

力学不均匀性对焊接接头 疲劳裂纹扩展的影响

孙大成

(天津解放军运输工程学院)

田锡唐 朱鸿官 余圣甫

(哈尔滨工业大学)

摘要 提出了软对硬不均匀裂纹体(裂纹在硬区)的研究模型。试验表明,力学不均匀性影响疲劳裂纹扩展速率。边界元的动态分析指出,在相同扩展步下,裂纹离软硬区界面越近, ΔJ 积分的幅值 ΔJ 越小。不均匀性对疲劳裂纹扩展速率的影响,主要是通过对 ΔJ 的影响来实现的。裂纹离软硬区界面越近, 疲劳裂纹扩展速率越小。

关键词 焊接接头, 不均匀性, 疲劳裂纹

0 序 言

焊接接头的疲劳裂纹扩展的研究,是焊接力学领域的一个重要研究课题。它不仅对焊接结构完全性和可靠性的评估有实际意义,而且由于它具有宏观力学性能的不均匀性,因此也有理论和学术价值。然而,焊接接头力学不均匀性对疲劳裂纹扩展的影响,至今研究的并不多^{[1][2]}。

本文对焊接接头不均匀体的疲劳裂纹扩展进行了实验研究和动态数值模拟,深入探讨了不均匀性对疲劳裂纹扩展的影响。

1 试验研究

焊接结构的疲劳裂纹扩展理论的发展及应用,始终和疲劳实验研究紧密联系着。宏观力学不均匀性对焊接接头疲劳裂纹扩展影响的研究,更有赖于试验提供依据。

研究^[3]表明,对于偏裂纹的软夹硬不均匀裂纹体(夹层材料的屈服极限高于母材材料的屈服极限),在一定载荷下,力学不均匀性对每侧裂纹面张开位移的影响具有独立性,主要取决于与该侧裂纹面到同一侧的夹层和母材分界面的距离。基于这一规律,本文将夹层中

带穿透裂纹的不均匀体简化成由两种不同材料组成的带穿透裂纹的不均匀体。软对硬不均匀板指裂纹在硬区，用CH表示。硬区材料的屈服极限高于软区的屈服极限。这一模型可模拟热影响区中含裂纹的高强钢焊接接头，或焊缝中含裂纹的高匹配焊接接头。软区材料为A3钢，硬区材料为60Si2Mn钢。疲劳试验机ZD20，频率5~30Hz。观察裂纹扩展量的读数显微镜的最小读数0.05mm。

在DSS-10T-S型电子拉伸机上分别测定无裂纹的均匀硬、软材料的外载荷(P)一位移(Δ)曲线。由

$$\sigma_0 = \frac{P}{A_0}, \quad \epsilon_0 = \frac{\Delta}{L_0}$$

将 $P-\Delta$ 曲线化为应力(σ_0)—应变(ϵ_0)曲线，其中 A_0 为板的原始横截面积， L_0 为板的原长。为真实反映材料在拉伸时的实际情况，采用真应力(σ)—真应变(ϵ)关系。真应力与工程应力(σ_0)，真应变与工程应变(ϵ_0)的关系如下：

$$\sigma = \sigma_0 (1 + \epsilon_0)$$

$$\epsilon = \ln (1 + \epsilon_0)$$

材料常数为：

(a) 软区材料(经回火处理)A3钢：

弹性模量 $E_s = 206,000 \text{ MPa}$

屈服应力 $\sigma_{ys} = 240 \text{ MPa}$

(b) 硬区材料(经回火处理)60Si2Mn钢：

弹性模量 $E_h = 206,000 \text{ MPa}$

屈服应力 $\sigma_{yh} = 441 \text{ MPa}$

回火后的试件中的两种材料硬度分布各自趋于均匀。

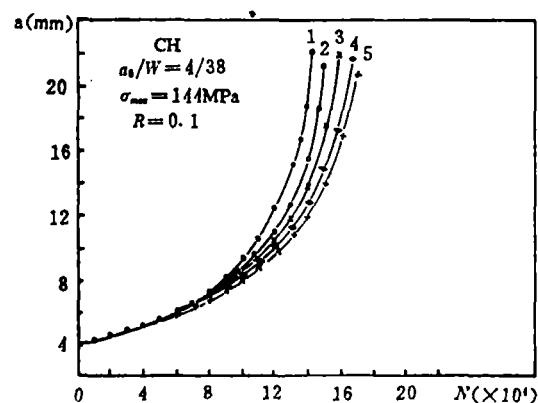


图1 软对硬不均匀板的实验的 $a-N$ 曲线

Fig.1 Experimental curves of $a-N$ for soft-hard heterogeneous plates

1. Hom. Hard
2. $d = 5.0 \text{ mm}$
3. $d = 2.5 \text{ mm}$
4. $d = 1.0 \text{ mm}$
5. $d = 0.5 \text{ mm}$

疲劳试验在等幅循环载荷下进行，应力比 R ($R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$) 为 0.1，加载频率10Hz。

