

CTOD 断裂韧度试验在海洋平台建造中的应用

曹 军 李小巍 温志刚

(海洋石油工程股份有限公司)

摘 要 根据 BS7448 和 DNV-OS-C 401 断裂韧度试验标准, 对 EH36 钢(板厚 55 mm)焊接接头的低温(0 °C 和 -15 °C) 裂纹尖端张开位移(CTOD) 进行测试, 其验收标准采用 DNV 标准, 即 CTOD 值大于 0.15 mm。试验结果表明, 未经焊后热处理的 EH36 钢手工电弧焊、单丝埋弧焊和双丝埋弧焊 3 种工艺的焊接接头的焊缝和热影响区(HAZ) 低温下绝大部分试样的断裂韧性值是合格的。EH36 钢手工电弧焊、单丝埋弧焊和双丝埋弧焊焊接接头可以在不进行焊后热处理的情况下使用, 这对缩短海洋平台结构的制造周期, 降低制造成本意义重大。

关键词 BS7448 标准 DNV-OS-C 401 标准 裂纹尖端张开位移 断裂韧度

海洋平台是一种典型的大型焊接工程结构, 在其焊接过程中常常出现接头的组织性能劣化, 由此产生高数值焊接残余应力甚至缺陷, 使焊接区域成为整个平台结构中最薄弱的部位。此外海洋平台若处在低温、海浪等恶劣的环境条件下, 接头部位易产生裂纹, 而裂纹扩展可导致结构失稳断裂。因此, 海洋平台制造材料具有良好的低温韧性, 并且在海洋平台制造中, 在焊后对所使用的大厚度钢板焊接接头部位进行热处理, 改善其低温断裂韧性, 是保证海洋平台安全运行的重要因素。海洋平台结构规模巨大且焊接部位较多, 进行热处理的施工周期长, 成本高; 因此, 进行一定条件下免除热处理的研究, 对缩短海洋平台结构的制造周期, 降低制造成本意义重大。我们以优化焊接工艺为手段, 采用合理地控制焊接线能量的办法, 从制造工艺的角度改善焊接部位断裂性能, 并以此为基础, 研究在一定使用温度和焊接工艺条件下的部分焊接部位免除焊后热处理的可行性, 取得成果, 这在国内外尚属首次。

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裂特性的重要参量。通过 CTOD 试验不但可以选择材料韧度, 而且可以为结构的安全可靠性的评定提供试验依据^[1,2]。根据 DNV-OS-C 401^[3] 标准以及 NOR-SOK M-101 标准^[4] 中“可以应用 CTOD 断裂韧度试

验免去焊后热处理”的规定, 我们进行了海洋平台用钢 EH36 免去焊后热处理的原厚度焊接接头 CTOD 试验, 并以该试验结果为依据评估了一定焊接工艺和使用温度条件下的焊接部位断裂性能, 判定其未经焊后热处理即可满足相关制造标准对接头断裂韧性的要求的可行性。

为确保 CTOD 试验结果的可靠性, 要求 CTOD 试验结果不但要满足国际上通行的英国标准 BS7448 标准^[5,6], 而且要符合挪威船级社 DNV-OS-C 401 标准的相关规定。

1 试样制备

试验所用材料为国产 EH36 钢, 对手工电弧焊、单丝埋弧焊和双丝埋弧焊 3 种工艺焊接接头的焊缝和热影响区(HAZ) 进行了低温断裂韧度的测定。根据英国标准 BS7448 制备了带预制疲劳裂纹的 3 点弯曲(TPB) 标准试样。

1.1 试样尺寸

根据标准试样尺寸为 $B \times 2B$, 缺口方向为 NP 的要求, 该试验试样尺寸确定为 54 mm \times 108 mm。

1.2 加工机械缺口

(1) 焊缝缺口的制备, 参照 BS7448 标准标记试样切割加工线, 并要求保证切割线所在平面与试样切割面的垂直角度为 $(90 \pm 5)^\circ$; 焊缝试样缺口开在

焊缝金属区的正中间 (WCL); HAZ 试样则按照 DNV-OS-C401 标准的相关规定, 要保证缺口位置距焊缝熔合线的距离不超过 0.5 mm。

(2) 在线切割机上用直径 0.08 mm 的钼丝加工机械缺口。

1.3 预制疲劳裂纹

采用 100 kN 高频疲劳试验机在室温下预制焊缝疲劳裂纹。根据 BS7448 标准, 在预制疲劳裂纹过程中, 应控制裂纹深度 (a) 不要扩展太快。在预制疲劳裂纹深度最后的 1.3 mm 内, 可以适当增大疲劳荷载比, 以避免使试样表面裂纹深度扩展量大于试样内部扩展量过多。同时应保证最终的预制疲劳裂纹深度和线切割长度之和控制在 0.45~0.70 W (宽度) 范围内。试样图形如图 1 所示。

