

DOI: 10.3901/JME.2019.18.022

用于管道变形检测的新型泡沫智能清管器 设计与试验验证*

熊毅¹ 高萍¹ 奉虎² 郑松贤² 王军² 兰学杰² 李友行² 柳斌²

(1. 中国石油大学(北京)安全与海洋工程学院 北京 102249;

2. 海洋石油工程股份有限公司 天津 300451)

摘要: 针对石油天然气管道完整性管理应用中, 现有智能清管器通过性较差, 聚氨酯泡沫清管器无法实现智能检测的问题, 提出将力传感器搭载在泡沫清管器上, 设计一种既能对管道进行变形检测又具备泡沫清管器良好通过性的新型泡沫智能清管器。通过力学性能理论分析和标定装置的试验验证发现: 该泡沫清管器能感应管道变形数据, 在变形量小于 1/2 传感器埋深时变形检测结果呈良好线性关系; 采用内外层密度相同的清管器结构检测灵敏度不受传感器初始位置影响, 可增加传感器埋深提升系统可靠性; 采用内高外低的清管器结构可以通过减小传感器埋深和增大内层泡沫密度提升检测灵敏度, 但应注意结构改变对检测系统可靠性的影响。该新型泡沫清管器可以实现变形的快速检测和定位, 减少前期清管次数, 节省成本; 同时由于泡沫清管器的良好通过性, 可以提升清管作业的安全性。

关键词: 管道变形; 柔性检测; 聚氨酯; 智能清管器; 通过性

中图分类号: O348

Design and Experimental Verification of a Novel Foam Smart PIG for Pipe Deformation Detection

XIONG Yi¹ GAO Ping¹ FENG Hu² ZHENG Songxian² WANG Jun²
LAN Xuejie² LI Youhang² LIU Bin²

(1. College of Safety and Ocean Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249;

2. Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300451)

Abstract: In the application of integrity management of oil and natural gas pipeline, there are some problems about the blocking risk of classical smart PIG and non-detectability of the polyurethane foam PIG. Therefore, the force sensors are mounted on the foam PIG to design a novel smart PIG with low blocking risk and capabilities for deformation detection. Through the theoretical analysis and experiment, it is found that the smart foam PIG can detect the pipe deformation and the result shows a good linear relationship when the deformation is less than 1/2 depth of sensors. Secondly, the detection sensitivity is unrelated to the initial position of sensors in the same density structure of inner and outer layer foam, so that the initial thickness of the inner foam can be reduced to enhance system reliability. And then, for the high inner and low outer density structure, the detection sensitivity can be improved by increasing the initial thickness and density of the inner foam, with attention to the effect on the reliability of the detection system. The novel smart foam PIG can detect and locate the deformation rapidly and safely by reducing the number of pre-pigging and blocking risk.

Key words: pipeline deformation; flexible detection; polyurethane; smart PIG; blocking risk

0 前言

随着我国石油和天然气工业的快速发展, 油气管道建设突飞猛进。目前管道运输已经成为我国陆

上油气运输的主要方式^[1]。随着管道服役年限增加, 一方面管道内的沉积物累积, 管道的有效流通面积减小, 甚至发生堵塞^[2-3]; 另一方面, 由于占压、地质变迁等因素, 也会导致管道发生凹陷、弯曲等变形, 改变管道内截面形状^[4]。清管器是一种依靠管输流体作为动力, 推动其在管道内运行并清除管道内沉积物质、检测管线的设备。根据其功能一般将

* 国家自然科学基金资助项目(51304228)。20180716 收到初稿, 20190125 收到修改稿

清管器分为两类^[5-8]：①以管道维护清理为主要目的的清管器，主要包括聚氨酯泡沫及皮碗式清管器；②以管道内检测为主要目的的清管器，包括几何形状检测清管器、地理位置检测清管器、磁检测清管器等。

