

应急抛锚状态下拖锚对海管的撞击损伤

孙倩¹, 周宏², 周沛林²

(1. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 江苏科技大学船舶与海洋工程学院, 江苏 镇江 212003)

[摘要] 为了分析拖锚对海底管道的撞击损伤情况, 运用 ABAQUS 软件, 对应急抛锚情况下拖锚与海底管道进行建模。选取最危险的锚尖与管道正撞情况进行了数值模拟, 根据碰撞后管壁的凹痕深度与管道外径的比值, 对海底管道进行安全校核; 同时选取了不同管壁厚度和管道长度进行了计算比较, 得出了拖锚撞击损伤程度随海底管道的壁厚和管道长细比的增加而减小。最后将 DNV 规范计算结果与有限元数值模拟结果进行对比, 发现规范计算值明显偏大。研究成果对分析海底管道受拖锚撞击损伤的变形规律、海底管道的设计及修复具有一定的实用意义。

[关键词] 拖锚; 海底管线; 撞击损伤

[中图分类号] U 664

Study on the Collision Damage of Submarine Pipelines by Towing Anchor Under Emergency Anchorage

SUN Qian¹, ZHOU Hong², ZHOU Peilin²

(1. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Naval Architecture and Ocean Engineering Institute, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: In this article finite element modeling of anchor and submarine pipeline under the condition of emergency anchorage was built up by using ABAQUS software, the positive collision between anchor tip and the pipeline was then selected as the most dangerous situation for numerical simulation. Security of the pipeline was checked as per the ratio of the dent depth to pipe wall diameter, and the relationships between towing anchor collision damage and pipe wall thickness as well as pipeline slenderness ratio were determined by horizontal comparison. It suggests that the damage degree of the towing anchor decrease in thickness and slenderness of the submarine pipelines. Finally, results from DNV classification rules were compared with the numerical simulation data, which reveals the significant difference between them. The research results have some practical significance for the analysis of deformation regularity of the submarine pipelines damaged by the towing anchor, the design and repair of the pipelines.

Key words: towing anchor; submarine pipelines; collision damage

0 引言

随着经济的高速发展, 石油天然气资源的开发和利用已经是我国现代化建设中的重要一环。据不

[收稿日期] 2018-03-27

[修回日期] 2018-05-23

[基金项目] 福建省自然科学基金项目(2018J01493; 2016J01249)

[作者简介] 孙倩(1974—), 女, 副教授, 从事船舶与海洋结构物设计制造研究, E-mail:sunqian1226@163.com。

完全统计, 1986—2016 年中国海油在中国海域共铺设了 315 条海底管道 (直径 50.8 ~ 762.0 mm), 总长约 6 202 km^[1]。由于海底管道长期处于恶劣环境中, 承受诸如环境载荷、工作载荷和意外风险载荷等, 所以海底管道泄漏事故风险随着海洋油气工业的快速发展而逐渐增加。据统计, 全球海底油气管道破裂事故有 50% ~ 60% 是由第三方破坏导致的^[2], 而船舶起抛锚作业是第三方破坏的重要原因之一。锚对海底管道的刮碰和撞击可能造成的损伤有管道的凹陷、刺穿和撕裂等^[3]。2008 年渤西天然气管道破损就是一起典型的船舶抛锚损伤事故^[2], 该事故导致外输管道破损泄漏, 造成整条外输管道停产, 损失重大。2009 年 3 月渤海潮西南作业区域渤中 13-1 至歧口 18-1 海底管道在 19 km 处发现漏气, 修复时确认是被大吨位货船的锚拉断^[4]。因此为了确保油气安全输送, 防止海底管道发生泄漏事故, 有必要对海管的损坏概率和抛锚作业对海管的损伤程度进行深入分析。

相对于普通抛锚作业, 应急抛锚是指为了保证船舶航行安全, 在遇到大风大浪等恶劣气象条件下, 为控制船首方向、增加船舶的漂泊阻力而采用顶浪滞航的方法, 或者在紧急情况下采用抛锚拖行的方法。应急抛锚状况下锚到海底的速度通常会大于正常抛锚时的速度, 另外锚对海底底质的冲击力也会增大。海底管线在应急抛锚情况下受到的撞击损伤分为落锚撞击损伤和拖锚撞击损伤两种。落锚撞击是抛锚时, 锚由上至下刚好垂直落在海底管线上, 锚和附加质量力垂直于管线, 会造成较大损伤, 但发生概率低。拖锚撞击是当船舶在拖锚淌航状态下锚对管线的撞击损害, 此时锚和附加质量力是以某一角度作用在管线上, 造成的损害虽然比前者小一些, 可是发生概率却要高很多^[4]。

