

DOI:10.11784/tdxbz202311010

# SCR 立管打底焊根部成形及其对疲劳性能的影响研究

张念涛<sup>1,2</sup>, 邓彩艳<sup>1,3</sup>, 武少杰<sup>1,3</sup>, 孔维臣<sup>1,3</sup>

(1. 天津大学材料科学与工程学院, 天津 300350; 2. 海洋石油工程股份有限公司, 天津 300452;  
3. 天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300350)

**摘要:** 浮式平台配合钢悬链线立管 (SCR) 是深海油气资源主流开发方式之一, 具有很高的经济价值和战略意义。但是由于深海浮式结构在风/浪/流作用下将产生较大漂移运动, 使得 SCR 系统在服役期间需要承受巨大极限载荷与平台运动/涡机振动所产生的交变荷载, 致使其环焊缝容易产生严重的断裂危险和疲劳失效问题。以  $\Phi 355 \text{ mm} \times 19.1 \text{ mm}$  的 X65 管线钢为试验材料, 对比分析了冷金属过渡 (CMT)、表面张力过渡 (STT) 两种单面焊双面成形打底焊工艺下焊接接头的疲劳性能, 发现单面打底焊容易因为焊根余高过大或者未熔合、未焊透等缺陷导致接头疲劳性能显著降低。在此基础上, 进一步对比了 7 种常见的单面打底焊工艺下的接头疲劳性能, 并对疲劳断口进行了分析, 结果发现所有单面打底焊工艺均难以稳定地保证焊根位置余高偏小且无未熔合和未焊透的缺陷。基于此, 提出了一种熔化极气体保护焊/脉冲钨极氩弧焊 (GMAW/GTAW-P) 双面打底焊工艺来保证 SCR 立管焊缝的内壁成形质量。试验结果发现, 该工艺下焊根余高尺寸可以限制在  $200 \mu\text{m}$  以内, 焊根过渡角  $\theta \leq 3^\circ$ , 焊根熔宽在  $6 \sim 8 \text{ mm}$ , 从工程应用角度有效地解决了传统单面打底焊工艺下焊根成形不良的问题, 并将焊接接头的疲劳寿命提高至  $1 \times 10^7$  周次以上, 为高疲劳寿命的 SCR 立管打底焊提供了一种新思路。

**关键词:** 钢悬链线立管; 焊接工艺; 根部焊趾; 疲劳性能

中图分类号: TG444.77

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2024)12-1273-07

## Investigation of the Root Formation of SCR Root Welding and Its Effect on Fatigue Performance

Zhang Niantao<sup>1,2</sup>, Deng Caiyan<sup>1,3</sup>, Wu Shaojie<sup>1,3</sup>, Kong Weichen<sup>1,3</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;  
2. Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300452, China;  
3. Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** In deep-sea oil and gas resource development, the combination of a floating platform with a steel catenary riser (SCR) is the primary method, offering substantial economic value and strategic significance. However, the significant drift motion experienced by deep-sea floating structures owing to wind, waves, and currents necessitates the SCR system to withstand immense ultimate and alternating loads generated by platform motion and turbomachinery vibration throughout its service life. Consequently, the circumferential welds are susceptible to serious fracture hazards and fatigue failure issues. This study focused on the use of X65 pipeline steel with dimensions of  $\Phi 355 \text{ mm} \times 19.1 \text{ mm}$ , assessing the fatigue performance of welded joints using two types of single-sided welding processes: cold metal transfer (CMT) and surface tension transfer (STT). The analysis revealed that the fatigue performance of the welded joints under the single-sided root welding process was significantly reduced owing to defects such as excessive weld root reinforcement, incomplete fusion, or incomplete penetration. Building on this observation, the fatigue performances of joints formed via seven common single-sided root welding processes were further compared, and the

收稿日期: 2023-11-12; 修回日期: 2024-01-25.

作者简介: 张念涛 (1984—), 男, 博士研究生, 1016208055@tju.edu.cn.

通信作者: 邓彩艳, dengcy@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52375376).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52375376).

resulting fatigue fractures were carefully analyzed. The experimental results indicated that all single-sided root welding processes faced challenges in consistently ensuring minimal reinforcement and freedom from unfused and unwelded defects at the weld root position. In response to these challenges, a novel welding process involving gas metal arc welding (GMAW)/gas tungsten arc welding-pulsed (GTAW-P) for double-sided root welding was proposed. This process aimed to ensure the quality of the inner-wall formation of the SCR weld. The experimental data demonstrated that this process effectively restricted the size of the weld root reinforcement within 200 μm, the transition angle of the weld root  $\theta \leq 3^\circ$ , and the weld root width to 6—8 mm. Importantly, it addressed the issue of poorly shaped weld roots associated with traditional single-sided root welding processes, enhancing the fatigue life of the welded joints to more than  $1 \times 10^7$  cycles. Furthermore, it presents a novel approach toward achieving high fatigue life for the root welds of the SCR in engineering applications.

