

• 试验研究 •

随机变幅荷载作用下焊接节点海水腐蚀疲劳裂纹扩展试验^①

中国科学院力学研究所(100080)

徐纪林 (副研究员) 薛以年 (研究员) 李 禾 (高工)

SEAWATER CORROSION FATIGUE CRACK
GROWTH TESTS ON WELDED JOINTS
UNDER RANDOM VARIABLE AMPLITUDE LOAD

Xu Jilin Xue Yinian Li He

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

提 要 本工作采用国产海上平台用钢的 T 型和十字形板状焊接节点试件, 模拟导管架管节点的弯曲受力状态, 在随机变幅荷载下进行了海水腐蚀疲劳裂纹扩展试验, 分别测得在海水自由腐蚀和阴极保护条件下的 $(da/dN)-\Delta K_{max}$ 关系曲线。对于十字型焊接节点试件, 根据试验测得的裂纹扩展速率曲线, 用断裂力学方法对其海水腐蚀疲劳裂纹扩展寿命(有阴极保护)进行了估算, 估算得到的裂纹扩展寿命曲线与试验数据, 以及用线性累积损伤理论估算的寿命曲线, 进行了分析比较和讨论。

关键词 随机变幅荷载 焊接节点 海水腐蚀疲劳 裂纹扩展

ABSTRACT Seawater corrosion fatigue crack growth tests were carried out on T-shaped and cruciform welded joints of China-made platform steel under random variable amplitude loading to simulate the actual situation of the tubular joints of jacked-type offshore platform during its term of service. The $da/dN-\Delta K_{max}$ curves of seawater corrosion fatigue with and without cathodic protection were obtained. Based on the crack growth rate curves obtained, fracture mechanics method has been used to predict the corrosion fatigue crack propagation life of the cruciform welded joints with cathodic protection under random variable amplitude loading. The predicted crack propagation life curve has been compared with the test data and the life curve obtained by using the linear cumulative damage summation rule.

KEY WORDS Random variable amplitude loading, Welded joints, Seawater corrosion fatigue, Crack growth.

基于疲劳裂纹扩展数据的断裂力学分析方法是估算海上导管架平台管节点寿命的有效途径, 导管架平台的腐蚀疲劳裂纹通常产生在管节点热点焊趾处, 然后沿交贯线向弦管的壁厚方向扩展并穿透壁厚, 裂纹基本上在焊缝区内扩展, 所以必须对焊接节点的腐蚀疲劳裂纹扩展进行研究, 至今国外在这方面的研究和发表的试验数据还比较少^[1, 2]。我们曾模拟管节点焊趾处的弯曲受力状态, 进行了常幅荷载下国产平台钢 E36-Z25

(抗层状撕裂钢)板状焊接节点的海水腐蚀疲劳裂纹扩展试验^[3], 测得裂纹扩展速率 da/dN 和应力强度因子范围 ΔK 关系曲线, 从而可得 Paris 公式中相应的 C 和 m 值。实际上海上平台经受的波浪荷载是随机变幅循环荷载, 通常忽略结构本身的响应, 因此需要在窄带随机荷载下进行试验和分析, 以前在这方面的一些焊接节点海水腐蚀疲劳强度试验^[4, 5]和腐蚀疲劳裂纹扩展试验^[6]也都是窄带随机荷载下进行的。

① 参加本试验工作的还有石茂、王亚立、于桂清和唐驰。

本工作首先对 T 型板状焊接节点试件在四点弯曲的随机变幅荷载下进行贯穿裂纹的海水自由腐蚀疲劳裂纹扩展试验, 测得了 $\overline{da}/dN - \Delta K_{\text{ms}}$ 曲线, 并与常幅循环荷载下试验结果^[3]作了比较; 另一方面对十字型板状焊接节点试件, 进行悬臂弯曲随机变幅荷载海水腐蚀疲劳(有阴极保护)强度试验^[5]的同时, 测得了其中两个试件的 $\overline{da}/dN - \Delta K_{\text{ms}}$ 曲线, 并根据此试验结果采用断裂力学方法估算了疲劳裂纹扩展寿命, 估算结果的裂纹扩展寿命曲线, 与试验数据以及用线性累积损伤理论得到的寿命曲线^[5]进行了比较。

