

# 十字接头恒幅和变载荷历程疲劳 试验结果及预测

孙明如  
(合肥工业大学)

**摘要** 对十字接头分别进行恒幅轴向载荷和变载荷历程疲劳试验, 接头疲劳裂纹通常开始发生在焊缝根部, 但如果接头变形引起的弯曲应力较大, 疲劳裂纹也可能发生在焊缝趾部。本研究试图找出影响焊接接头疲劳寿命各参数之间的相互关系, 并利用作者引伸的焊接接头疲劳裂纹起始—扩展模型较精确地预测复杂焊件的疲劳寿命。该模型把疲劳裂纹起始寿命看成是疲劳裂纹萌生、早期生成并聚合成主疲劳裂纹的循环次数, 利用应变控制疲劳数据和 Palmgren-Miner 线性累积损伤法则以及缺口尖端局部应力应变响应知识计算的。裂纹扩展寿命是利用疲劳裂纹扩展数据和 Paris 能量定律进行计算的。将疲劳试验结果与利用分析模型预测的结果相比较, 试验与理论吻合良好。该研究还表明, 在长寿命范围, 裂纹起始寿命是疲劳全寿命的主要部分。

**关键词:** 十字接头 疲劳寿命 变载荷历程 起始—扩展模型 预测 试验

## 0 序 言

本研究试图找出影响十字接头疲劳寿命各参数之间的相互关系, 并利用裂纹起始—扩展模型精确预测复杂焊件的疲劳寿命。

疲劳全寿命( $N_T$ )包括裂纹起始寿命( $N_I$ )和裂纹扩展寿命( $N_P$ )<sup>[1]</sup>, 即

$$N_T = N_I + N_P \quad (1)$$

$N_I$  可利用应变控制疲劳数据和 Miner 累积损伤法则以及缺口尖端局部应力应变响应知识<sup>[2]</sup>估算, 把  $N_I$  看成是疲劳裂纹萌生、早期生长并聚合成主疲劳裂纹的循环次数。 $N_P$  是先假定一个合适的初始裂纹长度  $a_0$ , 利用疲劳裂纹扩展数据和 Paris 能量定律计算的。

## 1 预测焊接接头疲劳抗力的起始—扩展模型

### 1.1 疲劳裂纹起始寿命估算

对高循环疲劳( $N_I > 10^5$ , 这是各种机械中最常见的), 循环硬化和软化效应通常忽略不计,  $N_I$  可利用 Basquin 方程和线性损伤求和法则<sup>[2]</sup>进行计算, 即

$$\int_1^{2N_I} \left[ (\sigma_f / \Delta\sigma / 2) (1 - \sigma_0 / (2N_i)^k / \sigma_f) \right]^{-1/b} dN_i = 1 \quad (2)$$

式中  $N_I$  是疲劳裂纹起始寿命,  $\sigma_f$  是疲劳强度,  $b$  是疲劳强度指数,  $k$  是平均应力松弛指数,  $\sigma_0$  是局部初始平均应力,  $\Delta\sigma$  是局部应力范围。

缺口根部应力, 即焊缝临界区域应力(焊趾或内部缺陷)可由修正 Neuber 法则<sup>[4]</sup>得到即

$$\Delta\sigma \Delta\epsilon = (K_f \Delta S)^2 / E \quad (3)$$

式中  $\Delta S$  是名义应力范围,  $\Delta\epsilon$  是局部应变范围,  $K_f$  是疲劳缺口系数,  $E$  是弹性模量。

在式(3)的计算中, 问题是如何确定焊趾  $K_f$  的合适值, 这是由于几何不连续处(例如焊趾)的缺

口根部半径为未知且是变化的。焊趾显微检查表明,实际上任何半径值均能观测到,因此缺口根部半径必须看成具有各种可能的值,对给定的焊缝形状  $K_f$  可利用 Peterson 方程<sup>[2]</sup> 计算,即

$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \frac{a}{r}} \quad (4)$$

式中  $K_t$  是理论应力集中系数,  $r$  是缺口半径(mm),  $a$  是材料参数(对钢  $a \approx 1.08 \times 10^5 S_u^{-2}/\text{mm}$ ),  $S_u$  是极限强度(MPa)。

