

焊接接头高应变率下的动态断裂韧度分析

巩水利¹, 张建勋²

(1. 北京航空工艺研究所, 北京 100024; 2. 西安交通大学, 西安 710049)

摘 要: 对采用 Hopkinson 气炮加载—Charpy V 形冲击试样试验方法对焊接接头高应变率下的动态断裂韧度数据进行了分析研究, 通过对试样断口形貌、冲击吸收功、断裂韧度及其影响因素进行分析, 表明在高应变率加载条件下, 焊接接头冲击试样断口形貌有特殊的表现, 延伸带或钝化区的尺寸大小反映了裂纹萌生前的塑性变形大小, 也反映了裂纹萌生功的变化趋势。同时说明焊接接头在高速动态冲击载荷作用下, 其断裂韧度参量受组配强度、冲击速度及环境温度等因素影响显著, 焊接热影响区的断裂韧度值关系到焊接接头断裂韧度的好坏。

关键词: 焊接接头; 高加载速率; 动态断裂韧度; 影响因素

中图分类号: TG115.5 文献标识码: A 文章编号: 0253—360X(2002)04—53—04



巩水利

0 序 言

示波冲击试验可以满足中低加载速率(即 $K < 10^5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$)条件下的材料及焊接接头的冲击断裂韧度测试的要求, 因此, 现有的关于焊接接头的断裂韧度试验研究大都集中在准静态及中低加载速率条件下进行^[1~5], 而对于高冲击加载速率($K \geq 10^5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$)条件下焊接接头的断裂韧度研究, 由于测量设备昂贵及技术原因, 国内开展试验研究较少, 而国际采用的焦散法和光弹法^[6~8], 由于耗资太大, 现在国内没能采用, 也不宜推广。

针对高速冲击载荷($K \geq 10^5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$)下焊接接头的断裂韧度研究, 作者采用了 Hopkinson 压杆气炮加载装置与三点弯曲冲击试样相结合的试验方法^[9, 10], 对焊接接头各部分分别进行了不同冲击速度、不同温度下的冲击试验。对高速冲击载荷作用下焊接接头的断裂韧度及影响因素进行了分析研究。

试验中采用子弹质量 $m = 3.082 \text{ kg}$, 冲击杆质量 $m = 6.5 \text{ kg}$ 。三点弯曲冲击试验进行了三种, 包括焊接接头 V 形缺口试验, 带预制裂纹的 V 形缺口冲击试验和纯母材的 V 形缺口冲击试验。试验时每种试样共三组, 取平均值。

试验母材为 16MnR 钢, 焊接材料分别采用 E4315、E5015 和 E6016, 以组成三种不同组配的接头。冲击试样的制备方法和试样的结构尺寸同 Charpy 冲击试样。

1 动态冲击载荷作用下焊接接头各区域断裂韧度

在相同试验环境温度下, 焊接接头各区域在不同冲击速度下的试验数据结果用曲线表示如图 1 所示。图中只表示了 E5015 焊接接头在室温条件下分别进行了四个速度级别的冲击试验, 冲击试样为带 V 形缺口的三点弯曲冲击试样。从图中可以看出, 在动态冲击载荷作用下, E5015 焊接接头的热影响区(HAZ)冲击吸收功低于母材和焊缝, 说明在动态冲击载荷作用下, 焊接接头热影响区的冲击韧度值低于母材和焊缝, 这一区域的“硬、脆”将值得关注, 是关系到接头安全的重要部位。对 E4315 和 E6016 两种焊接接头带 V 形缺口的三点弯曲试样以及三种接头的带预制裂纹的 V 形缺口的三点弯

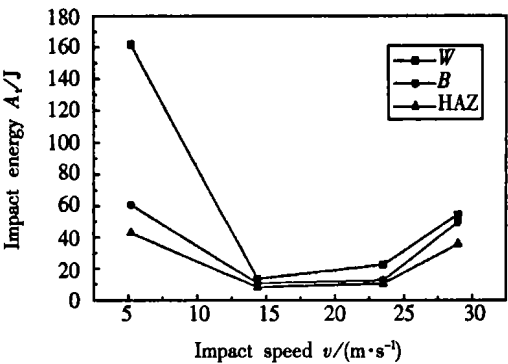


图 1 E5015 接头的冲击速度—冲击吸收功曲线图 (V 形缺口试样)

