

引用格式:黄兆力,高光军,张迪超,等.聚合物增强双金属复合管的弯曲性能分析[J].热加工工艺,2024,53(11):116-120.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20240629
http://www.rjggy.net rjggy@vip.163.com

聚合物增强双金属复合管的弯曲性能分析

黄兆力¹, 高光军², 张迪超², 孙彦青², 牛 犇², 朱 烨²

(1. 中海石油(中国)有限公司海南分公司, 海南 海口 570100; 2. 西安向阳航天材料股份有限公司, 陕西 西安 710025)

摘 要:为了探究聚合物增强双金属复合管的抗弯性和抗鼓包性能,以规格为 $\phi 508 \text{ mm} \times (14.3+3) \text{ mm}$ 的复合管作为研究对象,通过仿真分析对比机械式复合管和聚合物增强双金属复合管的抗鼓包性能;并通过 4 点弯曲试验进行了验证。结果表明,模拟与试验结果规律一致,聚合物增强复合管弯曲半径的模拟值与试验值偏差仅为 0.4 m,模拟计算结果可靠。试验结果表明,在临界弯曲状态下,聚合物增强复合管的最大应变绝对值是机械式复合管的 2.56 倍,弯曲半径是机械式复合管的 0.39 倍;聚合物增强双金属复合管的抗弯能力比机械式复合管更强,性能更优,在海洋石油开发的过程中更具优势。

关键词:聚合物增强双金属复合管;四点弯曲;机械式复合管;应变;弯曲半径

中图分类号:TB331;TG113.25

文献标识码:A

文章编号:1001-3814(2024)11-0116-05

Analysis on Bending Properties of Polymer-Reinforced Bimetallic Composite Pipe

HUANG Zhaoli¹, GAO Guangjun², ZHANG Dichao², SUN Yanqing², NIU Ben², ZHU Ye²

(1. CNOOC China Limited, Hainan Branch, Haikou 570100, China; 2. Xi'an Sunward Aeromat Co., Ltd., Xi'an 710025, China)

Abstract:In order to explore the bending resistance and bulging resistance of polymer reinforced bimetallic composite pipe, the composite pipe with specification of $\phi 508 \text{ mm} \times (14.3+3) \text{ mm}$ was taken as research object, the anti-bulging performance of the mechanical composite pipe and polymer reinforced bimetallic composite pipe was compared through simulation analysis. And it was verified through a four-point bending test. The results show that the simulation and experimental results are consistent. The deviation between the simulation value and the experimental value of the polymer reinforced composite pipe is only 0.4 m, and the simulation calculation results are reliable. The results show that the absolute maximum strain of the polymer reinforced composite pipe is 2.56 times of that of the mechanical composite pipe, and the bending radius is 0.39 times of that of the mechanical composite pipe. The bending resistance of the polymer reinforced bimetallic composite pipe is stronger than that of the mechanical composite pipe, and the performance is more superior, which has more advantages in the process of offshore oil development.

Key words:polymer reinforced bimetallic composite pipe; four-point bending; mechanical composite pipe; strain; bending radius

近年来,随着外部环境的不稳定,保障油气资源的供应成为重点。由于前期油气田的大规模开采,新开发的油气田项目大多开采环境复杂,油气中含有的腐蚀性介质较多,传统的碳钢管已经不能满足要求。机械式双金属复合管是一种由衬管和基管经过机械过盈配合而制成的特殊管道,基管主要起承压

的作用,保证整体管道的各项力学性能,降低成本;衬管主要承担管道系统的耐腐蚀要求,提高管道的耐腐蚀性能。但是,双金属复合管通过基管和衬管的变形产生过盈配合而不是冶金结合,所以在弯曲工况下内衬层可能出现起皱现象,尤其在海洋等复杂环境中,由于海水的冲击和地壳运动,在使用过程中复合管会发生摆动或弯曲,导致内衬出现屈曲鼓包现象,从而影响管道的正常运输^[1-6]。

通过试验和理论分析,研究者认为机械式复合管结合强度越高,其最小弯曲半径越小,抗弯能力越强。因此,机械式复合管的结合强度是保证复合管内

收稿日期:2024-03-21

基金项目:西安市油气田用耐蚀复合材料及装备重点实验室基金项目(2024-H-ZDSYJX-0033)

