

平面应力条件下非均质焊接接头中的 J 主导*

南京航空航天大学 康继东** 陈士煊 徐志怀 高德平
天津大学 张玉凤 霍立兴

【摘要】 采用弹塑性大变形有限元, 以低匹配焊接接头为例, 研究了平面应力条件下非均质焊接接头中 I 型裂纹的 J 主导问题。结果发现, 从应力场出发, J 主导是有条件在的, 此条件与匹配有关而与裂纹或韧带长度无关。

主题词: 平面应力 焊接接头 匹配

分类号: TG404 V229.8

1 引言

在均质材料的弹塑性断裂力学研究中, HRR 场理论^[1,2]的提出引起了人们对实际裂纹体中裂纹尖端 J 主导区研究的强烈兴趣。对于平面应变情形而言, 在大范围屈服时, McMeeking^[3] Parks^[3]以及 Shih^[4] German^[4]都曾指出, 双边裂纹试件或深裂纹弯曲试件中韧带全屈服的条件下只有在 $C \geq 25J/\sigma_s$ 时才存在 J 主导, 其中 C 为韧带长度, σ_s 为材料的屈服点应力。而对于中心裂纹试件则需在 $C \geq 200J/\sigma_s$ 时才存在 J 主导^[3]。对于平面应力情形而言, 从应力场出发, Liu^[5]以及 Sun^[6]都证明 J 主导存在。但关于位移场的讨论尚有分歧, 例如 Zhang & Ravi-Chandar^[7]和 Dadkhah & Kobayashi^[8]都发现横向位移场(u 场)中 J 主导失效。

由焊接引起的材料冶金、力学性能的不均匀性导致带有焊接接头的一类结构的力学性能与均质材料有着本质的区别。这里需要指出的是, 在 MIL-E-5007D 和 MIL-STD-1783 中都未对焊接接头力学性能予以特别说明, 导致在选择断裂参数及断裂判据时存有不少疑问^[9]。本文中, 以 I 型静止裂纹为例, 采用平面应力弹塑性有限变形有限元方法进行数值分析, 从应力场出发, 得到了关于非均质焊接接头中 J 主导的一些有益结果。

2 有限元计算模型及细节

通常, 焊接接头依焊缝金属与母材的屈服点应力之比分成高匹配、低匹配与等匹配 3 种。当焊缝金属的屈服点应力低于母材时, 称之为低匹配焊接接头。

在本研究中, 采用 OK68.45 焊条施焊 9%Ni 钢制成的低匹配焊接接头被考虑成由焊缝金属、母材和热影响区(HAZ)三部分组成, 在焊缝中含有一中心裂纹。模型尺寸如图 1(图中 $L =$

500 mm, $W = 110$ mm, $\delta = 12.5$ mm, $B = 16$ mm, $H = 3.2$ mm) 所示, 其 HAZ 宽度是采用 3% 硝酸酒精腐蚀真实大小尺寸的焊接接头后在工具显微镜下得测量得到的平均值^[9]。

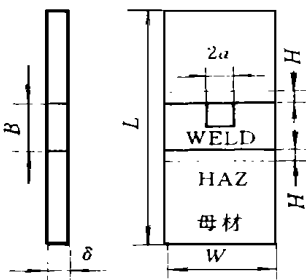


图 1 试件形状与尺寸

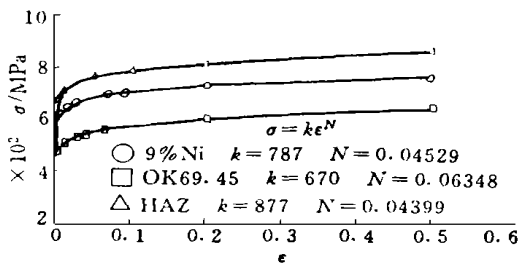


图 2 接头各部分机械性能

为考虑韧带长度的影响, 计算了 $2a = 10$ mm (对应于全面屈服断裂) 和 $2a = 30$ mm (对应于韧带屈服断裂) 两种裂纹尺寸。裂纹尖端处理成一半圆弧, 圆弧半径 $R_0 = 0.08$ mm。采用常规平面应力 8 节点等参元, 2×2 阶高斯积分点。由试件几何形状与受力的对称性, 只取 1/4 模型尺寸进行分析。对于 $2a = 10$ mm 试件共划分了 210 个单元, 709 个节点, 其中母材 129 个单元, 焊缝 70 个单元, HAZ 13 个单元。对于 $2a = 30$ mm 试件共划分了 210 个单元, 699 个节点, 其中焊缝 70 个单元, HAZ 13 个单元。单元最小径向尺寸为 0.08 mm。为比较方便, 裂纹尖端网格划分保持不变。接头各部分材料的单轴拉伸应力应变关系曲线如图 2 所示。需要说明的是 HAZ 性能是依照 HAZ 区的维氏硬度的实测值按下式拟合得到的^[9, 10]

$$\sigma_s = (H_v \times 9.8/3.0) (0.16)^N, \quad \sigma_s \cdot N = 30 \quad (1)$$

