

X65 管线钢焊接接头 CTOD 断裂韧度

邓彩艳¹, 张玉凤¹, 霍立兴¹, 白秉仁², 李小巍², 曹 军²

(1. 天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300072; 2. 海洋石油工程股份有限公司, 天津 塘沽 300452)

摘 要: 根据 BS7448 断裂韧度试验标准, 对 X65 管线钢焊接接头的低温(0 °C)裂纹尖端张开位移(CTOD)进行了测试。取尺寸为 $B \times 2B$ (B 为试样厚度)、缺口方向为 NP 的试样进行三点弯曲试验, 然后由所得到的 0 °C 下母材、焊缝和热影响区(HAZ)的 $P-V$ 曲线来计算 CTOD 值, 并对试验结果进行了讨论和总结。对显微组织的分析表明, 共有 3 个 HAZ 试件不满足裂纹尖端不超过熔合线 0.5 mm 且落在粗晶区内的要求。该结果恰好与 $P-V$ 曲线和所得的 CTOD 值相一致, 从而解决了试验值分散性大的问题, 同时为 ECA 评估提供了重要依据, 验证了 BS7448 标准的合理性并体现了它的优越性。

关键词: X65 管线钢; 裂纹尖端张开位移(CTOD); 断裂韧度

中图分类号: TG404 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2003)03-13-04



邓彩艳

0 序 言

海底油气管道属于海洋工程结构物的一种类型, 受海洋自然环境的影响, 像水文、气象、海底地形等因素; 特殊情况还需考虑地震、海啸等偶然因素的影响^[1,2]。X65 管线钢作为海底油气管道的主要材料, 承担着输送石油、天然气以及易燃、易爆介质等任务。由于常常处在低温等恶劣的环境下服役, 所以良好的低温韧性是保证管道安全运行的重要因素之一。由于在管道的连接过程中, 焊接过程常常使焊接接头的组织性能劣化及产生缺陷, 使焊接缺陷处成为整个压力管道中最薄弱的部位, 易产生裂纹起裂、扩展甚至失稳断裂。因此有必要对 X65 管线钢焊接接头的低温韧性进行研究。大量试验研究表明, CTOD(裂纹尖端张开位移)断裂韧度是评价钢材及焊接接头抗脆断特性的重要参量。与传统的夏比 V 型缺口冲击韧性比较, CTOD 更能有效准确地评价钢材的抗脆断能力。通过 CTOD 试验不仅可以进行材料韧度选择, 还可以为评定结构的安全可靠性提供试验依据^[3,4]。

近年来, 在国际上由英国焊接研究所提出的测试断裂韧度 K_{IC} 、CTOD(δ)和 J_{IC} 的统一试验标准 BS7448, 受到国际焊接学会的重视并予以推广应用^[5,6]。目前已被国际标准局(ISO)采纳, 编号为 ISO/TC164/SC4-N400。因此, 应用该标准来测试

X65 管线钢焊接接头 CTOD 有重要意义。

1 试样制备

试验所用材料由海洋石油工程公司(COOEC)提供, 材质为进口钢材 API 5LX65。

根据英国标准 BS7448, 制备带预制疲劳裂纹的三点弯曲(TPB)标准试样。其中母材根据 BS7448: 1991-Part I “确定金属材料 K_{IC} 、临界 CTOD 和 J 积分的方法”, 焊缝和 HAZ(热影响区)根据 BS7448: 1997-Part II “确定金属材料 K_{IC} 、临界 CTOD 和 J 积分的方法”。

1.1 截取试样

根据试样尺寸为 $B \times 2B$ 、缺口方向为 NP 的要求, B 为试样厚度(mm)在线切割机上从外径为 558.8 mm、壁厚为 12.7 mm 的管材上截取, 然后对试样进行分组编号登记。

1.2 加工机械缺口

确定缺口位置, 参照英国 BS7448 标准标记切割加工线, 并且要求保证切割线所在平面与试样切割面的垂直角度为 $90^\circ \pm 5^\circ$ 。对母材试件在中心线(CL)处划线; 焊缝试件划在焊缝金属区的正中间位置(WCL); 对 HAZ 试件, 由于采用 V 型坡口、多层焊接, 加上实际接头熔合线的不规则性, 要保证疲劳裂纹尖端距熔合线的距离不超过 0.5 mm 非常困难。经分析, 最优的方案是过 $B/2$ 线与熔合线交点划线^[3]。

