

环向加劲肋对海底管道屈曲性能影响的数值模拟研究

安峰辰¹, 陈军², 易浩¹, 付兵^{3*}

1 中国石油大学(北京)安全与海洋工程学院, 北京 102249

2 东南大学土木工程学院, 南京 210096

3 暨南大学力学与建筑工程学院, 广州 510632

* 通信作者, fubing@jnu.edu.cn

收稿日期: 2021-01-25

国家自然科学基金面上项目(编号 52078482)资助

摘要 海底管道担负着海上油气集输的重要使命, 是海洋油气生产系统的生命线。海底管道在静水压力作用下产生的局部屈曲及其传播是设计时首要考虑的结构失效模式。增设环向加劲肋是有效提升海底管道抗屈曲性能的经济有效手段。本文基于有限元分析软件ABAQUS建立带环向加劲肋管道的有限元模型, 系统分析环向加劲肋间距、高度和厚度3个参数对管道抗屈曲性能的影响, 并将管道模型的数值模拟结果与试验结果进行对比分析, 以验证该有限元模型的准确性。在此基础上, 通过参数分析的方法, 研究了环向加劲肋的间距、厚度和高度对带环向加劲肋管道抗屈曲承载力 P_{cr} 的影响, 并提出了相关管道的极限屈曲载荷计算公式。研究结果显示: 1) 环向加劲肋间距、厚度、高度3个参数对管道抗屈曲承载力 P_{cr} 的影响相互关联, 其中环向加劲肋间距对管道抗屈曲承载力 P_{cr} 的影响最为显著; 2) 管道抗屈曲承载力 P_{cr} 表现出与环向加劲肋间距成反比例的增长趋势; 3) 环向加劲肋的焊接会产生残余应力, 从而减弱加劲肋对管道的加强效果, 进而表明准确的有限元模型应考虑残余应力的影响; 4) 具有足够刚度的环向加劲肋可有效将局部屈曲行为控制在加劲肋之间, 并改变管道的屈曲破坏模式, 有效提升管道的抗屈曲承载力 P_{cr} ; 5) 提出的管道抗屈曲承载力 P_{cr} 计算公式能较好地预测结果, 可作为设置环向加劲肋管道的设计依据。

关键词 海底管道; 抗屈曲承载力; 环向加劲肋; 设计方法

Numerical study on the effects of ring stiffeners on the buckling performance of subsea pipelines

AN Fengchen¹, CHEN Jun², YI Hao¹, FU Bing³

1 College of Safety and Ocean Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China

3 College of Mechanics and Civil Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China

Abstract The subsea pipeline plays a pivotal role in transporting offshore oil and gas, and serves as a lifeline in the offshore oil and gas production system. The local buckling and its propagation of subsea pipelines under hydrostatic pressure are the primary structural failure mode for the pipeline design. The use of ring stiffeners is an economical and effective means to improve the buckling resistance of subsea pipelines. In this paper, a Finite Element (FE) model of a pipeline with or without the ring stiffener

引用格式: 安峰辰, 陈军, 易浩, 付兵. 环向加劲肋对海底管道屈曲性能影响的数值模拟研究. 石油科学通报, 2022, 04: 584-592

AN Fengchen, CHEN Jun, YI Hao, FU Bing. Numerical study on the effects of ring stiffeners on the buckling performance of subsea pipelines. Petroleum Science Bulletin, 2022, 04: 584-592. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.04.050

was established in the FE software ABAQUS to systematically investigate the effects of the spacing, height and width of the ring stiffener on the ultimate buckling performance of the pipe. The simulation results including ultimate load and failure mode were subsequently compared with their corresponding testing results to validate the accuracy of the FE model. A series of parameter analyses were conducted to investigate the effects of the spacings, thickness and height of the ring stiffener on the critical buckling pressure P_{cr} of the pipeline strengthened with ring stiffeners, thereby proposing a formula with regard to the critical buckling pressure P_{cr} of the pipe with ring stiffeners. The relevant analysis results show that: 1) The effects of the spacing, thickness and height of ring stiffener were found coupled on the critical buckling pressure P_{cr} of pipeline, with the most significant and effective effect on the enhance of the critical buckling pressure P_{cr} due to closer spacing of ring stiffener; 2) An inversely increasing trend was observed for the critical buckling pressure P_{cr} of the pipeline with the decline in the spacing of ring stiffeners; 3) A significant effect was found on undermining the strengthening effect of the ring stiffener on critical buckling pressure P_{cr} of the pipe due to the presence of residual stress produced in the welding operation at the connection between ring stiffener and pipe, which indicates that the effect of residual stress should be considered in an accurate FE model of the pipe with ring stiffeners; 4) The ring stiffener with sufficient rigidity could effectively restrain the local buckling behavior of the pipe between adjacent stiffeners, and lead to a change in the buckling mode and an effective enhance in the critical buckling pressure P_{cr} of the pipe; 5) the critical buckling pressure P_{cr} of the pipeline could be accurately predicted with the proposed formula based on the above findings, an agreement that indicates that the proposed formula in this paper is appropriate as a design basis for pipes with ring stiffeners.