**Keywords:** steel catenary riser (SCR); welding process; root toe; fatigue performance

南海深水油气资源的开采关系到我国能源安全,在当前日益动荡的国际局势下有极其重要的战略意义<sup>[1-2]</sup>. 其中,浮式平台(FP)+钢悬链线立管(steel catenary riser, SCR)是南海深水油气开采的最佳方案<sup>[3-4]</sup>. 深海中 SCR 立管在风/浪/流等复杂交变载荷的作用下承受巨大的疲劳断裂风险<sup>[5-6]</sup>,需要严格控制打底焊的焊缝成形,才能满足 DD-SPC-SCR-SPST-0002 标准的高疲劳要求<sup>[7-8]</sup>. 然而,国内目前对于 SCR 立管打底焊的工艺研究仍处于空白阶段,开发出一套 SCR 立管高疲劳寿命的焊接工艺对于我国的油气资源开采具有重要意义<sup>[9-10]</sup>.

SCR 立管管径尺寸小(168~460 mm),焊接难度大. 根据文献[11-13]可知,对于 SCR 立管海上安装铺设的焊接过程,现存的两种打底焊工艺为表面张力过渡(surface tension transfer, STT)工艺和冷金属过渡(cold metal transfer, CMT)工艺,这两种技术均能获得较为理想的管道根部成形质量,但在其工艺下仍然存在 15%~20%焊道因不满足要求需要割掉重新焊接的情况.

为了突破相关技术的封锁,开发并进一步优化 SCR 立管打底焊工艺,本文首先测试了 STT 工艺和 CMT 工艺所焊焊缝的疲劳性能,分析了其疲劳失效原因;在此基础上,进一步采用了 7 种常见的单面打底焊工艺进行了焊接,分别为钨极惰性气体保护焊(全自动 TIG (Auto-TIG-P (5G))、半自动 TIG (TIG

(5G)和 TIG (2G))、振动焊丝钨极惰性气体保护焊(半自动 TIP-TIG (TT (2G)))、全自动 TIP-TIG (Auto-TT (5G)和 Auto-TT (2G))和手工电弧焊(SMAW (5G)),并在相同应力水平下进行了接头疲劳性能试验. 其中 2G 代表横焊,5G 代表管道水平固定焊. 结果发现,上述单面打底焊工艺均无法避免焊根成形不良的问题,而焊根成形不稳定是导致接头疲劳性能显著下降的关键原因. 基于此,提出了一种熔化极气体保护焊/脉冲钨极氩弧焊(GMAW/GTAW-P)双面打底焊工艺,试验结果得出,该工艺可以有效地解决传统单面打底焊工艺下焊根位置成形不良的问题,为高疲劳寿命要求的 SCR 立管焊接提供一种新思路.

## 1 试验

### 1.1 试验材料

试验材料选择了同一批号的 API 5L X65 钢材,其中单面打底焊工艺选取了  $\Phi 355 \text{ mm} \times 19.1 \text{ mm}$  尺寸的管道,GMAW/GTAW-P 双面打底焊工艺选取了  $\Phi 220 \text{ mm} \times 8.0 \text{ mm}$  尺寸的管道,不同规格管道的化学成分如表 1 所示,常规力学性能如表 2 所示. 坡口尺寸统一采用 60°的 V 型坡口,不留坡口间隙,其中,单面打底焊钝边尺寸为 0.5~1.6 mm,双面打底焊坡口钝边尺寸为 1.5~2.5 mm.

表 1 SCR 立管母材主要化学成分

Tab.1 Main chemical composition of SCR base metal

%

管道规格	W <sub>C</sub>	W <sub>Si</sub>	W <sub>Mn</sub>	W <sub>P</sub>	W <sub>Ni</sub>	W <sub>V</sub>	W <sub>Cu</sub>	W <sub>Cr</sub>	W <sub>Mo</sub>
$\Phi 355 \text{ mm} \times 19.1 \text{ mm}$	0.11	0.28	1.26	<0.010	0.146	0.06	0.066	0.06	0.131
$\Phi 220 \text{ mm} \times 8.0 \text{ mm}$	0.11	0.28	1.26	<0.010	0.146	0.06	0.066	0.06	0.131

表 2 SCR 立管母材的力学性能

Tab.2 Mechanical properties of SCR base metal

管道规格	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%	0℃冲击功/J
$\Phi 355 \text{ mm} \times 19.1 \text{ mm}$	476	598	18	≥40
$\Phi 220 \text{ mm} \times 8.0 \text{ mm}$	473	590	19	≥40

