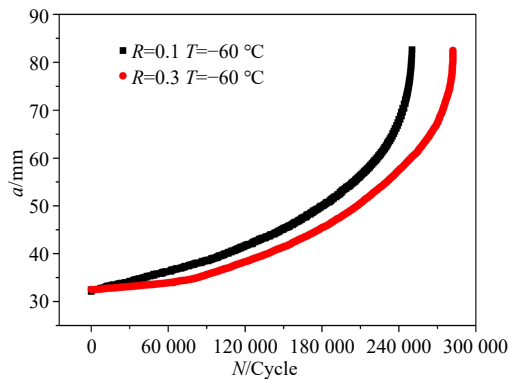


图 16 不同应力比  $a-N$  曲线图 ( $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Fig.16  $a-N$  curves for different stress ratios ( $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

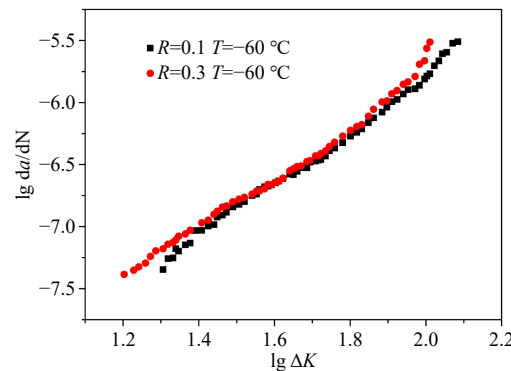


图 17 不同应力比下裂纹扩展速率曲线 ( $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Fig.17 Crack growth rate curve for different stress ratios ( $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

### 3 HTS-A 钢疲劳裂纹扩展速率预报及分析

#### 3.1 改进的 McEvily 疲劳裂纹扩展模型

疲劳裂纹扩展速率的准确预报首先需要建立恰当的裂纹扩展速率模型。迄今为止，描述疲劳裂纹扩展速率的模型有很多，应用最为广泛的是 Paris 公式，该公式形式简单，需要确定的模型参数少，但是仅能描述裂纹扩展速率曲线的第二区域——线性段部分。

Cui 等<sup>[9-11]</sup> 在 McEvily 与他的同事提出的扩展速率模型基础上，提出了改进的 McEvily 模型，能够

较好地预报常温下的疲劳裂纹扩展速率,见公式(1)。

$$\frac{da}{dN} = \frac{A[K_{\max}(1-f_{op}) - \Delta K_{\text{effh}}]^m}{1 - \left(\frac{K_{\max}}{K_c}\right)^n} \quad (1)$$

式中:  $K_c$  是材料的断裂韧性,  $A$  是环境敏感尺寸常数,  $m$  表示相应疲劳裂纹扩展速率曲线斜率的常数,  $n$  是不稳定断裂的常数,  $K_{\max}$  是最大应力强度因子,  $\Delta K_{\text{effh}}$  是在门槛值下的有效应力强度因子范围。

本文将在公式(1)的基础上,增加低温和应力比的影响参数,得到新的能够适用于低温环境和不同应力比条件下的疲劳裂纹扩展速率模型。

吕宝铜等<sup>[12]</sup>提出温度低于室温环境时,低温疲劳裂纹扩展门槛值为

$$\Delta K_{\text{th}}(T) = \Delta K_{\text{th}}(T_0) \left[ 1 + \frac{\sigma_{cy}(T) - \sigma_{cy}(T_0)}{\sigma_{-1}(T_0)} \right] \quad (2)$$

式中:  $\Delta K_{\text{th}}(T)$  和  $\Delta K_{\text{th}}(T_0)$  分别为低温及常温时的疲劳裂纹扩展门槛值,  $\sigma_{cy}(T)$  和  $\sigma_{cy}(T_0)$  分别为低温和常温时的循环屈服强度,  $\sigma_{-1}(T_0)$  为常温疲劳极限。

