

焊接接头强度组配对 CTOD 的影响^①

薛 河 赵海燕
(西安交通大学机械工程学院, 西安 710049)

史耀武
(北京工业大学材料科学与工程学院, 北京 100022)

摘 要 利用模拟焊接接头试样三点弯曲试验的方法, 就焊接接头强度组配对其断裂性能的影响进行了研究。发现不同的焊接接头强度组配对其断裂韧性和裂纹扩展驱动力有不同程度的影响, 在考虑强度组配对焊接接头的断裂性能的影响时, 必须从材料的断裂韧性变化和裂纹扩展驱动力变化的两个方面来考虑。

关键词 裂纹尖端张开位移 (CTOD) 三点弯曲 强度组配

中图法分类号 TG115. 5

焊接接头的断裂性能是焊接结构设计的主要参数之一。在分析一般焊接结构的断裂时, 仅从表征材料性能方面寻找最薄弱区域的最低韧性值, 所考虑的应力应变是指断裂所在部位无缺陷时存在的应力和应变, 再通过一定的换算关系得出裂纹扩展驱动力曲线。由于焊接结构的组织不均匀性和力学不均匀性严重影响了焊接接头的断裂行为, 近 10 多年来, 这一问题已引起了理论界的重视, 焊接接头强度组配对其断裂性能的影响就是其中颇具吸引力的研究课题之一^[1]。传统的做法是, 将焊接接头简化为具有母材和焊缝金属两种特性区的复合材料, 根据母材和焊缝金属的屈服强度分为低组配、等组配和高组配三种情况。由于裂纹扩展的失效等式为: 裂纹扩展驱动力= 断裂韧性, 因而, 在考虑焊接接头组配对断裂性能的影响时, 必须同时考虑其对裂纹扩展驱动力和断裂韧性两方面的影响。理论界对此已作了较多的研究, 但主要集中在组配对裂纹扩展驱动力的影响和对断裂韧性的需求方面^[2-8]。本文利用模拟焊接接头的方式对失效等式的两个方面 (即裂纹扩展驱动力和断裂韧性) 同时进行研究, 试图较为全面地反映焊接接头强度组配对其断裂性能的

影响。

1 试样制备

1. 1 实验用材及性能

由于影响焊接接头断裂性能的因素较多, 为了突出分析强度组配对焊接接头断裂性能的影响, 本次实验采用了模拟的焊接接头试样, 实验中选用了 BX52 管线钢、改良型 9Cr-1Mo 和 2-1/4Cr-1Mo 三种材料。用 5 倍园棒试样在 Instron 1195 电子拉伸试验机上进行了 3 种材料的拉伸性能测试, 测试结果取 $\sigma_{0.2}$ 的值为材料的屈服应力 σ_Y , 并按 Ramberg-Osgood 关系 (式 (1)) 进行回归分析得出试样用材的力学性能, 参见表 1。

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_Y} = \frac{\sigma}{\sigma_Y} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_Y} \right)^n \quad (1)$$

1. 2 三点弯曲试样的制备

根据上述 3 种材料的不同屈服强度特性制成不同强度组配的模拟焊接接头三点弯曲断裂试样。用 BX52 管线钢作母材、分别用改良型 9Cr-1Mo 和 2-1/4Cr-1Mo 作高组配焊缝金属和低组配焊缝金属。从大块板料中横向锯取母材

① 国家自然科学基金资助项目 59475065 收稿日期: 1998-04-13; 修回日期: 1998-06-05

薛 河, 男, 37 岁, 副教授, 博士研究生

和不同组配的焊缝金属及其夹条, 粗刨后, 对母材和模拟焊缝的金属夹条的焊接结合面进行磨削, 利用 EBW700/15 型电子束焊机, 按 BS-5762 标准^[9]所规定的方法焊制成模拟焊接接头, 按尺寸要求从模拟的焊接接头, 母材和焊缝材料中分别铣出断裂试样并磨削加工至同一标准尺寸, 各试样采用线切割后用疲劳裂纹机预制成一定的裂纹长度。如图 1 所示。其主要几何尺寸为: 试样长 ($2L$) 220.0 mm、宽 (W) 40 mm、厚 (B) 6.5 mm、焊缝宽度 ($2H$) 分别为 10.0 mm 和 20.0 mm、裂纹长 (a) 20.0 mm ($a/W=0.5$)。

