

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.11.020

油气田酸性介质输送用玻纤增强PE柔性管性能

李风^{1,2}, 张密^{1,2}, 于洲^{1,2}, 张瑾^{1,2}, 黄庭蔚³

(1. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司技术检测中心, 山东东营 257000;

2. 中国石油化工股份有限公司胜利油田检测评价研究有限公司, 山东东营 257000; 3. 北京化工大学机电工程学院, 北京 100029)

摘要: 玻纤增强聚乙烯(PE)柔性管具有易弯曲、质量轻、耐腐蚀性好且便于运输和安装等优点, 因此采用玻纤增强PE柔性管解决油田地面集输管网腐蚀问题是未来油田用管的主要研究方向。分别建立 $\varnothing 50$ mm、 $\varnothing 75$ mm管径的油田酸性介质用玻纤增强PE柔性管有限元模型, 开展柔性管爆破试验与有限元计算结果进行对比, 对玻纤带纵向拉伸强度进行参数修正, 修正系数取0.8。使用修正后的模型对 $\varnothing 100$ mm的油田酸性介质用玻纤增强PE柔性管进行校核, 校核类型包括: 管体爆破强度、设计压力下管体结构强度、管体拉伸强度及盘绕弯曲安全半径。结果显示, $\varnothing 100$ mm的油田酸性介质用玻纤增强PE柔性管爆破压力为24 MPa, 设计内压下其内衬层应力值、增强层纤维方向应力值、增强层基体方向应力值、外保护层应力值分别为5.0, 11.0, 14.0, 3.3 MPa, 管体最大拉伸载荷为100 kN, 在盘卷运输过程中最小弯曲半径为3.1 m, 现场铺设过程中最小弯曲半径为4.6 m。校核结果表明, 该柔性管满足使用要求, 目前已在现场得到应用。该研究结果可为玻纤增强PE柔性管强度计算及校核提供参考依据。

关键词: 聚乙烯; 复杂载荷; 柔性管; 修正; 性能研究; 判定准则

中图分类号: TE973 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)11-0123-06

Performance of Glass Fiber Reinforced PE Flexible Pipe for Oilfield Acid Medium Transportation

Li Feng^{1,2}, Zhang Mi^{1,2}, Yu Zhou^{1,2}, Zhang Jin^{1,2}, Huang Tingwei³

(1. Technical Testing Center of Sinopec Shengli Oil Fields Branch, Shengli Oilfield Branch of Sinopec, Dongying 257000, China; 2. Test Assessment and Research Co., Ltd. of Sinopec Shengli Oilfield, Dongying 257000, China; 3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical and Technology, Beijing 100029, China)

Abstract : Glass fiber reinforced polyethylene (PE) flexible pipes have the advantages of easy bending, light weight, good corrosion resistance, and easy transportation and installation. Therefore, using glass fiber reinforced flexible pipes to solve the corrosion problem of oil field surface gathering and transportation pipelines is the main research direction for future oil field pipes. $\varnothing 50$ mm and $\varnothing 75$ mm finite element model of fiberglass reinforced flexible pipe were established separately for acidic media in oil fields. The blasting test of the flexible pipe was carried out and were compared with the results of finite element calculation. The longitudinal tensile strength of the fiberglass strip was parameter corrected, with a correction coefficient of 0.8. Using the revised model for $\varnothing 100$ mm oilfield acidic medium was verified using fiberglass reinforced flexible pipes. The verification types include: pipe burst strength, pipe structural strength under design pressure, pipe tensile strength, and coil bending safety radius. The results show that the explosion pressure of a $\varnothing 100$ mm oilfield acidic medium reinforced flexible pipe with fiberglass reinforcement is 24 MPa. The stress values of the inner lining layer, the fiber direction of the reinforcement layer, the matrix direction of the reinforcement layer, and the outer protective layer under the designed internal pressure are 5.0, 11.0, 14.0 MPa and 3.3 MPa, respectively. The maximum tensile load of the pipe body is 100 kN. The minimum bending radius during coil transportation is 3.1 m, and the minimum bending radius during on-site laying is 4.6 m. The verification results indicate that the flexible pipe meets the usage requirements and has been applied on-site. The research results can provide a reference basis for the strength calculation and verification of fiberglass reinforced flexible pipes.

