

钢结构厚板对接焊缝的低温断裂韧性试验

王元清¹, 周 晖¹, 石永久¹, 胡宗文¹, 陈 宏²

(1. 清华大学 土木工程系 土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 100084 北京;

2. 清华大学 建筑设计研究院, 100084 北京)

摘 要: 随着钢板厚度的增加, 焊接难度加大, 且存在焊接裂纹缺陷的可能性也增大. 为防止钢结构厚板焊接接头的脆性断裂, 采用三点弯曲试样, 以裂纹尖端张开位移(CTOD)为指标, 对厚度为 150mm 的 Q345B 钢板对接焊缝低温下的断裂韧性进行试验研究. 分析了焊缝金属和热影响区断裂韧性 CTOD 值 δ_m 随温度的变化关系, 并用 Boltzmann 函数对断裂韧性-温度曲线进行拟合, 结合试样断口的扫描电镜图分析了断裂的微观机理. 试验结果表明: 焊缝金属和热影响区的 CTOD 值 δ_m 随温度的降低而降低, 从 20 °C ~ -60 °C, 降幅分别达 78% 和 91%; 热影响区 CTOD 值 δ_m 比焊缝金属和母材均要小. 试验积累了厚板对接焊缝的断裂韧性数据, 为低温地区钢结构厚板对接焊缝脆性断裂的预防提供了技术基础.

关键词: 厚钢板; 对接焊缝; 低温; 断裂韧性; 裂纹尖端张开位移(CTOD)

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)06-0115-06

Experimental study on fracture toughness of butt weld in thick plate steel structures at low temperature

WANG Yuan-qing¹, ZHOU Hui¹, SHI Yong-jiu¹, HU Zong-wen¹, CHEN Hong²

(1. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Department of Civil Engineering, Tsinghua University, 100084 Beijing, China; 2. Architectural Design and Research Institute, Tsinghua University, 100084 Beijing, China)

Abstract: To prevent brittle fractures in thick plate steel structures, the fracture toughness of butt welded joints fabricated from 150 mm thick Q345B steel plates were tested at low temperature by three-point bending specimens and crack tip opening displacement (CTOD) was applied as a fracture toughness index. The relationships between fracture toughness CTOD δ_m and temperature for weld metal and heat affected zone (HAZ) were analyzed through Boltzmann curve fitting from toughness versus temperature data. Furthermore, the fracture mechanism of the tested specimens were investigated with scanning electron micrographs. The test results indicated that the fracture toughness CTOD values δ_m for weld metal and HAZ reduced as the temperature decreased. From 20 °C to -60 °C, the CTOD values δ_m for weld metal and HAZ reduced by 78% and 91%, respectively. Compared to the base metal and weld metal, the CTOD values δ_m for HAZ were much lower. In this study, rich experimental data were collected for fracture toughness of thick plate butt weld, so as to form the technical basis for preventing brittle fracture of thick plate steel structures in cold regions.

Key words: thick steel plate; butt weld; low temperature; fracture toughness; crack tip opening displacement (CTOD)

收稿日期: 2011-04-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50778102).

作者简介: 王元清(1963—), 男, 教授, 博士生导师;

石永久(1962—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 王元清, wang-yq@mail. tsinghua. edu. cn.

近年来,我国建筑钢结构工程迅速发展,特别是一些超高层建筑和大跨度结构,应用了大量厚板钢材^[1]. 例如,国家体育场“鸟巢”采用了 110 mm 的 Q460E-Z35 厚板和 100 mm 的 Q345GJD

厚板^[2];央视新台址大楼采用了 80、100、110 mm 的 Q420D 和 S460M 厚板^[1];北京新保利大厦采用的轧制 H 型钢 (ASTM A913 Gr60),翼缘厚度达 125 mm^[3].