智能检测清管器的基础结构为钢制骨架，通过能力较差，容易造成管道卡堵^[5,9]；聚氨酯泡沫类清管器一般是子弹形状，质量轻、可收缩，具有良好的通过性，能够通过情况复杂的管道，但不具备检测功能^[10-13]。现场清管作业过程，为了保证传统智能检测清管器的安全运行，在管道变形状况未知的情况下，需要通过多次投放聚氨酯泡沫类清管器去除障碍物及判断管道初步变形状态^[14]。

本文从管道变形检测角度出发，对泡沫清管器进行了传感器结构设计和优化，通过在聚氨酯泡沫清管器内部埋设传感器检测泡沫体在管道变形作用下的受力特征，提出一种具有管道变形检测功能的新型泡沫智能清管器的设计，并进行试验验证。通过泡沫智能清管器收集管道变形数据，可以快速诊断管道的通畅变化情况，减少前期清管次数、提升清管作业安全性；同时泡沫清管器低成本、便携性的特点也可为油气管道运营企业缩短检测周期提供技术支撑。

1 泡沫智能清管器结构设计及检测原理理论分析

为了实现无刚性支撑骨架的变形检测智能清管器结构，需要提供新的传感器定位结构以及建立管道变形与传感器之间的非刚性耦合机制，实现传感器对管道变形的传感检测。

1.1 基于力测量的新型泡沫清管器结构

采用如图1所示的新型泡沫清管器结构，可以通过管道变形引起的聚氨酯泡沫变形将管道变形参数耦合至埋设在聚氨酯泡沫内部的传感器上，实现对管道变形的检测。新型泡沫清管器包括埋设在聚

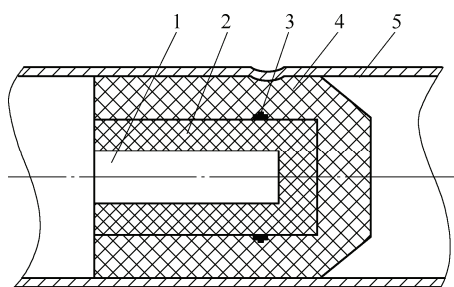


图1 新型泡沫智能清管器结构

1. 中心仪器仓 2. 内层泡沫体 3. 传感器 4. 外层泡沫体 5. 管道

氨酯泡沫内部的中心仪器仓、传感器；传感器所在位置将聚氨酯泡沫分为两层：内层泡沫体和外层泡沫体，被放置于管道内。传感器的位置(埋深)及固定可以通过设置内层泡沫体的厚度控制，无需采用刚性支撑骨架定位。

本文传感器选用悬臂梁式力传感器，管道变形通过压缩聚氨酯泡沫引起的弹性力参数耦合至力传感器，传感器处的力信号大小与管道变形量的大小成正比关系，可用来表征管道变形量。

1.2 检测原理理论分析

图1所示的泡沫智能清管器在管道变形作用下发生变形后受力分析可简化如图2所示，管道变形在泡沫体上产生引起一个与管道变形量相同的形变，引起泡沫体变形的作用力可由式(1)给出

$$F = \frac{\bar{E}A}{L} \Delta x \quad (1)$$

式中， A 为变形影响区面积； L 为泡沫体初始厚度； \bar{E} 为泡沫体等效弹性模量(当变形量不大时，泡沫体等效弹性模量近似为常数^[15])； Δx 为管道变形量。

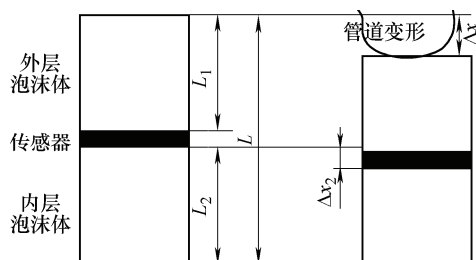


图2 泡沫清管器在管道变形作用下的形变分析图

当传感器位于泡沫体内时，其位置可由内层泡沫体初始厚度决定，传感器自身厚度忽略不计。当内层泡沫体与外层泡沫体采用密度不同聚氨酯发泡成型时，泡沫体变形产生的作用力将与内外层泡沫等效弹性模量、初始厚度相关，可由式(2)~(4)给出

$$L_2 + L_1 = L \quad (2)$$

$$\Delta x_1 + \Delta x_2 = \Delta x \quad (3)$$

$$F = \frac{\bar{E}_1 A}{L_1} \Delta x_1 = \frac{\bar{E}_2 A}{L_2} \Delta x_2 \quad (4)$$