Keywords : polyethylene ; complex load ; flexible pipe ; fix ; performance research ; judgment criterion

基金项目: 中国石化股份公司材料处项目(222028)

通信作者: 李风, 硕士, 高级工程师, 主要从事石油机械、复合材料相关技术研究工作

收稿日期: 2023-09-21

引用格式: 李风, 张密, 于洲, 等. 油气田酸性介质输送用玻纤增强PE柔性管性能[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(11): 123-128.

Li Feng, Zhang Mi, Yu Zhou, et al. Performance of glass fiber reinforced pe flexible pipe for oilfield acid medium transportation[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(11): 123-128.

由于 H_2S 、 CO_2 及酸性油气水介质含量高而导致的腐蚀问题愈加严重,使得碳钢和低合金钢等钢管的应用具有较高的风险^[1-3]。玻纤增强聚乙烯(PE)柔性管具有柔性好、质量轻、耐腐蚀,以及运输和施工方便等特点^[4-5],所以采用玻纤增强PE柔性管解决油田地面集输管网防腐问题是一种重要的解决方案。为确定玻纤增强PE柔性管的工况载荷强度,保障应用安全,潘俊等^[6]依据相关规范,重点对玻纤增强PE柔性管在30 MPa内压、600 N拉力和5 MPa外压载荷工况下的强度进行分析及校核。张耘晗等^[7]进一步根据计算及设计载荷的要求,利用ABAQUS有限元软件建立柔性管的有限元分析模型,并对其内压、外压和拉伸载荷组合工况下的应力进行分析。阮伟东等^[8]对柔性管的弯曲性能进行深入研究,分析了柔性管上卷过程中管道弯矩、弯曲曲率等力学响应规律。

通过查阅文献可知,目前柔性管相关研究主要集中于如何设计柔性管的结构以及分析柔性管在不同工况环境下的载荷情况^[9-13],而对多种工况下柔性管的强度校核和性能分析,则未能结合实验数据进行模型参数修正。笔者根据柔性管设计参数和爆破实验数据,利用ABAQUS软件建立并修正玻纤增强PE柔性管分析参数,再以相关的校核准则为依据,以油田常用的公称直径为100 mm的油田酸性介质用玻纤增强PE柔性管为例,对其强度及进行具体的计算及分析。

1 管体结构及材料性能参数

1.1 管体结构及设计参数

油田酸性介质用玻纤增强PE柔性管的主要结构包括内衬层、增强层及外保护层^[14],内衬层和外保护层材料均为高密度聚乙烯(PE-HD),增强层为玻纤预浸带,各层之间通过热熔相互黏接。内衬层位于柔性管最内侧,起防腐与防渗透的作用;增强层是由玻璃纤维带相互缠绕形成的,位于柔性管的中间,即内衬层和外保护层之间,主要起到承担载荷的作用;外保护层起到保护增强层和内衬层的作用,使外部环境的影响减小,其位于柔性管的外侧。油田酸性介质输送用玻纤增强PE柔性管内衬层厚度为6.0 mm,外保护层厚度为3.0 mm,增强层材料为玻璃纤维带,玻璃纤维带缠绕角度为 $\pm 54.4^\circ$ ^[15],缠绕层数为8层,管道规格为DN100 mm,管道设计压力为6.4 MPa。

1.2 材料性能参数

玻璃纤维带的力学性能参数由生产厂家通过实验获得,见表1。

表1 玻璃纤维带材料性能参数

基本性能	测试值
纵向拉伸弹性模量/MPa	30 400
横向拉伸弹性模量/MPa	3 600
面内剪切弹性模量/MPa	14 500
主泊松比	0.4
纵向拉伸强度/MPa	692
纵向压缩强度/MPa	150
横向拉伸强度/MPa	15
横向压缩强度/MPa	8
带厚/mm	0.35

