

X100 直缝埋弧焊管断裂韧性的 裂纹尖端张开位移试验研究

熊庆人^{1,2,3}, 刘俊¹, 张建勋¹, 李云龙², 谢勇²

(1. 西安交通大学金属材料强度国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 中国石油集团石油管工程技术研究院, 710065, 西安; 3. 中国石油天然气集团公司石油管工程重点实验室, 710065, 西安)

摘要: 为了检验 X100 直缝埋弧焊管的断裂韧性, 采用三点弯曲多试样法, 在室温、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下对该焊管的母材、热影响区和焊缝部位进行了裂纹尖端张开位移 (CTOD) 试验. 测试结果表明: 在同一温度下, CTOD 试验的表观启裂值 $\delta_{0.05}$ 、条件启裂值 δ_i 和最大载荷值 δ_m 的分布规律为母材最好, 焊缝次之, 热影响区最差; 采用裂纹扩展阻力和撕裂模量表征的分布规律为母材最好, 热影响区次之, 焊缝最差; 焊接热影响区组织中含有大量呈块状分布的铁素体, 而粒状贝氏体等增强相的含量较少, 这会造成其韧性下降, 使焊管出现局部失稳现象.

关键词: 断裂韧性; 裂纹尖端张开位移; 直缝埋弧焊管; 热影响区

中图分类号: TG142.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)09-0119-06

Fracture Toughness Investigation of X100 Longitudinal Submerged Arc Welded Pipe via Crack Tip Opening Displacement Test

XIONG Qingren^{1,2,3}, LIU Jun¹, ZHANG Jianxun¹, LI Yunlong², XIE Yong²

(1. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an 710065, China;
3. CNPC Key Laboratory of Oil Pipe Project, Xi'an 710065, China)

Abstract: Three-point bend testing method was employed in the crack tip opening displacement (CTOD) test to investigate the fracture toughness of base metal, heat affected zone (HAZ), and weld of an X100 longitudinal submerged arc welded (LSAW) pipe. The results show that at the same temperature, the $\delta_{0.05}$, δ_i , and δ_m in the X100 LSAW pipe distribute as: base metal > weld bead > HAZ; and the crack propagation resistance and tear modulus distribute as: base metal > HAZ > weld bead. Further analysis shows that the toughness of HAZ of X100 LSAW pipe closely relates with its microstructure. Large amount of polygonal ferrite in HAZ microstructure and less content of reinforcement phases, such as granular bainite, can lead to the decrease in fracture toughness, especially at low temperature, and the emergence of local instability.

Keywords: fracture toughness; crack tip opening displacement (CTOD); longitudinal submerged arc welding pipe (LSAW pipe); heat affected zone

天然气采用高压输送呈现强劲的发展趋势, 与提高压力相适应, 输送管道的强度级别也将持续提高. X80 级管线钢的研发工作已经完成, 目前已在欧

洲、北美以及我国西气东输二线管道工程中实现了商业化应用. 对于具有更高强度的 X100 和 X120 等级的钢管, 国外已进行了多年的研究^[1-7], 并进行了

小批量试制。例如,日本的 NKK、新日铁,欧洲的 Europepipe 等钢管公司已经开发出 X100 管线管。由 ECSC 赞助,CSM、Corus、Europepipe 和 Snam Rete Gas 公司共同实施的研究项目对 X100 钢管是否适用于高压管线进行了研究,重点研究了这种高等级管线钢的断裂行为,为 EPRG 公司资助的 EC-SC 示范项目 DEMOPIPE 奠定了基础。DEMOPIPE 项目的主要目标是增加对 X100 级管线管应用的了解,并建立 X100 钢管延性断裂控制所需的韧性安全值。

管线钢的断裂通常由裂纹的启裂和扩展 2 个阶段组成。启裂是裂纹由静止转变为扩展的临界点,启裂后若载荷继续增加,则进入亚临界扩展阶段^[8]。当外力增加到某一临界值或裂纹尺寸达到某一临界尺寸时,裂纹进入临界状态,发生高速失稳扩展。因此,管线钢的启裂控制是必要的。裂纹尖端张开位移(CTOD)试验属于一种开裂试验,由于其加载速率较低,与管线钢的启裂相近,因此常用来作为管线钢的启裂准则。