现行各种规范虽然确定了海底管线受冲击载荷作用下的变形条件, 但是在计算管线的凹陷时没有考虑各种非线性因素在撞击过程中的影响^[5-7], 因此导致分析结果不够精确。ABAQUS 软件在处理大变形非线性问题时, 提供了耦合欧拉-拉格朗日 (coupled eulerian-lagrangian, CEL) 法和任意拉格朗日-欧拉 (arbitrary lagrangian-eulerian, ALE) 法两种主要解决方案^[8], 使得计算结果更加接近实际情况。由于落锚或其他种类重物坠落对海底管线造成的损伤研究目前已比较多见^[3-4,8-13], 但是对于拖锚损害, 目前国内相关研究还比较少^[14], 因此本文利用挪威船级社 (det norske veritas, DNV) 的海底管线保护风险评估规范 (DNV - RP - F107)^[5-7]和 ABAQUS 软件对应急抛锚情况下拖锚作业对海底管线的撞击损伤进行数值模拟和对比分析。

1 规范对海底管道受损程度的划分

规范 DNV - RP - F107^[5]给出的裸露管线的破损分级如表 1 所示。该分级建议是依据海底管道的破损级别及该级别下管道能够吸收的能量和各种损伤发生的条件概率提出的。

表 1 海底裸露管线的破损分级
Tab.1 Damage grading of submarine bare pipeline

凹痕/直径比 Dent/Diameter ratio/%	破损描述 Damage description	产生破损的条件概率 Conditional probability of damage					
		次损坏 Minor damage	中损坏 Moderate damage	重损坏 Major damage	无泄漏 No release leakage	小泄露 Small release leakage	大泄露 Major release leakage
≤5	轻微损伤 Minor damage.	1.0	0	0	1.00	0	0
5 ~ 10	严重损伤预计泄露 Major damage. Leakage anticipated.	0.1	0.80	0.10	0.90	0.10	0
10 ~ 15	严重损坏预计泄露和断裂 Major damage. Leakage and rupture anticipated.	0	0.75	0.25	0.75	0.20	0.05
15 ~ 20	同上 Ditto	0	0.25	0.75	0.25	0.50	0.25
≥20	断裂 Rupture.	0	0.10	0.90	0.10	0.20	0.70

海底管线保护风险评估规范把损坏分为三级。

1) 次损坏: 凹坑最大深度 \leq 管径的5%, 海底管线能够照常运行。此时油气不会发生泄漏, 管线也不需要任何修复, 不过要进行技术检验以保证海管结构完整且可正常清管。

2) 中损坏: 凹坑的最大深度 $>$ 管径的5%但 $\leq 15\%$, 管道泄漏并不会发生, 对海底管线的修复可推迟一定时间, 但是在下次运行前需完成该管道的完整性检验; 另外需要特别指出如果海底管线本身管径较小, 需要经常进行清管, 如果凹痕比较大, 就有可能影响清管的进行, 从而可能会导致油气停产, 在这种情况下, 即使管道没有发生泄漏, 这也不是中损坏, 而是重损坏。

3) 重损坏: 此时海底管道已经发生泄漏, 海管壁已发生破损, 必须立即修复或替换管道, 同时停止输送油气。

2 海域以及锚的选择

渤海湾分布有赵东、渤西、埕岛和南堡等油气田, 是我国海洋石油的主要产区之一, 海底输油管道分布复杂而密集。近年来船舶运输业和渔业也获得快速发展, 港口和泊位的数量不断增加, 规模不断扩大, 抛锚作业也越发频繁。另外渤海也是我国渔业的主要产区之一, 在一些海域渔业生产领域可能和海底管道铺设区域互相重叠, 这些因素都会给海底管道带来一定的风险^[14]。1986—2016年, 我国海域内海底管道共发生事故51起, 因第三方破坏导致的事故在渤海海域发生最多^[1]。

船用锚主要有有杆锚、无杆锚、大抓力锚和特种锚四类^[15]。无杆锚是现今使用最广泛的锚, 它没有横杆, 锚杆和锚爪之间可以相对转动, 两个锚爪在使用过程中同时抓底, 具有抛起锚方便, 起锚后可直接收存在舷边链孔处, 不占甲板面积。商船上最常见的无杆锚就是如图1所示的霍尔锚, 它被广泛地用于各种船舶, 作为主锚。

