

# 超声冲击处理改善 X80 管线钢环焊缝 接头疲劳性能研究

张艳芳<sup>1</sup>, 王东坡<sup>2</sup>, 董磊磊<sup>3</sup>

(1. 海洋石油工程股份有限公司, 天津 300461; 2. 天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300350; 3. 大连理工大学 船舶工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** **目的** 验证超声冲击处理 (UIT) 对 X80 钢管环缝焊接接头疲劳性能的延寿效果。**方法** 分别开展 X80 管线钢 GMAW 自动焊环缝超声冲击前后的疲劳试验, 根据国际焊接学会 (IIW) 的规范处理试验数据, 并对结果进行对比。**结果** 稳定地控制管道内壁焊根区域的显微未熔合等焊接缺陷, 是保证 X80 管线钢环焊缝具有优异抗疲劳性能的关键延寿途径之一。采用最大应力固定为屈服强度+全厚度小尺寸试件的焊接接头疲劳试验方法能够替代足尺寸或全尺寸焊接结构疲劳试验, 也适用于评价超声冲击处理焊接接头的疲劳性能。在严格控制错边量的前提下, X80 管线钢 GMAW 环缝可以达到 BS7608 D 级设计曲线要求。**结论** 超声冲击处理可以显著提高 X80 管线钢环缝接头的疲劳性能, 大约延长疲劳寿命 4~10 倍左右。

**关键词:** X80 管线钢; 超声冲击处理; 疲劳寿命; 环焊缝接头; 残余应力; 疲劳试验; S-N 曲线

中图分类号: TG172

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)06-0092-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.06.012

## Fatigue Performance Improvement of X80 Pipeline Steel Girth Weld Joints by Ultrasonic Impact Treatment

ZHANG Yan-fang<sup>1</sup>, WANG Dong-po<sup>2</sup>, DONG Lei-lei<sup>3</sup>

(1. Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 3. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**ABSTRACT:** The work aims to verify the effect of ultrasonic impact treatment (UIT) on the fatigue performance of X80 steel pipe girth weld joints. To this end, fatigue tests with and without UIT for GMAW automatic girth welds of X80 pipeline steel were performed. The test data were processed following IIW's recommendations, and the results were compared. The test results showed that: stable control of welding defects such as microscopic lack of fusion in the weld root area of the pipeline's inner wall was one of the key life-extension methods to ensure that the X80 pipeline steel girth weld had an excellent fatigue per-

收稿日期: 2023-04-15; 修订日期: 2023-06-10

Received: 2023-04-15; Revised: 2023-06-10

作者简介: 张艳芳 (1969—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为海洋工程结构设计、建造和安装。

**Biography:** ZHANG Yan-fang (1969-), Male, Senior engineer, Research focus: structural design, construction and installation of ocean engineering.

通讯作者: 董磊磊 (1985—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为海洋立管设计分析。

**Corresponding author:** DONG Lei-lei (1985-), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: design and analysis of marine risers.

引文格式: 张艳芳, 王东坡, 董磊磊. 超声冲击处理改善 X80 管线钢环焊缝接头疲劳性能研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(6): 092-097.

ZHANG Yan-fang, WANG Dong-po, DONG Lei-lei. Fatigue Performance Improvement of X80 Pipeline Steel Girth Weld Joints by Ultrasonic Impact Treatment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(6): 092-097.

formance; The adopted fatigue test method for welded joints with the maximum stress being the yield strength combined with small-sized but full-thickness specimens can replace the fatigue test of full-scale or real-scale specimens, and was also suitable for evaluating the fatigue performance of ultrasonic impact treated welded joints; With a strict control of error variables, the GMAW girth welds of X80 pipeline steel could meet the requirements of level-D design curve of the BS7608 guide. Based on this study, it's concluded that the UIT technique can significantly improve the fatigue performance of X80 pipeline steel ring seam joints, with the fatigue life extended by about 4 to 10 times.

