断裂应变对含损伤焊接接头裂纹扩展 驱动力影响的数值

李继红, 张建勋

(西安交通大学 材料科学与工程学院,西安 710049)

摘 要:利用弹塑性损伤一应变耦合有限元方法,对含有损伤的焊接接头三点弯曲裂 纹试样进行了模拟计算,讨论了母材区的断裂应变 є_{/В}的变化对焊缝区裂纹的扩展驱动 力 J 积分的影响规律。结果表明,焊缝中裂纹的断裂行为受到焊缝两侧母材断裂应变 的明显影响。对于无论何种强度匹配的接头,在焊缝区各项力学性能参数保持不变的 条件下,随着母材区断裂应变的减小,损伤率的增加,损伤区的扩大,焊缝中裂纹韧带区 塑性应变及裂纹扩展驱动力 J 积分均有明显的提高;随着接头强度匹配比 *M* 的降低 (即母材屈服强度的升高),母材区断裂应变的变化对 J 积分的影响作用逐渐减弱;随着 焊缝宽度的逐渐增加,母材断裂应变的变化对 J 积分的影响作用逐渐减弱,焊接接头试 样的计算 J 积分值逐渐趋向于全焊缝材料试样计算得到的 J 积分值;当焊缝宽度增加到 2 *H*/*a*约为 0.6 时,母材断裂应变的变化对焊缝区裂纹扩展驱动力 J 积分的影响作用完 全消失。



李继红

关键词: 焊接接头; 损伤; J积分 中图分类号: TG404 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2004)01-52-06

0 序 言

焊接结构是发生事故较多的工程结构。这源于 经历不均匀加热和冷却过程所形成的焊接接头的固 有特性,即焊接接头中存在组织与力学性能的不均 匀性,同时也存在着各种冶金和几何缺陷。基于强 度组配的概念,诸多研究均表明,力学性能不均匀性 对含有宏观裂纹的焊接接头的断裂力学参量^[1,2](J 积分、裂纹尖端张开位移 CTOD 等)及断裂韧度^[3] 有很大的影响。另一方面,由于各区域组织及力学 性能的不同,焊接接头中各种微观缺陷的萌生演化 也存在不均匀性,这必然会影响到接头的变形以及 断裂行为。

由 Kachanov^{[4}引入的连续介质损伤力学理论, 对于探讨材料内部微观结构的变化,无疑是一个有 力的工具。金属材料的韧性断裂是内部空穴形核、 长大以及复合的一个渐进过程。Gurson^[5]首先对材 料中的微孔洞进行了研究,建立了带孔材料的塑性 势理论,从而使韧性损伤问题的研究有了重大突破。 随后 Tvergard^[6]着眼于小的空洞比和小空洞的聚集

收稿日期:2003-04-22 基金项目:国家教委骨干教师基金资助项目 对 Gurson 模型进行了修正。Lemaitre¹⁷ 和 Chaboche¹⁸ 等人则从宏观角度的连续介质力学和不可逆热力学 出发,基于内变量理论和应变等效性假设,阐述了一 系列(韧塑性,疲劳,蠕变)损伤演化方程。但是,由 于焊接接头本身所特有的复杂性,所以关于它的损 伤问题的研究远没有达到像均匀材料那样深入,并 且,多集中于焊接热模拟材料上^[9-10],针对实际焊 接接头的研究目前仍然比较缺乏。

作者利用弹塑性损伤一应变耦合有限元方法, 对含有损伤的焊接接头三点弯曲裂纹试样进行模拟 计算,以研究焊接接头各部分损伤演化的不均匀性 对裂纹扩展驱动力 J 积分的影响规律。