PE-HD力学性能参数由生产厂家提供,见表2。

表2 PE-HD材料力学性能参数

力学性能	测试值
拉伸弹性模量/MPa	600
屈服强度/MPa	16
泊松比	0.44

2 有限元参数修正与计算分析

依据上述油田酸性介质用玻纤增强PE柔性管结构参数及材料参数,利用有限元软件,建立仿真模型。玻纤增强PE柔性管内衬层和外保护层采用C3D8R的八节点线性六面体单元;玻纤增强PE柔性管增强层采用S4R的四节点曲面薄壳单元。并对网格数量加密后进行网格无关性检验,确认符合计算要求。依据圣维南原理,为减小管道端部应力集中的影响,柔性管模型的长度应至少为其外径的5倍。在柔性管两端圆心处建立相对参考点,然后在参考点处将柔性管两端面进行耦合,以方便施加载荷。所建立的油田酸性介质用柔性管模型如图1所示,其中管道内外侧分别表示内衬层与外保护层,中间部分表示柔性管增强层。

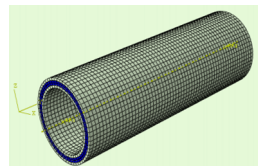


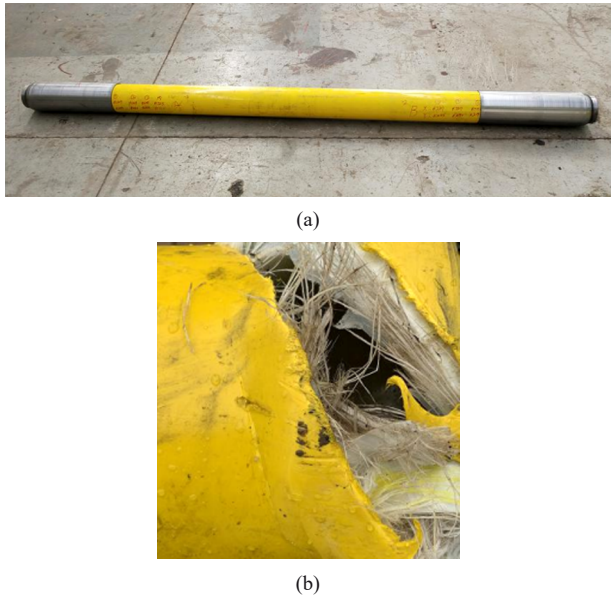
图1 油田酸性介质用柔性管有限元模型图

2.1 柔性管有限元参数修正

为使有限元模拟结果更准确,现对胜利油田分公司技术检测中心提供的相同生产工艺下其他规格的油田酸性介质用柔性管进行爆破仿真模拟计算,并与其爆破实验值进行对比分析,通过合理的参数修正提高有限元仿真计算准确性。

(1)柔性管管体爆破实验。

依据 GB/T 15560-1995 流体输送用塑料管材液压瞬时爆破和耐压试验方法,对常用规格的油田酸性介质用柔性管进行爆破实验,爆破实验样管及爆破点实物图如图 2 所示,通过爆破实验得到的爆破压力实验值见表 3。



a—爆破管样品;b—爆破后爆破点
图2 爆破实验样管及爆破点实物图

表 3 油田酸性介质用柔性管管体结构参数与爆破压力实验值

管径(DN)/ mm	油田酸性介质用柔性管结构参数			爆破压力实 验值/MPa
	缠绕层数	内衬层厚度/ mm	外保护层厚 度/mm	
75	4	5.5	3.0	18
	8	5.5	3.0	34
	16	5.5	3.0	59
50	20	4.5	3.0	91.2

(2)柔性管有限元分析及参数修正。

建立表 3 中 4 种规格的油田酸性介质用柔性管有限元模型。通过有限元仿真软件对其爆破强度进行计算。在柔性管内衬层施加爆破压力,固定柔性管一端并在柔性管另一端施加由爆破压力产生的轴向载荷,轴向载荷下计算公式为: $F = \pi \times P \times$

R^2 ,其中 P 为柔性管爆破压力值(单位 MPa), R 为柔性管内径(单位 mm)。由于内衬层和外保护层均为高分子聚合物,较增强层纤维的断裂伸长率更大,而柔性管在爆破过程中主要由于纤维丝断裂导致承载能力下降而引起管体发生破裂。因此柔性管爆破失效准则确立为:在爆破强度计算过程中增强层纤维方向的应力超过其材料的拉伸强度^[16]。通过试算逐渐增大内压,至柔性管增强层纤维方向应力达到其材料强度极限。图 3 为管径 75 mm,玻纤带缠绕层数 4 层的柔性管在 22 MPa 内压下的应力云图,此时玻纤带纤维方向的应力值为 697 MPa,略高于玻纤带的纵向拉伸强度 692 MPa,即柔性管的爆破压力为 22 MPa。

