

文章编号:1005-9865(2018)02-0001-08

深水管道抗压承载力海上试验设想与分析

余建星^{1,2}, 安思宇^{1,2}, 孙震洲^{1,2}, 段晶辉^{1,2}, 蒋梅荣²

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

摘 要:截至目前,国内外少有成功开展深水管道抗压承载力海上试验的案例,而海上试验对于验证室内压力舱模拟试验结果可靠性是非常必要的。对深水管道屈曲压溃及屈曲传播海上试验进行了设想和分析,并设计了试验流程。考虑到室内压力舱的加载特性,屈曲传播试验会受到若干因素影响,结合数值模拟,考虑屈曲传播海上试验中可能出现的各种加载条件对管道屈曲传播压力的影响进行了研究。数值模拟的结果与室内压力舱试验的结果之间存在一定差异,对该现象存在的原因进行了分析。还对试验中可能存在的问题及需要注意的关键难点提出了解决方案。

关键词:深水管道;海上试验;屈曲传播;数值模拟

中图分类号:TE88 **文献标志码:**A **DOI:**10.16483/j.issn.1005-9865.2018.02.001

Envisage and analysis of sea trial on deep-water pipeline's resistance to external pressure

YU Jianxing^{1,2}, AN Siyu^{1,2}, SUN Zhenzhou^{1,2}, DUAN Jinghui^{1,2}, JIANG Meirong²

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: There are few successful cases of sea trial on deep-water pipeline's resistance to external pressure until now. However, it is significantly important to verify the reliability of the results obtained by indoor full-scale hyperbaric chamber. Sea trial on collapse and buckling propagation of deep-water pipeline is envisaged and analyzed, as the test scheme is designed. With consideration of the loading identity of indoor chamber, the test on buckling propagation could be affected by several factors. The influences caused by variable loading conditions on the buckling propagation pressure of pipeline are studied by using finite element method. There are some differences between the conclusions drawn by the numerical simulation and the test implemented in full-scale hyperbaric chamber, the reasons of which are analyzed. Some possible problems which could happen in sea trial are considered, and solutions to key difficulties are proposed.

Keywords: deep-water pipeline; sea trial; buckling propagation; numerical simulation

近年来,我国石油产量稳步提升,而增量主要来自海洋石油开发。油气输送的主渠道是深水海底管道,海底管道保证了整个系统的正常运行,其稳定性和安全性对于海洋油气开发极为重要。海底管道在外部水压的作用下,有可能发生屈曲压溃,使管道发生屈曲压溃的最小外压称为管道的压溃压力。在管道发生压溃

收稿日期:2017-04-24

基金项目:国家重大科技专项资助项目(2016ZX05028005-004);国家重点基础研究发展规划(973计划)(2014CB046805);国家自然科学基金资助项目(51239008)

作者简介:余建星(1958-),男,福建泉州人,博士,教授,博士生导师。主要从事船舶与海洋结构物结构可靠性分析及优化,海洋油(气)工程开发等方面的研究。

通信作者:安思宇。E-mail:anmcy@sina.com

破坏后,只要外部水压达到一定值,这种局部的压溃变形就可以快速地沿管长传播,引发整条管道的破坏,该现象称为屈曲传播。维持管道屈曲传播发生所需的最小外压称为管道屈曲传播压力。屈曲压溃压力和屈曲传播压力是深水管道抗压承载力的具体体现。如图 1 所示的深海压力试验舱,可对管道进行全尺寸试验^[1],得到全尺寸管道的压溃压力和屈曲传播压力。

压力舱模拟试验是研究中常用的临界承载力追踪方法,但受限于其内部有限的容积,在管道后屈曲的大变形过程中难以对舱内进行精确的有效保压,同时管道周围的流场情况也与实际海水中存在较大差异。从某种意义上说,即使是全尺寸的压力舱模拟试验,也无法完全还原管道运行时所处的真实环境状态,其试验测得的管道压溃压力和屈曲传播压力是否真正可靠仍然缺乏充分的论证。因此利用该试验装置模拟深水环境加载试验的结果,必须通过海上试验进行验证。

