

焊接接头热影响区的海水腐蚀 疲劳裂纹扩展速率*

薛以年 徐纪林 李 禾

(中国科学院力学研究所)

摘要 本文采用 T 型板状焊接接头试件承受弯曲循环载荷进行空气中和海水自由腐蚀条件下的疲劳裂纹扩展试验 (海水中试验条件为 $R=0-0.1$, 加载频率 0.2Hz, 海水温度 $20^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$), 得到了海上平台钢 E36-Z35 焊接接头热影响区在空气中和海水中裂纹扩展速率 $da/dN\sim\Delta K$ 曲线和 Paris 公式中相应的 C 和 m 值, 并进行了讨论。

应用本文得到的试验数据, 用断裂力学方法对板状焊接接头在空气中和海水中自由腐蚀条件下的疲劳裂纹扩展寿命进行了估算, 结果表明, 在适当考虑裂纹起始寿命的情况下, 用断裂力学方法估算的疲劳裂纹扩展寿命与试验结果相当符合。文中还讨论了初始裂纹尺寸的选取对估算裂纹扩展寿命的影响。

关键词 焊接接头, 海水腐蚀疲劳, 疲劳裂纹扩展速率。

1 前言

导管架海上平台在海水腐蚀与海浪载荷的共同作用下, 主要的强度破坏形式是从管节点焊缝热点处产生腐蚀疲劳裂纹而导致断裂。由于导管架是大型焊接结构, 裂纹扩展寿命占总寿命的大部分, 因此基于疲劳裂纹扩展数据的断裂力学分析方法是估算导管架海上平台管节点疲劳寿命的有效途径, 近年来国内外在这方面的研究工作进展很快。过去许多工作大都是研究各种钢材的海水腐蚀疲劳裂纹扩展, 实际上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发展并穿透壁厚, 裂纹基本上在焊缝热影响区内扩展, 所以对焊接接头热影响区的腐蚀疲劳裂纹扩展进行研究是十分必要的, 至今这方面的研究和发表的试验数据还比较少^[1, 2]。

海水腐蚀疲劳裂纹扩展规律是受加载频率和海水温度等因素影响的, 频率越低扩展速率越快, 温度越高也增加扩展速率^[3, 4], 所以海水腐蚀疲劳裂纹扩展试验必须模拟海浪载荷的低频率循环加载, 并在一定的海水温度下进行。本工作采用 T 型板状焊接接头试件以模拟管

1989年8月20日收。

* 本项目得到国家自然科学基金资助。

节点热点焊趾处的弯曲受力状态, 并满足低频率循环加载和恒定温度的海水环境等试验要求。为了与空气中的裂纹扩展速率作比较, 本工作先进行空气中的裂纹扩展试验, 再进行在海水中自由腐蚀的裂纹扩展试验, 测得了它们的裂纹扩展速率。应用测得的试验数据, 本文用断裂力学方法估算了板状焊接接头在空气中和海水自由腐蚀条件下的疲劳裂纹扩展寿命, 并与它们相应的疲劳寿命试验结果^[5, 6]进行了比较。

2 试件

本试验的试件材料是海上平台抗Z向撕裂钢E36-Z35, 其化学成份和机械性能见表1和表2。

表1 E36-Z35钢板的化学成份

C	S	Si	Mn	P	Cu	Nb	Al
0.16	0.0012	0.33	1.35	0.009	0.04	0.027	0.04

表2 E36-Z35钢板的机械性能

$\sigma_s(\text{Nmm}^{-2})$	$\sigma_b(\text{Nmm}^{-2})$	$\delta_5(\%)$	$\psi(\%)$	$C_v-40^\circ\text{C}$ ($\text{kg}\cdot\text{m}$)	$C_v-40^\circ\text{C}$ 时效 ($\text{kg}\cdot\text{m}$)
403	548	33	72	19.4	10.3