对给定的焊缝几何形状,作为假定缺口根部半径的一种函数,  $K_t$  可用有限元法计算。假设十字接头焊缝  $K_t$  的一般形式为<sup>[4]</sup>

$$K_t = 1 + \alpha(t/r)^{1/2} \quad (5)$$

式中  $\alpha$  是常数,由焊缝几何形状和载荷类型确定,  $t$  是板厚。各种焊接接头  $K_t$  的具体计算公式可查文献[3]。将式(5)代入式(4),并对  $r$  求微分,就得到  $K_f$  的最大值  $K_{f\max}$

$$K_{f\max} = 1 + (\alpha/2)(t/a)^{1/2}$$

对钢:  $K_{f\max} \approx 1 + 0.0015 \alpha S_u t^{1/2}$  (6)

在相同的焊缝形状条件下,强度级别越高的钢,其  $K_{f\max}$  值越大。 $K_{f\max}$  值还与焊缝形状和施加载荷类型以及焊件厚度有关。在分析中往往还要用到弯曲  $K_{f\max}$ ,它须由弯曲应力引起的  $K_t$  值确定。

## 1.2 在复合载荷作用下疲劳裂纹起始寿命的估算

当焊接接头同时承受轴向应力、弯曲应力和残余应力时,为了模拟缺口根部应力应变而必须用到的 Neuber 准则的修正形式用图 1 说明:在第一个反向终点(0~1),缺口根部应力应变响应可通过求解下列方程得到

$$\sigma \epsilon = (K_f^A S_A^A + K_f^B S_B^B + \sigma_r)^2 / E \quad (7)$$

式中  $\sigma$  是真应力,  $\epsilon$  是真应变,上标(或下标)A 用于轴向载荷, B 用于弯曲载荷。  $S$  是名义应力,  $\sigma_r$  是应力比为  $R$  时的疲劳极限。在第二个反向终点(1~2):

$$\Delta \sigma \Delta \epsilon = (K_f^A \Delta S_A + K_f^B \Delta S_B)^2 / E \quad (8)$$

对变幅载荷历程,可用累积疲劳损伤法则简要说明在忽略平均应力松弛可能性时,在一个载荷历程单元内每个封闭的滞后回线的疲劳损伤率  $D_i$  为

$$D_{\text{载荷单元}} = \sum D_i = \sum \left[ \frac{\sigma_f - \sigma_0}{\Delta \sigma / 2} \right]_i^{-1/b} \quad (9)$$

那末  $N_f$  是  $D_{\text{载荷单元}}$  的倒数<sup>[2]</sup>,即

$$N_f = 1 / D_{\text{载荷单元}} \quad (10)$$

虽然在过去若干年中提出了多种循环计算法,但由 Dowling 和 Socie 发展的“向量法”<sup>[5]</sup>仍被认为是最有效最简易的数字计算机程序。对无弯曲应力和残余应力的缺口试件,载荷历程按下列方式重新排列:载荷历程中的第一个值和最后一个

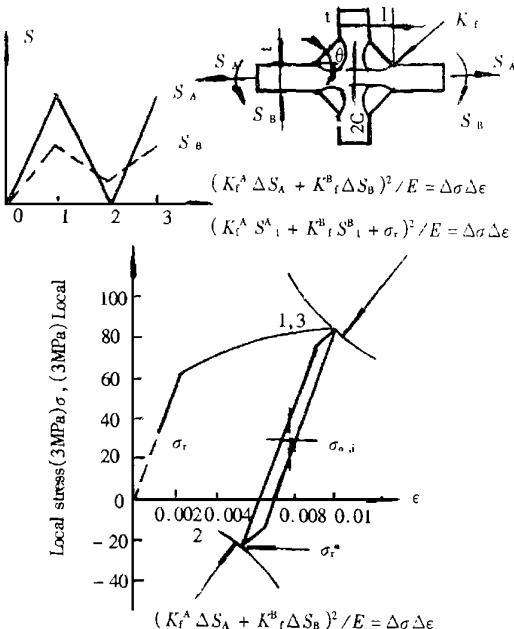


图 1 具有拉伸残余应力的焊趾处局部应力应变响应的计算机模拟

Fig. 1 Computer simulation of local stress and strain responses at the weld toe with tensile residual stresses