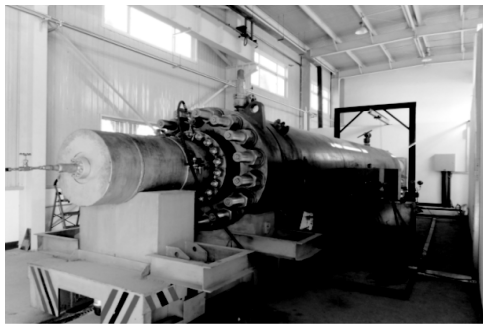


图 1 深水全尺寸压力舱

Fig. 1 Deep-water full-scale hyperbaric chamber

国内外成功开展了若干针对耐压壳的海上试验,如韩国 P Lee、B Jun 在东海和菲律宾海进行的深水遥控无人潜水器试验^[2], Michael Hamilton、Stephanie Kemna 进行的反潜 AUV 海上试验^[3],还对各种类型的水下工作系统^[4]和水下装置^[5]进行了海上试验。我国也于 2009 年 8 月至 2012 年 7 月完成了 1 000、3 000、5 000 和 7 000 m 的“蛟龙号”载人潜水器的海上试验^[6-8]。但截至目前,这类针对耐压壳的海上试验仍集中在潜水系统和潜水器上,对于深水管道的海上试验,国内外少有成功开展的案例。

1 海上试验流程设计

1.1 屈曲压溃试验

海底管道屈曲压溃海上试验的最大挑战在于控制变量,保证试验组与对照组管道的特征一致。以目前我国的海上支撑技术水平,能够比较安全和从容地进行试验,同时可以保证试验成本较小的最大水深在 500 m 左右,外部水压约为 5 MPa。而对于更深的水域,试验成本会迅速增加,各种试验仪器的安全性和稳定性也会受到影响。

在 5 MPa 的载荷水平下,在不人为施加初始缺陷的前提下,海底管道能够发生屈曲压溃的可能性不大。因此需要提前在陆上施加足够大的缺陷,以保证管道的顺利压溃。可以利用重物冲击或千斤顶挤压等手段对管道施加缺陷,但需避免输入的能量过大给管件带来非屈曲压溃形式的破坏,比如局部裂缝、整体弯曲等,以免增加试验过程的干扰因素。由于屈曲压溃压力的大小与缺陷形式、幅值、轴向区域长度等影响因素之间关系密切,因此在添加腐蚀缺陷时要保证海上试验同其室内试验对照组保持初始条件的精确一致,否则屈曲压溃压力之间的对比不容易实现。

试验流程可设计为以下五步。

第一步,随机选取两组尺寸和材质均相同的管件,分别设置编号为 A 和 B, A 管件定义为试验组, B 管件定义为对照组。

第二步,在 A、B 两组管件的端部均人为设置一个冲击或腐蚀,必须保证完全相同。

第三步,将 B 管件送入全尺寸压力舱中进行加压试验,在发生屈曲压溃后,停止加载并记录压溃压力。之后卸压并将管件出舱。

第四步,将 A 管件运往海上试验相应地点,吊装入水。室内全尺寸压力舱在压溃加载阶段可以实现准静态加载。因此海上试验中管道的下沉过程应尽量缓慢,以保证准静态的载荷条件,直到管道发生压溃。记录管道压溃时的水深,并根据当地海水密度换算成压力,即为屈曲压溃压力。

第五步,比较 A、B 管件的屈曲压溃压力,得到结论。

1.2 屈曲传播试验

海底管道屈曲传播海上试验比屈曲压溃海上试验具有更高的可行性。一方面,对于给定的管道,屈曲传播压力只与其径厚比和材料性质有关,而与导致屈曲压溃的初始缺陷无关,控制变量较少,容易实现试验组

与对照组之间的比较;另一方面,诱发结构屈曲传播的临界压力值通常较低,同样对于尺寸为 325 mm×10 mm 的 API 5L X65 管件,屈曲传播压力室内试验值为 2.68 MPa^[9],仅仅约相当于 270 m 水深压力,远小于其屈曲压溃压力。

试验流程可设计为以下五步。

第一步,随机选取两组尺寸和材质均相同的管件,分别设置编号为 A 和 B, A 管件定义为试验组, B 管件定义为对照组。

第二步,在 A、B 两组管件的端部均人为设置一个 5% 左右的初始椭圆度,具体位置、幅值可适当地进行调整,不必保证完全精确或相同,只需保证缺陷施加后管件不出现裂纹或明显的弯曲即可。

