

文章编号:1005-9865(2018)02-0092-08

椭圆度-凹坑双缺陷海底管道局部屈曲特性研究

薛陆丰¹, 余 杨¹, 余建星¹, 徐立新¹, 高静坤², 刘 浩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. 中海石油 深海开发有限公司, 广东深圳 518000)

摘 要:海底管道在制造、埋设以及使用过程中极易产生椭圆度-凹坑双缺陷, 双缺陷影响管道局部屈曲, 对含椭圆度-凹坑双缺陷海底管道的局部屈曲特性研究十分必要。现行规范中采用等效椭圆度对含椭圆度-凹坑海底管道进行评估, 该方法无法准确评估不同缺陷形式的屈曲特性。采用形状系数对含椭圆度-凹坑双缺陷的海底管道进行评估, 运用有限元软件 ABAQUS 进行数值模拟, 并进行试验验证。在此基础上对含有不同凹坑深度、不同椭圆度的海底管道进行局部屈曲的数值模拟, 计算不同形状椭圆度、含有不同凹坑深度海底管道的形状系数, 对其进行敏感性分析。计算结果表明: 形状系数对海底管道椭圆度、凹坑深度、径厚比敏感性较强; 对凹坑宽度敏感性较弱。

关键词:海底管道; 椭圆度; 凹坑; 有限元分析; 局部屈曲

中图分类号: P754 文献标志码: A DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2018.02.011

Local buckling study on subsea pipeline with ellipticity-denting defect

XUE Lufeng¹, YU Yang¹, YU Jianxing¹, XU Lixin¹, GAO Jingkun², LIU Hao²

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. CNOOC Deepwater Development Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: Ellipticity and denting easily occur in the manufacturing, burying and using of subsea pipelines, and double defects will influence the local buckling of subsea pipelines. Therefore, it is important to study the local buckling of subsea pipeline with ellipticity-denting defect. The assessment method for the subsea pipelines with ellipticity-denting defect in current codes uses equivalent ellipticity to describe the defect, but the method can't describe the buckling behavior of different defects. Coefficient of shape is used to describe the elliptical and denting defects with more accurate results. Finite element software ABAQUS is used to numerically simulate the local buckling of subsea pipelines with different ellipticities or denting depths to calculate the coefficient of shape, and to analyse the sensitivity of the coefficient of shape. The result shows that the coefficient of shape is sensitive to the ellipticity, denting depth and diameter-thickness ratio; and the width of denting doesn't influence a lot.

Keywords: subsea pipeline; ellipticity; denting; finite element analysis; local buckling

海底管道对于海上油气运输起到了关键的作用, 具有便捷、连续、输送量大等诸多优点, 被称为海上油气田的生命线。海底管道在外压作用下, 会发生局部屈曲, 初始缺陷的存在会加剧管道的局部屈曲, 局部屈曲一旦形成, 非常容易沿管长方向传播, 导致整个海底管线失效。局部屈曲问题成为海底管线设计和管道生产过程中必须研究的重要问题。

收稿日期: 2017-04-25

基金项目: 国家工信部高技术船舶科研项目“500米水深油田生产装备 TLP 自主研发”(CCL2016SZGF0003); 国家科技重大专项资助项目(2016ZX05028005-004); 国家自然科学基金青年基金资助项目(51609169)

作者简介: 薛陆丰(1992-), 男, 浙江嘉兴人, 硕士研究生, 从事海洋工程专业研究。E-mail: jeffxue_1992@yeah.net

通信作者: 余杨。E-mail: yang.yu@tju.edu.cn

由于制管工艺的限制,海底管道在生产过程中不可避免会含有一定的初始椭圆度,同时在管道铺设过程中,装吊、安装也会产生椭圆度。另外,在管道的使用过程中,抛锚、落物等会使得管道结构的外管产生凹坑缺陷。在海底管道的生产和使用过程中,往往同时存在椭圆度和凹坑两种缺陷,单纯评估椭圆度或凹坑缺陷下海底管道的屈曲特性难以满足实际工程需求。因此,对含初始椭圆度-凹坑双缺陷的海底管道屈曲特性研究具有重要的实际工程意义。