在线切割机上用 0.08 mm 的钼丝加工机械

缺口。

1.3 预制疲劳裂纹

采用高频疲劳试验机在室温下预制疲劳裂纹。根据 BS7448 标准在预制疲劳裂纹过程中,应控制裂纹不要扩展太快,在最后的 1.3 mm 内,可以适当增大疲劳载荷比,以避免使试件表面裂纹扩展量大于试样内部扩展量太多。同时应保证最终的预制疲劳裂纹和线切割长度之和在 0.45~0.55 W (母材)或 0.45~0.70 W (焊缝和 HAZ)范围内, W 为试样宽度(mm)。试样形式如图 1 所示。

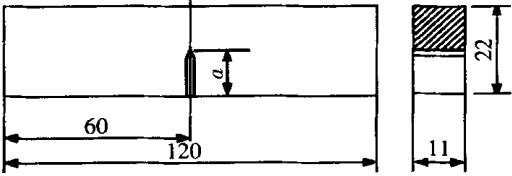


图 1 三点弯曲试样

Fig. 1 Three points bend specimen

2 试验程序

试验是在 DSS-25T 日本岛津电子万能试验机上进行,试验过程当中自动记录了 $P-V$ 曲线(P 为施加载荷, V 为裂纹嘴张开位移)。

2.1 试验步骤

(1) 用游标卡尺精确测量每个试件的 B 、 W 和 z (刀口厚度),测量精度为 0.02 mm。

(2) 试验时先将试件浸在有珍珠岩填充物夹层的冷却槽中进行冷却,槽内盛有干冰、酒精低温介质。待温度达到 0℃ 后进行保温,每个试件均保温 20 min 以上。试验过程当中低温介质液面超过试件上表面 2~3 mm,并用温度计进行温度监控测量,温度变化控制在 $\pm 2^\circ\text{C}$ 。

(3) 采用一次加载方式直到试样失稳破坏,加载速率控制在 0.5~1.0 mm/min 范围内,并同时记录试样载荷-位移曲线。

(4) 试样失稳破坏后,从低温箱中取出,对断口进行烘干处理后在试验机上快速压断试样。从断裂试样上取下断口用工具显微镜测量试件的裂纹长度 a_0 ,具体方法为:沿试件厚度方向取 9 个测试位置分别测量,其中最外侧的两个点位于距试件表面 1% B 处,然后在这两个点之间等间距的取 7 个测试位置。

(5) 数据处理:根据 $P-V$ 曲线上的最大载荷值 F (N) 和对应最大载荷时的塑性张开位移 V_P (mm);裂纹尖端处材料的屈服强度 σ_{YS} (MPa),当计

算 HAZ 的 CTOD 时,取母材和焊缝金属中较大 σ_{YS} ;取弹性模量 $E=2.1\times 10^5$ MPa,泊松比 $\nu=0.3$; B 为试样厚度(mm), W 为试样宽度(mm), z 为刀口厚度(mm); $f(a_0/W)$ 为试样几何形状尺寸。结合 BS7448 Part I 中式(3)和式(6)进行计算 CTOD 值^[5]。

2.2 试验结果

典型载荷-位移曲线,见图 2。
母材、焊缝和 HAZ 的计算结果如表 1 所示。

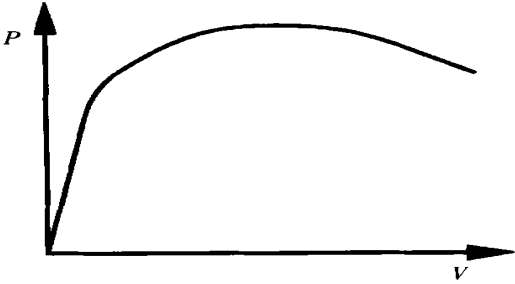


图 2 典型的载荷-位移曲线

Fig. 2 Typical curve of force vs displacement

表 1 0℃ 下断裂韧性试验结果

Table 1 CTOD fracture toughness test results at 0℃

| PQR No. | Notch location | Specimen No. | Average crack length a_0 /mm | CTOD value δ_m /mm |
|---------|----------------|--------------|--------------------------------|---------------------------|
| B | centerline | B-1 | 11.70 | 0.842 5 |
| | | B-2 | 11.73 | 0.804 3 |
| | | B-3 | 11.76 | 0.784 7 |
| SP-3H | Weldcenterline | W-1 | 11.63 | 0.385 5 |
| | | W-2 | 11.15 | 0.369 1 |
| | | W-3 | 11.28 | 0.368 8 |
| SP-3H | HAZ | H-1 | 11.34 | 0.548 8 |
| | | H-2 | 11.91 | 0.427 5 |
| | | H-3 | 11.44 | 0.781 1 |
| | | H-4 | 11.79 | 0.691 8 |
| | | H-5 | 12.06 | 0.752 8 |
| | | H-6 | 11.62 | 0.811 4 |