1 损伤演化及损伤耦合本构方程

针对弹塑性损伤,作者引入各向同性损伤变量, 定义为

$$D = \frac{\Delta_A - \Delta_{A_e}}{\Delta_A},\tag{1}$$

式中: ΔA 是围绕一个材料点的"无穷小"材料单元 任一截面的总面积; ΔA_e 是除去该截面的损伤(微孔 洞、微裂纹,及其边缘效应)面积后的有效承载面 积。根据应变等价性假设,该点(单元)的有效应力 张量可以定义为

$$\sigma_{ij}^* = \frac{\sigma_{ij}}{(1-D)^\circ}$$
(2)

对于各向同性韧性损伤及各向同性硬化情况, Lemaitre 和 Chaboche 所推导出的适合于实际工程 应用的一般的韧塑性损伤演化方程^[7,8] 为

$$\mathrm{d}D = \frac{D_C}{\varepsilon_f - \varepsilon_D} \left[\frac{2}{3} (1+\nu) + 3(1-2\nu) (F_\sigma)^2 \right] p^{\frac{2}{n}} \mathrm{d}p,$$
(3)

式中: $p = \int \left(\frac{2}{3} \epsilon_{f}^{p} \epsilon_{f}^{p}\right)^{\frac{1}{2}} dt$,为损伤累积等效塑性应 变; ϵ_{f}^{p} 为塑性应变率张量; D_{C} 为材料单元发生破坏 时的临界损伤值; n为材料的应变硬化指数; ν 为 泊松比; F_{σ} 为应力三轴度; ϵ_{f} 为一维条件下材料发 生破坏时的临界等效塑性应变(简称断裂应变),即 有 $p \mid_{F_{\sigma} = \frac{1}{3}} = \epsilon_{f} \rightarrow D = D_{C}$; ϵ_{D} 为一维条件下材料损 伤开始发展时的等效塑性应变,即有 $p \mid_{F_{\sigma} = \frac{1}{3}} < \epsilon_{D} \rightarrow D$ =0.

一般认为,材料的韧性断裂是塑性变形和应力 状态(应力三轴度)共同作用的结果,因此可以将一 维条件下(F_s=1/3)的断裂应变 & 作为材料的一 种韧性断裂判据。

根据无损伤材料的弹塑性本构方程及应变等价 性假设,损伤材料的弹塑性本构方程的增量形式得 以导出^[11],即

损伤材料的有效弹塑性矩阵 $\begin{bmatrix} C_D^{ep} \end{bmatrix}$ 为 $\begin{bmatrix} C_D^{ep} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [C] - \frac{[C] \{a\} \{a\}^T [C]^T}{H + \{a\}^T [C] \{a\}} \end{bmatrix}$ (1-D), (5) 式中: [C]为材料在无损伤状态下的弹性矩阵; $\{\alpha\}$ 为有效的流动矢量,可以根据塑性耗散势的一般形 式及有效应力张量得到; H 为损伤材料的有效应变 硬化参量。

2 计算模型及材料

考虑到实际中焊接接头的复杂性以及研究问题 的简便起见,作者将焊接接头简化成为"母材+焊缝 +母材"的数值计算模型,并假设母材金属和焊缝金 属的应力应变行为均遵循 Ramberg—osgood 假设, 即

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{F}, \qquad \sigma \leqslant \sigma_0. \qquad (6)$$

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^n, \qquad \sigma > \sigma_0. \tag{7}$$

这里假设母材金属和焊缝金属具有相同的弹性 模量 E,泊松比 ν ,以及相同的应变硬化材料常数 α 和 n,计算中分别取 $E = 2.06 \times 10^5$ MPa, $\nu = 0.3$, $\alpha = 1.0$, n = 6.0。而 σ_0 , ε_0 分别为材料的屈服强度 和屈服应变,焊缝金属屈服强度取 558 MPa,而母材 金属屈服强度分别取 372 MPa,558 MPa 和 930 MPa 从而构成不同匹配的焊接接头,匹配比(焊缝屈服应 力/母材屈服应力) M分别为 1.5, 1.0 和 0.6。

