

# 海洋钻井平台厚板焊接结构的层状撕裂

喻 军 马 涛 秦耀良 刘一程 严 铿

**摘 要** 研究了制造海洋钻井平台升降腿的大厚度高强钢材料及焊缝金属的层状撕裂敏感性。结果表明: WEL - TEN780 Mod - 037 钢母材和采用两种焊接方法焊接的焊缝均具有良好的抗层状撕裂性能。本文还从结构设计和工艺角度提出了防止层状撕裂的措施。

**关键词** 海洋平台 高强钢 层状撕裂

## 0 引言

随着世界各国经济的飞速发展,对能源的需求越来越大。当今,陆地上的石油资源已经不能满足日益增长的经济发展需要,这就迫切需要从海洋中获得新的石油资源。海洋面积占全球表面积的 71%,地球上约有 30% 的石油和天然气资源在海底下。自 1943 年世界上第 1 台水深为 6m 的导管架式采油平台在墨西哥湾问世以来,世界各国对海洋资源的开发正方兴未艾。目前海底油田的开发,已从浅海到深海、冰海区域拓展,前景广阔,对海洋钻井平台制造技术的要求亦越来越高。

海洋钻井平台的重要节点由于是大厚度管件相交,其角接头厚度方向拘束度大,当钢材厚度方向受力时,在近缝区的母材上有可能产生层状撕裂。层状撕裂是大厚度板在受到垂直于板材表面方向应力时出现的一种沿着钢板轧制方向发展的裂纹平台,通过大约与板面垂直的剪切壁而连接起来的阶梯型裂纹。层状撕裂从外观上难以观测,有时用超声波检查也不易发现。因此,它是一种危险极大的潜在缺陷,而发现后也难以修整,所以必须以防为主。因此,海洋钻井平台的厚板结构在材料选择、结构设

计、工艺制定时必须考虑层状撕裂破坏问题。

为了减轻海洋工程结构的重量,同时又增加结构整体的安全性,采用材料的强度级别也越来越高。如海洋钻井平台升降腿已采用屈服强度 690MPa 以上的低合金高强钢制造,材料的厚度也不断增加,最大厚度达到 210mm。这种高强度、大厚度材料对于防止层状撕裂破坏提出了更高的要求。本文主要研究制造海洋钻井平台升降腿的大厚度 WEL - TEN780 Mod - 037 钢母材和焊缝金属层状撕裂的敏感性及防止措施。

## 1 试验材料及方法

本文海洋钻井平台升降腿材料采用日本 Nippon Steel 公司生产的 WEL - TEN780 Mod - 037 钢,其化学成分见表 1,力学性能见表 2。手工电弧焊采用的焊条牌号为 L - 80SN,直径为 4.0 mm,其熔敷金属的化学成分如表 3 所示,熔敷金属的力学性能如表 4 所示。二氧化碳气体保护焊采用的焊丝牌号为 FLUXOFL 42 LT,直径为 1.2 mm,其熔敷金属的化学成分如表 5 所示,熔敷金属的力学性能如表 6 所示。试板尺寸为 400mm × 500mm × 180mm,焊接坡口的形状和尺寸如图 1 所示。

表 1 试验用 WEL - TEN780 Mod - 037 钢的化学成分 %

| C    | Si   | Mn  | P     | S     | Mo   | V    | Cu   | Ni   | Cr   | Nb   | B     | N    |
|------|------|-----|-------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|------|
|      | 0.1  | 0.6 |       |       | 0.40 | 0.02 | 0.10 | 1.50 | 0.40 |      |       |      |
| 0.16 | ~    | ~   | 0.020 | 0.010 | ~    | ~    | ~    | ~    | ~    | 0.02 | 0.005 | 0.02 |
|      | 0.55 | 1.5 |       |       | 0.70 | 0.08 | 0.50 | 3.00 | 0.80 |      |       |      |

$$P_{cm} = C + Mn/20 + Si/30 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

作者介绍:喻军,马涛,秦耀良现工作于外高桥造船有限公司;刘一程,严铿现工作于江苏科技大学。

采用二氧化碳和手工电弧焊这两种焊接方法对试板进行对接焊,试验所用的设备为焊接波形控制多功能交直流焊机 WX 300。手工电弧焊焊接工艺参数见表 7 所示。二氧化碳气体保护焊焊接工艺

