

海洋平台大厚度焊接接头断裂韧度

左 波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: 依据 BS7448 断裂韧度试验标准(ISO/TC164/SC4—N400), 对采用埋弧焊(SAW)工艺施焊的、板厚为 54 mm 的海洋石油平台大厚度对接接头试样进行了低温裂纹尖端张开位移(CTOD)试验。分别测试了—15℃下单丝和双丝埋弧焊工艺下焊缝金属和热影响区的 CTOD 值。试验表明, 除双丝埋弧焊热影响区试件外, 其余试件均满足挪威船级社 DNV 规定的最小特征 CTOD 为 0.15 mm 的要求, 为指导海洋平台的施工建造提供了科学依据。

关键词: 单丝埋弧焊; 双丝埋弧焊; 裂纹尖端张开位移; 断裂韧度

中图分类号: TG404 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2004)06-66-04



左 波

0 序 言

海洋平台在严酷的环境条件下工作, 要经受各种气候条件和风浪的袭击, 而且结构复杂, 应力集中程度高, 其结构处于较危险的状态。随着结构件厚度增加, 其破坏的危险性也愈来愈大, 尤其在寒冷海区工作, 由于钢的韧性降低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地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, 与传统的夏比 V 形缺口试验冲击韧度比较, CTOD 值更能有效准确地评价钢材的抗脆断能力。一般构件厚度超过 40 mm 时, 应补充做 CTOD 试验。CTOD 值能较准确的评价钢材脆性。如果焊缝有足够的 CTOD 值, 构件厚度小于 65 mm 时可不进行焊后热处理^[1,2]。

焊后热处理可以消除焊接应力, 改善焊接接头的韧性。但是在海洋平台建造过程中, 施工条件恶劣, 焊后热处理困难, 劳动强度大, 工期长, 大大增加了平台建造成本。根据挪威船级社 DNV 的规定, 在焊缝金属和热影响区的 CTOD 值大于 0.15 mm 的时候, 可以不进行焊后热处理。研究依据英国 BS 7448^[3,4] 断裂韧度试验标准, 分别对采用单丝和双丝埋弧焊工艺施焊的、板厚为 54 mm 的大尺寸焊接接头进行了 CTOD 试验, 测试了—15℃下焊缝金属

和热影响区的 CTOD 断裂韧度, 为指导海洋平台的施工建造提供了科学依据。

1 试验概述及试样制备

1.1 试验概述

近年来由英国焊接研究所提出的测试材料断裂韧度如 K_{IC} , CTOD (δ) 和 J_{IC} 的统一标准 BS7448, 受到国际焊接学会的重视并予以推广应用^[5]。目前已被国际标准局(ISO)采纳, 编号为 ISO/TC164/SC4—N400。其中 BS7448: 1991—Part I 《确定金属材料 K_{IC} 、临界 CTOD 和 J 积分的方法》与 BS7448: 1997—Part II 《确定焊接金属材料 K_{IC} 、临界 CTOD 和 J 积分的方法》试验标准已在工程界得到了普遍应用^[3,4]。作者依据该试验标准, 对海洋平台焊接接头的焊缝和热影响区进行了低温(—15℃)特征 CTOD (δ_c , δ_m , δ_u) 的测试。整个试验工作得到挪威船级社 DNV 专家的好评。

1.2 试样制备

试验所用试样毛坯由中国海洋石油工程股份有限公司(COOEC)制备, 板厚 54 mm 为超厚钢板。试验板采用 K 型坡口焊接制备, 焊接方法为单丝和双丝埋弧焊。对于单丝埋弧焊工艺施焊试件, 焊缝金属试件编号为 S—WCL—1~S—WCL—6, 热影响区试件编号为 S—HAZ—1~S—HAZ—6; 对于双丝埋弧焊工艺施焊试件, 焊缝金属试件编号为 T—WCL—1~T—WCL—6, 热影响区试件编号为 T—HAZ—1~T—HAZ—6。

按照 BS7448 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.试样毛坯采用铣、磨机械加工至截面为 $B \times 2B$ ($54\text{ mm} \times 108\text{ mm}$) 的最终尺寸, B 为试样的厚度.然后在线切割机上用 0.12 mm 的钼丝加工机械缺口.最后根据试验用位移引伸计的量程,在缺口嘴部区域试样表面处加工固定刀口的螺孔.