CTOD 作为裂纹启裂和较少量稳定扩展的性能指标,人们从理论上和实践上均已对其进行了大量研究^[8]。研究表明:在开裂前,CTOD 能反映裂纹端部的形变场强度,并且开裂瞬时的 CTOD 是一个与试样尺寸无关的常数,而是与材料的性质有关,因此可将其作为变形过程的参数和断裂判据。CTOD 方法起源于英国,在英国、日本等国首先得到发展,其后在其他工业发达国家也得到了广泛应用,主要用于压力容器、管道和焊接结构等产品的安全分析。

我国目前也正在开展 X100 管线钢/管的研发工作。X100 钢管管体、焊缝及热影响区的断裂韧性如何,将直接影响 X100 管线的使用及管道安全性。为此,本研究针对国外 X100 直缝埋弧焊管的断裂韧性,对其母材、焊缝及热影响区进行了 CTOD 试验,并对试验结果进行了分析,剖析了不同部位断裂韧性的特点,以期对 X100 管线钢/管的开发及工程应用有所裨益。

1 材料与试验过程

试验材料为进口 X100 直缝埋弧焊管,其化学成分和力学性能见表 1 和表 2。分别在焊缝、热影响区和母材 3 个位置取样进行试验,试验温度为室温、-10 ℃及-30 ℃。焊缝试样的缺口开在焊缝中心,母材试样的缺口开在试样中心,热影响区试样的缺口开在壁厚中心线与熔合线交点处。试样上的机械

缺口位置见图 1。在线切割机上用 0.08 mm 直径的钼丝加工机械缺口,缺口深度为 8 mm,且垂直于试样表面,偏差在±2°以内。

表 1 X100 钢管的化学成分

元素	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Nb+V+Ti
w	0.059	0.23	1.96	0.53	0.003 6	0.39	0.043

表 2 X100 钢管管体的力学性能

拉伸性能			夏比冲击韧性	
R_m / MPa	$R_{p0.2}$ / MPa	A / %	冲击功/ J	剪切面积比/ %
873	834	20.0	267	98
878	843	17.0	255	98
880	840	21.0	265	98

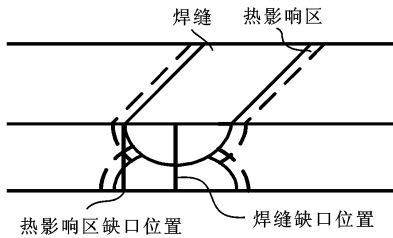


图 1 试样缺口位置示意图

采用 PLS-100 电液伺服动静试验机在室温(16 ℃)下预制疲劳裂纹。预制过程按照 ASTM-E1290—2007《裂纹尖端张开位移断裂韧性测量试验方法》^[9]进行。所有试样均通过疲劳的方法产生预裂纹,疲劳裂纹扩展至最后 0.7 mm 时,采用的最大疲劳载荷 $P_{f,max}$ 为规定载荷 P_f ,最小疲劳载荷 $P_{f,min}$ 为 $0.1P_f$ 。预置疲劳裂纹长度为 3 mm。

三点弯曲 CTOD 试验在 CSS-88100 试验机上进行,试样跨距 $S=96$ mm。冷却槽采用不锈钢保温瓶,以达到保温的目的;冷却液为干冰、工业酒精和液氮。所有试样预先在冷却槽中进行冷却,用温度计对冷却液进行测量,使温度保持在试验温度,冷却时间大于 15 min。在整个 CTOD 试验过程中,试样必须置于冷却槽内,且温度保持恒定。按照 ASTM-E1290—2007 标准进行试验^[3],试验中将试样分别加载到预先选定好的不同位移水平,加载速率为 1 mm/s。根据前一个试样的裂纹扩展量,按照 ASTM-E1290—2007 标准的相关规定确定下一个试样加载的位移值。根据没有发生失稳的有效数据

点拟合阻力曲线,并根据上述标准,对 CTOD 特征值 $\delta_{0.05}$ 、 δ_i 、 δ_c 和 δ_u 的有效性进行判断。

2 试验结果与分析

2.1 裂纹扩展阻力曲线及其特征分析

X100 直缝埋弧焊管母材、热影响区、焊缝在不同温度下的阻力曲线见图 2。根据图 2 整理的不同部位的裂纹扩展阻力 $tg\alpha$ 及撕裂模量 $T_{\delta R}$ 如图 3、图 4 所示(热影响区试样在低温 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 未能得到裂纹扩展阻力和撕裂模量)。