Keywords subsea pipeline; critical buckling pressure; ring stiffener; design method

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.04.050

0 引言

自新世纪以来,全球海洋油气勘探开发步伐明显加快,海上油气新发现总储量超过陆地,储产量持续增长,已成为全球油气资源的战略接替区。在海洋油气的开发过程中,海底管道担负着海上油气集输的重要使命,被称为海洋油气生产系统的生命线^[1]。无论是在铺设阶段还是在服役阶段,海底管道所面临的主要问题为由其所处环境带来的静水压力所造成的屈曲压溃破坏^[2],进而可能带来不可逆转的海洋环境破坏,为石油公司带来巨大的经济损失以及为社会带来巨大的生态损失。

为提高管道的抗屈曲压溃承载力,传统管道设计一般只能通过增加管道壁厚来实现^[1]。如Turk Stream管道直径812.8 mm、水深2200 m处管道壁厚为39 mm,SAGE管道直径690.88 mm,最大水深3450 m处管道壁厚为40.5 mm^[3]。这不仅增加了管道的用钢量及其造价,而且几乎已经达到管道制作工艺和施工能力的极限^[4]。

另一方面,海底管道和圆柱形薄壁壳屈曲承载力的提高可以通过增设环向加劲肋的方式来实现^[5]。比如,Chen和Rotter^[6]的研究发现环向加劲肋的设置,可以有效提高圆柱形薄壁壳的抗屈曲承载力,进而降低管道因抵抗屈曲载荷所需的厚度。Showkati和Shahandeh^[7-8]通过环向加劲管道的小规模尺寸试验研究,进一步证实了环向加劲肋对管道抗屈曲承载力的加强效果,并发现减小加劲肋的间距可有效提高管道

的抗屈曲承载力。在考虑环向加劲肋高度和间距对管道加强效果的基础上,Riahi^[9-10]等对海底管道的加劲肋进行了优化设计。Karroum^[11]等通过试验和数值模拟的方法发现,环向加劲肋对带缺陷的圆柱构件也有明显的加固效果。此外,由于环向加劲肋可有效地提高海底管道的抗屈曲承载力,因此,环向加劲肋的设置可有效阻止屈曲传播^[10-12]。

虽然大量的研究已经证实环向加劲肋对海底管道抗屈曲承载力的加固效果,但是相关的理论计算模型还不是很完善,进而导致目前国内外尚没有关于环向加劲肋管道的相关设计规范。目前,已有大量的专家学者基于海底管道的径厚比及其材料的本构,建立了可预测海底管道屈曲承载力的公式^[1]。然而,在关于增设加劲肋加固海底管道的研究理论方面,则比较欠缺。相关研究主要集中于环向加劲肋对管道抵抗屈曲传播压力的性能提升上^[7,13-16]。目前,仅有Riahi和Showkati^[8,10]提出了环向加劲肋加固管道的相关设计理论。但是,该理论仅仅考虑了环向加劲肋的间距,而没有考虑环向加劲肋的高度和厚度对管道加固效果的影响。

鉴于此,本文基于商业有限元分析软件ABAQUS,建立带环向加劲肋管道的有限元模型,并将其与相应的试验结果对比。在此基础上,通过一系列的参数分析,提出一个关于管道加劲肋的优化设计公式,为环向加劲肋在海底管道中的工程应用提供理论依据。

1 有限元模型

采用大型有限元分析软件ABAQUS, 建立文献^[7]中管道试件的三维有限元模型, 模拟海底管道的屈曲压溃全过程。

1.1 几何模型

文献[7]中的6组管道试件, 由0.25 mm厚的薄钢板滚卷成型为外径51 mm的圆形管道。其具体几何尺

寸如表1所示。沿管道轴向等间距设置数量不等的环向加劲肋。环向加劲肋由与管道相同的材料制备而成, 其厚度为2 mm, 高度为10 mm(即环向加劲肋的内、外径分别为61 mm和51 mm)。由于管道制作和施工过程中会不可避免地产生初始缺陷, 因此本研究的相关模拟将在管道的几何建模中考虑管道的椭圆度。通过对管道椭圆度分析, 发现管道的屈曲性能受到椭圆度的显著影响。当管道的椭圆度设为7.5%时, 管道的数值模拟结果与试验结果的吻合度比较高。利用结构和载荷的对称性, 取管道长度的一半进行模拟。

表1 文献[7]中管道试件的几何尺寸信息

Table 1 Geometric size of the specimens in the literature [7]

试件标号 ^{#1,2}	管长/m	环向加劲肋数量	环向加劲肋间距/m
P0.82R0	0.82	0	/
P2.46R0	2.46	0	/
P2.46R2	2.46	2	2.46
P2.46R4	2.46	4	0.82
P2.46R7	2.46	7	0.41
P2.46R13	2.46	13	0.205

注: 1) 标号P2.46R2表示管长为2.46 m且设有两个环向加劲肋; 2) P2.46R0为对照组, P0.82R0为验证长度效应组。

1.2 分析方法

薄壁管道的屈曲压溃分析为复杂的非线性问题, 分析不容易收敛, 拟通过以下设置改善有限元计算的收敛性: (1)合理设置初始增量步, 将增量步减小为0.001; (2)打开几何非线性参数(NLGEOM)以考虑模型的几何非线性因素; (3)采用隐式动力分析方法进行方程组的求解。

1.3 载荷与约束

为防止管道模型在加载过程中出现管壁互相侵入现象, 在管内壁将切向行为设置为‘Rough’自接触模式的接触属性。环向加劲肋与管外壁采用‘tie’进行连接, 以模拟试验中的焊接连接。在‘tie’设置中, 主平面为环向加劲肋内表面, 从平面为位于管道外表面加劲肋两侧的节点, 并采用‘Node to Surface’进行离散。

试验前, 分别将带2 mm深凹槽的刚性侧板固定于管道试件两端, 并采用硅胶将其密封, 因此可认为管道两端的径向和纵向位移被约束, 而其他4个自由度(即圆周向位移、轴向转角、径向转角、圆周向转角)未被约束。为模拟这种边界条件, 本文利用柱坐

