

文章编号: 0258-0926(2021)03-0096-07; doi:10.13832/j.jnpe.2021.03.0096

核级不锈钢管座焊接区与母材区 疲劳裂纹扩展性能对比研究

常海军

中国核工业二三建设有限公司, 北京, 101300

摘要: 焊接接头广泛应用于核电站管座处, 而疲劳裂纹扩展是导致焊接接头失效的重要原因之一。因此, 研究焊接区材料的疲劳裂纹扩展和寿命预测方法对准确预测焊接接头的寿命具有重要意义。本文以核电厂常用的 304L 不锈钢焊缝材料为对象, 研究不同载荷比、不同取样方向对疲劳裂纹扩展速率的影响; 基于试验数据建立焊缝材料的疲劳裂纹扩展速率模型, 并与美国机械工程师协会 (ASME) 标准中奥氏体钢进行对比。结果表明: 不同取样方向对焊缝疲劳裂纹扩展速率的影响不大, 但载荷比对其有较大影响, 较低载荷比下, 焊缝的疲劳裂纹扩展速率在某个应力强度因子幅值 (ΔK) 前高于母材的疲劳裂纹扩展速率, 在其之后则低于母材, 而较高载荷比下则恰恰相反。

关键词: 焊接接头; 疲劳裂纹扩展; 载荷比

中图分类号: TG407 **文献标志码:** A

Comparative Study on Fatigue Crack Growth Performance of Nuclear Stainless Steel Weld Joints and Base Metal

Chang Haijun

China Nuclear Industry 23 Construction Co., Ltd., Beijing, 101300, China

Abstract: Welded joints are widely used on the pipe sockets in nuclear power plants, and fatigue cracks are one of the important causes resulting in the failure of welded joints. Therefore, it is of great significance to study the fatigue crack propagation and life prediction methods for welding zone materials to accurately predict the life of welded joints. This paper takes the commonly used 304L stainless steel weld material in nuclear power plants as the object to study the effects of different load ratios and different sampling directions on the fatigue crack growth rate. Based on the test data, the fatigue crack growth rate model of the weld material is established, and it is compared with the austenite steel in ASME standard. The results show that different sampling directions have little effect on the fatigue crack growth rate of the weld, but the load ratio has a greater impact on it. At a lower load ratio, the fatigue crack growth rate of the weld is higher than that of the base metal before a certain ΔK value, and thereafter it is lower than that of the base metal thereafter, but vice versa with higher load ratios.

Key words: Welded joint, Fatigue crack growth, Load ratio

0 引言

截至 2020 年 4 月, 我国已有 47 台核电机组建成并投入运营。在投运的核电厂中, 焊接接头广泛应用于管座处, 但由于焊接形式使得两端母

材发生熔化到冷却等一系列过程, 焊接材料及热影响区的状态随之改变, 其抗疲劳性能也随之降低。加之焊接行为本身就已注定微观裂纹的存在^[1], 针对焊缝疲劳寿命的评估方法便与母材

收稿日期: 2020-09-14; 修回日期: 2021-02-03

作者简介: 常海军 (1984—), 男, 高级工程师, 现主要从事核电设备与管道力学相关研究, E-mail: changhaijun@cni23.com

的疲劳评估方法有所差异；另外，焊缝材料疲劳寿命的评价需要相同材料参数作为基础，但由于焊缝试样要考虑到焊接类型、焊接工艺、焊接形式等众多因素，目前的疲劳评估标准不能给出与实际情况完全匹配的焊缝参数。如 IIW-2008 标准^[2]中仅仅给出了典型的 T 型焊、对接焊等类型，且已提前假设无焊缝缺陷，这就导致了在对焊缝评价时只能选择与实际情况相近的参数，其计算结果也往往因人而异。所以确定焊缝的疲劳裂纹扩展参数对仿真分析具有重要意义。