图1是软对硬(含均匀硬材料，Hom. Hard)不均匀板的裂纹半长 a 与循环周数 N 的试验曲线。

图中 a_0 表示裂纹原始长度， W 表示板宽(下同)。

图2表示的是软对硬不均匀板在双对数坐标下裂纹扩展速率 da/dN 和应力强度因子幅 ΔK 的关系。 $\Delta K = Y \cdot \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$ (Y 是形状参数， $\Delta \sigma$ 为应力幅 ($\Delta \sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$))。图中 S 代表软区， H 代表硬区(下同)。

图3表示软对硬不均匀板在双对数坐标下 da/dN 和裂纹张开位移幅 ΔCOD 的关

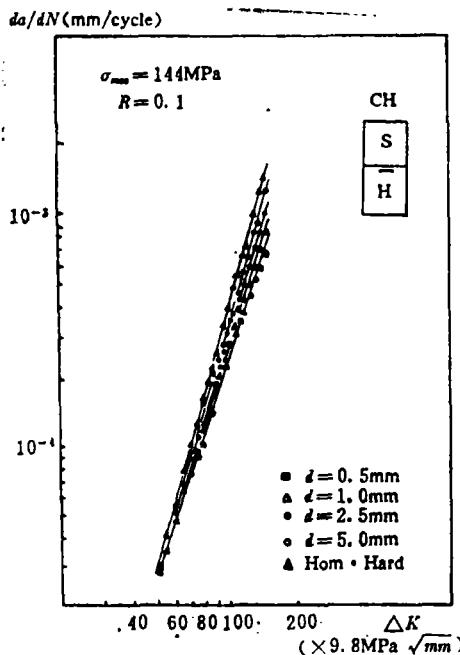


图 2 软对硬不均匀板的试验 $da/dN - \Delta K$ 关系
Fig.2 Relationships between da/dN and ΔK in experiments of CH

系。其中 ΔCOD 由 $\frac{\delta}{2\pi a \varepsilon_y} = \frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} \right)^2$ ^[4] 所对应的位移 δ 的差求得, ε_y 为屈服应力所对应的应变。

图 2、图 3 中的 ΔK , ΔCOD 均由均质条件下的公式求得, 没有考虑不均匀性的影响。

由图可见裂纹面与软硬区界面的距离 d 不同, 疲劳裂纹扩展速率不同。力学不均匀性影响了疲劳裂纹扩展速率。软对硬不均匀板的裂纹扩展速率随 d 的减小而减小。

由图 4 所示的疲劳裂纹扩展路径可见, 当韧带没有发生屈服时, 裂纹基本上沿原裂纹面方向扩展, 只是当裂纹扩展量较大韧带出现屈服时, 裂纹的扩展才偏向软区一侧。不均匀体的韧带屈服与均匀体的情况不同。

2 不均匀性对疲劳裂纹扩展中的 J 积分及其幅值的影响

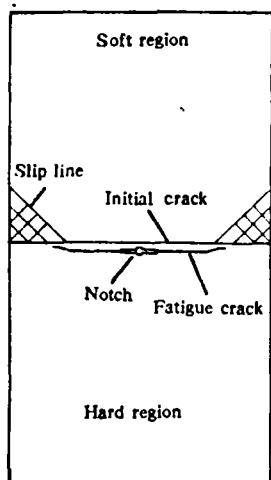


图 4 软对硬不均匀板的疲劳裂纹扩展路径
Fig.4 Path of fatigue crack growth in CH

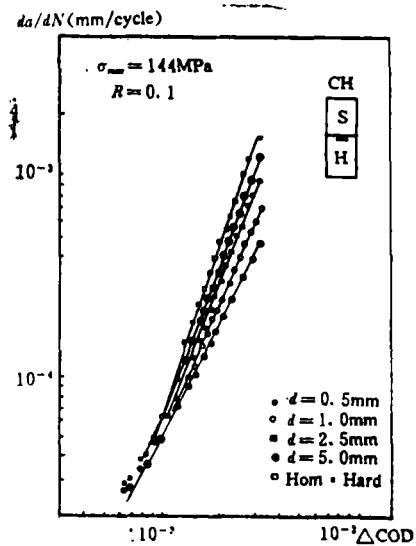


图 3 软对硬不均匀板的试验 $da/dN - \Delta COD$ 关系
Fig.3 Relationships between da/dN and ΔCOD in experiments of CH