试验结果表明:裂纹扩展阻力和撕裂模量均为母材的最大,热影响区的次之,焊缝的最小;对同一部位而言, $tg\alpha$ 与 $T_{\delta R}$ 在室温和 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时相差不大,但是在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时均出现了明显的下降。以上结果说明,母材的低温韧性优于热影响区和焊缝,且随着温度的降低,在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时各部位抵抗裂纹失稳扩展的能力均明显下降。

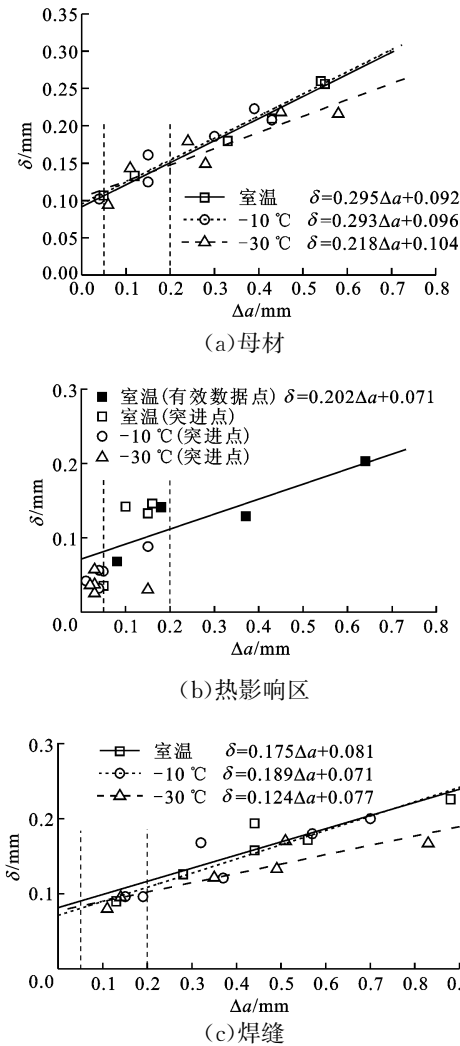


图 2 X100 直缝埋弧焊管的阻力曲线

热影响区试样在室温时有一部分出现了失稳现象,随着温度降低,在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温时所有的试样均出现了失稳现象,而且在出现失稳现象时,稳定裂纹扩展量均小于 0.2 mm 。这一结果表明,所测 X100 钢管热影响区的低温韧性较差,裂纹启裂后塑性变形的增加并不能减弱裂纹尖端的应力集中,裂纹张开位移和钝化区的饱和临界值较低,使得裂纹出现小范围内的失稳扩展。

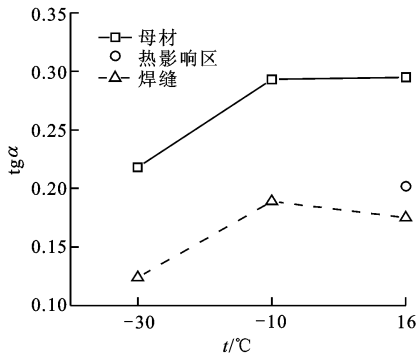


图 3 X100 直缝埋弧焊管的裂纹扩展阻力

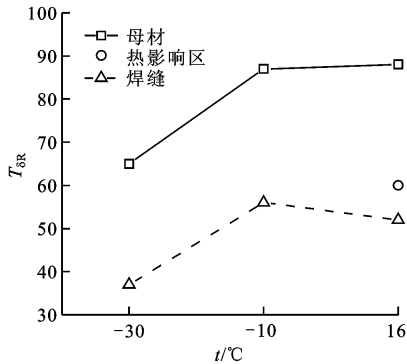


图 4 X100 直缝埋弧焊管的撕裂模量

2.2 CTOD 特征值分析

CTOD 特征值是指裂纹扩展过程中不同阶段的 CTOD 值,它表征了材料抵抗裂纹启裂或扩展的能力。CTOD 特征值包括表观启裂值 $\delta_{0.05}$ 、条件启裂值 δ_i 、脆性启裂值 δ_c 、脆性失稳值 δ_u 和最大载荷值 δ_m 。