值为最大绝对值。对承受弯曲应力和含有残余应力的焊接接头, 在进行循环计算时, 必须把载荷历程中具有  $(K_{f\max}^A S_i^A + K_{f\max}^B S_i^B + \sigma_r)$  最大值的第  $i$  值 ( $S_i$ ) 看作是第一个值和最后一个值。

### 1.3 疲劳裂纹扩展寿命估算

焊接接头疲劳扩展寿命可通过积分 Paris 方程进行估算, 即

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (11)$$

$$N_p = \int_{a_I}^{a_f} da/c(\Delta K)^m \quad (12)$$

式中  $N$  为循环次数,  $a$  为裂纹长度,  $\Delta K$  为应力强度因子幅度,  $a_I$  和  $a_f$  分别是初始裂纹长度和最终裂纹长度,  $c$  和  $m$  是材料常数。而

$$\Delta K = Y \Delta S (\pi a)^{1/2} \quad (13)$$

式中的几何因子  $Y$  可看成是几种效应的迭加<sup>[6]</sup>

$$Y = M_s M_t M_k / \Phi_0 \quad (14)$$

式中  $M_s$  是边缘裂纹影响系数(通常取 1.12),  $M_t$  是有限宽度影响系数,  $M_k$  是焊接缺陷应力集中影响系数,  $\Phi_0$  是裂纹形状修正因子。应用式(14)的最大问题是确定  $M_k$ , 它通常是裂纹长度  $a$  的函数。Emery 的解给出了任意裂纹张开应力系统的  $M_k$ , 即

$$M_k = \frac{1}{S} [1.12 \sigma_a - \int_{0f}^a \left( \frac{x}{a} \right) \frac{d\sigma}{dx} dx] \quad (15)$$

式中  $\sigma_a$  是  $x=a$  时的应力,  $d\sigma/dx$  是应力梯度。Albrecht 和 Yamada 给出了  $f(\frac{x}{a})$  的一种简易表达式

$$f\left(\frac{x}{a}\right) = 1.12 \frac{2}{\pi} \sin^{-1}\left(\frac{x}{a}\right) \quad (16)$$

### 1.4 在复合载荷作用下疲劳裂纹扩展寿命估算

因为裂纹是位于焊接缺陷尖端塑性区之外, 所以缺口根部残余应力可视为对疲劳裂纹扩展没有影响。由于弯曲应力方向平行于轴向载荷, 所以轴向载荷与弯曲载荷共同作用的应力强度因子  $\Delta K_T$  可用迭加法求得, 即

$$\Delta K_T = \Delta K_A + \Delta K_B \quad (17)$$

式中  $\Delta K_A$  是轴向载荷应力强度因子,  $\Delta K_B$  是弯曲应力强度因子。用  $\Delta K_T$  代  $\Delta K$ , 从式(12)可计算  $N_p$ 。

应用 Socie 提出的变载荷历程下疲劳裂纹扩展寿命计算方法<sup>[7]</sup>, 把裂纹长度固定在初始裂纹尺寸, 再加上每次循环裂纹伸长增量就可计算出每个载荷单元的裂纹生长率为

$$\Delta a/\Delta B = \Sigma da_i \quad (18)$$

用载荷单元表示的裂纹扩展寿命为

$$N_p = \int_{a_I}^{a_f} (\Delta B/\Delta a) da \quad (19)$$

由式(12)、(13)、(19), 轴向载荷的  $\Delta a/\Delta B$  为

$$\Delta a/\Delta B = CY^m (\pi a)^{m/2} \Sigma \Delta S^m \quad (20)$$

当接头同时受到弯曲和轴向载荷作用时, 则

$$\frac{\Delta a}{\Delta B} = CY_A^m (\pi a)^{m/2} \Sigma \Delta S_A^m (1 + Y_B \Delta S_B / Y_A \Delta S_A)^m \quad (21)$$