三点弯曲实验加载跨距为 160.0 mm, 试验在 Instron 1341 电液伺服试验机上完成。试验时加载速率为 0.1 mm/min, 加载到最大载荷点停机。试验过程中记载了载荷一位移 ($p-\delta$) 曲线以及载荷—裂纹嘴张开位移 ($p-\text{CMOD}$) 曲线。

2 实验结果与讨论

2. 1 裂纹扩展驱动力的结果与讨论

根据 CMOD 实验标准^[9, 10], 采用的计算铰链模型如图 2 所示, 图中 δ 为裂纹嘴张开位移, δ_p 为裂纹嘴张开位移的塑性分量, r_p 为塑性转动因子, O_p 为塑性转动中心。

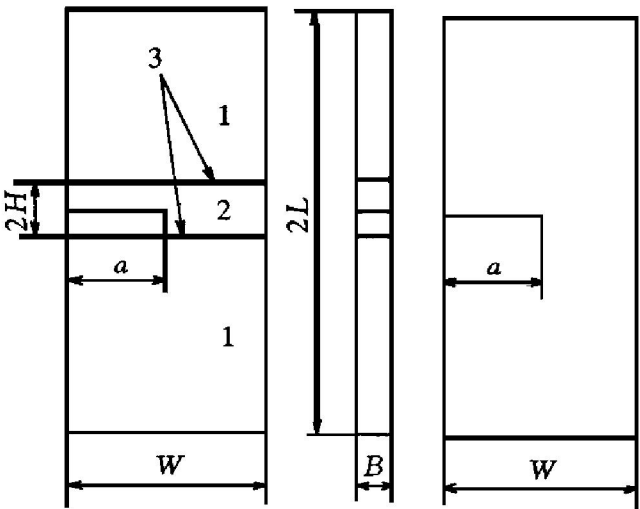


图 1 三点弯曲试样的几何尺寸
Fig. 1 Geometric gauge of three point bending specimens
(a) —Simulated welded specimen;
(b) —Weld metal and base material specimens;
1—Base material; 2—Simulated welding metal;
3—Welds made by electronic beam

表 1 实验用材的力学性能和化学成分

Table 1 Mechanical properties and chemical composition of materials

Material	Chemical composition/ %							Mechanical properties		
	C	Si	Mn	S	Cr	Ni	Mo	σ_Y /MPa	α	n
Modified 9Cr-1Mo	0.08	0.45	0.47	0.003	8.61	0.09	1.01	533	2.317	6.71
2-1/4Cr-1Mo	0.11	0.29	0.37	0.007	2.05		0.93	297	0.397	14.71
BX52	0.10	0.26	1.21	0.005	0.03		0.02	405	2.808	9.35

