

Reel-lay 铺设对机械式 双金属复合管性能的影响

刘孔忠¹, 熊 刚¹, 高光军², 张迪超², 闫振欣²

(1. 中海石油(中国)有限公司海南分公司, 海口 570311;

2. 西安向阳航天材料股份有限公司, 西安 710075)

摘要: 为了探究机械式双金属复合管进行 Reel-lay 海底管道铺设的可行性, 模拟 Reel-lay 铺管过程, 采用全尺寸静态弯曲试验机对 $\Phi 219.1 \text{ mm} \times (14.3+3.2) \text{ mm}$ L450Q+316L 机械式双金属复合管进行了循环弯曲试验。通过复合管弯曲应力应变测试, 证明本试验装置完全可以模拟复合管 Reel-lay 铺设过程的弯曲变形。同时, 对复合管弯曲前后的金相组织、拉伸性能、硬度和冲击性能进行检测, 结果表明 Reel-lay 铺设过程中弯曲变形对该管材的理化性能影响较小, 采用 Reel-lay 铺设方式是可行的。

关键词: 机械式复合管; Reel-lay 铺设; 弯曲; 起皱

中图分类号: TG115.54

文献标识码: A

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2023.02.011

Effect of Reel-lay Laying on Mechanical Bimetallic Composite Pipe

LIU Kongzhong¹, XIONG Gang¹, GAO Guangjun², ZHANG Dichao², YAN Zhenxin²

(1. China National Offshore Oil Corporation (CNOOC), Hainan Branch, Haikou 570311, China;

2. Xi'an Sunward Aeromat Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: In order to explore the feasibility of mechanical bimetallic composite pipe for Reel-lay submarine pipeline laying, the cyclic bending test of $\Phi 219.1 \text{ mm} \times (14.3+3.2) \text{ mm}$ L450Q + 316L mechanical bimetallic composite pipe was carried out using full-size static bending testing machine to simulate the Reel-lay laying process. Through the stress-strain test of the bending of the composite pipe, it is proved that the experimental device and method can fully simulate the bending deformation of the actual Reel-lay laying process during the test. Meanwhile, through the test of the microstructure, tensile property, hardness and impact property of the composite pipe and butt weld before and after bending, it is shown that it has little influence on the performance of the mechanical composite pipe. The results show that the Reel-lay method is feasible for the mechanical bimetallic composite pipe.

Key words: mechanical composite pipe; Reel-lay laying; bend; wrinkle

1 概 述

在海洋油气田开发中, CO_2 和 H_2S 腐蚀问题一直威胁着海底管道的安全运行, 给海洋石油开发带来极大的风险^[1]。机械式复合管以良好的抗腐蚀性能和高性价比成为海洋石油管道的首选。海底管道铺设 S-lay、J-lay 和 Reel-lay 三种方式, 其中, Reel-lay 铺设速度最快, 受天气因素影响较小, 应

用水深无限制, 能够大大减少时间和人力成本^[2-7]。Reel-lay 铺管是将成品管道连接成一根长管, 将其缠绕到铺管船的卷筒上, 与矫直器、张紧器和对中器等机构连接, 待船行驶至指定位置, 驱动卷筒开卷, 在海上展开矫直后将管道连续铺入海底^[8-9]。Reel-lay 铺设过程如图 1 所示, 在这个过程中, 机械式双金属复合管道会经历两次不同方向的弯曲, 易造成管道基/衬结合面分离, 产生褶皱^[10]。

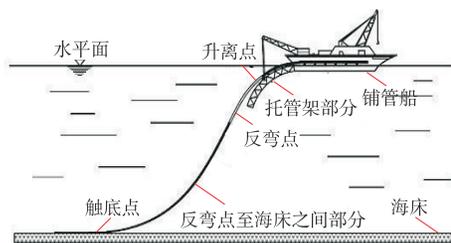


图1 海底管道 Reel-lay 铺设示意图

为了研究 Reel-lay 铺设弯曲过程对复合管内衬层起皱的影响，以 $\Phi 219.1 \text{ mm} \times (14.3+3.2) \text{ mm}$ 机械复合管为对象，模拟管道实际铺设过程并进行全尺寸弯曲试验，探究机械式双金属复合管使用 Reel-lay 铺设方式的可行性。

2 试验材料及方法

2.1 试验材料

试验材料为 $\Phi 219.1 \text{ mm} \times (14.3+3.2) \text{ mm}$ 机械复合管，材质 L450Q+316L，管长 12 m 左右。1# 试样为没有对接焊缝的整管，2# 试样由两根 6 m 长的双金属复合短管对接而成。弯曲试验需在复合管前端连接一段碳钢管作为引管，再通过焊接与工装相连，如图 2 所示。