对式(21)进行积分, 就能计算出轴向载荷和弯曲载荷联合作用时的  $N_p$ 。

## 2 试验过程

### 2.1 材料和试样

研究了两种类型的十字接头: A3 钢十字接头和三组 20 号钢十字接头。接头中焊角  $\theta$  为 45°, 焊缝尺寸  $L$  等于板厚 (12mm), 2C 值: 20 号钢 A 组试样 5mm, B 组试样 8mm, C 组试样 10mm, 所有试样焊后均切成 76mm 宽。A3 钢是用 E4303 焊条手工电弧焊, 20 号钢用半自动 CO<sub>2</sub> 气体保护焊, 焊丝 H08Mn2SiA。

### 2.2 焊接试样疲劳试验

在 MTS-100 液压试验机上通过控制载荷使所有试样在疲劳试验中破坏, 使用频率 2~5Hz, 每个接头均贴有 4 个应变片, 安放位置离焊趾 12mm, 这样记录的公称二次弯曲应力刚好在焊趾影响之外。

对恒幅载荷, 做应力比(只考虑轴向载荷)  $R=0$  和  $R=-1$  两种疲劳试验, 应力水平选择使疲劳寿命从  $10^4$  到  $10^7$  循环。在变幅疲劳试验中, 载荷历程用一个特制的函数发生器进行记录, 该函数发生器与 MTS 试验机相连接, 它能贮存各种载荷历程, 并能在不同频率下提供这些载荷历程。当经过载荷历程终点(一个单元)时, 为了计算各载荷单元寿命, 需向 MTS 循环计算器输入一个信号。20 号钢 B 组十字接头是用变载荷历程进行疲劳试验的。

## 3 结果及讨论

### 3.1 焊接接头疲劳寿命预测

接头疲劳全寿命应用上节所讨论的方法进行估算。试样的  $K_{f\max}$  值根据焊缝几何形状计算, 焊接热影响区和焊缝金属单调与循环应力应变特性可查有关表<sup>[2]</sup>。应用式(15)、(16)计算  $M_K$ , 计算中取缺口根部半径  $r$  等于 Peterson 材料常数  $a$ <sup>[2]</sup>。根据应力分布, 对轴向载荷  $M_k$  可近似表达为

$$M_k = 1 + (K_t - 1) \exp \left[ -22.0 (K_t - 1)^{0.85} \frac{a}{t} \right] \quad (22)$$

对弯曲载荷为

$$M_k = 1 + (K_t - 1) \exp \left[ -42.5 (K_t - 1)^{0.65} \frac{a}{t} \right] \quad (23)$$

十字接头预测疲劳全寿命的方法不仅用于焊趾也用于焊根。计算焊根疲劳裂纹扩展寿命用到的应力强度因子 ( $\Delta K$ ) 可以计算<sup>[2]</sup>。而用公式表示接头应力分布是很困难的, 因此不能用解析法计算  $a$ , 为了计算疲劳裂纹扩展寿命, 假定  $a=0.25\text{mm}$ <sup>[1]</sup>。

### 3.2 十字接头疲劳寿命

A3 钢十字接头疲劳试验中,  $R=-1$  时, 8 个试样中有 2 个在趾部断裂;  $R=0$  时, 11 个试样中有 6 个在趾部断裂, 其余试样均在根部断裂。绝大多数趾部断裂都发生在较高的施加载荷和具有较大的弯曲应力试样中。断裂在根部的那些试样经受的弯曲应力较小。

20 号钢十字接头, 只有 A 组一个试样在短寿命范围断裂在趾部。当  $2C \geq 10\text{mm}$ , 所有 B 组和 C 组试样在根部都有疲劳裂纹萌生。焊趾和焊根的疲劳全寿命都可以估算, 算出的最短寿命部位就假定是断裂位置, 该位置预测的疲劳全寿命就作为试样的预测疲劳全寿命。

