

哈尔滨工业大学

工学博士学位论文详细摘要

力学不均匀性对焊接接头  
疲劳裂纹扩展影响的研究

系 别 金属材料及工艺

学科、专业： 焊 接

博 士 生： 孙 大 成

导 师： 田 锡 唐

一九八八年四月

## 内 容 提 要

焊接接头的疲劳裂纹扩展的研究，一直是焊接力学领域中的重要研究课题。它不仅对焊接结构疲劳的安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上的价值。然而，焊接接头的宏观力学性能的不均匀性对疲劳裂纹扩展的影响，尚缺乏深入的探讨。本文采取新的研究手段，进行了焊接接头不均匀体的疲劳裂纹扩展的数值模拟和大量的实验，深入地研究了不均匀体的疲劳裂纹扩展行为，取得了以下主要成果：

1. 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，自行编制和开发了高效而经济的计算源程序，实现了疲劳裂纹扩展的动态数值模拟，为焊接力学的疲劳问题研究，开辟了新的途径。

2. 提出了软对硬、硬对软的带穿透裂纹的不均匀板的计算和实验的分析模型，对进一步研究力学性能不均匀性对疲劳裂纹扩展的影响，给出了一个新的思想。

3. 对于软对硬不均匀板（裂纹在硬区），裂纹离软硬区界面越近， $J$ 积分幅值 $\Delta J$ 和近裂纹尖端张开位移幅值 $\Delta\phi_{90}$ 越小，疲劳裂纹扩展速率越小；对于硬对软不均匀板（裂纹在软区），裂纹离软硬区界面越近， $J$ 积分幅值 $\Delta J$ 和近裂纹尖端张开位移幅值 $\Delta\phi_{90}$ 越大，疲劳裂纹扩展速率越大。

4. 揭示了不均匀体疲劳裂纹扩展的规律，指出：可用裂纹所在区域的材料特征所给出的均匀体的裂纹扩展速率公式来估算相应的不均匀体的疲劳裂纹扩展速率，影响不均匀体疲劳裂纹扩展速率的，主要是相同扩展步下的考虑了不均匀性影响的 $J$ 积分幅值 $\Delta J$ 和近裂纹尖端张开位移幅 $\Delta\phi_{90}$ ，为焊接结构疲劳问题的分析，提供了理论基础。

## 符 号 表

第一个为英语字母，

$a$	半裂纹长
$a_0$	原始半裂纹长
$A_0$	板原始截面积
$b$	韧带宽 $W - a$
$bi$	体积力分量
$\underline{b}$	材料常数
$B$	材料常数
$\underline{B}$	体积力矩阵
$c_i$	系数
$\underline{c}$	材料常数
$C$	材料常数
$C_D$	材料常数
$C_J$	材料常数
<i>Calc.</i>	<i>Calculate</i> 计算结果
CH	<i>Crack in Hard region</i> 裂纹在硬区，对应软对硬不均匀板
CS	<i>Crack in Soft region</i> 裂纹在软区，对应硬对软不均匀板
CMOD	<i>Crack Mouth Opening Displacement</i> 裂纹嘴张开位移
COD	<i>Crack Opening Displacement</i> 裂纹张开位移
CTOD	<i>Crack Tip Opening Displacement</i> 裂纹尖端张开位移
CMOD <sub>max</sub>	对应于 $\sigma_{max}$ 的CMOD
CMOD <sub>min</sub>	对应于 $\sigma_{min}$ 的CMOD

$d$	裂纹面与两种材料交界面的距离
$d_{ij}$	弹塑性系数矩阵分量
$D_i$	应力函数的参数
$\widetilde{D}^{ep}$	弹塑性系数矩阵
$\widetilde{da}/dN$	疲劳裂纹扩展速率
$E$	材料弹性模量
$E_h$	硬区材料弹性模量
$E_s$	软区材料弹性模量
<i>Exp.</i>	<i>Experiment</i> 实验结果
$f$	屈服函数
$F_w$	应力强度因子的板宽修正系数
$\widetilde{F}$	方程 $\widetilde{A}\widetilde{X} = \widetilde{F}$ 中的已知量
$g$	系数
$g_{ij}$	边界积分方程的应力影响系数的子矩阵
$G$	材料剪切模量
$\widetilde{G}$	边界积分方程的应力影响系数矩阵
$h$	夹层宽度
$h_{ij}$	边界积分方程的位移影响系数的子矩阵
$\widetilde{H}$	边界积分方程的位移影响系数矩阵
<i>Hom.</i>	<i>Homogeneous Body</i> 均质材料；在 CH 下，表示 <i>Hom.Hard</i> ；在 CS 下，表示 <i>Hom.Soft</i>
<i>Hom.Hard</i>	均匀硬质材料
<i>Hom.Soft</i>	均匀软质材料
$J$	J 积分
$\left. \begin{array}{l}  J  \\  J  \end{array} \right\}$	<i>Jacobi</i> 矩阵