试件是T型板状焊接接头, 长度方向是轧制方向, 板厚为32mm, 几何形状见图1。以手工电弧焊焊接而成, 焊后未作任何处理(as-welded)。在试件肋板的某一侧主板上距焊趾约1mm左右处, 用电火花线切割制作深度为1mm的裂纹 a , 再以弯曲循环加载预制疲劳裂纹, 在预制裂纹过程中逐步降低载荷, 以保证最后的载荷明显低于试验载荷。

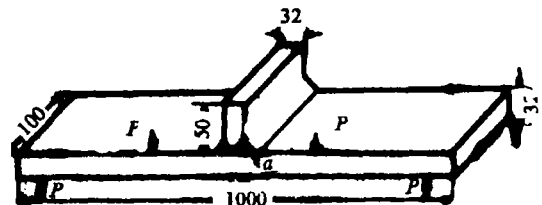


图1 试件的几何形状

3 试验条件

本试验是在专门建立的海水腐蚀疲劳试验装置上进行的, 由电液伺服机构控制的作动筒加载; 加载形式是四点弯曲常幅循环载荷, 应力比 $R=0\sim 0.1$ 。在空气中试验的循环载荷频率为1Hz; 在海水中试验的频率为0.2Hz。本试验采用人工配制的海水(按ASTM, D1141-75配方)循环流过包围试件焊缝的塑料海水槽, 使焊缝附近周围不断有海水流过, 平均流速为1升/分, 海水温度控制在 $20^\circ\text{C}\pm 1^\circ\text{C}$, 海水成份和参数范围见表3和表4。

表3 海水成份(g/litre)[按ASTM, D1141-75配制]

NaCl	MgCl ₂	Na ₂ SO ₄	CaCl ₂	KCl	NaHCO ₃	KBr	H ₂ BO ₃	SrCl ₂	NaF
24.53	5.20	4.09	1.16	0.695	0.201	0.101	0.027	0.025	0.003

表4 海水参数范围

PH值	盐度(g/litre)	氧度(g/litre)	含氧量	温度 $^\circ\text{C}$
7.5-8.5	32-36	18-20	92-99%饱和 (11-12mg/litre)	19-21

4 裂纹深度的测量

要测定焊接接头的疲劳裂纹扩展速率, 必须测量疲劳裂纹扩展的深度, 如果用读数显微镜目测只能从试件侧面量测裂纹深度, 中间部分测量不到, 况且在海水中不易进行读测; 而通常采用的刻痕法又势必影响真实的裂纹扩展过程, 尤其经过海水腐蚀的刻痕已模糊不清, 很难辨认。本试验采用英国产 U₈ 裂纹探测仪来测量裂纹深度, 该仪器实际上是利用交流电位法, 它利用仪器本身产生的高频交流电(2A, 频率 6000Hz)的趋肤效应来加强被测物体表面电流强度, 使电位测量具有较高的精度和灵敏度, 我们对该仪器的精度进行了检定^[7], 将该仪器的测量值与刻痕法的读测数作比较, 结果表明两者相对误差一般小于 10%。为了减少测量系统带来的误差, 我们将输入电流线锡焊固定在试件的两端, 信号测量探头点焊在试件上, 沿试件宽度取三个测量点的平均值作为裂纹深度值。

5 试验结果与分析

在空气中进行裂纹扩展速率的测定试验共有五个试件, 测得的裂纹深度范围是 2.3mm~19mm; 在海水中的测定试验共有五个试件, 测得的裂纹深度范围是 1.7mm~16mm。我们将测得的裂纹深度 a 和循环加载次数 N 采用七点递增多项式拟合合成 $a \sim N$ 曲线, 并计算得到裂纹扩展速率 da/dN , 并以与 da/dN 值对应的裂纹深度 a 来计算应力强度因子幅值 ΔK , 这里应力强度因子 K 的计算按照纯弯公式

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \sqrt{\frac{2t}{\pi a} \operatorname{tg} \frac{\pi a}{2t}} \frac{0.923 + 0.199 \left(1 - \sin \frac{\pi a}{2t}\right)^4}{\cos \frac{\pi a}{2t}} \quad (1)$$

