

海洋石油平台焊接接头大型 CTOD 试验

杨新岐¹, 王东坡¹, 李小魏², 李 磊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: 依据英国 BS 7448 断裂韧性试验标准, 对焊接接头超大尺寸低温裂纹尖端张开位移(CTOD)试验测试技术进行了探讨, 对采用焊条电弧焊与埋弧焊工艺施焊的、板厚为 2.5 in(63.5 mm)的海洋石油平台焊接接头试样进行了 CTOD 试验, 分别测试了 -18 °C 两种工艺下焊缝金属和热影响区的 CTOD 断裂韧性, 对试验结果及试验中的有关技术问题进行了分析讨论。试验表明, 除两个热影响区(HAZ)试样外, 其余试样均满足美国 Phillips 石油公司提出的最小 CTOD 为 0.15 mm 的要求。试验结果为评价这种板厚焊接接头的焊后热处理规范提供了依据。

关键词: 大尺寸焊接接头; 裂纹尖端张开位移(CTOD); 试验测试

中图分类号: TG404 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2002)04-48-05



杨新岐

0 序 言

海洋石油平台是典型的焊接结构, 由于其工作环境严酷, 结构形式复杂及应力集中程度高, 加之焊接残余应力、焊接缺陷及接头组织性能不均匀性的影响, 在外载荷的作用下很容易产生脆性破坏。因此如何合理有效评价海洋平台用钢材低温韧性, 保证海洋平台安全可靠运行是工程上极为关注的问题^[1,2]。大量试验研究表明, 对海洋平台广泛使用的中、高强度低合金钢而言, CTOD(裂纹尖端张开位移)断裂韧性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 形缺口冲击韧性比较, CTOD 值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性选择, 还可以对焊接工艺及焊前、后热处理规范等进行优化, 并为评定海洋平台安全可靠提供试验依据。CTOD 断裂试验目前已在欧美、日本等发达国家的海洋平台生产建造中得到广泛应用^[1,2]。

由于海洋石油平台结构巨大, 其构件厚度尺寸均较大, 为了准确评价钢材的韧性, CTOD 断裂试验必须采用最大厚度的板厚进行, 这使得试样尺寸明显增大, 对试验设备能力及试验测试技术提出较高的要求。尽管对小尺寸试样的母材及焊接接头断裂韧性试验已有大量的试验研究, 但有关低温下焊接接头大型 CTOD 试验在国内很少报道^[3,4]。研究依据英国 BS 7448^[5,6] 断裂韧性试验标准, 对焊接接头

大尺寸低温 CTOD 试验测试技术进行了探讨, 对采用 SMAW(焊条电弧焊)与 SAW(埋弧焊)工艺施焊的、板厚为 2.5 in(63.5 mm)的大尺寸焊接接头试样进行了 CTOD 试验, 分别测试了 -18 °C 两种工艺下焊缝金属和热影响区(HAZ)的 CTOD 断裂韧性, 对试验结果及试验中的有关技术问题进行了分析讨论。试验结果为评价这种板厚焊接接头的焊后热处理规范提供了依据。

1 试验概述及试样制备

1.1 试验概述

近年来在国际上由英国焊接研究所提出的测试断裂韧性 K_{IC} 、CTOD(δ)和 J_{IC} 的统一试验标准 BS 7448, 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。其中 BS 7448: 1991-Part I “确定金属材料 K_{IC} 、临界 CTOD 和 J 积分的方法”与 BS 7448: 1997-Part II “确定焊缝金属材料 K_{IC} 、临界 CTOD 和 J 积分的方法”试验标准已在工程界得到普遍应用^[5,6]。研究依据该试验标准, 对海洋平台焊接接头的焊缝和热影响区进行了低温(-18 °C) δ_c 、 δ_m 和 δ_q 的测试。整个试验工作得到美国 Phillips 石油公司和挪威船级社 DNV 专家的好评。

1.2 试样制备

试验所用试样毛坯由海洋石油工程有限公司(COOEC)制备, 母材为进口钢材 API2H(Gr50),

板厚 2.5 in(63.5 mm)为超厚钢板。焊接材料为 LB

—52 U (KOBELCO)、LH—75 MR (LINCOLN) 和 LA—71 MR (LINCOLN)。试板分别采用 X 和 K 形两种坡口对接焊接头制备, 焊接方法分别为 SMAW 与 SAW 两种施焊工艺, 多层焊焊道至少为 24 层。试样数量及类型如表 1 所示。