随着钢板厚度的增加,焊接难度大大提高,存在焊接缺陷的可能性也相应增加^[2]. 厚板焊接较大的热输入量对焊接热影响区的抗裂性及韧性产生了显著影响. 厚板钢材的冶炼轧制工艺,使厚板的韧性和塑性均有所降低,特别是中心偏析使钢板厚度方向的性能明显劣化. 因此,厚板焊接接头非常容易在焊接施工和使用过程中,发生脆性断裂事故^[3]. 另一方面,我国冬季覆盖范围广,且部分地区长期处于低温,冬季施工或低温下服役都容易引发钢结构的脆性断裂,尤其是厚板焊接工程.

断裂韧性反映了材料抵抗断裂的能力,其受到材质、构件厚度、环境温度和加载速率等因素的影响^[4-5]. 断裂力学方法能对钢结构的断裂行为做出准确、定量的判断^[6-8],而断裂韧性是断裂力学分析所必需的基本材料性指标. 因此,开展钢结构厚板对接焊缝断裂韧性的试验测定及其影响规律研究,对防止厚板焊接接头的脆性断裂具有重要意义^[9]. 低温对钢材及焊缝的韧性具有显著影响^[10-12],本文将在低温环境下,采用三点弯曲试样,对 150 mm 的 Q345B 厚板对接焊缝进行裂纹尖端张开位移试验,分别测定焊缝金属和热影响区材料各低温点下的断裂韧性,并研究其随温度的变化规律.

1 试 验

1.1 试验依据与目的

根据 GB/T 2358—94《金属材料裂纹尖端张开位移试验方法》的规定^[13],在 20、0、-20、-40、-60 ℃ 五个温度点下,对结构用钢材 Q345B 的 150 mm 厚钢板对接焊缝的熔敷金属和热影响区材料进行三点弯曲试验.

试验直接测定试样跨中荷载 P 和刀口张开位移 V ,得到 $P-V$ 曲线,从而按照试验标准^[13]给出的公式计算最大荷载点对应的裂纹尖端张开位移 CTOD 值 δ_m ,以表征相应材料的断裂韧性. 并得到焊缝金属和热影响区材料 CTOD 值 δ_m 随温度和厚度方向位置的变化规律. 最大荷载点对应的 CTOD 值 δ_m 为^[13]

$$\delta_m = \frac{K_I^2(1 - \mu^2)}{2\sigma_y E} + \frac{r_p(W - a_0)V_{mp}}{r_p(W - a_0) + a_0 + Z}$$

式中: $\mu = 0.3$ 为泊松比; $E = 2.06 \times 10^5$ MPa 为

弹性模量; σ_y 为焊缝金属或热影响区材料的屈服强度^[14]; $r_p = 0.44$ 为塑性转动因子; W 为试样宽度; a_0 为试样原始裂纹长度,由断口测定; V_{mp} 为 $P-V$ 曲线最大荷载点对应的塑性位移; Z 为固定引伸计的刀口厚度; $K_I = YP_m/[BW^{1/2}]$ 为 I 型应力强度因子,其中 P_m 为 $P-V$ 曲线上的最大荷载值, B 为试样厚度, Y 由 (a_0/W) 按照试验标准^[13]查表得到.

1.2 试样材料与尺寸

试验选用首钢生产的结构用厚板钢材 Q345B,厚度 $t = 150$ mm,主要化学成分见表 1. 对接焊缝采用单边 V 形坡口,坡口形式见图 1. 焊接在常温下进行,焊接位置为平焊,焊接方法为 CO₂ 气体保护焊,焊丝型号 H08Mn₂SiA、直径 1.2 mm,电流 250~300 A、电压 28~35 V、送丝速度 30~45 cm/min.

表 1 Q345B 钢板主要化学成分 (质量分数) %					
化学成分	碳 C	锰 Mn	硅 Si	硫 S	磷 P
质量分数	0.190	1.510	0.420	0.018	0.017

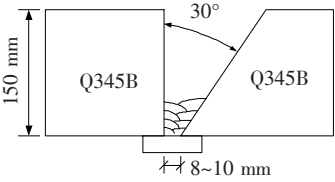


图 1 对接焊缝坡口形式示意

试验采用的三点弯曲试样的几何尺寸见图 2,试样厚度 $B = 10$ mm、宽度 $W = 2B = 20$ mm、跨度 $S = 4W = 80$ mm、总长度 $L = 110$ mm,裂纹长度为 7 mm 的线切割和约 3 mm 的预制疲劳裂纹.