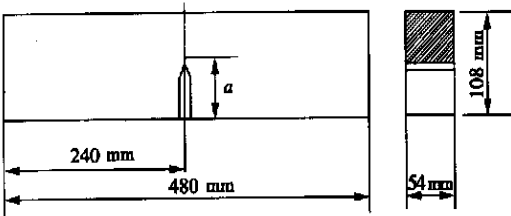


图 1 3 点弯曲试样

2 试验程序

试验在 1000 kN 万能材料试验机上进行, 试验过程中自动记录试样的 $P-v$ 曲线。试验步骤如下。

(1) 用游标卡尺精确测量每个试样的 B (厚度) 和 W (宽度), 测量精度为 0.02 mm。

(2) 试验时先将试样浸泡在冷却槽中冷却 (槽内盛有干冰、酒精低温介质), 待温度达到待测温度后进行保温, 每个试样均保温 20 min 以上。试验过程中, 低温介质液面应高出试样顶面 2~3 mm, 温度变化控制在 $\pm 2^\circ\text{C}$ 间。

(3) 采用一次加载方式加载直到试样失稳破坏, 加载速率控制在裂纹深度扩展的 0.5~1.0 mm/min 范围内, 并同时记录试样 $P-v$ 曲线。

(4) 试样在失稳破坏后, 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。取下断裂断口, 用工具显微镜测量试样的裂纹长度 a_0 。具体方法为: 沿试样厚度 (B) 方向取 9 个测试位置分别测量, 其中最外侧的 2 个点定在距试样表面 0.01 B 处, 然后在这 2 个点之间等间距地取 7 个测试位置。

(5) 数据处理。根据试样 $P-v$ 曲线上的最大

荷载值 F (N), 对应最大荷载时的塑性张开位移 v_p (mm), 裂纹尖端处材料的屈服强度 σ_{YS} (MPa); 计算 HAZ 的 CTOD 时, 取母材和焊缝金属中较大的 σ_{YS} , 弹性模量取 $E = 2.1 \times 10^5$ MPa, 泊松比 $\nu = 0.3$ 。根据 BS7448 第一部分计算 CTOD 值。

3 试验结果

3.1 典型的 $P-v$ 曲线

典型的 $P-v$ 曲线如图 2 所示。手工电弧焊焊接接头焊缝和热影响区的试验结果如表 1 所示; 单丝埋弧焊焊接接头焊缝和热影响区的试验结果如表 2 所示; 双丝埋弧焊焊接接头焊缝和热影响区的试验结果如表 3 所示。

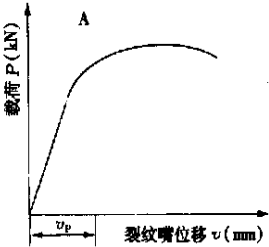


图 2 典型的 $P-v$ 曲线

表 1 手工电弧焊焊缝和热影响区断裂韧度试验结果

焊接工艺 评定号	接头 型式	缺口位置	试件号	CTOD (mm)	$\Sigma_N \lambda_{I1}^*$ (mm)	评价
S-246	K 型 坡口	热影响区 (0 $^\circ\text{C}$)	S-246-B-1	0.634 7	23.5	有效
			S-246-B-2	1.306 8	22.5	有效
			S-246-B-3	1.181 0	10.0	有效
			S-246-B-4	0.286 8	27.5	有效
			S-246-B-5	0.282 0	8.5	有效
			S-246-B-6	0.887 7	0.0	无效
			S-246-B-7	0.733 7	16.0	有效
			S-246-B-8	1.303 3	31.0	有效
			S-246-B-9	0.128 0	14.5	有效
S-247	K 型 坡口	热影响区 (-15 $^\circ\text{C}$)	S-247-B-1	0.395 5	24.0	有效
			S-247-B-2	0.128 8	12.0	有效
			S-247-B-3	0.178 7	24.5	有效
			S-247-B-4	1.283 5	40.0	有效
			S-247-B-5	0.122 6	31.0	有效
			S-247-B-6	0.122 3	35.0	有效
			S-247-B-7	0.756 1	11.5	有效
			S-247-B-8	0.221 8	14.0	有效
			S-247-B-9	0.438 5	21.0	有效
	K 型 坡口	焊缝中心 (-15 $^\circ\text{C}$)	S-247-A-1	0.326 2		有效
			S-247-A-2	0.358 6		有效
			S-247-A-3	0.326 4		有效
			S-247-A-4	0.714 4		有效
			S-247-A-5	0.180 1		有效

* 疲劳裂纹尖端位于热影响区的总长度

3.2 有效性判别

BS7448 标准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 2 个裂纹深度的差值均不大于 0.2 a_0 ; ③预制疲劳裂纹的