1 试验

试件材料系采用国产海上平台钢 E36-Z35, 该种钢板具有抗层状撕裂性能(化学成分和机械性能见文献[5])。试件类型有两种, 一种是 T 型板状焊接节点试件, 承受四点弯曲荷载, 板厚 32mm(见图 1(a)), 在肋板

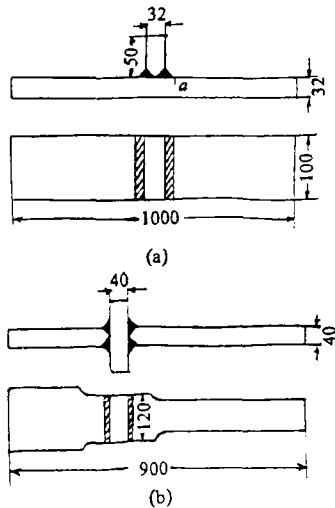


图 1 试件尺寸

(a)—T型节点; (b)—十字型节点

一侧主板上距焊趾约 1mm 处, 用电火花线切割制作深度为 1mm 的贯穿裂纹 a, 再以弯曲

循环加载预制裂纹; 一种是未预制裂纹的十字型板状焊接节点试件, 承受悬臂弯曲荷载, 板厚 40mm(图 1(b))。这两种试件都是以手工电弧焊焊接而成, 焊后未作任何处理。

试验采用人工配制的海水(按 ASTM, D1141-75 配方)循环流动, 平均流速约为 1L/min, 水温为 $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, 海水成分和参数范围见文献[3]。T 型焊接节点试件的四点弯曲试验是在海水自由腐蚀条件下进行的, 试件在海水中的负电位约为 -650mV , SCE。十字型焊接节点试件的悬臂弯曲试验是在阴极保护条件下进行的, 试件在海水中的负电位为 $-850\text{mV} \pm 30\text{mV}$, SCE, 采用恒电位仪以外加电流方法对试件进行阴极保护, 试件焊缝周围缠绕铂丝作为阳极。

波浪作用的循环荷载基本上是窄带随机过程, 从短期看, 过程是平衡的, 荷载峰值分布接近于瑞利(Ryleigh)分布; 从长期看, 过程是非平衡的, 但峰值应力的长期分布可以方便地由几个不同幅值水平的瑞利分布来组成, 而瑞利分布的随机变幅加载在试验室中是比较容易实现的。

T 型焊接节点试件四点弯曲试验采用峰值分布为瑞利分布的随机变幅荷载, 加载频率为 0.2Hz, 接近海浪频率。瑞利分布的概率分布函数为

$$P\left(\frac{S}{\sigma}\right) = \exp\left(-\frac{S^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

式中 S 为应力峰值, 由公式(1)可得到

$$S = \left\{2\sigma^2 \ln \frac{1}{P}\right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

公式(2)即为应力峰值 S 的瑞利分布函数表达式, P 是在 0 和 1 之间的均匀分布随机数。

十字型焊接节点试件悬臂弯曲试验采用 C/12/20 随机变幅荷载谱^[7], 谱块长度为 10^[5], 在加载频率 0.2Hz 情况下, 进行一个谱块的试验时间接近 6 个昼夜, 然后继续重复进行第二、第三、... 个谱块加载。

C/12/20 谱由 6 个瑞利分布组成, 如图 2 所示, 其中有 4 个不同的应力均方根幅值水平: $0.347\sigma_{LT}$ 、 $0.799\sigma_{LT}$ 、 $1.366\sigma_{LT}$ 、 $1.960\sigma_{LT}$ 。 σ_{LT} 为 C/12/20 谱的长期(long term)均方根应力幅值。这 6 个瑞利分布次序排法, 是反映气候温和、恶劣及暴风雨的海况。