第三步,将 A 管件送入全尺寸压力舱中进行加压试验,在发生屈曲压溃后,小心地控制试验过程,利用压力舱内的深海摄像头观察舱内管件的变形情况,同时观测压力采集的实时数据,在压溃截面刚刚发生内壁之间的接触,尚未发生屈曲传播现象,即在已压溃区间曲线开始显著上升的时刻,停止加载,卸压并将管件出舱;相应地,将 B 管件送入全尺寸压力舱中进行加压试验,并依照已有流程完成屈曲传播试验,记录其屈曲传播压力。

第四步,将 A 管件运往海上试验相应地点,吊装入水。由于压溃变形后的管道体积发生变化,室内全尺寸舱在屈曲传播过程中的加载呈动态稳定趋势。下沉过程应模拟该加载过程,管道迅速下沉 10 m 深度,之后停止一段时间,再继续下沉,重复该过程直至屈曲传播发生。A 管件加载过程如图 2 所示,在管道已经屈曲压溃并且发生了内壁接触的情况下,经过一段时间的卸载回弹,再对管道施加如图 2 后段的时程载荷,即在相对较短的时间内实现增压,随后保持一段时间的该压力,重复该过程直到发生屈曲传播。

第五步,比较 A、B 管件的屈曲传播压力,得出结论。

2 数值模拟

对于室内全尺寸压力舱而言,前屈曲加载阶段由于管道还没有产生压溃变形,因此可以实现准静态加载,海上试验中只需保证管件下沉速度尽量缓慢,即可实现室内试验与海上试验加载过程一致。而对于屈曲传播过程,海上试验需要模拟室内全尺寸舱在屈曲传播过程中动态稳定的加载过程,导致会有若干因素对管道屈曲传播压力产生影响。因此在海上试验前,需要对试验中可能存在的敏感性因素进行讨论和分析。通过进行数值仿真模拟,预估试验现象并辅助试验设计。

2.1 基本设置

在大型有限元商业软件 ABAQUS 中,采用可以自由设置加载曲线幅值的动力隐式加载方法^[10]。为方便对比,仍选用 325 mm×10 mm 的 API 5L X65 管件作为算例,密度设为 7 850 kg/m³。管道及止屈器材料的弹性模量及泊松比可以通过测量得到,并利用 Ramberg-Osgood 方程拟合得到材料的屈服应力-塑性应变曲线,方程如下:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \left[1 + \frac{3}{7} \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^{n-1} \right] \quad (1)$$

式中: ε 为应变, σ 为应力, σ_y 为材料的屈服应力, E 为材料的杨氏模量,取 n 为 10.7,得到相应材料属性。

2.2 数值模拟步骤设计

在第一个加载步里,管道端部的初始椭圆度设置为 8%,这种情况下管道端部发生压溃的最小压力值约为 4.4 MPa。对管道外表面施加峰值为 5 MPa 的恒定水压外载荷。恒定外压载荷的作用时间最少约为 0.005 1 s,才能使得具有椭圆度缺陷的管道端部发生屈曲压溃,并使管道内壁逐渐接近刚性平面并最终与其相接触。在第一个加载步内,管道的变形过程如图 3 所示。

