

力学性能非对称焊接接头 断裂特征参量研究

张式程讲师 马维甸博士 田锡唐教授

(哈尔滨工业大学) (清华大学) (哈尔滨工业大学)

摘要

根据力学性能和几何的对称性,本文对焊接接头非均匀体进行了分类。研究了更接近实际情况的力学性能非对称的焊接接头非均匀体的断裂特征参量,以及力学性能非对称性对裂纹开裂角的影响。

符号表

a —裂纹半长; c —外加应变; c_{ys} —三种材料中最软材料(S区)的 ϵ_0 值; E —杨氏弹性模量; h —夹层宽度; h_1 —裂纹与距其较近一侧界面的距离; J —J积分; L —模型长度; $n, \sigma_0, \epsilon_0, \alpha$ Ramberg-Osgood 关系式 $\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n$ 中的参数, 其中 $\epsilon_0 = \frac{\sigma_0}{E}$, ϵ 为等效应变, σ 为等效应力; V —加载点位移; W —模型宽度; δ_t —CTOD (裂纹顶端张开位移); δ_m —CMOD (裂纹嘴张开位移); σ —外加应力, 在 $\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n$ 中表示等效应力; σ_{ys} —三种材料中最软材料的(S区) σ_0 值; θ —裂纹开裂角。

1. 序言

由于焊接接头具有力学性能非均匀性,因此,建立焊接接头断裂准则时既要考虑力学性能非均匀性对断裂韧性的影响,同时又要考虑力学性能非均匀性对断裂特征参量的影响。对于前者人们已经做了许多工作^[1],而对于后者直到最近才引起人们的注意^[2]。文献〔2~4〕系统地研究了力学性能非均匀性对软夹硬和硬夹软两类非均质焊接接头断裂特征参量的影响。但是焊缝、热影响区和母材三个区域的力学性能一般是互不相同的,而且一般情况下热影响区的宽度是很小的^[5]。根据上述特点,文献〔6〕建立了图1所示的三个区域。夹层区(A区)宽度(h)较小且可变、裂纹偏心程度(h_1/h)可变的力学模型。

就力学性能而言，当B区与C区力学性能相同而A区与B区和C区力学性能不同时，称其是力学性能对称的，当A、B、C三区力学性能互不相同时，称其是力学性能非对称的。就几何因素（裂纹位置）而言，当 $h_1/h=0.5$ 时，称其是几何对称的，否则称其是几何非对称的。这样，为研究问题方便起见可将裂纹平行于界面的非均质焊接接头按力学性能对称与否、几何对称与否分为以下四类：

- (1) 力学性能对称、几何对称的非均匀体(简称第一类非均匀体)。
- (2) 力学性能对称、几何非对称的非均匀体(简称第二类非均匀体)。
- (3) 力学性能非对称、几何对称的非均匀体(简称第三类非均匀体)。
- (4) 力学性能非对称、几何非对称的非均匀体(简称第四类非均匀体)。

文献〔2～4〕研究了第一、二类非均匀体的断裂特征参量。本文将进一步研究更接近实际情况的第三类非均匀体的断裂特征参量。

2. 有限元分析模型及有限计算的可靠性

本文研究的模型为软-中-硬非均匀裂纹体。三个区域材料的应力应变关系如图2所示，其中标有H、M、S的三条曲线分别为较硬区域、硬度适中区域和较软区域材料的应力应变关系，图中还列出了这三种材料的Ramberg-Osgood参数（其中 σ_0 单位为10 N/mm²，n、α无量纲）。模型的几何尺寸如图3所示，其中反映夹层宽度的 $h/2a$ 值是可变的，可取0.00, 0.25, 0.50, 1.00, ∞（指 $h=L$ ）。这种软-中-硬模型可以模拟某些加过渡材料的异种钢焊接接头^{〔6〕}。