针对含椭圆度或凹坑的海底管道的局部屈曲,国内外学者开展了相关研究。Wierzbicki 等忽略剪切的影响,建立两端完全约束时凹坑深度与凹坑载荷的关系^[1];美国石油协会通过管道试验,得到凹坑载荷与凹坑深度的经验关系式^[2];S Kyriakides 等通过数值分析以及物理实验对不同凹坑形状对管道压溃压力的影响进行了研究^[3];Park 等对不同径厚比的海底管道进行了研究,得到了初始椭圆度与屈曲压力的关系曲线^[4]。

余建星等在深海压力舱进行了不同椭圆度管道的全尺寸压溃试验^[5];何璇建立含凹坑的海底管道的有限元模型,对其进行加载纯外压、纯弯矩的数值模拟,得到了纯载荷作用下临界载荷的拟合公式^[6];焦中良、帅健采用弹塑性断裂理论对含裂纹和划伤凹坑的剩余强度进行了计算,结合国外主要标准以及凹坑自身特性,提出了管道凹坑完整性评价体系^[7]。

然而,国内外学者对于海底管道局部屈曲特性的研究多停留于单缺陷方面,对双缺陷共同作用下的管道屈曲研究较少,对椭圆度-凹坑双缺陷的管道的评估方法不完善。因此,本文基于 ABAQUS 有限元软件研究了初始椭圆度以及凹坑缺陷同时存在的管道的局部屈曲机理,对不同初始椭圆度管道的局部屈曲随凹坑深度变化的规律进行了分析,提出了用形状系数 C_s 去评估椭圆度-凹坑双缺陷管道局部屈曲的方法。

1 缺陷描述

1.1 凹坑

凹坑是海底管道几何缺陷最常见的形式之一。在管道服役周期的各个阶段都有可能产生凹坑,管道在受到外部挤压或者碰撞(例如海上落物撞击、拖网捕鱼、船舶起抛锚作业等)而产生径向位移形成的缺陷,是管壁永久塑性变形使其横截面发生的总的变形。凹坑一旦形成,将会直接影响管道的局部应变、剩余强度以及疲劳寿命,给海底管线系统安全运行带来潜在危害。

根据导致管壁曲率发生平滑或急剧改变,凹坑可分为平滑凹坑和曲折凹坑。当管道在外界载荷作用下产生凹坑时,若管道不存在厚度减薄和其它缺陷(如沟槽、焊缝或裂纹),该凹坑称为单纯凹坑^[8]。对于单纯凹坑的评估,工程上采用绝对凹深和相对凹深两种评估方法。如图1所示,绝对深度 H 是指管道在直径方向上凹陷深度值,而相对凹深 H/D 是指绝对深度 H 与原管直径 D 的比值。

美国机械工程师协会的 ASMEB 31.8 将临界深度定义为外径的 6%^[9];美国石油协会的 API 579 确定深度小于外径的 7% 即可视为安全^[10], API PUBL 1156 认为深度小于外径的 2% 时安全,在 2%~6% 之间需要进行疲劳评估,大于 6% 时则不安全^[11]。

相对深度的评估方法固然简便,但是随着管道技术的不断发展,该方法的精确性有时不能满足实际需求,仅靠凹坑深度的评估会对凹坑的严重性评估不准确。例如 API PUBL 1156^[11] 中认为相对深度 2% 为安全临界,其结果过分保守,经济性较低。因此,行业迫切需要更加可靠精确的评估方法,本文通过数值模拟方法得到管道凹坑深度与压溃压力的关系可以提高对管道凹坑评估的精确性。

1.2 椭圆度

在圆形钢管的横截面上存在着外径不等的现象,即存在着不一定相互垂直的最大外径 D_{\max} 和最小外径 D_{\min} 。API RP 1111^[4] 中对椭圆度的定义如下式(1)所示:

$$\Delta = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_{\max} + D_{\min}} \quad (1)$$

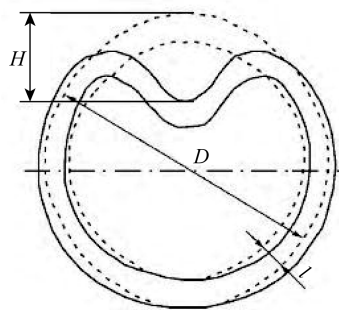


图1 凹坑的几何形状

Fig. 1 Geometric shape of denting

其中: D_{\max} 为横截面的最大外径; D_{\min} 为横截面的最小外径。

制管过程中无法避免椭圆度的出现, DNV-OS-F101 指出, 一般工程中使用的管道的椭圆度在 0.25% ~ 1.5% 之间。另外, 管道在埋设的过程中, 极易在外力作用下发生变形, 从而也会带来一定的椭圆度。初始椭圆度对管道的压溃压力有极大的削减。