(a) 试样活动端及工装



(b) 试样弯曲前

图2 弯曲试验现场照片

2.2 试验装置

弯曲试验采用 TS-300 全尺寸静态弯曲试验机 (见图 3)，将复合管一端焊接在工装上 (活动

端)，另一端使用插销固定 (固定端)。动力机通过绞轮拉动活动端工装上的缆绳，在水平方向对试样施加载荷，随着活动端受力移动，缆绳施加的载荷方向也随之变动，并与试样活动端的方向逐渐趋近；调整动力机方向，缆绳反向拉动工装，试样反向弯曲矫直，在一组循环载荷作用下，试样在水平方向往复运动。

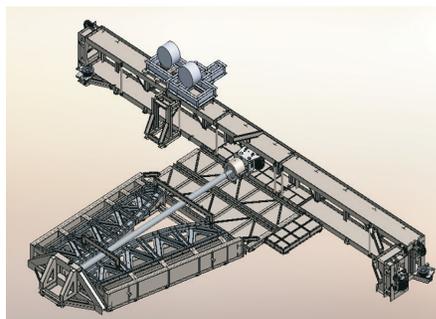


图3 弯曲试验机示意图

2.3 试验数据采集

2.3.1 应变值采集

在试样有效弯曲段的外弧和内弧位置分别采集记录 6 组应力、应变数据，每组采集应变片间距约 100 mm，1# 试样以距离固定端 7 m 处为原点向两侧对称排列，2# 试样以环焊缝为原点向两侧对称排列，每一根样管采集 12 处，共 24 组数据。

2.3.2 内窥镜数据采集

试样弯曲分为三个阶段，即复合管与弯曲模具贴合、复合管回复到初始位置、复合管与矫直模具贴合，使用内窥镜在试样弯曲的每个阶段对复合管内表面进行全方位检查并记录相关数据。

3 试验结果及讨论

3.1 试验模型

每次弯曲循环运动包括 1 次正向弯曲和 1 次反向矫直，各进行 5 次弯曲循环。弯曲靠模 $R=9\ 000 \text{ mm}$ ，矫直靠模 $R=22\ 860 \text{ mm}$ 。模拟管道实际铺设过程，复合管的弯曲直径是 19.5 m，矫直直径是 79.039 m。根据理论计算，复合管的实际弯曲应变 ε_1 和矫直应变 ε_2 分别为

$$\varepsilon_1 = \frac{219.1}{219.1 + 19500} \approx 0.011111 \quad (1)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{219.1}{219.1 + 79039} \approx 0.002764 \quad (2)$$

试验模型的弯曲应变 ε_1' 和矫直应变 ε_2' 分别为

$$\varepsilon_1' = \frac{219.1}{219.1 + 18000} \approx 0.012026 \quad (3)$$

$$\varepsilon_2' = \frac{219.1}{219.1 + 45720} \approx 0.004769 \quad (4)$$

由公式(1)~(4)可看出, 试验模型的弯曲应变值和矫直应变值均大于理论计算值, 表明试验过程完全可以模拟实际铺设过程的弯曲变形。

3.2 试验结果

3.2.1 内窥镜检测和应力应变

1#和2#试样各自经过5次弯曲循环后, 在管内壁中部(离铰轴6~8 m)的弯曲程度最高, 与模具贴合最紧, 通过内窥镜观察1#和2#试样内壁均未出现起皱、鼓包(见图4), 矫直归零后1#



图4 试样内壁内窥镜观察照片



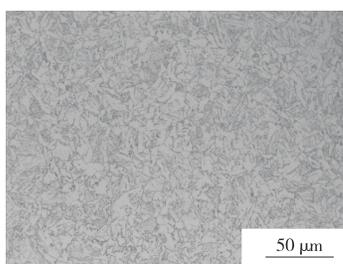
图5 矫直后的复合管

和2#试样均有不同程度的弯曲(见图5)。记录的应变值显示弯曲时最大的应变值在0.011左右, 矫直时的应变在0.003~0.004, 满足铺设过程的应变值要求。结果表明, 试验时复合管的变形程度超过了实际铺设过程的弯曲变形程度, 本试验完全可以模拟实际铺设过程的弯曲变形。

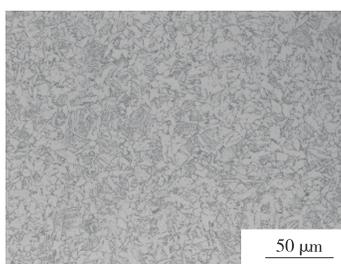
3.2.2 理化性能

3.2.2.1 微观组织

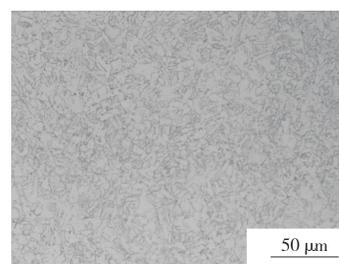
弯曲试验前后试样管体的显微组织形貌如图6所示。由图6可以看出, 管体组织形貌均为铁素体+珠光体+贝氏体, 试验前后没有明显变化。