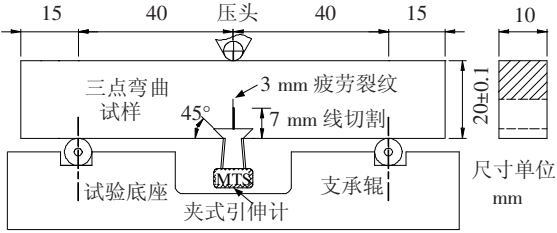


图 2 三点弯曲试样尺寸及试验装置示意

如图 3 所示,取样方向垂直于焊缝方向,分别在距钢板表面 0、1/4、1/2、3/4 厚度位置取样;焊缝金属试样的裂纹平面大致位于所在厚度位置焊缝宽度的中心,热影响区试样的裂纹平面大致位于距熔合线 2 mm 的母材一侧. 试样分组情况见表 2.

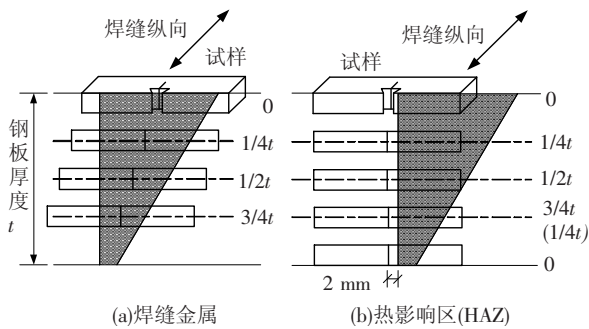


图3 三点弯曲试样的取样位置

表2 三点弯曲试样的分组情况

材料	取样位置	试样数 × 温度点数(温度值/℃)
焊缝金属	表面	3 × 3(20、0、-40)
	1/4 厚度	3 × 5(20、0、-20、-40、-60)
	1/2 厚度	3 × 3(20、0、-40)
	3/4 厚度	3 × 3(20、0、-40)
	合计	42 件
热影响区	表面	3 × 3(20、0、-40)
	1/4 厚度	3 × 5(20、0、-20、-40、-60)
	1/2 厚度	3 × 3(20、0、-40)
	合计	33 件

注:表中第3列为试样数,如“3×3(20、0、-40)”表示选取3个温度点20、0、-40℃,每个温度点3个试样,共3×3=9个试样。

1.3 试验设备与注意事项

试验在清华大学航空航天学院力学系实验室进行,采用的全套低温试验设备见图4。试验中试样由空气和液氮的混合气体进行冷却,并由温度传感器、控制器、混合气体伺服阀等调节保温箱内的温度保持某一设定值,该温度控制设备调节温度的精度在±1℃。测量刀口张开位移的引伸计为专门的低温夹式引伸计。

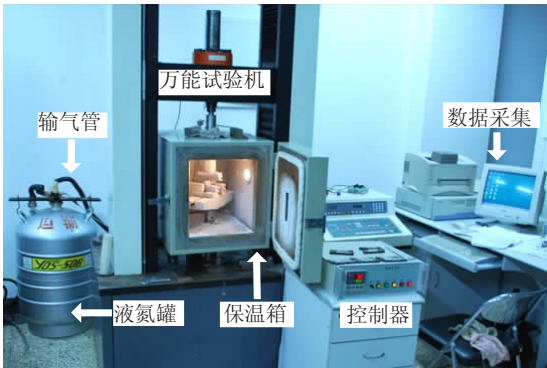


图4 三点弯曲低温试验的设备

试验过程中应注意的事项如下:

- 1) 试验机应保证试样在跨中位置受压,压头位移速率为2 mm/min,保证为静力加载;
- 2) 试验从高温到低温进行,多试样同时在低温箱内冷却,提高试验效率;
- 3) 冷却试样的时间不少于15 min,且在加载