收稿日期:2007 - 08 - 30

参数如表 8 所示。

表 2 试验用 WEL - TEN780 Mod - 037 钢的力学性能

| 屈服强度 $R_e$<br>/MPa | 抗拉强度 $R_m$<br>/MPa | 伸长率 $A$<br>/(%) | 冲击功 $A_K$ /J<br>1/4t - 37<br>1/2t - 27 | HB<br>1/4t<br>QT |
|--------------------|--------------------|-----------------|--|------------------|
| 690                | 790 ~ 930          | 15              | 69                                     | 260              |

表 3 L - 80SN 焊条熔敷金属的化学成分 %

| C    | Si   | Mn   | P     | S     | Ni   | Mo   |
|------|------|------|-------|-------|------|------|
| 0.05 | 0.36 | 1.39 | 0.012 | 0.004 | 4.64 | 0.48 |

表 4 L - 80SN 焊条熔敷金属的力学性能

| 屈服强度 $R_e$ /MPa | 抗拉强度 $R_m$ /MPa | 延伸率 $A$ / (%) | 冲击吸收功 $A_{KV}$ /J<br>- 60 |
|-----------------|-----------------|---------------|---------------------------|
| 765             | 863             | 22            | 69                        |

表 5 FLUXOFL 42LT 焊丝熔敷金属的化学成分 %

| C     | Si   | Mn   | P     | S     | Ni    | Mo    | Cr    |
|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.087 | 0.47 | 1.74 | 0.008 | 0.006 | 2.131 | 0.459 | 0.230 |

表 6 UXOFL 42LT 焊丝熔敷金属的力学性能

| 屈服强度 $R_e$ /MPa | 抗拉强度 $R_m$ /MPa | 延伸率 $A$ / (%) | 冲击吸收功 $A_{KV}$ /J<br>- 40 | 冲击吸收功 $A_{KV}$ /J<br>- 60 |
|-----------------|-----------------|---------------|---------------------------|---------------------------|
| 860             | 894             | 18            | 88                        | 77                        |

表 7 手工电弧焊焊接工艺参数

| 预热温度 / | 层间温度 / | 焊条直径 /mm | 电压 /V   | 电流 /V     | 电流极性 | 焊接层数 |
|--------|--------|----------|---------|-----------|------|------|
| 280    | 190    | 4.0      | 24 ~ 26 | 160       | 直流反接 | 前五层  |
| 280    | 190    | 5.0      | 25 ~ 27 | 170 ~ 180 | 直流反接 | 后五层  |

表 8 CO<sub>2</sub> 焊接工艺参数

| 预热温度 / | 层间温度 / | 焊丝直径 /mm | 电流 /A     | 电压 /V   | 电流极性 |
|--------|--------|----------|-----------|---------|------|
| 275    | 160    | 1.2      | 210 ~ 220 | 25 ~ 27 | 直流反接 |

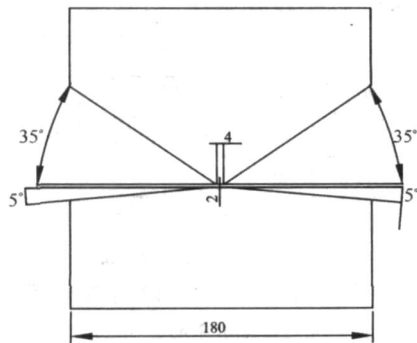


图 1 焊接坡口

母材和焊缝金属的 Z 向拉伸试验在 CMT5205

微机控制电子万能 (拉力) 试验机上进行,微观分析试样在拉伸试样上截取,微观分析在 ZEISS 金相显微镜和 JSW - 6480 扫描电镜上进行。

2 Z 向拉伸试验结果与层状撕裂敏感性

关于大厚钢板焊接层状撕裂倾向的研究,尚未建立国家标准。根据近年来国际焊接学会的调查,世界上许多国家均采用 Z 向拉伸断面收缩率作为评定层状撕裂的依据<sup>[1]</sup>,故本文采用 Z 向拉伸试验评定层状撕裂倾向。Z 向拉伸试验是评定层状撕裂敏感性的间接试验方法,通过测定母材的 Z 向断面收缩率来评价焊接结构的层状撕裂敏感性。IWI 规定的 Z 向拉伸试样尺寸如图 2 所示<sup>[2]</sup>。