有限元网格由890个常应变三角形单元和494个节点构成，裂纹尖端附近单元的最大边长小于 $a/360$ 。为了与适用于均质情况的EPRI结果对比以检验有限元分析的可靠性，本文将软-中-硬(SMH)模型中夹层两侧的S与H区都取为M区得到MMM均匀介质情况，但计算过程仍按非均质方法进行，计算结果如图4所示，图中V、CMOD、J分别表示加载点位移、裂纹嘴(裂纹中心)张开位移和J积分，下标FEM表示有限元计算结果，EPRI表示按EPRI方法计算的结果。图4的(1)(3)(5)为平面应力情况，(2)(4)(6)为平面应变情况。 σ/σ_0 为远端外加应力 σ 与Ramberg-Osgood参数 σ_0 (屈服应力)的比值。所有情况FEM结果与EPRI结果的误差均小于5%。由于整个有限元计算过程是按非均质介质方法进行的，有限元程序中处理非均匀性的各个环节都得以运行。因此，本文分析SMH非均匀裂纹体的有限元结果是可靠的。

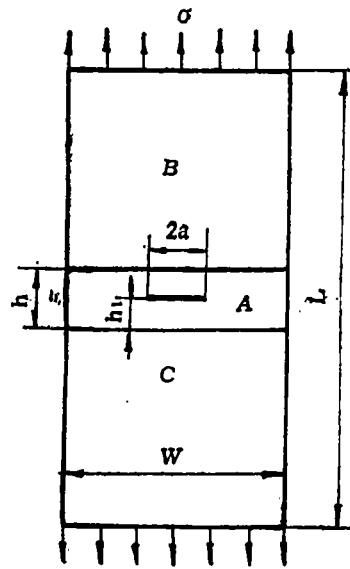


图1 三区非均匀裂纹体

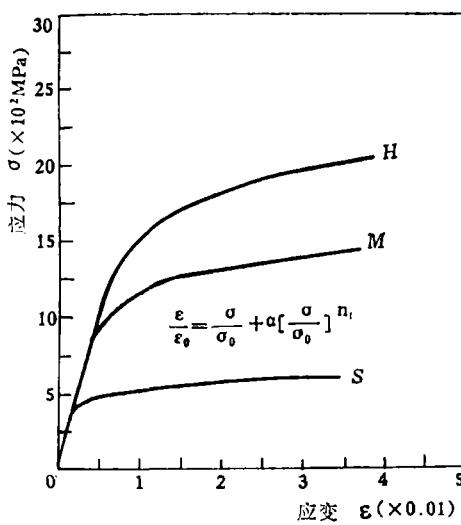


图2 三种材料立力应变关系

H: $\sigma_0 = 149.72$, $n = 8.44$, $\alpha = 0.267$; M: $\sigma_0 = 109.70$, $n = 9.66$,
 $\alpha = 0.365$; S: $\sigma_0 = 46.71$, $n = 11.06$, $\alpha = 0.856$