对于浅裂纹情形需要考虑焊缝形状对应力强度因子的修正^[8], $K_I = M_k K'_I$, 其中 M_k 为焊缝放大因子。

通常裂纹扩展速率与应力强度因子幅值之间的关系遵从 Paris 公式

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (2)$$

由试验结果经回归分析计算确定参数 C 和 m 。式中 da/dN 以米/循环次(m/c)计, ΔK 的量纲单位是 $\text{MPa}\sqrt{\text{M}}$, 于是得到在空气中 $C = 4.76 \times 10^{-12}$, $m = 3.15$; 在海水自由腐蚀条件下 $C = 7.06 \times 10^{-12}$, $m = 3.23$, ΔK 的范围为 $10 \text{MPa}\sqrt{\text{M}} < \Delta K < 50 \text{MPa}\sqrt{\text{M}}$, 可写成下式:

$$\text{在空气中} \quad \frac{da}{dN} = 4.76 \times 10^{-12} (\Delta K)^{3.15} \quad (3)$$

$$\text{在海水中} \quad \frac{da}{dN} = 7.06 \times 10^{-12} (\Delta K)^{3.23} \quad (4)$$

图 2 和图 3 中分别给出空气中和海水中 T 型板状焊接接头热影响区的裂纹扩展速率测定的试验结果。结果表明, 海水中裂纹扩展速率是空气中的两倍左右, 而且空气中与海水中的裂纹扩展速率曲线接近平行。从试验点分布来看, 海水腐蚀对裂纹扩展速率的影响在试验范围内是变化的, 海水腐蚀的影响随裂纹扩展先是逐渐增大, 然后又逐渐减小, 这于文献[1]中的结果是

一致的。文献[1]给出的碳锰钢板（机械性能与 E36-Z35 相近）母材在空气中的裂纹扩展速率曲线为 $da/dN = 6.1 \times 10^{-12}(\Delta K)^{3.0}$ ，与本文空气中焊接接头热影响区的试验结果比较见图 4，可以看出，焊接热影响区的裂纹扩展速率比母材稍快一些，但差别不太大。