表 1 — 18 ℃ 下 CTOD 断裂韧性试验结果

Table 1 CTOD fracture toughness test results for — 18 ℃

PQR No.	Joint type	Notch location	Specimen No.	CTOD value δ_c /mm	Average CTOD δ_{av} /mm
S—119—3 (SMAW/SAW)	Double-V (X)	Weld centerline	A	1.954	1.651
			B	1.155	
			C	3.306	
			D	0.676	
			E	1.164	
S—119—4 (SMAW/SAW)	K-groove	HAZ	A	3.403	1.324
			B	0.046 7	
			C	1.760	
			D	0.041 6	
			E	1.371	
S—244—3 (SMAW)	K-groove	Weld centerline	A	0.829	0.827
			B	0.711	
			C	0.813	
			D	1.280	
			E	0.502	
S—244—4 (SMAW)	K-groove	HAZ	A	2.176	1.486
			B	0.741	
			C	1.867	
			D	1.036	
			E	1.609	

按 BS 7448 标准规定, 试验采用带预制疲劳裂纹的三点弯曲(TPB)标准试样。试样形式如图 1 所示, 试样宽度 $W=127$ mm, 厚度 $B=62$ mm, 长度 $L=550$ mm。按试验要求缺口分别开在焊缝和热影响区, 用 0.12 mm 的钼丝加工机械缺口。对焊缝试样采用 X 形坡口焊接接头, 机械缺口位于名义焊缝中心线处; 对热影响区试样采用 K 形坡口, 机械缺口沿坡口直线边一侧位于距熔合线 0~1 mm 的范围内。由于实际接头熔合线的不规则性, 应尽量保证裂纹前缘最大限度位于该尺寸范围内。全部试样的机械缺口深度为 58.0 mm 近似为试样宽度 W 的 45%。

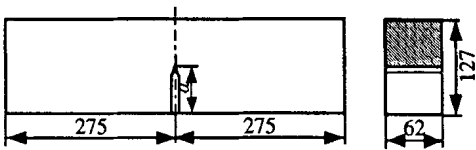


图 1 三点弯曲试样

Fig. 1 Three points bending specimen

采用高频疲劳试验机在室温下预制疲劳裂纹。为保证疲劳预制裂纹前缘具有合理的形状, 对每一个试样都采用局部压缩方法减少焊缝中心部位的焊接残余应力。依据 BS 7448 Part W II^[6] 附录 D 的规定进行缺口尖端韧带局部区域压痕处理, 采用双面压缩处理方法, 所用压块平台直径约为 $\phi 30$ mm, 压痕载荷为 700~850 kN, 这样在试样两侧缺口尖端附近所产生的压痕深度近似为 0.2~0.7 mm。由于焊接接头板厚中残余应力的复杂性, 对不同试样其压痕深度是不同的, 必须根据预制疲劳裂纹扩展情况调整压痕深度以保证裂纹前缘的平直度。

2 试验原理

2.1 试验装置及步骤

试验是在 1 000 kN 的万能材料试验机上进行。试验装置及记录仪器如图 2 所示。

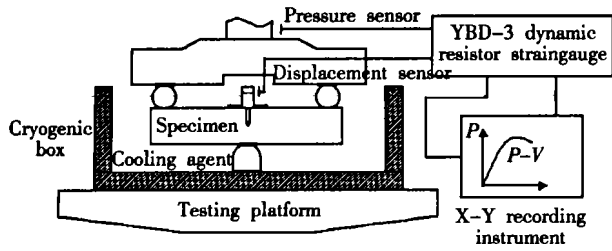


图2 试验装置与记录仪器

Fig. 2 Test device and recording instrument

试验步骤如下: (1) 测量记录试样尺寸并将试样放入低温箱中进行冷却, 待温度达到 -18°C 后进行保温, 冷却时间至少应在 30 min 以上, 温度变化控制在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$; (2) 采用一次加载方式直到试样失稳断裂, 加载速率控制在 $0.48 \sim 1.28 \text{ mm/min}$ 范围内, 通过试验机测试系统记录载荷 P 和裂纹嘴张开位移 V 值并自动绘制 $P-V$ 曲线。由于焊接接头中裂纹前缘存在局部脆性组织, 这将导致裂纹局部脆性扩展, 在 $P-V$ 曲线上出现载荷突然降低位移突然增加的“pop-in”现象。试验过程中应详细记录所出现的“pop-in”现象与试样断裂时间; (3) 试样失稳断裂后, 从低温箱中取出试样, 并在试验机上快速压断试样, 然后对断口进行烘干处理以备后续测量; (4) 重复上述过程直到完成全部试验。