Wang 等<sup>[13-14]</sup>通过大量试验数据的统计分析得出,钢材在低温环境下的强度指标可以用自然对数  $e$  的指数函数进行拟合,即

$$\sigma_y(T) = \sigma_y(T_0)e^{q(T_0-T)} \quad (3)$$

本文将在公式(1)的基础上引入公式(3)以考虑温度引起的材料屈服强度变化,结合公式(2)进一步考虑低温下材料性能对疲劳裂纹扩展门槛值的影响,并进行无量纲化处理。最后,在扩展速率模型公式(1)的基础上,提出了包含温度参数和应力比  $R$  影响的新的改进 McEvily 模型,见公式(4)。其中,模型中的参数计算公式(6)考虑了应力比对低温疲劳裂纹扩展的影响。

$$\frac{da}{dN} = \frac{A \left\{ \left( 1 - \frac{\sigma_y(T) - \sigma_y(T_0)}{\sigma_y(T_0)} \right) [K_{\max}(1-f_{op}) - \Delta K_{\text{effh}}] \right\}^m}{1 - \left(\frac{K_{\max}}{K_c}\right)^n} \quad (4)$$

其中,

$$\begin{cases} K_{\max} = \sqrt{\pi r_e \left( \sec \frac{\pi \sigma_{\max}}{2 \sigma_v} + 1 \right)} \left( 1 + Y(a) \sqrt{\frac{a}{2r_e}} \right) \sigma_{\max} \\ K_{\min} = \sqrt{\pi r_e \left( \sec \frac{\pi \sigma_{\min}}{2 \sigma_v} + 1 \right)} \left( 1 + Y(a) \sqrt{\frac{a}{2r_e}} \right) \sigma_{\min} \\ \Delta K = K_{\max} - K_{\min} \end{cases} \quad (5)$$

$$f_{op} = \begin{cases} \max \{R, A_0 + A_1 R + A_2 R^2 + A_3 R^3\} & 0 \leq R \leq 1 \\ A_0 + A_1 R & -2 \leq R \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} A_0 = (0.825 - 0.34\alpha' + 0.05\alpha'^2) \left[ \cos \left( \frac{\pi \sigma_{\max}}{2 \sigma_{fl}} \right) \right]^{\alpha'} \\ A_1 = (0.415 - 0.071\alpha') \cdot \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{fl}} \\ A_2 = 1 - A_0 - A_1 - A_3 \\ A_3 = 2A_0 + A_1 - 1 \\ \sigma_{fl} = \frac{\sigma_y + \sigma_u}{2} \\ \alpha' = \frac{1}{1-2\nu} + \frac{1 - \frac{1}{1-2\nu}}{\left[ 1 + 0.8861 \cdot \left( t / \left( \frac{K_{\max}}{\sigma_y} \right)^2 \right)^{3.2251} \right]^{0.75952}} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} K_c = \left[ \frac{(1-2\nu)^2 - \sqrt{1-\nu^2}}{(1-2\nu)^2 - 1} \cdot \frac{\pi \cdot \lambda}{(1-2\nu)^2} + \frac{\sqrt{1-\nu^2} - 1}{(1-2\nu)^2 - 1} \right] \cdot K_{1c} \\ \lambda = \frac{(1-1.65\nu^2)}{5} - \frac{1}{20n'} [(1-1.65\nu^2)]^{\frac{1}{n'}} + \frac{\frac{1}{\pi} - \frac{1}{2.2n'} \left(\frac{1}{\pi}\right)^{\frac{1}{n'}} - \left[ \frac{(1-1.65\nu^2)}{5} - \frac{1}{20n'} [(1-1.65\nu^2)]^{\frac{1}{n'}} \right]}{\left[ 1 + \frac{t/(K_{max}/\sigma_Y)}{1+1/n'} \right]^{1.6+1/n'}} \end{cases} \quad (8)$$