$J_{max}$	对应 $\sigma_{max}$ 的 J 积分
$J_{min}$	对应 $\sigma_{min}$ 的 J 积分
K	应力强度因子
$K_I$	I 型裂纹的应力强度因子
$K_{max}$	对应 $\sigma_{max}$ 的应力强度因子
$K_{min}$	对应 $\sigma_{min}$ 的应力强度因子
$K_{th}$	应力强度因子门槛值
L	板长
$L_0$	板原始长
$m$	} 材料常数
$m_D$	
$m_J$	
M	边界单元数
$n$	材料常数
$n_i$	单位外法线向量
N	循环周数
$\underline{N}$	非线性项矩阵
$P_i$	面力分量
$\underline{P}$	面力矢量
$\overline{P}_i$	已知面力分量
P	外加载荷
$\underline{P}$	面力矩阵
Q	内部单元数
$r$	两点间距离
$r_i$	两点间距离分量
R	应力比 $\sigma_{min}/\sigma_{max}$
s	路径弧长
S	材料塑性模量
$S_h$	硬区材料塑性模量

$S_s$	软区材料塑性模量
$S_{ij}$	应力偏量
$t$	时间
$T$	边界上的面力
$u$	算子符中的变量
$u_i$	位移分量
$u_j^i$	位移
$\bar{u}_i$	已知位移分量
$\underline{U}$	位移矩阵
$U\phi_{s_0}^{max}$	对应 $\sigma_{max}$ 的邻近软硬区交界一侧的 $\phi_{s_0}^{max}$
$V$	位移
$w$	应变能
$w_r$	权重因子
$W$	半板宽
$x$	横座标
$x_i$	座标分量
$\underline{X}$	未知量矩阵
$y$	纵座标

第一个为希腊字母，

$\alpha$	材料常数
$\beta$	材料常数
$\Gamma$	区域边界
$\Gamma_i$	积分路径
$\Gamma_J$	
$\Gamma'_1$	给定位移的边界
$\Gamma'_2$	给定面力的边界
$\delta$	位移

$\delta_i$	}	Dirac Delta 函数
$\delta_j$		
$\delta_{ij}$		Kronecker Delta 函数
$\delta \varepsilon$	}	应变增量
$\delta \varepsilon_{ij}$		
$\delta \sigma$	}	应力增量
$\delta \sigma_{ij}$		
$\delta \sigma^e$		弹性应力增量
$\delta \sigma^{ep}$		弹塑性应力增量
$\delta \sigma^0$		初应力增量
$\Delta$		伸长位移
$\Delta a$		裂纹扩展增量
$\Delta_B$		计算控制误差
$\Delta C_{MOD}$		CMOD 幅值
$\Delta CTOD$		CTOD 幅值
$\Delta K$		应力强度因子幅值
$\Delta K_{eff}$		等效应力强度因子幅值
$\Delta K_{th}$		应力强度因子门槛值幅值
$\Delta J$		J 积分幅值 $J_{max} - J_{min}$
$\Delta N$		循环周数增量
$\Delta \delta$		位移幅值
$\Delta \phi_m$		$\phi_m$ 的幅值
$\varepsilon$		应变
$\varepsilon_f$		断裂应变
$\varepsilon_{ij}$		应变张量
$\varepsilon_0$		工程应变
$\varepsilon''$	}	塑性应变
$\varepsilon''_{ij}$		