过程中温度偏离设定值不超过±2℃;
4) 由计算机采集系统记录试样破坏前荷载与位移的全过程曲线。

2 试验结果

2.1 CTOD 值 δ_m 随温度的变化

GB/T 2975—1998《钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备》规定,对于厚度大于50 mm的钢板,取样位置为距表面1/4厚度处。因此,在CTOD试验中,将1/4厚度位置试样的试验值作为钢板或焊缝整体性能的代表值。母材、焊缝金属和热影响区材料的断裂韧性CTOD值 δ_m 随温度的变化关系见图5(δ_m 为3个试样试验的平均值,母材数据来自前期试验^[14])。

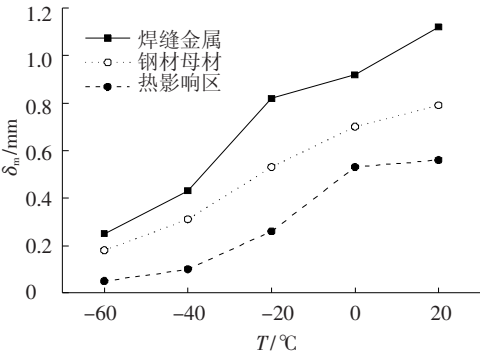


图5 断裂韧性CTOD值 δ_m 随温度的变化

由图5可见,随着温度的降低,焊缝金属、热影响区和母材的CTOD值 δ_m 均迅速降低;如热影响区CTOD值 δ_m 由20℃的0.56 mm降低至-60℃的0.05 mm。相同温度点下,焊缝金属的CTOD值 δ_m 相对较高,而热影响区CTOD值 δ_m 低于母材。造成这一结果的可能原因:对接焊缝采用CO₂气体保护焊,氩弧焊丝H08Mn₂SiA熔敷金属具有优良的塑性、韧性和抗裂性能,尤其是低温冲击韧性较高^[12];而对于焊接热影响区,在焊接热循环作用下焊缝两侧的母材发生明显的组织和性能变化,奥氏体晶粒长大,使热影响区的塑性和韧性均低于母材。

2.2 CTOD 值 δ_m 随取样位置的变化

为研究沿板厚方向不同位置的断裂韧性分布,试验在20、0、-40℃三个温度点下,对焊缝金属和热影响区材料进行了沿厚度方向不同位置的取样。焊缝金属材料的热影响区材料的试验结果见图6和图7,图7还列出了母材的试验结果。