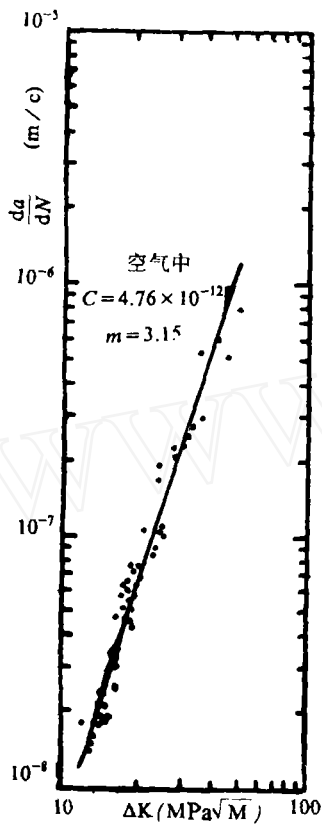


图 2

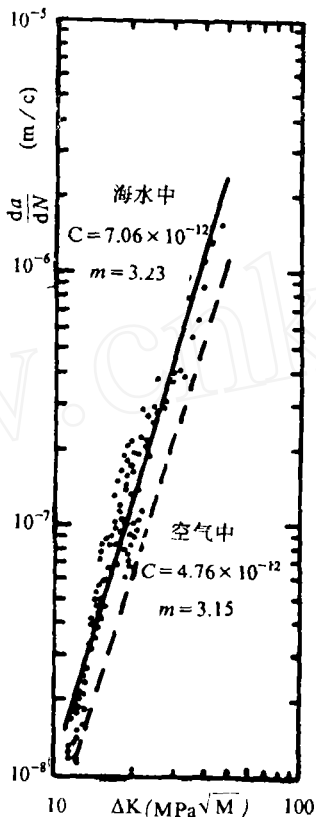


图 3

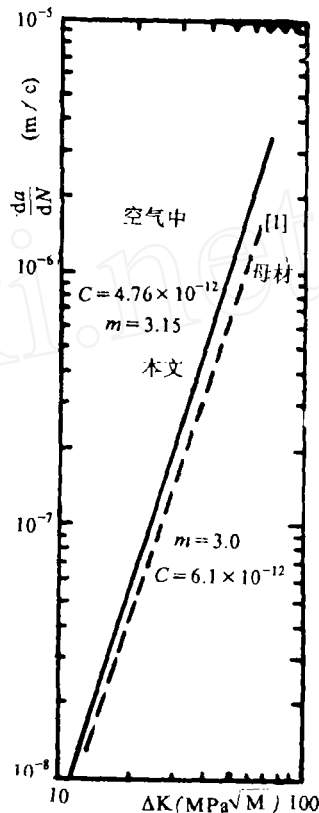


图 4

6 在海水腐蚀疲劳寿命估算中的应用

如前所述，焊接结构的疲劳寿命中裂纹起始寿命占总寿命的一小部分，大部分是裂纹扩展寿命，尤其对于导管架平台管节点的起始寿命只占不到总寿命的 20%，因此用断裂力学方法估算其疲劳寿命是有效可靠的。本文测定了板状焊接接头试件在空气中和海水中自由腐蚀条件下的裂纹扩展速率，对用断裂力学方法估算管节点的疲劳寿命提供了基本试验数据。这里用本文的试验数据对板状焊接接头在空气中和海水自由腐蚀条件下的裂纹扩展寿命进行了估算，并与它们的试验结果^[5,6]进行比较。

由 Paris 公式(2)经数值积分得到疲劳裂纹扩展寿命

$$N = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{C \Delta K^m} \quad (5)$$

其中在空气中和海水中的 C 和 m 值分别由式(3)和式(4)中给出； ΔK 应力强度因子的表达式由式(1)确定，对于非很浅的裂纹情形无需考虑焊缝形状影响的修正； a_f 取试件厚度的一半，计算表明，超过厚度一半以后的裂纹扩展寿命很短，可以忽略不计；关于 a_i 的选取在

下面讨论。

初始裂纹尺寸 a_i 一般取 0.1mm-0.5mm^[9]，它的选取对裂纹扩展寿命影响是显著的，经过计算，由图 5 给出了海水自由腐蚀条件下板厚为 40mm 焊接接头的不同初始裂纹值 a_i 与疲劳裂纹扩展寿命的关系。通常认为初始裂纹尺寸 a_i 与焊接接头的类型、加载形式、厚度及缺陷大小有关，而且还受拉伸强度的影响，文献[10]建议了一个确定初始裂纹尺寸的半经验公式

$$a_i = 0.1878\sqrt{t} / \alpha\sigma_b \quad (6)$$

其中 t 为板厚 (量纲单位 in)， σ_b 为材料拉伸强度 (量纲单位 ksi)， α 为反映焊接接头类型和加载形式的系数，对于本文试件和加载形式应取 $\alpha=0.19$ 。由公式(6)确定的四种板厚 40mm，32mm，25mm 和 16mm 的初始裂纹尺寸分别为 0.396mm，0.355mm，0.313mm 和 0.251mm。