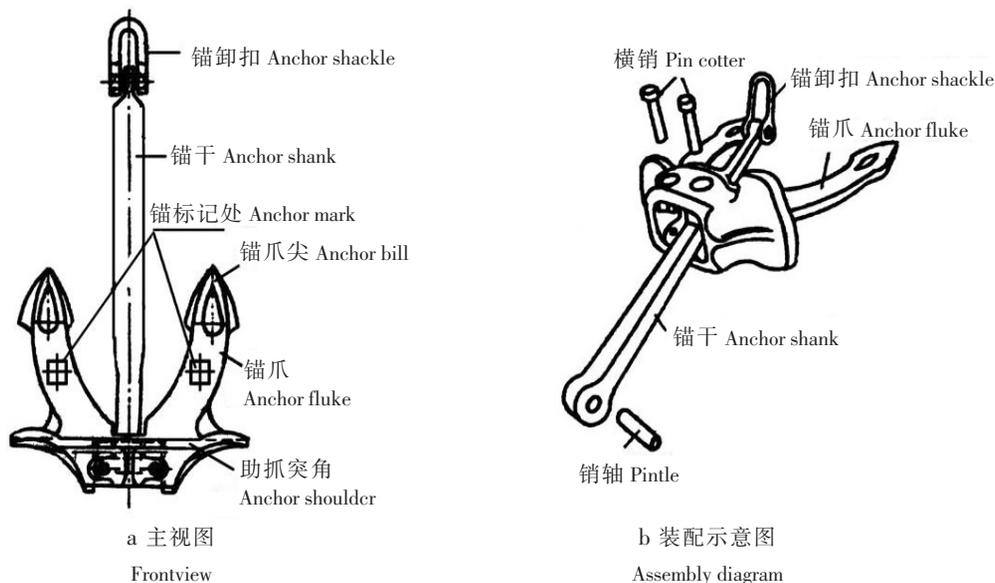


图1 霍尔锚

Fig.1 Hall anchor

本文选择航行于渤海水域常见的一艘中型渔船作为研究对象, 该船配备5 250 kg C型霍尔锚, 该锚的主要参数可通过查询GB/T 546-1997^[16]获得。

锚爪间距离 A_A 为1 364 mm; 锚的宽度 B_A 为1 910 mm; 锚干的长度 C_A 为2 728 mm; 锚爪的长度 D_A 为1 760 mm; 锚的厚度 E_A 为846 mm。

挡水面积 $S_A = (D_A + C_A \sin 45^\circ) B_A = (1\ 760 + 846 \times (\sqrt{2}/2)) \times 1\ 910 = 4.50\ \text{m}^2$ 。