2 有限元模型

2.1 建模流程

2.1.1 几何模型

运用 ABAQUS 有限元软件进行数值模拟, 管道模型全长 $L=6\ 000\text{ mm}$, 选取 273/10、325/10、325/20 三种径厚比的管道模型进行研究。基于对称性和提高计算效率考虑, 本文建立 1/4 管道模型。在管道模型的中点处横截面设置局部椭圆度, 运用刚性压头模拟落物, 并在管道下端设置支撑作用的刚性板, 如图 3 所示。

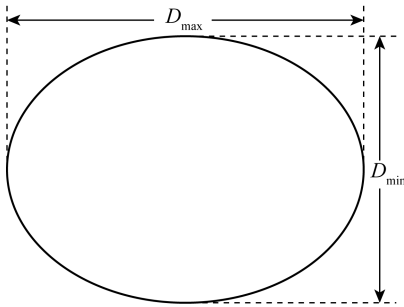


图 2 椭圆度示意

Fig. 2 Ellipticity diagram

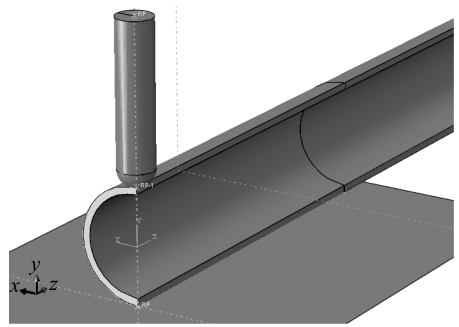


图 3 管道模型

Fig. 3 Pipeline model

管道模型采用 API X65 钢材, 主要材料参数如表 1 所示。

表 1 API X65 钢材主要参数

Tab. 1 Main parameters of API X65

参数名称	数值	参数名称	数值
密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{mm}^{-3})$	7 850	杨氏模量 $E / (\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$	2.0e5
泊松比 ν	0.3	硬化指数 n	18.99
屈服强度 $\sigma_y / (\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$	413	极限抗拉强度 $\sigma_u / (\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$	517

采用 Romberg-Osgood 方程建立本构关系, 方程的基本形式为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + K \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^n \quad (2)$$

式中: ε 为应变, σ 为应力 (N/mm^2), K 为强度系数, n 为应变硬化指数。 K 和 n 依材料属性而定, 与材料硬化有关。

为了通过材料的轴向拉伸试验验证 R-O 方程的正确性, 根据表 1 中的参数以及试验测得的数据完成对比曲线的绘制, 吻合度较好, 如图 4 所示。

2.1.2 网格划分

选择解析刚体模拟压头, 选用实体单元模拟管道。 ABAQUS 中适用于接触问题显示分析方法的实体单元必须为减缩积分单元, 因此选用减缩积分的 8 节点六面体单元 (C3D8R)。在模型边 (Edge) 上布种的方法对管道进行网格划分, 在轴向、径向和环向上布种, 并对凹坑附近管道进行网格加密, 网格划分如图 5 所示。