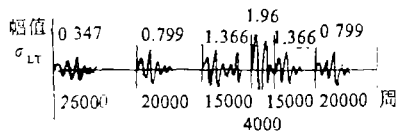


图 2 由 6 段不同的 σ_{LT} 瑞利分布组成的 C/12/20 应力谱

本试验用 IBM-PC-XT 微机产生加载谱信号, 由试验系统的电液伺服机构控制作动筒加载动作, 同时进行数据采集及处理, 详细情况参见文献[5]。

要测定焊接节点焊趾处的疲劳裂纹扩展速率, 关键在于测量疲劳裂纹扩展的深度。通常采用的刻痕法难免影响实际的裂纹扩展过程, 尤其在随机变幅加载情况下, 刻痕荷载会成为加载过程中的一部分; 此外海水腐蚀环境使刻痕锈蚀比较模糊不易辨认。本试验采用了英国制 U_2 裂纹探测仪测量裂纹深度, 该仪器实际上是应用交流电位法, 试验前我们对该仪器精度进行过检定^[8], 它与刻痕读测值作比较, 两者相对误差一般小于 10%。

2 试验结果

T 型焊接节点共进行了两个试件的四点弯曲加载试验, 在试件肋板一侧焊趾处有预制的贯穿疲劳裂纹, 初始裂纹深度为 5.9mm 和 2.8mm, 沿裂纹等间距分布有 8 个裂纹深度测量点, 每个测量点点焊一对跨裂纹的导线作为测量探头, 由 U_2 裂纹探测仪进行测量, 裂纹深度测量值取这 8 个测点的平均值, 测量深度达到 15mm 左右。测量结果表明, 裂纹基本上均匀向深度方向扩展, 裂纹前缘接近

于直线。T 型节点试件承受瑞利分布的随机变幅弯曲荷载的平均应力不为零, 该平均应力使得在最大峰值情况下的最小应力接近于零, 即应力保持不过零。本试验用的 50kN 作动筒, 试验中每加载 2000 次测量一次裂纹深度, 由此得到裂纹扩展平均速度 \overline{da}/dN , 同时取两个相邻的裂纹深度值的平均值 \bar{a} 来计算应力强度因子 K 。按照 Paris 公式关系

$$\overline{da}/dN = C(\Delta K_{rms})^m \quad (3)$$

式中, ΔK_{rms} ——应力强度因子范围的均方根值, $\Delta K_{rms} = (K_{max} - K_{min})/rms$ 。由试验得到的 \overline{da}/dN 和 ΔK_{rms} , 在对数坐标系中经线性回归分析可得出 $m = 3.578$, $C = 8.241 \times 10^{-13}$, 可写成

$$\overline{da}/dN = 8.241 \times 10^{-13} (\Delta K_{rms})^{3.578} \quad (4)$$

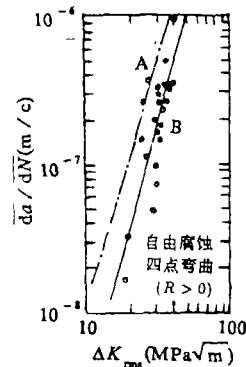


图 3 T 型节点试验结果
A—常幅^[3]; B—随机变幅;

式中, 量纲 \overline{da}/dN 以 m/循环次计, ΔK_{rms} 是 $MPa\sqrt{m}$ 。图 3 是本试验结果, 还示出了与常幅循环荷载下试验结果^[3]的比较。可以看到, 在海水自由腐蚀条件下, 随机变幅加载的裂纹扩展速率比常幅循环加载的裂纹扩展速率要低。

十字型节点悬臂弯曲试件是在随机变

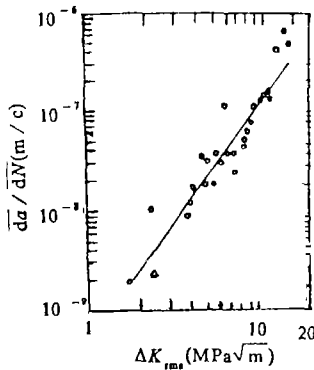


图4 十字型节点试验结果

(阴极保护-850mv.SCE, 悬臂弯曲试件, 随机变幅, $R=-1$)