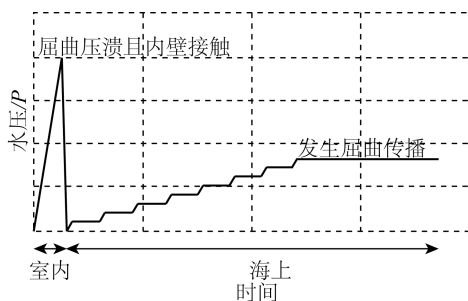


图 2 A 管件水压外载荷历时曲线

Fig. 2 Historical external pressure amplitude of pipe A

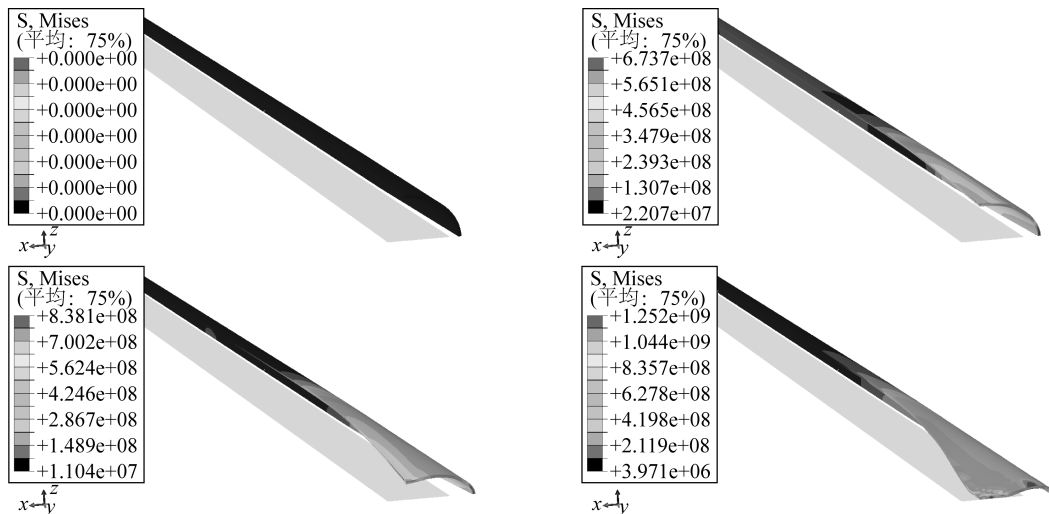


图 3 加载步一:管道屈曲压溃至内壁接触

Fig. 3 Step-1: deformation of pipe from initial state to inner-wall contact by collapsing

在第二个加载步里,对管道外表面施加的压力迅速降低为零,并维持一段时间。在此过程中,由于管道材料的弹塑性特性,已变形的结构会发生轻微的回弹。如图 4 所示,通过数值模拟的结果可以明显地看出,管道外壁上的应力分布以及变形情况会在回弹过程中发生变化,但变化的程度极小,可以认为卸载出舱对管道结构整体的变形影响不大。

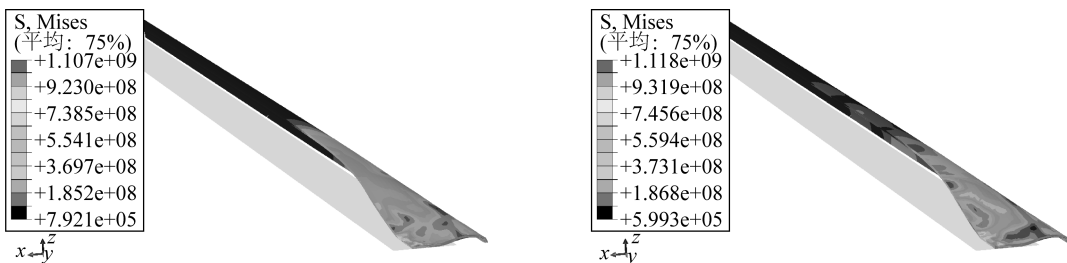
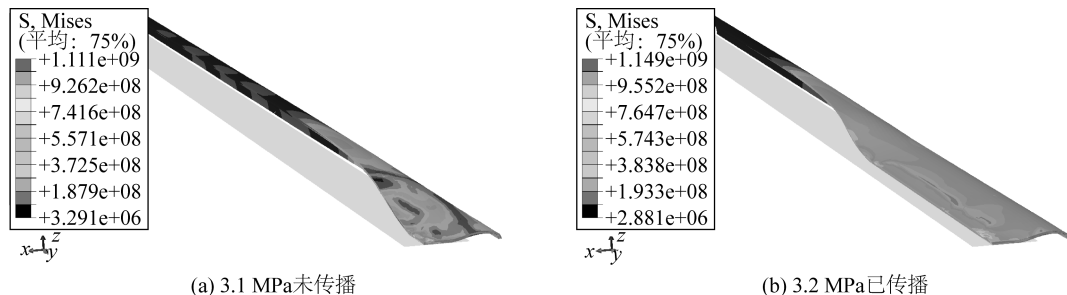


图 4 加载步二:卸载回弹

Fig. 4 Step-2: unloading and resilience

在第三个加载步里,重新对管道外表面施加如图 2 后期曲线所示的时程压力载荷。由图 5 可知,在到达临界压力值 3.2 MPa 之前,结构上不会有屈曲传播大变形出现,外压可持续增加直至发生屈曲传播。这验证了管道结构在内壁发生接触之后,重新获得了稳定的平衡构型,不会因微小扰动就发生随遇平衡,在理论上得到的临界压力值是唯一的,这符合屈曲传播压力的定义。