式中： $K_c$ 是材料的断裂韧性， $A$ 是环境敏感尺寸常数， $m$ 表示相应疲劳裂纹扩展速率曲线斜率的常数， $n$ 是不稳定断裂的常数， $K_{ci}$ 是材料在疲劳载荷下的断裂韧性， $r_e$ 是固有缺陷长度的经验材料常数， $a$ 是修正后裂纹长度， $\sigma_{max}$ 是最大施加应力， $\sigma_{min}$ 是最小施加应力， $R$ 是应力比， $\Delta K_{eff}$ 是有效应力强度因子范围， $\Delta K_{effh}$ 是在门槛值处有效应力强度因子范围， $K_{op}$ 是张开裂纹处的应力强度因子， $\alpha'$ 是裂纹尖端应力/应变约束比， $\alpha$ 是计算虚拟强度参数， $\sigma_u$ 是材料极限强度， $\sigma_y$ 是材料屈服强度， $n'$ 是材料的硬化指数，是裂纹扩展速率模型中表明裂纹不稳定的指标， $\nu$ 是泊松比。 $A_0$ 、 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 定义了计算 $f_{op}$ 的系数。

对于本文试验中的 CT 试件，其应力强度因子  $K$  计算过程中用到的几何形状因子  $Y(a)$ ，对应的计算式为公式(9)。若要将扩展速率公式(4)应用到其他形式的裂纹疲劳扩展问题，需要根据具体的裂纹形式查阅应力强度因子手册确定相应的几何形状因子  $Y(a)$ 。

$$Y(a) = \frac{B \cdot \left(2 + \frac{a}{W}\right) \left[0.886 + \frac{4.64a}{W} - 13.32\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72\left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.6\left(\frac{a}{W}\right)^4\right]}{\sqrt{\pi a W} \cdot \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{1.5}} \quad (9)$$

### 3.2 疲劳裂纹扩展速率模型的参数确定及裂纹扩展速率预报

为了验证本文提出的改进 McEvily 疲劳裂纹扩展模型在不同温度、不同应力比条件下的有效性，将 2.1 节中的疲劳试验数据分为两部分：一部分用于疲劳试验数据进行模型参数确定，另一部分试验数据用于检验模型对裂纹扩展速率的预测能力。

把-20 °C 和-40 °C 的试验数据用最小二乘法进行模型参数确定，而把 20 °C 和-60 °C 的试验数据用于检验模型的预测能力。HTS-A 钢断裂韧性为 150 MPa，模型中的参数  $n=6.0$ ，常温下的屈服强度为 850 MPa，通过参数拟合确定模型参数  $A$  和  $m$ ，根据公式(3)可以计算得到低温-20 °C 和-60 °C 下屈服强度为 920 MPa、997 MPa 以及-40 °C 时屈服强度为 958 MPa。

公式(4)模型参数拟合如图 18~21 所示，得到 HTS-A 钢不同应力比下的低温疲劳扩展速率模型见公式(10)。

$$\frac{da}{dN} = \frac{3.16228 \times 10^{-10} \left\{ \left( 1 - \frac{\sigma_y(T) - \sigma_y(T_0)}{\sigma_y(T_0)} \right) [K_{max} (1 - f_{op}) - 3] \right\}^{1.9804}}{1 - \left( \frac{K_{max}}{150} \right)^6} \quad (10)$$

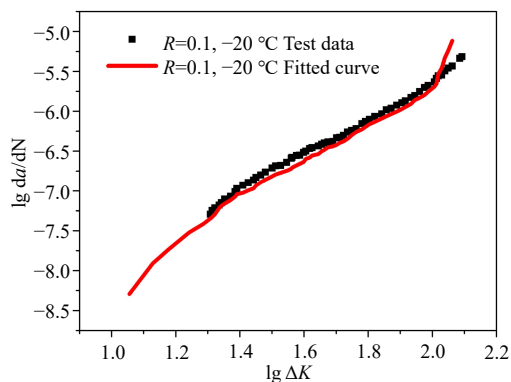


图 18 裂纹扩展速率预报 (-20 °C, R=0.1)