本文首次将边界元法引入焊接接头不均匀体的疲劳裂纹扩展的研究中。分析对象与试验研究对象一样, 是由两种不同材料组成的带穿透裂纹的不均匀板, 宽为 $2W$, 长为 $L = 4W$, 原始裂纹长 $2a_0$, 裂纹与两种材料界面之距为 d , 载荷

垂直于界面和裂纹面。整个板的几何和受载条件对称于 y 轴，故可取板的二分之一来研究。

本文研究平面应力问题。疲劳载荷为等幅载荷，最大值 $\sigma_{max} = 176 \text{ MPa}$ ，最小值 $\sigma_{min} = 17.6 \text{ MPa}$ ，应力比 $R = 0.1$ 。

裂纹扩展的每步步长 Δa 为常数^[5]， $\Delta a = 0.3 \text{ mm}$ ，并假设载荷达到最大值时向前扩展。研究了裂纹半长从 3 mm 到 6 mm 的扩展过程，共计 10 个扩展步。

文献[6]对疲劳载荷下不均匀体的 J 积分守恒性进行了大量的边界元计算，指出对于受疲劳载荷的扩展裂纹，不均匀裂纹体的 J 积分在裂纹扩展量小于原始裂纹长的 0.6 倍时的守恒性很好；在裂纹扩展量大于原裂纹长的 0.6 倍左右时的最大偏差小于 $6\% \sim 7\%$ ，基本上守恒。

计算中的 J_{max} 和 J_{min} 分别指最大应力 σ_{max} 和最小应力 σ_{min} 所对应的 J 积分值， ΔJ 是 J 积分幅值 ($\Delta J = J_{max} - J_{min}$)。

软对硬不均匀板的 J_{max} ， J_{min} 和 ΔJ 的值，随着裂纹的扩展，都呈现增长趋势。而在同一扩展步，当裂纹与软硬区界面的距离逐渐减小时， ΔJ 减小。反之，当 d 增大时， ΔJ 增大，并且越接近均匀硬材料的 ΔJ 。

3 不均匀体的疲劳裂纹扩展速率

为了对金属焊接结构的安全性评估提供依据，必须给出疲劳裂纹扩展速率的数学表达式。采用如下二个公式：

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

$$\frac{da}{dN} = C_J(\Delta J)^{m_J} \quad (2)$$

式中 C ， C_J ， m ， m_J 为材料常数。式 (2) 中的 ΔJ 随裂纹扩展的变化结果已由数值计算给出。完成式 (2) 的关键是确定 C_J 和 m_J 。由实验得到的均匀硬材料的 $a - N$ 曲线 (图 1) 而作出的 $da/dN - \Delta K$ 关系 (图 2)，可求得硬材料的疲劳裂纹扩展速率公式：

$$\frac{da}{dN} = 1.58 \times 10^{-11} (\Delta K)^{3.68}$$

其中 $C = 1.58 \times 10^{-11}$ ， $m = 3.68$ 。

在线弹性和平小范围屈服的弹塑性阶段，有下式^[7, 8] (平面应力)：

$$\Delta J = \frac{(\Delta K)^2}{E} \quad (E \text{ 为弹性模量})$$

在有塑性变形的交变载荷下，这样的关系仍对应得非常好^[7]。于是，由 C ， m 可确定 C_J ， m_J 。容易看出：

$$m_J = \frac{m}{2} \quad C_J = C \cdot E^{\frac{m}{2}}$$

故对硬材料可求到：

$$m_J = 1.84, \quad C_J = 1.42 \times 10^{-3}$$

$$\frac{da}{dN} = 1.42 \times 10^{-3} (\Delta J)^{1.84}$$

图2和图3表明不均匀性对疲劳裂纹扩展速率的影响，软对硬不均匀板的裂纹扩展速率随裂纹面与软硬区界面的距离 d 的减小而减小。但是，其中的 ΔK 和 ΔCOD 是利用均质材料的公式计算得到的，并没有考虑不均匀性的影响。因此，实际给出的是疲劳裂纹扩展速率与均质条件下的断裂参数间的关系。