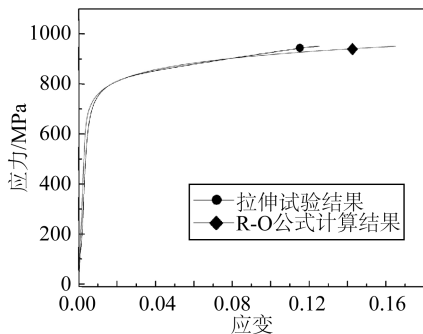


图 4 拉伸试验结果与 R-O 方程计算结果对比

Fig. 4 Comparison between tensile test and calculation results

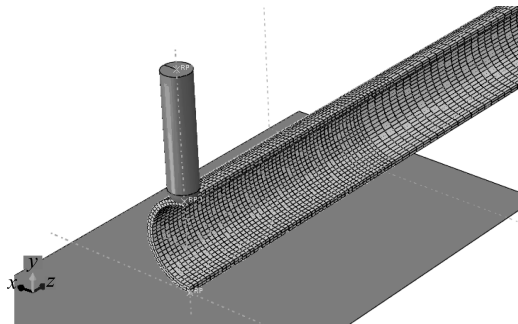


图 5 网格划分

Fig. 5 Mesh of the model

2.1.3 接触与摩擦

管道外壁与刚性压头之间、管道外壁与刚性板之间设置有限滑移、不可穿越接触；管道内壁设置自接触。

2.1.4 约束与载荷

在管道模型对称面上施加对称约束,管道末端施加固支约束;对压头施加约束,限制移动、转动,控制压头仅在垂向上下移动;对刚性板施加约束,限制其 6 个自由度的移动以及转动,模拟压头在撞击管道的过程中支撑管道,避免管道整体发生弯曲;凹坑形成后,在管道外壁施加外压。

2.2 分析过程

首先对刚体施加垂向位移模拟压头撞击管道的过程,压头向下移动的过程中,管道含初始椭圆度的截面受到压头的挤压和下方刚性板的支撑作用,在附近产生凹坑(见图 6(b));然后移除刚性压头以及下方起支撑作用的刚性板,管道会沿着原路径有轻微回弹(见图 6(c))。

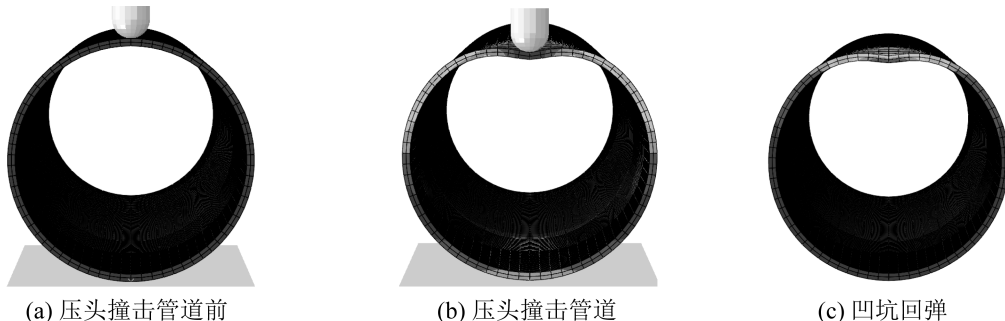


图 6 压头撞击管道过程模拟

Fig. 6 Process of indenter impacting

通过在管道外壁施加面载荷模拟管道受压过程,管道的压溃过程如图 7 所示。椭圆度-凹坑双缺陷的管道在受到外压作用时,凹坑附近管道受到较大应力,首先发生变形(见图 7(a));之后,管道在外压作用下,会沿着管道存在凹坑的方向发生变形,此时凹坑处以及两侧所受应力较大(见图 7(b));最后,管道在存在凹坑的截面压溃,沿管长方向发生屈曲传播(见图 7(c))。

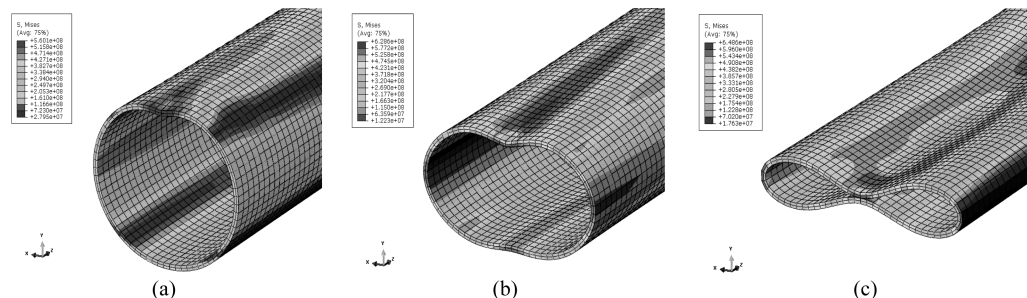


图 7 管道压溃过程模拟

Fig. 7 Process of pipeline buckling

3 结果对比与分析

3.1 模型验证

为验证数值模型的可行性,进行了管道压溃试验。试验管道为 API X65 钢材,管道长 $L=8\ 000\ \text{mm}$,直径 $325\ \text{mm}$,壁厚 $10\ \text{mm}$,管道初始椭圆度 0.1% ,分别对三根试验管道进行处理:完好的管道、施加 $2\ \text{mm}$ 凹坑和施加 $3\ \text{mm}$ 凹坑。ABAQUS 模型参数选取与试验管道一致。