采用高频疲劳试验机在室温 ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$) 下进行疲劳裂纹预制.在疲劳裂纹预制过程中,应随时观测、监控疲劳裂纹的扩展长度与方向,以保证裂纹总长度 a 在 $(0.45 \sim 0.70)W$ (W 为试样宽度) 的有效范围内.

依据 BS 7448 Part II 附录 D 的规定进行缺口尖端韧带局部区域压痕处理,以证疲劳预制裂纹前缘具有合理的形状.

2 试验原理

2.1 试验装置及步骤

试验是在 1000 kN 的万能材料试验机上进行的.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 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后进行保温,冷却时间至少应在 30 min 以上,温度变化控制在 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$; (2)采用一次加载方式直到试样失稳断裂,加载速率控制在 $0.48 \sim 1.28\text{ mm/min}$,通过试验机测试系统记录载荷 p 和裂纹嘴张开位移 V 值

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

(3)

将试样尺寸 B 、 W 、和 S 、 z , 裂纹平均深度 a_0 , 载荷 F_c 、 F_u 、 F_m , 裂纹嘴塑性张开位移 V_p 代入式 (2)、(3) 即可求得 CTOD 值.

2.2 试样有效性判断

BS7448 标准对母材金属有效试样规定为: 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 $10\% a_0$, 但对焊接接头试样有所放宽, 其具体要求如下.

(1)试样平均裂纹深度 $a_0=0.45 \sim 0.70 W$, 机械缺口宽度最大为 $0.065 W$.

(2)在断口上测量初始裂纹深度 (a_0) 时, 任意两个裂纹深度的差值均不大于 $20\% a_0$, a/W 值均小于 0.7 .

(3)在断口上预制疲劳裂纹的最小值不小于 1.3 mm 和 $2.5\% W$ 两者中的较大值.

并自动绘制 $p-V$ 曲线.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, 取出试样, 放入 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温冷冻箱冷冻; (4)重复上述过程直到完成全部试样试验; (5)在试验机上快速压断冷冻后的试样, 然后对断口进行烘干处理以及后续测量.

通过机加工从断裂试样上取下断口, 测算平均裂纹深度 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 9 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深度

$$a_0=\frac{1}{8}\left[\frac{a_1+a_9}{2}+\sum_{i=2}^8 a_i\right],$$

(1)

CTOD 的计算公式为

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

(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); S 为三点弯曲时的试样的跨度; V_p 为 $p-V$ 曲线上对应最大载荷时的夹式引伸计塑性张开位移; σ_{YS} 为裂纹尖端处材料的屈服强度, 当计算热影响区 CTOD 时, 取母材和焊缝金属中较大的 σ_{YS} ; $z=2.0\text{ mm}$ 为刀口高度; $f(a_0/W)$ 为试样几何形状因子, 其计算公式为

(4)预制疲劳裂纹扩展长度位于 BS 7448 标准所规定的缺口局部区域内.

(5)预制疲劳裂纹扩展方向与垂直试样长度方向的夹角不大于 10° .

(6)当出现“pop-in”(突跃)现象时, 由导致载荷下降相位移增加小于 1% 时可忽略不计, 大于 1% 而小于 5% 时, 进行断口金相分析以确定裂纹起裂的有效区域; 大于 5% 时确定为裂纹起裂, 并以此时载荷计算 CTOD 值.

(7)对于热影响区试件, 进行断口金相分析, 在试件中间 75% 段的范围内, 如果熔合线和预制疲劳裂纹之间距离小于 0.5 mm , 测量沿厚度方向的长度 λ_i , 然后计算所有的长度和值 $\sum_N \lambda_i$, 挪威船级社 DNV 规定 $\sum_N \lambda_i$ 大于等于试件 75% 厚度值的 20% (如图 1).

3 试验结果与讨论

试验结果如表 1 所示。

试验中的 24 件试样都获得很好的裂纹前缘形状,完全符合 BS7448 标准的规定.裂纹前缘裂纹深度差值见表 1,全部试样裂纹前缘任意两个裂纹深度的差值都小于 10% a_0 , a/W 均小于 0.7 对热影响区试件剖面测量 $\sum_N\lambda_1$,全部 12 件试样的 $\sum_N\lambda_1$ 值都大于 8.1 mm (20% $\times$ 75% B),均满足挪威船级社 DNV 标准,为有效试件。