式中， Δx_1 为外层泡沫体变形量， L_1 为外层泡沫体初始厚度(即传感器埋深)， \bar{E}_1 为外层泡沫体等效弹性模量； Δx_2 为内层泡沫体变形量， L_2 为内层泡沫体初始厚度， \bar{E}_2 为内层泡沫体等效弹性模量； L 为泡沫体整体厚度。

联立式(2)~(4)，可以得出传感器力信号大小与内外层泡沫体参数、管道变形量大小满足关系式(5)。

$$F = \frac{\bar{E}_1 \bar{E}_2}{\bar{E}_1 L_2 + \bar{E}_2 (L - L_2)} A \Delta x \quad (5)$$

2 试验装置、原理及误差分析

为了验证上述检测原理及优化设计泡沫智能清管器,设计了一套泡沫清管器传感器力信号与管道变形量标定试验装置,如图 3 所示。

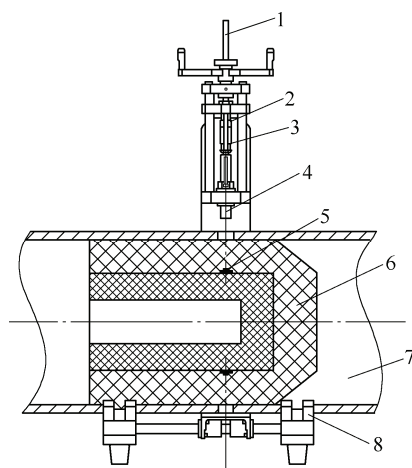


图 3 泡沫清管器力传感器信号与管道变形量标定试验装置

1. 手轮 2. 丝杠 3. 位移传感器 4. 压头 5. 力传感器
6. 泡沫清管器 7. 管道 8. V 型支座

泡沫清管器放入管道内,并置于 V 型支座上,管道壁对应传感器位置上方留有压头通孔,V 型支座可以左右滑移,通过调节 V 型支座的位置对准压头与压头通孔。测试过程中,通过丝杠带动压头下压模拟管道变形对泡沫清管器的影响,通过位移传感器测量压头位移等效为管道变形量,置于泡沫体内的力传感器信号可通过数据采集装置进行采集存储以获得该管道变形量下的泡沫清管器测试信号。

利用该试验装置对泡沫清管器内同样深度条件下(埋深 50 mm)的 5 组力传感器进行了标定试验,其力信号与管道变形量之间对应关系如图 4 所示。

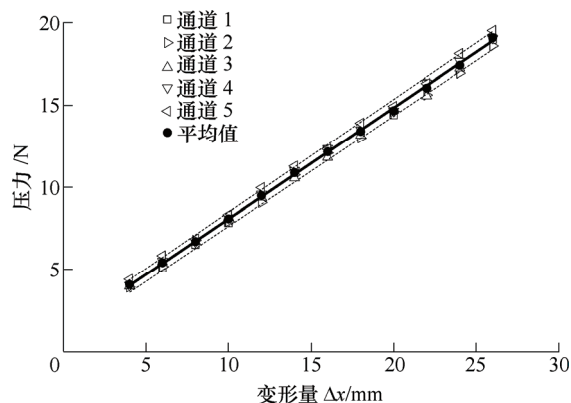


图 4 力信号与管道变形量之间对应关系

由图 4 可知,相同条件下的不同传感器通道的标定数据具有较好的一致性。为了更好地描述检测系统传感器通道的一致性,通过式(6)引入信号幅值偏离度描述不同传感器检测数据的最大偏差情况;通过式(7)引入线性度偏差率描述不同传感器信号的线性拟合曲线偏差^[16]。