标系, 在管道端部2 mm的表面节点上限制R轴方向的自由度, 同时在两个特征节点上限制管道在轴线方向的自由度(即图1管道模型左侧)以防止管道的移动, 并于管道截面(即图1管道模型右侧)上施加对称约束‘ZSYMM’, 即确保模型边界在轴线方向的线位移、径向和环向的角位移为零。具体边界条件如图1所示。

试验中, 通过采用真空泵抽取管内空气产生管内外压差的方法, 模拟实际工程中的静水压力; 有限元模拟时, 采用均匀外压进行加载, 并采用等步长的方法来逐步增加载荷。由于环向加劲肋焊接于圆形管道上, 因此焊接处管材的力学性能会由于残余应力的影



图1 试件几何模型

Fig. 1 Geometric model of specimen

响而有所降低。鉴于此,本研究通过在焊接影响范围内引入初始应力场的方法,模拟焊接残余应力对管体力学性能的影响。在本研究中,焊接影响范围拟定为环向加劲肋两侧各 10 mm 的区域。

1.4 网格剖分与材料属性

采用 4 节点双曲面线性减缩积分壳单元 S4R 模拟管道薄壁结构,而环向加劲肋则采用 8 节点线性立方体减缩积分单元 C3D8R 进行模拟。为兼顾计算效率和计算精度,单元网格尺寸总体设置为 6 mm;为提高计算精度,在接触和边界条件附近区域,采用相对较精细的单元进行剖分,具体为:距管道末端 2 mm 的区域、管道焊接的部位以及环向加劲肋,沿纵向设置 1 mm 网格尺寸;在焊接影响范围内的管道沿纵向设置 2 mm 网格尺寸。具体网格划分方案如图 2 所示。

薄壁管道和环向加劲肋钢材的应力应变关系曲线如图 3 所示,其屈服强度(f_y)、泊松比(ν)和杨氏模量

(E)分别为 250 MPa、0.3 和 2×10^5 MPa。

2 试验验证

通过将有限元结果和其所对应的文献[7]中的试验结果进行对比分析,验证所建立管道有限元模型的准确性。

2.1 抗屈曲承载力

如表 2 所示,模拟结果与试验结果总体吻合较好:未设置环向加劲肋管道的抗屈曲承载力(P_{cr})的有限元预测结果与试验结果的误差为 1.53%;而设置加劲肋试件的有限元模拟结果却与其对应的试验结果有较大的误差。其中,试件 P2.46R7 的误差最大,达到 32.90%。设置加劲肋管道的有限元模拟结果与试验结果误差较大的主要原因为,在构件制作过程中环向加劲肋的焊接过程会不可避免地在加劲肋附近的管体内

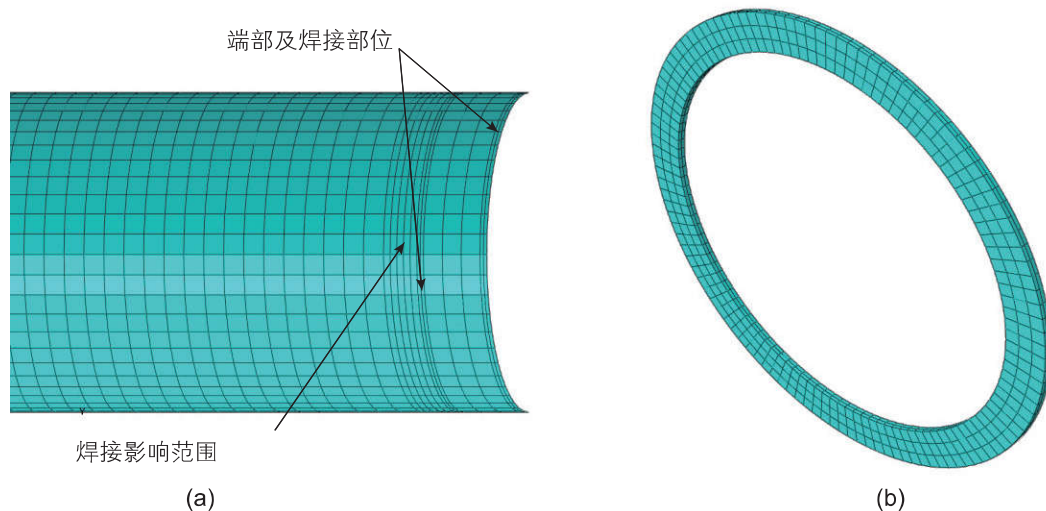


图 2 模型网格划分策略:(a)圆形管道网格细部划分示意图 (b)环向加劲肋网格划分示意图

Fig. 2 Mesh scheme for the model: (a) circular pipe and (b) ring stiffener

表 2 管道抗屈曲承载力(P_{cr})的试验结果与数值结果的比较

Table 2 Comparison in perspective of critical buckling pressure (P_{cr}) through experimental and Finite Element studies

试件标号	试验结果/kPa	数值结果 ^{#1} /kPa	数值结果 ^{#2} /kPa	误差 ^{#3} /%
P0.82R0	17.70	17.43	/	1.53
P2.46R0	5.96	5.62	/	5.79
P2.46R2	5.96	5.49	5.66	7.89
P2.46R4	16.88	18.85	19.85	11.64
P2.46R7	27.84	37.00	40.39	32.90
P2.46R13	61.90	74.15	79.93	19.79

注: ^{#1} 为考虑残余应力影响的数值模拟结果; ^{#2} 为不考虑残余应力影响的数值模拟结果; ^{#3} 为考虑残余应力影响的数值模拟结果与试验结果的对比。