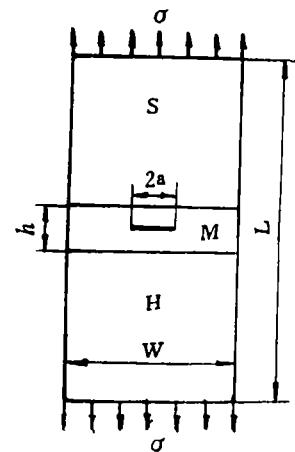
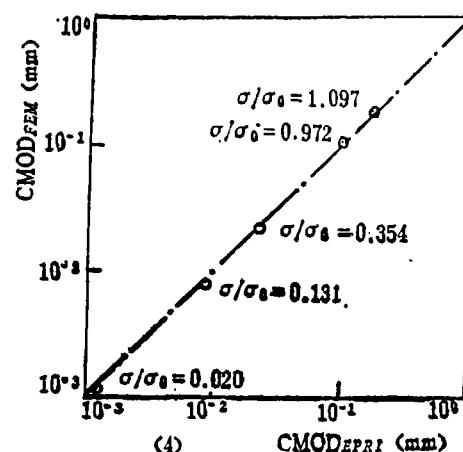
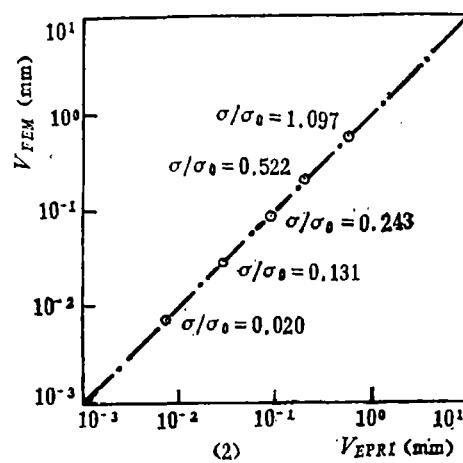
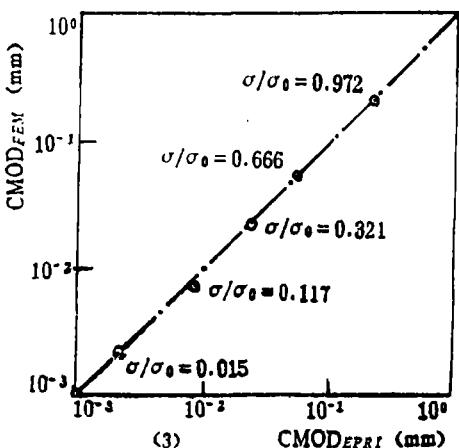
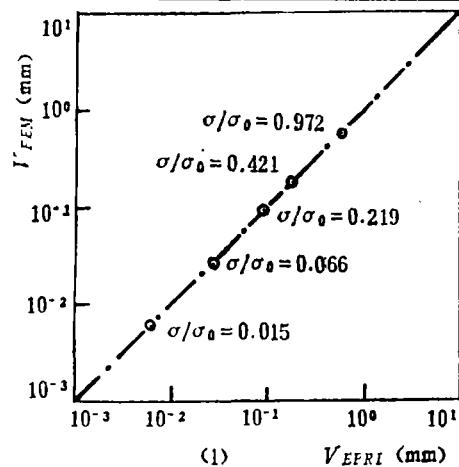