幅荷载下进行海水腐蚀疲劳试验^[5], 其中两个试件进行了裂纹扩展速率的测定。试验结果表明腐蚀疲劳裂纹都产生在近夹持端的焊趾处, 然后扩展破断。因此在试件上下两面的焊趾处, 沿焊趾等间距分布了7个裂纹深度测量点, 每个测量点点焊一对跨焊趾的导线作为测量探头, 由 U_g 裂纹探测仪进行测量(这里未预制裂纹), 测量深度达板厚一半左右。十字型节点试件承受的是 $C/12/20$ 谱随机变幅弯曲疲劳荷载^[5], 平均荷载为零(即应力比 $R=-1$)。本试验是20kN作动筒加载的, 应力截断水平为 $S_{max}/\sigma_{LT}=4.2$, 此水平并不影响试验结果^[4]。把7个测量点裂纹深度测量值连结, 可以描绘出裂纹扩展过程中裂纹前缘形状, 而裂纹源在焊趾处多处产生, 在扩展过程中合并扩展, 所以表面裂纹扩展的长度与深度比相当大。

分析试验结果, 可将7个测量点中的最大值作为裂纹深度值 a 。本试件的表面裂纹应力强度因子的计算近似采用 ASTM E740-80 规范中 Newman Raju 的计算公式, 这样便可得到 $\overline{da}/dN - \Delta K(a)_{rms}$ 的试验数据。 $\Delta K(a)_{rms}$ 为表面裂纹深度方向的应力强

度因子均方根幅值, 这是由于 $R=-1$, 一般认为在 $a > 1.5\text{mm}$ 后焊接残余应力已基本消失^[6], 因此循环荷载的负荷载对裂纹扩展不作贡献; 本试验除个别试验点外, 绝大部分试验点为 $a > 1.5\text{mm}$ 。在对数坐标系中经线性回归分析计算得到的公式(3)中的参数值 $m=2.421$, $C=4.964 \times 10^{10}$, 可写成

$$\overline{da}/dN = 4.964 \times 10^{10} (\Delta K(a)_{rms})^{2.421} \quad (5)$$

式中, \overline{da}/dN 以 $\text{m}/\text{循环次}$ 计, $\Delta K(a)_{rms}$ 为 $\text{MPa}(\sqrt{\text{m}})$ 。图4给出了本试验结果。由于此十字焊接节点试件焊趾处产生多个裂纹源, 在扩展中有合并过程, 所以难以确定表面裂纹长度的扩展速率。

3 寿命估算

对十字型焊接节点试件在 $C/12/20$ 谱随机变幅荷载作用下进行海水腐蚀寿命估算时, 利用裂纹扩展速率公式(5), 通过数值积分就可以得到裂纹扩展寿命, 这里初始裂纹 a_0 的确定系采用半经验公式^[9]

$$a_0 = 0.1878\sqrt{t}/a\sigma_t \quad (6)$$

式中, t 为板厚(原量纲单位 in), σ_t 为材料拉伸强度(原量纲单位 KSI), a 为反映焊接节点类型和加载形式的系数。本试验 a 应取 0.19, 由公式(6)并经标准计量单位换算, 可得到 $a_0 = 0.396\text{mm}$ 。这里的表面裂纹长度值 C 取经验公式(7)计算^[10]

$$C = a \exp(ka) \quad (7)$$

式中, $k = 0.2 \left(\frac{\Delta S_{rms}}{116} \right) \left(\frac{t}{26} \right)^{\frac{1}{2}}$, ΔS_{rms} 为长期均方根应力过程范围(量纲为 MPa), t 为 40mm。

在计算中当 a 达到厚度一半时认为破断, 即 $a_f > 20\text{mm}$ 确定裂纹扩展寿命 N_p 。表面裂纹应力强度因子仍采用 Newman Raju 近似公式进行计算, 但当 $a < 1.5\text{mm}$ 时, 由于拉伸

残余应力的影响, 应考虑荷载的负荷载贡献来计算 $\Delta K(a)_{rms}$; 当 $a > 1.5\text{mm}$ 时, 则不计负荷载贡献来计算 $\Delta K(a)_{rms}$, 即前者为范围, 后者为幅值, 两者相差一倍。