3 基于 ABAQUS 的拖锚对海底管道的撞击损伤分析

3.1 拖锚撞击分析有限元模型的建立和参数设置

图 2 是拖锚对海底管道撞击的分析模型，主要由锚和海底管道两部分组成。

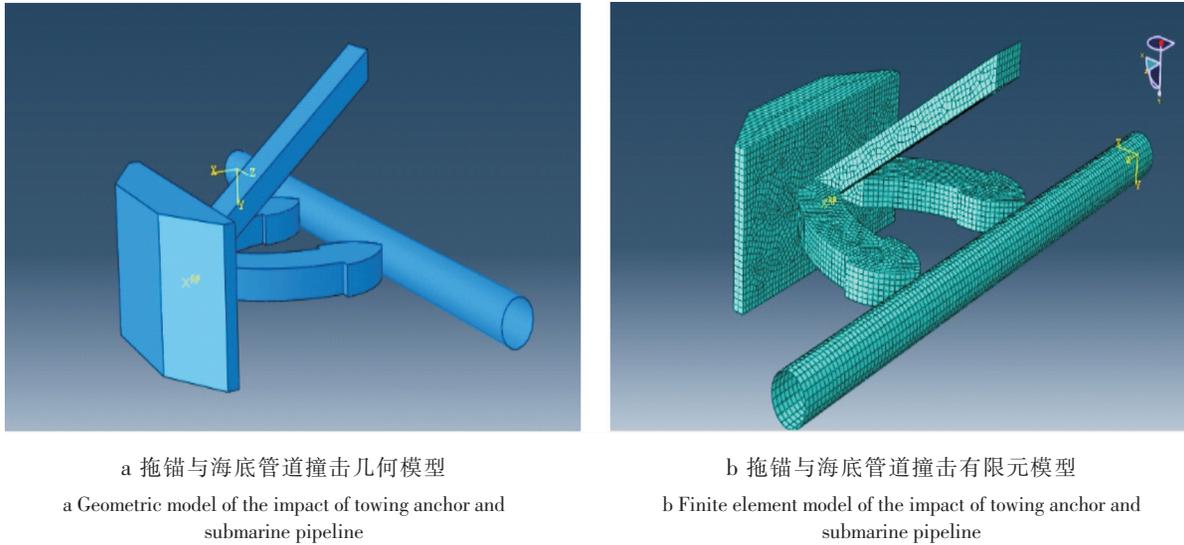


图 2 拖锚与海底管道撞击模型

Fig.2 Model of the impact of towing anchor and submarine pipeline

锚为 3D 解析刚体拉伸体，海底管道设置为 3D 可变形体，实体拉伸壳，模型选用弹塑性本构关系。拖锚的质量和附连水质量通过在其质心位置（该点设置为参考点）处添加集中力进行模拟^[17]。撞击模型的初始参数的设置见表 2。

表 2 拖锚与海管的撞击模型的初始参数

Tab.2 Initial parameters of the towing anchor-pipeline collision model

管道外径(D) Pipe outer diameter /mm	管道壁厚(t) Pipe wall thickness/mm	管道长度(L) Pipe length/m	钢料牌号 Steel grade	屈服强度(σ_y) Yield strength/MPa	材料密度(ρ) Material density /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量(E) Modulus of elasticity/MPa	泊松比(μ) Poisson ratio
273.1	11.1, 15.4, 19.7	5, 8, 10	APIX65	530	7.85×10^3	2.01×10^5	0.3

拖锚对海底管道的撞击属于典型的边界条件非线性的接触问题，分析步选用动力显式分析模拟拖锚对海底管道的撞击过程，撞击能量通过设置粘性体积参数来吸收^[17]，本文线性体积粘性参数和二次体积粘性参数分别取 0.06 和 1.2。

本文算例的接触类型属于面接触，锚选为主面，管道选为从面，接触域包括全部外表面、解析刚体表面和壳边，接触相互作用选为有限滑移，大变形开关 Nlgeom 设置为 ON，时间增量 Time Increment 等控制参数取默认值。

网格划分方面，为保证收敛效果和提高计算精度，作为从面的海底管道网格不能比主面拖锚的网格粗。本文除了满足整体管道网格大小要求外，还对管道受撞击区域的网格进行了适度地加密，加密后的有限元网格如图 3 所示。锚采用 R3D4 刚体单元模拟，管道采用 S4R 壳体单元模拟。

管道两端设置为刚性固定，即位移转角均为 0。选取锚尖端正面撞击管壁的情形为最危险情况，锚只允许其在 X 轴方向上移动，保证是正撞，锚的运动速度通过在其质点添加一个速度场来模拟。因为拖锚速度明显低于落锚的速度，通常只有落锚速度的 1/4 ~ 1/3^[4]，同一尺寸落锚的触底速度根据规范的相关公式^[5]计算得到，为 4.63 m/s，因此本文选择 1.5 m/s 作为拖锚撞击海底管道时的速度。

3.2 管道壁厚与拖锚撞击损伤程度的关系

拖锚对海底管道的撞击过程可以通过有限元模型来模拟。为了得到管道壁厚与拖锚撞击损伤程度之间的关系, 本文选择以同一重为 5 250 kg 的拖锚与渤海区域常见的壁厚 t 分别为 11.1、15.4、19.7 mm, 外径固定为 273.1 mm 的海底管道进行撞击, 对撞击后留下的塑性变形进行分析。管道受撞击区域的变形云图和最大位移区域局部放大图如图 4 所示。

壁厚 t 为 11.1 mm、长度 L 为 5 m 的海底管道受撞击后撞击区域变形图和最大位移区域局部放大图如图 4a、图 4b 所示。

因为本文只需要研究凹坑的深度, 所以选取裸露海底管道受拖锚碰撞区域最大位移点, 如图 4b 所示, 通过后处理读取位移图, 可知最大位移 δ 为 11.8 mm, 此时凹痕直径比为 $\delta/D = 11.8/273.1 = 4.32\%$ 。

