

# 980 钢焊接接头在谱载荷作用下的疲劳裂纹扩展\*

上海交通大学船舶与海洋工程学院 黄小平 崔维成  
哈尔滨工程大学船舶学院 石德新

**摘 要** :对 980 钢焊接接头在谱载荷作用下的疲劳裂纹扩展行为进行了初步研究。用 980 钢焊接接头制成两种标准 CT 试件 ,裂纹分别开在焊缝金属上和焊趾处平行于焊缝方向 ,在两种谱载荷下进行了疲劳裂纹扩展试验。采用 Wheeler 模型进行谱载荷作用下裂纹扩展分析 ,得到焊缝金属的载荷延滞效应明显 ,而焊趾处金属的载荷延滞效应不明显的初步结论。

**关键词** :980 钢 ;焊接接头 ;谱载荷 ;疲劳裂纹扩展

中图分类号 :O346.2 ;TG115.57 文献标识码 :A 文章编号 :1001 - 4837(2002)07 - 0004 - 04

## Fatigue Crack Propagation of Steel 980 Welded Joint under Spectrum Load

School of Naval Architecture and Ocean Eng. , Shanghai Jiaotong University HUANG Xiao - ping  
CUI Wei - cheng  
Shipbuilding Engineering Institute , Harbin Engineering University SHI De - xin

**Abstract** :Preliminary research on fatigue growth behavior of the steel 980 welded joint under spectrum loading had been done. Two types of standard CT samples , which cracked in weld metal and at weld toe parallel to weld line respectively , were made of steel 980 welded joint. The fatigue experiments , under two types of spectrum loading respectively , had been carried out. Wheeler 's model was employed to analyzing the crack growth behavior under spectrum loading. It was shown that the loading retarded effect of weld metal was high and the loading retarded effect of weld toe metal was lower by comparing the calculating results with the experiment data.

**Key words** :steel 980 ;welded joint ;spectrum loading ;fatigue crack propagation

潜艇所受的疲劳外载荷不是恒幅载荷 ,而是随机载荷。文献 [1] 用概率方法分析了潜艇外载荷分布特征。由于潜艇耐压壳是焊接结构 ,焊接接头本身相当复杂 ,其母材与焊接接头间 ,在材料成分、微观组织及力学性能方面存在差别。因此 ,研究潜艇用钢焊接接头在随机载荷作用下的疲劳裂纹扩展行为是必要的。

对真实的随机载荷历程的试验模拟是困难的 ,

本文依据用蒙特卡洛法模拟潜艇的随机载荷历程所获得的一个潜艇下潜深度的随机数列 ,并进行一定的简化编制 ,能在一定程度上反映潜艇随机载荷特点的简化随机块载荷谱——特征载荷谱作为加载条件<sup>[2]</sup>。用 Wheeler 模型来分析潜艇用高强钢焊接接头在谱载荷作用下的疲劳裂纹扩展行为。对 980 钢焊接接头在谱载荷作用下的疲劳裂纹扩展行为进行了实验研究。

\* 中国博士后基金项目。

### 1 谱载荷作用下疲劳裂纹扩展计算

#### 1.1 谱载荷作用下裂纹疲劳扩展模型

在恒幅疲劳载荷作用下, 裂纹疲劳扩展速率可用 Paris 公式表示为

$$\frac{da}{dN} = \alpha (\Delta K)^m \quad (1)$$

在谱载荷作用下, 载荷幅值是变化的, 大小载荷的加载顺序不同, 对构件产生的损伤不同。一般认为大载荷造成的裂纹尖端塑性区将对后续小载荷产生影响——即过载效应。目前, 用来说明产生过载效应机理的模型有 Wheeler 模型、Willenborg 模型、HeQZ 模型以及 Chen Lee 模型等<sup>[3]</sup>。本文采用较简单且直观的由 Wheeler 提出的塑性区模型。