预测的疲劳全寿命与实测的疲劳全寿命相比较表示在图 2 中, 二者相一致性在 2 因子内。

### 3.3 变幅载荷作用下的疲劳寿命

20 号钢 B 组十字接头变载荷历程疲劳试验结果表示在图 3 中。图中所标的公称应力是载荷

历程中最大绝对值。寿命用载荷单元表示(一个单元有 5937 变向), 接头中所有裂纹均发生在焊根。预测的疲劳全寿命和实测的疲劳全寿命相比较表示在图 4 中, 该图表明二者吻合良好。

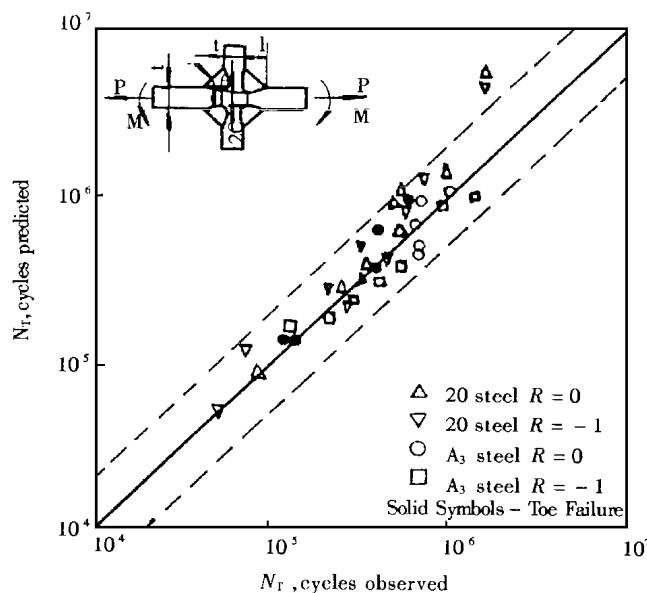


图 2 各种十字接头预测与观测的疲劳全寿命比较

Fig. 2 Comparison of predicted and observed  $N_f$  for various cruciform weldments

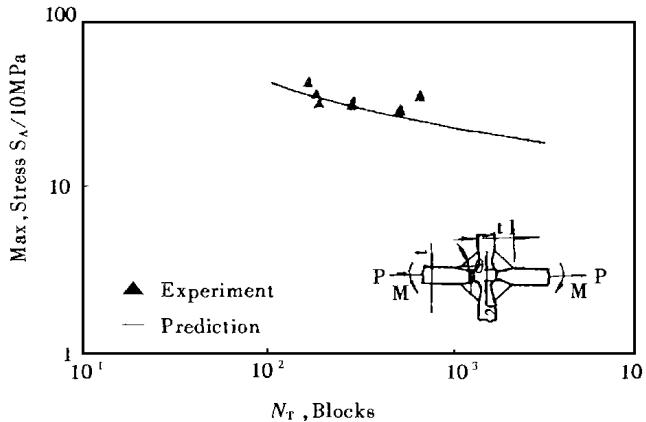


图 3 在变载荷历程作用下 20 号钢(B 组)十字接头疲劳全寿命预测与试验结果

Fig. 3  $N_f$  predictions and experimental results for 20 steel cruciform weldments (Group B) under variable load history

### 3.4 弯曲对疲劳抗力的影响

本研究中作试验的绝大多数十字接头均经受一些弯曲应力, 这些应力是用应变片测量的。焊趾的弯曲应力集中系数比焊根(靠近中性轴)大, 因而弯曲应力要降低焊趾的疲劳抗力, 而对焊根影响较小。弯曲应力对焊接接头疲劳抗力起始寿命的主要影响是改变初始平均应力的符号以及改变局部应力范围( $\Delta\sigma$ ), 弯曲应力对疲劳裂纹扩展寿命的影响, Burk 等人已有详细说明<sup>[8]</sup>。如果弯曲应力方向与外加轴向载荷方向相反, 则疲劳全寿命能得到改善。然而对十字接头, 弯曲应力对疲劳抗力总是存在负面效应, 因为它总是要增大焊趾反面某处的局部应力。