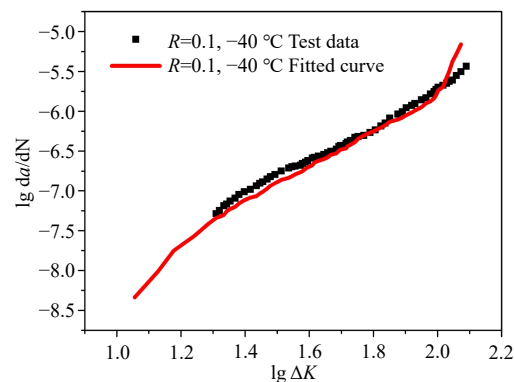


图 19 裂纹扩展速率预报 (-40 °C, R=0.1)

Fig.18 Prediction of crack growth rate (-20 °C, R=0.1)

Fig.19 Prediction of crack growth rate (-40 °C, R=0.1)

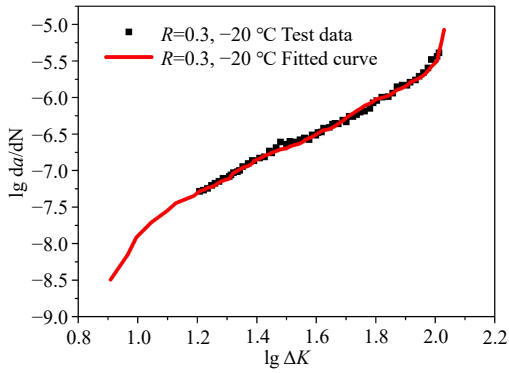


图20 裂纹扩展速率预报 (-20 °C, R=0.3)

Fig.20 Prediction of crack growth rate (-20 °C, R=0.3)

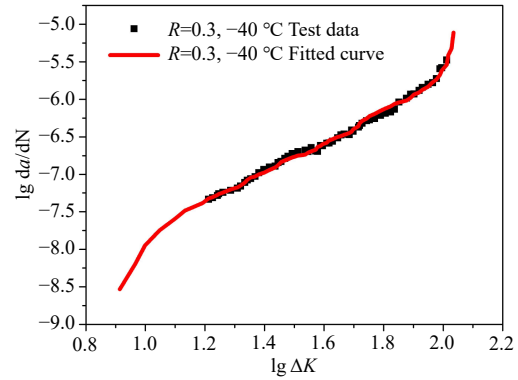


图21 裂纹扩展速率预报 (-40 °C, R=0.3)

Fig.21 Prediction of crack growth rate (-40 °C, R=0.3)

运用公式(10)对 20 °C 和-60 °C 低温环境下、应力比 0.1 和 0.3 时的裂纹扩展速率进行预报,并与试验结果对比验证,如图 22~25 所示。

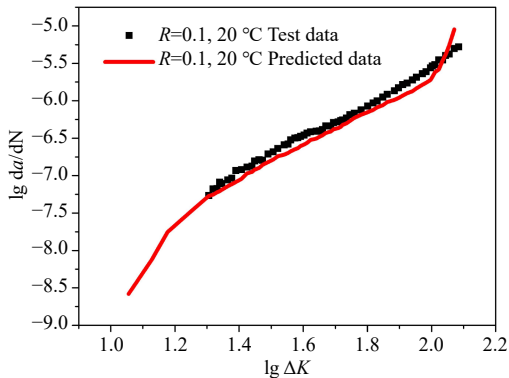


图22 裂纹扩展速率结果对比 (20 °C, R=0.1)

Fig.22 Results comparison of crack growth rate (20 °C, R=0.1)