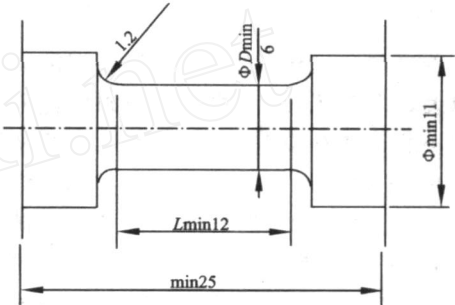


图 2 Z 向拉伸试样

WEL - TEN780 Mod - 037 钢母材、采用 L - 80SN 焊条手工电弧焊的焊接接头的焊缝、采用 FLUXOFL - 42LT 焊丝 CO<sub>2</sub> 气体保护焊的焊接接头的焊缝均进行了 Z 向拉伸试验,结果如表 9 所示。

表 9 Z 向拉伸试验结果

| 焊接材料           | 屈服强度 $s$ /MPa | 抗拉强度 $b$ /MPa | 伸长率 / (%) | 断面收缩率 $z$ / (%) | 备注     |
|----------------|---------------|---------------|-----------|-----------------|--------|
|                | 888.3         | 938.3         | 5.2       | 50.8            | 母材 Z 向 |
| L - 80SN       | 838.3         | 883.3         | 14        | 62              | 焊缝 Z 向 |
| FLUXOFL - 42LT | 795           | 855           | 15.0      | 50.2            | 焊缝 Z 向 |

从 WEL - TEN780 Mod - 037 钢的化学成分分析,其含 S 0.010,含 P 0.020,为防止层状撕裂,DNV 的要求 S 0.020, P 0.025,ABS 的要求 S 0.025, P 0.025,因此,WEL - TEN780 Mod - 037 钢应该具有良好的抗层状撕裂性能。

根据前面研究,WEL - TEN780 Mod - 037 钢为超细晶粒钢,其 Z 向拉伸断面收缩率  $z$  为 50.8%,远高于 ABS 防止层状撕裂的要求  $z$  25%。

从表 9 所示试验结果中可以看到,采用 L - 80SN 焊条的焊缝和采用 FLUXOFL 42LT 焊丝的焊缝,其 Z 向拉伸断面收缩率  $z$  均大于 50%,不低于 WEL - TEN780 Mod - 037 钢的 Z 向拉伸断面收缩

率。因此,本项目采用的两种焊接材料焊接 WEL - TEN780 Mod - 037 钢的焊缝均具有良好的抗层状撕裂性能。

图 3 为 WEL - TEN780 Mod - 037 母材、手工焊焊缝 Z 向、气保护焊焊缝 Z 向的微观组织对比。可以看到,母材、手工焊和气体保护焊的焊缝 Z 向组织都很细小,而且没有因轧制而造成的带状组织,即使在前面母材的横向组织中也没有发现带状组织。均匀细小的组织证实了上述材料和焊缝具有良好的 Z 向塑性。