在对核级管道进行疲劳裂纹扩展寿命预测时，针对缺少焊缝区域材料疲劳裂纹扩展材料参数 (C_0 和 n) 的情况，往往采用 ASME 标准中奥氏体和铁素体钢母材的材料参数进行计算，但标准中没有明确具体的材料牌号，可靠度差。针对焊缝材料的疲劳裂纹扩展问题，由立成^[3]对 12Cr1MoV 钢管母材及焊缝开展了裂纹扩展速率试验，采用 ASTM E647-88 中的七点递增多项式数据处理程序拟合出 530 下母材和焊缝的 $da/dN-\Delta K$ 曲线，得出焊缝材料的疲劳裂纹扩展速率比母材小的结论；顾玉丽^[4]针对母材和焊缝的疲劳裂纹扩展速率研究得更加细致，测定 GH625 合金焊缝处在应力强度因子幅值 (ΔK) 较小时疲劳裂纹扩展速率小于母材，当 ΔK 较大时则大于母材，但针对母材与焊缝的比较并没有考虑到不同载荷比对疲劳裂纹扩展速率的影响。

本文针对不锈钢焊缝材料进行不同载荷比、不同取样方向的疲劳裂纹扩展速率试验，研究载荷比和取样方向对疲劳裂纹扩展速率的影响，针对试验数据利用 Paris 公式^[5]进行数据拟合，得到不同条件下的疲劳裂纹扩展速率参数。同时，将拟合出的疲劳裂纹扩展速率预测曲线与 ASME 标准中所给出的奥氏体钢的疲劳裂纹扩展速率曲线进行比较，分析采用母材疲劳裂纹扩展参数来评价焊缝疲劳寿命而产生的误差。

1 焊接区材料疲劳裂纹扩展试验

1.1 疲劳裂纹扩展理论

若要准确地预测含裂纹结构和材料的剩余疲劳寿命，需要研究其疲劳裂纹扩展特性。疲劳裂纹扩展速率是描述疲劳裂纹扩展的主要方法之一^[5]。

Paris 和 Erdogan 提出的 Paris 计算公式^[6]常用

于恒幅载荷下的疲劳裂纹扩展速率。此公式在实际工程中应用广泛且能够很好地描述疲劳裂纹稳定扩展阶段的扩展速率，其典型的裂纹扩展曲线如图 1 所示，Paris 公式可表示为：

$$\frac{da}{dN} = C_0 (\Delta K)^n \quad (1)$$

式中， a 为裂纹长度； N 为循环周次； ΔK 为应力强度因子幅值； C_0 和 n 为材料参数。

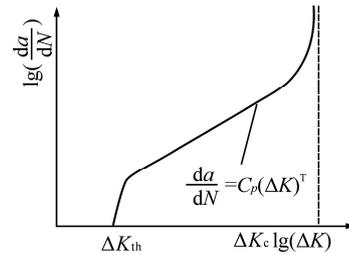


图 1 典型裂纹扩展曲线

Fig. 1 Typical Crack Growth Curve
 ΔK_{th} —应力强度因子变化的门槛值； ΔK_c —强度因子变化的极限值

对于试验中的标准 CT 试样，其应力强度因子为^[7]：

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

式中， ΔP 为循环载荷幅值； B 为试样厚度； W 为试样宽度， $\beta = a/W$ ， a 为裂纹长度。

对式 (1) 两侧取对数，得到：

$$\lg\left(\frac{da}{dN}\right) = \lg C_0 + n \lg(\Delta K) \quad (3)$$

式 (3) 表明裂纹扩展速率 da/dN 应力强度因子幅值在双对数坐标下呈斜率为 n 、截距为 $\lg C_0$ 的线性方程。

根据疲劳裂纹扩展试验得到的裂纹长度 a 随循环加载周期 N 的变化数据 $a-N$ ，通过式 (2) 可计算得到各个试样裂纹扩展速率 da/dN 与应力强度因子幅值的数值，进一步研究焊接区域材料的疲劳裂纹扩展行为。