(a) 3.1 MPa 未传播

(b) 3.2 MPa 已传播

图 5 加载步三:管道屈曲状态

Fig. 5 Step-3: buckling status of pipeline

2.3 敏感性因素讨论与分析

在加载步三中设置多组算例,研究各种敏感性因素对其临界压力值的影响。

如图 6(a) 所示,在保持初始载荷的加载和卸载时间固定情况下,改变后续加载步的初始载荷大小或者加载方式对于管道的屈曲传播压力没有影响。将载荷停留时间(维持当前外压时间)分别取值 0.03、1、10 和

50 s,梯度加载时间(外压上升 0.1 MPa 所需时间)分别取值 0.001、1 和 10 s,将算例结果按一定比例绘制于图 6(b),可见管道的屈曲传播压力都没有发生改变。可见,改变后续载荷的梯度加载时间和停留时间对于最终的屈曲传播压力同样没有影响。对于海上试验,管件的入水过程和入水速率对于管道的屈曲传播压力并不会会有明显的影响。从实际情况考虑,为了避免吊机出现故障或数据采集不准确等情况,下放速率和载荷停留时间可适当缩短,宜采用算例 1 的方式,先快速下沉至 200 m(水压 2 MPa),之后进行适当的阶梯状加载。

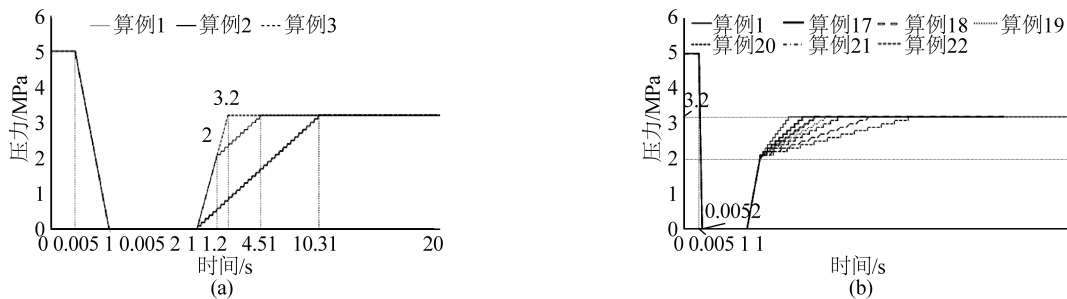


图 6 梯度加载时间和停留时间对屈曲传播压力的影响

Fig. 6 The impact of gradient-loading time and pause time on propagation pressure

在图 7 所示算例中,保持 5 MPa 初始载荷的加载时间以及后续加载过程不变,改变其卸载时间(初始外压降低为零所需时间)。显见的是,改变卸载时间,即改变前屈曲加载总时间的长度,对于管道的屈曲传播压力有显著的影响。在图 8 所示算例中,改变加载步二中载荷的间隔时间,对于管道的屈曲传播压力并没有明显的影响,这说明管道在卸载结束到重新加载的过程中,不会因为管道的弹塑性回弹而产生明显应力状态和几何形式上的变化。从实际情况考虑,海上试验中运输和储存等关键步骤对管道结构整体的抗压承载力影响不大。