$\delta_{0.05}$ 是指阻力曲线中裂纹扩展量 $\Delta a=0.05\text{ mm}$ 所对应的 CTOD 值; δ_i 是指阻力曲线中 $\Delta a=0.2\text{ mm}$ 所对应的 CTOD 值; δ_m 是指最大载荷点所对应的 CTOD 值; δ_c 是指稳定裂纹扩展量小于 0.2 mm 的脆性失稳断裂点所对应的 CTOD 值; δ_u 是指稳定裂纹扩展量大于 0.2 mm 的脆性失稳点所对应的 CTOD 值。当试样失稳断裂时,按照 Δa 在 $0.15\sim 0.5\text{ mm}$ 中的数据点来确定 δ_i 。X100 钢管各 CTOD 特征值的变化趋势如图 5 所示。

在同一温度下,X100 钢管的表观启裂 CTOD 值 $\delta_{0.05}$ 、条件启裂 CTOD 值 δ_i 和最大载荷 CTOD

值 δ_m 均为母材的最大,焊缝的次之,热影响区的最小,其中热影响区试样在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时没有测得 $\delta_{0.05}$ 和 δ_m . 同一部位试样在不同温度下的特征值略有变化,其中: $\delta_{0.05}$ 在 3 个温度下相差不大;母材和焊缝的 δ_i 值在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时略小于室温和 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的值,热影响区的 δ_i 受温度影响比较明显,温度越低 δ_i 越小;随着温度降低,最大载荷值 δ_m 不断减小. 由于热影响区试样出现失稳现象,所以测得其失稳点所对应的 CTOD 值为脆性失稳值 δ_c ,低温下热影响区的 δ_c 明显低于室温下,说明更易出现失稳现象.

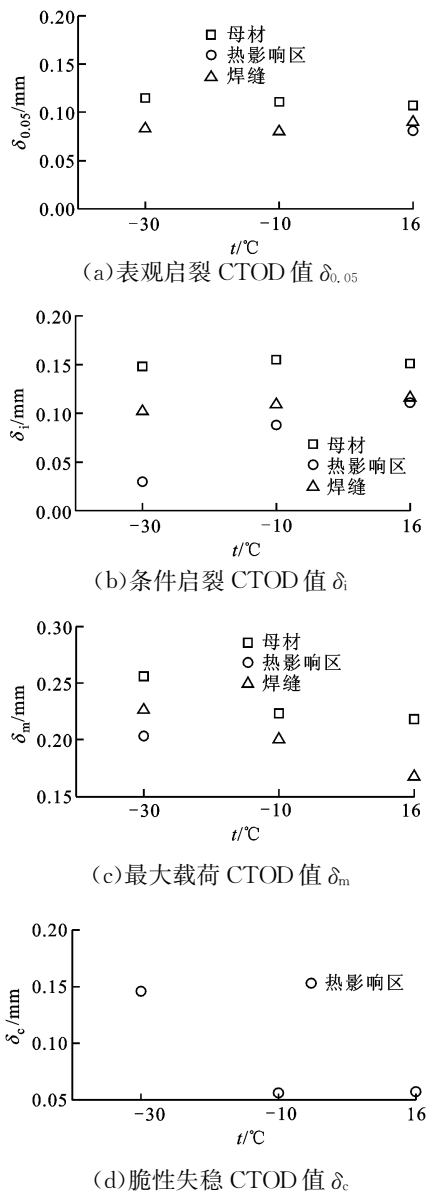


图 5 X100 直缝埋弧焊管的 CTOD 特征值随温度的变化

CTOD 特征值的测试结果表明:相对焊缝和热影响区,X100 钢管母材具有更高的 $\delta_{0.05}$ 、 δ_i 和 δ_m 值,并且随着温度的降低, $\delta_{0.05}$ 、 δ_i 没有出现明显的下降,说明母材在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下具有较好的

低温韧性和抗裂纹启裂、扩展的能力;焊缝的 $\delta_{0.05}$ 、 δ_i 和 δ_m 值低于母材的,随着温度的降低, $\delta_{0.05}$ 、 δ_i 同样没有出现明显的下降,而且没有试样出现失稳现象,说明焊缝的低温韧性相对母材较弱,但优于热影响区;热影响区在室温时有部分试样出现了失稳,随着温度的降低,在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温下所有试样均出现了失稳现象,说明所测定的热影响区韧性较差,特别是低温韧性.