1.2 试验材料及试验方法

为保证焊缝区域试样的可靠性，使用直径 1.6 mm 的 ER316L 焊丝以全熔透的对接焊方式将 2 个 304L 不锈钢钢板进行焊接，焊接工艺选用钨极惰性气体保护焊 (TIG) 技术，利用氩气作为保护气体，并按照 RCC-M 标准进行焊接。然后进行打磨得到平整的焊接区域材料，并用 4% 硝酸酒

精溶液对融合区腐蚀，形成肉眼可见焊接区域，便于后续加工制备试样。

按照 ASTM E647-15《疲劳裂纹扩展速率试验方法》标准在焊接区域制备紧凑拉伸试样（CT），试样厚度为 4.5 mm，预制切口长 5 mm，试样如图 2 所示。

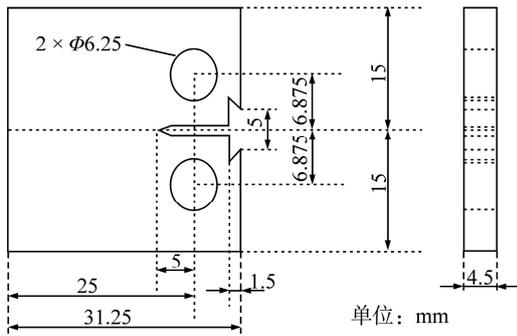


图 2 CT 试样规格尺寸
Fig. 2 CT Sample Size

考虑到取样方向对疲劳裂纹扩展特性的影响，在焊缝区域按照 X-Z 方向、Y-X 方向以及 X-Y 方向分别选取 6 个 CT 试样，试样的预制切口均处于焊接区域中心处，试样在焊接区域材料上的取样方式如图 3 所示。对所选取的 CT 试样进行打磨、抛光及电解侵蚀后，利用光学显微镜观测试样，确定焊接区域形状完好，未发现裂纹等缺陷，符合标准要求。

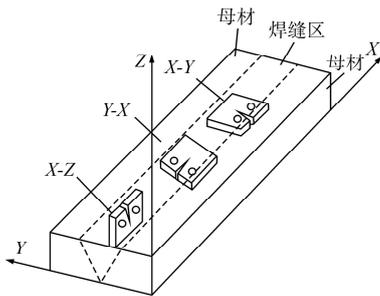


图 3 CT 试样在不锈钢焊接材料上取样方式
Fig. 3 Sampling Direction of CT Sample on Stainless Steel Welding Material

在室温 20℃ 下，使用 MTS LandMark 379.10 疲劳试验机对试样开展恒幅载荷下疲劳裂纹试验。利用裂纹张开位移计（COD 规），通过柔度法获取裂纹长度，所施加正弦交变载荷见表 1。

2 焊缝试验结果分析

对多个试样分别执行不同载荷比下疲劳裂纹

扩展试验，得到 a 随 N 的变化数据，分析各个试样裂纹扩展速率 da/dN 与应力强度因子幅值的数值，并利用式（3）对不同载荷比、不同试样所对应的疲劳裂纹扩展数据进行回归分析，拟合出材料参数 $\lg C_0$ 和 n 。

表 1 交变载荷表

Tab. 1 Alternating Load

试样编码	载荷比 (R)	最大力/kN	频率/Hz
S-X-Z-1、S-X-Z-2、S-Y-X-1 S-Y-X-2、S-X-Y-1、S-X-Y-2	0.05	4	10
S-X-Z-3、S-X-Z-4、S-Y-X-3 S-Y-X-4、S-X-Y-3、S-X-Y-4	0.3	5	10
S-X-Z-5、S-X-Z-6、S-Y-X-5 S-Y-X-6、S-X-Y-5、S-X-Y-6	0.79	10	10