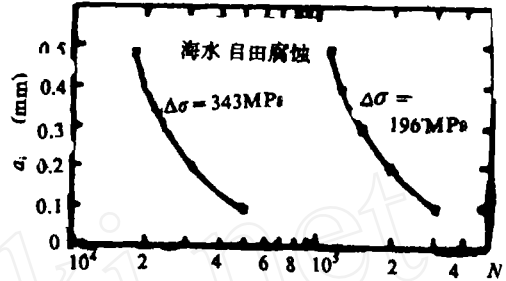


图 5

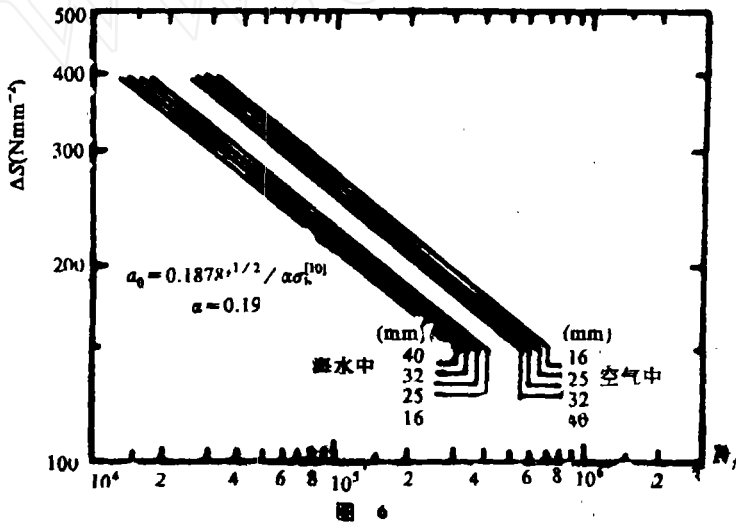


图 6

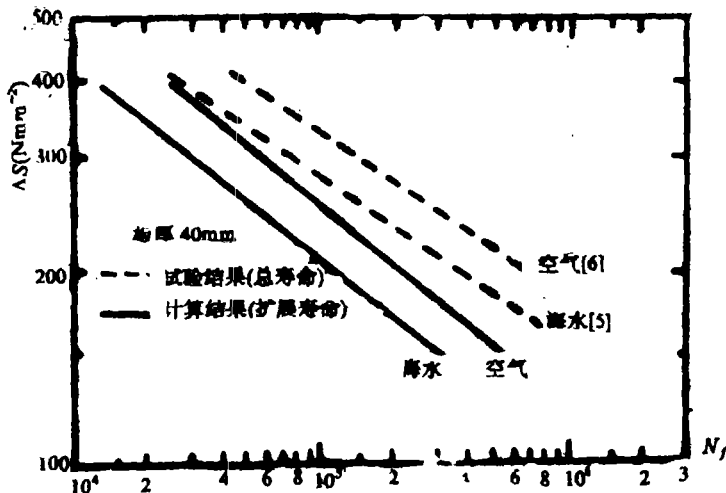


图 7

由公式(5)经过数值积分计算得到了不同板厚焊接接头在空气中和海水中的疲劳裂纹扩展寿命 $S-N$ 曲线, 见图 6。结果表明, 海水自由腐蚀条件下的疲劳裂纹扩展寿命为空气中的一半左右。图 7 给出了板厚为 40mm 焊接接头试件在空气中和海水中疲劳裂纹扩展寿命计算结果与试验结果^[5,6] (总寿命) 的比较。可以看出, 裂纹扩展寿命的计算结果约为总寿命试验结果的 1/2, 而试验结果^[6]表明板状焊接接头的裂纹起始寿命一般占总寿命一半左右, 因此用断裂力学方法估算的疲劳裂纹扩展寿命与试验结果是相当符合的。关于焊接接头疲劳裂纹起始寿命的确定和与之相关联的初始裂纹尺寸的选取至今没有满意地解决, 裂纹起始寿命包括微裂纹生成, 短裂纹扩展和多个裂纹的合并这段过程的寿命。开展这方面的深入研究是十分必要的。然而由于导管架管节点的起始寿命占总寿命比重很小, 所以如果只考虑其裂纹扩展寿命, 在工程实际应用上已达到要求。

7 结论

本文通过 T 型板状焊接接头试件的疲劳裂纹扩展试验, 得到了海上平台钢 E36-Z35 焊接接头热影响区在空气中和海水自由腐蚀条件下受弯曲循环载荷的裂纹扩展速率与应力强度因子幅值关系 (Paris 公式):

$$\frac{da}{dN} = 4.76 \times 10^{-12} (\Delta K)^{3.15} \quad (\text{空气中})$$

$$\frac{da}{dN} = 7.06 \times 10^{-12} (\Delta K)^{3.23} \quad (\text{海水中})$$

海水自由腐蚀疲劳裂纹扩展速率为空气中的两倍左右。与机械性能相近的钢板母材裂纹扩展速率比较看出, 焊接接头热影响区在空气中的裂纹扩展速率比母材稍快一些, 但差别不太大。