$$\xi_i = \left(Y_i - \bar{Y} \right) / \bar{Y} \times 100\% \quad (6)$$

式中, ξ_i 为 i 通道传感器的幅值偏离度; Y_i 为 i 通道传感器的信号值; \bar{Y} 为各通道信号平均值。

$$\Delta P_i = \left| \frac{k_i - \bar{k}}{\bar{k}} \right| \times 100\% \quad (7)$$

式中, ΔP_i 为 i 通道传感器的线性拟合偏差率; k_i 为 i 通道传感器的线性拟合斜率; \bar{k} 为各通道线性拟合斜率平均值。

将图 4 所示数据代入式(6)可以得到如表 1 所示的不同通道传感器在不同变形量下的力信号幅值偏离度,其中最大幅值偏离度为 8.12%,最小幅值偏离度仅为 0.1%。从图 4 可知,各通道传感器在不同变形量下的幅值偏离绝对值相差不多,所以当测试变形量小时,幅值偏离度大,相对误差较大(最大幅值偏离度出现在测试的最小变形量 4 mm 处);当测试变形量大时,幅值偏离度小,相对误差较小。

表 1 传感器不同通道信号幅值偏离度 %

通道	不同变形量下力信号幅值偏离度				
	4 mm	8 mm	14 mm	20 mm	26 mm
1	-1.38	-2.95	-0.43	-1.84	-0.62
2	-3.67	1.10	-1.25	-0.19	-2.62
3	-2.21	0.03	-3.11	0.33	1.15
4	-0.86	-0.35	1.13	-0.10	-0.18
5	8.12	2.17	3.66	1.80	2.26

将图 4 所示数据代入式(7)可以得到如表 2 所示的不同通道传感器测量信号的线性拟合偏差率,其中偏离最大的通道线性拟合偏差率仅为 2.96%。

表 2 不同通道传感器信号的线性拟合曲线偏差率

通道	偏差率 ΔP (%)
1	0.67
2	2.17
3	0.94
4	0.81
5	2.96

因此,本论文所设计的检测系统在相同条件下的不同传感器通道检测一致性良好,由传感器偏差

带来的数据误差对试验结果影响较小，在后续泡沫体材料、结构优化设计验证试验中不再考虑传感器偏差对试验结果的影响。

3 内外层泡沫密度和厚度对检测系统特性的影响

如图1所示的智能清管器结构，影响传感器检测力信号的主要参量包括内外层泡沫体的等效弹性模量(由聚氨酯密度决定)和传感器初始位置(由内层泡沫体初始厚度决定)，因此在设计泡沫智能清管器时需要在这两个参量进行优化设计。根据图1所示的清管器结构，设计一套在外径406 mm管道(壁厚7.5 mm)内应用的泡沫智能清管器，其中心筒直径120 mm，即泡沫整体厚度为 $L=135.5$ mm。