2.1 裂纹扩展的不确定性

通过分析试验数据可以看出，所有试样的疲劳裂纹扩展试验数据均出现一定的分散性，并且在取样方向一致的情况下，试验结果的分散性随载荷比的增加而加大，这也必然加大了拟合直线的不确定性。如在 X-Y 取样方向上不同载荷比下试验数据的分散性如图 4 所示。

图 4 中黑色圆圈表示各试样疲劳裂纹扩展试验数据，蓝线代表的是基于材料拟合参数的裂纹扩展速率预测线，其中部分测量数据偏离拟合出的裂纹扩展速率预测线，拟合的直线存在一定的不确定性。这表明核级不锈钢焊接区域的疲劳裂纹扩展行为呈现出一定程度的随机性，且分散性因载荷比的增加而加大。

2.2 不同取样方向的疲劳裂纹扩展速率

从金属结晶的角度看，焊缝在焊接过程中以柱状晶的形式从母材向焊缝中间生长，首先结晶的金属纯度较高，随结晶的生长杂质会越来越多，这些杂质相比之下熔点较低并伴随着焊缝结晶的凝固被排挤到境界处，存在于焊缝的中心，被称之为“液态薄膜”^[8]。由于熔化金属的凝固会产生拉应力，“液态薄膜”区域便成了疲劳薄弱区域。

图 3 描述了 CT 试样在不锈钢焊接材料上不同的取样方向，图 5 为不同取样方向试样的裂纹开裂方向，从图中可以看出：由于试样的预制切口均处于焊缝中心位置处，所以 3 个方向的试样开裂起始位置均处于“液态薄膜”平面上，其中 X-Z 试样以及 Y-X 试样裂纹开裂方向平行于“液

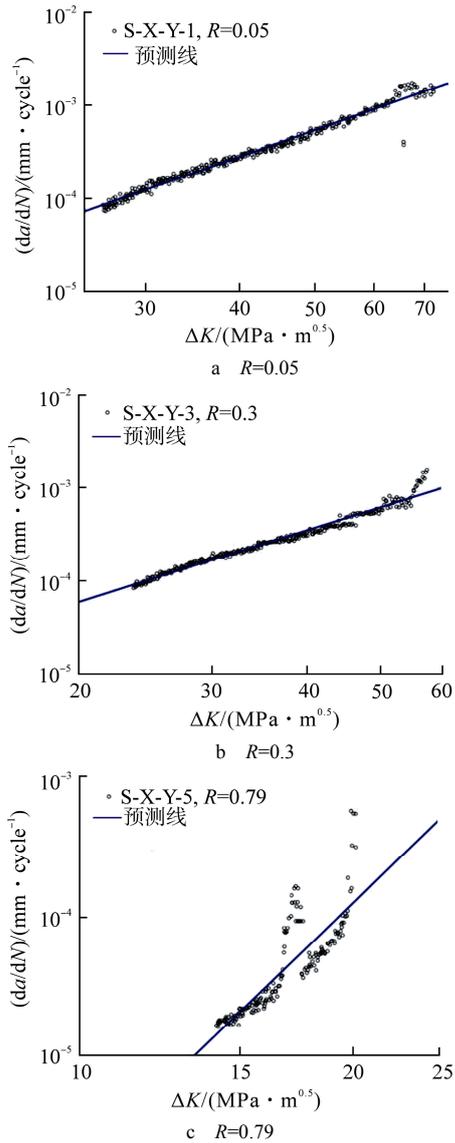


图4 X-Y方向不同载荷比的试验数据

Fig. 4 Experimental Data of Different Load Ratios in X-Y Directions

态薄膜”平面，而 X-Y 试样的开裂方向垂直于“液态薄膜”平面。结合试验扩展速率拟合结果，在载荷比相同的情况下，X-Z、Y-X、X-Y 3 个取样方向的裂纹扩展速率的拟合曲线趋于一致，如 R=0.05 下 3 个取样方向试样的拟合曲线，如图 6 所示。