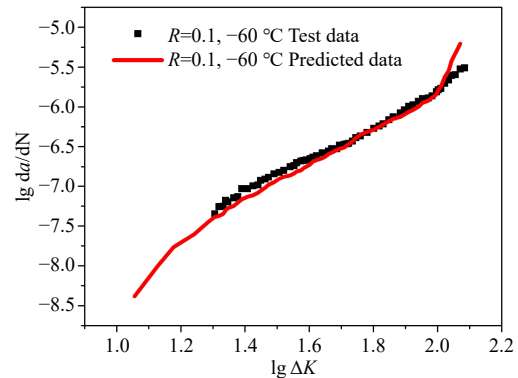


图23 裂纹扩展速率结果对比 (-60 °C, R=0.1)

Fig.23 Results comparison of crack growth rate (-60 °C, R=0.1)

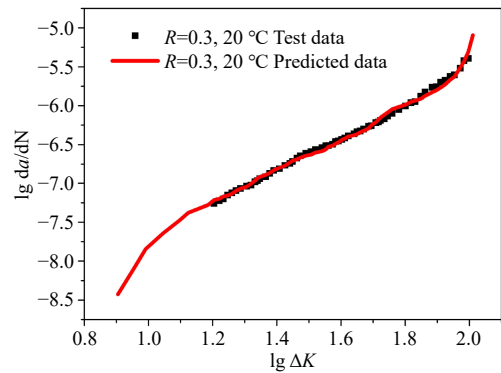


图24 裂纹扩展速率结果对比 (20 °C, R=0.3)

Fig.24 Results comparison of crack growth rate (20 °C, R=0.3)

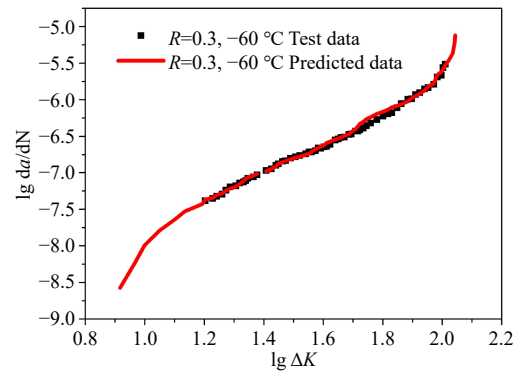


图25 裂纹扩展速率结果对比 (-60 °C, R=0.3)

Fig.25 Results comparison of crack growth rate (-60 °C, R=0.3)

从图 22~25 可以看出公式(10)对 HTS-A 钢在不同温度、不同应力比条件下的疲劳裂纹扩展速率预测结果与试验结果吻合较好,表明本文提出的扩展速率模型能够准确反映 HTS-A 钢在不同温度、不同应力比条件下的疲劳裂纹扩展速率特性,同时运用少量组的试验数据确定模型参数,就能够预测出其他温度、应力比条件下的疲劳裂纹扩展速率,从而减少大量的低温疲劳试验,节约试验成本。同时该模型也可以为 HTS-A 钢深海耐压结构的低温疲劳寿命评估提供参考。

## 4 结 论

本文开展了 HTS-A 钢 CT 试件疲劳裂纹扩展试验,研究了不同应力比  $R$  对其低温环境下疲劳裂纹扩展速率的影响。在试验研究的基础上,提出了考虑温度和应力比影响的新的改进 McEvily 模型,通过对试验结果进行最小二乘法拟合确定了模型参数,进一步对 HTS-A 钢的低温疲劳裂纹扩展速率完成预报分析。通过研究得到以下结论:

(1)随着应力比  $R$  的增大,HTS-A 钢低温疲劳扩展速率增大;同时,随着温度的降低,应力比  $R$  对疲劳裂纹扩展速率的影响越来越小。

(2)基于本文的 HTS-A 钢疲劳裂纹扩展速率试验和试验数据,本文提出了一种考虑了应力比和温度影响的改进 McEvily 疲劳裂纹扩展速率公式,可以拟合和预测在不同低温、不同应力比条件下的疲劳裂纹扩展速率,预报结果与试验结果较为吻合。该方法可以减少低温疲劳试验数量,节省试验成本同时可为低温环境下的海洋装备疲劳寿命评估打下基础。