Fig. 1 Impact speed-impact energy curve diagram of charpy V-notch specimen of E5015 welded joint

曲试样进行的相同速度级别的冲击试验,其不同区域的冲击吸收功的变化趋势与图 1 的结果相似。由此说明,在动态冲击载荷作用下,热影响区的断裂韧度值的高低关系到整体接头的断裂安全。

2 不同组配条件下接头的动态断裂冲击韧度

图 2 为三种强度组配的焊接接头的热影响区在不同冲击速度级别下的冲击断裂韧度值变化示意图,试样为带 V 形缺口三点弯曲冲击试样。试样外形尺寸为 10 mm×10 mm×55 mm,缺口深度为 2 mm+0.02 mm,尖端曲率半径 $r=0.25$ mm。由图可看出,三种组配焊接接头热影响区的断裂韧度随冲击速度的变化而变化的趋势相同,但是在同一冲击速度级别下,等组配焊接接头(E5015)的热影响区的断裂韧度值均比高组配焊接接头(E6016)和低组配焊接接头(E4315)的断裂韧度值高。

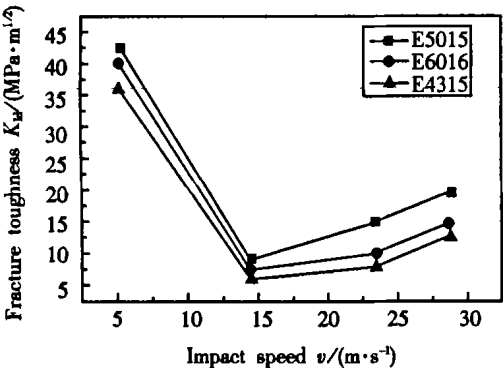


图 2 不同强度组配的焊接接头热影响区不同冲击速度下的断裂韧度值

Fig. 2 Curve diagram of fracture toughness of HAZ of welded joint with different strength and different impact speed

图 3 为高组配焊接接头(E6016)、等组配焊接接头(E5015)和低组配焊接接头(E4315)的焊缝在相同速度级别下的断裂参量比较柱状图。图中 A_i 代表冲击吸收功, E_i 代表裂纹萌生功, E_p 代表裂纹扩展功, K_{Ic} 代表断裂韧度。试样为带预制裂纹的 V 形缺口冲击试样。试样是在 V 形缺口尖端线切割 1 mm 深后再经疲劳裂纹试验机预制到长 1.5 mm 的裂纹。图中等组配焊接接头(E5015)的平均冲击速度为 14.85 m/s, 高组配焊接接头(E6016)的平均冲击速度为 14.91 m/s, 低组配焊接接头(E4315)的平均冲击速度为 14.38 m/s。图中显示在相同速度级别下, 无论高组配(E6016)接头还是低组配(E4315)接头, 其焊缝处的冲击吸收功均低于等组配

配(E5015)接头, 该处的断裂韧度值 K_{Ic} 表现结果也同冲击吸收功一致。

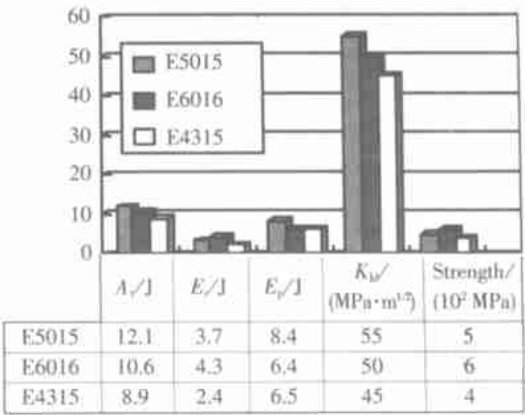


图 3 不同强度组配的焊接接头断裂参量比较柱状图
Fig. 3 Comparative diagram of fracture parameters of welded joint with different strength

从三种接头的裂纹萌生功及所占冲击吸收功的比例看出, 高组配和等组配均高于低组配, 这里主要应归结为材料组配强度因素, 即低组配的强度较低, 因此在动态条件下, 屈服强度上升, 增大“脆硬”倾向, 从而导致冲击断裂功值较小及 K_{Ic} 也较小。另外就高组配与等强组配而言, 强度等级提高不利于动态断裂冲击韧度, 但从裂纹萌生功 E_i 及在总冲击吸收功中所占比例而言, 高组配的值反而高于等强组配(如图 3 所示), 也就是说, 高组配焊缝较等强组配焊缝而言, 其裂纹开裂较难(其 E_i 值高), 但裂纹扩展功较低, 即产生裂纹后较等组配接头焊缝易扩展。这反映出两种组配(低组配除外)在裂纹萌生与扩展方面不同的能量效应。