2.3 有效性判别

BS7448 标准对母材金属有效试样规定:平均裂纹深度为 $a_0=0.45\sim 0.55 W$;裂纹前缘任意两个裂纹深度的差值均不大于 10% a_0 。

对焊接接头断裂试样规定:①试样平均裂纹深度 $a_0=0.45\sim 0.70 W$;②任意两个裂纹深度的差值均不大于 20% a_0 ;③预制疲劳裂纹的最小值不小于 1.3 mm 和 2.5% W 二者中的较大值;④预制疲劳裂纹时,其开裂方向平面与线切割裂纹垂直延伸平面夹角不大于 10°;⑤对于热影响区试件,还需对断口晶粒进行金相分析,从而确定裂纹尖端在粗晶区的

试验结果才为有效。

3 试验结果分析

典型试样的宏观断口形状如图 3 所示。

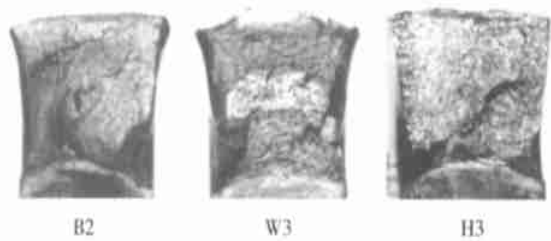
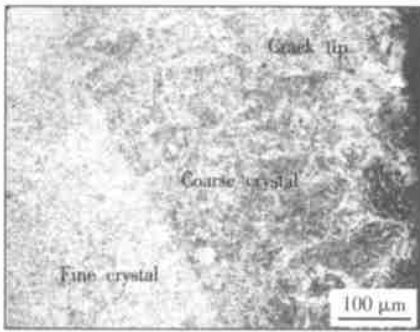


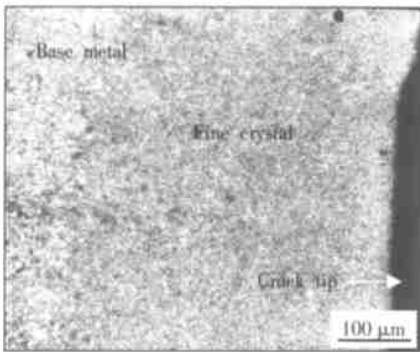
图 3 典型试样的宏观断口

Fig 3 Typical fracture surface of specimens

根据 BS7448 Part II, 试验后的金相组织观察是判断试件有效性, 即裂纹尖端是否落在目标组织区的有效措施。因此, 要对每个 HAZ 试件进行金相检验。其典型的微观组织(以 H1 为例)如图 4 所示。从图上可以看出, 其裂纹尖端恰好位于粗晶区, 所以完全符合试验要求。相反对于 H6 试件, 其裂纹尖端位于细晶区, 这与试验结果中其 CTOD 值明显偏高相一致。因此, 该 H6 试件应判为无效。



(a) H1



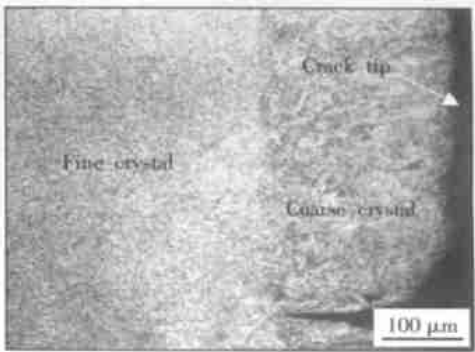
(b) H6

图 4 典型 HAZ 试样的微观组织

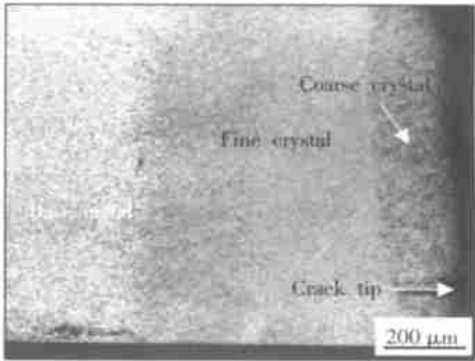
Fig 4 Typical microstructure of HAZ specimens