母材和焊缝金属中的损伤均遵循式(3)的韧塑 性演化方程。计算中,母材和焊缝金属保持一致的 损伤参数为初始损伤 $D_0 = 0.0, D_c = 0.99, \epsilon_D =$ 0.0。焊缝金属的断裂应变 ϵ_{fW} 保持不变,取0.2,而 母材的断裂应变 ϵ_{fB} 分别取0.05,0.1,0.2,0.3,0.4, 0.5,以分析母材金属的断裂应变的变化对裂纹扩展 驱动力 J 积分的影响规律。

如图 1a 所示,采用三点弯曲焊接接头试样研究 其断裂损伤行为。其中裂纹位于焊缝的中心,并承 受集中载荷 P 的作用。





这里,试样应力状态假设为平面应力状态。试 样宽度 W=40 mm,裂纹深度 a=20 mm,裂纹深度 比 a/W=0.5。为了进一步研究母材因素对焊接接 头焊缝区裂纹的断裂力学参量的综合影响,焊缝宽 度与裂纹深度之比 2H/a 分别取 0.05,0.1,0.2, 0.4,0.6。

注意到试样结构与加载方式的对称性,只取试 样的 1/2 进行有限元网格划分。有限元分析网格由 779 个四边形 8 结点等参数单元和 2 476 个节点构 成。在应力应变场的高梯度区域(例如裂纹尖端), 有限元网格进行了细化。最终试样整体网格划分形 式如图 1b 所示,其中裂端采用钝化裂纹模型 (图 1c)。

在远离裂纹尖端的区域选择7条不同的环绕裂 尖的路径,沿每条路径所经过的单元进行数值积分, 获得每条路径上的J积分值,并基于J积分的路径 无关性进行算术平均,最终获得某一外载荷条件下 裂纹试样的J积分值。

3 结果与讨论

3.1 母材区断裂应变的变化对 J 积分的影响

图2 比较了 2H/a=0.05 时强度等匹配接头 (M=1.0)母材断裂应变 ϵ_{fB} 的变化对裂纹扩展 驱动力 J 积分及韧带区塑性应变分布的影响规律。 其中载荷 P 和 J 积分进行了无量纲化处理, $P_0=$ $0.536\sigma_0(W-a)^2/4W$, σ_0 为焊缝金属的屈服应力 (下同), b=(W-a), 为裂纹试样的韧带长度。



Fig. 2 Influences of ε_{fB} on J— integral and plastic

strains along toughness ligament (M=1, 0, 2H/a=0, 05)

从图 2a 中可以看出, 在同样的外载荷作用下, 随着 ɛß 的减小, 裂纹体的 J 积分值均有明显的增加; 从弹塑性断裂力学的观点来说, J 积分代表着试 样中裂纹的扩展驱动力。因此, ɛß 的减小将增加焊 缝区中的裂纹的扩展趋势。图 2b 中, 塑性应变随取 样点远离裂尖而迅速降低; 在同样的外载荷作用下, 韧带区的等效塑性应变随 ε_β 的减小而有明显的提高;对于强度匹配比 *M*=1.0 的通常意义上的等匹 配接头,虽然母材金属同焊缝金属的一般力学性能 (弹性模量,强度.泊松比,应变硬化性能)相同,但母 材金属和焊缝金属的损伤参量之间存在着的差异依 然对焊缝区裂纹的断裂力学参量具有显著的影响, 即研究焊缝区裂纹的断裂行为,不仅要考虑到焊缝 区自身材料断裂损伤性能的影响因素,而且对于焊 接接头这种力学性能不均匀体,更要对焊缝两侧母 材区的断裂损伤行为加以考虑。而母材的损伤行为 在以往的研究中是被忽视的。