设前一个大载荷作用时的裂纹深度为  $a_0$ , 相应的应力为  $\sigma_{max}$ , 该载荷在裂纹尖端将产生一个尺寸为  $r_y$  的塑性区。塑性区尺寸  $r_y$  的计算式有多个<sup>[4~6]</sup>, 本文采用文献 [6] 中考虑板厚约束情况的计算式。即  $r_y$  可由下式计算:

$$r_y = \alpha \left( \frac{K_{max}}{\sigma_s} \right)^2 \quad (2)$$

$$\begin{cases} \alpha = \frac{1}{6\pi} & (t \geq 2.5 (K_{max}/\sigma_s)^2) \\ \alpha = \frac{1}{\pi} & (t \leq \frac{1}{\pi} (K_{max}/\sigma_s)^2) \\ \alpha = \frac{1}{6\pi} + \frac{5}{6\pi} \left( \frac{2.5 - t (K_{max}/\sigma_s)^2}{2.5 - \pi^{-1}} \right) & (\frac{1}{\pi} (K_{max}/\sigma_s)^2 < t < 2.5 (K_{max}/\sigma_s)^2) \end{cases}$$

将前一个大载荷相应的  $K_{max}$  代入式 (2) 便得到  $r_y$ ; 将当前载荷相应的  $K_{max}$  代入式 (2) 便得到  $r_y$ 。

Wheeler 认为, 在大载荷后的应力循环中, 只要塑性区尺寸  $r_y$  在大载荷造成的塑性区尺寸  $r_y$  范围内, 过载效应就起作用。当裂纹扩展或应力增加使  $a +$

$r_y$  达到或大于  $(a_0 + r_y)$  时, 过载效应就消失。因此, 在裂纹扩展速率公式中引入一个延滞系数  $C_p$ 。

$$\frac{da}{dN} = C_p \cdot \alpha (\Delta K)^m \quad (3)$$

在谱载荷作用下, 式 (3) 可写成如下形式

$$a_r = a_0 + \sum_{i=1}^r C_{pi} \alpha (\Delta K_i)^m \quad (4)$$

式中  $C_{pi}$ ——延滞系数;

$$\begin{cases} C_p = \left( \frac{r_y}{a_0 + r_y - a} \right)^m & (a + r_y < a_0 + r_y) \\ C_p = 1 & (a + r_y \geq a_0 + r_y) \end{cases} \quad (5)$$

$r_y$ ——当前屈服区尺寸, m;

$a$ ——当前裂纹尺寸, m;

$m$ ——形状指数, 和材料有关, 由实验确定。当  $m = 0$  时, 载荷的顺序效应可忽略。

### 2 谱载荷作用下疲劳扩展试验

#### 2.1 载荷谱

对于疲劳问题, 载荷幅或有效应力强度因子幅起主要作用, 加载顺序也有很大影响。而在进行疲劳实验时, 常用的方法是首先对实测的载荷—时间历程计数, 统计出载荷分布规律, 然后根据各级幅值出现的相对频率编制程序载荷谱。本文采用文献 [2] 给出的简化载荷谱——特征载荷谱, 如图 1。实际加载时, 按图 1 所示载荷谱进行循环加载。

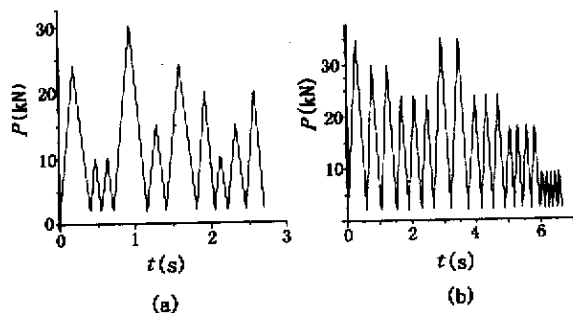


图 1 载荷谱

表 1 化学成分 (%)

元素 材料	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
板 材	0.09 ~ 0.13	0.18 ~ 0.31	0.54 ~ 0.59	0.008 ~ 0.011	0.005 ~ 0.010	4.40 ~ 4.54	0.53 ~ 0.68	0.36 ~ 0.44
焊 缝	0.050 ~ 0.065	0.35 ~ 0.42	1.56 ~ 1.61	0.009 ~ 0.013	0.009 ~ 0.010	2.48 ~ 2.56	0.55 ~ 0.56	0.60 ~ 0.62