$\varepsilon_Y$	对应屈服应力 $\sigma_Y$ 的应变
$\eta$	局部坐标
$\lambda$	Lame 常数 $\frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$
$\lambda_m$	比例因子
$\mu$	Lame 常数 $\frac{E}{2(1+\nu)}$
$\nu$	Poisson 比
$\xi$	加载率
$\pi$	圆周率
$\sigma$	应力
$\bar{\sigma}$	等效应力
$\sigma_f$	断裂应力
$\sigma_{ff}$	临界断裂应力
$\sigma_{ij}$	应力张量
$\dot{\sigma}_{ij}$	应力张量增量
$\sigma_{ij}^0$	初应力张量
$\sigma_{ij}^t$	总应力张量
$\sigma_0$	工程应力
$\sigma_y$	裂纹尖端 $y$ 方向的应力
$\sigma_y^{max}$	对应 $\sigma_{max}$ 的 $\sigma_y$
$\sigma_Y$	材料屈服应力
$\sigma_{Yh}$	硬区材料屈服应力
$\sigma_{Ys}$	软区材料屈服应力
$\sigma_{max}$	最大应力
$\sigma_{min}$	最小应力
$\phi_{50}$	裂纹尖端后 $50\mu m$ 的张开位移
$\phi_{50}^{max}$	对应于 $\sigma_{max}$ 的 $\phi_{50}$
$\phi_{50}^{min}$	对应于 $\sigma_{min}$ 的 $\phi_{50}$



$\Phi$	位移插值函数
$\Psi$	面力插值函数
$\Omega$	区域
$\mathcal{L}(\cdot)$	算子符
$\mathcal{N}(\cdot)$	算子符

其它无说明的符号，在第一次出现时，均有说明。

关键词：焊接接头，不均匀性，疲劳裂纹扩展，边界元方法，弹塑性

# 目 录

内容提要	i
符号表	ii
关键词	viii
第一章 绪 论	1
§1.1 选题意义	1
§1.2 本领域研究的概况及评述	1
第二章 本研究的目的是和主要工作	18
§2.1 本文的研究目的	18
§2.2 本文的主要工作	18
第三章 研究的主要手段之一——实验研究	20
§3.1 试样	20
§3.2 实验仪器和设备	21
§3.3 实验过程	22
§3.4 实验现象的分析讨论	24
第四章 研究的主要手段之二——边界元方法	30
§4.1 问题的提出	30
§4.2 边界元方法在固体力学中应用的简介	31
§4.3 边界元的非线性问题	42
§4.4 边界元的分区均匀问题	45
§4.5 边界元分析	49
§4.5.1 分析的对象	49
§4.5.2 区域和单元的划分	51
§4.5.3 单元划分的渐增法	51
§4.5.4 内部单元的划分及处理	52
§4.5.5 疲劳裂纹扩展模型	54
第五章 不均匀性对疲劳裂纹扩展中的 J积分及其幅值的影响	58
§5.1 J积分的守恒性	58

§5.1.1 J 积分的定义 .....	58
§5.1.2 J 积分的守恒性 .....	58
§5.1.3 疲劳裂纹扩展中不均匀裂纹体 J 积分的守恒性 .....	59
§5.2 不均匀性对 J 积分及其幅值的影响 .....	61
§5.3 小 结 .....	62
第六章 不均匀性对疲劳裂纹扩展中的 CMOD、 $\delta_{90}$ 及其幅值的影响 .....	78
§6.1 CMOD、 $\delta_{90}$ 的定义 .....	78
§6.2 不均匀性对裂纹面张开位移和 CMOD 及其幅值的影响 .....	79
§6.3 不均匀性对 $\delta_{90}$ 及其幅值的影响 .....	81
§6.4 J 积分及幅值与 CMOD、 $\delta_{90}$ 及幅值的关系 .....	82
§6.5 小 结 .....	82
第七章 疲劳裂纹扩展中塑性区的变化 .....	108
第八章 不均匀体的疲劳裂纹扩展速率 .....	141
第九章 计算结果正确性的论证 .....	147
第十章 结论和展望 .....	151
§10.1 主要结论 .....	151
§10.2 研究展望 .....	152
致 谢 .....	153
参考文献 .....	154