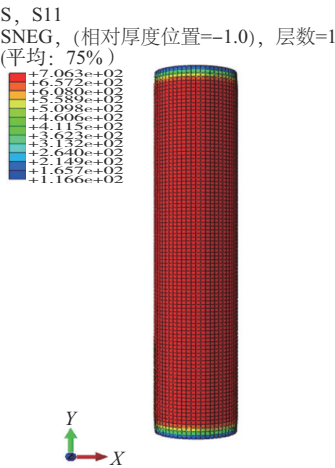


图3 Ø75 mm,4层柔性管爆破强度计算云图(内压为22 MPa)

同理,对于公称直径为 75 mm,缠绕层数为 8 层、16 层和公称直径为 50 mm,缠绕层数为 20 层的油田酸性介质用柔性管,当管内压力分别达到 38, 70 MPa 和 111 MPa 时,玻纤带纤维方向的应力值分别为 693, 695 MPa 和 694 MPa,达到玻纤带的纵向拉伸强度 692 MPa。为方便进行比较和分析,将模拟计算结果与实验室爆破实验数据进行对比,具体见表 4。

表 4 爆破实验数据与有限元模拟计算结果对比

管径(DN)/mm	缠绕层数	爆破值/MPa	模型修改前有限元模 拟值/MPa	模型修改前有限元模拟 与实验误差/%	模型修改后有限元 模拟值/MPa	模型修改后有限元模拟 与实验误差/%
75	4	18	22	22.2	18	0
	8	34	38	11.7	31	8.8
	16	59	70	18.6	57	3.4
50	20	91.2	111	21.7	100	9.6

由表 4 可知,对于公称直径为 75 mm,缠绕层数为 4 层、8 层、16 层和公称直径为 50 mm,缠绕层数

20 层的油田酸性介质用玻纤增强 PE 柔性管的爆破压力实验值分别为 18, 34, 59 MPa 和 91.2 MPa,均小

于有限元模拟值 22, 38, 70 MPa 和 111 MPa。其相对误差分别为 22.2%, 11.7%, 18.6% 和 21.7%。由 1.1 节可知该柔性管的中间增强层为主要的受力承载层,承受着主要的爆破压力载荷,故该层也是产生实验值和模拟值差异的原因。产生该差异的原因主要有:①玻纤带材料本身存在差别,且具有各向异性的特点,导致受力复杂;②玻纤带缠绕过程中的缠绕精度难以控制,导致各层、各部位受力存在差别。

由于有限元计算分析过程中玻纤带纵向拉伸强度与柔性管是否发生破坏密切相关,因此对玻纤带纵向拉伸强度进行参数修正。经试算玻纤带纵向拉伸强度修正系数取为 0.8,即将玻纤带纵向拉伸强度修正为 $692 \times 0.8 = 554$ MPa,爆破压力仿真计算结果与实验值之间相对误差见表 4,均小于 10%,符合计算要求。

2.2 柔性管爆破强度校核

参照 2.1 节方法建立公称直径为 100 mm 的油田酸性介质用玻纤增强 PE 柔性管有限元模型,对柔性管一端参考点进行全约束,另一端参考点施加轴向拉力,同时在内衬层表面施加爆破压力。通过试算的方法逐渐增大内压值,直到柔性管增强层纤维方向应力超过其材料强度极限,油田酸性介质用柔性管增强层纤维方向受到的最大拉应力如图 4。

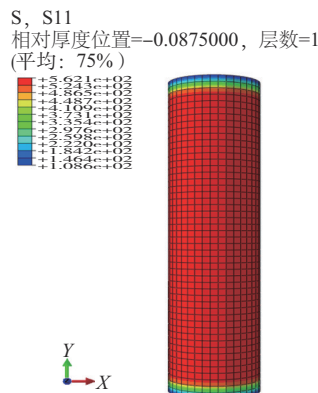


图 4 柔性管爆破强度校核云图(压力为 24 MPa)