引入残余应力及变形,从而导致管体材料性能下降,进而影响设置加劲肋管道的整体抗屈曲承载力。对表

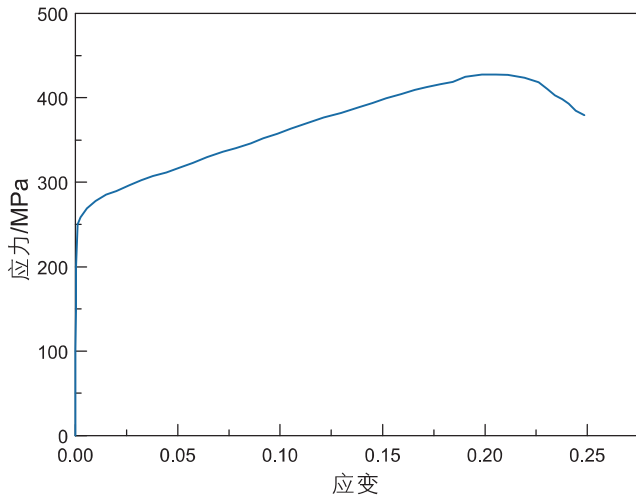
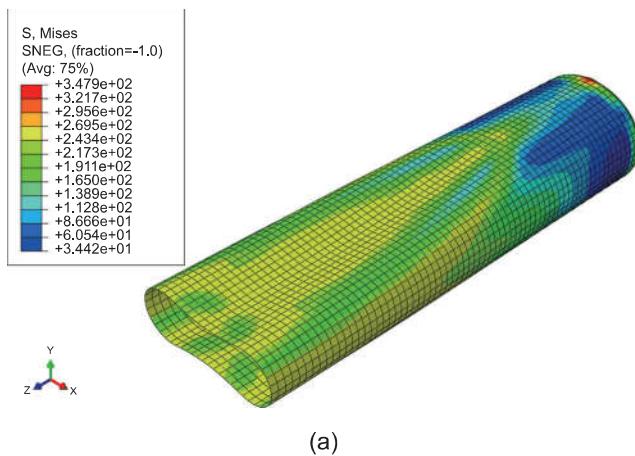


图3 材料应力—应变关系曲线^[7]

Fig. 3 Stress-strain relation curve^[7]



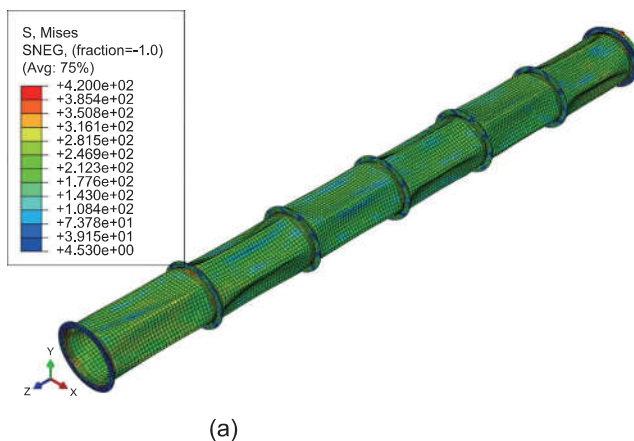
(a)



(b)

图4 管道试件P0.82R0的屈曲破坏模式:(a)有限元 (b)试验^[7]

Fig. 4 Buckling failure mode of Specimen P0.82R0: (a) Finite element and (b) test^[7]



(a)



(b)

图5 管道试件P2.46R13的屈曲破坏模式:(a)有限元 (b)试验^[7]

Fig. 5 Buckling failure mode of Specimen P2.46R13: (a) Finite element and (b) test^[7]

2中考虑和不考虑残余应力影响的试件的模拟结果进行对比分析发现,增设加劲肋引入的残余应力和变形确实降低了管道的抗屈曲承载力。

2.2 屈曲模式

未设置环向加劲肋的管道试件(即P0.82R0和P2.46R0)在屈曲发生之前表现出明显的非线性弹性行为,其应力随着外压的增加而急剧增加。管道应力达到材料的屈服应力时发生局部屈曲,管壁出现凹陷,外压载荷达到最大值(即管道的抗屈曲极限承载力)。随后,局部屈曲开始传播,凹陷处沿着管道的纵向和环向扩展,直至整个管道被压溃破坏(图4)。

有限元模拟结果显示,增设环向加劲肋后,管道的屈曲破坏模式有明显地改善。具体表现为:(1)其局部屈曲传播仅限于两环形加劲肋之间(图5);(2)管道试件截面沿着管道环向呈现出多个波峰波谷形状(图6),具体数量取决于环向加劲肋的间距;(3)加劲肋两