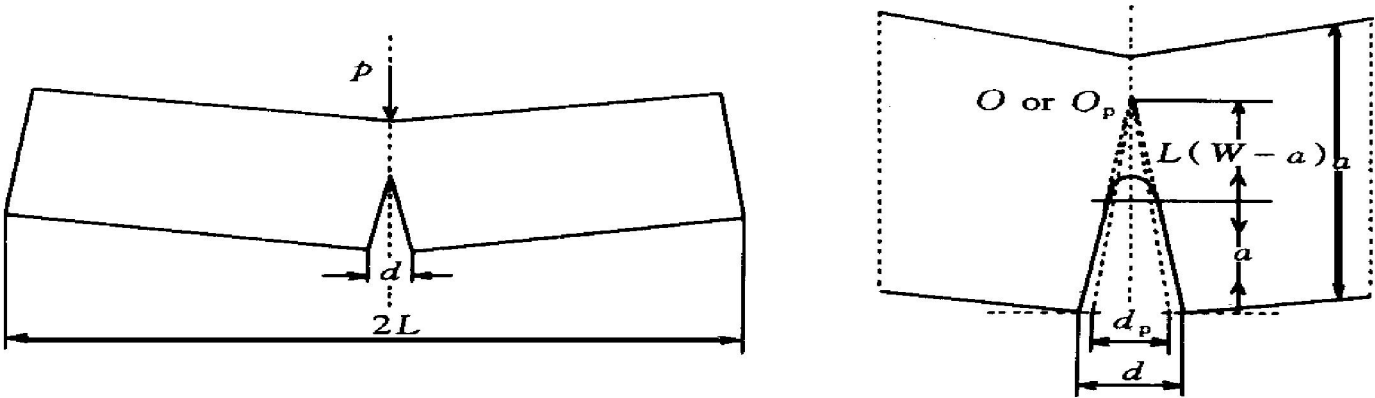


图 2 三点弯曲实验铰链模型
Fig. 2 Hinge model of three point bending test

根据 BS-5762 标准给出的计算式 (2) 来计算裂纹尖端张开位移 δ , 进而绘制用 δ 表达的裂纹扩展驱动力曲线。

$$\delta = \delta_e + \delta_p = \frac{K_I^2 \cdot (1 - r_p^2)}{2 \cdot \sigma_Y \cdot E} + \frac{r_p \cdot (W - a) \cdot \delta_p}{r_p \cdot (W - a) + a} \quad (2)$$

式中 δ_e 为裂纹尖端张开位移的弹性分量, δ_p 为裂纹尖端张开位移的塑性分量。

三点弯曲试样的应力强度因子 K_I 通过边界配位法可求得

$$K_I = \frac{2 \cdot P \cdot L}{B \cdot W^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (3)$$

式中

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} [1.99 - \left(\frac{a}{W}\right)(1 - \frac{a}{W})]}{2(1 + 2\frac{a}{W})} \cdot \frac{(2.15 - 3.93\frac{a}{W} + 2.7\frac{a^2}{W^2})}{(1 - \frac{a}{W})^{2/3}} \quad (4)$$

虽然在加载过程中 r_p 为变量, 但在启裂点附近 r_p 趋于一常量^[11], 根据标准 [9] 的推荐取 r_p 为 0.45, 这可保证在启裂点附近裂纹扩展驱动力曲线有足够的可信度。

由每个模拟试样在各载荷点计算得出的 (δ) CMOD 值, 绘出 $p - \delta$ 曲线。并按图 3 所示方法, 计算得出裂纹咀张开位移的弹、塑性分量 δ_e , δ_p , 进而得出 $p - \delta_p$ 曲线。

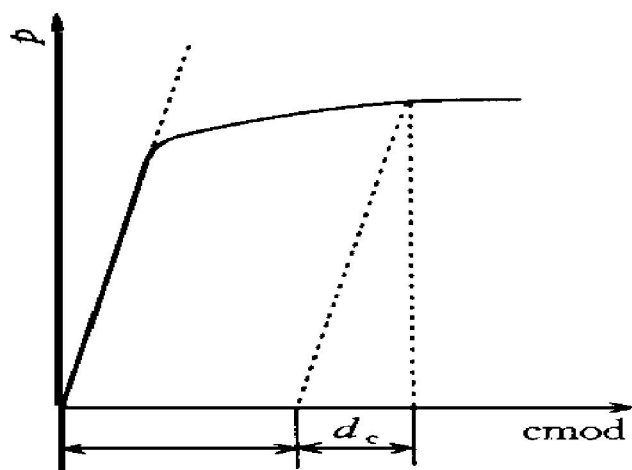


图 3 弹性与塑性 CMOD 的关系

Fig. 3 Relation of elastic with plastic CMOD

最后, 得出 3 种材料的 10.0mm 宽模拟焊缝和 20.0mm 宽模拟焊缝的焊接接头的裂纹扩展驱动力曲线分别如图 4 和图 5 所示。

由图 4 可以看出就单一材料而言, 在同一载荷作用下材料的屈服强度越高, 其裂纹扩展驱动力 CTOD (δ) 越小; 反之, 屈服强度越低, δ 越大。由图 5 可以看出在同一母材下, 高组配由于母材的优先屈服保护作用, 使焊缝裂纹