## 参 考 文 献:

- [1] 李永正,阮 浩,王 珂,等. 新型钛合金材料疲劳寿命试验及预报方法研究[J]. 船舶力学, 2021, 25(11): 1543–1550.  
Li Y Z, Ruan H, Wang K, et al. Research on fatigue life test and forecast method of new titanium alloy materials[J]. Journal of Ship Mechanics, 2021, 25(11): 1543–1550. (in Chinese)
- [2] 冯国庆,刘文超,赵伟栋,等. DH36 钢趾端焊接接头低温疲劳试验[J]. 船舶工程, 2020, 42(9): 93–98.  
Feng G Q, Liu W C, Zhao W D, et al. Low temperature fatigue experiment of welded toe joint of DH36 steel[J]. Ship Engineering, 2020, 42(9): 93–98. (in Chinese)
- [3] 严仁军,周宏飞,刘 慧,等. HTS-A 钢对接接头低周疲劳寿命研究[J]. 船舶力学, 2014, 18(Z1): 152–157.  
Yan R J, Zhou H F, Liu H, et al. Study on low-cycle fatigue at butt joint of HTS-A steel[J]. Journal of Ship Mechanics, 2014, 18(Z1): 152–157. (in Chinese)
- [4] 秦 闯. 极地破冰船用钢低温疲劳性能研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2019.  
Qin C. Study on low temperature fatigue performance of steel used in polar icebreaker[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [5] 张浩辉. 极地船舶结构疲劳分析方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.  
Zhang H H. Research on fatigue strength of the polar ship[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018. (in Chinese)
- [6] 廖小伟,王元清,石永久,等. 低温环境下桥梁钢 Q345qD 疲劳裂纹扩展行为研究[J]. 工程力学, 2018, 35(10): 7.  
Liao X W, Wang Y Q, Shi Y J, et al. Experimental study on the fatigue crack growth behavior of bridge steel Q345qD at low temperatures[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(10): 7. (in Chinese)
- [7] 许 赞. 转向架用钢 Q355NHC 低温疲劳断裂性能研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2019.  
Xu Z. Study on low temperature fatigue fracture properties of steel Q355NHC for bogies[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2019. (in Chinese)
- [8] Moore, P, Nowak-Coventry, et al. The effect of fatigue pre-cracking forces on fracture toughness[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 2016, 39(2): 135–148.
- [9] Cui W C, Huang X P. A general constitution relation for fatigue crack growth analysis of metal structure[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2003, 16(5): 342–354.
- [10] Wang F, Chen F L, Cui W C. Applicability of the improved crack growth rate model and its parameters estimation method [J]. Journal of Ship Mechanics, 2010, 14 (3): 252–262.

- 
- [11] Zhou C, Cui W C. Determination of fatigue crack growth rate using existing data[J]. Shipbuilding of China, 2003, 44(3): 74–79.
- [12] 吕宝桐, 郑修麟. 低温下 LY12CZ 铝合金的疲劳裂纹扩展[J]. 宇航学报, 1993(1): 76–80.  
Lü B T, Zheng X L. Fatigue crack growth of LY12CZ aluminum alloy at low temperatures[J]. Acta Astronautica, 1993(1): 76–80. (in Chinese)
- [13] Wang Y, Zhou H, Wang X I, et al. Experimental study on mechanical properties of thermit joints of rail steels at low temperature[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(7): 13–16.
- [14] Liu X Y, Wang Y Q, Zong L, et al. Experimental study on mechanical properties and toughness of Q460C high-strength steel and its butt welded joint at low temperature[J]. International Journal of Steel Structures, 2014, 14(3): 457–469.