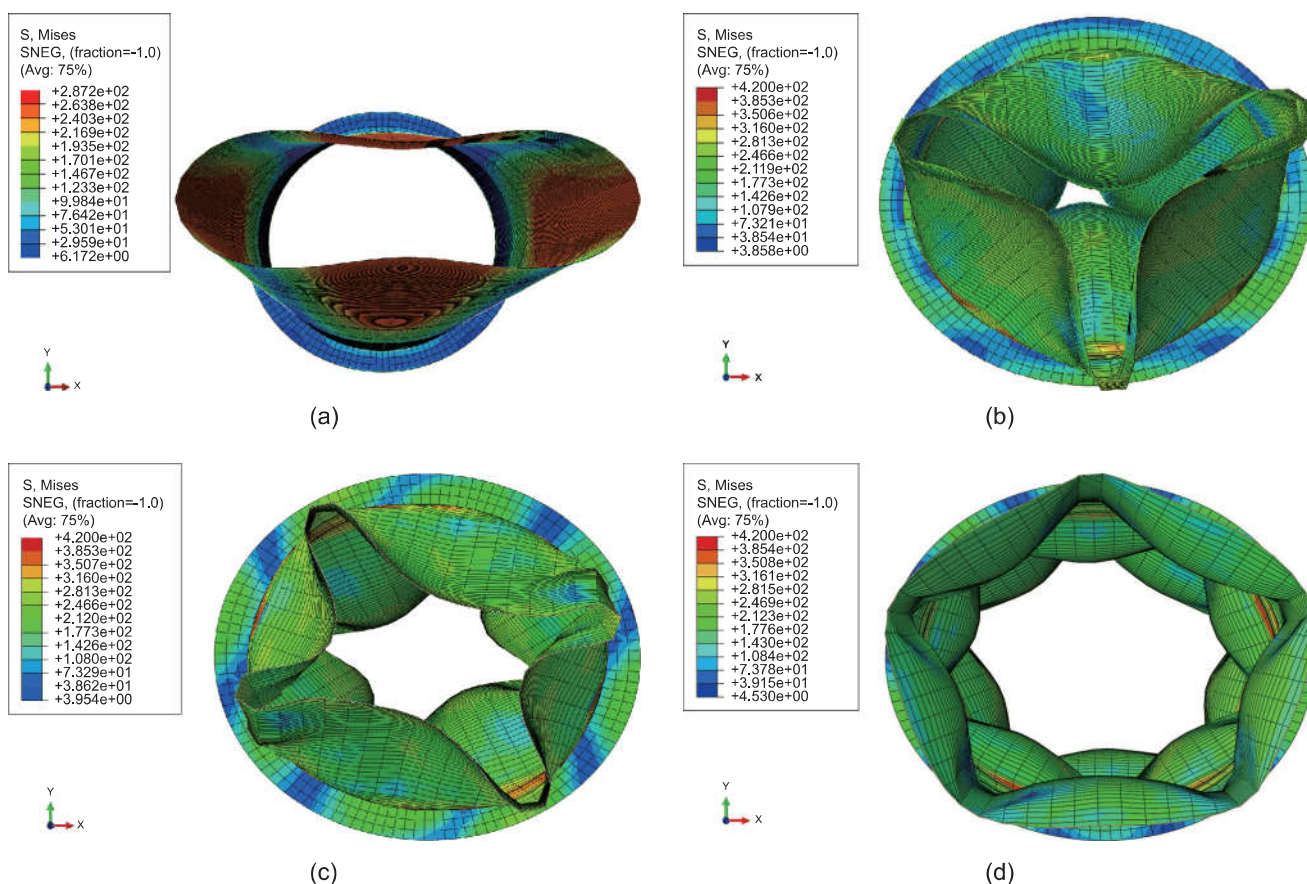


图 6 试件 (a) P2.46R2、(b) P2.46R4、(c) P2.46R7 和 (d) P2.46R13 的管道截面屈曲破坏模式
 Fig. 6 Buckling failure mode of Specimen: (a) P2.46R2, (b) P2.46R4, (c) P2.46R7 and (d) P2.46R13

侧的管道屈曲变形不一致，从而导致管道的屈服形状由无加劲肋管道的直线转变为折线，并导致加劲肋发生平面外变形和失稳(图 7)。此外，如图 4 和图 5 所示，加劲肋管道与非加劲肋管道破坏模式的数值模拟结果与其对应的实验结果现象比较吻合。

综上所述，本文所建立的有限元模型可以比较准确地模拟环向加劲肋管道的力学响应。

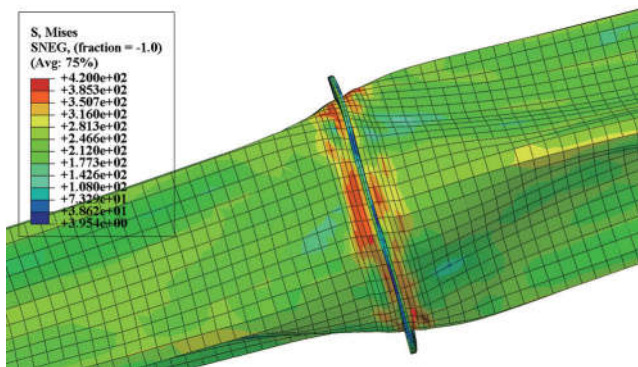


图 7 环向加劲肋的平面外变形
 Fig. 7 Out-of-plane deformation of ring stiffener

3 参数分析

采用上述建立的且已通过验证的精确有限元模型，分别分析环向加劲肋高度、厚度和间距对管道抗屈曲承载力(P_c)的影响。在参数分析时，通过引入局部应力场的方法来考虑环向加劲肋焊接过程所引入的初始残余应力，但不考虑环向加劲肋自重的影响。

为方便研究加劲肋几何参数对管道抗屈曲承载力的影响，本文所涉及的管道长度(2460 mm)、厚度(0.25 mm)、椭圆度(初始缺陷)和边界条件均保持不变。根据拟分析参数的取值对模拟试件，以 Rn-Hm-Wq 的格式进行编号。其中，Rn 表示设置 n 个环向加劲肋($n=2, 4, 7, 13$ ，环向加劲肋间距分别为 2460 mm、820 mm、410 mm、205 mm)，Hm 表示环向加劲肋的高度为 $m(m=5, 10, 15, 20, 25$ mm)，Wq 表示环向加劲肋的厚度为 $q(q=2, 6, 10$ mm)。例如，R7H20W10 表示该试件有 7 个高为 20 mm 厚度为 10 mm 的环向加劲肋。

参数分析结果显示，高度为 5 mm、厚度为 2 mm

的环向加劲肋由于截面惯性矩较小和刚度较低的特点，导致其很难阻止屈曲现象在整个管道的传播行为，进而使得整个管道发生屈曲压溃现象。具体破坏模式如图 8 所示。另一方面，其他尺寸的加劲肋由于截面惯性矩相对较大，均可以有效地阻止屈曲传播行为。