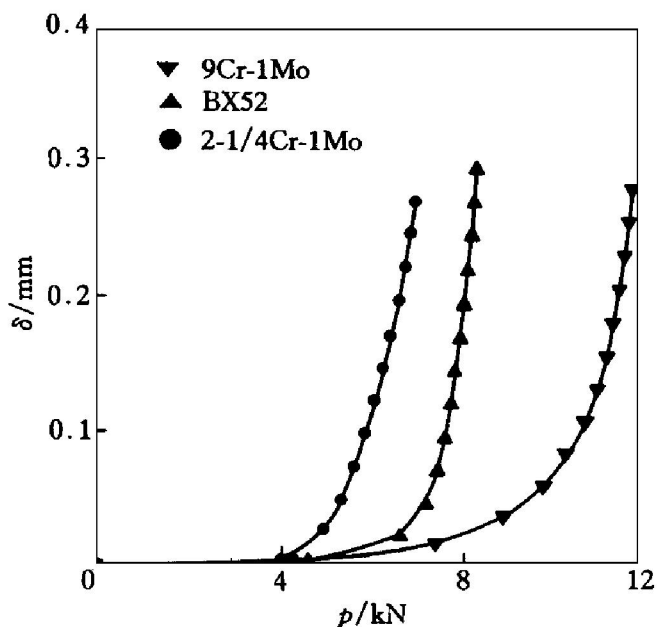


图 4 三种实验用材料的裂纹尖端张开位移图

Fig. 4 Crack tip opening displacement of three kinds of test material specimens

扩展驱动力下降, 低组配由于较大的应变存在于焊缝金属中, 使焊缝裂纹扩展驱动力上升。在焊缝宽度 10.0mm 的焊接接头试样中, 启裂后低组配焊接接头与等组配 (纯母材) 焊接接头产生交叉, 这是由于电子束焊缝的强化影响造成的, 由于我们仅考虑裂纹启裂前和启裂时的裂纹扩展驱动力情况, 这一数据是可信的。随着焊缝宽度的增加, 影响加大。换句话说, 焊缝裂纹扩展驱动力受母材和焊缝材料屈服极限共同影响, 当焊缝宽度减小, 裂纹扩展驱动力受母材影响较多; 反之, 当焊缝宽度增加到一定值时, 焊接接头的裂纹扩展驱动力曲线与纯焊缝材料的裂纹扩展驱动力曲线相仿。