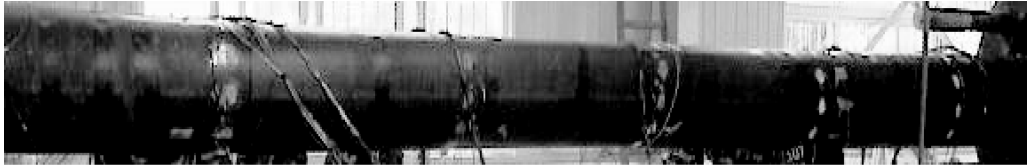


图 8 试验前管道

Fig. 8 Pipeline before experiment

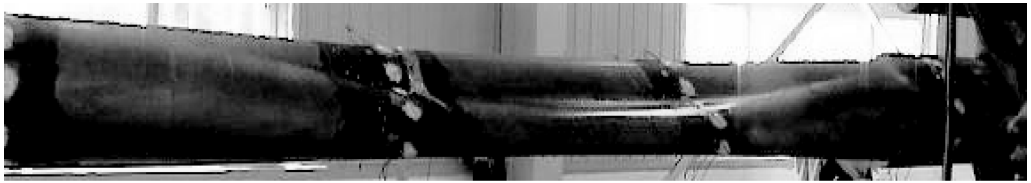


图 9 试验后管道

Fig. 9 Pipeline after experiment

将数值模拟结果与实际管道压溃试验结果进行比较,管道压溃形式如图 10 所示。

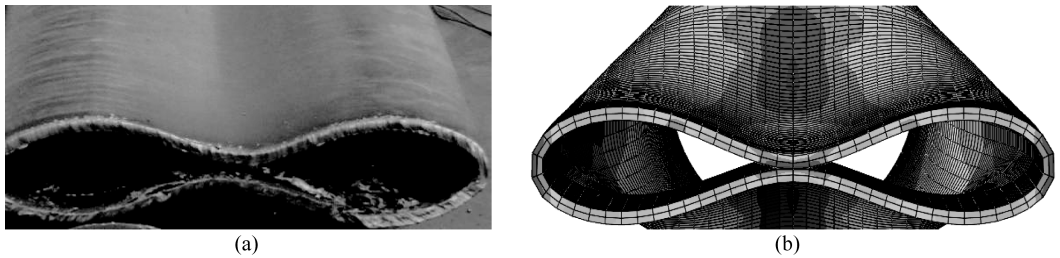


图 10 管道压溃截面形状对比

Fig. 10 Comparison between simulation and experiment

压溃压力对比如表 2 所示。

表 2 数值模拟结果与管道压溃试验结果对比

Tab. 2 Comparison between simulation result and experiment result

管件类型	数值模拟结果/MPa	试验结果/MPa	误差
325×10 无缺陷	10.218 6	10.159	0.59%
325×10 凹深 2 毫米	10.218 6	10.131	0.86%
325×10 凹深 3 毫米	10.216 0	9.942	2.76%

由表 2 可知,数值模拟结果与管道压溃试验结果接近,验证此数值模拟方法的正确性,模拟结果可信。

3.2 形状系数

现行规范中对椭圆度-凹坑双缺陷的评估方法多用等效椭圆度以及相对凹深的概念进行评估,但是由于不同缺陷形式,管道可能产生相同的等效椭圆度,如图 11 所示(其中 D_{\max} 与 D_{\min} 相等),但显然图 11(b) 的管道的压溃压力由于凹坑的存在较图 11(a) 的管道小。因此,相同等效椭圆度的管道在压溃压力上会存在巨大差异,现行规范的评估方法此时就不适用。