作者简介:黄兆力(1991-),广西贺州人,工程师,现从事海管建造和安装工作的研究;E-mail:2494166328@qq.com

衬完整性的主要因素之一。在控制成本和性价比的情况下,聚合物增强双金属复合管通过在结合界面涂覆特殊粘结剂,增加复合管的结合强度,以增强复合管的抗弯能力^[7]。

本文采用规格为 $\phi 508 \text{ mm} \times (14.3+3) \text{ mm}$ 的复合管作为研究对象,对机械式和聚合物增强两种不同结合工艺的双金属复合管在临界弯曲工况和弯曲工况下进行有限元仿真计算,对比两种复合管的表现,得出可靠性分析结果。然后使用四点弯曲法进行试验,验证有限元计算的结果,从而证明聚合物增强复合管在海洋石油开发中应用的可行性,对双金属复合管在海洋等复杂环境下的应用有重要意义。

1 有限元仿真模拟

1.1 计算说明

1.1.1 仿真内容

(1) 临界弯曲工况:对传统的机械式双金属复合管和聚合物增强双金属复合管进行临界弯曲起皱过程的仿真计算,考虑实际情况合理引入工艺缺陷(如基管内壁凹坑、基衬夹杂等),计算缺陷对鼓包效应的影响。

(2) 弯曲工况:对同一曲率的机械式复合管和聚合物增强复合管分别进行计算,对比两种复合管的强度;考虑实际情况引入轴向拉力,计算弯曲曲率和轴向拉力对复合管在弯曲变形过程中的影响。

1.1.2 材料参数

采用规格为 $\phi 508 \text{ mm} \times (14.3+3) \text{ mm}$ 的复合管作为研究对象,具体参数如表 1 所示。

表 1 复合管参数
Tab.1 Parameters of the composite pipe

部件	材料	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	规格
衬管	625 不锈钢	414	827	内径 473.4 mm, 外径 479.4 mm, 长 12 m, 厚 3 mm
基管	X65 碳钢	450	530	内径 479.4 mm, 外径 508 mm, 长 12 m, 厚 14.3 mm

1.1.3 建模基本思想

根据工况描述,机械式复合管考虑衬管外表面向基管内表面的过盈配合挤压,过盈配合量 0.01 mm,聚合物增强复合管考虑为衬管和基管界面的绑定连接。此外,管材长度较长,若不涉及弯曲,与径向和周向应变相比,轴向应变可以忽略不计,因此将复合管的液压胀形问题简化为平面应变问题进行研究,极大地节约了计算资源,节省了计算时间。针对临界弯曲工况,

考虑其沿轴向和径向的对称性,因此只需建立截面的 1/2 模型即可。弯曲工况由于轴向不对称,不能使用二维平面应变模型,因此建立实体模型。

1.2 临界弯曲工况

1.2.1 有限元模型

由于临界弯曲状态下复合管对称,因此只取 6 m 长度,以复合管截面作为对称边界。建立三维复合管模型:长度 6 m,衬管(内径 $\phi 473.4 \text{ mm}$ 、外径 $\phi 479.4 \text{ mm}$),基管(内径 $\phi 479.4 \text{ mm}$ 、外径 $\phi 508 \text{ mm}$),如图 1 所示。