图3 软-中-硬非均匀裂纹尺寸

$L = 72$, $W = 30$, $2a = 6$,
 $h/2a = 0.00, 0.25, 0.50, 1.00, \infty$



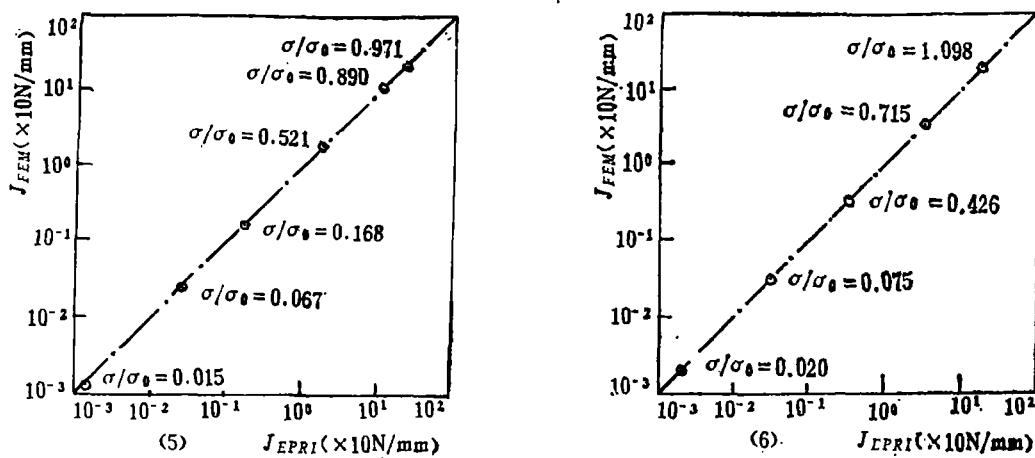


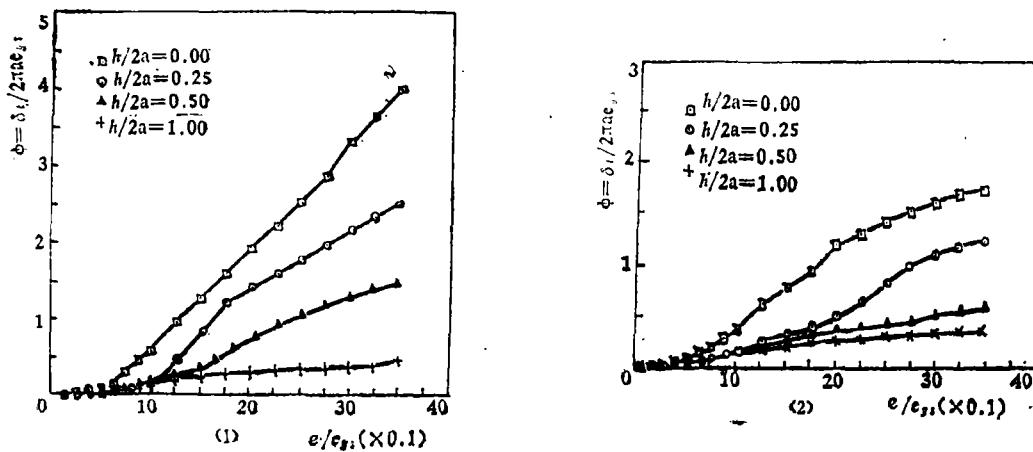
图4 有限元结果和EPRI结果的对比

(1) (3) (5) 平面应力情况 (2) (4) (6) 平面应变情况

3. 有限元分析结果

3.1 COD设计曲线

图5所示为上述软-中-硬非均匀裂纹体的CTOD和CMOD设计曲线，其中(1)、(3)为平面应力情况，(2)、(4)为平面应变情况，CTOD的定义为Wells提出，佐藤发展了弹塑性交界定义^[7,8]。由图可见，在非均匀介质条件下CTOD设计曲线不是一条而是一族，当载荷(e/e_{ys})高于一定值后， $h/2a$ 值的减小使CTOD值增大。CMOD设计曲线也有类似特点，然而，目前英国的PD6493(1980)设计曲线、日本的JWES2805(1980)设计曲线以及我国的CVDA(1984)设计曲线都没有考虑力学性能非均匀性的影响，这一点应该引起人们的注意。