由图6三个温度点下CTOD值 δ_m 随厚度位置的分布可见,焊缝金属CTOD值 δ_m 沿厚度位置的变化没有明显规律,是随机波动的。

由图7可见,热影响区CTOD值 δ_m 沿厚度位

置的分布规律和母材保持一致,均表现出从表面至中心位置不断降低的趋势;且同一温度点下相同厚度位置上,热影响区的 CTOD 值 δ_m 均比母材的小。

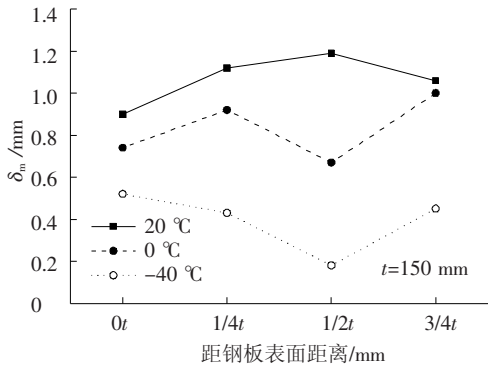


图 6 焊缝金属 CTOD 值 δ_m 随厚度位置的变化

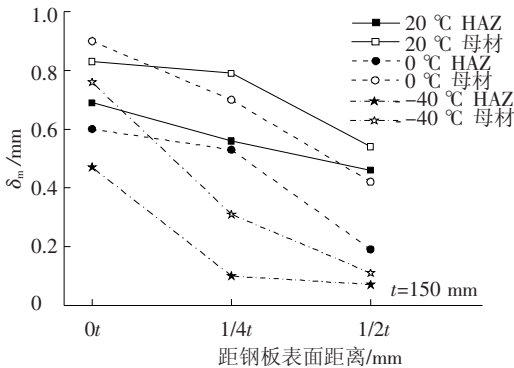


图 7 热影响区 CTOD 值 δ_m 随厚度位置的变化

3 韧脆转变温度分析

韧脆转变温度是反映材料低温冷脆性能的一个重要指标,转变温度越高,材料越容易发生低温冷脆。见图 8,断裂韧性 CTOD 值 δ_m 随温度的变化曲线总体上呈 S 形,分为上平台区、转变区和下平台区 3 个部分。采用 Boltzmann 函数可以较好地拟合断裂韧性 - 温度曲线^[15]

$$\delta_m = \frac{\delta_1 - \delta_2}{1 + \exp[(T - T_i)/\Delta T]} + \delta_2.$$

式中: δ_1 、 δ_2 分别为断裂韧性 CTOD 值的下平台、上平台值(mm); T 为温度变量(°C); T_i 为韧脆转变温度(°C), ΔT 为转变温度区范围(°C)。

采用 Boltzmann 函数,基于 1/4 厚度位置每个试样的断裂韧性试验值,对焊缝金属、热影响区和母材的断裂韧性 - 温度曲线进行拟合,图 8 给出了热影响区材料的韧脆转变拟合曲线,参数结果见表 3,由表 3 可见:

1) 与热影响区和母材相比,焊缝金属的上平台值和转变温度区范围都较大,且韧脆转变温度较低(- 30.8 °C),表现出较好的断裂韧性;但拟合的相关系数较低,表明试验结果的离散性较大。

2) 热影响区的上平台值和转变温度区范围均小于母材,而韧脆转变温度 - 17.0 °C 则高于母材的 - 25.4 °C ,表明热影响区的断裂韧性比母材差。

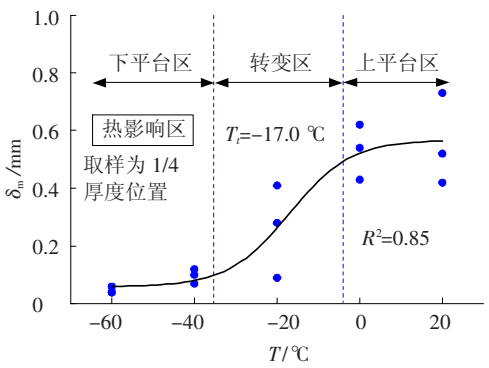


图 8 热影响区 CTOD 值 δ_m 随温度的转变曲线

表 3 断裂韧性 - 温度曲线的拟合参数结果

材料	δ_1 / mm	δ_2 / mm	T_i / °C	ΔT / °C	R^2
焊缝金属	0.05	1.16	- 30.8	18.6	0.74
热影响区	0.06	0.57	- 17.0	7.4	0.85
钢材母材	0.11	0.82	- 25.4	15.4	0.90

4 试样断口分析

三点弯曲试样断口包括切割区、疲劳区、纤维区、剪切区、脆性断裂区和冲击断裂区^[16],见图 9。切割区是试样加工时线切割的区域;疲劳区是试样进行疲劳裂纹加工的过程中形成的;纤维区是试样加载过程中延性断裂的断口,低温脆断时该区域很小甚至没有;剪切区出现在试样表面,为剪切破坏;脆性断裂区为试样发生脆性断裂形成的断口,形成速度较快;冲击断裂区是加载结束后将试样压断而形成的。

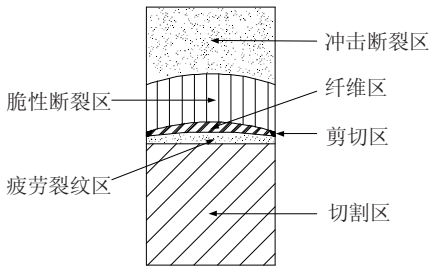


图 9 三点弯曲试样断口的组成示意

图 10 和图 11 分别为焊缝金属和热影响区试样在不同试验温度下的宏观断口照片。通过宏观断口形貌,可以看出试样断裂时的塑性变形随温度的降低而不断减小甚至消失,且试样表面两侧的剪切区也越来越不明显,表明韧性越来越差。

对三点弯曲试样断口进行电镜扫描,放大倍

数为 1 000 倍,焊缝金属和热影响区试样断口的扫描电镜照片见图 12 和图 13.