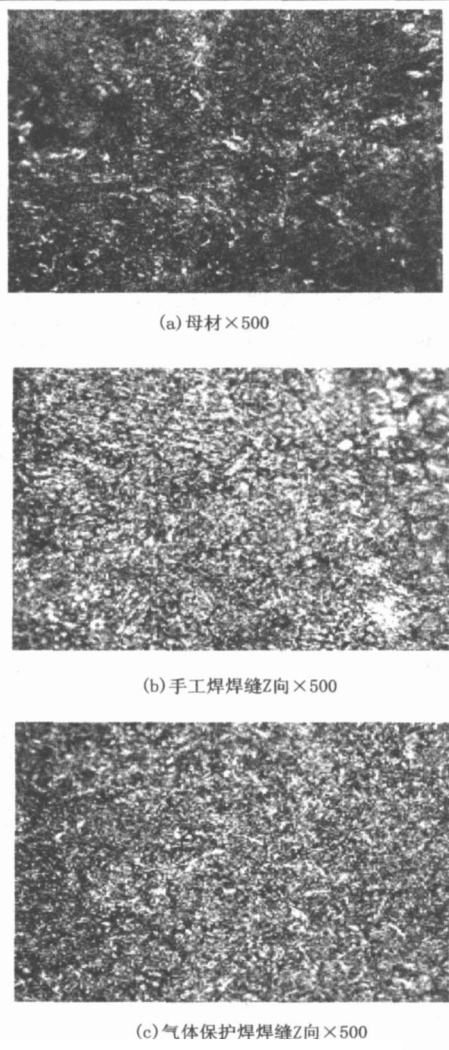


图 3 母材和焊缝 Z 向微观组织

WEL - TEN780 Mod - 037 钢 Z 向拉伸试样的断口微观形貌如图 4 所示,手工焊焊缝 Z 向拉伸试样的断口微观形貌如图 5 所示,气保护焊焊缝 Z 向拉伸试样的断口微观形貌如图 6 所示。从上述试样断口的宏观形貌分析中可知,断口基本均有纤维区和剪切唇组成,而放射区很小,几乎没有。在断口的微观形貌中,在纤维区的不同位置,只是韧窝的大小、深浅有所变化,而反映脆性断裂特征的解理形貌

根本没有,连准解理形貌也几乎找不到,说明上述材料具有极好的塑性。

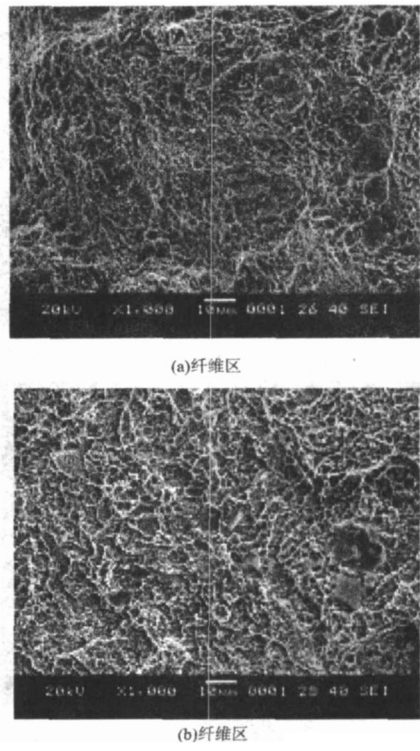


图 4 WEL - TEN780 Mod - 037 钢 Z 向拉伸试样的断口微观形貌

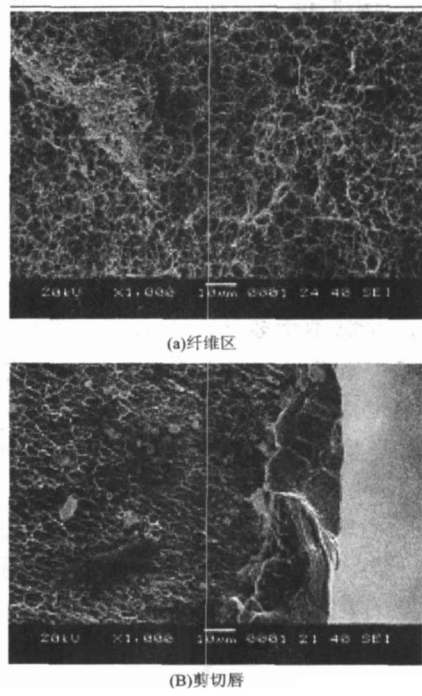


图 5 手工焊焊缝 Z 向拉伸试样的断口微观形貌

### 3 防止层状撕裂的措施

海洋钻井平台的层状撕裂和许多因素有关,主要原因有<sup>[3,4]</sup>:

(1)母材金属存在层状夹杂物,其中硫化物影响最严重,由于硫化物往往沿着母材轧制方向呈带

状分布,影响着钢板厚度方向的性能,发生层状撕裂的钢中,含硫量大多高于 0.02%。

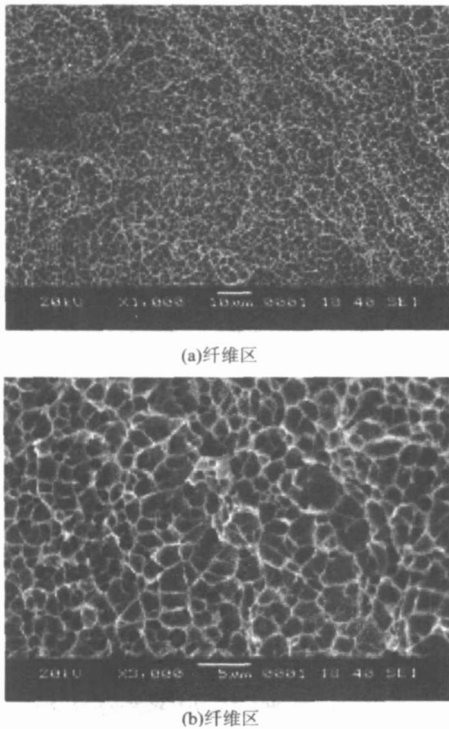


图 6 气保护焊焊缝 Z 向拉伸试样的断口微观形貌

(2)在钢板厚度方向塑性低。习惯上用厚度方向(Z向)拉伸断面收缩率  $\psi_z$  表示其塑性,一般认为  $\psi_z$  小于 15%钢板在焊接时易产生层状撕裂。