**KEY WORDS:** X80 pipeline steel; ultrasonic impact treatment; fatigue life; girth weld joint; residual stress; fatigue test; S-N curve

X80 管线钢因其具有很高的强度与优异的焊接性, 常用于深海浮式 TLP 平台关键部件张力腿或深海采矿系统输送提升管道制造。为了保证其在服役期间不发生脆性破坏事故, 不仅要求环焊缝接头具有良好的抗裂性与断裂韧性, 而且还对其疲劳性能提出非常高的要求, 以适应 TLP 平台张力腿<sup>[1-3]</sup>或深海采矿系统提升管道<sup>[4-5]</sup>在长期服役过程中所承受的因风、浪、流而引发的数以亿次计的交变环境载荷的苛刻作用。由于焊接过程中加热不均和快速冷却, 不可避免地产生高值焊接残余应力, 以及气孔、夹渣等焊接缺陷, 同时也会产生盖面与根部成形不良、错边等几何制造偏差, 从而造成较为严重的结构性和缺口性应力集中, 导致管道环焊缝的疲劳寿命大幅度降低, 以致环缝过早失效而造成难以想象的灾难性后果<sup>[6-7]</sup>。因此, 为了改善环焊缝接头的疲劳性能, 有必要对接头表面进行强化处理来延长结构的使用寿命。

超声波冲击处理 (Ultrasonic Impact Treatment, UIT) 是国内外应用较广的表面强化处理方法之一。UIT 技术通过引入压应力、有效降低或消除接头焊趾表面的有害残余拉应力、减小焊趾应力集中来提高焊接结构或部件的服役寿命与安全可靠性, 是一种有效改善焊接接头抗疲劳、抗应力腐蚀的重要方法<sup>[8-9]</sup>。Roy 等<sup>[10]</sup>对 18 个全尺寸 W27×129H 型钢材进行了超声冲击处理, 试验结果表明, UIT 通过改善焊趾形状、改变微观结构和引入有益的压缩残余应力, 提高了试件的疲劳性能。该技术在不变 S-N 曲线斜率的情况下, 有效提高了疲劳裂纹生长阈值和疲劳极限。Alalkawi 等<sup>[11]</sup>对 2017-T4 铝合金开展了超声冲击处理试验, 结果表明, 在经过  $10^7$  次疲劳循环后, 试件的疲劳强度提高了 4.16%, 疲劳寿命提高了 24%。

目前国内外对 X80 管线钢的研究主要围绕改善环焊工艺和分析合金元素对环焊缝区域显微组织的影响机制<sup>[12-13]</sup>, 但从表面局部强化和消除残余应力的角度出发, 利用 UIT 技术改善 X80 管线钢环焊缝接头疲劳性能的研究相对较少, 极少数的研究<sup>[14]</sup>也未考虑显微未熔合缺陷和错边量对试件疲劳性能的影响。由此可见, 针对 TLP 平台张力腿及深海采矿输送提升管道系统, 开展 UIT 处理 X80 管线钢环焊缝接头疲劳延寿实施效果的研究具有巨大的实用价值和应用前景。

鉴于此, 本文采用 UIT 处理了 X80 管线钢 GMAW 环缝, 测试了 X80 钢管焊接接头在处理前后的疲劳性能, 试图验证 UIT 对 X80 钢管环缝焊接接头疲劳性能的延寿效果, 并对 UIT 能否用于 TLP 平台张力腿或深海采矿输送提升管道环缝的疲劳延寿进行了探讨。

## 1 试验

### 1.1 材料

本文采用 X80 管线钢 (其化学组成见表 1), 同时选用 X80 管线钢 GMAW 自动焊常用的美国林肯电器公司产品 80Ni1 (AWS ER80S-Ni-1) 气保护实芯焊丝作为环焊缝试验的匹配焊材。该焊丝焊接时电弧稳定, 发尘少, 焊后熔渣少, 脱渣容易, 且具有优良的力学性能<sup>[15]</sup>, 化学成分见表 2。

### 1.2 环缝焊接试验

为了研究 UIT 提高 X80 管线钢环焊缝疲劳性能的实施效果, 本文采用 GMAW 工艺方法<sup>[16-17]</sup>焊接了

表 1 X80 管线钢的化学成分 (质量分数, %)

Tab.1 Chemical composition of X80 pipeline steel (mass fraction, %)

Si	Mn	Al	Nb	V	Ni	Gr	Mo	Ti	Cu	C
0.31	1.76	0.058	0.079	0.008	0.225	0.023	0.026	0.015	0.025	0.061

表 2 ER80S-Ni-1 气保护实芯焊丝的化学成分 (质量分数, %)