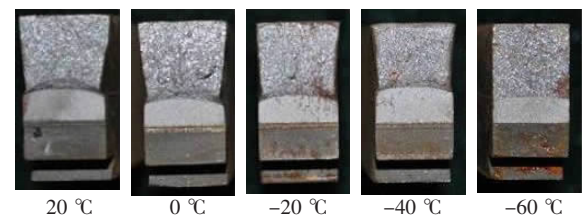


图 10 焊缝金属试样在不同试验温度下的断口

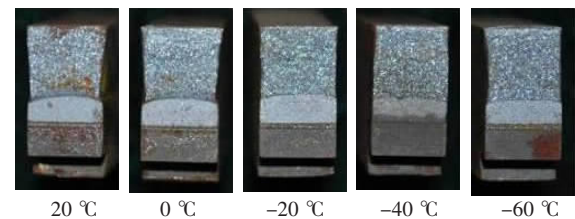
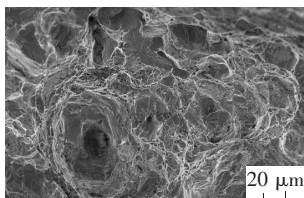
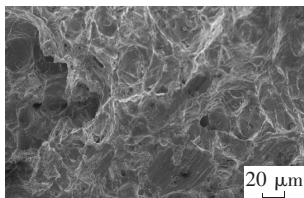


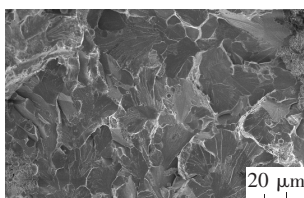
图 11 热影响区试样在不同试验温度下的断口



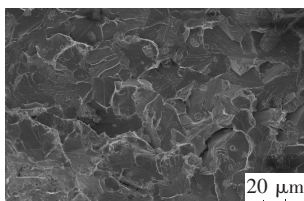
(a) 20 °C (纤维区)



(b) -20 °C (纤维区)



(c) -40 °C (脆断区)



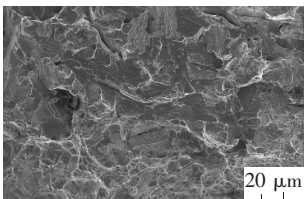
(d) -60 °C (脆断区)

图 12 不同试验温度下焊缝金属试样断口的扫描电镜照片

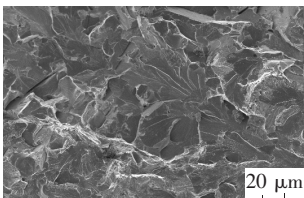
由图 12 可见,常温 20 °C 时断口存在明显的纤维区,有典型的韧窝分布,断裂的微观机理为微孔聚合型断裂,韧性较好;当温度降低至 -20 °C

时断口依然存在纤维区,但同时也有少量解理面出现;低温 -40 ~ -60 °C 时断口仅存在脆性断裂区,显示出非常清晰的解理断裂的舌状花样.

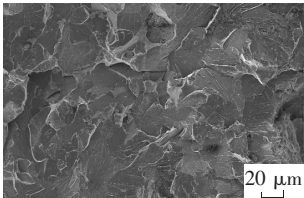
由图 13 可见,20 °C 时热影响区试样的纤维区分布着较明显的韧窝和解理面;温度达 -20 °C 时纤维区完全消失而仅存在脆性断裂区,具有河流状花样的解理断裂特征;低温 -40 ~ -60 °C 时,脆性断裂特征更加明显.