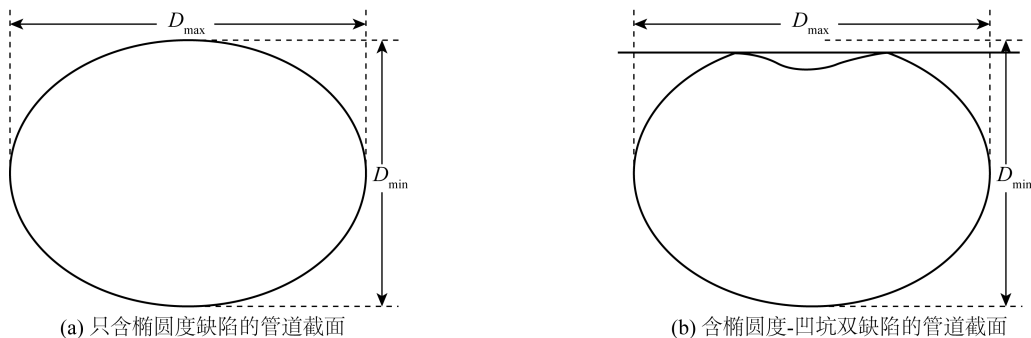


图 11 含椭圆度缺陷和凹坑双缺陷的管道截面

Fig. 11 Section of pipeline with ellipticity and ellipticity-denting

为了对椭圆度-凹坑双缺陷的管道进行评估,本文对海底管道的压溃压力进行无量纲化处理,即引入形状系数 C_s 。形状系数表示了管道的因变形而带来压溃压力的折损,其定义如下式(3)所示:

$$C_s = \frac{P_c}{P_{c0}} \quad (3)$$

式中: P_c 含凹坑管道的压溃压力(N/mm²), P_{c0} 仅含初始椭圆度管道的压溃压力(N/mm²)。

3.3 形状系数的敏感性分析

3.3.1 凹坑深度与管道形状系数关系

取前文中管道模型的参数,给定压头的直径 $d = 100$ mm,管道取不同椭圆度 $\Delta = 0.2\%、0.4\%、0.6\%、0.8\%、1.0\%$,不同径厚比 $D/t = 27.3、32.5、16.25$ 共 15 组模型参数,通过分别计算含初始椭圆度的管道以及椭圆度-凹坑双缺陷管道的压溃压力计算得到管道的形状系数 C_s ,得到形状系数随相对凹深 H/D 的变化规律如图 12 所示。

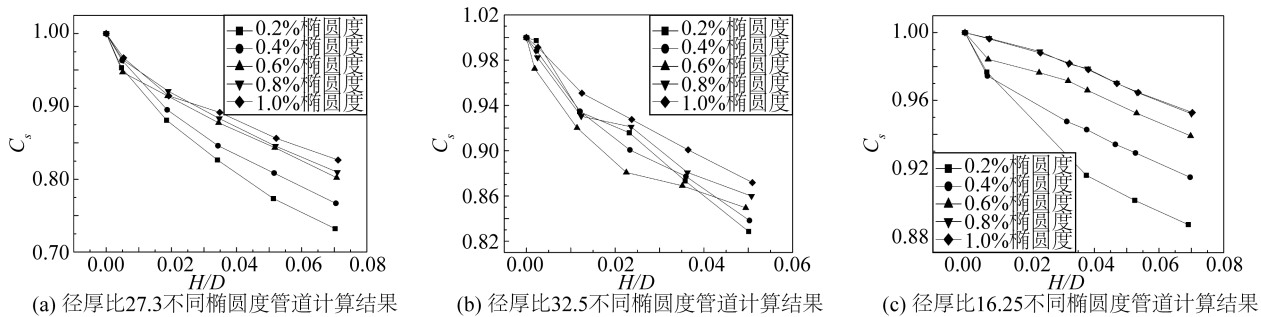


图 12 径厚比不同椭圆度管道计算结果

Fig. 12 Results of pipelines with different diameter-thicknesses

分析图 12 中的变化趋势可知:管道的形状系数 C_s 随着相对凹深的增大而减小, C_s 随着管道的椭圆度增大而减小;凹坑深度较小时,不同椭圆度管道的形状系数相差较小,凹坑深度较大时,形状系数相差较大,相同等效椭圆度的管道误差会超过 10%。