表 2 单丝埋弧焊焊缝和热影响区断裂韧度试验结果

焊接工艺 评定号	接头 型式	缺口位置	试件号	CTOD (mm)	$\Sigma_N\lambda_1^*$ (mm)	评价
S-127	K 型 坡 口	热影响区 (0℃)	S-127-B-1	0.1500	27.0	有效
			S-127-B-2	0.8997	14.0	有效
			S-127-B-3	0.1745	21.0	有效
			S-127-B-4	0.3414	31.0	有效
			S-127-B-5	0.1507	32.0	有效
			S-127-B-6	0.2126	21.0	有效
			S-127-B-7	0.5866	22.0	有效
			S-127-B-8	0.7615	18.0	有效
			S-127-B-9	0.1566	4.0	无效
S-126	K 型 坡 口	热影响区 (-15℃)	S-126-B-1	0.2616	14.5	有效
			S-126-B-2	0.2182	18.5	有效
			S-126-B-3	0.0610	13.0	有效
			S-126-B-4	0.2382	6.0	无效
			S-126-B-5	0.4002	4.0	无效
			S-126-B-6	1.3475	13.0	有效
			S-126-B-7	0.3332	17.5	有效
			S-126-B-8	0.6053	2.5	无效
			S-126-B-9	0.7159	18.0	有效
S-126	X 型 坡 口	焊缝中心 (-15℃)	S-126-A-1	0.5991		有效
			S-126-A-2	0.5156		有效
			S-126-A-3	0.7898		有效
			S-126-A-4	0.1767		有效
			S-126-A-6	0.9260		有效
			S-126-A-7	1.2629		有效

* 疲劳裂纹尖端位于热影响区的总长度

表 3 双丝埋弧焊焊缝和热影响区断裂韧度试验结果

焊接工艺 评定号	接头 型式	缺口位置	试件号	CTOD (mm)	$\Sigma_N\lambda_1^*$ (mm)	评价
S-128	K 型 坡 口	热影响区 (0℃)	S-128-B-1	0.9350	5.0	无效
			S-128-B-2	0.1432	16.0	有效
			S-128-B-3	0.0970	14.0	有效
			S-128-B-4	0.7245	10.0	有效
			S-128-B-5	0.3298	32.0	有效
			S-128-B-6	0.8591	14.0	有效
			S-128-B-7	0.8468	5.0	无效
			S-128-B-8	0.0782	11.0	有效
			S-128-B-9	0.1575	28.0	有效
	X 型 坡 口	焊缝中心 (-15℃)	S-128-A-1	0.8953		有效
			S-128-A-2	0.8513		有效
			S-128-A-3	0.5494		有效
			S-128-A-4	0.5939		有效
			S-128-A-5	0.6761		有效
			S-128-A-6	0.1939		有效

* 疲劳裂纹尖端位于热影响区的总长度

最小值不小于 1.3 mm 和 0.025% 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对于热影响区试样, 还需对断口晶粒进行金相分析, 确定裂纹尖端在粗晶区后结果才有效。

为了确保 CTOD 试验结果的可靠性, 在判定试验结果的有效性时, 不仅要符合 BS7448 标准, 而且要符合挪威船级社 DNV-OS-C 401 标准的规定: 疲劳裂纹尖端落于热影响区的总长度应超过整个试样厚度的 15%。该试验中, 试样厚度为 54 mm, 因此疲劳裂纹尖端位于热影响区的总长度应该大于 8.4 mm, 否则该试样是无效的。