表 2 力学性能

材料	$\sigma_s$ MPa	$\sigma_b$ MPa	$\delta_5$ %	$\psi$ %	$A_{KV}$ J
板材	802 ~ 921	886 ~ 960	19.2 ~ 21	65.7 ~ 72.6	132 ~ 205
焊缝	859 ~ 886	957 ~ 989	17.0 ~ 17.6	61.4 ~ 63.5	67.3 ~ 77.6

#### 2.2 疲劳试验

试验材料为潜艇用高强度结构钢 980 钢焊接接头。980 钢 (VHD402), 其屈服强度  $\sigma_s \geq 800\text{MPa}$ , 是我国研制的高强度、高韧性、可焊接的潜艇耐压壳体用钢。与之配套的焊接材料是 V840 焊条, 母材和焊条

的化学成分见表 1,力学性能见表 2。

试样为标准紧凑拉伸试样,试样共 4 件,其中 2 件为焊缝,两件为焊趾处(金相腐蚀观察为紧贴焊缝热影响区即热影响区和母材的过渡带上)。试验前,按照标准 GB6398-86 预制疲劳裂纹,预制条件为  $f = 20\text{Hz}$ ,  $R = 0.1$ ,  $K_{\max} = 20\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ , 裂纹深度预制到  $a/W = 0.2$ 。裂纹扩展速率的控制软件为 MTS 759.40。用 MTS632.03C-20 位移规测量试样的张口位移,位移规及系统的测量误差均小于 ASTM E606-80 标准的要求。裂纹扩展试验控制参数为:按图 1 所示的载荷谱加载;试验温度为室温。试验在 MTS-New810 疲劳试验机上进行。

先在试验机 MTS-New 810 上按图 1 所示的特征载荷谱输入试验系统的控制单元,输入完毕后,将预制好裂纹的标准试件安装好后进行加载并在  $x-y$  函数记录仪上输出加载波形,确认输出波形和输入波形一致后,测量初始裂纹长度。

开始正式加载实验并记录循环块数,每循环一定块数  $N_i$  后,用 MTS810 试验系统配套软件测量裂纹深度  $a_i$ 。焊缝试件和焊趾处试件分别按图 1(a)(b)所示载荷谱加载,试验结果如图 3~图 6。

### 2.3 试验结果分析讨论

根据 Paris 公式和所得的材料疲劳裂纹扩展性能参数计算相应循环块后裂纹的增量(或深度),并把计算结果和实测值进行比较分析。由于所采用的试件为标准紧凑拉伸试件,计算过程中采用的应力强度因子计算式来自 GB6398-86。

应力强度因子幅  $\Delta K$  :

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} F\left(\frac{a}{W}\right) \quad (6)$$

$$F\left(\frac{a}{W}\right) = 29.6\left(\frac{a}{W}\right)^{3.5} - 185.5\left(\frac{a}{W}\right)^{2.5} + 655.7\left(\frac{a}{W}\right)^{1.5} - 1017\left(\frac{a}{W}\right)^{0.5} + 638.9$$

由文献 1 得到 980 钢的疲劳裂纹扩展试验数据如图 2(a)(b),疲劳裂纹扩展速率用 Paris 公式表示为:

焊缝金属:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m = 4.87 \times 10^{-9} (\Delta K)^{2.9622} \quad (7)$$

焊趾处金属:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m = 4.39 \times 10^{-8} (\Delta K)^{2.3865} \quad (8)$$

根据式(6)和式(7)或(8)便可进行疲劳裂纹扩展

增量计算。对每一个载荷每一次循环都进行一次裂纹深度增量  $\Delta a_i$ ,一直累加下去,直到计算完所有的循环,计算量较大。

考虑载荷的顺序效应,将式(7)或式(8)乘以由式(5)确定的延滞系数  $C_p$ ,选取  $m = 0, m = 0.5, m = 1$  和  $m = 2$  进行计算。当  $m = 0$  时,延滞系数  $C_p = 1$ ,即不考虑载荷顺序效应。焊趾处金属的计算、试验结果如图 3 图 4,焊缝金属的计算、试验结果如图 5 图 6。