2.3 载荷比对疲劳裂纹扩展速率的影响

2.2 节可以看出不同取样方向对裂纹扩展速率的影响并不大，所以针对同载荷比的 6 个试样试验结果，忽略取样方向进行数据整合，得到某特定载荷比下焊缝材料的疲劳裂纹扩展特性，进而确定其疲劳裂纹扩展速率模型。

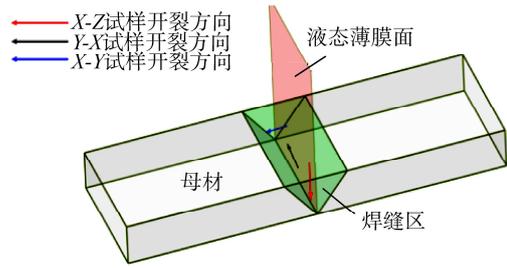


图5 试样开裂方向

Fig. 5 Cracking Direction on Sample

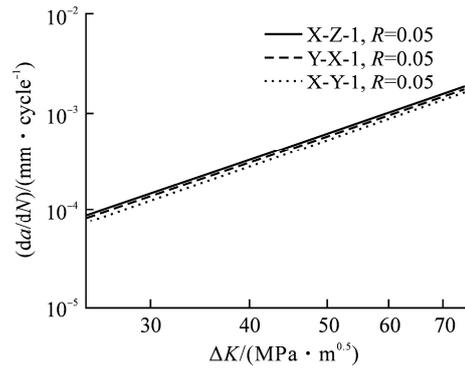


图6 R=0.05 时 3 个取样方向的试验数据拟合曲线

Fig. 6 Fitting Curve of Experimental Data with R=0.05 in Three Sampling Directions

利用式 (3) 分别对 R=0.05、0.30、0.79 下多个不同取样方向的疲劳裂纹扩展试验数据进行线性回归分析，各载荷比下的拟合曲线对比见图 7。

从图 7 可发现，在 R=0.05、0.30 时，疲劳裂纹扩展速率相差不大，但是随着载荷比的继续增

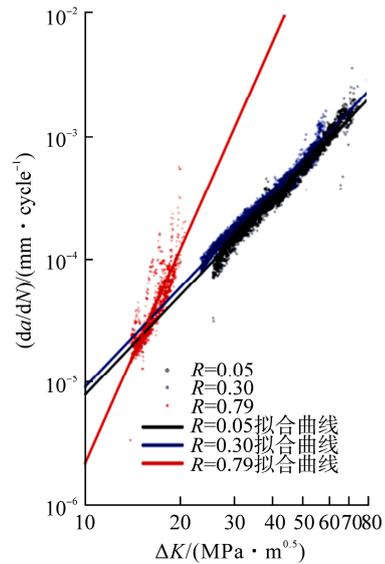


图7 不同载荷比下试样参数拟合结果对比

Fig. 7 Comparison of Fitting Results of Sample Parameters with Different Load Ratios

加, 疲劳裂纹扩展的速率也会迅速随之增加。即表明当所施加载荷在某个载荷比阈值 (R_{th}) 以下时, 疲劳裂纹扩展速率基本相同, 但是超过 R_{th} 时, 疲劳裂纹扩展速率则会迅速增长。多种不同热处理方式的材料也有这种特性, 例如欧阳辉^[9]在探究 R 对结构钢疲劳裂纹扩展速率的影响的试验中得出的结论: R 在 0.1~0.3 时, R 对 da/dN 的影响较小, 当 R 增加到 0.6 时, da/dN 对 R 的变化较为敏感, 这也从侧面论证了此次试验的准确性。