根据挪威船级社 DNV 的规定,海洋平台构件施工建造过程中,为了不进行焊后热处理,焊接接头的焊缝和热影响区试件的 CTOD 断裂韧度必须满足三个有效试件的 CTOD 值均大于或等于 0.15 mm,如果三个试件中有不满足条件的,必须追加 CTOD 试验。如果试件数量是 3~5 件,试件的特征 CTOD 值取所

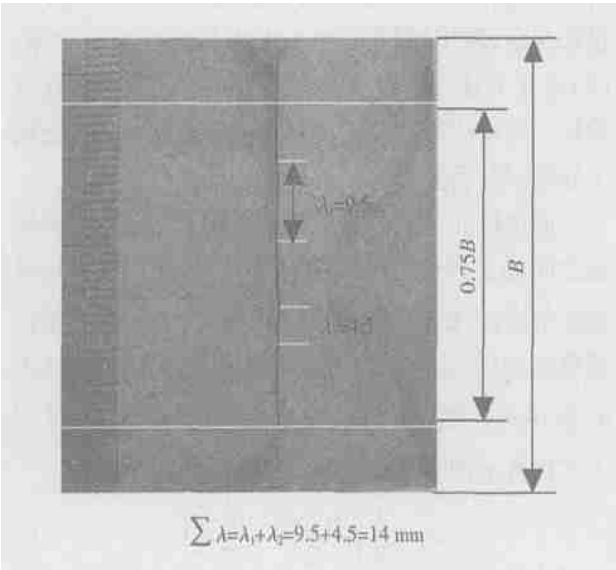


图 1 断口剖面图
Fig. 1 Fracture cutaway view

表 1 裂纹前缘裂纹深度的差值
Table 1 Difference of crack length along crack front

试样编号	平均裂纹深度 a_0 /mm	最大裂纹深度 a_{max} /mm	最小裂纹深度 a_{min} /mm	$\frac{a_{max}-a_{min}}{a_0}$	a/W	CTOD/mm	$\sum_N\lambda_1/mm$
S-WCL-1	55.904	56.54	54.78	3.14	0.527	0.5439	—
S-WCL-2	55.494	56.24	54.08	3.89	0.539	1.3985	—
S-WCL-3	57.221	57.58	55.64	3.39	0.552	1.1914	—
S-WCL-4	54.891	55.20	54.30	1.64	0.508	1.8412	—
S-WCL-5	54.329	55.00	53.20	3.31	0.512	1.8111	—
S-WCL-6	55.326	56.18	53.74	4.41	0.516	0.3639	—
T-WCL-1	55.738	56.84	53.74	5.56	0.516	0.1687	—
T-WCL-2	55.939	56.88	54.20	4.79	0.516	1.3395	—
T-WCL-3	56.408	56.96	54.44	4.50	0.517	1.6600	—
T-WCL-4	55.606	56.48	54.10	4.28	0.515	1.4538	—
T-WCL-5	55.883	56.68	54.04	4.72	0.516	1.0490	—
T-WCL-6	55.429	56.48	54.06	4.37	0.513	1.4366	—
S-HAZ-1	55.121	56.28	53.24	5.52	0.510	0.1521	17.5
S-HAZ-2	54.494	55.24	52.98	4.15	0.503	0.4007	13.0
S-HAZ-3	56.410	57.34	54.66	4.75	0.522	1.0439	9.5
S-HAZ-4	54.930	56.04	52.86	5.79	0.508	1.3149	11.5
S-HAZ-5	54.369	55.02	52.78	4.12	0.503	1.6904	14.0
S-HAZ-6	53.881	54.80	52.86	3.60	0.502	0.0914	19.0
T-HAZ-1	55.571	56.08	54.12	3.53	0.525	0.4801	11.0
T-HAZ-2	55.608	54.42	52.40	3.77	0.507	0.0410	18.0
T-HAZ-3	55.583	56.76	54.44	4.17	0.526	0.0627	18.0
T-HAZ-4	58.358	59.22	56.94	3.91	0.552	0.0583	18.0
T-HAZ-5	56.508	57.84	54.96	5.10	0.534	0.0476	16.0
T-HAZ-6	55.108	55.98	53.54	4.43	0.522	0.0442	18.0

有效试件中的最低值,如果试件数量是 6~10 件,取有效试件中的第二低值,如果试件数量是 11~15 件,特征 CTOD 值取第三低值。根据该规定,对于单

丝和双丝埋弧焊试件,焊缝金属和热影响区均为 6 件有效试件,试件的特征 CTOD 值均取第 [下转第 81 页]