对于公称直径为 100 mm 的油田酸性介质用柔性管,当其内压达到 24 MPa 时,柔性管增强层纤维方向受到的最大拉应力为 554 MPa,达到玻维的拉伸强度 554 MPa。故其爆破压力为 24 MPa,大于 3 倍的设计压力,其爆破压力符合设计要求。

2.3 柔性管设计压力下管体结构强度校核

根据柔性管设计参数及材料参数建立其有限元模型,对柔性管内表面施加 6.4 MPa 的设计压力,

将柔性管的一端固定,另一端保留轴向自由度,约束其他 5 个方向的自由度。

根据 API17B-2014 标准规定,在有设计载荷时,柔性管中的内衬层和外保护层不能发生屈服,纤维不得断裂。此外,如果使用单一角度缠绕成型增强层时,如果正负缠绕角之差大于 70° 时,其基体方向的受力情况也要考虑在内,要保证增强层基体方向不能开裂。为消除管道端部效应的影响,正确分析受力状况,计算结束后,采取管道中间部位应力最大值进行应力分析,应力值大小列于表 5。

表 5 柔性管设计内压 6.4 MPa 下各部位应力值 MPa

部位	应力值
内衬层	5.0
增强层纤维方向	110.0
增强层基体方向	14.0
外保护层	3.3

由表 5 可知, $\varnothing 100$ mm 油田酸性介质用柔性管在设计压力作用下,其内衬层应力值、增强层纤维方向应力值、增强层基体方向应力值、外保护层应力值分别为 5.0, 110, 14.0, 3.3 MPa,均在其材料强度极限范围内(内衬层和外保护层材料屈服强度为 16 MPa,增强层纤维方向拉伸强度为 554 MPa,基体方向拉伸强度为 15 MPa)。因此油田酸性介质用柔性管在所设计的缠绕角度与缠绕层数下能满足设计内压的强度要求。

2.4 柔性管管体拉伸强度、弯曲半径计算

(1) 柔性管管体拉伸强度计算。

根据 API17B-2014 标准规定,柔性管在铺设过程中会受到轴向拉力载荷,载荷过大容易导致柔性管结构破坏,因此应对最大拉伸载荷进行校核。主要通过试算的方法逐渐增大轴向拉力,直到管道某一层应力接近其材料的强度极限值,将该值作为柔性管的**最大拉伸载荷,柔性管各部位应力值列于表 6。

表 6 柔性管拉伸载荷 100 kN 下各部位应力值 MPa

部位	应力值
内衬层	3.1
增强层纤维方向	52.6
增强层基体方向	14.6
外保护层	2.8

由表 6 可知,对于公称直径为 100 mm 的油田酸性介质用柔性管,当拉伸载荷达到 100 kN 时,柔性管增强层基体方向受到的最大拉应力为 14.6 MPa,已接近基体的拉伸强度 15 MPa。故该柔性管在实

际铺设过程中所能承受的最大拉伸载荷不能超过 100 kN。

(2)柔性管盘绕弯曲安全半径计算。

柔性管在实际运输、安装、在位服役过程中会受到不同程度的弯曲作用,一旦实际弯曲半径小于柔性管允许的盘绕弯曲安全半径就会发生弯曲破坏。因此,在多种工况下,需要对其柔性管进行盘绕弯曲安全半径计算。

根据 API17B-2014 标准规定,将柔性管在弯曲载荷作用下内衬层、增强层和外保护层所受应力不得超出其材料的强度极限作为最小弯曲安全半径的评判标准。主要通过试算的方法逐渐增大弯曲载荷,直到管道某一层应力接近其材料的强度极限时将该值作为柔性管最小弯曲安全半径。

① 无内压工况下盘绕弯曲安全半径计算。

利用 ABAQUS 有限元软件建立有限元模型。在模型两个端面圆心处建立参考点以保证柔性管在弯曲过程中两个端面保持平面,并将参考点和端面进行全耦合约束。为模拟柔性管真实弯曲过程,下端参考点全固定,上端参考点施加转角 α ,随着转角 α 增大,柔性管各层应力逐渐增加。