3 焊接接头动态冲击韧度的温度效应

在静态或准静态载荷作用下, 焊接接头的断裂韧度存在明显的温度效应^[11], 试验说明, 在动态冲击载荷作用下, 焊接接头的冲击断裂韧度的温度效应也是很明显的。图 4 为 E4315 焊接接头在一定冲击速度下不同温度的冲击韧度参数比较图。

从图 4 中可以看出, 焊接接头的动态断裂韧度冲击吸收功 A_i 随温度降低而下降, 同时动态应力强度因子值 K_{Ic} 随温度下降而降低。从裂纹萌生功 E_i 值看, 温度降低, E_i 值下降, 裂纹萌生变得容易, 裂纹扩展功也下降, 说明裂纹扩展也变得容易, 断裂性质发生变化。从试件断口形貌看, 随着温度下降断裂由弹塑性向脆性断裂发展, 这些结果同静态、准静态试验结果相一致。

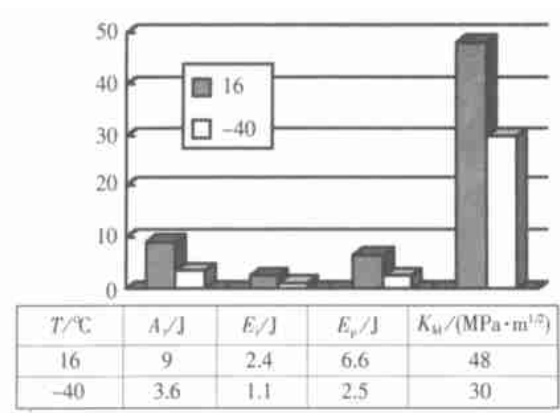


图 4 焊接接头不同环境温度条件下断裂参量比较
Fig. 4 Comparative diagram of fracture parameters of welded joint with different temperature

4 焊接接头动态冲击断裂参量随加载速率的变化

研究表明, 材料的动态断裂韧性除对温度敏感之外, 对加载速率也很敏感。焊接接头试验结果如图 1 所示。从图中可以看出, 无论是母材、热影响区还是焊缝, 在起初, 随着加载速率增加, 其断裂韧性下降, 然后趋于一平台或上升平台, 然后显著上升。这一现象说明随着加载速率的急剧增加, 裂尖绝热温升效应显著, 导致断裂韧性值急剧增高。从裂纹萌生功 E_i 与冲击吸收功比例的变化也说明了这一点。

图 5 为 E5015 焊接接头焊缝和母材的 E_i/A_i-v 的关系图。从图中可以看出, 随着加载速率的增加, 焊接接头各区域中裂纹萌生功所占整个冲击吸收功 A_i 的比例上升, 导致裂纹萌生倾向减弱, 也说明了高速冲击下裂尖塑性变形局域绝热温升效应。

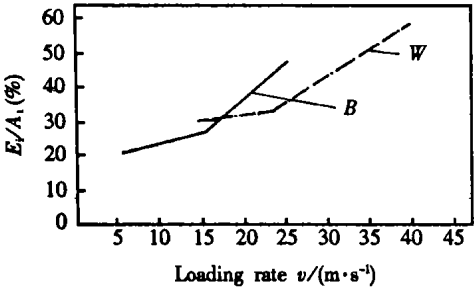


图 5 焊接接头(E5015) E_i/A_i-v 关系
Fig. 5 E_i/A_i-v curve diagram of welded joint

5 焊接接头冲击载荷下的 E_i 与 E_p 分析

由试验可知, 在冲击载荷作用下, 试样首先发生弹塑性变形, 其表现为试样纵向弯曲, 缺口根部横向收缩, 背向缺口一面横向膨胀。同时, 对于带预制裂

纹的冲击试样, 裂纹尖端在载荷作用下发生塑性变形而产生延伸带, 而在 V 形缺口根部形成钝化区。延伸带或钝化区的尺寸随载荷增加而增加, 当达到塑性变形的临界值时, 裂纹在缺口根部(对于 V 形缺口冲击试样)或裂尖(对于带预制裂纹的冲击试样)萌生。萌生后, 在随后扩展过程中, 延伸带或钝化区尺寸横向收缩不再变化, 但纵向弯曲及横向膨胀还将随裂纹扩展继续增大, 所以延伸带或钝化区的尺寸反映了裂纹萌生前的塑性变形的大小。