根据式(3)可知,随着 ε_β的减小,母材区的损伤 演化率增加。即在同样的外载荷作用下, ε_β 的降低 将导致该区域损伤状况的加剧(如图 3 所示),材料 发生劣化和软化,因而必然减弱了对于焊缝区的变 形约束,该区域塑性变形更为自由,塑性应变更多地 集中在裂纹尖端附近韧带区上,使得裂纹扩展驱动 力J积分增加,裂纹扩展更易于进行;反之,随着 ε_β 的升高,母材性能趋向硬化,对焊缝区变形的约束增 加,促使焊缝区的塑性变形更为均匀,降低了裂纹尖 端附近韧带区上的应变集中程度,裂纹扩展驱动力 J 积分降低。



图 4 给出了其它两种强度匹配焊接接头(M= 1.5,0.6)中 ϵ_{β} 对 J 积分的影响规律。同样地, J 积 分值随着 ϵ_{β} 的减小而增加; 同时, 对图 2a 和图 4 进 行比较, 可以看到, 随着接头强度匹配比 M 的降低 (即母材屈服强度的升高), ϵ_{β} 的变化对 J 积分的影 响作用逐渐减弱。原因在于屈服强度的提高使得塑 性变形不易进行, 对 ϵ_{β} 改变所导致的损伤程度的变 化有所削弱; 相应地, 母材屈服强度的降低将增加这 种变化趋势。



3.2 焊缝宽度(2H/a)与母材区断裂应变对 J 积分的综合影响

针对无损伤的各种强度匹配焊接接头的断裂行 为,研究者已经对焊缝宽度和强度匹配比 *M* 对焊 缝区裂纹的断裂行为的综合影响进行了诸多分 析^[2,12],认为焊缝宽度的改变将引起母材强度因素 对焊缝区裂纹断裂行为的影响作用的变化。考虑到 这一点,研究中选用强度等匹配焊接接头,即 *M*= 1.0,以单独分析母材损伤行为在焊缝宽度发生变化 的条件下对 J 积分的影响规律。

图 5 比较了不同焊缝宽度条件下($2H/a = 0.1 \sim 0.6$),强度等匹配焊接接头(M = 1.0)中 ϵ_{FB} 对焊缝区裂纹扩展驱动力 J 积分值的影响作用。从 图 5 中可以看出, J 积分值仍然保持随 ϵ_{fB} 的降低而 升高的变化趋势,和图 2a 相一致。但与图 2a 相比, 随着焊缝宽度的增加, ϵ_{fB} 的变化对 J 积分值的影响 作用逐渐减弱,当焊缝达到 2H/a = 0.6时, ϵ_{fB} 对焊 缝区的断裂行为已无明显的影响。

图 6 比较了不同母材断裂应变条件下,强度等 匹配焊接接头中焊缝宽度的变化对 J 积分值的影 响。从图 6 中可以看出,根据母材断裂应变的不同, 焊缝宽度对 J 积分的影响表现出三种不同的趋势, 当 $\epsilon_{fW} > \epsilon_{fB}$ 时,J 积分值随着焊缝宽度的增加而降 低;当 $\epsilon_{fW} = \epsilon_{fB}$ 时,母材和焊缝金属性能相同,焊缝



宽度的变化对 J 积分值无影响; 当 $\epsilon_{fW} < \epsilon_{fB}$ 时, J 积 分值随着焊缝宽度的增加而升高。因此, 比照焊接 接头强度匹配的一般定义, 研究中不妨将 $\epsilon_{fW} / \epsilon_{fB}$ 1, $\epsilon_{fW} / \epsilon_{fB} = 1$, $\epsilon_{fW} / \epsilon_{fB} < 1$ 三种情况视为损伤概念 下的"高匹配"、"等匹配"以及"低匹配"接头来处理, 这样可以更为容易地以以往的关于强度匹配焊接接 头断裂行为的研究结果来理解损伤参量对 J 积分值



的影响。

为了更为直观地显示出不同母材断裂应变条件 下焊缝宽度的变化对 J 积分值的影响作用,作者假 设在某一载荷水平下, $F_B = J_J/J_W$,为母材性能对焊 接接头 J 积分的影响因子,其中 J_J 为一般意义上的 焊接接头的计算 J 积分值;而 J_W 为全焊缝材料试 样的计算 J 积分值。图 7 给出了在载荷 $P = 1.6P_0$ 的条件下 F_B 随焊缝宽度增加的变化趋势。