1.2 焊接工艺与试验方法

所有的单面打底焊工艺结束后均采用相同的工艺装备进一步完成填充和盖面,填充焊过程中的层间温度控制在 65 ~ 150 °C. 双面打底焊工艺则采用了自主设计的试验系统,其中 GTAW 焊枪始终领先 GMAW 焊枪 10 mm 左右,试验系统如图 1 所示. 在打底焊工序结束后,采用 Preheat35 预热焊机将管道预热至 100 ~ 150 °C,通过 GMAW 全位置焊工艺对 SCR 立管进行填充、盖面焊接,填充焊过程中的层间温度同样控制在 65 ~ 150 °C,具体的焊接工艺参数如表 3 所示. 上述所有焊缝焊后均进行无损检测,保证焊缝内不存在缺陷.

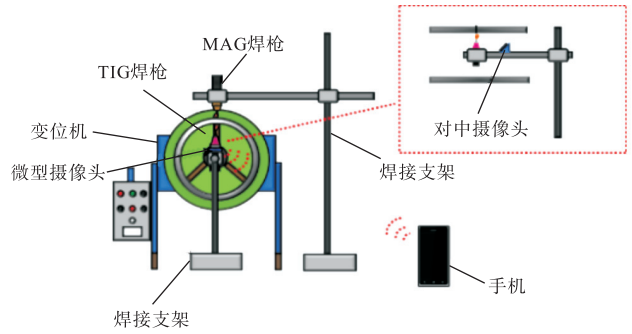


图 1 SCR立管双面打底焊设备示意  
Fig.1 Schematic diagram of double-sided root welding equipment for the SCR

表 3 焊接工艺参数

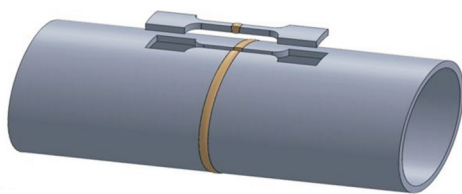
Tab.3 Welding process parameters

焊接工艺	电流/A	电压/V	送丝速度/(cm/min)	焊接速度/(mm/min)	热输入/(kJ/mm)	层间温度/°C
Auto-TT (2G)	175	11	25	140	0.825	100
Auto-TT (5G)	160 ~ 165	11	30 ~ 32	100 ~ 130	0.812 ~ 1.089	100
TT (2G)	145 ~ 160	10 ~ 13	21 ~ 25	100 ~ 120	0.798 ~ 1.152	100
Auto-TIG-P (5G)	峰值:170 ~ 200 基值:80 ~ 110	9.2	峰值:38.1 ~ 63.5 基值:25.4	66.04	0.969 ~ 1.290	40
TIG (5G)	90 ~ 130	10 ~ 16		50 ~ 120		40
TIG (2G)	80 ~ 120	10 ~ 16		50 ~ 120		40
SMAW (5G)	80 ~ 130	22 ~ 28		60 ~ 180		40
GMAW/GTAW-P	MAG:200, TIG:280	MAG:18, TIG:10		270		70
Fill	300	14	75	110 ~ 120	2.10 ~ 2.22	200 ~ 250
Cap1	230	13	45	120	1.50	220
Cap2	220	13	45	110	1.56	225

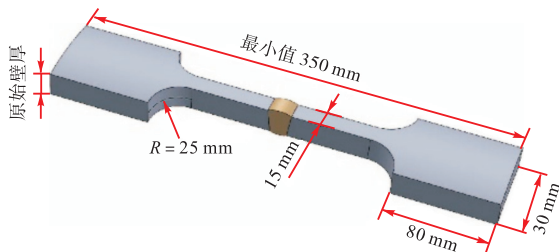
注: Fill 为填充焊工艺参数, Cap1 和 Cap2 为盖面焊工艺参数, 其余为打底焊工艺参数.

本文中均选择小尺寸疲劳试样进行疲劳性能测试,取样方式选择从零点按圆周顺时针依次取样,疲劳试样取样位置和尺寸如图 2 所示. SCR 管道测试

标准规定固定平均应力为 140 MPa, 动载分别为 80 MPa(低)、125 MPa(中)、175 MPa(高)<sup>[14]</sup>. 为了弥补小尺寸疲劳试件在取样过程中残余应力释放的影响,依照 DEP-37.81.40.31 标准保守估计,选择测得的最大残余拉应力 260 MPa 进行载荷补偿,即试验固定静载设定为 400 MPa,动载选择了最高应力水平 175 MPa 进行试验测试. 采用 PROTO X 射线法对试样表面进行残余应力测试,残余应力测试及疲劳试样装夹方式如图 3 所示.