为了考察疲劳裂纹扩展速率与考虑了不均匀性影响的断裂参数间的关系，将图2横坐标的 ΔK ，用计算得到的考虑了不均匀性影响的断裂参数 ΔJ 来替换，得到的 $da/dN - \Delta J$ 关系示于图5。由图5可见，在双对数坐标中，不同 d 的 $da/dN - \Delta J$ 关系几乎落在一条直线上，相关系数在0.95~0.98之间。不均匀性对疲劳裂纹扩展速率的影响，主要通过对 ΔJ 的影响来实现的。若在 ΔJ 中考虑了不均匀性的影响，那么就可用裂纹所在区域的材料特征给出的均匀体的裂纹扩展速率的公式，来估算相应的不均匀体的疲劳裂纹扩展速率。

软对硬不均匀板的 J 积分幅值 ΔJ ，随裂纹与软硬区界面之距的减小而减小，因而疲劳裂纹扩展速率减小。

4 结 论

(1) 试验和边界元数值计算中提出的软对硬不均匀裂纹体，对于研究力学不均匀性对焊接接头疲劳裂纹扩展的影响是合理的分析模型。

(2) 试验表明，裂纹面离软硬区界面越近，软对硬不均匀体的疲劳裂纹扩展速率越小。

(3) 软对硬不均匀裂纹板的 J 积分幅值 ΔJ ，随裂纹与软硬区界面之距的减小而减小。

(4) 不均匀体的疲劳裂纹扩展速率主要取决于考虑了不均匀性影响的 ΔJ 。不均匀性对疲劳裂纹扩展速率的影响，包含在 ΔJ 的变化之中。当 ΔJ 减小时，疲劳裂纹扩展速率就减小。

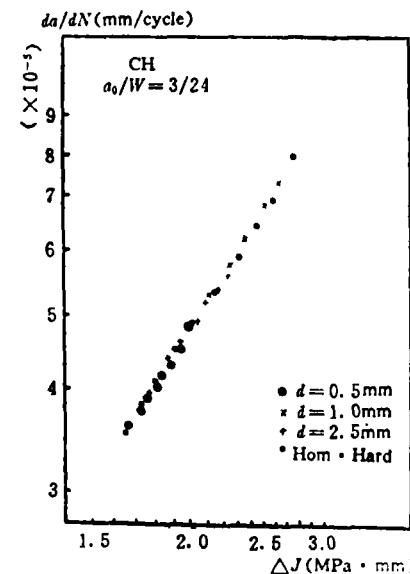


图5 软对硬不均匀板的 $da/dN - \Delta J$ 关系

Fig.5 Relationship between da/dN and ΔJ

(1991年4月17日收到修改稿)

● 考 文 献

- 1 Dowse K R, Richard C E. Fatigue Crack propagation through weld heat affected zones. *Metal. Trans.*, 1971, 2(2): 599~603
- 2 Mukai Y, Nishimura A. Fatigue crack propagation behavior in the hardness heterogeneous field. *Trans. of JWS*, 1983, 14(1): 18~26
- 3 Tian Xitang, Zhu Hongguan, Ma Weidian. Study of the fracture behavior of welded joints with a crack in transverse hard layer. *IIW Doc. X-1084-85*, 1985
- 4 佐藤邦彦著, 崔伟昌译. 焊接接头的强度和设计. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- 5 Sih G C, Moyer JR E T. Path dependent nature of fatigue crack growth. *Engg. Fract. Mech.*, 1983, 17: 269~280
- 6 孙大成. 哈尔滨工业大学博士学位论文. 1988. 58~63

Effect of mechanical heterogeneity on fatigue crack propagation in welded joints

Sun Dacheng

(Transportation Engineering Institute, Tianjin)

Tian Xitang, Zhu Hongguan

(Harbin Institute of Technology)

Abstract In this paper, a soft-hard heterogeneous cracked body has been established as the model for analysis. The fatigue testing of the heterogeneous plates showed that the mechanical heterogeneity affected the fatigue crack growth rate. The numerical simulation of BEM, boundary element method, was used for analysing the heterogeneous fatigue bodies. The smaller the distance between the crack surface and the interface of soft-hard region is, the smaller ΔJ (the amplitude of J-integral in the same growth step) is, and the fatigue crack growth rate become. The influence of heterogeneity on the fatigue crack growth rate is mainly determined by ΔJ .

Key words welded joint; heterogeneity; fatigue crack propagation