2.3 断口形貌分析

2.3.1 宏观断口形貌分析 X100 直缝埋弧焊管母材 CTOD 试样的室温断口形貌如图 6 所示,可以划分为 2 种典型的断口:失稳断口和未失稳断口.

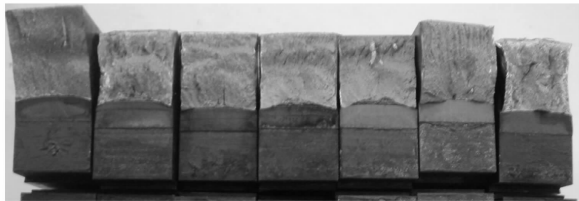


图 6 母材 CTOD 试样的室温断口形貌

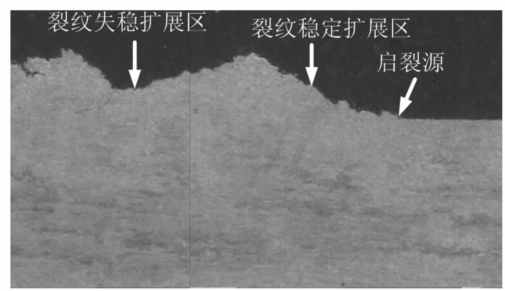
失稳断口由 5 部分组成,由下往上依次为:机加工缺口(黑色),预制疲劳裂纹(蓝色),不明显的钝化及稳定扩展区(显微镜下呈棕色),失稳扩展区(黄色),压断区(银色). 预制疲劳裂纹前缘呈月牙形;钝化及稳定裂纹扩展区非常窄,在显微镜下能看到棕色的条纹;失稳扩展区和压断区的裂纹断面形貌相同,为光亮平坦的结晶状小刻面,宏观上呈现无规则取向,当在光线照射下转动断口时呈现许多闪闪发光的小平面,属于较明显的脆性失稳断裂断口.

未失稳断口共分为 4 部分,由下往上依次为:机加工缺口(黑色),预制疲劳裂纹(蓝色),钝化及稳定扩展区(棕色),压断区(银色). 与失稳断口相比,未失稳断口没有失稳扩展区. 钝化及稳定扩展区的尺寸较为明显,呈显著的月牙形,其上有许多波纹状花纹,这与裂纹尖端在塑性变形过程中大量的位错滑移有关.

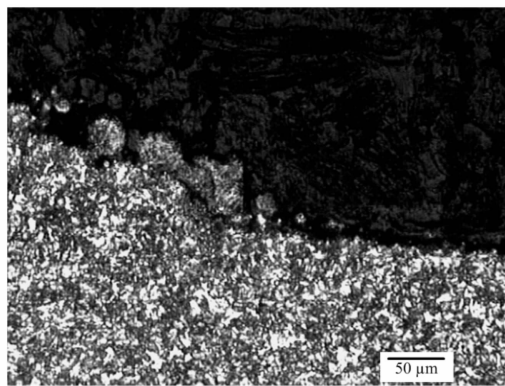
2.3.2 热影响区失稳断口分析 在室温($16\text{ }^{\circ}\text{C}$)下,有一半的热影响区试样出现了失稳现象,而在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温时,所有的热影响区试样均出现了失稳现象.

为了研究热影响区失稳区域的显微组织,选取出现失稳的热影响区试样断口,沿截面从中心剖开,将内侧面进行镶样、磨制、抛光、腐蚀,并观察金相组织. 图 7a 为断口的宏观形貌;在启裂源、裂纹稳定扩展区和裂纹失稳扩展区分别观察其显微组织,结果

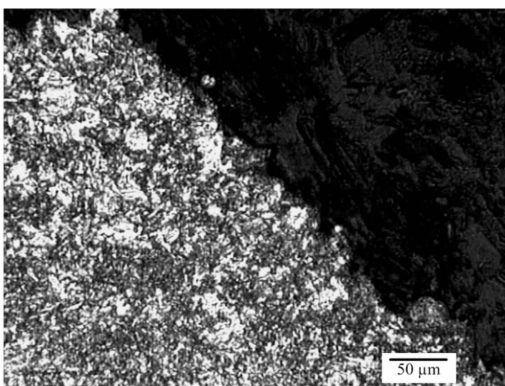
如图 7b~7d 所示.