(a) 取样位置



(b) 试样尺寸

图 2 疲劳试样取样位置及试样尺寸

Fig.2 Sampling position and size of fatigue specimen



(a) 测试过程

(b) 装夹过程

图 3 残余应力测试及疲劳试样装夹过程

Fig.3 Processes of residual stress test and installation of fatigue specimens

## 2 结果与分析

### 2.1 不同单面打底焊工艺对焊接接头的疲劳性能的影响

首先对目前实际生产项目中使用的 CMT 工艺与 STT 工艺打底焊工艺进行了焊接接头疲劳试验测试,其中 CMT(5G)、CMT(2G)和 STT(5G)工艺各分别取样 27 个、26 个、23 个(管道外表面打磨),疲劳循环周次设定为 1 000 万次,其疲劳性能及断裂位置如表 4 中所示. 试验结果发现,CMT(5G)工艺焊缝试件的平均疲劳寿命可达 3 267 254 周次,焊接接头试件的焊根起裂率为 44.4%;CMT(2G)与 STT(5G)工艺下的平均疲劳寿命分别可达 599 308 周次和 504 239 周次,疲劳试样焊根起裂率分别为 100% 和 95.7%. 由此可知,对于 CMT 与 STT 焊接工艺,焊根位置是焊接接头试样疲劳性能最薄弱的部位,极大地

限制了 SCR 立管的疲劳性能.

表 4 STT/CMT 焊接工艺下接头断裂位置

Tab.4 Fracture positions of welded joints with STT and CMT welding processes

工艺	平均疲劳寿命/周次	断裂位置
STT(5G)	504 239	焊趾(1)/焊根(22)
CMT(2G)	599 308	焊根(26)
CMT(5G)	3 267 254	母材(13)/未断(2)/焊根(12)

通过对 CMT 与 STT 工艺下疲劳寿命异常低的焊接接头试样进行 SEM 断口分析发现,上述 3 种焊接工艺下的焊根位置均存在不同程度的根部未熔合缺陷,如图 4 所示. 在高频循环载荷的作用下,焊根位置的未熔合区域存在极大的应力集中,且该缺陷属于表面缺陷或者近表面缺陷,极易在高频载荷下作为起裂位置并向内扩展,导致焊缝试件疲劳性能显著下降. 因此,焊根位置一方面需要避免余高过大导致的应力集中情况,同时也需要避免局部位置未熔合或未焊透而导致的应力集中情况.

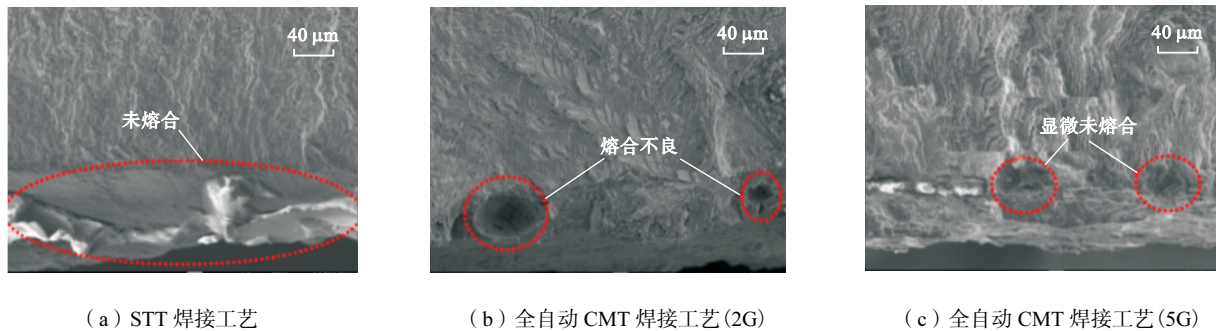


图 4 疲劳寿命异常试样的 SEM 形貌

Fig.4 SEM morphology of specimens with abnormal fatigue life

基于 CMT 与 STT 打底焊工艺下存在的问题,本文进一步对比了 7 种常见的管道打底焊工艺下的疲劳性能情况,7 种打底焊工艺分别为 Auto-TIG-P(5G)、TIG(5G)、TIG(2G)、TT(2G)、Auto-TT(5G)、Auto-TT(2G)和 SMAW(5G). 试验结果发现,对于以上所有的单面打底焊接工艺,焊根依然为整个焊缝试件疲劳性能最差的位置,其中 95.27% 的焊缝试件均起裂于此. 7 种 SCR 立管打底焊工艺下的接头的断裂情况如表 5 所示. 通过对以上工艺疲劳寿命异常低的焊缝试件进行宏观形貌观察发现,部分试件根部余高尺寸过大,导致疲劳裂纹沿根部焊趾位置起裂并向内扩展. 此外,一些疲劳试样存在错边的现象,采用单面打底焊工艺,根部焊趾位置不可避免在上错位置处形成明显的应力集中点,疲劳裂纹从该位置起裂向内扩展.