图 9 和图 10 显示了环向加劲肋间距对管道抗屈曲承载力的影响。如图 9 所示，环向加劲肋的间距对管道试件的抗屈曲承载力 P_{cr} 的提高有明显影响：管道抗屈曲承载力 P_{cr} 随着环向加劲肋间距的减小而增大；尤其在间距小于约 5 倍管道直径（即 255 mm）时，环向加劲肋对管道抗屈曲承载力的提高影响更为明显。此外，加劲肋间距对管道抗屈曲承载力 P_{cr} 的贡献会随着环向加劲肋厚度的增加而有所增强（如图 10 所示）。比如，厚度为 2 mm 的加劲肋分别以 R7（即间距 410 mm）和 R13（即间距 205 mm）的方式布置时，其抗屈曲承载

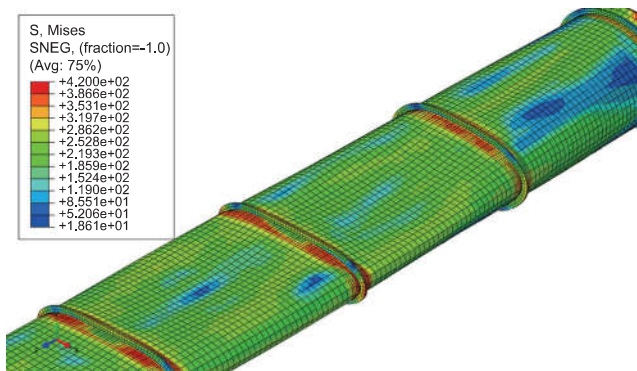


图 8 试件 R13H5W2 的屈曲破坏模式
Fig. 8 Buckling failure mode of Specimen R13H5W2

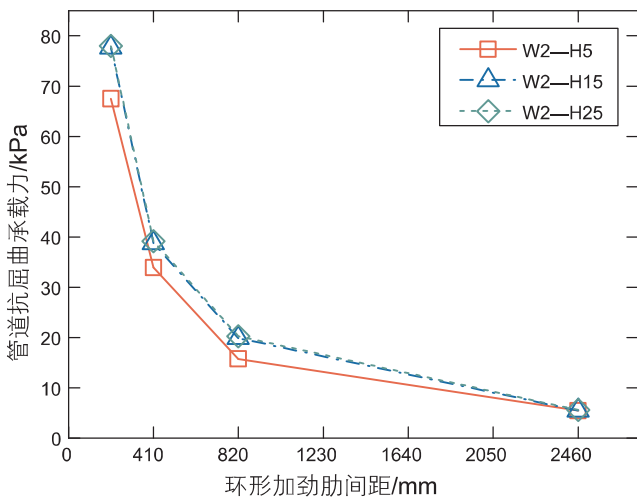


图 9 同等厚度但不同加劲肋高度和间距对管道抗屈曲承载力 P_{cr} 的影响
Fig. 9 The effects of the height and spacing of ring stiffener on the critical buckling pressure P_{cr} of pipeline

力的增加幅值为 37.15 kPa，增加幅度为 100.3%；而厚度为 6 mm 的加劲肋分别以 R7 和 R13 的方式布置时，其抗屈曲承载力的增加幅值为 49.96 kPa，增加幅度为 117.5%。

图 11 显示了在不同加劲肋布置方案中加劲肋厚度对管道抗屈曲承载力的影响。如图 11 所示，加劲肋厚度这一参数在 R2、R4 和 R7 这三种加劲肋布置方案（其加劲肋间距分为 2460 mm、820 mm 和 410 mm）中，对管道抗屈曲承载力 P_{cr} 的提高几乎无明显贡献，但在 R13 的加劲肋布置方案（即加劲肋间距为 205 mm）中，则加劲肋厚度可对管道的抗屈曲承载力的提高有一定程度的贡献。对于 R13 方案来说，当加劲肋的厚度从

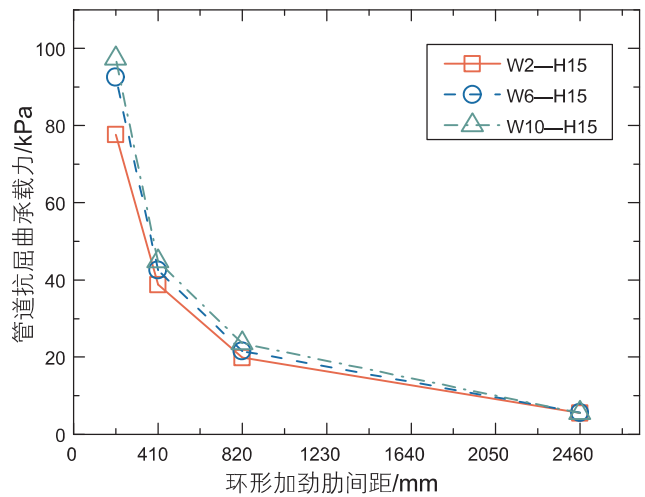


图 10 同等高度但不同加劲肋厚度和间距对管道抗屈曲承载力 P_{cr} 的影响
Fig. 10 The effects of the thickness and the spacing of ring stiffener on the critical buckling pressure P_{cr} of pipeline