## 第一章 绪 论

### § 1.1 选题意义

焊接结构不但用于金属结构和传统的机械制造业，而且广泛应用于航天、核技术等各个领域〔1〕，已成为使用最广泛的一种结构。

大量的统计资料表明，在破坏的结构中，由于疲劳破坏而引起的失效，约占百分之九十。按照美国国家标准局（NBS）和 *Battelle Columbus* 实验室（BCL）的统计资料〔2〕，以焊接结构仅占失效结构的百分之四十五估算，则仅在美国，每年的损失就高达480亿美元。全世界每年在这方面的损失就更为惊人了。因此，焊接结构的疲劳问题的研究，有着重要的实际意义。同时，由于焊接结构的本身的特殊性，所以，又有它的理论和学术的价值。

焊接接头具有三个特点：一、应力集中变化范围大；二、有较大的残余应力；三、高梯度的力学性能不均匀性。

多年来，科技工作者，就焊接接头的应力集中和残余应力对疲劳的影响，进行了大量的研究，取得了许多成果，而对焊接接头不均匀性对疲劳的影响，则没有引起足够的重视。

焊接接头的宏观力学性能具有高梯度的不均匀性。异种金属的焊接接头的不均匀性，更是不言而喻的。而焊接接头中不可避免地存在着缺陷。焊接结构的疲劳破坏，又往往是从焊接接头处开始的。因此，宏观力学性能的不均匀性，对焊接结构的疲劳行为，特别是疲劳裂纹扩展行为的影响，是焊接结构疲劳断裂研究中的一个极重要的内容，必须予以足够的重视。

### § 1.2 本领域研究的概况及评述

焊接结构（包括钎焊和胶接结构）的主要特征之一，是它的力学性能的不均匀性〔1〕。

研究任何问题，都要力求抓住问题的本质，不仅要充分注意到其与周围同类问题的普遍性，而且更重要的是要注意到该问题所具有的特殊性，只有这样，才能把握住事物的本质和研究的方向。

焊接结构的疲劳失效，大多是起源于焊接接头。因此，焊接结构的

疲劳的研究，必然要集中于焊接接头上。而焊接接头，则是由焊缝金属、熔合区、热影响区和母材组成的〔3〕，不均匀性在较小的范围内会发生很大的变化（图 1—1）。在焊接过程中，不可避免地会产生裂纹一类的缺陷（图 1—2）。这种裂纹又处于一种宏观力学性能的不均匀的环境之中。

残余应力对焊接接头疲劳裂纹的影响，已进行了较多的研究〔5—10〕。竹園等〔9〕考察了初始残余应力对纯弯条件下的疲劳裂纹扩展的影响，并作了有限元分析。黑崎茂等〔7〕研究了 I 型和混合型裂纹体的疲劳裂纹扩展速率受残余应力影响的问题。仁瓶等〔6〕将焊接接头残余应力的影响引入应力比中，以代替一般意义上的应力比。西田等〔8〕的研究指出，残余应力的释放，会引起常应力比的疲劳裂纹扩展速率的降低。本田等〔10〕认为，用由残余应力分布计算所得到的等效应力强度因子幅值，来分析疲劳裂纹的扩展是有益的。

对于诸如由焊接工艺过程中引起的应力集中，近焊缝处金属性能的变化，及残余应变、缺陷等对疲劳裂纹扩展的影响问题，研究工作已取得较大进展，可参看文献〔1, 3, 4〕。

但是，关于焊接接头的宏观力学性能的不均匀性，对疲劳断裂力学参量，如  $CMOD$ ， $CTOD$ ， $CTOA$  和  $J$  积分等的影响，已有的研究报告和文献却不多〔12—14, 46〕。Труфьяков 所做的不均匀光滑圆棒的疲劳实验结果表明〔14〕（图 1—3），对软夹硬焊接接头，不均匀性对疲劳强度基本上没有影响，此时的疲劳强度取决于母材金属，而在