式中 H_v 为维氏硬度值。

采用平面应力状态下基于 Lagrange 标架的 Total-Lagrangian (T.L.) 方法和 Von Mises 屈服准则进行弹塑性有限变形有限元分析。全部有限元计算工作是在 486 上由微机版本的 ADINA 程序运行得到。有限元计算是从小范围屈服直至韧带屈服或全面屈服。计算结果与相应的小型宽板试验结果比较, 两者符合较好^[9]。

3 裂纹尖端 HRR 场及 J 主导条件的验证

由 I 型平面应力问题的裂纹尖端应力场的局部解—HRR 场^[1, 2], 有:

$$\sigma_{ij}(R, \theta) = \sigma_s [EJ/(\alpha \sigma_s I_n R)]^{1/(n+1)} \tilde{\sigma}_{ij}(R, \theta) \quad (2)$$

其中 I_n 为一与 n 有关的常数, 可由积分算出^[1]。这里, $n = 1/N$ 。

对 (2) 式两边取对数, 并以 J/σ_s 表征极坐标下距裂纹尖端距离 R 的名义化尺度, 则有:

$$\lg(\sigma_{ij}/\sigma_s) = -[1/(n+1)] \lg[R/(J/\sigma_s)] + \text{Const} \quad (3)$$

式中, $\text{Const} = \lg[E/(\alpha \sigma_s I_n R)]^{1/(n+1)} \tilde{\sigma}_{ij}(R, \theta)$ 。

(3) 式表明在双对数坐标中, 给定角度 θ 下, σ_{ij}/σ_s 与 $R/J/\sigma_s$ 的关系为一斜率为 $-(1/n+1)$ 或 $-(N/N+1)$ 的直线。

4 结果及讨论

以裂纹尖端塑性区内最靠近裂纹延长线的高斯积分点上的应力分量 σ_r 及此高斯积分点距裂纹尖端距离 R 按 (3) 式进行处理, 得到各高斯积分点处的 $\lg \sigma_r/\sigma_s^W$ 与 $R/J/\sigma_s^W$, 其中 σ_s^W 为

裂纹所在区域—焊缝金属的屈服点应力。 J 为相应外加载荷水平下的远场 J 积分平均值 J_{AV} , J 积分值由专门编制的程序^[9]按下式^[3,11]给出:

$$J = \int \left[W_{n1} - s_{ij} n_j \frac{\partial U_i}{\partial x_1} \right] d\Gamma$$

(4)

上式与文献[11]中表达式的差别在于应力应变分别是由第2类 Piola– Kirchhoff 应力和 Green– Lagrange 应变替换的。图3(a,b)中分别给出了 $2a=10\text{ mm}$ 、 $2a=30\text{ mm}$ 时的 $\lg(\sigma_y/\sigma_s^W) \sim \lg(R/J/\sigma_s^W)$ 关系曲线。

对于焊缝金属强度低匹配的焊接接头对应于全面屈服断裂裂纹尺寸($2a=10\text{ mm}$)试件,从图3a可发现在所有数据的中部存在着一直线段。当外加载荷水平较低时,相应的数据都在此直线段上,而当外加载荷水平增加时,则在该直线的端部出现偏离此直线的数据,出现非线性段,这表明 $\lg(\sigma_y/\sigma_s^W) \sim \lg(R/J/\sigma_s^W)$ 有较好的线性关系,但在其它 $C\sigma_s^W/J$ 下,则失去此线性关系。因此 J 主导条件可表示为 $C\sigma_s^W/J \geq 1190$ 。对此直线段采用最小二乘法拟合可以发现其斜率为 -0.05058 。需要指出的是,此斜率与母材或焊缝金属的 $-1/(n+1)$ 或 $-N/(N+1)$ 均不相同。