图 1 临界弯曲工况下的复合管实体模型
Fig.1 Solid model of composite pipe under critical bending

采用扫掠方法对图 1 实体模型进行网格划分,网格模型如图 2 所示。

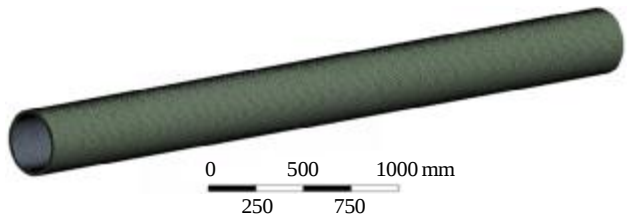


图 2 临界弯曲工况下的复合管网格模型
Fig.2 Grid model of composite pipe under critical bending

1.2.2 工况载荷及边界条件

弯曲可由对复合管一端截面旋转一定角度的方法来实现。如图 3 所示,对复合管一端截面(包括内衬和基管截面)施加远程点并给予 0.05 rad 的弯曲弧度。

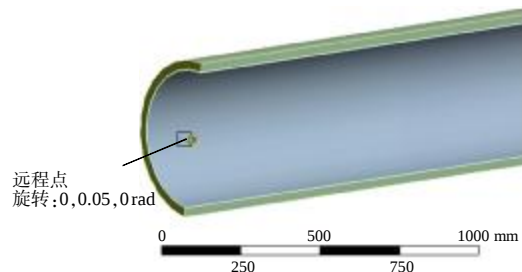


图 3 临界弯曲工况下的弯曲载荷设置
Fig.3 Bending load setting under critical bending condition

1.3 弯曲工况

1.3.1 有限元模型

建立三维复合管实体模型:长度 12 m,衬管(内

径 $\phi 473.4\text{ mm}$, 外径 $\phi 479.4\text{ mm}$, 基管(内径 $\phi 479.4\text{ mm}$, 外径 $\phi 508\text{ mm}$), 如图 4 所示。



图 4 弯曲工况下的复合管实体模型

Fig.4 Solid model of composite pipe under bending condition

对图 4 实体模型进行网格划分, 网格模型如图 5 所示。所有网格均为六面体。



图 5 弯曲工况下的复合管网格模型

Fig.5 Grid model of composite pipe under bending condition

1.3.2 工况载荷及边界条件

弯曲可由对复合管一端截面旋转一定角度的方法实现。弯曲角度由管体长度 12 m 与弯曲半径 83.28 m 的比值确定。对复合管两端截面(包括内衬和基管截面)施加远端点并给予 0.144 rad 的弯曲弧度, 因此在复合管两侧端面各给予 0.072 rad 弯曲弧度, 同时在两端截面施加反向 200 t 的轴向拉力, 分别如图 6、7 所示。

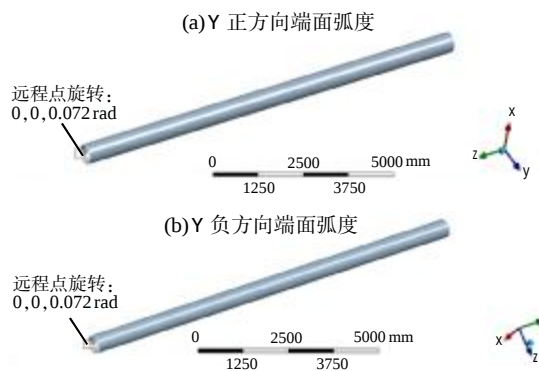


图 6 弯曲工况下的弯曲边界设置

Fig.6 Curved border setting under bending condition

2 有限元计算结果及数据

2.1 临界弯曲工况的计算结果及分析

在静力学分析模块下, 临界弯曲工况的变形结果如图 8 所示(彩图见电子版, 下同)。由图 8 可见, 截面 0.05 rad 的旋转角度使两种复合管发生了 76 mm 的弯曲变形。将此结果导入屈曲分析模块计算复合管的屈曲特征及临界屈曲载荷, 结果如图 9、10