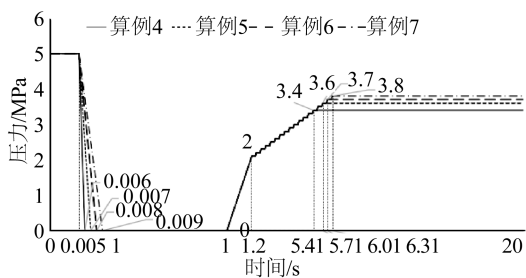


图 7 卸载时间对屈曲传播压力的影响

Fig. 7 The impact of unloading time on propagation pressure

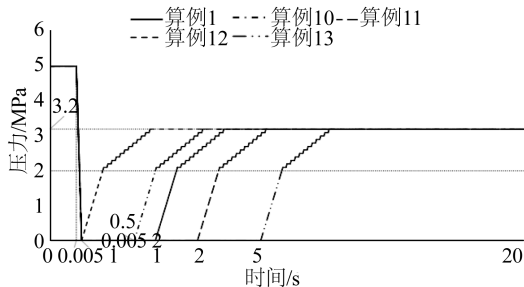


图 8 加载间隔时间对屈曲传播压力的影响

Fig. 8 The impact of interval time on propagation pressure

加载步一中的前屈曲加载同样会对屈曲传播压力造成影响。如图 9(a) 所示,保持加载时间和卸载时间固定,分别设置初始载荷大小为 5~8 MPa,管道的屈曲传播压力会随着前屈曲载荷增大而增加。在图 9(b) 中,改变前屈曲加载载荷大小的同时也对加载时间(外压提高至设定值所需时间)进行调整。将算例 3 与算例 9 相对比,可以发现在前屈曲过程载荷保持为 5 MPa 的情况下,加载方式和加载持续时间会对管道屈曲传播压力产生影响。

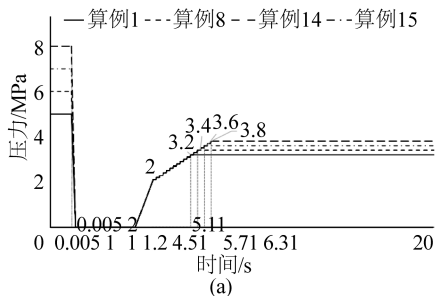
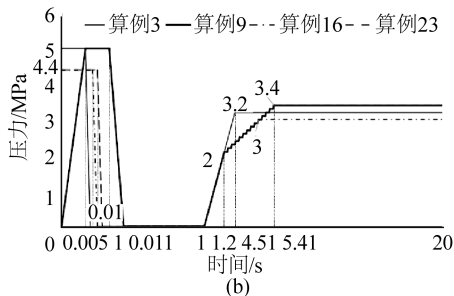


图 9 前屈曲加载对屈曲传播压力的影响

Fig. 9 The impact of loading in Step-1 on propagation pressure



在算例 16、23 中,对管道施加 4.4 MPa 的外压,持续时间分别为 0.065 和 0.075 s,管道的屈曲传播压力也随着前屈曲加载时间变长而增加。

对于上图中的若干算例,加载方式得到的屈曲传播压力比全尺寸试验模拟结果 2.8 MPa 要高。需要注意到该模拟加载过程同试验流程设计相比存在以下两点差异。

第一,卸载的速率不同。室内压力舱中,一旦管道发生局部屈曲压溃的大变形,外部压力会瞬间降低。但在有限元模拟中很难定义与准静态卸载过程完全一致的载荷幅值曲线,因此设置的是在一个非常短的时间之内回零。图 7 给出了卸载时间对屈曲传播压力的影响,可见卸载所用的时间越长,则最后维持屈曲传播的压力就越高。

第二,前屈曲加载载荷的条件不同。室内压力舱中,前屈曲阶段的压力逐步上升到屈曲压溃压力。但在有限元模拟中,为了保证内壁相接触,同时更直观地研究前屈曲加载对管道屈曲传播的影响,施加的外载荷要高于屈曲压溃压力,并且要保持一段时间的恒定,这与全尺寸试验舱内压力从零增至压溃压力后瞬间降为零有所不同。图 9 给出了前屈曲加载对屈曲传播压力的影响,可见加载幅值越高,作用时间越长,最后维持屈曲传播的压力就越高。

上述两个差异的共性是有限元模拟加载阶段输入结构的外力功比压力舱试验或准静态过程中的都要大。由于结构响应的动能很小,因此多出的大部分外力功转化为了额外的应变能^[11],使得内壁接触后截面被压溃的程度增大,也同时提高了其承载力,最终使得屈曲传播压力增大。这一现象也表明,在实际工程的恒压工况下,如果海底管道所处的水深压力较大,一旦因偶然事件发生了局部屈曲压溃,虽然屈曲传播很难避免,但能够维持其发生传播的最小压力应该比设计的屈曲传播压力要大。这一结论有利于止屈器的优化设计。同时,对于结构而言,准静态方法实现了力的平衡,这就意味着找到了能够使结构产生力平衡状态最小的变形情况。准静态方法得出的压力值,其实是管道理论上的最小屈曲传播压力。而动力学算法实现的是能量的平衡,这也会造成一定程度上的数值差异。

综上,通过有限元模拟,得到了 325 mm×10 mm 的 API 5L X65 管件在不同条件下海上试验的预估屈曲传播压力。在实际试验中,可结合试验海域的海水密度,设计试验下放的速度和深度等参数。