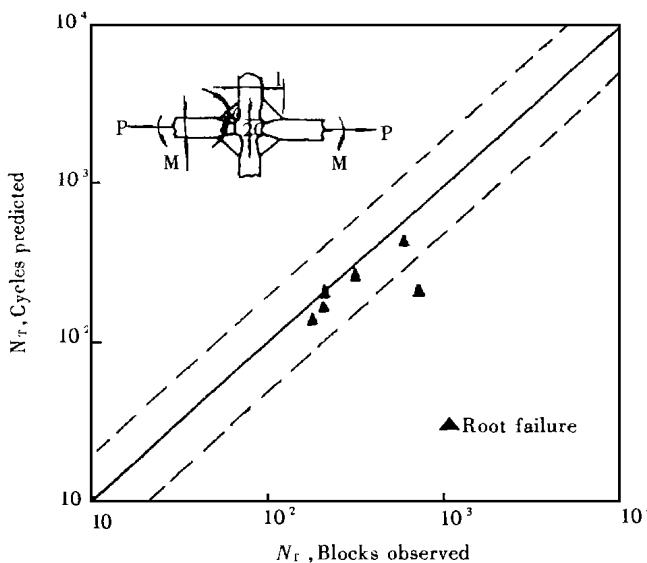


图 4 变载荷历程 20 号钢十字接头(B 组)预测与观测的  $N_T$  比较

Fig. 4 Comparison of predicted and observed  $N_T$  for 20 steel cruciform weldments under variable load history

弯曲应力对那些在趾部失效的十字接头疲劳全寿命的影响从图 5 可看出。不考虑弯曲应力时, 预测的寿命比实测寿命长; 考虑弯曲应力时, 预测寿命与实测寿命具有较好的一致性。有无弯曲应力, 影响到失效位置。无弯曲应力时, 预测的焊根寿命和预测的焊趾寿命可明确表示为:

[寿命(焊趾, 无弯曲)]>寿命(焊根)>寿命(焊趾, 有弯曲)]

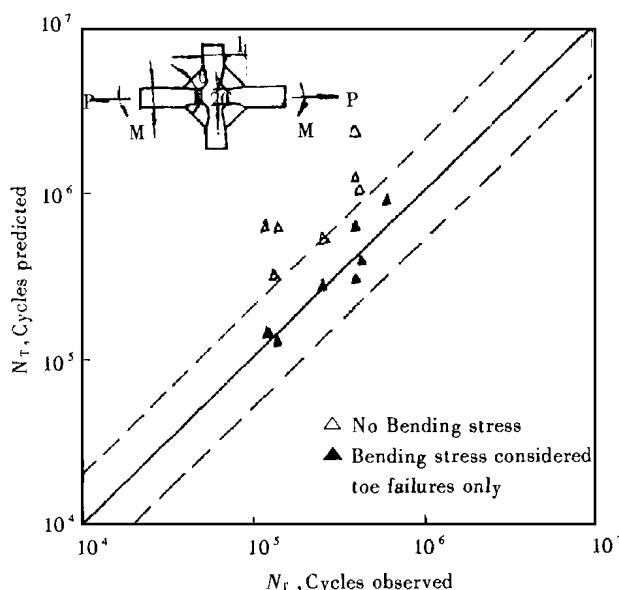


图 5 预测中考虑与不考虑弯曲应力时十字接头预测与观测的  $N_T$  比较

Fig. 5 Comparison of predicted and observed  $N_T$  cruciform weldments with and without bending stress included in prediction

如果试样是直的且引起的弯曲应力较小, 焊根失效是可以预见的。这就解释了为什么 20 号钢 A 组十字接头在焊根失效的较多, 这是因为这种接头在载荷作用下变直了, 因而弯曲应力很低。对各种焊缝几何形状和应力比要使失效位置由焊根移到焊趾, 所需的弯曲应力, 是可以推算出来的。

### 3.5 疲劳裂纹起始相对重要性

根据裂纹起始—扩展模型  $N_T = N_I + N_P$ , 但  $N_I$  是否可测出以及  $N_P$  是否控制焊件疲劳全寿命, 这是有争议的。有不少证据表明,  $N_T$  的大部分是由裂纹起始构成, 特别是在长寿命范围中更是如此。