3.3.2 凹坑宽度与管道形状系数关系

取前文中管道模型的参数,给定管道椭圆度 $\Delta = 0.8\%$,取不同的压头直径 $d = 50、100$ 及 150 mm,不同径厚比 $D/t = 27.3、32.5、16.25$ 共 9 组模型参数,计算结果如图 13 所示。

分析图 13 中的变化趋势可知:在管道尺寸、径厚比、椭圆度等其它条件相同的情况下,形状系数 C_s 随凹坑宽度的变化不大,即凹坑宽度对管道的抗屈曲能力影响不大。

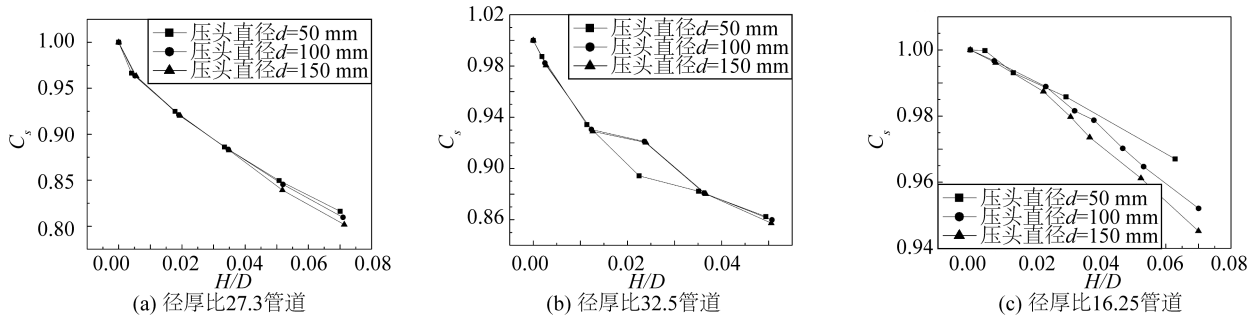


图13 不同径厚比管道不同压头直径计算结果

Fig. 13 Result of pipeline with different diameter-thicknesses under different indenters

3.3.3 管道径厚比与形状系数的关系

取前文中管道模型的参数,压头直径 $d=50\text{ mm}$,不同管道椭圆度 $\Delta=0.4\%$ 、 0.8% 、 1.0% ,径厚比 $D/t=27.3$ 、 32.5 、 16.25 共9组,计算结果如图14所示。

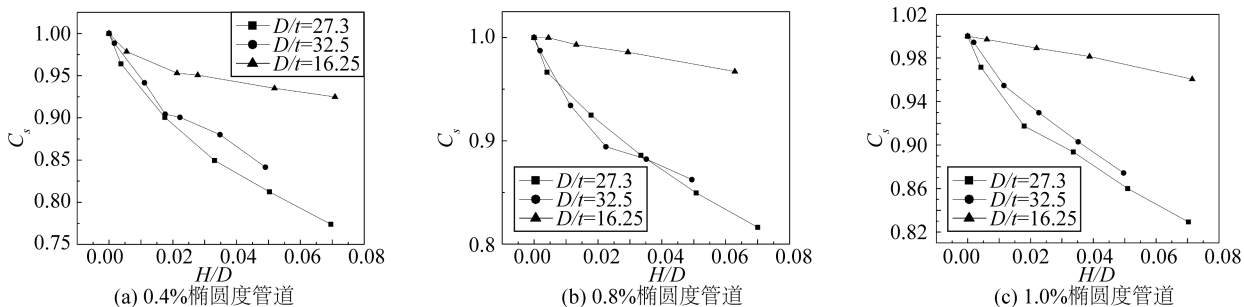


图14 不同椭圆度管道不同径厚比计算结果

Fig. 14 Result of elliptical pipeline with different D/t

分析图14中的计算结果可知:在管道尺寸、椭圆度,凹坑宽度等其它条件相同的情况下,厚壁管道的形状系数 C_s 较大,薄壁管道的形状系数 C_s 较小,厚壁管道相较于薄壁管道而言,不易受形状缺陷的影响。

3.4 通过形状系数计算压溃压力

对于不含初始几何缺陷的管道而言,其弹性屈曲压力 P_{c0} 可由式(4)计算^[4]得到:

$$P_{c0} = \frac{2E}{(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{D} \right)^3 \quad (4)$$