对于焊根成形良好且无错边的低疲劳寿命试样,通过 SEM 进行断口分析发现,以上 7 种单面打底焊

工艺的焊根表面或者近表面也会出现 30~200 μm 的显微未熔合,如图 5 所示. 因此可以得出结论,采用单面打底焊工艺难以稳定地保证焊根位置余高偏小且无未熔合和未焊透的缺陷.

表 5 不同 SCR 立管焊接工艺下接头断裂位置

Tab.5 Fracture positions of welded joints with different SCR welding processes

工艺	表面状态	断裂位置
Auto-TIG-P(5G)	打磨焊缝	母材(1)/未断(1)/焊根(41)
TIG(5G)	原始表面	焊根(11)
TIG(2G)	原始表面	焊根(11)
TT(2G)	原始表面	焊根(24)
Auto-TT(5G)	打磨焊缝	未断(4)/焊根(23)
Auto-TT(2G)	打磨焊缝	未断(2)/焊根(25)
SMAW(5G)	打磨焊缝	焊根(26)

### 2.2 不同单面打底焊工艺对焊缝疲劳性能的影响

对于 SCR 立管来说,理想的焊缝成形是焊根位置几乎不存在余高且无根部未熔合和未焊透等缺陷. 但是单面打底焊工艺熔池体积大,而且不同焊接

位置处熔池受力状态、电弧作用力大小都不相同，同时还会受到钝边与错边的影响，这导致单面打底焊仅

通过调节工艺窗口很难稳定高效地保证焊根位置处于理想的熔透状态。

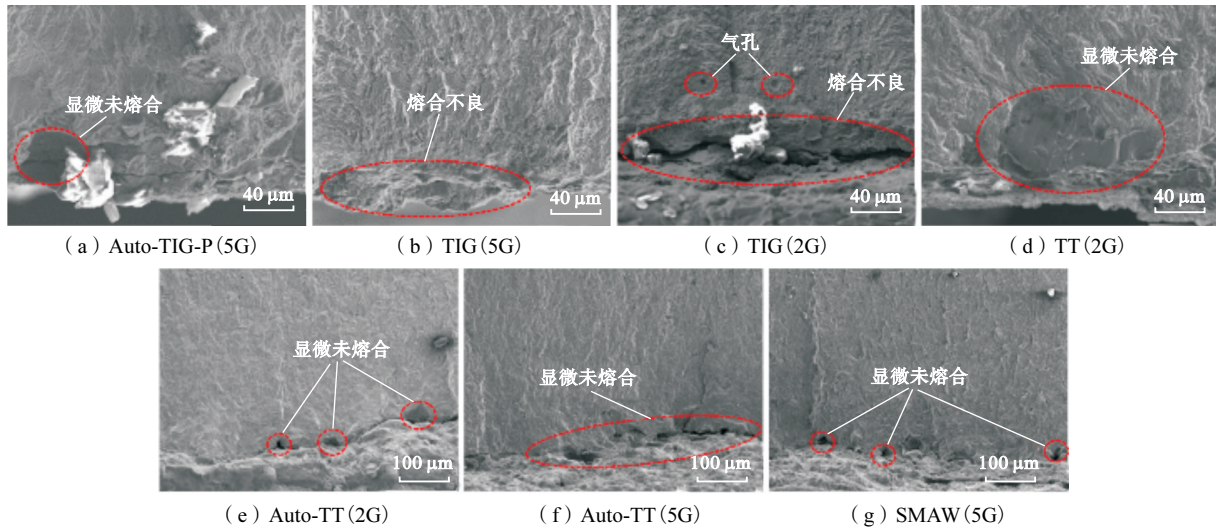


图 5 低疲劳寿命试样典型 SEM 形貌

Fig.5 Typical SEM morphology of specimens with low fatigue life

基于此，本文提出了采用 GMAW/GTAW-P 双面打底焊工艺来保证 SCR 立管焊缝的内壁成形质量：一方面，双面电弧可以分别从钝边两侧熔化一定尺寸的金属，增大了焊接工艺窗口，更有利于得到全熔透焊缝；另一方面，内壁的 TIG 自熔焊还能够有效地把错边熔化，保证内壁成形光滑，提高焊缝的疲劳性能；最后，采用该双面打底焊工艺时能够使用比单面

打底焊更大的热输入，也有利于内壁不出现淬硬的现象。

基于上述原理分析，本文对不同钝边尺寸 (1.5 mm, 2.0 mm, 2.5 mm) 和典型焊接位置 (1G, 3G, 4G) 进行了工艺探究试验以明确该双面打底焊工艺的成形情况，其接头截面成形如图 6 所示，内壁光滑，成形良好。