Tab.2 Chemical composition of ER80S-Ni-1 gas shielded solid wire (mass fraction, %)

C	Si	Mn	S	P	Ni	Gr	Mo	V	Ti	Cu
0.075	0.57	1.08	0.008	0.003	0.935	0.032	0.015	0.010	0.027	0.022

壁厚为 21.4 mm、直径为 1 016 mm 及错边量控制在 0.5 mm 以内的 X80 管线钢环焊缝管节,进行了 2 组原始焊态与超声冲击处理态的对比疲劳试验。所采用的焊接工艺参数见表 3。

### 1.3 超声波冲击处理

本文采用 UIT-500 全波长 UIT 设备实施处理,设备如图 1 所示。鉴于 X80 管线钢具有较高的屈服强度,需要采用高能量冲击处理参数,因此本文采用的

超声波冲击处理参数:频率为 17.9 kHz,振幅为 35  $\mu\text{m}$ ,单根冲击针,直径为 4 mm,处理过程移动速度为 150~300 mm/min,处理 2~3 遍,同时冲击枪沿试板焊缝长度方向适当做一定幅度往复处理。

依据 GB/T 33163《金属材料残余应力超声冲击消除处理方法》<sup>[18]</sup>的相关规定,在处理过程中将超声冲击枪与待处理试板之间的角度始终保持在 40°~60°,并进行一定范围摆动,彻底消除原始焊趾痕迹,保证 UIT 疲劳延寿的实施效果。

表 3 X80 管线钢 GMAW 自动焊环缝焊接工艺参数

Tab.3 Welding parameters of X80 pipeline steel GMAW automatic girth welds

焊道层数	焊丝牌号	焊接方向	层温/°C	电流/A	电压/V	送丝速度/(cm·min <sup>-1</sup> )	焊接速度/(cm·min <sup>-1</sup> )	摆动宽度/mm	干伸长度/mm	气体流量/(L·min <sup>-1</sup> )
封底 STT	ER70 S-6	向下	98	136	17.3	135	20	/	11	22
热焊	80Ni1	向上	101	159	21.3	240	19	4.5	12	25
填 1	80Ni1	向上	97	169	21.9	240	17	5.5	12	25
填 2	80Ni1	向上	96	172	22.3	250	17	8.5	11	25
填 3	80Ni1	向上	102	176	22.2	260	18	11.5	12	25
填 4	80Ni1	向上	98	174	22.1	260	16	12.5	11	25
填 5-1	80Ni1	向上	95	171	22.0	250	19	5.0	12	25
填 5-2	80Ni1	向上	96	167	21.8	250	19	5.0	11	25
填 6-1	80Ni1	向上	93	162	21.4	240	18	7.0	11	25
填 6-2	80Ni1	向上	95	165	21.5	240	17	7.0	12	25



图 1 UIT-500 全波长超声冲击设备

Fig.1 UIT-500 full-wavelength ultrasonic impact device

### 1.4 疲劳试验

本文在疲劳试验过程中采用的最大应力  $\sigma_{\max}$  恒等于 X80 母材的名义屈服强度 555 MPa。UIT 处理前后焊接接头的疲劳试验在 300 kN 的高频疲劳试验机 GPS300 上进行,载荷类型为轴向拉伸载荷。其中,应力范围  $\Delta\sigma$  分别为 270、240、200、175、150、135、100 MPa。疲劳试样采用全厚度小尺寸试样,试样尺寸如图 2 所示。

### 1.5 疲劳试验数据统计方法

本文按照国际焊接学会文件(XIII-1539-96/XV-845-96: 2016, Recommendations on Fatigue Design of Welded Joints and Components)规定的统计方法对疲