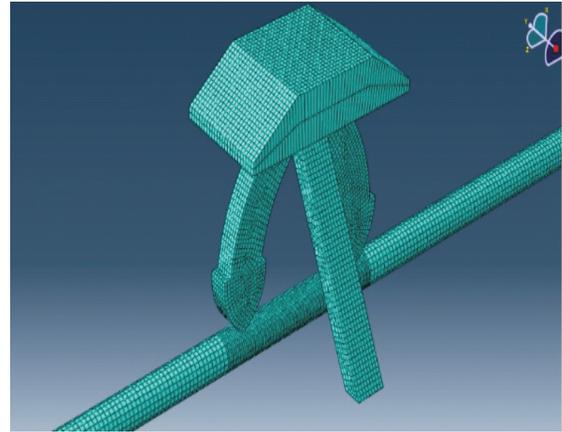


图3 海底管道撞击区域加密有限元网格图

Fig.3 Dense finite element grids of submarine pipeline collision region

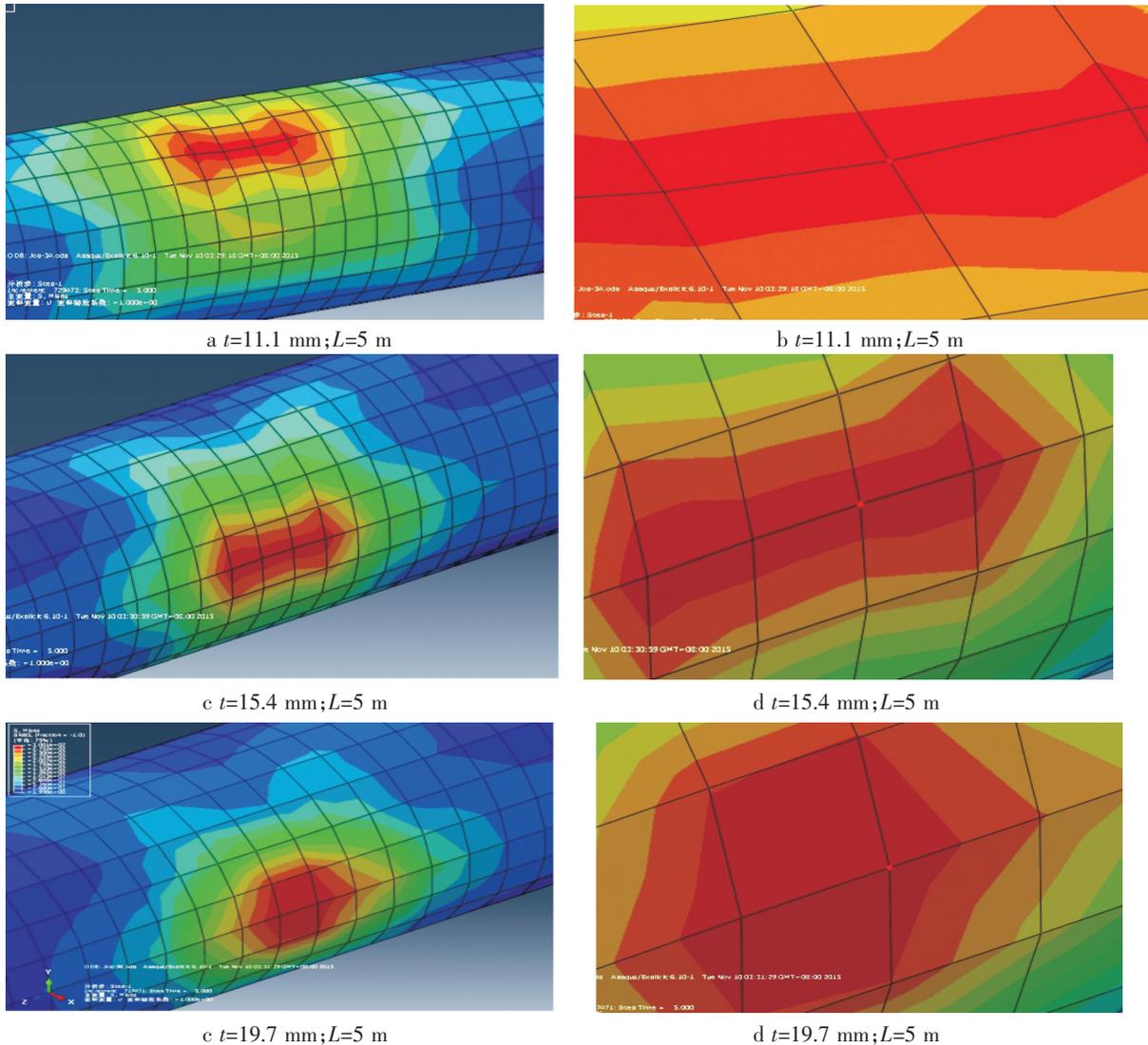


图4 管道受撞击区域的变形云图和最大位移区域局部放大图

Fig.4 Deformation cloud atlas of the pipeline under impact and local large scale diagram of maximum displacement region