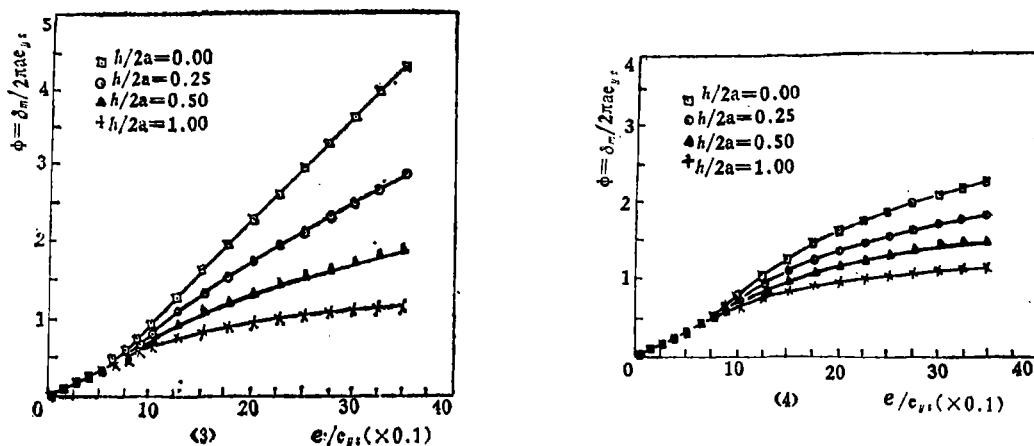


图 5 CTOD、CMOD设计曲线
 (1) (3) 平面应力情况 (2) (4) 平面应变情况

3.2 J积分设计曲线

由于某些情况下 COD 设计曲线已经成功地用于工程实际，因此，有人提出以 J 积分为参量建立 J 积分设计曲线以便于 J 积分准则的工程应用^[9]。但这方面的工作还仅限于均匀介质。因此，为了最终对非均质焊接接头建立 J 积分设计曲线有必要探讨力学性能非均匀性对 J 积分设计曲线的影响。图 5 所示为本文研究的软-中-硬非均匀裂纹体的 J 积分设计曲线，其中（1）为平面应力情况。（2）为平面应变情况。由图可见，当载荷(e/e_{y_s}) 高到一定程度后， $h/2a$ 值的减小使 J 积分值增大，因此，对于非均匀介质 J 积分设计曲线也应为一族而不是一条。

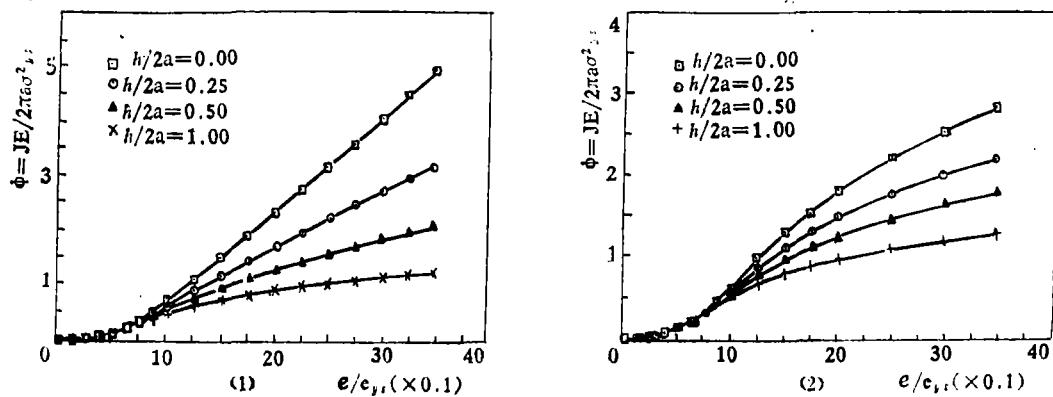


图 6 J积分设计曲线
 (1) 平面应力情况 (2) 平面应变情况

3.3 裂纹开裂角

对于非均匀裂纹体，裂纹偏转问题是人们普遍关心的问题^[10,11]，由于力学性能

和几何的对称性,第一类非均匀体裂纹开裂角为零。对于第二类非均匀体,文献(4)的研究结果表明裂纹偏离夹层中心线是导致裂纹偏转的原因之一。即几何非对称是导致裂纹偏转的一个原因。对于几何对称、力学性能非对称的第三类非均匀体,按本文软-中-硬模型计算的裂纹开裂角如图7所示,其中(1)为平面应力情况,(2)为平面应变情况,可见在裂纹没有偏离夹层中心线(几何对称的情况下,由于力学性能的非对称性,使夹层中的裂纹仍有一定的开裂角,而且载荷越高,开裂角越大,夹层宽度($h/2a$)越小相同载荷下开裂角越大,并且开裂角的方向是由裂纹所在区域偏向两侧较软的区域。