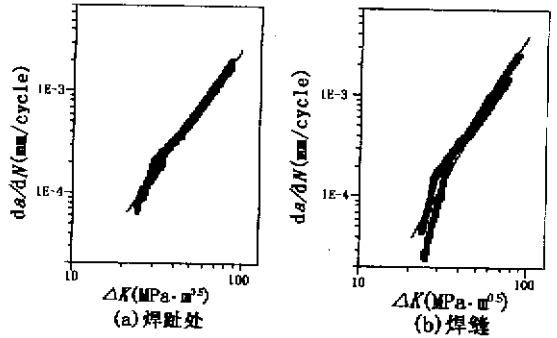


图 2 疲劳裂纹扩展试验结果

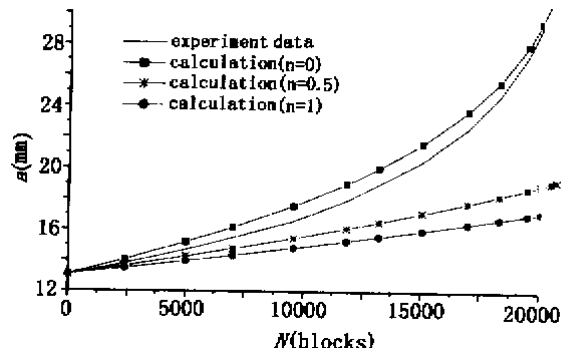


图 3 载荷谱(a)作用下的  $a-N$  曲线

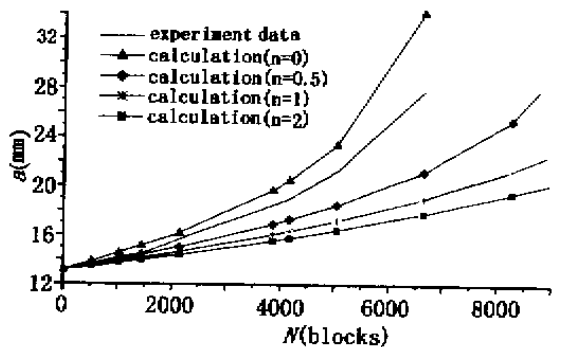


图 4 载荷谱(b)作用下的  $a-N$  曲线

从图中可以看到在相同循环次数下,不考虑载荷顺序效应即  $m = 0$  时的计算结果要比试验实测值要大。图 3 中结果显示,当  $m = 0$  时的计算结果和实测值最接近且计算值大于实测值,图 4 中的结果显示实测值介于  $m = 0$  和  $m = 0.5$  的计算结果之间且偏于  $m$

= 0, 说明焊趾处金属的载荷延迟效应小。图 5 表明试验结果介于  $m = 0$  和  $m = 0.5$  的计算结果之间且偏于  $m = 0.5$  图 6 表明试验结果大部分在  $m = 2$  附近, 图 5 和图 6 所示结果表明焊缝金属的载荷延迟效应明显。这和焊缝金属材料的疲劳门槛值较高有关, 尤其是当应力强度因子幅值在材料的疲劳门槛值附近时, 表现得更为突出。应当指出不同的载荷谱下的延迟效应是不尽相同的, 是否与局部残余应力有关还有待于进一步研究。

