

高组配焊接接头表面裂纹 J 积分试验研究

李继红, 张建勋, 裴 怡

(西安交通大学, 西安 710049)

摘 要: 实际构件中大量存在着半穿透型的焊接表面裂纹, 对于这种力学性能不均匀三维裂纹体的弹塑性断裂力学参量(例如 J 积分)的探讨还比较缺乏。利用 J 积分直接测试方法以及适当的理论弹性修正, 对存在于不同组配比的高组配焊接接头焊缝区的三维表面裂纹的 J 积分进行了试验研究, 着重讨论了接头组比对焊接接头试样加载过程中裂纹扩展驱动力(J 积分, 裂纹嘴张开位移 $CMOD$)、应变沿积分路径分布的影响。结果表明, 焊接接头试样上应变的分布趋势取决于裂纹位置和组配比的综合影响; 随载荷的增加, 邻近焊缝的母材区将产生应变集中; 并且, 随组配比的降低, 该区域的应变集中程度随之提高, 而焊缝区的变形量随之降低, 裂纹扩展驱动力增大。

关键词: 焊接接头; 表面裂纹; J 积分

中图分类号: TG404 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2000)02-47-04



李继红

0 序 言

由于焊接本身是一个复杂的物理化学冶金过程及热应力应变过程, 所以焊接结构中预先存在或在服役过程中产生某些缺陷几乎是无法避免的, 接头部位常成为结构中裂纹或其它缺陷萌生及扩展的敏感区域。随着焊接技术在重要工程结构中的广泛应用, 含裂纹焊接结构的安全性已成为工程界十分关注的问题。

自 Rice J_R 于 1968 年提出以 J 积分作为弹塑性断裂力学的断裂参量以来, J 积分在焊接工程中的应用取得了许多成果^[1~3]。采用断裂力学的观点, 分析焊接结构断裂问题的研究多集中于把焊接缺陷简化成为穿透型的二维裂纹体的方法, 而实际焊接结构中的缺陷, 例如未焊透、未熔合及咬肉等则是更接近于半穿透型的表面裂纹。而对焊接表面裂纹进行评定时, 不仅要考虑缺陷的几何特性, 还需要考虑材料力学性能不均匀性的影响问题。因此, 针对焊接表面裂纹这种力学性能不均匀三维裂纹体, 测定其 J 积分, 并探讨焊接接头组配及裂纹状态对 J 积分的影响, 研究焊接表面裂纹的断裂行为, 对于提高焊接结构的可靠性, 无疑具有重要的意义。

1 试验原理

焊接表面裂纹本质上属于三维裂纹体, Amestoy

等人^[4]于 1981 年导出了三维裂纹体 J 积分的定义公式, 如图 1 所示。

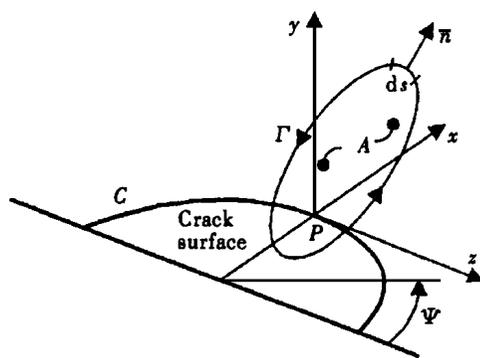


图 1 表面裂纹三维 J 积分定义

Fig. 1 Definition of 3D J -integral for surface crack

$$J(P) = J_{\Gamma}(P) + J_A(P)$$

$$J_{\Gamma}(P) = \int_{\Gamma} \left[W dv - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right]$$
$$J_A(P) = - \int_A \frac{\partial}{\partial z} \left[\sigma_{3i} \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right]$$

式中 三维裂纹体 J 积分中的线积分项 J_{Γ} 等同于二维裂纹体的 J 积分; 而面积分项 J_A 则是由于存在三维应力应变场, 对线积分项所进行的修正。三维裂纹体 J 积分是裂纹前沿点位置 P 的函数。文献 [5] 指出, 对于半椭圆形的表面裂纹, 其最深点具有最大的 J 积分值, 即最易起裂和扩展。同时, 理论分析^[6]表明, 裂纹最深点的 J_A 积分项和 J_{Γ} 积分项相比较小。