$$f\left(\frac{a_0}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{a_0}{W}\right)^{0.5} \left[1.99 - \left(\frac{a_0}{W}\right) \left(1 - \frac{a_0}{W} \right) \left(2.15 - \frac{3.93a_0}{W} + \frac{2.7a_0^2}{W^2} \right) \right]}{2 \left(1 + \frac{2a_0}{W} \right) \left(1 - \frac{a_0}{W} \right)^{1.5}} \quad (3)$$

根据式(2)、(3)即可求得试样的 CTOD 断裂韧性 (mm)。

2.2 试样有效性判断

在大型 CTOD 焊缝和 HAZ 断裂韧性测试中, 保证缺口尖端预制疲劳裂纹前缘平直度是获得有效试样的关键。但对焊接接头由于焊接残余应力的影响, 不采用压痕处理的裂纹前缘往往是 W 形状疲劳裂纹, 或形成多层次疲劳裂纹, 这将影响所测试 CTOD 值的准确性。

BS 7448 标准对母材金属有效试样规定, 平均裂纹深度为 $a_0 = 0.45W \sim 0.55W$, 裂纹前缘任意两个裂纹深度的差值均不大于 $10\%a_0$, 但对焊接接头断裂韧性试样有所放宽, 其具体要求如下: (1) 试样平均裂纹深度 $a_0 = 0.45W \sim 0.70W$, 机械缺口宽度最大为 $0.065W$; (2) 在断口上测量初始裂纹深度 a_0 时, 要求任意两个裂纹深度的差值均不大于 $20\%a_0$; (3) 断口上预制疲劳裂纹的最小值应不小于 1.3 mm 和 $2.5\%W$ 二者中的较大值; (4) 预制疲劳

通过加工从断裂试样上取下断口, 用工具显微镜测量原始裂纹长度 a_0 , 分别在预制疲劳裂纹前缘和稳定扩展裂纹前缘, 沿试件厚度方向等间距的九点上测量初始裂纹长度 $a_{0i} (i=1, 2, 3, \dots, 9)$ 和裂纹扩展后长度 a_i , 其中最外侧点位于距试样表面内 $1\%B$ 处。采用下式计算平均裂纹长度

$$a_i = \frac{1}{8} \left(\frac{a_1 + a_9}{2} + \sum_{i=2}^8 a_i \right) \quad (1)$$

CTOD 的计算公式为

$$\delta = \left[\frac{FS}{BW^{1.5}} \cdot f\left(\frac{a_0}{W}\right) \right]^2 \frac{(1-\nu^2)}{2\sigma_{YS}E} + \frac{0.4(W-a_0)V_P}{0.4W+0.6a_0+z} \quad (2)$$

式中: $E = 2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$ 为弹性模量; $\nu = 0.3$ 为泊松比; F 为 $P-V$ 曲线上所对应的最大载荷值 (N); B 为试样厚度 (mm); W 为试样宽度 (mm); S 为试样的跨度 (mm); V_P 为 $P-V$ 曲线上对应最大载荷时的塑性张开位移 (mm); σ_{YS} 为裂纹尖端处材料的屈服强度 (MPa), 当计算热影响区的 CTOD 时, 取母材和焊缝金属中较大 σ_{YS} ; $z = 2.0 \text{ mm}$ 为刀口厚度 (mm); $f(a_0/W)$ 为试样几何形状因子, 其计算公式为

裂纹扩展方向与垂直试样长度方向的夹角应不大于 10° ; (5) 当出现“pop-in”现象时, 由导致载荷下降和位移增加小于 1% 时可忽略不计, 大于 1% 而小于 5% 时, 应进行断口金相分析以确定裂纹起裂的有效区域; 大于 5% 时应确定为裂纹起裂, 并以此时载荷计算 CTOD 值。

3 试验结果与讨论

两种焊接方法 (SMAW 和 SAW) 的焊缝金属和热影响区的 CTOD 试验结果如表 1 所示。典型试样宏观断口形貌如图 3 所示。试样检测表明, 除试样 S-119-4 B 外, 其余试样均为有效试样。由于 S-119-4 B 试样最小预制疲劳裂纹 (仅为一点处) 稍小于 $2.5\%W$ (如图 4 所示), 如果严格按照 BSI 7448 标准规定此试验应判为无效。