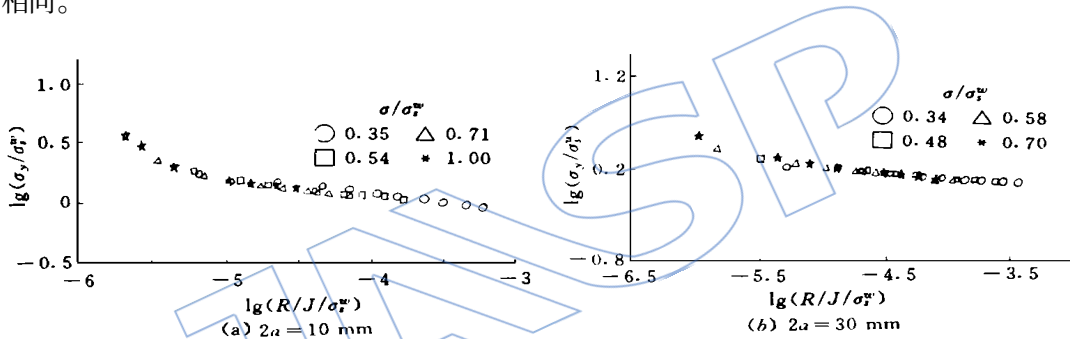


图3 $\lg(\sigma_y/\sigma_s^W) \sim \lg(R/J/\sigma_s^W)$ 关系曲线

对图3b中对应于韧带屈服断裂的裂纹尺寸($2a=30\text{ mm}$)作基于图3a的同样处理得到相应的 J 主导条件为 $C\sigma_s^W/J \geq 1118$, 其直线段斜率为 -0.05723 , 此斜率也与母材或焊缝金属的 $-1/(n+1)$ 或 $-N/(N+1)$ 均不相同。

从上述结果可以发现韧带尺寸(c)或裂纹尺寸($2a$)对 J 主导条件没有强烈的影响。因此,对本文所研究的这种焊接接头,至少在本文的试件几何尺寸下,可偏于保守地定出 J 主导条件为 $C\sigma_s^W/J \geq 1200$ 。

综上所述,平面应力条件下焊接接头中 J 主导是有条件存在的。 J 主导条件的提出至少意味着平面应力状态下焊接接头中 J 积分的应用是有条件的,这个条件包括两方面的内容:(1)作为一个局部解的 HHR 场仅是在一定外加应力水平以下方可应用。(2)对于平面应力状态的 J 积分测试,其试件尺寸是必须满足上述 J 主导要求的。

必须指出,与均匀材料中关于 J 积分主导性的研究结果^[5,6]完全不同,非均质焊接接头中 J 主导是有条件存在的,其根本原因在于接头中各部分变形的不同时性与不均匀性,且这种变形不同时性与不均匀性是接头匹配程度(以焊缝金属与母材的屈服点应力大小的比值表示)有关的。这可以从接头的塑性区扩展行为中得到证实^[9]。对于低匹配焊接接头中心裂纹试件,在裂纹尖端首先发生屈服,随着外加应力水平增加直至焊缝金属屈服点,塑性变形限制于焊缝

金属内而并不向母材扩展。当外加应力水平超过焊缝金属屈服点后, 塑性变形才有可能转向母材。

5 结 论

(1) 对低匹配焊接接头裂纹尖端应力场的 J 主导条件的研究表明, 至少对于本文所研究的试件构形而言, 非均质焊接接头中 J 主导是有条件的。

(2) 没有发现韧带长度或裂纹尺寸对 J 主导条件的强烈影响。

(3) 对于本文所研究的接头的 $\lg(\sigma/\sigma^Y) \sim \lg(R/J/\sigma^Y)$ 关系曲线, 其直线段斜率与母材或焊缝金属的 $-1/(n+1)$ 或 $-N/(N+1)$ 均不相同。

参 考 文 献

- 1 Hutchinson J W. Singular Behavior at the End of a Tensile Crack in a Hardening Material. J. Mech. Phys. Solids, 1968, 16(1): 13– 31
- 2 Rice J R, Rosegren G R. Plain Strain Deformation Near a Crack Tip in a Power– Law Hardening Material. J. Mech. Phys. Solids, 1968, 16(1): 1– 12
- 3 McMeeking R M, Parks D M. On Criteria for J – Dominance of Crack Tip Fields in Large Scale Yielding. ASTM STP 668: 175– 194
- 4 Shih C F, German M D. Requirement for a One Parameter Characterization of Crack Tip Fields by the HRR Singularity. Int. J. Fracture, 1981, 17(1): 27– 43
- 5 Liu H W, Zhuang T ao. Characteristic Crack Tip Field and the Characterizing Parameter for Elastic– Plastic Fracture Mechanics. ICF7, India, 1984
- 6 Sun Jun. Mode I Plane Stress Crack Tip Constraint for Elastic– Plastic Material with Different Strain Hardening. Engng. Fracture Mech., 1992, 54: 235– 242
- 7 Zhang Y, Ravi– Chandar K. On the Dominance of HRR Field. Proc. Fifth. Int. Conf. on Num. Method in Fracture Mech., Pineridge Press, 1990: 557– 569
- 8 Dadkhah M S, Kobayashi A S. HRR Field in an Aluminum SEN Specimen. Proc. 1989 SEM Annual Meeting, Cambridge, 1989
- 9 康继东. 非均匀体中的 J 积分参量及其应用可行性研究: [学位论文]. 天津大学, 1994
- 10 Auerkari P. On the Correlation on Hardness with Tensile and Yield Strength. VTT Report, 416, VTT, 1986
- 11 Rice J R. A Path Independence Integral and the Analysis of Strain Concentrations by Notches and Crack. J. of Appl. Mech., 1968, 35(2): 379– 386

(责任编辑 魏星禄)