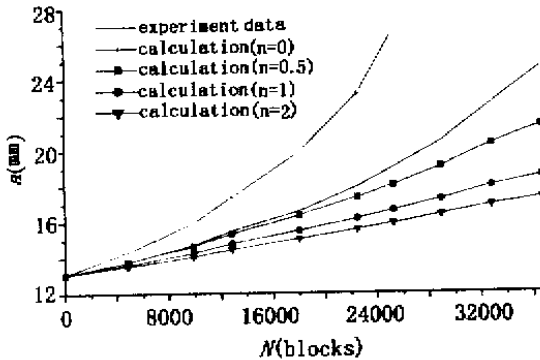


图 5 载荷谱 (a) 作用下的  $a - N$  曲线

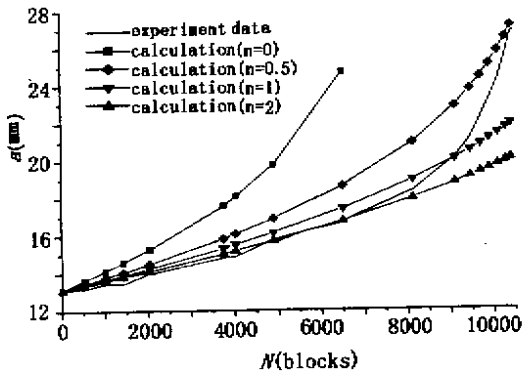


图 6 载荷谱 (b) 作用下的  $a - N$  曲线

由以上分析可以得到以下大致的结论 980 钢焊缝金属的疲劳载荷顺序效应较明显, 而近焊缝区金属的疲劳载荷顺序效应相对较小, 可以忽略。潜艇结构的疲劳主要发生在焊缝的焊趾处, 因此, 对于随机载荷作用下的潜艇疲劳裂纹扩展寿命计算可不考虑载荷的顺序效应。

### 3 结语

对随机载荷作用下焊接件的疲劳裂纹扩展寿命计算进行了探讨。用 980 钢焊接件制的标准 CT 试件 (裂纹分别开在焊缝金属上和平行于焊缝的焊趾处), 在两种谱载荷下进行了疲劳裂纹扩展试验, 得到的初步结论是焊缝金属的加载顺序效应明显, 而焊趾处金属的加载顺序效应相对较小, 可以略去不计。不同的载荷谱下的延迟效应不尽相同, 能否用局部存在残余应力进行解释还有待于进一步研究。

潜艇疲劳裂纹多发生于焊缝焊趾处。因此, 为安全起见, 进行谱载荷作用下的潜艇疲劳裂纹扩展寿命计算可不考虑加载顺序效应的影响。

### 参考文献

[1] 黄小平. 高强度钢潜艇锥柱结构疲劳性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学博士学位论文, 2001.  
 [2] 黄小平, 石德新, 崔宏斌. 潜艇用高强度在程序块载荷作用下的疲劳裂纹扩展[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2001, 22(2): 6-9.  
 [3] 陈志伟, Lee O.S. 随机载荷谱下裂纹扩展分析的几种模型[J]. 机械强度, 2000, 22(4): 245-248.  
 [4] Alawi H. Designing Reliably for Fatigue Crack Growth under Random Loading[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1990, 37(1): 75-85.  
 [5] Svensson T. Fatigue Damage Calculations on Block Load Sequences[J]. Fatigue & Engineering Materials & Structures, 1996, 19: 251-264.  
 [6] Voorwald H J C, Torres M A S. Modelling of Fatigue Crack Growth Following Overloads[J]. Int. J. Fatigue, 1991, 13(5): 423-427.

收稿日期 2001-10-30

作者简介 黄小平, 男, 1963 年生, 博士, 副教授, 主要研究方向 压力容器与船舶结构的应力分析及疲劳、断裂性能研究, 通讯地址: 上海市华山路 1954 号上海交大船舶与海洋工程学院, 邮编 200030.

(上接第 48 页)

测氧仪是监测舱内氧浓度的重要仪表, 对测氧仪的检查, 可以从以下几方面入手。

- 1) 对测氧仪进行调试, 观察是否出现: 无法定标, 定标后有明显漂移, 反应迟钝, 数字显示不稳等现象;
- 2) 测测氧仪的示值误差应不大于 3%, 报警误差应不超出 1%;
- 3) 核对氧电极的制造时间, 确认其是否在

有效期内; 4) 对于空气加压舱的测氧仪要根据设定的报警上、下限, 实际测试测氧仪的声、光报警功能是否符合规定; 5) 对于多舱室的大、中型氧舱, 要核对每个独立使用的加压舱是否均单独配备了测氧仪; 6) 检查与测氧仪配套使用的测氧记录仪能否正常工作。

(下转第 40 页)