3 试验讨论

在第 2 节中,通过数值模拟对可能存在的影响管道屈曲传播压力的敏感性因素进行了计算和分析,在实际海上试验中,可以此为依据辅助试验设计。对于海上试验,除了需要在试验前完成试验方案和流程的设计,还需要解决试验中可能存在的问题。

3.1 管件在室内压力舱模拟试验中加载停止时刻的控制

图 10 所示为深水管道一般加载曲线。对于屈曲压溃试验,只要管件在压力舱中出现压溃变形,即可停止加载,读取压溃压力数据。对于屈曲传播试验, $T_1 < T \leq T_3$ 区间内的管道处于理论上的后屈曲不稳定平衡状态。直至内壁发生接触,曲线表示的外压承载力开始上升,则意味着结构重新获得相对稳定的构型。如果在内壁接触之前过早地停止试验并出舱,已局部压溃的管件尚处于不稳定的构型,停止加载点一旦位于 T_1

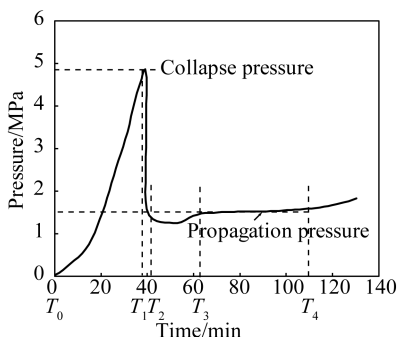


图 10 深水管道一般加载曲线

Fig. 10 General loading curve of deep-water pipeline

和 T_2 之间高于屈曲传播压力的位置,则在海上试验的过程中,极有可能在预期的水深条件下还不足以诱发屈曲传播,导致试验失败;反之,如果在内壁接触之后不及时停止试验并出舱,则试件有可能已经发生了相当程度的屈曲传播,留给海上试验的试验段过短,难以辨别失效情况。内壁接触点前后曲线的发展趋势相对平缓,不易及时发现和捕获。因此,在实际试验操作过程中的这一阶段,需要试验人员同时密切注意舱内摄像和实时压力数据采集的情况,控制好停止加载的时刻,从而保证后续试验步骤不受影响。

3.2 管件在海上试验中是否已发生屈曲压溃或屈曲传播的测量或判定

由于深水条件的限制,进行海上试验时很难在管件上布置传感器或应变片等结构信号采集装置。唯一的办法是利用如图 11 所示的实时图像采集装置,从外部进行视觉观测,以结构是否已发生大变形来进行判定。该方法存在以下三个难题需要处理和克服。



图 11 深海摄像头(承压能力 60 MPa)

Fig. 11 Deep-sea camera (capacity 60 MPa)



图 12 水下吊笼

Fig. 12 Underwater cage

1) 搭载工具或方式。深海摄像头最佳的搭载工具为 ROV,但考虑到海上试验并非作业单位的生产任务,很难征用到适合试验要求的 ROV。可行的替代方法是将深海摄像头焊接在管端法兰或放置管件的吊笼上(如图 12 所示),与管件同时沉入水中。

2) 能见度。海上试验的地点应尽可能靠近实际工程的作业地点,比如海油工程公司某项目所处的文莱附近某海域,计划作为海上试验场。其最大水深在 500 m 左右,水质比较清澈。但在水下的能见度范围并不大,深海摄像头必须同时配备 LED 等照明设备,确保能够及时、准确地观察到屈曲传播的发生。如果单个摄像头的能见度为 3~4 m,则仅布置一个摄像机在管道端部即可,此时可采用撑杆吊装管件入水的方式;如果单个摄像头的能见度仅为 1~2 m 甚至更小,则必须沿管道试件轴向布置多个机位,其间隔与具体数量取决于能见度的具体值,此时必须采取将管件置于吊笼中入水的下放方式。

3) 供电方式与电源续航能力。图 11 所示的深海摄像头一般用于压力舱模拟试验,由电缆供电,不能直接用于水中。海上试验中必须采取电池供电方式,且密封性能要保证良好。由于观测与记录数据的需要,管件的吊装下放过程在预计会发生屈曲传播的深度附近,每间隔 0.1 MPa 将停留一定时间,因此总试验持续时间会在 30 min~1 h 以上,必须保证电源电量足够支撑该工作时间。除此之外,试验之前必须安排备用摄像头与电源,随时做好应对突发情况的准备。