Kobayashi T^[12] 将冲击载荷—挠度曲线上最大载荷前的能量 E_i 进行划分, 指出对于 V 形缺口试样 E_i 代表了实际裂纹萌生功, 而对于带预制裂纹的冲击试样, 其 E_i 包含裂纹萌生功和部分裂纹扩展功。他采用“小能量冲击试验”法, 将裂纹萌生功从 E_i 中分离出来。根据最大载荷点 P_m 对应的挠度 f_m , 利用 $f-\Delta a$ 关系求出载荷达到 P_m 时的裂纹扩展量 $(\Delta a)_m$, 得到 V 形缺口试样的 $(\Delta a)_m$ 为 $104\ \mu\text{m}$, 而带预制裂纹的冲击试样的 $(\Delta a)_m$ 为 $134\ \mu\text{m}$ 。因此, 在载荷到达 P_m 时, 裂纹已扩展了一定长度, 这说明 P_i 点位于 P_m 之前, 同时也进一步证明了传统的 K_{Id} 试验求解法中以 P_m 作为开裂点的不合理性。由 $\Delta a=0$ 时的挠度 f_i 可确定 P_i , P_i 点将 A_i 分为两部分, P_i 之前为裂纹萌生功, P_i 之后为部分裂纹扩展功。因此, 对于冲击试样来说

$$E_i = E_{i1} + E_{i2} + E_{i3}, \tag{1}$$

式中: E_{i1} 为裂纹萌生前弹塑性变形消耗的功; E_{i2} 为萌生裂纹所固有的功; E_{i3} 为裂纹初始扩展功。其中 $E_{ic} = E_{i1} + E_{i2}$ 为裂纹萌生功。这里指出要区分 E_{i1} 和 E_{i2} 是困难的。试验证明, 对于 V 形缺口冲击试样, E_{i3} 在 E_i 中所占比例很小^[11], 可以认为这时的 E_i 值, 实际上代表了裂纹萌生功的大小, 即

$$E_i = E_{ic}. \tag{2}$$

而对带预制裂纹的冲击试样, E_{i3} 在 E_i 中占相当一部分, 因此, 其 E_i 应为 E_{ic} 与 E_{i3} 之和, 即

$$E_i = E_{ic} + E_{i3}. \tag{3}$$

将总的冲击吸收功 A_i 划分为裂纹萌生功 E_i 和裂纹扩展功 E_p 具有十分重要的意义, 因为 E_i 的大小反映了材料起裂能力的大小, 而 E_p 则反映了裂纹扩展能力的大小, 二者大小在 A_i 中所占的比例对于不同材料、不同工作条件下是不同的, 特别是对于焊接接头不同区域更是不同(见图 3、4)。因此只用 A_i 或 K_{Id} 的大小来衡量冲击载荷作用下断裂韧度的好坏, 不是十分合理的, 有必要研究冲击载荷作用下的 E_i 和 E_p 的大小及影响因素。

5.1 裂纹萌生功 E_i 和裂纹扩展功 E_p 的温度效应

图 4 显示了 E4315 焊接接头焊缝在动态载荷作用下 V 形缺口裂纹萌生功 E_i 和裂纹扩展功 E_P 随温度的变化情况。从图中数据明显看出, 温度下降, 裂纹萌生功 E_i 和裂纹扩展功 E_P 均减小, E_i 从 2.4 J 减小到 1.1 J, E_P 从 6.6 J 减小到 2.49 J。这充分说明, 在一定的冲击速率下, 温度降低, 裂纹开裂和扩展需要的能量值减小, 开裂倾向增加, 扩展容易。特别是随着温度下降, 裂纹扩展功急剧减小, 越容易发生断裂。

5.2 加载速率对 E_i 的影响

试验说明在动态冲击载荷作用下, 加载速率对 E_i 有十分明显的影响。图 5 为 E5015 焊接接头母材、热影响区及焊缝部位的 E_i - v 关系。从图中可以看出, 随着 v 增加, E_i 减小, 到一个最低点后逐渐回升, 呈 V 形变化趋势, 中间出现了一个略微上升平台, 随后上升。这是因为在很高的加载速率下, 在裂纹的前沿, 由于塑性流动产生的热量来不及全部散去, 造成裂尖附近局部温度显著升高, 使 E_i 值升高。对带预制裂纹的焊接接头冲击结果也有类似的趋势。