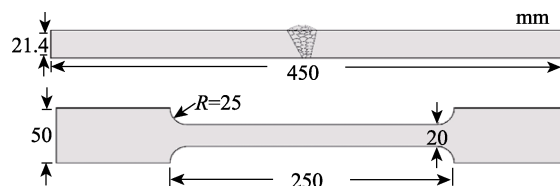


图 2 焊接接头疲劳试样尺寸

Fig.2 Fatigue test specimen size of welded joints

劳数据进行处理分析。首先计算所有疲劳试验数据点的应力范围 ( $\Delta\sigma$ ),以及循环周次 ( $N$ ) 以 10 为底的对数值。然后以  $\Delta\sigma$  为纵坐标,  $N$  为横坐标,绘制  $S-N$  曲线。采用幂函数拟合计算  $S-N$  曲线的斜率  $m$  和常数  $\lg C$  值,见式 (1)。基于公式 (2)、(3),计算得到平均值  $C_m$  和标准偏差 ( $\delta_{\text{stdv}}$ );根据公式 (2)~(4) 计算特征值  $C_k$ ;根据公式 (1)、(2) 计算平均疲劳强度  $\Delta\sigma_m$  和特征疲劳强度  $\Delta\sigma_k$  (FAT)。对于当循环次数达到  $10^7$  次仍未发生断裂的试样,其疲劳数据不纳入后续数据分析处理。

疲劳数据统计方法的前提是首先假设疲劳试验结果符合对数正态分布,然后用斜率为  $m$  且分别对应  $K$  倍正负标准差的 2 条标称  $S-N$  曲线形成一数据分散带 ( $K$  为特征值),指定的存活概率为 95%,置信度为 95%。

标称值通过下述过程计算:

1) 计算所有疲劳试验数据点的应力范围  $\Delta\sigma$  以及循环周次  $N$  以 10 为底的对数值。

2) 采用幂函数模型回归计算指数  $m$  和常数  $\lg C$  值:  
 $m \lg \Delta\sigma + \lg N = \lg C$  (1)

3) 设  $C_i$  是试验数据的对数值, 利用所获得的  $m$  值, 计算  $\lg C$  平均值  $C_m$  和标准偏差  $\delta_{stdv}$ :

$$C_m = \frac{\sum C_i}{n} \quad (2)$$

$$\delta_{stdv} = \frac{\sqrt{\sum (C_m - C_i)^2}}{n-1} \quad (3)$$

4) 计算特征值  $C_k$ :

$$C_k = C_m - K \cdot \delta_{stdv} \quad (4)$$

## 2 结果和讨论

X80 管线钢 GMAW 环焊缝原始焊态试件的疲劳试验结果见表 4; 超声冲击处理试件的疲劳试验结果见表 5; 原始焊态与超声波冲击处理焊接接头 50%与 95%存活率的  $S-N$  曲线对比如图 3 所示, 所拟合的  $S-N$  曲线参数见表 6。

原始焊态部分试件的疲劳裂纹起裂于焊趾, 而部分试件的疲劳裂纹起裂于焊根。起裂于焊根的试件, 一般疲劳寿命较短, 而起裂于焊趾的试件的疲劳寿命一般也较长。显而易见, 这种差异性可能与根部焊趾

表 4 X80 钢环缝原始焊态试件疲劳试验结果  
 Tab.4 Fatigue test results of X80 steel ring seam specimens of original weld state

试件编号	应力范围 $\Delta\sigma$ /MPa	循环次数 $N$	裂纹位置
1	270	238 453	焊趾
2	270	322 746	焊趾
3	270	203 275	焊根
4	240	357 643	焊根
5	240	497 658	焊趾
6	240	305 463	焊趾
7	200	543 567	焊趾
8	200	754 325	焊趾
9	200	403 289	焊根
10	175	647 865	焊根
11	175	1 143 561	焊趾
12	175	824 567	焊根
13	150	1 532 456	焊根
14	150	1 229 654	焊根
15	150	2 185 432	焊趾
16	135	2 564 345	焊趾
17	135	5 438 764	焊根
18	135	1 765 478	焊根
19	100	9 367 704	焊根
20	100	4 076 543	焊根
21	100	7 547 623	焊根

表 5 X80 钢环缝超声冲击态试件疲劳试验结果  
 Tab.5 Fatigue test results of X80 steel ring seam ultrasonic impact treated specimen

试件编号	应力范围 $\Delta\sigma$ /MPa	循环次数 $N$	裂纹位置
1	270	303 563	焊趾
2	270	249 876	焊趾
3	270	206 445	焊趾
4	240	437 865	焊趾
5	240	376 539	焊趾
6	240	298 743	焊根
7	200	694 376	焊根
8	200	1 267 307	焊趾
9	200	1 067 356	焊趾
10	175	963 204	焊根
11	175	1 894 563	焊趾
12	175	2 236 753	焊趾
13	150	3 438 467	焊趾
14	150	1 735 632	焊根
15	150	4 356 453	焊趾
16	135	3 332 743	焊根
17	135	10 236 753	未断
18	135	7 864 533	焊趾