为了说明裂纹尖端部位各区的组成情况, 对试件(以 H2 为例)进行了不同放大倍数的金相观察,

如图 5 所示。从图上可以看出, H2 试件的裂纹尖端附近由焊缝、HAZ 和母材组成。因此可以更清楚的判断裂纹尖端的位置。



(a)



(b)

图 5 不同放大倍数的金相照片

Fig 5 Typical metallograph of different magnifications

4 结 论

(1) 从试验结果可以看出, CTOD 值由高到低的顺序为: 母材>HAZ>焊缝。因此, 母材的低温断裂韧性最好, HAZ 次之, 焊缝最差。

(2) 对于热影响区 CTOD 试验, 对试样的断口晶粒进行金相分析是关键, 只有在试样断口晶粒组成符合热影响区的特征时试验才有效。因此, 该研究主要依据 BS7448 标准对裂纹尖端附近的组织进行了金相分析。从结果可以看出, 裂纹尖端有的落在细晶区, 有的落在粗晶区, 这与 CTOD 值偏大或偏小以及 $P-V$ 曲线的不同形状相一致, 从而为试验值有明显的分散性问题提供了解释。同时体现了 BS7448 标准的优越性。

(3) 应用英国 BS7448 断裂韧性试验标准, 对 X65 管线钢母材、焊缝和 HAZ 的 CTOD 分别进行了测试, 尤其是 HAZ 的金相组织分析。该试验结果为 ECA 评估提供了重要依据。

参考文献:

[1] 马 良. 海洋油气管道工程[M]. 北京: 海洋出版社, 1987.

[2] 杨明华. 海洋油气管道工程[M]. 天津: 天津大学出版社, 1994. 30~80.

[3] 霍立兴. 焊接结构工程强度[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995. 68~89.

[4] 霍立兴. 焊接结构的断裂行为及评定[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000. 46~77.

[5] BS 7448: Part 1; 1991, Fracture mechanics toughness tests. Part 1. Method for determination of K_{IC} , critical CTOD and critical J values of metallic materials[S].

[6] BS 7448: Part 2; 1997, Fracture mechanics toughness tests. Part 1. Method for determination of K_{IC} , critical CTOD and critical J values of welds in metallic materials[S].

作者简介: 邓彩艳, 女, 1979 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为焊接结构的强度与断裂。

Email: dcaiy@eyou.com

[上接第 12 页]

理等工艺措施进行调整。采用不开坡口, 填充 TA1 纯钛焊丝, 预热 150℃的手工钨极氩弧焊工艺和 800℃×8 h 的焊后真空热处理, 可获得各项性能指标均达到技术指标要求的焊接接头。

参考文献:

[1] 郝传勇, 李正林, 毛先锋. Ti-55M 高温钛合金焊缝塑性的改善[J]. 金属学报, 2001, 37(7): 709~712.

[2] Mitchell D R, Tucker T J. The properties and transformation characteristics of welds in Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo titanium alloy[J]. Weld-

ing Journal, 1969, 48(1): 23s~33s.

[3] Wu K C. Correlation of properties and microstructure in welded Ti-6Al-6V-2Sn[J]. Welding Journal, 1981, 60(11): 219s~226s.

[4] Baeslack W A, Banas C M. A comparative evaluation of laser and gas tungsten arc weldments in high-temperature titanium alloy[J]. Welding Journal, 1981, 60(7): 121s~130s.

[5] Mullins F d, Becker D W. Weldability study of advanced high temperature titanium alloy[J]. Welding Journal, 1980 59(6): 177s~182s.

[6] 刘羽寅, 李阁平, 李 东, 等. 高温钛合金中稀土相的热稳定性[J]. 中国稀土学报, 1998, 16(6): 163~165.

作者简介: 郝传勇, 男, 1970 年出生, 博士, 副研究员。主要从事新材料焊接研究工作, 发表论文 10 篇。

Email: cyhao@imr.ac.cn