(a) 试验前微观组织形貌



(b) 试验后弯曲侧微观组织形貌



(c) 试验后矫直侧微观组织形貌

图6 弯曲试验前后管体微观组织形貌

3.2.2.2 硬度

试样在经过弯曲试验后, 其硬度检测结果见表1。由表1可以看出, 试验前后管体和环焊缝的硬度变化不大, 符合标准要求。

表1 弯曲试验前后试样硬度检测结果

| 项目 | 试验前硬度(HV ₁₀) | | 试验后硬度(HV ₁₀) | |
|------|--------------------------|---------|--------------------------|---------|
| | 管体 | 环焊缝 | 管体 | 环焊缝 |
| 1#试样 | 171~204 | - | 172~211 | - |
| 2#试样 | 171~204 | 176~255 | 176~218 | 180~261 |
| 标准要求 | - | - | ≤235 | ≤325 |

3.2.2.3 力学性能

试验前管体的屈服强度、抗拉强度、屈强比均值分别为499 MPa、610 MPa和0.82, 弯曲后试样的力学性能检测结果见表2。由表2可知, 试验前后复合管管体和环焊缝的力学性能基本相当。

3.2.2.4 冲击性能

试样在经过弯曲试验之后, 其冲击试验结果见表3。由表3可以看出, 弯曲试验后管体和环焊缝位置的冲击性能基本相当。弯曲试验前管体的冲击功平均值为325 J, 弯曲试验

后管体的冲击功平均值降低了约40 J, 完全符合标准要求。

表2 复合管弯曲后的力学性能

| 项目 | $R_{1.0.5}/\text{MPa}$ | R_m/MPa | 屈强比 |
|-----------|------------------------|------------------|------------|
| 1#试样 | 535 | 600 | 0.89 |
| | 500 | 605 | 0.82 |
| 2#试样(环焊缝) | 515 | 600 | 0.86 |
| | 530 | 625 | 0.85 |
| 标准要求 | ≥ 450 | ≥ 535 | ≤ 0.9 |

表3 复合管弯曲后的冲击功

| 项目 | $A_{kv}/\text{J}(-30\text{ }^\circ\text{C})$ | |
|-----------|--|-----------|
| | 单值 | 均值 |
| 1#试样 | 265、270、324 | 286 |
| 2#试样(环焊缝) | 249、262、313 | 275 |
| 标准要求 | ≥ 60 | ≥ 80 |

4 结 论

(1) 采用全尺寸静态弯曲试验机模拟管道 Reel-lay 铺设过程, 进行管道弯曲过程的应力、应变检测和计算。结果表明, 试验过程完全可以模拟实际铺设过程的弯曲变形。

(2) 通过5次循环弯曲试验, 管体内壁及对接环焊缝未出现裂纹和褶皱, 表明 $\Phi 219.1\text{ mm} \times (14.3+3.2)\text{ mm}$ L450Q+316L 机械复合管的抗弯曲性能满足 Reel-lay 铺设的要求。

(3) 弯曲试验后对样管进行理化性能检测, 复合管弯曲前后的力学性能和显微组织

没有明显的变化, 说明 Reel-lay 铺设过程中弯曲变形对该管材的理化性能影响较小, 采用 Reel-lay 铺设方式是可行的。

参考文献:

[1] 杜清松, 曾德智, 杨斌. 双金属复合管塑性成型有限元模拟[J]. 天然气工业, 2008, 28(9): 1-2.

[2] 李刚, 姜瑛, 张蓬菲. Reel-Lay 在铺设海底机械复合管中的应用[J]. 石油机械, 2018, 46(6): 48-51.

[3] 谭丁森, 张建勋, 秦庆华. 带环形焊缝双金属复合管屈曲失效研究[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(2): 154-161.

[4] 曾德智, 杨斌, 孙永兴. 双金属复合管液压成型有限元模拟与试验研究[J]. 钻采工艺, 2010, 33(6): 78-79.

[5] ESTEFEN S F. Collapse behaviour of intact and damaged deepwater pipelines and the influence of the reeling method of installation[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1999 (50): 99-114.

[6] 孙意卿, 贾旭. 海底管线铺设状态下的动力特性的有效数值方法[J]. 海洋工程, 1990, 8(3): 1-2.

[7] 李华军, 张燕飞, 郭崇晓. 基于四点弯曲法的机械式复合管弯曲性能研究[J]. 焊管, 2013, 36(1): 29-33.

[8] 冯现洪, 王文亮, 郑羽. 一种卷筒式铺管法计算分析技术[J]. 舰船科学技术, 2014, 36(4): 103-107, 113.

[9] 黄维平, 曹静, 张恩勇. 国外深水铺管方法与铺管船研究现状及发展趋势[J]. 海洋工程, 2011, 29(1): 135-142.

[10] 胡雪峰, 张燕飞, 魏帆. 机械式复合管弯曲性能分析[J]. 焊管, 2012, 35(11): 34-39.

作者简介: 刘孔忠 (1971—), 男, 教授级高工, 现从事海洋石油工程项目管理工作。

收稿日期: 2022-09-08

修改返回日期: 2022-10-31

编辑: 任永峰