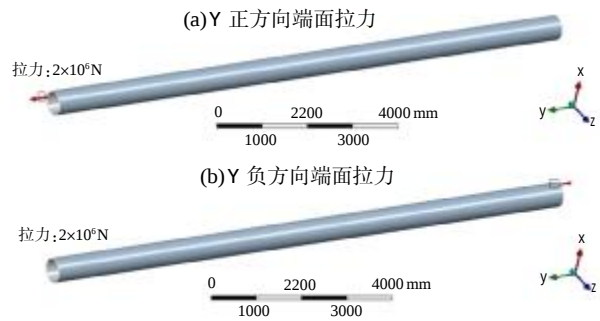


图 7 轴向拉力施加

Fig.7 Axial tension to be applied

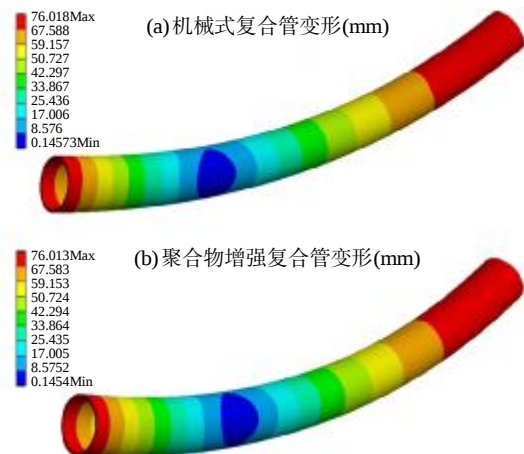


图 8 临界弯曲工况下的弯曲变形

Fig.8 Bending deformation under critical bending condition

所示。聚合物增强复合管的变形程度明显比机械式复合管的大。

由图 10 可得, 机械式复合管临界屈曲系数为

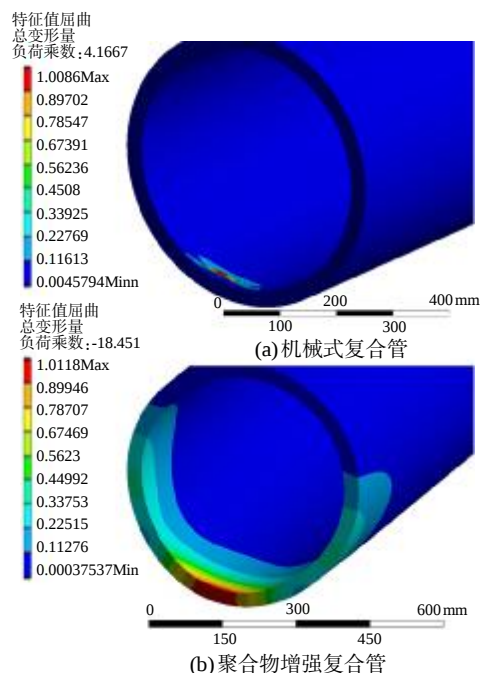


图 9 临界弯曲工况下的屈曲变形结果

Fig.9 Buckling results under critical bending condition

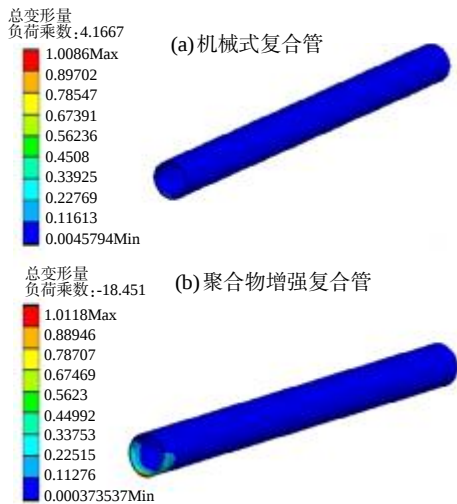


图 10 临界弯曲工况下的屈曲系数

Fig.10 Buckling coefficient under critical bending condition

4.1667, 换算到临界弯曲半径为 46.5m, 即在弯曲半径为 46.5m 时, 过盈配合的机械复合管的基管和衬管之间的结合强度归零, 将会发生屈曲褶皱和鼓包现象; 聚合物增强复合管的临界屈曲系数为 18.451, 换算到临界弯曲半径为 12.3m, 即在弯曲半径为 12.3m 时, 聚合物增强复合管的基管和衬管之间的结合强度归零, 将会发生屈曲褶皱和鼓包现象。对比结果, 聚合物增强复合管的临界弯曲半径(12.3m)比机械式复合管的临界弯曲半径(46.5m)要小, 因此, 聚合物增强复合管抗弯强度更高, 稳定性更好。