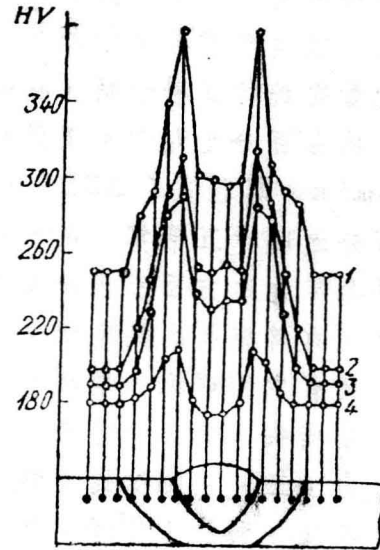
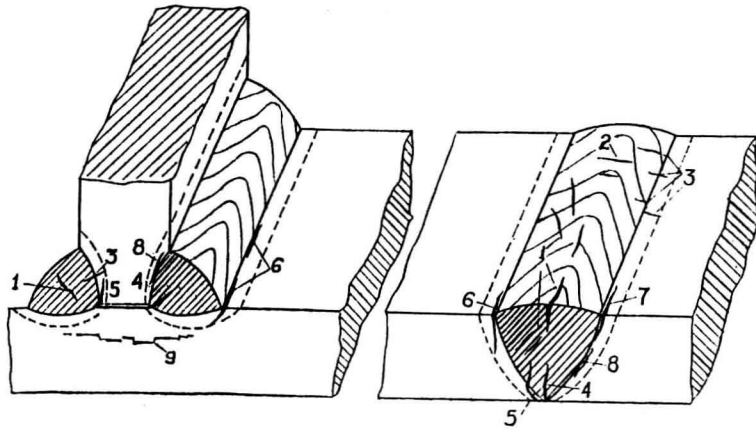


Fig. 1-1 Distribution of hardness in weld and the adjacent zone of four steels

图 1—1 20Г2Б(1),  
18Г2Б(2), 16Г2Б(3),  
10Г2Б(4)钢焊缝与近缝  
区金属的硬度分布



- |                 |            |
|-----------------|------------|
| 1—焊缝中的纵向裂缝与弧形裂缝 | 2—焊缝中的横向裂缝 |
| 3—熔合区附近的横向裂缝    | 4—焊缝根部裂缝   |
| 5—近缝区根部裂缝       | 6—焊趾处纵向裂缝  |
| 7—焊趾处纵向裂缝       | 8—焊道下裂缝    |
| 9—层状撕裂缝         |            |

Fig.1-2 Distribution of cracks in welded joints

图 1—2 焊接接头裂缝分布形态

硬夹软焊接接头中，断裂发生在软夹层中，疲劳强度还取决于夹层尺寸  $h/d^*$  ( $d^*$ : 试样直径)。当  $h/d^* \geq 0.75$  时，接头的疲劳强度在很大程度上取决于夹层的疲劳强度，而当  $h/d^* < 0.75$  时，接头的疲劳强度随  $h/d^*$  的减小而提高(图1—3)。但是疲劳实验所用的是光滑试样，未涉及裂纹萌生和扩展问题。Dowse 等〔46〕通过实验研究了疲劳载荷下，位于软区的初始裂纹(与焊缝(硬区)呈锐角)(图1—4a)的扩展，发现疲劳裂纹在扩展到热影响区附近时，有偏离热影响区的趋势(图1—4b)。其不足之处在于，初始裂纹是从母材(软区)向焊缝(硬区)方向扩展的；而焊接结构的裂纹绝大多数发生在焊接接头焊缝及淬硬区。向井等〔12〕进行了弯曲和拉伸试样的疲劳实验和  $\Delta CTOD$  的有限元分析。初始裂纹也是在母材(软区)中的(图1—5a, b)。当裂纹尖端接近但尚未到热影响区时，扩展速率大幅度地减小了(图1—5c)。向井等将初始裂纹置于母材中，这与焊接结构疲劳破坏往往起源于焊接接头焊缝及淬硬区的裂纹的事

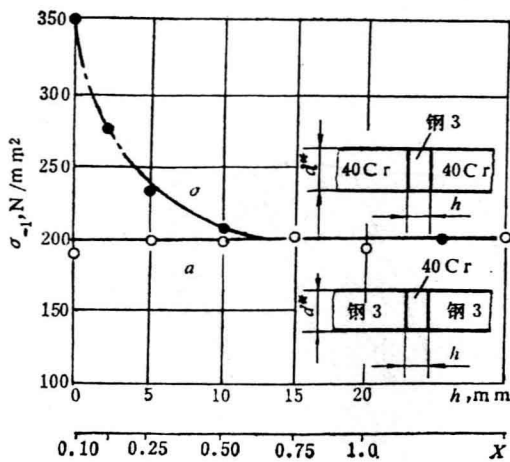


Fig.1-3 Relations between fatigue limit of joint and layer width

图 1—3 接头疲劳极限与夹层尺寸的关系 [14]