(3)焊接时,在厚度方向上产生较大的拘束应力,因此可能产生层状撕裂。

(4)焊接冷裂纹诱发。在焊接热影响区焊趾或焊根的冷裂纹诱发下而形成层状撕裂。形成冷裂纹的原因中,氢是最重要的因素之一。

防止层状撕裂主要从两个方面来考虑,一是选择对层状撕裂敏感性小的材料,二是从结构设计和工艺角度来考虑。

由于大厚度管相交的角焊缝在厚度方向上拘束力大,海洋工程重点节点容易在临近焊缝的母材上产生层状撕裂,对钢进行脱 S 处理,改善钢材性能,有利于防止层状撕裂的发生。另外,对于钢材抗层状撕裂性能的要求,各船级社都对移动式海洋钻井平台的 Z 向断面收缩率  $\psi_z$  和低温韧性提出特别的要求。

从本文研究看,海洋钻井平台制造的材料选择均为具有良好抗层状撕裂性能的钢材,下面着重分析如何从结构设计和工艺的角度来减小层状撕裂的

敏感性。

(1)从结构设计角度考虑,应改变焊缝布置以改变焊缝收缩应力方向,尽量避免焊接接头的受力方向与厚度方向垂直;同时,亦可改变坡口方向来改变受力方向;焊接接头坡口间隙的大小对层状撕裂的敏感性也有影响,过大的坡口间隙在焊接时会使焊接区产生较大的收缩量,从而产生较大的拘束应力,在实际焊接施工中,一般宜将间隙控制在 3mm 以下。此外,在保证结构强度的前提下,应尽量减小焊脚尺寸,从而减小焊缝金属体积,以减小焊缝收缩应变。

(2)从焊接工艺、方法角度考虑,选用低氢的  $\text{CO}_2$  气体保护焊,应能减小冷裂敏感性,从而有利于减小层状撕裂敏感性。焊接材料的选择在保证接头强度要求的条件下,尽量选择低强匹配的焊接材料,低强匹配易使应变集中于焊缝而减轻母材热影响区的应变,从而改善抗层状撕裂性能。在焊接工艺方面,合理的焊接程序是改善焊接接头受力状况的有效措施;采用多层、多道焊、适当小的线能量均有利于降低层状撕裂倾向,但小的线能量必须以防止产生冷裂为前提;施焊时还要防止因焊缝扩散氢引起冷裂纹而诱发层状撕裂,故借助预热和后热可减少和防止层状撕裂的产生,但它比防止氢致裂纹要求的预热温度要高(一般要高 50~100),并与钢材的含硫量有关,尤其在焊接高拘束接头时,更应引起重视<sup>[5,6]</sup>。

## 4 结论

从防止层状撕裂的角度分析, WEL - TEN780 Mod - 037 钢母材和采用两种焊接材料焊接的焊缝均具有良好的抗层状撕裂性能。在实际生产中,还可从结构设计和工艺角度采取措施防止层状撕裂。

### 参考文献:

- [1] 曾乐. 现代焊接技术手册 [M]. 上海:上海科学技术出版社, 1994.
- [2] 中国焊接学会. 焊接手册 [M]. 北京:机械工业出版社, 2002.
- [3] 龙杰. 抗层状撕裂钢 16MnR - Z25 的研制 [J]. 宽厚板, 1996, 2(6): 7 - 11.
- [4] 杨蕴续. 角接头层状撕裂及预防措施 [J]. 石油化工设备, 2001, 30(4): 52 - 53.
- [5] 韩鑫根. 大厚度钢材焊接层状撕裂的防止 [J]. 中国修船, 1996, (1): 8 - 10.
- [6] 刘翠荣, 吴志生, 郭东城, 等. A633D 钢层状撕裂倾向试验研究 [J]. 太原理工大学学报, 1998, 29(6): 657 - 660.