2.2 弯曲工况的计算结果及分析

在静力学分析模块下, 弯曲工况的变形、应力结果分别如图 11、12 所示。

在给定弯曲半径为 83.28m, 对复合管两端截面

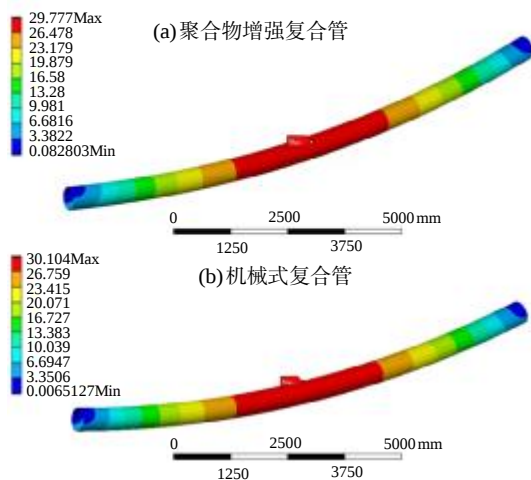


图 11 弯曲工况下的复合管弯曲变形

Fig.11 Deformation of composite pipes under bending condition

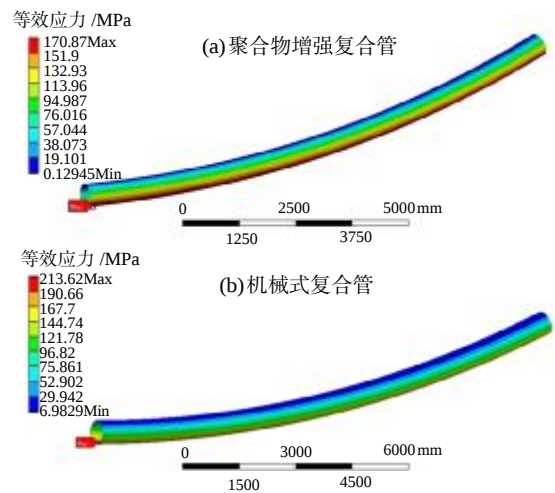


图 12 弯曲工况下复合管的应力

Fig.12 Stress of composite pipes under bending condition

(包括内衬和基管截面)施加远端点并给予 0.144rad 的弯曲弧度 (即在管两侧端面各给予 0.072 弯曲弧度), 同时在两端截面施加反向 2000 kN 的轴向拉力。由图 11、12 可以得到: 聚合物增强复合管最大变形为 29mm、最大应力为 170 MPa; 机械式复合管最大变形为 30mm、最大应力为 213 MPa。

由以上结果可以明显得出, 两种复合管在给定的弯曲工况条件下最大应力均远小于屈服强度(450 MPa)。而在弯曲曲率相同时, 两种复合管的变形程度近乎相同, 但是聚合物增强双金属复合管的应力明显小于机械式复合管的应力。由此可得, 聚合物增强双金属复合管在弯曲变形和载荷作用下产生的应力较机械式复合管更小, 可以承受的载荷强度更高, 抗弯能力更强。

3 四点弯曲试验验证

3.1 试验方法

根据试验目的与四点弯曲试验法的特点, 结合双金属复合管特殊的结构, 选用四点弯曲试验法进行实验验证, 既可测试双金属复合管的最小弹性弯曲半径, 又可以测试双金属复合管基衬分离的临界弯曲半径及双金属复合管的其他弯曲性能。

四点弯曲试验法是将试样放在有一定距离的两个支撑点上, 在离两个支撑点的中心相同距离上对试样施加向下的载荷, 试样在四个接触点的作用下发生四点弯曲, 且在中点处的弯曲半径最大。四点弯曲试验主要用来测试试样的弯曲半径, 同时可以测试两种材料的结合强度^[8-10]。

3.2 试验材料和方案

试验选用 1 根机械式双金属复合管,1 根聚合物增强双金属复合管;试样规格为 $\phi 508\text{ mm} \times (14.3+3)\text{ mm}$;试样长度:12 m。将试样置于四点弯曲试验设备上,两端固定点间距 10.5m(图 13 中 C、D 两点间距),试样固定好后在图 13 所示 A、B(两点间距 3.5m)两点中间粘贴应变片,然后在 A、B 两点施加载荷,直至内壁出现鼓包,记载此时最大应变值。