4 试验结果与结论

典型试样的宏观断口形状如图 3 所示。

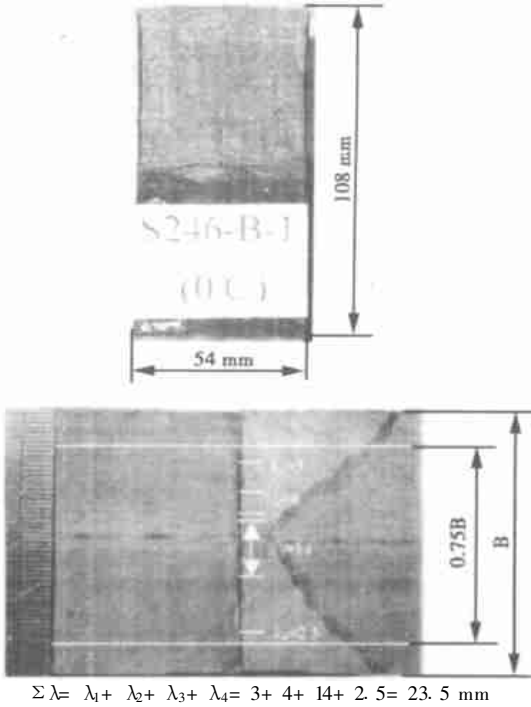


图 3 典型试样的宏观断口

根据 DNV 验收标准, 全厚度试样的裂纹尖端张开位移 CTOD 值达到 0.15 mm 即满足要求。从试验结果可以看出: 手工电弧焊焊接接头热影响区在 0℃时, 只有 1 个试样不能满足要求; 在 -15℃时有 3 个试样不能满足要求, 焊缝都是合格的; 单丝埋弧焊焊接接头热影响区在 -15℃时有 1 个试样不合格, 其余试样均合格; 双丝埋弧焊的焊接接头热影响区在 0℃时有 3 个试样不合格, 其余均符合要求。由此可见, 在手工电弧焊、单丝埋弧焊和双丝埋弧焊 3 种焊接工艺条件下, 未经焊后热处理的 EH36 钢焊缝和热影响区(HAZ)低温下试样的断裂韧性值均满足要求, 这 3 种焊接接头可以在不进行焊后热处理的情况下使用。

(下转第 136 页)

的完全相似,可以应用本文所提出的式(5)将模型实验结果转换到实型。

(4) 在相同的荷载和结构整体尺寸的情况下,只要筒内气体不从底部溢出,不同筒群组合的最大倾角变化不大。而当筒数相同时,若筒位布置距结构中心点比较远,则恢复力矩较大,与此同时,其结构的最大倾角也将会变小。

参 考 文 献

- 1 Cheung K F, Phadkp A C, Smith D A, Lee S K, Seidl L H. Hydrodynamic response of a pneumatic floating platform. *Ocean Engineering*, 2000, 27(12): 1407~1440
- 2 Do Sam Kim, Koichiro Iwata. Dynamic behavior of tautly moored semi-submerged structure with pressurized air chamber and resulting wave transformation. *Coastal Engineering in Japan*, 1991, 34(2): 223~242
- 3 沈国光, 项伟征, 王传荣. 关于气浮筒群结构的静稳性. *海洋工程*, 2002, 20(1): 80~83
- 4 别社安, 时忠民, 王翎羽. 气浮结构的静浮态分析. *中国港湾工程*, 2000, (6): 18~23

收稿日期: 2003-10-23 改回日期: 2004-03-19

(编辑: 许 敏)

(上接第 131 页)

参 考 文 献

- 1 霍立兴. 焊接结构工程强度. 北京: 机械工业出版社, 1995
- 2 霍立兴. 焊接结构的断裂行为及评定. 北京: 机械工业出版社, 2000
- 3 DNV-OS-C401. Fabrication and testing of offshore structures. 2001
- 4 NORSOK M-101. Structural steel fabrication. 1997
- 5 BS 7448: Part 1. Fracture mechanics toughness tests. Part 1. Method for determination of K_{IC} , critical CTOD and critical J values of metallic materials. 1991
- 6 BS 7448: Part 2. Fracture mechanics toughness tests. Part 1. Method for determination of K_{IC} , critical CTOD and critical J values of welds in metallic materials. 1997

收稿日期: 2003-06-19 改回日期: 2004-03-16

(编辑: 许 敏)

Application of CTOD fracture toughness tests in offshore oil platform fabrication

Cao Jun Li Xiaowei Wen Zhigang

(Offshore Oil Engineering Co. Ltd., Tianjin, 300452)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

The similarity of static stability of air floating structure and the relation between static stability and arrangement of cylinder group

Xu Jiong Shen Guoguang

(Civil Engineering College, Tianjin University, Tianjin, 300072)

Abstract In this paper the similarity of stability of air floating structure is analyzed and the relations between static stability and arrangement of cylinder group are investigated according to the calculated results for the 4, 8, 16 and 25 cylinder group. The results indicate that the relatively error of restore moment at the scale ratio of 0.1 can be 52% if the influence of atmosphere pressure doesn't take into account when doing model experiment. Owing to the water density can't change and in order to satisfy the similarity criterion of the environment pressure, we have to control the temperature of circumstance only in the experiment, but it is hardly to realize. For this, this text put forward a modified formula, by which the experiment result can be applied to the archetypal.

Key words: air floating structure; static stability; cylinder group; similarity

Abstract: CTOD tests were performed on EH36 steel (thickness of 55 mm) joints welded by SMAW, SAW and SAW (tandem) according to BS7448 and DNV-OS-C401 fracture toughness tests standards, and the DNV standard was taken as the acceptance standard, that is CTOD values shall be greater than 0.15 mm. The test results indicate that the most seam and HAZ test samples of EH36 steel joints welded by three kinds of welding processes and without PWHT meet the requirement of CTOD value at low temperature. So it can be concluded that EH36 steel joint welded respectively by SMAW, SAW and SAW (tandem) can omit PWHT, which has the important significance in reducing fabrication period and cost of the offshore platform structures.

Key words: BS7448 standard; DNV-OS-C401 standard; crack tip opening displacement; fracture toughness