○—“硬”夹层情况 ●—“软”夹层情况

实是不符的。另外，向井等进行  $\Delta CTOD$  有限元计算时，裂纹并不扩展，这对于分析疲劳裂纹的扩展尚显不足。Pisarski [13] 通过对铝合金焊缝疲劳裂纹扩展的实验研究，发现在热影响区的疲劳裂纹扩展速率比在母材的要小，指出这与热影响区的微结构和机械性能有关。但没有涉及不均匀性对断裂参量的影响。

哈尔滨工业大学田锡唐教授，开展了对焊接接头不均匀体在静载和疲劳载荷条件下的断裂研究，多年来一直致力于这方面的理论探讨和实验研究，取得许多研究成果 [50—54]。

人们对于疲劳的理论及其应用方面的研究，已有很长的历史了，作了极大量的工作。随着现代断裂力学的兴起和发展，疲劳问题的研究出现了一个崭新的局面。

断裂力学中的线弹性断裂理论，经过近十几年的发展，已比较完善和成熟。其中对于分层的不均匀体的裂纹问题，不少学者已取得了弹性静力学方面的研究成果 [15—22]。这些文献对一些特殊边界和加载条件问题，给出了封闭解，对于象树脂复合材料那样的不均匀体的断裂分

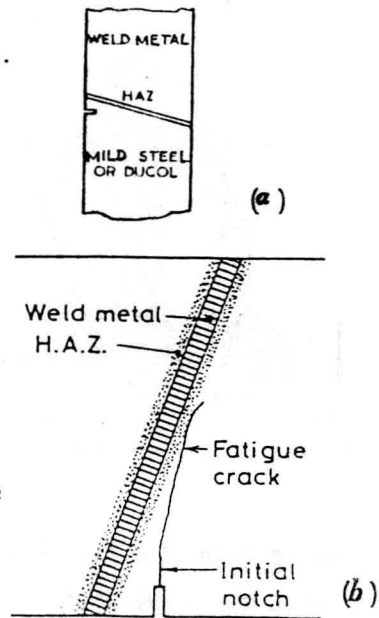
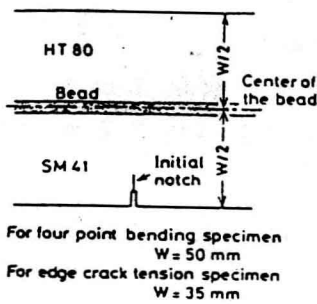
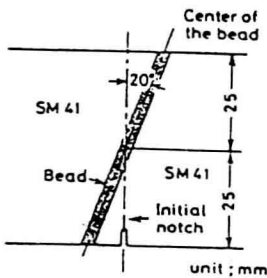


Fig.1-4 Fatigue crack growth path in heterogeneous body

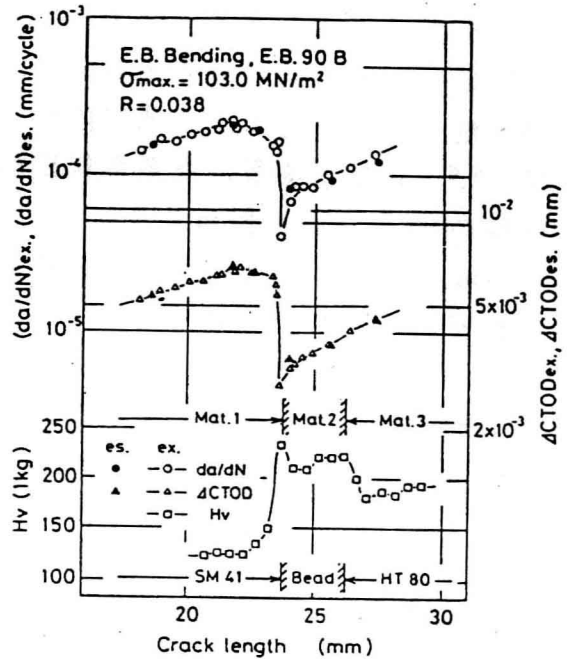
图 1—4 非均匀体疲劳裂纹扩展路径



(a)



(b)



Variation in  $(da/dN)_{ex}$ ,  $(da/dN)_{es}$ ,  $\Delta CTOD_{ex}$ ,  $\Delta CTOD_{es}$  and Hv along the crack length.