3 焊缝与母材疲劳裂纹扩展性能对比

3.1 试验材料与规范材料疲劳裂纹扩展速率比较

ASME 标准中指出, 对于缺少焊缝区材料疲劳裂纹扩展参数的, 可参考母材数据。标准中考虑到奥氏体不锈钢母材的疲劳裂纹扩展性能会受到温度、载荷比 R 和环境的影响, 给出了空气环境下奥氏体钢的材料参数 C_0 和 n 值。其中 $n=3.3$, C_0 按照式 (4) 给出:

$$C_0 = CS \quad (4)$$

式中, C 是考虑到温度影响的比例参数, 由下式给出:

$$C = 10^{[-8.714 + 1.34 \times 10^{-3} T - 3.34 \times 10^{-6} T^2 + 5.95 \times 10^{-9} T^3]} \quad (5)$$

式中, T 为金属温度, $T < 430$; S 是考虑载荷比 R 影响的比例参数, 由下式给出:

$$S = \begin{cases} 1.0 & R \leq 0 \\ 1.0 + 1.8R & 0 < R \leq 0.79 \\ 1.0 & 0.79 \leq R \leq 1.0 \end{cases} \quad (6)$$

根据 ASME 标准中所给出母材 (奥氏体钢) 的材料参数 C_0 及 n , 计算得到疲劳裂纹扩展速率曲线图并与本次试验所得到的疲劳裂纹扩展速率预测线进行比对, 得到不同载荷比下母材与焊缝的疲劳裂纹扩展速率, 见图 8。

图 8 中不同载荷比下母材与焊缝的 $da/dN-\Delta K$ 曲线会随 ΔK 的增长而相交, 在载荷比较小时如 $R=0.05$ 及 $R=0.3$, 随着 ΔK 的增长, 母材与焊缝的疲劳裂纹扩展速率差距会逐渐减小, 直至超过焊缝。而当载荷比较大时, 在某个 ΔK 值前, 焊缝裂纹扩展速率偏低, 但之后则超过母材, $R=0.79$ 时母材与焊缝扩展规律与文献[4]所得结论一致。这说明, 在对母材与焊缝的裂纹扩展速率进行比较时要考虑到载荷比 R 的影响, 同时, 从图 8 中不同载荷比下焊缝与母材的 $da/dN-\Delta K$ 曲线的

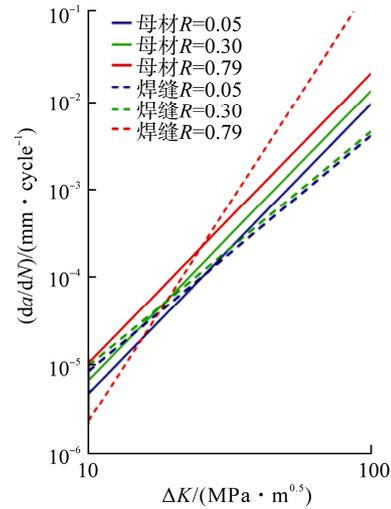


图 8 母材与焊缝的疲劳裂纹扩展速率对比
Fig. 8 Comparison of Fatigue Crack Growth Rate between Base Metal and Weld

斜率可分析出焊缝处疲劳裂纹扩展的速率会随着载荷比的变化而发生较大的变动, 而母材则保持稳定, 这与文献[10]所测得试验结果相吻合。

3.2 试验材料与规范材料的疲劳裂纹扩展寿命比较

ASME XI 《核电厂部件在役检查规则》规范对管道缺陷给出了评定流程, 同时针对含有缺陷的核级管道给出了寿命评估方法。本节利用该规范, 以含有轴向深埋缺陷 (图 9a) 以及轴向表面缺陷 (图 9b) 的管道为例, 分别利用本次试验参数以及规范中 C8410a 奥氏体母材试验参数计算不同条件下管道的疲劳裂纹扩展寿命。管道几何参数及初始裂纹参数见表 2。