壁厚 t 为 15.4 mm、管线长度 L 为 5 m 的管道受撞击后的变形云图如图 4c、图 4d 所示。

同样选取碰撞处管道上位移最大的点, 查得位移 δ 的大小是 7.2 mm, 此时凹痕深度与管道直径比为 $\delta/D = 7.2/273.1 = 2.64\%$ 。

壁厚 t 为 19.7 mm、管线长度 L 为 5 m 的管道受撞击后的变形云图如图 4e、图 4f 所示。

查得碰撞处管道上位移最大点 δ 是 3.2 mm, 此时凹痕深度与管道直径的比值是 $\delta/D = 3.2/273.1 = 1.17\%$ 。

由上述计算结果可以得出: 当拖锚撞击载荷保持不变时, 凹痕直径比随着管道壁厚的增加而减小, 换言之, 海底管道抵抗撞击的能力随着管道壁厚的增加而增强。管道壁厚从 11.1mm 增加至 15.4 mm 时, 厚度增加了 38.74%, 凹痕直径比下降了 38.89%; 当壁厚进一步增加至 19.7 mm 时, 厚度增加了 77.48%, 凹痕直径比下降了 72.92%。

3.3 管道长细比和拖锚撞击损伤程度的关系

为了得到拖锚撞击损伤与管道长细比的关系, 本文计算了壁厚 t 为 11.1 mm, 长度 L 分别为 5、8、10 m, 外径 D 为 273.1 mm 的海底管道受同一拖锚载荷撞击后留下的塑性变形, 受撞击区域变形云图和最大位移区域局部放大图如图 5 所示。

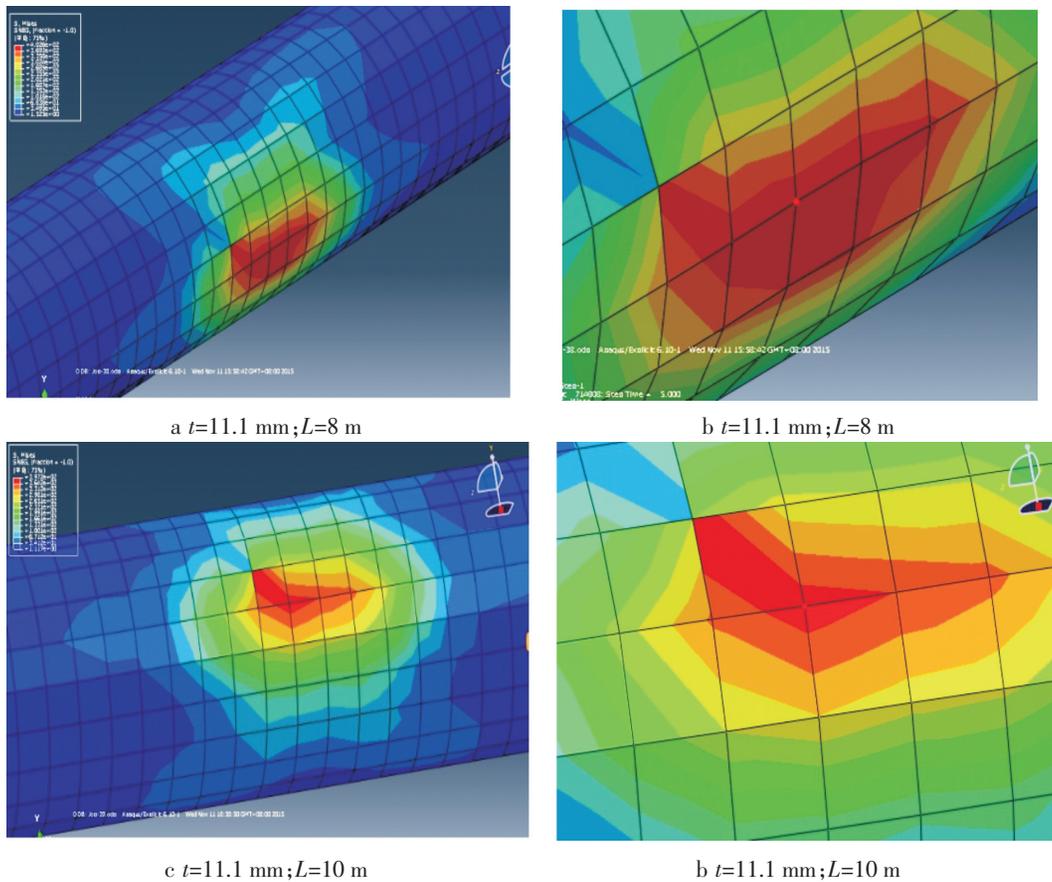


图 5 管道受撞击区域的变形云图和最大位移区域局部放大图

Fig.5 Deformation cloud atlas of the pipeline under impact and Local large scale diagram of maximum displacement region