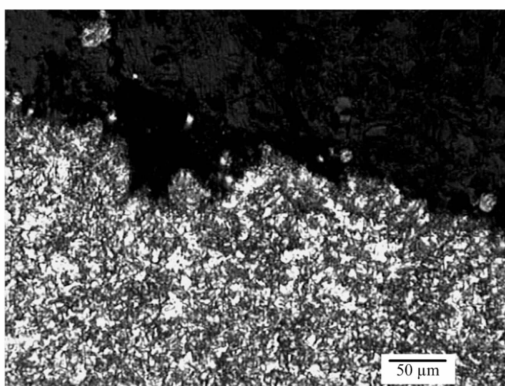
(a)热影响区的断口宏观形貌



(b)启裂源



(c)裂纹稳定扩展区

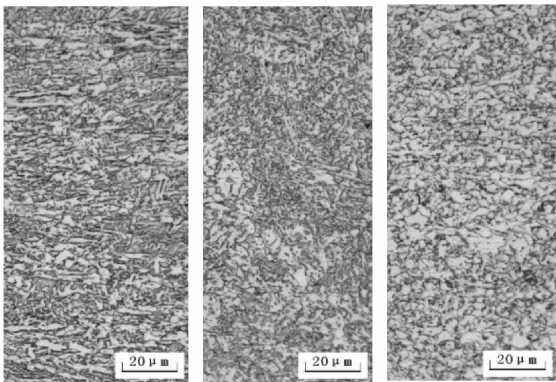


(d)裂纹失稳扩展区

图 7 X100 钢管热影响区试样断口的显微组织

对比母材、焊缝及热影响区的组织(见图 8)可见:X100 钢管母材的显微组织中含有低温转变产物,微观组织以含细小 MA 组元的粒状贝氏体为主,同时有少量多边铁素体;焊缝组织为晶内成核针状铁素体+粒状贝氏体+多边形铁素体+珠光体;热影响区组织为多边形铁素体,同时有少量粒状贝氏体和珠光体.有关研究^[10-11]表明,X100 管线钢的组织受冷却速度、加热温度影响较大.当冷却速度低于 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时,组织以多边形铁素体为主;在 $0.5\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 的冷却速度范围内,组织主要为准多边形铁素体和粒状铁素体;当冷却速度大于 $20\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时,组织以粒状贝氏体为主;当冷却速度大于 $50\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时,将形成马氏体.

从图 7 及图 8 的金相组织可以看出,热影响区失稳试样断口附近的组织中铁素体所占的比例较高,而且呈现块状分布(见图 8c 中的白色块状组织).图 8 c 中的灰色组织为粒状贝氏体,深色组织为珠光体,含量均较少.文献[12]表明:X100 管线钢中的增强相(如粒状贝氏体)具有较高的强度,可以显著提高管线钢的强度;适当的铁素体作为韧化相可以提高管线钢的韧性,但是只有晶粒尺寸较小的弥散分布的铁素体才能作为韧化相.在本试验中,X100 钢管的热影响区组织中含有大量的铁素体,且呈块状分布,使得裂纹扩展时没有穿过增强相,而且增强相含量较少,对铁素体变形的限制能力较弱,使裂纹形成降低,因此导致断裂韧性(特别是低温断裂韧性)下降.



(a)母材 (b)焊缝 (c)热影响区

图 8 X100 钢管各区域的组织形貌

3 结 论

通过对 X100 直缝埋弧焊管的母材、焊缝及热影响区在室温、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下进行的 CTOD 测试与分析,得到如下结论:

(1)多试样法测得的裂纹扩展阻力和撕裂模量的表现规律为母材最好,热影响区次之,焊缝最差;

(2)CTOD 的表现启裂值 $\delta_{0.05}$ 、条件启裂值 δ_i 和最大载荷值 δ_m 的分布规律为母材最好,焊缝次之,热影响区最差;

(3)热影响区的组织中含有大量呈块状分布的铁素体,而粒状贝氏体等增强相含量较少,导致其对铁素体变形的限制能力较弱,这是造成断裂韧性下降并出现局部失稳的组织原因。

参考文献:

- [1] HILLENBRAND H G. Development of linepipe in grade up to X100 [C]// Proceedings of the 11th EPRG/PRCI Biennial Joint Technical Meeting on Pipeline Research. Arlington, MA, USA: Pipeline Research Council International, 1997: 6-10.
- [2] HILLENBRAND H G, KALWA C. High strength line pipe for project cost reduction [J]. World Pipelines, 2002, 2(1): 1-10.
- [3] GLOVER A. Application of grade 555 (X80) and 690 (X100) in Arctic climates [C]// Proceedings of Application & Evaluation of High Grade Linepipe in Hostile Environments Conf. Yokohama, Japan: Scientific Surveys Ltd., 2002: 33-52.
- [4] BARSANTI L. From X80 to X100: know-how reached by ENI Group on high strength steel [C]// Proceedings of Application & Evaluation of High Grade Linepipe in Hostile Environments Conf. Yokohama, Japan: Scientific Surveys Ltd., 2002: 231-244.
- [5] FAIRCHILD D P. High strength steels: beyond X80 [C]// Proceedings of Application & Evaluation of High Grade Linepipe in Hostile Environments Conf. Yokohama, Japan: Scientific Surveys Ltd., 2002: 307-321.
- [6] BARSANTI L, HILLENBRAND H G, MANNUCCI G, et al. Possible use of new materials for high pressure linepipe construction: an opening on X100 grade steel [C]// Proceedings of 4th International Pipeline Conference. New York, USA: ASME, 2002: 287-298.
- [7] DEMOFONTI G, MANNUCCI G, HILLENBRAND H G, et al. Evaluation of the suitability of X100 steel pipes for high pressure gas transportation pipelines by full scale tests [C]// Proceedings of 5th International Pipeline Conference. New York, USA: ASME, 2004: 1685-1692.
- [8] 高惠临. 管线钢组织、性能与焊接行为[M]. 西安: 陕西

科学技术出版社, 1995: 157.

- [9] ASTM-E1290—2007 Standard test method for crack-tip opening displacement (CTOD) fracture toughness measurement [S]. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials, 2007.
- [10] 刘守显, 罗海文, 王瑞珍, 等. X100 管线钢的连续冷却相变及组织研究[J]. 钢铁研究, 2008, 36(1): 30-32.
LIU Shouxian, LUO Haiwen, WANG Ruizhen, et al. Investigation on the phase transition and microstructure of X100 linepipe steel after continuous cooling [J]. Research on Iron and Steel, 2008, 36(1): 30-32.
- [11] 赵春. X100 管线弯管的组织性能研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2008.
- [12] 刘守显. 高强度管线钢 X100 的基础技术研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2007.

[本刊相关文献链接]

Al₂O₃ 粉末对 ZrO₂-TiB₂-Al₂O₃ 纳米复合陶瓷材料力学性能的影响. 西安交通大学学报, 2011, 45(3): 125-128.

高效搅拌摩擦钎焊制备铝/钢双金属复合板的可行性研究. 西安交通大学学报, 2010, 44(12): 93-98.

超轻 X 型点阵芯体金属夹层板的剪切疲劳机制. 西安交通大学学报, 2010, 44(11): 61-65.

石油膨胀套管的力学性能及膨胀后的残余应力. 西安交通大学学报, 2010, 44(7): 90-94.

焊缝缺陷类型识别方法的研究. 西安交通大学学报, 2010, 44(7): 100-103.

大型厚壁筒体斜插弯管接头应力特征有限元快速预测. 西安交通大学学报, 2010, 44(3): 68-71.

焊缝缺陷的水淹没分割算法. 西安交通大学学报, 2010, 44(3): 90-94.

有机包覆对磁性聚乳酸复合材料力学和介电性能的影响. 西安交通大学学报, 2009, 43(12): 120-124.

铝基复合材料的活性液相扩散焊新工艺. 西安交通大学学报, 2009, 43(11): 71-74.

焊后多次正火对超细晶粒钢热影响区组织与硬度的影响. 西安交通大学学报, 2008, 42(1): 65-69.

一种低合金低温铸钢及其组织与性能. 西安交通大学学报, 2008, 42(7): 875-879.

添加纳米 TiO₂ 对 Mg₁₇Al₁₂ 吸氢性能的影响. 西安交通大学学报, 2008, 42(5): 647-650.

La_{1-x}Y_xNi_{4.8}Mn_{0.2} 合金的贮氢性能研究. 西安交通大学学报, 2008, 42(3): 359-363.

球磨处理对 LiAlH₄ 放氢动力学的影响. 西安交通大学学报, 2008, 42(2): 256-260.

(编辑 葛赵青)