表 7 为柔性管转角 α 为 0.32 rad 下各部位应力值(无内压)。由表 7 知,对于公称直径为 100 mm 的油田酸性介质用柔性管,当柔性管端部转角 α 达到 0.32 rad 时,内衬层及外保护层所受的最大应力,已经接近其材料的屈服强度 16 MPa。

表 7 柔性管转角 α 为 0.32 rad 下各部位应力值(无内压)

部位	应力值/MPa
内衬层	15.51
增强层	273.5
外保护层	15.19

柔性管盘绕弯曲安全半径可由曲率计算公式得出,即:

$$K = \frac{\theta_{\text{RF}}}{L}$$

其中, K ,为曲率, θ_{RF} 为施加的转角,0.32 rad, L 为柔性管的长度,1 m。

盘绕弯曲安全半径 R 由 $R = \frac{1}{K}$ 计算得到,对于公称直径为 100 mm 的油田酸性介质用柔性管在盘卷运输过程中的弯曲半径不得小于 3.1 m。

②内压工况下盘绕弯曲安全半径计算。

内压工况下的柔性管弯曲需要考虑其弯曲过程中内压的作用。与无内压工况不同的是需在柔

性管内部施加设计压力,有限元分析方法与无内压工况相同。随着转角 α 增大,柔性管各层应力逐渐增大。

表 8 为柔性管转角 α 为 0.22 rad 下各部位应力值(内压 6.4 MPa)。由表 8 知,当 α 达到 0.22 rad 时,柔性管在内压和弯曲的共同作用下,内衬层受到的最大 Mises 应力已接近其材料的屈服强度 16 MPa,代入曲率计算公式,计算得到柔性管盘绕弯曲安全半径为 4.6 m。

表 8 柔性管转角 α 为 0.22 rad 下各部位应力值(内压 6.4 MPa)

部位	应力值/MPa
内衬层	15.34
增强层	471.3
外保护层	15.07

因此对于公称直径 100 mm 的油田酸性介质用柔性管,在现场铺设过程中其弯曲半径不得小于 4.6 m。

3 结论

根据油田酸性介质用柔性管的结构设计参数,建立参数修正的有限元分析模型,对其多种载荷工况下的强度进行计算及校核,得到以下结论:

(1)通过将爆破压力仿真计算值与爆破实验值对比分析,取玻纤带拉伸强度修正系数为 0.8,即玻纤带拉伸强度修正为 554 MPa 时,仿真计算结果更符合真实值;

(2)公称直径为 100 mm 的油田酸性介质用柔性管爆破压力为 24 MPa,符合设计要求;

(3)油田酸性介质用柔性管在所设计的缠绕角度与缠绕层数下能够满足设计内压强度要求;

(4)经分析,Ø100 mm 的油田酸性介质用柔性管在实际铺设过程中所能承受的最大拉伸载荷不能超过 100 kN;柔性管在盘卷运输过程中的弯曲半径不得小于 3.1 m;柔性管在现场铺设过程中的弯曲半径不得小于 4.6 m。

参考文献

- [1] 郭建军,杨毅,余郡平,等.酸性油气介质输送管道管材选择优化研究[J].广州化工,2015,43(11):165-167.
Guo Jianjun, Yang Yi, She Junping, et al. Study on optimization of material of transportation system of high sour gas field[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2015, 43(11):165-167.
- [2] 宋成立,董占民,郭宇,等.油田酸性采出水中的 Cl^- 对 20#钢管道腐蚀的影响[J].石油管材与仪器,2023,9(5):27-31.
Song Chengli, Dong Zhanmin, Guo Yu, et al. Effect of Cl^- on 20# pipe corrosion in oilfield acidic produced water[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2023, 9(5):27-31.