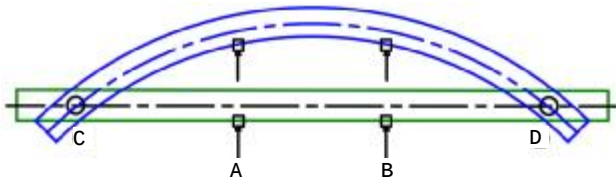


图 13 四点弯曲示意图

Fig.13 Diagram of four-point bending test

3.3 试验原理

通过理论分析可知,复合管结合强度越高,其最小弯曲半径越小,抗弯能力越强,因此,弯曲半径是衡量复合管抗弯曲性能的主要因素。

弯曲半径的测试:测量临界弯曲状态时对应的最大应变值,利用变形几何条件计算弯曲半径 R ^[3]。弯曲半径 R 的计算公式为:

$$R=D/2\varepsilon \quad (1)$$

式中: D 为复合管公称外径,即 508mm; ε 为最大应变。

3.4 试验结果

通过仿真分析和弯曲试验,可以得到机械式复合管和聚合物增强复合管的弯曲半径,如表 2 所示。

表 2 复合管的弯曲半径

Tab.2 Bending radius of the composite pipes

试验管	最大应变绝对值	弯曲半径 /m	
		模拟计算值	理论计算值
机械式复合管	0.0078	46.5	32.6
聚合物增强复合管	0.02	12.3	12.7

分析四点弯曲试验结果,当机械式复合管产生起皱现象,即处于临界弯曲状态时,最大应变为 0.0078,由式(1)得出弯曲半径约为 32.56m;聚合物增强复合管在临界弯曲状态下,最大应变为 0.02,弯曲半径为 12.7m。通过表 2 可以看出聚合物增强复合管的弯曲半径理论计算值 12.7m,接近模拟计算结果;机械式复合管的弯曲半径理论计算值 32.6m,与模拟计算结果偏差较大。经过研究发现机械式复

合管在弯曲试验中变形较快,在测量应变时已经超过临界弯曲状态,实际的应变测量值与临界值偏差较大,因此弯曲半径的理论计算值与模拟计算结果偏差较大。

对比两种管道的试验结果可以看出,临界状态下聚合物增强复合管的弯曲半径比机械式复合管的小。可知,聚合物增强双金属复合管的抗弯能力更强,结合强度更高。

4 结论

(1) 通过仿真分析得出,聚合物增强复合管较机械式复合管具有更小的临界弯曲半径,是机械式复合管的 0.26 倍,不容易发生鼓包现象。

(2) 四点弯曲试验结果表明,在临界弯曲状态下,聚合物增强复合管的最大应变绝对值是机械式复合管的 2.56 倍,弯曲半径是机械式复合管的 0.39 倍。

(3) 有限元计算和试验数据规律一致,聚合物增强复合管的临界弯曲半径比机械式复合管的小,其中聚合物复合管的有限元分析弯曲半径与实际试验值只差 0.4m,表明有限元计算结果可靠。

(4) 分析有限元计算和实际试验数据表明,聚合物增强复合管具有更好的抗鼓包能力。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 魏帆,张燕飞,郭霖,等. 机械式复合管结合强度的检测与控制[J]. 焊管,2015,38(2):32-36.
- [3] 李华军,张燕飞. 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.
- [4] 裴中涛,李剑敏,闻步正,等. 双金属复合管的弹塑性分析及有限元模拟[J]. 化工机械,2011,38(6):749-752.
- [5] 杜清松,曾德智. 双金属复合管塑性成型有限元模拟[J]. 天然气工业,2008,28(9):64-66.
- [6] 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.
- [7] 魏帆,张燕飞,郭崇晓,等. 不同结合强度下机械式复合管的模态参数分析[J]. 焊管,2014,37(8):61-72.
- [8] 林香祝,陈仁悟,何良干. 用四点弯曲法测定硬质涂层的结合力[J]. 陕西机械学院学报,1985(4):26-33.
- [9] 张锁龙,尤一匡,黄志荣,等. 低碳钢含裂纹管道四点弯曲作用下弹塑性裂纹扩展的试验研究[J]. 压力容器,1999(2):14-18.
- [10] 赵长财,肖宏,董国疆,等. 管材屈曲和起皱分析[J]. 中国机械工程,2007,18(11):1363-1366. H