从图 7 中可以看出,对于母材金属断裂应变小 于焊缝金属断裂应变的焊接接头而言,由于两者损 伤演化行为的差异,焊缝中裂纹的断裂行为受到其 两侧相对软化母材的影响,造成裂纹扩展驱动力J 积分值的增加, *F*_B> 1,并且随着母材和焊缝断裂应 变值差异的增加而增加;反之,对于母材断裂应变值 大于焊缝断裂应变值的情况,母材的相对硬化作用, 将使 *F*_B< 1,两者差异愈大,*F*_B 值愈小。但随着焊 缝宽度的增加,母材远离裂纹区域,母材金属的强化 或弱化作用均趋于减弱,*F*_B 值渐趋近于 1,即在焊 缝宽度达到一定宽度(研究中,2*H*/*a* 约为 0.6)后, 可以认为母材的损伤演化行为对焊缝区中裂纹的断 裂力学参量已无影响,焊接接头试样的计算 J 积分 值等同于全焊缝材料试样的 J 积分值。

4 结 论

(1)焊缝中裂纹的断裂行为受到焊缝两侧母材 断裂应变的明显影响。对于无论何种强度匹配的接 头,在焊缝区各项力学性能参数保持不变的条件下, 随着母材区断裂应变的减小,该区域损伤率增加,损 伤区扩大,焊缝中宏观裂纹的扩展驱动力J积分均 有明显的提高。

(2)随着接头强度匹配比 *M* 的降低(即母材屈 服强度的升高),母材区断裂应变的变化对裂纹扩展 驱动力 J 积分的影响作用逐渐减弱。

(3)随着焊缝宽度的逐渐增加,母材断裂应变的 变化对 J 积分的影响作用逐渐减弱,焊接接头试样 的计算 J 积分值逐渐趋向于全焊缝材料试样计算得 到的 J 积分值。当焊缝宽度增加到 2*H*/*a* 约为0.6 时,母材断裂应变对焊缝区裂纹的断裂力学参量的 影响作用完全消失。

参考文献:

- Zhang J X, Shi Y W, Tu M J. Studies on the fracture mechanics parameters of weldment with mechanical heterogeneity[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1989, 34 (5/6): 1041 ~ 1050.
- [2] Zhang M, Shi Y W, Zhang X P. Influence of strength mismatching on crack driving force and failure assessment curve of weldment[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1997, 70(1): 33~41.
- [3] Tang W, Shi Y W. Influence of strength matching and crack depth on fracture toughness of welded joints[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1995, 51(4): 649~659.
- [4] Kachanov L M. Rupture time under creep conditions(translated from lzvestia akademii nauk SSSR, otdelenie tekhnicheskich nauk, No. 8, 1958, pp. 26~31, in russian)[J]. International Journal of Fracture 1999, 97(1~4): 11~18.

[下转第60页]

表 1 匹配点图 像坐标 Table 1 Image coordinate of pattern match point

图像顺序号		匹配点图像坐标值(像素)	
a	(318. 678, 385. 489)	(320. 113, 405. 725)	(314. 336, 238. 824)
b	(639. 783, 519. 666)	(606.096, 536.074)	(732. 907, 475. 073)
с	(621.001, 523.763)	(658. 337, 560. 973)	(642. 724, 545. 161)
d	(143. 138, 321. 866)	(323. 498, 315. 145)	(348. 369, 314. 154)

可见,根据常规的相关系数法计算公式进行匹 配计算时,虽然可以通过对相关函数归一化来克服 图像幅度变化的影响,但是当图像的尺度和旋转角 度变化的时候,需要结合多种图像处理算法进行匹 配计算。在此课题的匹配试验过程中,采用了金字 塔图法匹配技术,大大提高了匹配计算的运算速度。 另外,在匹配过程中,结合模板的边缘特征信息及智 能化的采样技术,可以在图像尺度变化(±5%)和旋 转(0°~360°)的情况下实现准确的匹配识别。