2.2 断裂韧性的结果及讨论

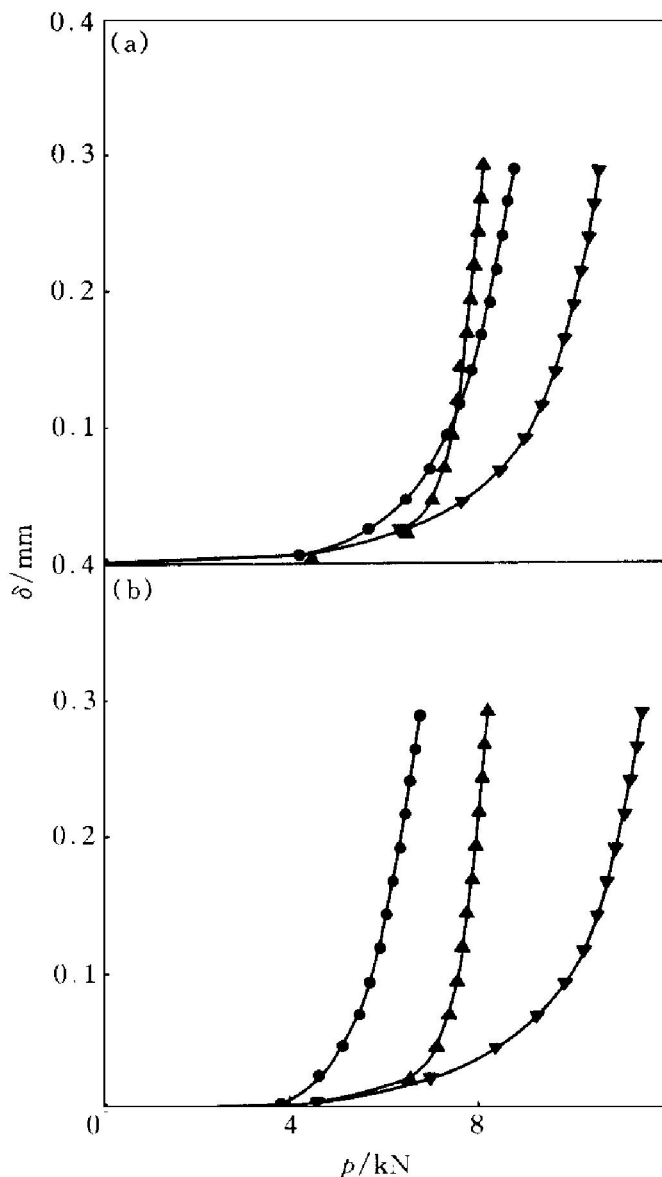


图5 模拟焊接接头试样的裂纹尖端
张开位移图

Fig. 5 Crack tip opening displacement of
simulated weld joint specimens

(a) $-2H = 10.0 \text{ mm}$; (b) $-2H = 20.0 \text{ mm}$

▼ —Overmatching joint; ▲ —Evenmatching joint;
● —Undermatching joint

在三点弯曲试验中材料启裂值的确定是比较困难的, 对于一般钢铁材料一般无法从裂纹扩展驱动力曲线中直接获得。由于实验条件的限制, 我们采用两种简单的经验方法进行断裂韧性的分析, 即根据表面测定法估计启裂值 δ_c 的范围和用柔度变化率标定 δ_c 。

由工具显微镜看出在加载到最高载荷点停机的试样表面裂端形状如图6所示, 借助多剖面测定法原理^[12], 可据式(5)计算 δ_c :

$$\begin{aligned}\delta_c &= \overline{PQ} - \overline{O_1O_2} - \overline{O_3O_4} \\ &= S_1 + S_2 + S_3\end{aligned}\quad (5)$$

有了 δ_c 的基本范围, 便可进一步用柔度变化率标定法来确定 δ_c 。加载点的柔度变化率的表达式为^[13]

$$\begin{aligned}\overline{C} &= \frac{d\Delta}{dp} = C - C_Y \\ &= (\Delta p - \Delta p_Y) / (\Delta p_Y)\end{aligned}\quad (6)$$

式中 p_Y 根据 EPRI 的推荐取^[14]