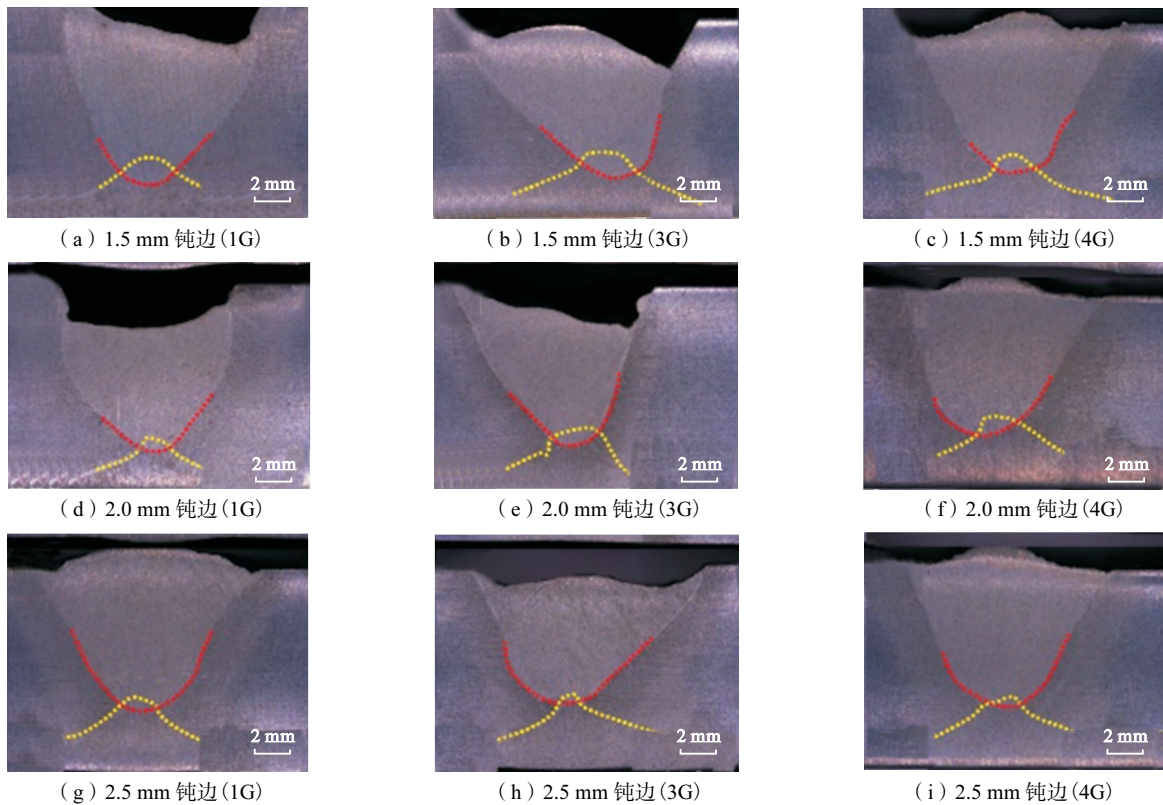


图 6 TIG 内壁自熔焊焊缝截面

Fig.6 Cross-sections of weld with TIG inner-wall self-fusion welding

焊根应力集中系数计算式<sup>[15]</sup>为

$$K_t^{\rho=r_{ref}} = 1 + \alpha_0 \left( \frac{\delta}{t_s} \right)^{\alpha_1} \left( \frac{r_{ref}}{t_s} \right)^{\alpha_2} \tan \left( \frac{\beta}{2} \right)^{\alpha_3} \quad (1)$$

式中:  $\delta$  为焊缝余高;  $\beta$  为焊根过渡角;  $t_s$  为试样厚度;  $\rho = r_{ref} = 1 \text{ mm}$ ; 其余参数为常量, 如表 6 所示。

表 6  $K_t^{\rho=r_{ref}}$  参数方程系数

Tab.6 Coefficients of parametric equation  $K_t^{\rho=r_{ref}}$

$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$
0.99	0.06	-0.34	0.59

单面打底焊工艺和 GMAW/GTAW-P 双面打底焊工艺下试样的焊根应力集中系数分别如表 7 和表 8 所示。

表 7 单面打底焊工艺下焊根应力集中系数

Tab.7 Stress concentration coefficients of the weld root with the single-sided root welding process

工艺	表面状态	应力集中系数
Auto-TIG-P (2G)	打磨焊缝	1.72
TIG (5G)	原始表面	1.98
TIG (2G)	原始表面	2.23
TT (2G)	原始表面	2.21
Auto-TT (5G)	打磨焊缝	1.69
Auto-TT (2G)	打磨焊缝	1.71
SMAW (5G)	打磨焊缝	2.50
STT (5G)	打磨焊缝	2.52
CMT (2G)	打磨焊缝	1.66
CMT (5G)	打磨焊缝	1.70