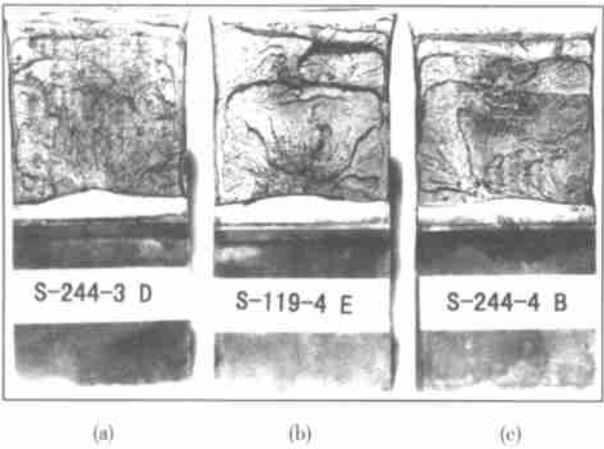


图 3 典型试样断口形貌

Fig. 3 Typical fracture surface of specimens

试验表明对焊缝进行预压缩处理是保证获得焊缝和 HAZ 试样合格疲劳裂纹的有效措施。试验中的 25 个试样均获得较好的裂纹前缘形状, 完全符合

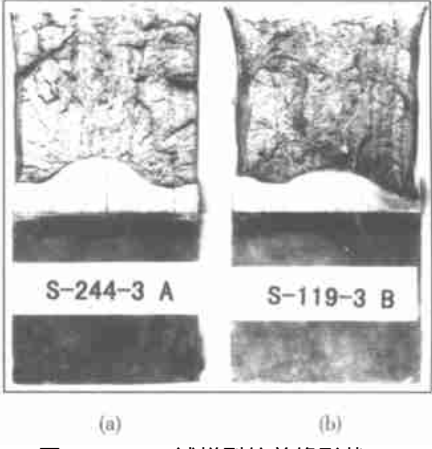


图 4 pop in 试样裂纹前缘形状

Fig. 4 Crack front shape for specimens with pop in

BS 7448 标准的规定。压痕深度与裂纹深度差值如表 2 所示。除试样 S-119-3 B 和 S-244-3 A 外, 其余试样裂纹前缘任意两个裂纹深度的差值均小于 $10\%a_0$, 如图 5 所示。

表 2 试样裂纹前缘裂纹长度差值

Table 2 Difference of crack length along crack front

Serial number		Average crack length a_o /mm	Max crack length a_{max} /mm	Min crack length a_{min} /mm	$(a_{max}-a_{min})/a_0$ (%)	Indentation Δ /mm
S-119-3	A	68.94	71.50	66.36	7.46	0.74
	B	69.12	72.76	63.48	13.4	0.27
	C	65.11	67.12	63.54	5.50	0.30
	D	65.14	66.98	63.62	5.16	0.31
	E	65.50	67.32	63.84	5.31	0.24
S-119-4	A	68.94	71.18	66.74	6.44	0.39
	B	65.03	67.36	62.34	7.72	0.27
	C	65.50	66.82	63.72	4.73	0.36
	D	65.24	67.06	63.68	5.18	0.24
	E	65.42	67.24	63.68	5.44	0.37
S-244-3	A	70.88	75.92	66.68	13.0	0.45
	B	64.75	65.96	63.74	3.43	0.38
	C	72.38	74.20	70.92	4.50	0.60
	D	65.17	67.12	63.42	5.68	0.39
	E	66.62	69.20	64.64	6.80	0.40
S-244-4	A	65.01	66.34	63.78	3.94	0.39
	B	65.05	66.44	64.12	3.57	0.43
	C	64.96	66.56	63.54	4.65	0.50
	D	65.00	66.62	63.10	5.42	0.44
	E	65.39	66.48	63.88	3.98	0.68