基于以上两点, 首先利用 J 积分直接测试法, 沿试样表面选择环绕裂纹最深点的积分回路, 通过积分回路上某些点应变、位移量的测量, 进行适当简

化积分,即可得到裂纹最深点的 J_{Γ} 值;由于 J_A 尚无法直接测量,因此采用对 J_{Γ} 进行弹性修正的方法,即假设 J_A 和 J_{Γ} 在加载过程中成比例,比例系数不变,即有 $J_A = \alpha J_{\Gamma}$,则 $J = (1 + \alpha)J_{\Gamma}$ 。在小载荷线弹性条件下,可以利用 J 积分和应力强度因子 K 之间的关系和载荷及试样、裂纹尺寸确定出 α 值,然后将 α 值近似地应用于加载的全程,即可求得三维表面裂纹的 J 积分^[7]。

表 1 母材及焊接材料的化学成分(质量分数%)与力学性能

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of used materials

Material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mo	Al	Ni	Cr	Ti	Ti+Zr	Yield streng	Tensile strength
													σ_y /MPa	σ_b /MPa
WEL-TEN590	0.09	0.25	1.69	0.017	0.005	—	—	—	—	—	0.09	—	578.4	680.7
YM-60C	0.07	0.69	1.97	0.010	0.016	0.21	0.38	0.003	—	—	—	0.18	599.0	716.9
YM-70C	0.06	0.82	1.75	0.008	0.005	0.21	0.48	—	1.55	—	—	—	629.6	803.7
YM-80A	0.08	0.31	1.30	—	—	—	0.57	—	2.60	0.50	—	—	736.0	870.0

试板采用附加垫板的V形坡口,焊接采用CO₂气体保护焊,焊接规范为焊接电流 $I=128$ A,焊接电压 $U=27$ V,送丝速度 $V=13.0$ mm/s

焊接试板经机械加工,铣削成为 $12\text{ mm} \times 70\text{ mm} \times 450\text{ mm}$ 的板状试样,焊缝位于试板的中心,并垂直于试验中的拉伸加载方向。首先采用电火花机床,在预定位置垂直于试板表面,制造长 $2c_0=10$ mm,深 $a_0=3$ mm的裂纹源,然后利用三点弯曲加载方式预制疲劳裂纹。裂纹开在焊缝区的中心。选取 J_{Γ} 积分回路为 $G-F-E-D-C-B-A$ 。考虑到试板结构与材质的对称性,因此只沿 $1/2$ 积分回路在试样表面布置应变片及引伸计,加工配置完成后的试样如图2所示。

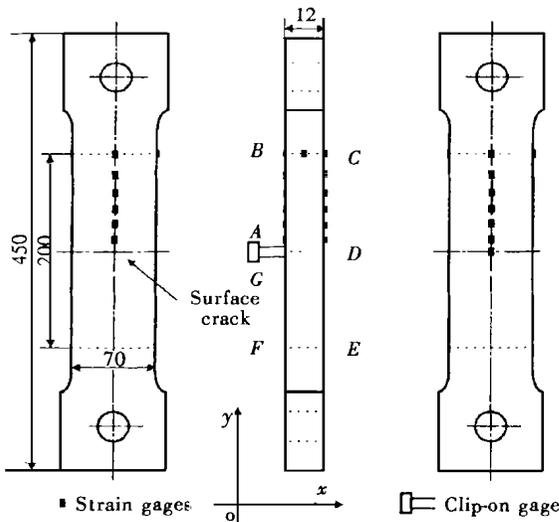


图 2 表面裂纹拉伸试样及测量装置

Fig. 2 Surface cracked tensile panel with instrument

试验在万能材料试验机上进行。试样装夹后,施加初始的拉伸载荷,待仪器设备稳定后,逐步加大载荷,在预定的载荷点上测量相应的应变及位移值。

2 试验条件

母材选用日本 WEL-TEN590 焊接结构用高强度钢,原始板厚 16 mm。填充金属采用 YM-60C、YM-70C 和 YM-80A 三种不同强度等级的焊丝,直径均为 1.2 mm。母材及三种焊丝熔敷金属的化学成分与焊后实际测定力学性能列于表 1 中。

直至试样出现一定量的屈服后,停机卸载。试验完成后,试样经热氧化发蓝处理,二次疲劳后压断,测量裂纹尺寸。试样编号及裂纹尺寸如表 2 所示。

表 2 试样编号及裂纹尺寸(mm)

Table 2 Serial number of specimens and crack size

Specimen	Welding material	Crack depth a	Crack length 2c
WM0	YM-60C	5.487	18.226
WM1	YM-70C	4.817	21.386
WM2	YM-80A	5.338	21.339