应用本文得到的数据, 用断裂力学方法对板状焊接接头在空气中和海水自由腐蚀条件下的疲劳裂纹扩展寿命进行估算的结果表明, 在适当考虑裂纹起始寿命的情况下, 用断裂力学方法估算的疲劳裂纹寿命扩展与试验结果是相当符合的。由于导管架管节点的起始寿命占总寿命比重很小, 因此用断裂力学方法估算其疲劳寿命是有效可靠的。本文通过计算指出, 初始裂纹尺寸的选取对裂纹扩展寿命估算的影响是显著的, 而且与裂纹起始寿命相关联, 关于确定裂纹起始寿命的方法至今尚未获得满意的解决。

本试验的试件是由海上平台管节点研究委员会提供的, 并给予相当大部分的经费资助, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Scholte, H. G., Wildschut, H., Fatigue crack propagation tests on welded specimens in air and sea water. Int. Conf. Steel in Marine Structures, Paris, France, 1981, paper 5.2.
- [2] Nibbering, J.J.W., Buisman, B.C., Wildschut, H., Van Rietbergen, E., Corrosion fatigue strength of T-type welded connections of thick plates for high number of load cycles, Steel in Marine Structures (SIMS'87), Delft, The Netherlands, 1987. TS43.

- [3] Scott, P.M., The effects of seawater on corrosion fatigue in structural steels. Proc.USSR-UK Corrosion Fatigue Seminar, 1980.
- [4] Morgan, H. G., Thorpe, T.W., Rance, A., Sylvester, D.R.V., Scott, P.M., An investigation of the corrosion fatigue crack growth behaviour of structural steel in seawater, Int. Conf. Steel in Marine Structures, Paris, France, 1988, paper.5.1.
- [5] 薛以年等. 国产海上平台钢焊接接头的海水腐蚀疲劳性能, 中国科学院力学研究所研究报告, 1989.
- [6] 薛以年等. 国产海上平台钢焊接接头在空气中的疲劳性能, 中国科学院力学研究所研究报告, 1989.
- [7] 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, 第三届全国疲劳学术会议论文集 (金属学会), 天津, 1989年.
- [8] 徐纪林, 薛以年, T型焊接接头应力强度因子及焊缝形状对应力集中的影响, 第五届全国近海工程学术会议论文集, 天津, 1989年.
- [9] Burns, D. J., Lambert, S. B., Mohaupt, U. H., Crack growth behaviour and fracture mechanics approach. Steel in Marine Structures (SIMS'87), Delft, The Netherlands, 1987.PS6.
- [10] Lawrence, F. V., Ho, N. J., Mazumder, P. K., Predicting the fatigue resistance of welds, *Ann. Rev. Mater. Sci.*, 11 (1981), P.401.

Seawater Corrosion Fatigue Crack Growth Rate in Heat Zone at Welded Joints

Xue Yinian Xu Jilin Li He

(*Institute of Mechanics, Academia Sinica*)

Abstract Fatigue crack growth tests were carried out on T-type welded joints under four-point bending in air and seawater. The tests in seawater were conducted at stress ratio $0 \sim 0.1$, loading frequency 0.2Hz and seawater temperature $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$. The $(da/dN) \sim \Delta K$ curves in the heat affected zone at welded joints made of platform steel E36-Z35 as well as the constants C and m in Paris relation in air and seawater were obtained.

From the test date, fatigue crack propagation lives of welded joints in air and seawater were predicted according to fracture mechanics approach. Considering an appropriate crack initiation life, these life predictions agree fairly well with test results. The influence of initial crack size on life prediction were also discussed in this paper.

Key words welded joints, seawater corrosion fatigue, fatigue crack growth rate.