(c)

Fig.1-5 Fatigue crack growth rate in heterogeneous body

图 1—5 非均匀体疲劳裂纹扩展速率

析，是很有应用价值的。但对于金属焊接结构的弹塑性的疲劳问题，仅仅用线弹性理论来分析，就显得不够了。因为，焊接接头材料一般具有相当的韧性〔23〕，因而，焊接接头的宏观力学性能的不均匀性，就不只表现为材料的弹性常数不同这样一个简单问题了。

疲劳断裂的研究告诉我们，在疲劳裂纹扩展过程中，裂纹尖端附近不可避免地会发生塑性变形，形成塑性区，存在稳定的裂纹扩展。塑性变形是疲劳裂纹扩展研究中，必须考虑的一个十分重要的因素〔25—43〕。所以，线弹性断裂力学 (LEFM) 分析研究的结果，对于焊接结构的断裂分析，特别是接头的疲劳裂纹问题的分析，是不够的，而必须借助于弹塑性断裂力学的理论。



首先回顾一下对带裂纹的不均匀体的弹塑性分析的研究状况。

日本学者佐藤和丰田〔44〕研究了裂纹沿溶合线的低匹配焊接接头中的裂纹张开位移和应力分布。荒田〔45〕进行了焊接接头的冲击试件的塑性区的分析工作。他们使用的分析方法是有限元法。佐藤、丰田〔44〕还提出全面屈服条件低匹配以及高匹配焊接接头的裂纹张开位移 COD 与应变之间的关系。

实际工程的焊接结构中，裂纹极易出现在焊缝和热影响区。而出现在母材和低强度焊接焊缝的几率是比较小的。文献〔50〕将不均匀体的弹塑性研究向前推进了一大步。对带裂纹的软夹硬及硬夹软不均匀体（为便于研究，将焊接接头简化为夹层的不均匀体，把夹层材料的屈服极限高于母材的屈服极限的不均匀体，称为软夹硬不均匀体，反之，把夹层材料的屈服极限低于母材的屈服极限的不均匀体，称为硬夹软不均匀体），进行了大量的有限元计算和实验工作，给出了许多有意义的结论。文献〔52〕提出，将焊接接头这样一个不均匀体视为均匀体来研究，是不合适的。实际上，宏观力学性能的不均匀性，对断裂表征参量的影响，是不容忽略的。并进一步指出〔50、52〕，当载荷足以使软夹硬不均匀裂纹体的软区出现局部屈服时，硬夹层的裂纹张开位移随硬夹层宽度的减小而增加，对偏裂纹（裂纹面距软硬区界面的距离不相等）的软夹硬不均匀体，此时的裂纹面张开位移变得不对称。靠近界面较近一侧的裂纹面的张开位移比另一侧的裂纹面的张开位移要大。而且，在平均应力小于某一数值时，对于偏裂纹的软夹硬不均匀体，每侧裂纹面的变形，几乎互不相关。材料的力学性能的不均匀性，对每侧裂纹面的变形的影响，主要取决于与该侧裂纹面到同一侧的夹层和基体分界面的距离。这些重要的结论，对于本文研究对象选取的进一步简化，提供了有益的借鉴。

焊接接头的疲劳裂纹问题，不少文献是以实验为基础进行研讨的〔46—49，53，55—57〕。近几年（一九八五、一九八六年），山下满男〔55〕，武藤睦治〔56〕，太田昭彦〔57〕等，对焊接接头的疲劳强度，疲劳裂纹的扩展，以及疲劳裂纹扩展速率  $da/dN$  与应力强度因子幅  $\Delta K$ ，J 积分和裂纹扩展量  $\Delta a$  等之间的关系，作了进一步的实验研究，但是并没有考虑接头的力学性能的不均匀性对疲劳裂纹扩展