3 试验结果与分析

3.1 应变的分布与接头组配的影响

图 3 和图 4 为高组配焊接表面裂纹试样上应变沿线积分路径的分布(σ_0 为母材的屈服强度,下同)。

由图 3 可以看出,随载荷增加,各试样在裂纹的前端表面(D-C段)且靠近裂纹面的区域,均开始产生应变集中,且应变集中的程度逐渐增大。对于焊接表面裂纹试样,裂纹前端表面的应变集中区位于靠近焊缝金属的母材区。在这种高组配焊接接头中,由于焊缝区的强度和硬度相对较高,不容易变形,因此塑性区的扩展不仅在裂纹前沿所处的焊缝区中进行,而且母材区也存在大范围屈服,组配比越高,焊缝熔敷金属和母材金属的强度差异就越大,塑性应变由焊缝区向近缝区的“释放”效果就越明显,即造成母材区应变集中程度的提高;而焊缝区的应变则随组配比的增加有所下降。

对于表面裂纹的后端表面(A-B段),如图 4 所示,小载荷条件下,应变值随测量点远离裂纹面而缓慢上升,并在一定区域内达到稳定,同时在临近裂纹面的区域,应变值发生陡降。这说明试样在弹性变

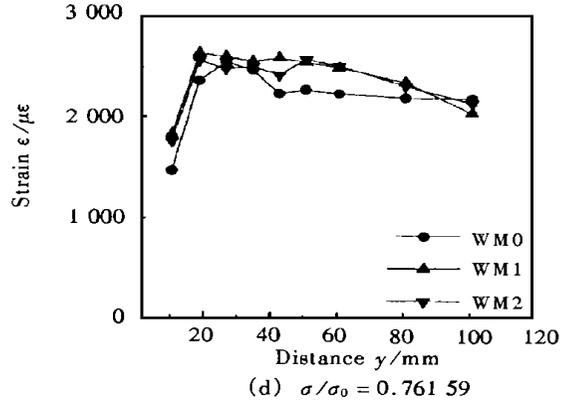
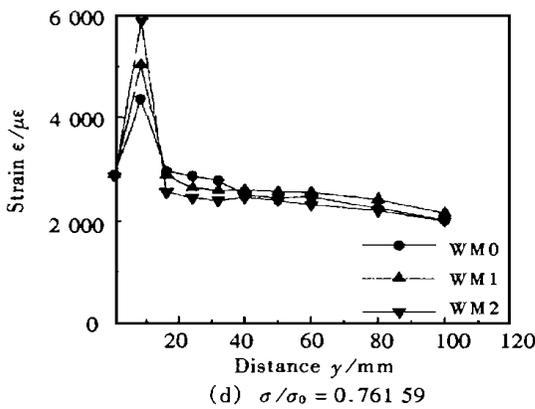
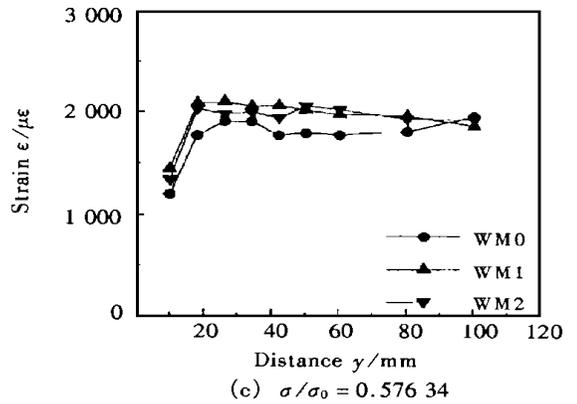
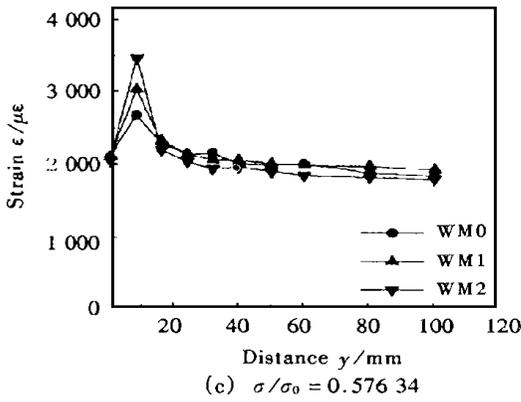
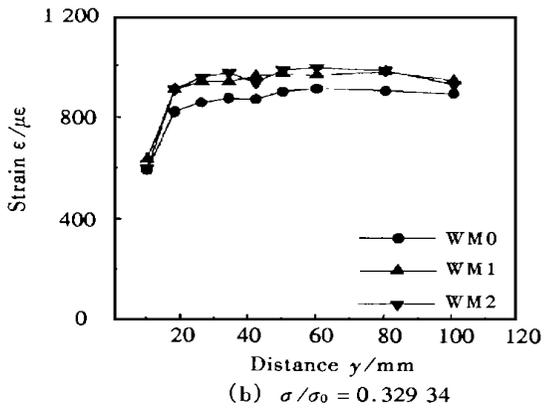
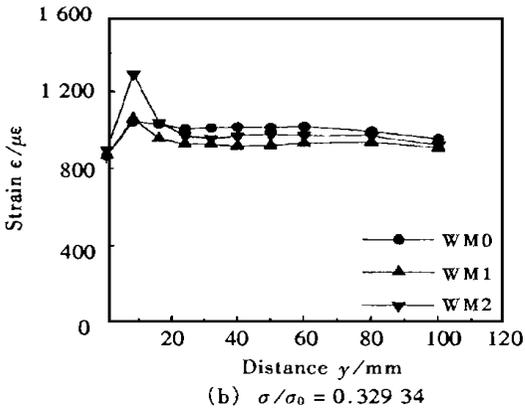
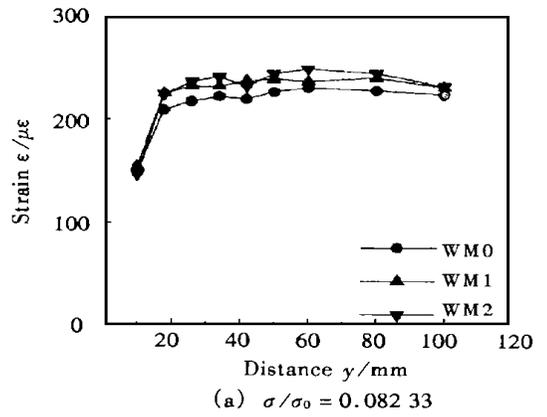
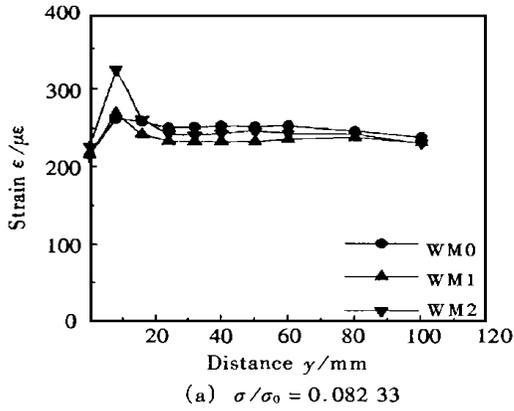