上节中已经得到壁厚 t 为 11.1 mm、管线长度 L 为 5 m 的管道受撞击后管道凹痕深度与外径的比值为 4.32%。

壁厚 t 为 11.1 mm、长度 L 为 8 m 的海底管道受拖锚撞击后管道的变形云图如图 5a、图 5b 所示。选取碰撞处管道上位移最大的点, 查得位移 δ 为 10.8 mm, 此时凹痕深度与管道外径的比值为

$\delta/D = 10.8/273.1 = 3.95\%$ 。

壁厚 t 为 11.1 mm、管线长度 L 为 10 m 的管道受撞击后的管道变形云图如图 5c、图 5d 所示。

查得碰撞处管道上位移最大点 δ 为 9.5 mm, 此时凹痕深度与管道外径的比值为 $\delta/D = 9.5/273.1 = 3.48\%$ 。

当拖锚以低速与海底管道发生侧向撞击时, 产生的能量会转化为管道碰撞区域局部变形和管道的整体变形。管道直径不变, 长细比越大, 相对刚度越小, 整体变形吸收的能量越多, 转化为局部变形的能量占比越少, 管道在撞击后产生的塑性变形也越小。当管道外径为 273.1 mm, 长度从 5 m 增加至 8 m 时, 长细比增加 60%, 凹痕直径比下降了 8.56%; 当管道长度增加至 10 m 时, 长细比增加 100%, 凹痕直径比下降了 19.44%。在此基础上可以得出拖锚撞击对长距离的输油管道影响比较小。

4 ABAQUS 数值模拟与 DNV - RP - F107 规范计算值比较

由于 DNV - RP - F107 规范^[5]规定凹坑最大深度小于等于管径的 5% 时, 海管不需要任何修复。因此本文先计算造成 5% 的管壁凹陷所需要的撞击能量。

首先计算管线的塑性弯矩 $m_p = \sigma_y \cdot t^2/4$ 。式中: σ_y —屈服应力, MPa; t —海管壁厚, m。

带入具体数值计算得:

$$m_p = \sigma_y \cdot t^2/4 = (530 \times 10^6) \times (11.1^2 \times 10^{-6})/4 = 16\,325.325 (\text{N} \cdot \text{m})$$

对海底管线造成 5% 的管壁凹陷时所需的能量 (或凹坑最大深度等于管径的 5% 时海底管道的吸收能) 为:

$$E = 16 \cdot \sqrt{2\pi/9} m_p \sqrt{D/t} \cdot D \sqrt[3]{(\delta/D)^2}. \quad (1)$$

式中: δ —管的变形凹坑深度, m; D —海管外径, m。

带入具体数值计算得:

$$E = 16 \times [(2 \times 3.14)/9]^{1/2} \times 16\,325.325 \times [273.1/11.1]^{1/2} \times 0.2731 \times [5/100]^{3/2} = 3\,304.58 (\text{kJ}).$$

质量 m 为 5 250 kg 的锚在拖锚状态下以速度 $v = 1.5$ m/s 撞击海底管线时, 对海底管线的有效撞击能量为: $E_E = E_T + E_A = (m + m_a)v^2/2$ 。式中: E_T —锚的动能, kJ; E_A —附连水的动能, kJ; m_a —附连水质量, kg。

附连水质量 m_a 可根据 $m_a = m \cdot (\rho_{\text{water}}/\rho_{\text{anchor}}) \cdot C_a$ 求得。式中: ρ_{water} —水的密度, kg/m^3 ; ρ_{anchor} —锚的密度, kg/m^3 ; C_a —锚的附加质量系数, 参考 DNV - RP - F110 规范^[18]取为 1.0。

因此锚的有效撞击能量 E_E 为:

$$E_E = m(1 + \rho_{\text{water}}/\rho_{\text{anchor}})/2 \cdot v^2 = (5250/2) \times (1 + (1025/7850) \times 1.0) \times 1.5^2 = 6\,677.45 (\text{kJ})$$