表 6 X80 管线钢环缝接头  $S-N$  曲线参数  
 Tab.6 Parameters of  $S-N$  curves for X80 pipeline steel ring seam joints

$S-N$ 曲线类型	存活率/%	斜率	截距	标准差
原始焊态	50	3.37	13.6	0.15
	95		13.3	
超声冲击处理态	50	5.55	18.9	0.11
	95		18.7	

存在一定深度的显微未熔合缺陷有关。一旦未熔合缺陷存在 (尺寸过小, 无损检测无法检出), 将不可避免地缩短疲劳裂纹在超声冲击处理过程中产生的压缩应力场中的扩展路径长度, 进而影响其疲劳寿命。

经超声冲击处理后, 焊趾表面组织被细化, 应力集中减小, 拉应力被转变为压应力, 疲劳性能增强<sup>[19]</sup>。但管道环焊缝根部焊趾容易含有一定尺度的显微未熔合缺陷, 这可能是此类超声冲击处理试件裂纹起裂于根部焊趾时其疲劳寿命相比较低的主要原因。由此可见, 通过优化 GMAW 单面焊双面成形焊接工艺<sup>[20]</sup>, 稳定地控制管道内壁焊根区域的显微未熔合等焊接缺陷, 是保证 X80 管线钢环焊缝具有优异抗疲劳性能的关键延寿途径之一。

从图 3 可以看出, 对于具有较小错边量的 X80 管线钢原始焊态试件, 其 95%存活率的标称  $S-N$  曲线位于 BS7608<sup>[21]</sup> D 级设计曲线之上。当错边量小于或者等于 0.5 mm 时, 为较小错边范畴; 大于 0.5 mm 时, 为较大错边范畴<sup>[22]</sup>。过大的错边量会产生咬边等缺陷

和应力集中,从而导致疲劳性能下降。这说明试验中通过控制焊接工艺方法使错边量在较小错边范畴时,X80 管线钢 GMAW 环缝疲劳强度较高,其疲劳性能可以满足 BS7608 D 级设计曲线的相关要求。从图 3 还可知,经过超声冲击处理之后,X80 管线钢环缝接头的疲劳性能显著高于原始焊态试样。针对无错边原始焊态试件,超声冲击处理后,X80 管线钢环缝焊接接头的疲劳寿命可以延长 4~10 倍左右。

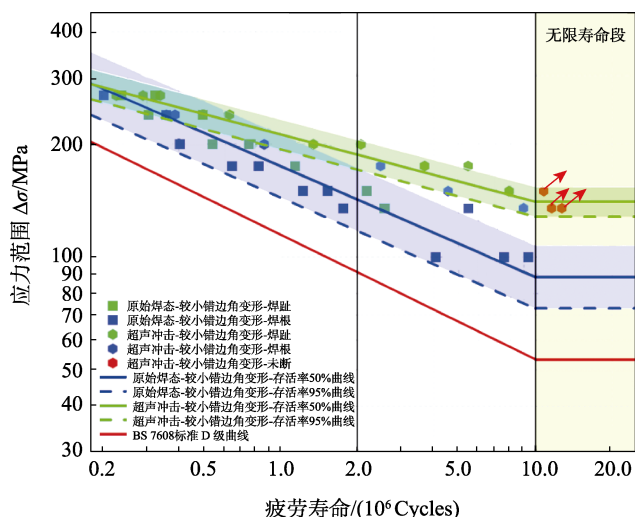


图 3 X80 管线钢环缝超声冲击处理试件疲劳性能对比  
Fig.3 Comparison of fatigue performance of X80 pipeline steel ring seam ultrasonic impact treated specimens