根据 ASME 中规定, 结合管道运行压力, 由

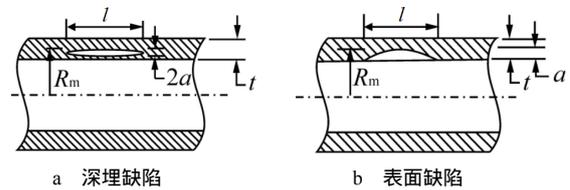


图 9 管道缺陷

Fig. 9 Pipeline Defect

R_m —管道平均半径; t —管道壁厚; a —缺陷深度; l —缺陷长度

表 2 管道参数

Tab. 2 Pipeline Parameters

管道外径/mm	管道壁厚/mm	缺陷深度/mm		椭圆比例 [a/(l/2)]
		深埋 2a	表面 a	
75	8	2	2	0.4

式(7)确定出含轴向缺陷的应力强度因子：

$$K_I = K_{Im} + K_{Ir} \quad (7)$$

$$K_{Im} = (S_{Fm}) F \sigma_h [\pi a / (1000Q)]^{0.5} \quad (8)$$

$$\sigma_h = p R_m / t \quad (9)$$

$$F = 1.12 + 0.053\alpha + 0.0055\alpha^2 + (1.0 + 0.02\alpha + 0.0191\alpha^2)(20 - R_m / t)^2 / 1400 \quad (10)$$

$$Q = 1 + 4.593(a/l)^{1.65} \quad (11)$$

$$\alpha = \left(\frac{a}{t}\right) / \left(\frac{a}{l}\right) \quad (12)$$

式中， K_I 为应力强度因子； K_{Im} 是根据薄膜应力计算出的应力强度因子； K_{Ir} 是根据缺陷部位的残余应力计算得出的应力强度因子，取残余应力为 60 MPa； S_{Fm} 为安全系数，取值如表 3 所示； F 为轴向缺陷应力强度因子参数； σ_h 为管道缺陷处环向应力； Q 为缺陷形状参数； p 为管道内压，取 10 MPa； α 为无量纲。

几何参数示意图见图 9。

表 3 薄膜应力安全系数

Tab. 3 Safety Factors of Film Stress

使用限制	薄膜应力的 S_{Fm}
A 级	2.7
B 级	2.4
C 级	1.8
D 级	1.3

在保证管道几何参数、外载荷输入及温度一致的情况下，采用 A 级使用限制计算母材及焊缝在不同载荷比下的疲劳裂纹扩展寿命。焊缝疲劳裂纹扩展寿命保守的采用试验数据 $\mu \pm 3\sigma$ 裂纹扩展拟合线(图 10)的上边界($\mu+3\sigma$)对应的材料参数 C_0 和 n 进行计算，其中 μ 是试验数据均值， σ 是标准差。

预测相对误差计算公式如下：

$$c = \left| \frac{N_m - N_w}{N_m} \right| \times 100\% \quad (13)$$

式中， c 为相对误差； N_m 为母材疲劳寿命； N_w 为焊缝疲劳寿命。

20 空气环境下母材及焊缝材料的疲劳裂纹扩展寿命对比见表 4。

从表 4 可以看出，利用本次试验得到的焊缝区域材料裂纹扩展参数所计算出的寿命普遍低于规范中奥氏体材料的寿命。主要原因有：

- (1) ASME 标准提供的裂纹扩展参数与焊缝区域材料的真实裂纹扩展参数不完全匹配。
- (2) 焊缝区材料存在各向异性，分散性也比母材大，本文使用试验数据的上边界进行保守计算，也是导致数据差异的一个重要原因。