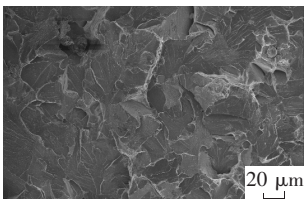
(a) 20 °C (纤维区)



(b) -20 °C (脆断区)



(c) -40 °C (脆断区)



(d) -60 °C (脆断区)

图 13 不同试验温度下热影响区试样断口的扫描电镜照片

由焊缝金属和热影响区试样断口的微观形貌比较可见,热影响区材料的脆性特征更加明显一些,这与试验中测得的热影响区材料 CTOD 值 δ_m 更小的结果相一致.

5 结 论

1) 焊缝金属和热影响区的断裂韧性 CTOD 值 δ_m 随温度的降低而降低,从 20 ~ -60 °C,降幅分别达 78% 和 91%;焊缝金属的断裂韧性最好、母材次之、热影响区最差.

2) 焊缝金属的 CTOD 值 δ_m 随厚度位置的分布无明显规律;热影响区的 CTOD 值 δ_m 随厚度位置的分布规律与母材一致,表现出从表面到中心降低的趋势,但热影响区的断裂韧性值 δ_m 比母材小.

3) 焊缝金属的韧脆转变温度最低($-30.8\text{ }^{\circ}\text{C}$),母材次之($-25.4\text{ }^{\circ}\text{C}$),热影响区最高($-17.0\text{ }^{\circ}\text{C}$).

4) 焊缝金属和热影响区试样断口的宏、微观形貌分析表明,热影响区材料的脆性特征更加明显,这与该材料较小的断裂韧性试验测定值 δ_m 相符.

参考文献:

- [1] 柴昶. 厚板钢材在钢结构工程中的应用及其材性选用[J]. 钢结构, 2004, 19(5): 47-53.
- [2] 戴为志, 刘景凤. 建筑钢结构焊接技术——“鸟巢”焊接工程实践[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [3] 王元清, 周晖, 石永久, 等. 钢结构厚板层状撕裂及其防止措施的研究现状[J]. 建筑钢结构进展, 2010, 12(5): 26-34.
- [4] KUWAMURA H, IYAMA J, MATSUI K. Effects of material toughness and plate thickness on brittle fracture of steel members [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(11): 1475-1483.
- [5] WANG Y Q, ZHOU H, SHI Y J, *et al.* Study on fracture toughness indices of Chinese structural steel and weld metal [C]//Proceedings of the Twentieth (2010) International Offshore and Polar Engineering Conference. Beijing: ISOPE, 2010:129-134.
- [6] 张式程, 田锡唐. 焊接接头弹塑性断裂力学分析工程方法研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1990, 22(1): 93-98.
- [7] 刘洪波, 赵文军, 李爽, 等. 楔形翼缘连接板腹板连接节点断裂性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(10): 1662-1666.
- [8] WANG Y Q, ZHOU H, SHI Y J, *et al.* Fracture behavior analyses of welded beam-to-column connections based on elastic and inelastic fracture mechanics [J]. International Journal of Steel Structures, 2010, 10(3): 253-265.
- [9] 苗张木. 厚钢板焊接接头韧度 CTOD 评定研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.
- [10] WU Y M, WANG Y Q, SHI Y J, *et al.* Effects of low temperature on properties of structural steels [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2004, 11(5): 442-448.
- [11] 王元清, 胡宗文, 石永久, 等. 结构钢厚板低温冲击韧性试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(9): 1179-1184.
- [12] 王元清, 胡宗文, 石永久, 等. 钢结构厚板对接焊缝低温冲击韧性试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2010, 7(5): 1-5.
- [13] GB/T 2358—94 金属材料裂纹尖端张开位移试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [14] 胡宗文. 钢结构厚板及焊缝脆性断裂的力学性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [15] 张玉玲. 大型铁路焊接钢桥疲劳断裂性能与安全设计[D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [16] 武延民. 钢结构脆性断裂的力学机理及其工程设计方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.

(编辑 赵丽莹)