表 8 双面打底焊工艺下焊根应力集中系数

Tab.8 Stress concentration coefficients of the weld root with the double-sided root welding process

钝边尺寸/mm	焊接位置	表面状态	应力集中系数
1.5	1G	打磨焊缝	1.19
	3G	原始表面	1.19
	4G	原始表面	1.00
2.0	1G	原始表面	1.00
	3G	打磨焊缝	1.00
	4G	打磨焊缝	1.10
2.5	1G	打磨焊缝	1.00
	3G	打磨焊缝	1.00
	4G	打磨焊缝	1.00

对比表 7 和表 8 可以发现, 双面打底焊工艺下焊根应力集中系数最大为 1.19, 远小于单面打底焊工艺下的最小应力集中系数 1.66, 表明双面打底焊工艺的成形效果更好。

同时, 试验发现 GMAW/GTAW-P 双面打底焊工艺下焊根余高尺寸可以限制在  $200 \mu\text{m}$  以内, 焊根过渡角  $\theta \leq 3^\circ$ , 焊根熔宽在  $6 \sim 8 \text{ mm}$ , 解决了焊根位置容易出现余高过大的问题。而且双面焊工艺基本不会出现单面打底焊中焊根位置容易出现的未熔合和未焊透等焊接缺陷。

此外, 双面打底焊工艺可以将钝边尺寸从传统  $0.5 \sim 1.6 \text{ mm}$  提升到  $1.5 \sim 2.5 \text{ mm}$ , 而钝边厚度较大时熔池偏移导致双面打底焊重合熔深减小。当采用  $1.5 \text{ mm}$  的钝边尺寸时, 双面打底焊重合熔深可以控制在  $0.5 \sim 1.0 \text{ mm}$ ; 当采用  $2.0 \text{ mm}$  的钝边尺寸时, 双面打底焊重合熔深可以控制在  $0.3 \sim 0.5 \text{ mm}$ ; 当采用  $2.5 \text{ mm}$  的钝边尺寸时, 双面打底焊重合熔深可以控制在  $0.2 \sim 0.5 \text{ mm}$ 。采用  $1.5 \text{ mm}$  的钝边尺寸进行焊接并测试其疲劳性能, 结果表明试样的疲劳寿命超过了  $1 \times 10^7$  周次。

钝边尺寸的增大也解决了传统单面打底焊工艺下钝边量过小引起的对中困难问题, 避免 SCR 立管打底焊因为错边导致的焊根成形不良问题。最后, 单面打底焊过程中容易因为错边导致的上错一侧过度熔透, 导致该侧形成很大的焊根角度, 而双面打底焊内壁的 TIG 焊工艺对于小尺寸的错边量 ( $100 \sim 200 \mu\text{m}$ ) 也具有很好的成形效果, 如图 7 所示。该工艺有效地从工程应用角度上解决了传统单面打底焊工艺下焊根成形不良的问题。

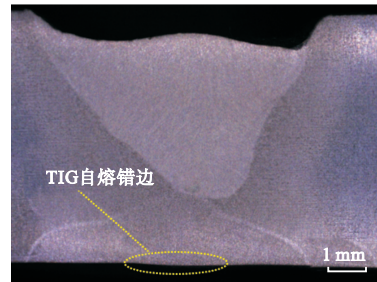


图 7 TIG 内壁打底对于错边的修熔截面图  
Fig.7 Cross-section of welded joint showing correction of defective side through the TIG inner-wall root welding process

### 3 结 论

(1) 通过对比研究 CMT/STT 与常用的几种单面打底焊工艺发现, 单面打底焊工艺下焊根成形不稳定, 容易出现未焊透、未熔合或过熔透而导致的焊趾角度过大的问题, 这些问题使得焊根位置容易产生应力集中, 成为限制 SCR 立管高疲劳寿命的关键因素。

(2) 提出了一种熔化极气体保护焊/脉冲钨极氩弧焊 (GMAW/GTAW-P) 双面打底焊工艺。该工艺适用的钝边尺寸为  $1.5 \sim 2.5 \text{ mm}$ , 内壁余高可以控制在  $200 \mu\text{m}$  以下, 焊根过渡角  $\leq 3^\circ$ , 焊根熔宽为  $6 \sim 8 \text{ mm}$ , 重合熔深为  $0.2 \sim 1.0 \text{ mm}$ 。该工艺为打破国外技术的垄断、开发国产化高疲劳寿命的 SCR 立管打