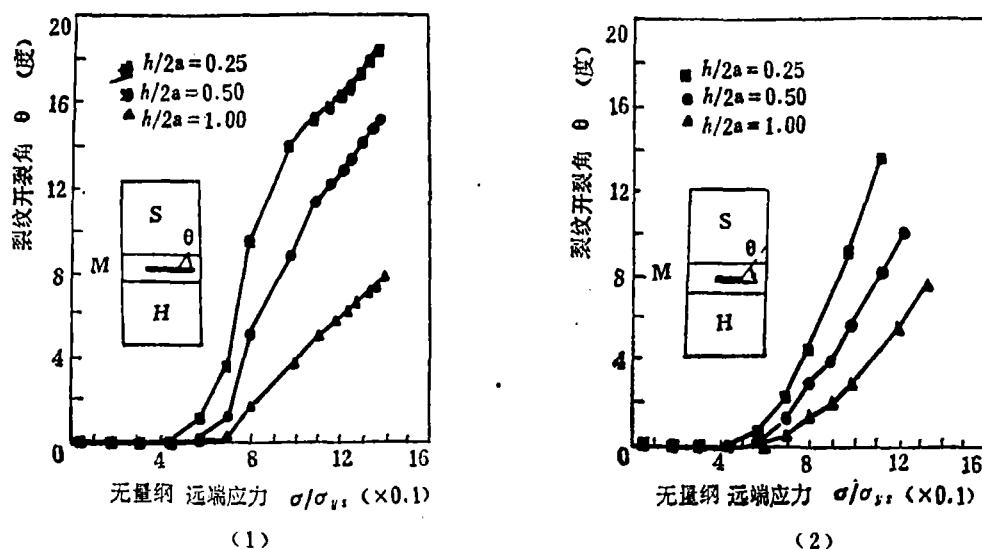


图7 裂纹开裂角
(1) 平面应力情况 (2) 平面应变情况

4. 结 论

1. 非均质裂纹体 COD 设计曲线、J 积分设计曲线应为一族而不是一条,而现行国内外有关 COD 设计曲线标准中没有反映这一特点,这一点应该引起人们的注意。
2. 对于软-中-硬类型的焊接接头,当载荷超过一定程度后夹层宽度($h/2a$)的减小将使 CTOD、CMOD 和 J 积分值增大。
3. 对于非均匀裂纹体,力学性能非对称是导致裂纹偏转的一个因素,并且夹层中裂纹的开裂角偏向两侧较软的区域。

(1987年3月15日收到修改稿)

参考文献

- (1) Satoh K., Toyoda M.: IIW Doc. X-1113-86.
- (2) Tian Xitang, Zhu Hongguan, Ma Weidian, Proceedings of the International Conference on Quality and Reliability in Welding, September 6-8, (1984), Vol. 3, C-5.
- (3) Tian Xitang, Zhu Hongguan, Ma Weidian: IIW Doc. X-1084-85.
- (4) 马维甸, 哈尔滨工业大学工学博士学位论文, 1985年12月。
- (5) Sekiguchi H., Fundamental Research on the Welding Heat-Affected Zone Steel, Tokyo, Nikkan Kogyo Shimbun, (1976).
- (6) 张式程: 哈尔滨工业大学博士学位论文, 1987年12月。
- (7) Wells A.A.: British Welding Journal, November (1963), P563~570.
- (8) 佐藤邦彦, 豊田政男他, 《溶接学会論文集》, 2 (1984), 第3号, P447~454。
- (9) Begley J. A., Landes J. D. and Wilson W. K.: ASTM STP 560, (1974), P155~169.
- (10) Dolby R. E.: Metal Construction and British Welding Journal, July (1974), P228~233.
- (11) Arata Y., Matsuda F. et al: IIW Doc. IV-195-76.

STUDY OF FRACTURE CHARACTERIZING
PARAMETERS OF WELDED JOINTS WITH
ASYMMETRICAL MECHANICAL HETEROGENEITY

Lecturer Zhang Shicheng
(Harbin Institute of Technology)

Postdoctor Ma Weidian
(Qinghua University)
Professor Tian Xitang
(Harbin Institute of Technology)

Abstract

In this paper cracked welded joints are classified according to their heterogeneity and location of the crack into four types: 1. symmetrical heterogeneity with a central crack, 2. symmetrical heterogeneity with an eccentric crack, 3. asymmetrical heterogeneity with a central crack, and 4. asymmetrical heterogeneity with an eccentric crack. A study has been made on the fracture characterizing parameters of cracked welded joints of the third type and also on the effect of asymmetrical heterogeneity upon the crack deviation angle.