式中: E 是弹性模量, ν 是泊松比, t 是壁厚, D 是管道外径。

通过计算可以得到 P_{c0} ,再由图表可以查询得到对应初始缺陷状态下的管道的形状系数 C_s ,根据形状系数的定义式(3)可得,该缺陷条件下管道的压溃压力为:

$$P_c = P_{c0} \cdot C_s \quad (5)$$

4 结 语

经过研究和计算分析,得到以下结论:

1)有限元软件 ABAQUS 可以计算含初始缺陷的海底管道在外压作用下的局部屈曲,并得出局部屈曲与初始缺陷相应的变化规律,该数值模拟结果可应用到海洋工程实践中。现行规范用等效椭圆度的评估方法并不完善,采用形状系数去评估含椭圆度-凹坑双缺陷的管道有十分重要的工程意义。

2)在管道尺寸、管道材料等其它条件相同的情况下,管道的形状系数 C_s 与管道的初始椭圆度、径厚比,凹坑深度相关。管道相对凹深的越大, C_s 越小,且当相对凹深较大时, C_s 随相对凹深的增大而线性减小;管道的初始椭圆度越大, C_s 越小;厚壁管道的 C_s 大于薄壁管道。所以在工程实践中,应尽量选择初始椭圆度较小的厚壁管道,尽量避免管道受落物碰撞或其它因素而形成较深的凹坑。

3)缺陷形式不同但等效椭圆度相同的管道形状系数有很大差异,故若按原有评估方法对含椭圆度-凹

坑双缺陷管道进行评估,会产生误差,误差可能大于10%。

参考文献:

- [1] WIERZBICKI T. Indentation of tubes under combined loading[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1988, 30(3-4):229-248.
- [2] American Petroleum Institute. RP-2A-WSD Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design[S]. The United States:American Petroleum Institute,2002.
- [3] KYRIAKIDES S, BABCOCK C D, ELYADA D. Initiation of propagating buckles from local pipeline damages[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 1983, 106(1):79-87.
- [4] PARK T D, KYRIAKIDES S. On the collapse of dented cylinders under external pressure[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1996, 38(5):557-578.
- [5] 余建星,卞雪航,余杨,等.深水海底管道全尺寸压溃试验及数值模拟[J].*天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2012, 45(2):154-159. (YU Jianxing, BIAN Xuehang, YU Yang, et al. Full-scale collapse test and numerical simulation of deepwater pipeline[J]. *Journal of Tianjin University*,2012,45(2):154-159. (in Chinese))
- [6] 何璇.含凹坑海底管道屈曲机理的数值模拟[D].浙江大学,2015. (HE Xuan. Numerical simulation of buckling mechanism on dented subsea pipelines[D]. Zhejiang University,2015. (in Chinese))
- [7] 焦中良,帅健.含凹坑管道的完整性评价[J].*西南石油大学学报(自然科学版)*,2011,33(4):157-164. (JIAO Zhongliang, SHUAI Jian.Integrity evaluation of pipeline with denting[J].*Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition)*,2011.(in Chinese))
- [8] MACDONALD K A, COSHAM A, ALEXANDER C R, et al. Assessing mechanical damage in offshore pipelines-Two case studies[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2007, 14(8):1 667-1 679.
- [9] 杨琼,帅健.凹陷管道的工程评定方法[J].*石油学报*,2010,31(4):649-653. (YANG Qiong, SHUAI Jian. Engineering evaluation method for dented pipeline[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010,31(4):649-653.(in Chinese))
- [10] TED L Anderson, DAVID A Osage. API 579: a comprehensive fitness-for-service guide[J]. *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, 2000, 77(14-15):953-963.
- [11] ALEXANDER C R, KIEFNER J F. Effects of smooth and rock dents on liquid petroleum pipelines[C]//API Pipeline Conference. Dallas, Texas, April 1999.
- [12] LEE L H, KYRIAKIDES S, NETTO T A. Integral buckle arrestors for offshore pipelines: Enhanced design criteria[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2008, 50(6):1 058-1 064.
- [13] KYRIAKIDE S, CORONA E. *Mechanics of submarine pipelines*[M]. Oxford: Elsevier Science Ltd, 2007.
- [14] KYRIAKIDE S. Propagating instabilities in structures[J]. *Advances in Applied Mechanics*, 1993, 30(114):67-89.