十字接头中预测的裂纹起始寿命占  $N_T$  的百分率是随预测的疲劳全寿命而变化的。试验表明, 对趾部断裂, 裂纹起始寿命大于  $10^5$  次循环。将预测的  $N_I$  与实测的  $N_T$  进行了比较, 预测的焊趾和焊根疲劳断裂的  $N_I$  大致保持在实测  $N_T$  的 2 因子分散带内。

如上所讨论, 对所研究的焊缝几何形状, 疲劳全寿命的大部分是在裂纹起始部分。一般来说, 在长寿命范围,  $N_I$  是疲劳全寿命的主要部分。

## 4 结 论

(1) 焊接接头变形引起的弯曲应力显著影响外部几何不连续处(例如焊趾等)的疲劳裂纹起始寿命和裂纹扩展寿命, 而对内部缺陷处的疲劳抗力影响较小。因此本应在内部缺陷处开裂的焊接接头可能由于弯曲应力存在而在外部几何不连续处开裂。

(2) 本研究表明, 在长寿命范围, 裂纹起始(即裂纹萌生、早期生长并聚合成主裂纹)是疲劳全寿命的主要部分。

(1999—01—5 收到初稿, 1999—09—24 收到修改稿)

## 参 考 文 献

- 1 中国机械工程学会焊接学会编. 焊接手册. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- 2 赵少汴, 王忠保编著. 疲劳设计—方法与数据[ M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- 3 Ho N J. and Lawrence V. Fatigue of weldment subjected to complex loadings. Fcp Report, No. 45, college of Engineering, University of Illinois, 1983.
- 4 徐灏. 疲劳强度[ M]. 北京: 高等教育出版社, 1988.
- 5 Dowing S and Socie D. Simple rainflow counting algorithms. Int J. Fatigue, 1982, 4(1): 53~58.
- 6 Maddox S J. An analysis of fatigue crack in fillet welded joints. Brit. Weld. inst. Report No. E/49/72, 1972.
- 7 Socie D F. Estimation fatigue crack initiation and propagation lives in notched plates under variable loading history. ph. D. Thesis, University of Illinois, Urbana, 1977.
- 8 Brink J D. and Lawrence F V, Jr. Influence of bending stresses on fatigue crack propagation life in butt joint welds. Weld. J. 1977, (56): 43S~48S.

## Constant Amplitude and Variable Load History Fatigue Test Results and Predictions for Cruciform Weld

*Sun Mingru*

(Hefei University of Technology )

**Abstract** Cruciform welds were fatigue tested under constant amplitude axial load and variable load history conditions. Fatigue cracks generally initiate at the root but may initiate at the toe if higher bending stresses are induced by joint distortion. This study attempts to interrelate the parameters that influence the fatigue life of weldments and to predict accurately the fatigue lives of complex weldments using an initiation-propagation model developed by author. The model for the predictions assumes that the fatigue crack initiation period ( $N_I$ ) is the number of cycles for the initiation of a fatigue crack and its early growth and coalescence into a dominant fatigue crack.  $N_I$  is estimated using strain-controlled fatigue data and the Palmgren-Miner linear damage cumulation rule through knowledge of the local stress and strain response at the tip of the notch. The fatigue crack propagation period ( $N_P$ ) is estimated using fatigue propagation data and the power law of Paris. The fatigue test results were compared with predictions made using the analytical model and good agreement between experiment and theory was observed. Moreover, the study indicated that the fatigue crack initiation period is the main portion of the total fatigue life at long lives.

**Key words** cruciform weld, fatigue life, variable load history, initiation-propagation model, prediction, experiment

**作者简介** 孙明如,男,59岁,副教授,上海交通大学焊接专业硕士研究生毕业。1968年至1979年在国营722厂工作,1979年至1987年在桂林电子工业学院任教,1987年至今在合肥工业大学任教。研究方向是焊接力学。发表主要论著:《自动对接焊应力与应变有限元分析》,《单道自动对接焊应变应力场分析》等多篇。主要研究成果:“微机缝焊电流实时控制系统研究”获省科技成果三等奖。