根据上面数值模拟的结果: 当拖锚以速度 1.5 m/s 撞击裸露海底管线时, 凹痕直径比为 4.32%, 小于 5%, 没有对管道造成伤害。但是相同条件下规范计算的结果明显偏大, 通过式 (1) 可得出凹痕与管道直径的比值已经达到 7.99%, 管道已经出现中度损伤, 这体现了规范的保守性。造成这么大偏差的原因可能是由于规范在计算裸露管道受撞击变形时没有考虑拖锚本身对能量的吸收, 认为能量仅由管道 (如管道外包覆混凝土则需考虑混凝土的影响) 吸收, 使得凹痕计算值明显偏大, 管道设计方案有些保守。

5 结论

1) 本文利用 ABAQUS 软件对拖锚与裸露海管的撞击过程进行了数值模拟, 计算结果表明, 海底管道对拖锚撞击的抵抗能力随着管壁厚度、管路长细比的增加而增强。当壁厚增加 38.74% 和 77.48% 时, 凹痕直径比分别下降了 38.89% 和 72.92%; 长细比增加 60% 和 100% 时, 凹痕直径比分别下降了 8.56% 和 19.44%。

2) 将 ABAQUS 数值模拟结果与 DNV - RP - F107 规范计算值进行比较, 发现规范计算值明显偏大, 原因是, 一方面可能是因为规范计算管道凹痕时没有考虑坠落物等因素的能量吸收问题, 另一方面规范在计算撞击所产生的凹痕深度时也忽略了撞击过程中各种非线性因素的影响, 因此造成计算结果比较保守, 留出了较大的安全裕度。

3) 建议今后在研究和规范制定过程中综合考虑海底管道与撞击物、海床和土壤等因素之间的相互作用, 深入分析各种影响因素的耦合作用, 同时可充分利用 ABAQUS 等大型软件在非线性分析方面的强大优势, 从而得到更加准确的计算结果, 提高设计方案的经济性。

[参 考 文 献]

- [1] 王红红, 刘国恒. 中国海油海底管道事故统计及分析 [J]. 中国海上油气, 2017, 29(5): 157-160.
- [2] 方娜, 陈国明, 朱红卫, 等. 海底管道泄漏事故统计分析 [J]. 油气储运, 2014, 33(1): 99-103.
- [3] 丁红岩, 乐丛欢, 张浦阳. 落物撞击作用下海底管道风险评估 [J]. 海洋工程, 2010, 28(1): 25-30.
- [4] 张磊. 基于船舶应急抛锚的海底管道埋深及保护研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [5] DET NORSKE VERITAS. Risk assessment of pipeline protection (DNV-RP-F107) [S]. Oslo: Det Norske Veritas, 2010.
- [6] DET NORSKE VERITAS. Submarine pipeline systems (DNV-OS-F101) [S]. Oslo: Det Norske Veritas, 2013.
- [7] DET NORSKE VERITAS. Interference between trawl gear and pipelines (DNV-RP-F111) [S]. Oslo: Det Norske Veritas, 2013.
- [8] 王懿, 胡知辉, 段梦兰, 等. 基于 CEL 的船舶抛锚撞击对海底管道影响分析 [J]. 石油机械, 2015, 43(5): 58-62.
- [9] 黄小光, 孙峰. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的海底管道受抛锚撞击动力学仿真 [J]. 中国海洋平台, 2012, 27(5): 41-44.
- [10] 杨秀娟, 闫涛, 修宗祥, 等. 海底管道受坠物撞击时的弹塑性有限元分析 [J]. 工程力学, 2011, 28(6): 189-194.
- [11] 白俊磊. 海底管道坠物碰撞损伤数值模拟分析研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [12] LIU JUN, TIAN JIANLONG, YI PING. Impact forces of submarine landslides on offshore pipelines [J]. Ocean Engineering, 2015, 95: 116-127.
- [13] 周沛林, 周宏. 抛锚对海底管道的碰撞损害 [J]. 中国海洋平台, 2017, 32(4): 97-100.
- [14] 汪海成. 海底管线系统偶然性载荷作用下的风险评估 [D]. 天津: 天津大学, 2003.
- [15] 王肇庚, 龚昌奇. 运输船舶设备与系统 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [16] 国家技术监督局. 霍尔锚: GB/T 546 - 1997 [S]. 北京: 中国标准出版社出版, 2012.
- [17] CAD/CAM/CAE 技术联盟. ABAQUS2016 有限元分析从入门到精通 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2017.
- [18] DET NORSKE VERITAS. Global buckling of submarine pipelines-structural design due to high temperature/high pressure (DNV-RP-F110) [S]. Oslo: Det Norske Veritas, 2007.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)