4 结论

试验选取不锈钢在焊缝区域不同方向上的试样，进行不同载荷比下的疲劳裂纹扩展速率试验，

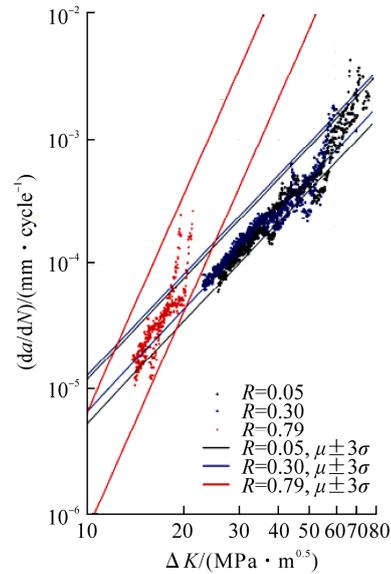


图 10 CT 试样的 $\mu \pm 3\sigma$ 裂纹扩展拟合曲线

Fig. 10 Crack Propagation Fitting Curve of CT Specimen

表 4 母材及焊缝疲劳寿命对比

Tab. 4 Comparison of Fatigue Life of Base Metal and Weld

缺陷	R	初始 $\Delta K / (MPa\sqrt{m})$	疲劳裂纹扩展寿命/cycle		误差/%
			N_m	N_w	
表面缺陷	0.05	16.5	56798	34435	39
	0.30		40201	31954	21
	0.79		25562	6521	75
深埋缺陷	0.05	11.28	109627	51973	53
	0.30		77594	48228	38
	0.79		49337	32483	34

对试验数据使用 Pairs 公式进行拟合后与 ASME 标准中的奥氏体钢疲劳裂纹扩展速率进行比较, 得到以下结论:

(1) 疲劳裂纹扩展试验数据具有一定的随机性, 且数据的分散程度随载荷比的增加而加大。

(2) 相同的载荷比下, 不同取样方向的试验数据较为一致, 且拟合出的疲劳裂纹扩展预测曲线趋于相同。

(3) 在不同载荷比下, 当载荷比低于某个特定值 R_{th} 时, 疲劳裂纹扩展速率变化不大, 但是当超过 R_{th} 时, 疲劳裂纹扩展速率将迅速增加。

(4) 较低载荷比下, 焊缝的疲劳裂纹扩展速率在某个 ΔK 值前高于母材的疲劳裂纹扩展速率, 在其之后则低于母材, 而较高载荷比下则相反。

(5) 对焊接区域材料进行寿命评估时采用 ASME 标准中所给出的母材疲劳裂纹扩展速率数据会导致结果有较大误差。所以对于一些重要部件的寿命评定, 可通过试验获取具体材料的裂纹扩展参数, 以提高评估结果的准确性。

参考文献:

[1] 兆文忠, 李向伟, 董平沙. 焊接结构抗疲劳设计理论

与方法[J]. 焊接技术, 2017, 46(08): 64.

[2] England Joint working group document recommendations for fatigue design of welded joints and components: IIW-1823-200[Z]. 2008.

[3] 由立成, 黄振仁, 成建国, 等. 12Cr1MoV 钢管焊缝材料高温疲劳裂纹扩展速率的试验研究[J]. 石油化工设备, 1995(06): 11-16.

[4] 顾玉丽, 魏振伟, 蒋睿哲. GH625 和 GH536 变形高温合金焊接的疲劳裂纹扩展速率分析[J]. 失效分析与预防, 2015, 10(05): 274-279.

[5] PARIS P C, ERDOGAN F. A critical analysis of crack propagation laws [J]. Journal of Basic Engineering, 1963, 85(4): 528- 533.

[6] 解梦莹, 安宗文, 秦浩星, 等. Q345 钢疲劳裂纹扩展 Paris 公式中参数的统计分布[J]. 机械制造, 2016(5): 23-27.

[7] ASTM. 647: Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates[Z]. Annual book of ASTM standards, 2011, 3: 591-630.

[8] 张运动. 焊接工字梁中角缝产生裂纹的原因及解决措施[J]. 焊接技术, 2002(03): 59-60.

[9] 欧阳辉, 刘俊洲, 苏小燕, 等. 应力比 R 对疲劳裂纹扩展速率的影响[J]. 固体力学学报, 1984(04): 577-584.

[10] 王智祥, 张鑫, 张继祥. 2205 双相不锈钢焊接结构疲劳裂纹扩展速率研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2011, 30(04): 880-884.

(责任编辑: 张祚豪)