底焊工艺提供了一种新思路。

### 参考文献:

- [1] Li M J, Duan M L, Yu F F, et al. Model test investigation on a J-lay system designed for deepwater pipeline installation in South China Sea[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2012, 138/139: 484-491.
- [2] 张丽娜. 南海争议海域油气资源共同开发探析[J]. *海南大学学报(人文社会科学版)*, 2015, 33(6): 8-14.  
Zhang Lina. On joint development of oil and gas resources in disputed waters of South China Sea[J]. *Journal of Hainan University(Humanities & Social Sciences)*, 2015, 33(6): 8-14(in Chinese).
- [3] 李清平, 孙 钦, 程 兵, 等. 陵水 17-2 气田深水水下生产系统工程设计关键技术[J]. *中国海上油气*, 2021, 33(3): 180-188.  
Li Qingping, Sun Qin, Cheng Bing, et al. Key technologies for engineering design of deepwater subsea production system in LS17-2 gas field[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2021, 33(3): 180-188(in Chinese).
- [4] 贾 旭, 贾鲁生, 黄 俊, 等. “深海一号”能源站钢悬链立管总体方案研究[J]. *中国海上油气*, 2021, 33(5): 165-174.  
Jia Xu, Jia Lusheng, Huang Jun, et al. Research on overall design of steel catenary riser for “Deep Sea No. 1” energy station[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2021, 33(5): 165-174(in Chinese).
- [5] Jhingran V, Zhang H P, Lie H, et al. Buoyancy spacing implications for fatigue damage due to vortex-induced vibrations on a steel lazy wave riser(SLWR) [C]//Offshore Technology Conference. Houston, USA, 2012: OTC-23672-MS.
- [6] 康 庄, 李 辉, 孙丽萍, 等. 自由站立式立管总体运动疲劳分析[J]. *海洋工程*, 2011, 29(4): 43-50.  
Kang Zhuang, Li Hui, Sun Liping, et al. Free standing hybrid riser global motion fatigue analysis[J]. *The Ocean Engineering*, 2011, 29(4): 43-50(in Chinese).
- [7] 王 震, 程方杰, 张彦燊, 等. 错边对钢悬链立管横焊接头疲劳性能的影响[J]. *焊接学报*, 2019, 40(3): 123-127, 166.  
Wang Zhen, Cheng Fangjie, Zhang Yanshen, et al. Effect of misalignment on fatigue performance of horizontal welded joints in steel catenary riser system[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(3): 123-127, 166(in Chinese).
- [8] 王 震. X65 钢悬链立管环缝窄间隙 TIG 焊接工艺及接头力学性能研究[D]. 天津: 天津大学材料科学与工程学院, 2018.  
Wang Zhen. Study on Welding Procedure and Mechanical Properties of the X65 Steel Catenary Riser Girth Joints by Narrow-Gap TIG Welding[D]. Tianjin: School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, 2018(in Chinese).
- [9] Jeong J W, Kim I S, Kim W S, et al. A study on optimized technology for an automatic root-pass welding of girth weldment in pipeline[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2011, 1315(1): 813-818.
- [10] 胡艳华, 牛虎理, 刘 剑, 等. 全尺寸疲劳试件疲劳断口分析[J]. *石油工程建设*, 2019, 45(3): 48-51.  
Hu Yanhua, Niu Huli, Liu Jian, et al. Fatigue fracture analysis of full-scale specimen for fatigue test[J]. *Petroleum Engineering Construction*, 2019, 45(3): 48-51(in Chinese).
- [11] 周灿丰, 焦向东, 曹 静, 等. 海洋深水立管环缝疲劳性能研究现状及建议[J]. *焊接*, 2011(4): 5-10, 69.  
Zhou Canfeng, Jiao Xiangdong, Cao Jing, et al. Investigation of fatigue performance of girth weld in deepwater riser pipe[J]. *Welding & Joining*, 2011(4): 5-10, 69(in Chinese).
- [12] Maddox S J, Speck J B, Razmjoo G R. An investigation of the fatigue performance of riser girth welds[J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2008, 130(1): 011007-011017.
- [13] Zhang Y H, Maddox S J. Fatigue testing of full scale girth welded pipes under variable amplitude loading[J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2014, 136(2): 021401-021410.
- [14] 许可望, 刘永贞, 栾陈杰, 等. 深水 SCR X65 管线钢环缝无衬垫全自动 GMAW 焊接接头疲劳行为[J]. *中国海洋平台*, 2019, 34(1): 96-100.  
Xu Kewang, Liu Yongzhen, Luan Chenjie, et al. Fatigue behavior of girth joint of X65 pipeline steel by full automatic gas metal arc welding without backing in deepwater SCR riser[J]. *China Offshore Platform*, 2019, 34(1): 96-100(in Chinese).
- [15] Pachoud A J, Manso P A, Schleiss A J. New parametric equations to estimate notch stress concentration factors at butt welded joints modeling the weld profile with splines [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2017, 72: 11-24.

(责任编辑: 田 军)