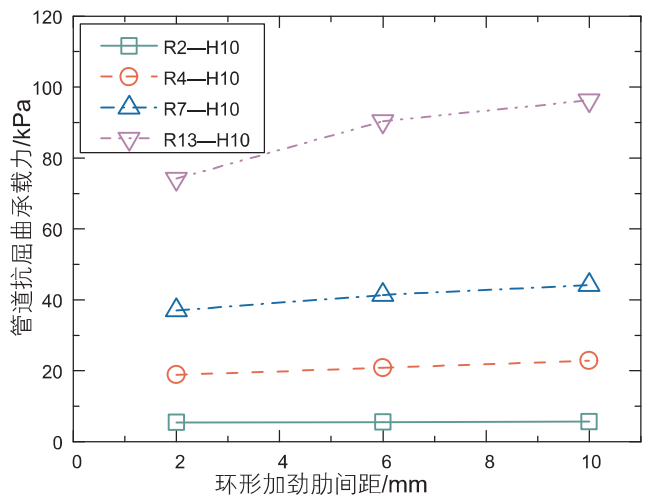


图 11 环向加劲肋厚度对管道抗屈曲承载力 P_{cr} 的影响
Fig. 11 The effects of the ring stiffener thickness on the critical buckling pressure P_{cr} of pipeline

2 mm增加到 6 mm(即增加了 200%)时, 其抗屈曲极限承载力仅提高了 21.9%; 当加劲肋的厚度从 6 mm 提高到 10 mm 时, 其极限抗屈曲承载力仅仅提高了 6.5%。综上所述, 加劲肋厚度这一参数, 对管道抗屈曲承载力 P_{cr} 的提高影响不是很大, 只有在加劲肋布置比较密时, 才有一定的敏感性, 而且当加劲肋厚度超过 6 mm 时, 这种影响将变得更加微小。因此, 通过提高加劲肋的厚度来提高管道的抗屈曲承载力, 并不是一个经济有效的手段。

如图 12 所示, 加劲肋高度对管道抗屈曲承载力的影响, 具有同加劲肋厚度这一参数相类似的趋势。具体说来, 在 R2、R4 和 R7 这 3 种加劲肋布置方案(其加劲肋间距分为 2460 mm、820 mm 和 410 mm)中, 加劲肋高度对管道抗屈曲承载力 P_{cr} 的提高几乎无明显贡献。在 R13 的加劲肋布置方案(即加劲肋间距为 205 mm)中, 加劲肋高度对管道抗屈曲承载力 P_{cr} 稍有影响, 但影响甚微。加劲肋高度对管道抗屈曲承载力 P_{cr} 影响不明显。在 R13 的加劲肋布置方案中, 当加劲肋高度从 5 mm 增大为 10 mm(即增加 100%)时, 其抗屈曲承载力仅提高 5.0%; 当加劲肋高度从 10 mm 增大为 15 mm(即增加 50%)时, 其抗屈曲承载力仅提高 2.3%; 当加劲肋高度从 15 mm 增大为 25 mm(即增加 66.7%)时, 其抗屈曲承载力几乎不变。综上所述, 提高加劲肋高度对加劲肋管道抗屈曲承载力的影响较小。

4 管道抗屈曲承载力计算模型

参数分析结果表明: 环向加劲肋的间距、厚度和

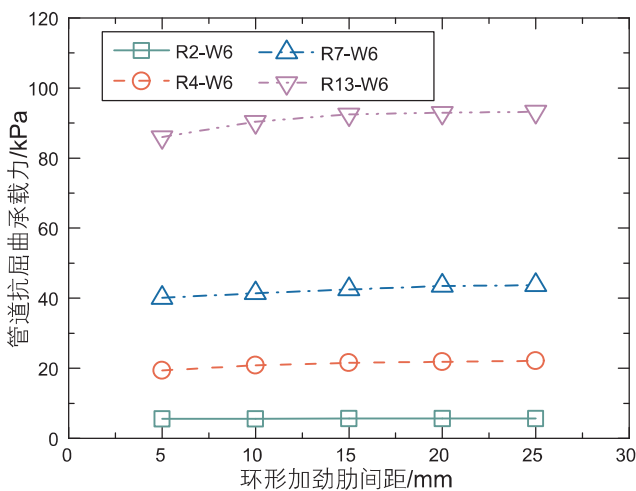


图 12 环向加劲肋高度对管道抗屈曲承载力 P_{cr} 的影响
 Fig. 12 The effects of the ring stiffener height on the critical buckling pressure P_{cr} of pipeline

高度对管道抗屈曲承载力 P_{cr} 均有一定的影响, 其中环向加劲肋间距对管道抗屈曲承载力 P_{cr} 的影响最为明显。参照无加劲肋管道抗屈曲承载力的表达式^[17], 建立考虑加劲肋影响的管道抗屈曲承载力表达式:

$$P_{cr} = kE \cdot \left(1 + \left(\frac{h}{t} \right)^\alpha \cdot \left(\frac{b}{L} \right)^\beta \right) \cdot \left(\frac{R}{L} \right)^\eta \cdot \left(\frac{t}{R} \right)^\gamma \quad (1)$$

式中, P_{cr} 、 h 、 b 、 L 、 R 、 t 、 E 分别为抗屈曲承载力、加劲肋高度、加劲肋厚度、加劲肋间距(管道计算长度)、管道半径、壁厚、材料弹性模量; k 、 α 、 β 、 γ 、 η 是相关影响系数。基于参数分析结果进行回归分析, 得出各系数值分别为: $k=0.693$ 、 $\alpha=0.177$ 、 $\beta=0.372$ 、 $\gamma=2.5$ 、 $\eta=1$ 。它们的标准差分别为 0.06, 0.02, 0.09, 0, 0。如图 13 所示, 所提出的计算公式的预测值与有限元方法分析结果吻合良好, 相关系数为 0.995 69, 预测模型具有较好的相关性。需要说明的是, 为保证环向加劲肋能有效将局部屈曲限制于环向加劲肋之间, 应保证加劲肋具备足够的刚度, 即加劲肋的厚度和高度。