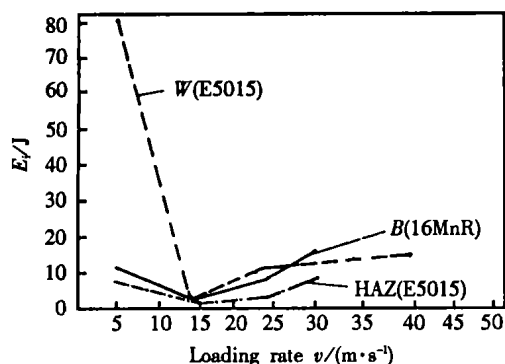


图 6 焊接接头 V 形缺口冲击试样各区域的 E_i - v 关系曲线

Fig. 6 E_i - v curve diagram of V-notch impact specimen of welded joint

6 结 论

(1) 在高应变率加载条件下, 焊接接头冲击试样断口形貌有特殊的表现, 延伸带或钝化区的尺寸大小反映了裂纹萌生前的塑性变形大小, 也反映了裂纹萌生功的变化趋势。

(2) 在一定的冲击速度下, 焊接接头各区域的动态断裂韧度值不同, 热影响区的动态断裂韧度值低于母材和焊缝, 因而热影响区的动态断裂韧度值应作为动态载荷条件下焊接接头的断裂韧度好坏的特征值。

(3) 焊接接头不同强度组配对焊接接头的动态断裂韧度值影响显著。针对文中研究的压力容器用钢 16MnR 而言, 采用等强组配(E5015)接头, 其动态

断裂韧度值均高于低组配(E4315)和高组配(E6016)接头的动态断裂韧度值, 这说明, 在动态载荷作用下, 焊接接头的安全设计完全按传统的强度理论设计是不安全的, 更应重视和优先考虑动态断裂韧度值的高低。

(4) 焊接接头动态断裂韧度的温度效应明显。温度降低, 冲击吸收功和动态断裂韧度值降低, 裂纹萌生功 E_i 减小, 断裂倾向增加。

(5) 焊接接头动态断裂韧度的应变率效应显著。随着加载速率的升高, 动态断裂韧度值呈上升趋势, 裂纹萌生功增大, 绝热温升效应明显。

参考文献:

- [1] 陈冰莹. 管线钢及其焊接接头的韧度研究[D]. 西安: 西安交通大学, 1988.
- [2] 林君山. 低合金钢低温下形变与断裂的动态效应研究[D]. 西安: 西安交通大学, 1989.
- [3] 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.
- [4] ASTM STP 466. Impact testing of metals[S]. The american society for testing and materials. Philadelphia, 1970.
- [5] ASTM STP 563. Instrumented impact testing[S]. The American Society for Testing and Materials. Philadelphia 1974.
- [6] Kalthoff J F. The measurement of dynamic fracture toughness[J]. International Journal of Fracture, 1985, 27(3): 277~298.
- [7] Beinert J, Kalthoff J F. Experimental determination of dynamic stress intensity factors by shadow patterns[J]. Mechanics of Fracture, 1981, 7(5): 281~330.
- [8] Murty K N, Rao N K, Krishnan H K. Application of instrumented impact testing for studying dynamic fracture behavior of rotor steel[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1983, 18(6): 1173~1184.
- [9] 巩水利. 爆炸容器焊接接头动态力学响应及断裂韧度研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2001.
- [10] 于 琴, 巩水利. 焊接接头高应变率条件下的冲击韧度测试技术[J]. 焊接学报, 2001, 22(3): 71~75.
- [11] 钢铁研究总院物理室. 15MnVNg 钢基材 56 毫米厚板对母材和焊缝在不同温度下的动态断裂韧度试验研究[R]. 北京: 冶金部钢铁研究总院, 1991.
- [12] Kobayashi T. Analysis of impact properties of A533 steel for nuclear reactor pressure vessel by instrumental charpy test[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1984, 19(1): 49~79

作者简介: 巩水利, 男, 1964 年 12 月出生, 工学博士, 高级工程师。主要从事焊接结构力学行为研究。获各级科技进步奖 17 项, 发表论文 10 余篇。

Email: gongshuli@sina.com