从表 6 可以看出,小错边量 X80 管线钢超声冲击处理态试件的  $S-N$  曲线的斜率  $m$  约为 5.55。这反映出相比常用的保持应力比  $R=0.5$  不变的疲劳试验方法,保持最大应力为屈服强度的疲劳试验方法获得的  $S-N$  曲线的斜率明显偏低,说明该方法用于评价超声冲击处理焊接接头的疲劳性能是较为适合的,这是因为这种方法科学地考虑了焊接残余应力对超声冲击处理接头疲劳性能影响的本质规律。相比高交变应力范围,当试验过程恒定最大应力为材料的屈服强度时,在交变荷载较低的情况下,通过外部施加更大静荷载的方式来反映此时焊接残余应力释放相对较少的客观事实,致使测试所获得的超声冲击处理焊接接头的  $S-N$  曲线的斜率较陡,即  $m$  值偏小,接近  $m=5$  左右。同时,经过超声冲击处理后的环焊缝接头,其残余拉应力被转变为有益的残余压应力,试件因此获得更高的疲劳性能<sup>[23-25]</sup>。

### 3 结论

本文开展了 X80 管线钢 GMAW 自动焊环缝超声冲击处理前后的疲劳对比试验,根据试验结果得出以下结论:

1) 验证了采用固定最大应力为屈服强度+全厚度小尺寸试件的焊接接头疲劳试验方法能够替代足尺

寸或全尺寸焊接结构疲劳试验,也适用于评价超声冲击处理焊接接头的疲劳性能。

2) UIT 可以显著提高 X80 管线钢环缝接头的疲劳性能,延长疲劳寿命 4~10 倍。稳定地控制管道内壁焊根区域的显微未熔合等焊接缺陷,是保证 X80 管线钢环焊缝具有优异抗疲劳性能的关键途径之一。

3) 较小错边量 X80 管线钢原始焊态试件的 95% 存活率标称  $S-N$  曲线位于 BS7608 D 级设计曲线之上,说明在严格控制错边量的前提下,X80 管线钢 GMAW 环缝可以达到 BS7608 D 级设计曲线的要求。

### 参考文献:

- [1] 鲍莹斌,李润培,顾永宁. 张力腿平台系索疲劳可靠性研究[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(1): 87-90.  
BAO Ying-bin, LI Run-pei, GU Yong-ning. Fatigue Reliability of Tension Leg Platform Tendons[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2000, 34(1): 87-90.
- [2] 徐伽南. 基于子模型技术的海洋张力腿平台结构疲劳分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.  
XU Jia-nan. Fatigue Analysis of Offshore Tension Leg Platform Structure Based on Submodel Technology[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [3] 余建星,刘杰,余杨,等. 基于累积损伤的张力腿平台疲劳及时变可靠性评估[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2016, 49(9): 896-901.  
YU Jian-xing, LIU Jie, YU Yang, et al. Fatigue Reliability and Time-Dependent Reliability Assessment on TLP Based on Cumulative Damage Theory[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2016, 49(9): 896-901.
- [4] 金国庆,邹丽,宗智,等. 深海采矿系统中悬臂式立管涡激振动分析[J]. 力学学报, 2022, 54(6): 1741-1754.  
JIN Guo-qing, ZOU Li, ZONG Zhi, et al. Analysis of vortex-Induced Vibration for a Cantilever Riser in a deep-Sea Mining System[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022, 54(6): 1741-1754.
- [5] 陈智昊,吕海宁,吴琪. 深海采矿系统长距离垂直输运管道力学性能研究[J]. 海洋工程, 2021, 39(1): 72-82.  
CHEN Zhi-hao, LV Hai-ning, WU Qi. Research on Mechanical Properties of Long-Distance Vertical Transportation Pipeline in Deep Sea Mining System[J]. The Ocean Engineering, 2021, 39(1): 72-82.
- [6] ISO 5817—2014, Welding—Fusion—Welded Joints in Steel, Nickel, Titanium and Their Alloys (Beam Welding Excluded)—Quality Levels for Imperfections[S].
- [7] HOBACHER A F. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components[M]. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [8] 高志伟. 腐蚀环境下焊接结构疲劳及延寿机理研究[D]. 天津市: 天津大学, 2022.  
GAO Zhi-wei. Study on Fatigue and Life Extension Mechanism of Welded Structures in Corrosive Environ-