通过压痕处理, 可在试样表面裂纹尖端附近产生压残余应力, 在试样中心部产生拉残余应力, 调整

原来焊接接头中的残余应力分布, 从而降低表面附近疲劳裂纹扩展速率, 获得合理的疲劳裂纹前缘形

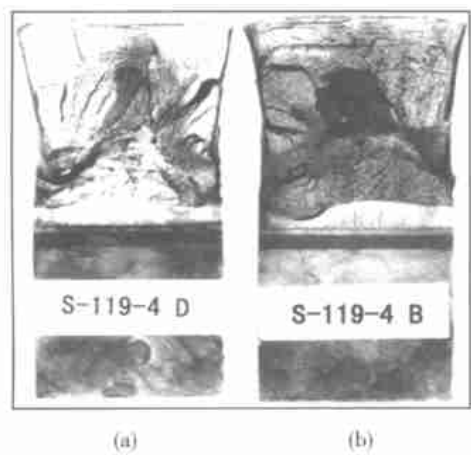


图 5 244-3 A 和 119-3 B 试样裂纹前缘形状
Fig. 5 Crack front shape for 244-3 A and 119-3 B

状。这是大型 CTOD 试验的关键所在, 必须考虑焊缝、热影响区材质不均匀性等因素的影响, 通过多次试验确定合理有效的压痕处理规范, 并在预制疲劳裂纹中随时监控试样两侧的疲劳裂纹扩展状态。但即使这样仍然很难保证每一个试样裂纹前缘形状具有很好的平直度。

试验过程中, 埋弧焊热影响区试样 S-119-4 B 和 S-119-4 D 的载荷-位移曲线表现出明显的“pop-in”现象, 此时塑性张开位移 $V_P=0$, 因而对应很低的 CTOD 值。图 4 为上述试样裂纹宏观断口形貌。可以看出, 裂纹起裂前缘附近具有明显的脆性裂纹扩展特征(图 4 中箭头所指区域), 此后裂纹止住, 断口表现出较大的塑性变形。这说明对焊接接头而言, 尽管母材和焊缝金属在低温($-18\text{ }^{\circ}\text{C}$)下均具有很好的 CTOD 断裂韧性, 但在焊接热影响区仍不可避免存在局部脆性粗晶区, 这将导致裂纹局部脆性扩展。对整个焊接接头讲, HAZ 局部脆性区并不意味着焊接接头整体韧性低, 如果局部脆性粗晶区周围的材料具有较好的止裂特性, 同样可以保证整体焊接接头的安全性。

从试验结果可看出, 埋弧焊接头焊缝金属 CTOD 值高于其 HAZ 的 CTOD 值, 而焊条电弧焊接头焊缝金属 CTOD 值却低于其 HAZ 的 CTOD 值。两种焊接方法比较, SAW 焊缝断裂韧性明显高于 SMAW, 但 SAW 热影响区的 CTOD 断裂韧性则低于 SMAW 的 CTOD 值。SAW 热影响区的 CTOD 值具

有较大的分散性, 这与疲劳裂纹前缘位置有关。由于 HAZ 区域很窄, 准确测量 HAZ 韧性具有一定的难度, 加之实际接头中热影响区总是很不规则的, 尽管采用一边为直线的 K 形坡口也不能完全保证裂纹前缘全部位于实际 HAZ 中。只有通过多次试验并进行断口金相分析才能准确测定 HAZ 的 CTOD 断裂韧性。

4 结 论

依据英国 BS 7448 断裂韧性试验标准, 成功地对采用焊条电弧焊与埋弧焊工艺施焊的、板厚为 2.5 in (63.5 mm) 的大尺寸焊接接头试样进行了 CTOD 试验, 分别测试了 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 两种工艺下焊缝金属和热影响区的 CTOD 断裂韧性。试验表明, 除两个 HAZ 试样外, 其余试样均满足美国 Phillips 石油公司提出的最小 CTOD 为 0.15 mm 的要求。试验结果为评价这种板厚焊接接头的焊后热处理规范提供了可靠依据。

参考文献:

[1] 虞维明 周岳银, 陈秀妹. 海洋平台的建造与维修[M]. 北京: 海洋出版社, 1992. 78 ~ 165.
[2] 孔祥鼎, 夏炳仁. 海洋平台建造工艺[M]. 北京: 人民交通出版社, 1993. 22 ~ 68.
[3] 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.
[4] 霍立兴. 焊接结构焊接工程强度[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995. 68 ~ 89.
[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 2. Method for determination of K_{IC} critical CTOD and critical J values of welds in metallic materials[S].

作者简介: 杨新岐, 男, 1962 年 8 月出生, 博士后, 副教授。主要从事焊接结构强度与断裂、弹塑性断裂力学及数值模拟等方面的教学与科研工作。发表论文 20 余篇。

Email: xqyang@tjtu.edu.cn