3 结 论

在 LabView 语言开发环境下进行了焊缝的模 板匹配识别试验,试验结果表明,由于 LabView 的 图形化编程及子 VI 层次化结构特性,使系统的调 试及维护简便、快捷,而且运算速度较快。根据匹配 结果,可以实现对焊缝在图像中的位置的初始确定。 匹配过程将传统模板匹配方法与模板的边缘特征信 息相结合,在图像的尺度和旋转角度发生变化时仍 然保持较高的匹配精度和准确性。

参考文献:

[1] 林尚扬,陈善本,李成桐. 焊接机器人及其应用[M]. 北京:机

[上接第 56 页]

- [5] Gurson A L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: part I⁻ yield criteria and flow rules for porous ductile media[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME, 1977, 99(1): 2~15.
- [6] Tvergaard V. On localization in ductile materials containing spherical voids [J]. International Journal of Fracture, 1982, 18(4): 237~251.
- [7] Lemaitre J. A continuous damage mechanics model for ductile fracture [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME, 1985, 107(1): 83~89.
- [8] Chaboche J L. Continum damage mechanics: part I—general concepts[J]. Journal of Applied Mechanics Transactions of the ASME, 1988, 55(1): 59~64.
- [9] Hval M, Thaubw C, Lange J H, et al. Numerical modeling of ductile fracture behavior in aluminum weldments[J]. Welding

械工业出版社,2000.1~8.

- [2] Andersen T. Robot welding in shipbuilding[A]. Advanced techniques and bw cost automation-proceeding of the' 94 international conference of international institute of welding [C]. Beijing, 1994. 149~151.
- [3] 吴 林,陈善本. 智能化焊接技术[M]. 北京:国防工业出版 社,2000.1~10.
- [4] 陈 强, 陈念国. 计算机视觉传感技术在焊接中的应用[J]. 焊 接学报, 2001, 22(1): 83~90.
- [5] Pyunghyun Kim, Sehun Rhee, Chang Hee Lee. Automatic teaching of welding robot for free—formed seam using laser vision sensor[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1999, 31: 173~182.
- [6] 张 炯, 吴 林, 吕伟新. 一种识别薄板对接接头的视觉方法
 [J]. 材料科学与工艺, 1997, 5(2): 1~4.
- [7] 阮秋琦. 数字图像处理学[M].北京:电子工业出版社,2001.
 481~493.
- [8] 贾云得. 机器视觉[M]. 北京:科学出版社, 2000.273~286.
- [9] Andrew Bettiol A, Van Kan J A, Sum T C, et al. A labview—based scanning and control system for proton beam micromaching
 [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2001, 181: 49~53

作者简介: 朱振友, 男 1973 年 2 月出生, 讲师, 博士研究生。研 究方向为焊接机器人视觉传感及焊接过程自动化, 发表论文 6 篇。

Email: zzy@sjtu. edu. cn

Jou mal, 1998, 77(5): 208s~217s.

- [10] Wang T J. A continuum damage model for ductile fracture of weld heat affected zone[J]. Engineering Fracture M echanics, 1991, 40(6): 1075~1082.
- [11] Dhar S, Sethuraman R, Dixit P M. A continuum damage mechanics model for void growth and micro-crack initiation[J]. Engineering Fracture M echanics, 1996, 53(6): 917~928.
- [12] Zhang J X, Murakawa H. Numerical investigation on ductile con-straint near crack tip in weldment with mechanical heterogeneity[J]. Transactions of JWRI, 2000, 29(1): 81~87.

作者简介: 李继红, 男, 1973 年4 月出生, 博士研究生。主要从事 焊接结构断裂损伤及焊接 CAD 方面的研究工作, 发表论文 5 篇

Email: e1980604@mailst. xjtu. edu. cn