图3 裂纹前端表面应变分布

图4 裂纹后端表面应变分布

Fig. 3 Distribution of strain along contour segment DC

Fig. 4 Distribution of strain along contour segment AB

形阶段, 裂纹存在对应变分布的影响占主导地位。随着外加载荷的增大, 在裂纹面附近, 也产生了一定程度的应变集中。这进一步说明, 随载荷的增加, 塑性屈服不仅向裂纹前沿的焊缝区及裂纹前端表面靠

近焊缝的母材区扩展, 而且也向裂纹后端表面靠近焊缝的母材区扩展。在这种条件下, 焊接表面裂纹试样中接头各区域的强度差异对应变分布的影响占据主导地位。

3.2 组对比对表面裂纹 J 积分和裂纹嘴张开位移 CMOD 的影响

图 5 为不同试样裂纹前沿最深点 J 积分和裂纹嘴张开位移 CMOD 随载荷的变化趋势 (F 为表面裂纹的边界修正因子, 是试样及裂纹尺寸的函数)。

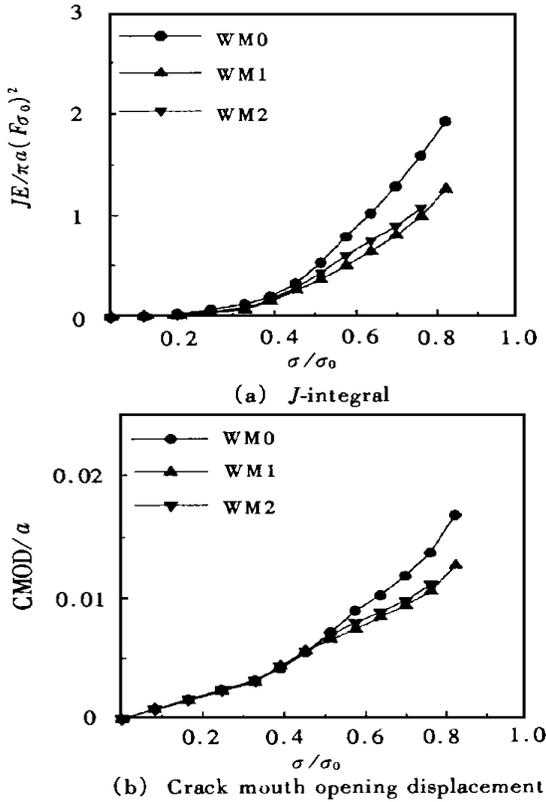


图 5 不同试样断裂性能的比较

Fig. 5 Comparison of fracture property of different specimens

总体而言, 对于三种高组配焊接接头试样, 随组配比的提高, J 积分和 CMOD 值呈下降趋势, 其中组配比较高的两类试样“WM1”和“WM2”的试验结果差别不大。在同一载荷下, J 积分和 CMOD 反映的是施加的载荷在裂纹体上产生的裂纹扩展驱动力的大小。两者值越小, 说明加载时, 越不易达到或后达到它们的临界值, 裂纹抗起裂及扩展的能力强; 反之, 则越易达到临界值, 裂纹抗起裂及扩展的能力差。因此可以得出同样的结论, 即: 随着组配比的提高, 存在于高组配接头焊缝区中的表面裂纹的裂纹扩展驱动力逐渐降低。

根据不同组配焊接接头试样上应变分布的分析, 可以认为, 对于处于高组配焊接接头焊缝区的表面裂纹, 随载荷的增加, 塑性屈服不仅会发生在裂纹前沿高强度的焊缝区内, 而且更有可能发生在相对强度较低的母材区内。因此, 随着组配比的提高, 塑性屈服由高强度的焊缝区向低强度的母材区转移的现象更为明显。而母材区的屈服造成塑性区扩展, 使得裂纹前沿的应力更易释放, 应力集中程度降低。

从能量的观点来说, 外载荷做功, 裂纹体吸收能量并发生变形, 弹塑性应变能增加, 由于高组配焊接接头母材区的强度相对较低, 产生了应变集中, 并且其程度随组配比的提高而提高, 使得本应由裂纹前沿高强度焊缝区吸收的能量向母材区“释放”, 因而降低了裂纹前沿的能量密度, 裂纹扩展驱动力 J 积分及 CMOD 也随之下降。

4 结 论

(1) 在小载荷弹性条件下, 裂纹的存在对试样应变分布的影响占主导地位, 测量点距裂纹越远, 所受的这种影响作用就越弱, 应变值就越大; 在大载荷弹塑性条件下, 焊缝与母材的强度差异对高组配接头焊接表面裂纹试样应变分布的影响占主导地位, 在靠近焊缝的母材区将产生显著的应变集中。

(2) 对于本文所研究的高组配接头焊缝区表面裂纹试样, 随组配比的提高, 裂纹扩展驱动力 (J 积分, 裂纹嘴张开位移 CMOD) 呈下降趋势。

(3) 对于本文所研究的高组配接头焊缝区表面裂纹试样, 随组配比的提高, 靠近焊缝的母材区的应变集中程度随之提高, 而焊缝区的变形量随之降低, 即焊缝区表面裂纹前沿的变形随焊缝强度的提高, 更易于向低强度的近缝区释放, 从而使裂纹前沿应力集中程度降低, 裂纹扩展驱动力减小。

参考文献:

- [1] 马维甸, 张式程, 田锡唐. J 积分在非均质焊接接头弹塑性断裂评价中的应用 [J]. 机械工程学报, 1987, 23(4): 43~50.
- [2] 张建勋. 材料力学性能不均匀裂纹体弹塑性断裂工程准则研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 1989.
- [3] Smith E. The value of the J -integral at the onset of crack extension from a weld defect; weld material is softer than parent material [J]. International Journal of Fracture, 1992, 53(1): 33~42.
- [4] Amestoy M, Bui H D, Labbers R. On the definition of local path independent integrals in three-dimensional crack problems [J]. Mechanics Research Communications, 1981, 8(4): 231~236.
- [5] Nikishkov G P, Atluri S N. Three-dimensional elastic-plastic J -integral calculations for semielliptical surface cracks in a tensile plate [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1988, 29(1): 81~87.
- [6] King R B, Cheng Y W, Read D T, McHenry H I. J -integral analysis of surface cracks in pipeline steel plates [J]. ASTM SIP 803, 1983(1): 444~457.
- [7] 李继红. 焊接表面裂纹断裂行为研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 1998.

作者简介: 李继红, 男, 1973 年 4 月出生。西安交通大学焊接研究所在读博士生。主要从事焊接结构断裂损伤和强度及焊接 CAD 方面的研究工作。已发表 2 篇论文。