- [3] 王村.长输管道腐蚀因素与防护技术研究[J].工程建设与设计, 2023(16):48-50.
Wang Cun. Study on corrosion factors and protective technology of long distance pipeline[J]. Construction & Design for Engineering, 2023(16):48-50.
- [4] 姚璐,王树青,何文涛,等.海洋玻纤增强热塑性柔性管的理论与数值分析[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2020,50(6):141-148.
Yao Lu, Wang Shuqing, He Wentao, et al. Theoretical and numerical analysis of glass-fiber reinforced thermoplastic flexible pipe for marine engineering[J]. Periodical of Ocean University of China (Nature Science Edition), 2020, 50(6):141-148.
- [5] 彭传远,付新钰,师梦科,等.大口径热塑性复合材料管及接头内压失效分析[J].工程塑料应用,2022,50(7):104-109.
Peng Chuanyuan, Fu Xinyu, Shi Mengke, et al. Internal pressure failure analysis of large diameter thermoplastic composite pipe and joint[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(7):104-109.
- [6] 潘俊,张东胜,李鹏,等.深海玻纤增强柔性管截面结构设计及强度分析[J].玻璃钢/复合材料,2018(2):21-27.
Pan Jun, Zhang Dongsheng, Li Peng, et al. Cross section structure design and strength analysis of glass fiber reinforced flexible pipe in deep sea[J]. Fiberglass Reinforced Plastic/Composite Material, 2018(2):21-27.
- [7] 张耘哈,姜敏,胡平,等.纤维增强复合材料柔性管强度校核及截面设计[J].石油机械,2021,49(2):68-74.
Zhang Yunhan, Lou Min, Hu Ping, et al. Strength check and section design of fiber-reinforced composite flexible pipe[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(2):68-74.
- [8] 阮伟东,亓可夫,陈苗依,等.柔性管卷管式铺管上卷有限元模拟[J].海洋工程,2023,41(4):127-139.
Ruan Weidong, Qi Kefu, Chen Miaoyi, et al. Finite element simulation of flexible pipe laying process by reel approach[J]. The Ocean Engineering, 2023, 41(4):127-139.
- [9] 汤历平,姚红,罗衡,等.轴向拉伸下非粘结柔性管抗拉铠装层力学响应[J].石油机械,2022,50(4):72-79.
Tang Liping, Yao Hong, Luo Heng, et al. Mechanical response of tensile armour of the unbonded flexible pipes under axial tension[J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50(4):72-79.
- [10] 樊耀华,杨志勋,王刚,等.海洋柔性管缆整体线型静态快速设计方法[J].哈尔滨工程大学学报,2023,44(9):1 622-1 630.
Fan Yaohua, Yang Zhixun, Wang Gang, et al. Static rapid design method for configurations of flexible pipe cable[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2023, 44(9):1 622-1 630.
- [11] 张亚,王阳阳,李昌良,等.内压作用下玻纤增强柔性管损伤失效预测[J].工程力学,2023,40(9):238-246.
Zhang Ya, Wang Yangyang, Li Changliang, et al. Failure prediction of glass fiber-reinforced flexible pipes under internal pressure[J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(9):238-246.
- [12] 白浩,李雄岩,易涤非,等.柔性跨接管结构形式与截面设计的有限元分析[J].广东造船,2015,34(6):36-39.
Bai Hao, Li Xiongyan, Yi Difei, et al. Finite element analysis for structural form and section design of flexible jumpers[J]. Guangdong Shipbuilding, 2015, 34(6):36-39.
- [13] 祝效华,雷清龙,刁飞,等.径向夹持载荷作用下海洋柔性管骨架层的静力特性研究[J].石油钻探技术,2018,46(5):76-82.
Zhu Xiaohua, Lei Qinglong, Diao Fei, et al. Study on the static characteristics of marine flexible riser skeleton layer under radial clamping loads[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(5):76-82.
- [14] 张学敏,周腾,李厚补,等.涤纶纤维增强聚乙烯复合管承压性能模拟[J].工程塑料应用,2020,48(8):118-122,129.
Zhang Xuemin, Zhou Teng, Li Houbo, et al. Simulation of pressure-bearing performance of polyester fiber reinforced polyethylene composite pipes[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(8):118-122, 129.
- [15] Kruijer M P, Warnet L L, Akkerman R. Analysis of the mechanical properties of a reinforced thermoplastic pipe(RTP)[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005, 36(2):291-300.
- [16] 王刚,颜廷俊,李平,等.海洋玻纤增强柔性管用锥套连接型接头密封性能研究[J].压力容器,2021(8):42-51.
Wang Gang, Yan Tingjun, Li Ping, et al. Research on sealing performance of cone-sleeve joint of marine glass fiber reinforced flexible pipe[J]. Pressure Vessel Technology, 2021(8):42-51.