- ment[D]. Tianjin: Tianjin University, 2022.
- [9] MARQUIS G B, BARSOUM Z. IIW Recommendations on High Frequency Mechanical Impact (HFMI) Treatment for Improving the Fatigue Strength of Welded Joints[M]. Singapore: Springer, 2016: 1-34.
- [10] ROY S, FISHER J W, YEN B T. Fatigue Resistance of Welded Details Enhanced by Ultrasonic Impact Treatment (UIT)[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25(9/10/11): 1239-1247.
- [11] ALALKAWI H J M, ALHAMDANY A A, ABDUL HASSAN M R. Investigation on Influence of Ultrasonic Impact Treatment (UIT) on Fatigue Life for Aluminium Alloy 2017-T4[J]. Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences, 2018, 21(1): 141.
- [12] HAN D, 齐丽华, 霍春勇, 等. 几种典型 X80 管线钢管及其环焊缝性能研究[J]. 石油管材与仪器, 2021, 7(2): 55-61.  
HAN D, QI Li-hua, HUO Chun-yong, et al. X80 Line Pipes with Several Typical Alloy Designs and Their Girth Welds[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2021, 7(2): 55-61.
- [13] 陈自振, 程义远, 李天伟, 等. X80 管线钢药芯焊丝气保护全自动焊缝性能研究[J]. 材料导报, 2022, 36(S2): 352-355.  
CHEN Zi-zhen, CHENG Yi-yuan, LI Tian-wei, et al. Study on Weld Performance of X80 Pipeline Steel Automatic Gas Shielded Welding with Flux Cored Wire[J]. Materials Reports, 2022, 36(S2): 352-355.
- [14] WANG Xue-li, WANG Dong-po. Microstructure and Mechanical Properties of Welded Joint of X80 Pipeline Steel before and after Ultrasonic Impact Treatment[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022, 31(2): 1465-1477.
- [15] 刘树新, 张少健, 韩海峰, 等. 无镀铜实心焊丝 TMS-80Ni1 的研制[J]. 焊接技术, 2018, 47(2): 67-70.  
LIU Shu-xin, ZHANG Shao-jian, HAN Hai-feng, et al. Development of Solid Welding Wire TMS-80Ni1 without Copper Plating[J]. Welding Technology, 2018, 47(2): 67-70.
- [16] 刘云龙. 焊工技师手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.  
LIU Yun-long. Welder Technician's Manual[M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [17] 周岐, 武晓峰, 王冠群. 电焊工操作技能: 彩图版[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.  
ZHOU Qi, WU Xiao-feng, WANG Guan-qun. Operation Skills of Welders: Color Chart Version[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [18] GB/T 33163—2016, 金属材料残余应力超声冲击处理法[S].  
GB/T 33163—2016, Metallic Materials—Residual Stress—With Ultrasonic Impact Treatment[S].
- [19] 王飞茹. 超声冲击处理对 X80 管线钢接头组织和力学性能的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2020.  
WANG Fei-ru. Effect of Ultrasonic Impact Treatment on Microstructure and Mechanical Properties in X80 Pipeline Steel Joints[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [20] 张远健. GMAW 立焊单面焊双面成形焊接技术[J]. 农机使用与维修, 2021(10): 42-43.  
ZHANG Yuan-jian. GMAW Vertical Welding Single Side Welding Double Side Forming Welding Technology[J]. Agricultural Machinery Using & Maintenance, 2021(10): 42-43.
- [21] BS 7608—1993, Guide to Fatigue Design and Assessment of Steel Products[S].
- [22] 刘春宁, 钮旭晶, 侯振国, 等. 不同错边量对 6005-T6 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接头疲劳性能的影响[J]. 轨道交通装备与技术, 2020(1): 41-43.  
LIU Chun-ning, NIU Xu-jing, HOU Zhen-guo, et al. Influence of Different Alignment Tolerance on Fatigue Strength of FSW Joint of 6005A-T6 Aluminum Alloy Fabricated with Double-Shouldered Probe[J]. Rail Transportation Equipment and Technology, 2020(1): 41-43.
- [23] OKAZAWA T, SHIMANUKI H, FUNATSU Y, et al. Effect of Preload and Stress Ratio on Fatigue Strength of Welded Joints Improved by Ultrasonic Impact Treatment[J]. Welding in the World, 2013, 57(2): 235-241.
- [24] AN X, RODOPOULOS C A, STATNIKOV E S, et al. Study of the Surface Nanocrystallization Induced by the Esonix Ultrasonic Impact Treatment on the Near-Surface of 2024-T351 Aluminum Alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2006, 15(3): 355-364.
- [25] JANOSCH J J. International Institute of Welding Work on Residual Stress and Its Application to Industry[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2008, 85(3): 183-190.

责任编辑: 刘世忠