降低应力集中,采用较高的预热和后热温度降低焊接应力,使用敏感温度范围的低匹配而在常温下等强匹配的焊接材料,也可缓和过热区的应力状态,提高抗再热裂纹的能力。需要强调的是焊接性有两个方面,工艺焊接性和使用焊接性,有再热裂纹敏感性的钢焊接接头。在采取降低应力措施下不发生裂纹的情况下,如经历高温过热、再热弱化的热循环过程,即使不发生再热裂纹,其接头的使用性能也是不能满足要求的,因为焊接接头已经再热脆化了。

4 结 论

- (1) 再热裂纹的机理:高温过热(Cr、Mo 等合金元素碳化物固溶),再热弱化(晶界析出大颗粒状的 Cr、Mo 等合金元素碳化物导致晶粒表面的贫合金元素层,晶界高温强度不足)。
- (2) 影响再热裂纹的三要素:生成晶界大颗粒状碳化物的 Cr、Mo、C 等合金元素,高温过热与再热弱化的热循环过程,焊接接头一定的拘束应力。
- (3) 影响再热脆化的二要素:生成晶界大颗粒状碳化物的 Cr、Mo、C 等合金元素,高温过热与再热弱化的热循环过程。
- (4) 再热裂纹与再热脆化的机理相同,两者同

- 时发生,采用降低应力的方法防止再热裂纹并不能防止焊接接头的再热脆化。再热裂纹和再热脆化是同一机理下的两种不同表现形式。
- (5) 使用无缺口插销可进行再热裂纹插销试验,能得出再热裂纹的插销临界应力和 C 曲线。
 - (6) 无缺口再热插销试件的宏观断口呈沿过热区的弧形断裂表明,影响再热裂纹的主要因素是过热区的敏化组织。
 - (7) 防范再热裂纹和再热脆化首先应该避免合金元素碳化物在晶界的大颗粒状析出,钢种的超低碳和降低 Cr、Mo 等敏感元素的含量是良好的选择。

参考文献:

[1] 张文钺. 焊接冶金学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
[2] 陈伯鑫. 金属焊接性基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
[3] 陈伯鑫. 焊接工程缺欠分析与对策[M]. 北京: 机械工业出版社 1998.
[4] 陈伯鑫. 焊接冶金原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.

作者简介: 姚 钦, 男, 1962 年出生, 工学硕士。高级检验师, ASME 授权检验师 AI, 福建省锅炉压力容器检验所副所长, 福建省机械工程学会焊接分会理事长。主要从事锅炉压力容器压力管道监督检查与金属的焊接性研究工作, 发表论文 20 余篇。
Email: flpvi @fjz. sina. net

[上接第 68 页]

二低值,单丝埋弧焊的焊缝和热影响区试件特征 CTOD 值分别为 0.5439 和 0.1521;双丝埋弧焊试件的焊缝和热影响区试件的特征 CTOD 值分别为 1.0490和 0.0442。

从试验结果可以看出,对于焊缝金属试件,两种工艺下的特征 CTOD 值都满足大于 0.15 mm 的要求;而对于热影响区试件,双丝埋弧焊试件的特征 CTOD 值小于 0.15 mm,单丝埋弧焊试件大于 0.15 mm。两种焊接方法比较,双丝埋弧焊工艺虽然生产率高,但不可避免热输入大,造成晶粒粗大,断裂韧度下降。

4 结 论

- (1) 对于同一种工艺下的试件,焊缝金属试件的特征 CTOD 值大于热影响区试件。
- (2) 单丝埋弧焊工艺焊接的该厚度的海洋平台焊接接头特征 CTOD 值满足 DNV 规定要求,施工过程中可以免除焊后热处理,这已经在海洋平台施工建造中得到了应用,提高生产率,降低劳动强度,并节约了海洋平台施工建造成本。

(3) 双丝埋弧焊工艺焊接焊接接头热影响区试件特征 CTOD 值未能达到规定要求,能否免除热处理还需要进一步的研究。

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.
[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.
[3] BS 7448-1997, Fracture mechanics toughness tests. Part 1. Method for Detemination of K_{IC} , critical CTOD and critical J values of metallic materials[S].
[4] BS 7448-1997, fracture mechanics toughness test. Part 2. Method for Detemination of K_{IC} , critical CTOD and critical J values of welds in metallic materials[S].
[5] 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.

作者简介: 左 波, 男, 1981 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: zuobo @yeah. net