由公式(5)经过数值积分得到的裂纹扩展寿命曲线 $\Delta S_{rms}-N_f$ 见图 5。图 5 中还给出

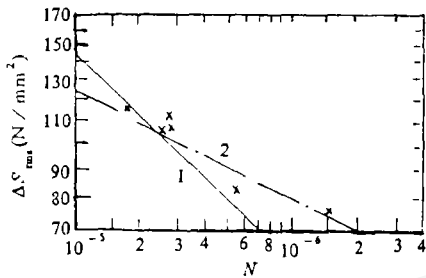


图 5 裂纹扩展寿命曲线

1—断裂力学方法估算; 2—总寿命曲线(线性累积损伤估算)⁽⁵⁾;
x—总寿命试验数据⁽⁵⁾

了随机变幅荷载 $C/12/20$ 谱下的海水腐蚀疲劳寿命试验数据及线性累积损伤法则估算的寿命曲线⁽⁵⁾。可以看到, 随着随机变幅加载的应力水平降低, 海水腐蚀疲劳寿命试验值和线性累积损伤寿命估算值, 比用断裂力学方法估算的裂纹扩展寿命越来越大, 这是由于在低应力水平长寿命范围, 裂纹起始寿命占总寿命比重较大; 在应力水平较高, 寿命较短的情况下, 裂纹起始寿命不占多少比重, 甚至可忽略不计。

4 结论

T 型焊接节点试件在峰值为瑞利分布随机变幅荷载下, 海水自由腐蚀疲劳裂纹扩展速率 ($R > 0$) 的 Paris 公式为: $\overline{da}/dN = 8.241 \times 10^{-13} (\Delta K_{rms})^{3.578}$; 此裂纹扩展速率比常幅循环荷载下的海水自由腐蚀疲劳裂纹扩展速率低。十字型焊接节点试件在 $C/12/20$ 谱随机变幅荷载下, 有阴极保护 (-850mV.SCE) 的海水腐蚀疲劳裂纹扩

展速率 ($R = -1$) 的 Paris 公式为: $\overline{da}/dN = 4.964 \times 10^{-10} (\Delta K(a)_{rms})^{2.421}$ 。

用断裂力学方法对十字型焊接节点的海水腐蚀疲劳(有阴极保护)裂纹扩展寿命估算结果, 与试验结果以及用累积损伤法则估算寿命的结果比较表明: 在低应力水平长寿命范围, 裂纹起始寿命占总寿命的比重较大; 在较高应力水平较短寿命的情况下, 裂纹起始寿命占总寿命比重较小, 可忽略不计。

参考文献

- [1] H.G.Scholte, H.Wildschut, Fatigue Crack propagation tests on welded specimens in air and seawater, Int.Conf. steel in Marine Structures, Paris, France, 1981 Paper 5.2
- [2] J.J.W.Nibbering, B.C.Buisman, H.Wildschut, E.Van Rietbergen, Corrosion fatigue strength on T-type welded connections of thick plates for high number of load cycles, Steel in Marine Structures (SIMS '87), Delft, The Netherlands, 1987. TS 43
- [3] 徐纪林, 薛以年, 李禾, 焊接接头热影响区的海水腐蚀疲劳裂纹扩展速率, 实验力学, 5 卷, 4 期, 396—402 页, 1990 年 12 月
- [4] R.Holmes and G.S.Booth, Fatigue and corrosion fatigue of welded joints under narrow band random loading, Int. Conf. Steel in Marine Structures, Paris, France, 1981. Paper 7.2
- [5] 薛以年, 徐纪林, 李延莘, 李禾, 随机变幅荷载下焊接接头的海水腐蚀疲劳研究, 海洋工程, 10 卷, 2 期, 16—22 页, 1992 年 5 月
- [6] L.P.Pook, Fatigue crack growth in unstress-relieved welded joints under non-stationary narrowband random loading, Proc. of ICF Int.Sym. on Fracture Mechanics, Beijing, China 1983. P. 784
- [7] L.P.Pook, An approach to practical load histories for fatigue testing relevant to offshore structures, J.Soc. Environ. Engrs 1978'17-1(76)
- [8] 徐纪林, 李禾, 薛以年, 表面裂纹扩展速率的测定—用交流电位法测量裂纹深度, 理化检验—物理分册, 28 卷 3 期, 37—40 页, 1992 年 6 月
- [9] F.V.Lawrence, N.J.Ho, P.K.Mazumder, Predicting the fatigue resistance of welds, Ann Rev. Mater. Sci. Vol.11, 1981. P.401
- [10] R.Bell, O.Vosikovsky 'D.J.Burns, U.H.Mohaupt' Fracture mechanics model for life prediction of welded plate joints, Steel in Marine Structures (SIMS '87), Delft, The Netherlands, 1987, TS53