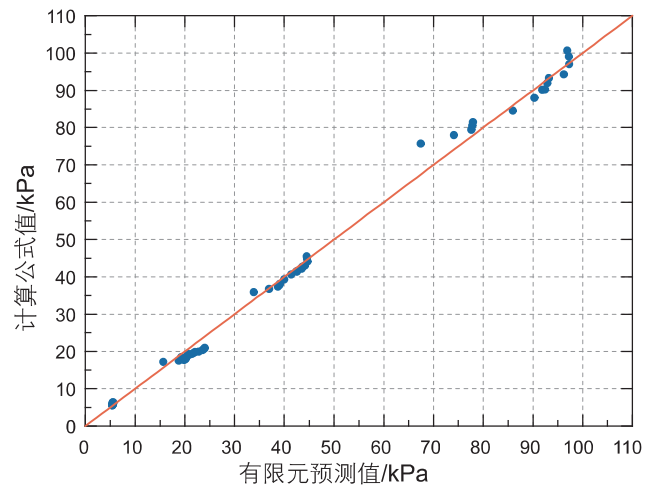


图 13 公式和有限元结果对比
 Fig. 13 Comparison of predicted values through formula and FE model

5 结论

本文基于大型有限元分析软件 ABAQUS 建立配置或不配置环向加劲肋的管道有限元模型; 通过将有限元模型结果与文献[7]中的试验结果进行对比, 来验证所建立管道有限元模型的准确性。在此基础上, 采用所建立的管道有限元模型分析加劲肋间距、厚度和高度对管道抗屈曲承载力 P_{cr} 的影响规律, 提出考虑环向加劲肋影响的抗屈曲承载力预测公式, 并得到以下主

要具体结论:

(1) 具有足够刚度的环向加劲肋能够有效将局部屈曲限制在相邻加劲肋之间, 从而改变管道的屈曲破坏模态, 并有效提升管道的抗屈曲承载力 P_{cr} 。

(2) 环向加劲肋的焊接会产生残余应力, 从而减弱加劲肋对管道的加强效果。因此, 准确的有限元模型应考虑残余应力的影响。

(3) 环向加劲肋的间距、厚度和高度对管道抗屈曲承载力 P_{cr} 均有一定的影响。其中, 间距对管道抗屈曲承载力 P_{cr} 的影响最为显著。

(4) 基于有限元参数分析结果所建立的可考虑环向加劲肋影响的管道抗屈曲承载力公式能够较好地预测结果, 可作为海底管道设置环向加劲肋的理论依据。

参考文献

- [1] PALMER A C, KING R A. Subsea pipeline engineering[M]. PennWell Corporation, 2008.
- [2] KYRIAKIDES S, CORONA E. Mechanics of offshore pipelines, volume 1: Buckling and collapse[M]. Elsevier, 2007.
- [3] 胡知辉, 佟光军, 郭学龙, 等. 国内外深水海底管道技术发展现状概述[J]. 石油工程建设, 2018, 44(5): 6–10. [HU Z H, TONG G J, GUO X L, et al. Overview on current status of deepwater pipeline technology development in China and abroad [J]. Petroleum Engineering Construction, 2018, 44(5): 6–10.]
- [4] FYRILEIV O, AAMLID O, VENAS A, et al. Deepwater pipelines—status, challenges and future trends[J]. Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2013, 227(4): 381–395.
- [5] Guide for building and classing subsea Shallow Cylindrical Shells Constructional Steel pipeline systems and risers[S]. Houston: American Bureau of Shipping, 2017.
- [6] CHEN J F, ROTTER J M. Effective cross sections of asymmetric rings on cylindrical shells[J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(9): 1074–1080.
- [7] SHOWKATI H, SHAHANDEH R. Experiments on the buckling behavior of ring-stiffened pipelines under hydrostatic pressure[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2010, 136(4): 464–471.
- [8] SHAHANDEH R, SHOWKATI H. Influence of ring-stiffeners on buckling behavior of pipelines under hydrostatic pressure[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 121: 237–252.
- [9] PEROTI S, RIAHI F, GHAEMIAN M, et al. Numerical analysis of ring-stiffener effect on ultimate buckling strength of pipeline[J]. Middle East Journal of Scientific Research, 2013, 13(5): 579–584.
- [10] RIAHI F, SHAMSAI A, RAHMANI K, et al. Obtaining optimal performance with ring stiffeners on strength for submarine pipeline[J]. World Applied Sciences Journal, 2011, 15(11): 1494–1502.
- [11] KARROUM C G, REID S R, LI S. Indentation of ring-stiffened cylinders by wedge-shaped indenters—Part 1: An experimental and finite element investigation[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2007, 49(1): 13–38.
- [12] JOHNS T G, MESLOH R E, SORENSON J E. Propagating buckle arrestors for offshore pipelines[C]//Offshore Technology Conference, 1976.
- [13] PALMER A C, MARTIN J H. Buckle propagation in submarine pipelines[J]. Nature, 1975, 254(5495): 46–48.
- [14] KYRIAKIDES S, BABCOCK C D. On the dynamics and the arrest of the propagating buckle in offshore pipelines[C]//Offshore Technology Conference, 1979.
- [15] ESTEFEN S F, AGUIAR L A D, ALVES T M J. Correlation between analytical and experimental results for propagation buckling[C]//Proc., 15th Int. Conf. of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1996.
- [16] STEEL W J M, SPENCE J. On propagating buckles and their arrest in sub-sea pipelines[C]//Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1983.
- [17] SHOWKATI H, ANSOURIAN P. Influence of primary boundary conditions on the buckling of shallow cylindrical shells[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1996, 36(1): 53–75.

(责任编辑 李世远 编辑 马桂霞)