$$p_Y = 0.536 \cdot \sigma_Y \cdot B \cdot (W - a)^2 / L \quad (7)$$

根据式(6)绘制出柔度变化率曲线, 可以看出该曲线上有两个拐点(图7), 将第一个拐点看作是裂纹的启裂点。通过该点所对应的 p_1 可以计算得出 δ_c 。

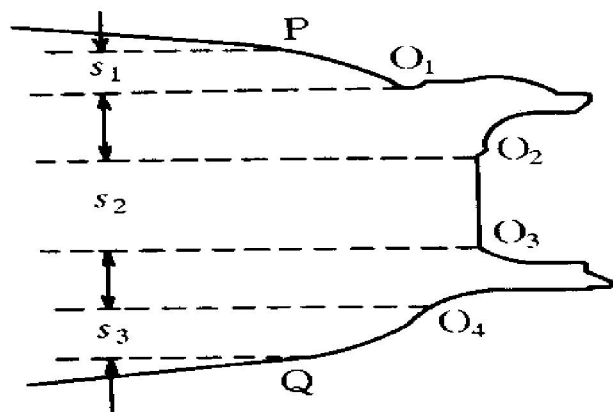


图6 裂纹尖端形貌图

Fig. 6 Contour of crack tip area

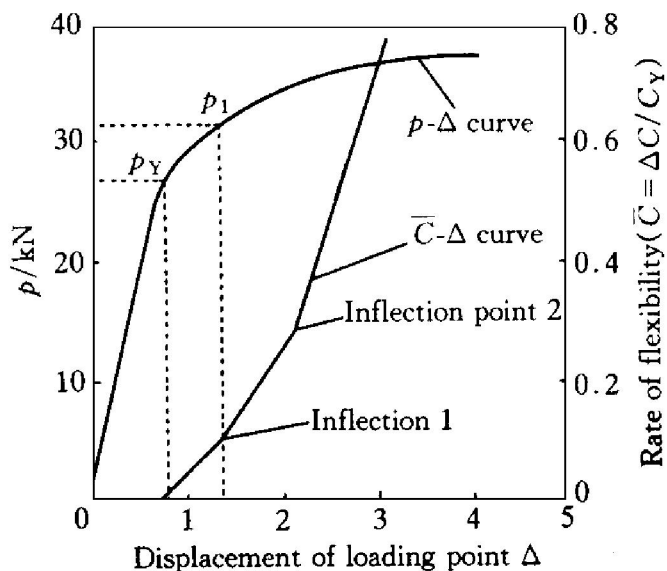


图7 柔度变化率法示意图

Fig. 7 Sketch drawing of various
rate of flexibility

强度组配对焊接接头断裂韧性的影响与其对焊缝裂纹扩展驱动力的影响规律相仿。值得注意的是,从量上来说,焊缝裂纹的启裂韧性 δ_c 主要受焊缝材料的影响,受接头强度组配的影响较小(表2)。

表2 试样的断裂韧性 δ_c

Table 2 Fracture toughness δ_c of specimens (mm)

Matching type	All welding	$H = 10.0\text{mm}$	$H = 20.0\text{mm}$
Evenmatching joint	0.083		
Overmatching joint	0.053	0.055	0.054
Undermatching joint	0.114	0.100	0.107

REFERENCES

- 1 Smith E. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1995, 63 (1): 81–88.
- 2 Schwalbe H K. International Journal of Fracture, 1992, 56 (2): 257–277.
- 3 Denys R M. IIW Document X-1222–91, 1991.
- 4 Zhang J X (张建勋), Shi Y W (史耀武) and Tu M J (涂铭旌). Engineering Fracture Mechanics, 1989, 34 (5/6): 1041–1050.
- 5 Yin Jianzheng (印建正), Chen Boli (陈伯蠡), Yan

- Yuanfei (严鸢飞) *et al.* Chinese Journal of Mechanical Engineering (机械工程学报), 1995, 31 (1): 101–106.
- 6 Shi Y W (史耀武). International Journal of Fracture, 1992, 62 (1): 201–204.
- 7 Burstow M C and Ainsworth A. Fatigue & Fracture of Engineering Material & Structure, 1995, 18 (2): 221–234.
- 8 Xue He (薛河), Fu Jianqin (傅建钦) and Shi Yaowu (史耀武). Journal of Xi'an Mining Institute (西安矿业学院学报), 1997, 17 (2): 171–174.
- 9 BS 5447. London: British Standard Institution, 1991.
- 10 GB2358–80. Beijing: Chinese Standard Institute, 1980.
- 11 Liu Yongning and Song Xiaolong. Engineering Fracture Mechanics. 1995, 52 (5): 1029–1033.
- 12 Failure Assessment Standard Organizing Group (压力容器缺陷评定规范编制组). In: Li Zezheng (李泽震) ed. Safety Assessment of Pressure Vessel (压力容器安全评定), Beijing: Labour Publishing House, 1987, 154–165.
- 13 Kobayashi T, Yamamota I and Ninomi M. Engineering Fracture Mechanics, 1986, 24 (3): 773–782.
- 14 Kumar V, German M D and Shih C F. EPRI Topical Report NP-1931, Palo Alto, California, EPRI, 1981.

INFLUENCE OF WELD JOINT STRENGTH

MATCHING ON CRACK TIP OPENING DISPLACEMENT

Xue He, Zhao Haiyan and Shi Yaowu[†]

School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P. R. China

[†] *School of Materials Science and Engineering, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, P. R. China*

ABSTRACT By means of simulated weld joints specimen, the influence of welding strength matching on the fracture property was investigated. It was found that the different strength matching of the welded joints affects both the crack opening driving force and fracture toughness. Both the material fracture toughness and the crack opening driving force must be considered when the influence of welded joint strength matching on the fracture property is analyzed.

Key words crack tip opening displacement (CTOD) three-point bend specimens strength matching

(编辑 黄劲松)