3.3 能够保证试验结果可靠性的最短持续时间

海上试验需要租赁工程作业船舶,安排相应的试验操作人员,一般情况下会依托于某个正在实施的海上工程项目。在此情况下,海上试验的持续时间应尽可能短。不过,海上的实际环境比较复杂,吊机功率也存在一定限制,所以海上试验的时间也不能无限期缩短。具体的下放速率、观测起始深度和某一深度处的停留时间需要与试验设计人员和操作人员沟通确定,设置能够保证试验结果可靠性的最短持续时间。

4 结 语

对深水管道海上试验进行了设想与分析,得到了以下结论:

1) 对国内外少有开展的深水管道抗压承载力海上试验进行了构思,对屈曲压溃及屈曲传播海上试验进行了讨论和设计。海上试验可以克服室内全尺寸压力舱的不足,通过对管件进行真实环境及海况的试验,可以验证室内全尺寸压力舱的准确性和工程实用性。

2) 通过有限元数值模拟对影响管道屈曲传播压力的敏感性因素进行了计算和分析,结果显示:梯度加载时间、载荷停留时间、卸载时间、加载间隔等对于管道屈曲传播承载力没有明显影响,而前屈曲加载过程会对管道屈曲传播承载力产生重要影响。

3) 海上试验中,除了试验前需要完成试验方案和流程的设计,试验中还可能存在着某些问题。对一些关键难点进行了分析,并提出了解决方案。

参考文献:

- [1] 杨源. 海底管道屈曲失效机理及其防护研究[D]. 天津: 天津大学建筑工程学院, 2013: 41-43. (YANG Yuan. The research of submarine pipeline buckling failure and buckle arrestor [D]. Tianjin: School of Civil Engineering of Tianjin University, 2013: 41-43. (in Chinese))
- [2] LEE P, JUN B, KIM K, et al. Sea-trial and experimental results of the deep-sea unmanned underwater vehicles, HEMIRE and HENUVY [C]//Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies. Symposium on. IEEE, 2007:276-284.
- [3] M J H, KEMMA S, HUGHES D. Antisubmarine warfare applications for autonomous underwater vehicles: The GLINT09 sea trial results[J]. Journal of Field Robotics, 2010, 27(6):890-902.
- [4] AZOU S, BUREL G, DUFF L L, et al. Sea trial results of a chaotic direct-sequence spread spectrum underwater communication system [C]//Oceans. IEEE, 2003(3): 1 539-1 546.
- [5] JEANS G, BELLAMY I, DE VRIES J J, et al. Sea trial of the new datawell GPS directional waverider [C]//Current Measurement Technology, Proceedings of the IEEE/OES Seventh Working Conference on. IEEE Xplore, 2003:145-147.
- [6] 崔维成, 刘峰, 胡震, 等. 蛟龙号载人潜水器的 5 000 米级海上试验[J]. 中国造船, 2011, 52(3): 1-14. (CUI W C, HU Z, YE C, et al. Sea trials of deep manned submersible “Jiaolong” at the depth of 5 000 m [J]. Shipbuilding of China, 2011, 52 (3): 1-14. (in Chinese))
- [7] 崔维成, 刘峰, 胡震, 等. 蛟龙号载人潜水器的 7 000 米级海上试验[J]. 船舶力学, 2012, 16(10): 1 131-1 143. (CUI W C, HU Z, YE C, et al. Sea trials of deep manned submersible “Jiaolong” at the depth of 7 000 m [J]. Journal of Ship Mechanics, 2012, 16(10): 1 131-1 143. (in Chinese))
- [8] FENG L, CUI W C, LI X Y. China’s first deep manned submersible, JIAOLONG [J]. Science China Earth Sciences, 2010, 53 (10): 1 407-1 410.
- [9] YU J X, SUN Z Z, LIU X X, et al. Ring-truss theory on offshore pipelines buckle propagation [J]. Thin-Walled Structures, 2014, 85:313-323.
- [10] Dassault System Simulia Corporation. Abaqus 6.10 analysis user’s manual Volume II: Analysis [M]. 2010.
- [11] HERYNK M D, KYRIAKIDES S, ONOUFRIOU A, et al. Effects of the UOE/UOC pipe manufacturing processes on pipe collapse pressure [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2007, 49(5):533-553.