3.1 同密度条件下内层泡沫厚度对检测系统特性影响与试验验证

当内外层泡沫选择相同密度聚氨酯泡沫成型时，内外层泡沫等效弹性模量 $\bar{E}_1 = \bar{E}_2 = \bar{E}$ ，测得力信号可简化为

$$F = \frac{1}{L} \bar{E} A \Delta x \quad (6)$$

针对不同的内层泡沫初始厚度 L_2 ，分别测试了不同管道变形程度下的传感器力信号，如图5所示。

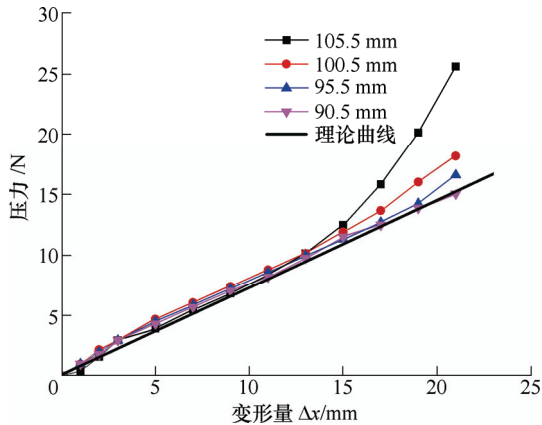


图5 不同内层泡沫初始厚度下压力值随变形量变化曲线

图5所示的力信号试验结果显示，当管道变形量 Δx 小于 $1/2 L_1$ (即 $L - L_2$)时，力传感器工作在线性区域，测得的力信号值与理论曲线重合，其结果与内层泡沫初始厚度(L_2)无关，符合式(6)的理论分析；当管道变形量 Δx 大于 $1/2 L_1$ 时，检测系统进入非线性工作区域，其力信号值与变形量仍成正比关系，但其定量关系偏离理论曲线。因此，如需要保证传感器的线性工作特征，则需要保证管道变形量的最大值小于外层泡沫厚度 L_1 的

一半，即满足式(7)。

$$\Delta x_{\max} < \frac{1}{2} L_1 = \frac{1}{2} (L - L_2) \quad (7)$$

管道变形量 Δx 大于 $1/2 L_1$ 时，检测系统进入非线性工作区，其主要原因在于管道变形引起的聚氨酯材料局部变形区域开始接近力传感器，变形区域的边缘挤压效应在变形顶端附近产生的附加力效果开始作用到力传感器上，引入了一个非线性力项。关于该问题的分析，需要在后续研究中进一步深入讨论。

试验与理论分析表明：①当内外层泡沫选择相同密度时，传感器位置并不影响检测信号的灵敏度；②为了保护传感器以及增加检测系统的线性工作范围，可适当增加传感器埋设深度(即减小内层泡沫初始厚度 L_2)；③为了提升检测系统灵敏度，理论上可增加泡沫等效弹性模量，选择更高密度聚氨酯泡沫，但考虑到清管器在管道内的运行特性(通过性和耐磨性)，其外层泡沫材料密度需要满足特定设计要求，可调整范围较小，检测系统灵敏度基本固定；④在传感器线性工作范围内，力传感器的实际测量信号与理论公式的预测值吻合，可用理论公式对传感器测量信号进行预测分析。

3.2 不同材料密度下内层泡沫厚度对检测系统特性影响

为了保证泡沫清管器的通过性和耐磨性，泡沫清管器与管道内壁接触的外层材料密度需要满足特定要求，其弹性模量一般不可任意调节。为了实现对清管器检测系统灵敏度的调节，可以通过调节内层泡沫密度及内层泡沫初始厚度的方式设计清管器，以实现清管器检测系统灵敏度的调节。在调节内层泡沫密度过程中，一般认为泡沫体等效弹性模量与泡沫体密度正相关，密度越大弹性模量越大(由泡沫体材料性质决定)；外层泡沫体密度不变，即等效弹性模量 \bar{E}_1 不变(由通过性和耐磨性需求决定)。

3.2.1 外高内低条件下的内层泡沫厚度影响分析

采用外层泡沫密度高于内层泡沫密度的清管器结构，其内外层泡沫体等效弹性模量比 $m = \frac{\bar{E}_2}{\bar{E}_1} < 1$ ，内层泡沫体初始厚度与泡沫体整体厚度比 $n = \frac{L_2}{L} < 1$ ，则测得力信号可简化为

$$F = \frac{m}{n(1-m) + m} \frac{\bar{E}_1}{L} A \Delta x = S_1 \frac{\bar{E}_1}{L} A \Delta x \quad (8)$$

式中， S_1 为外高内低条件下检测系统灵敏度系数。

根据式(8)分析可以得到不同材料等效弹性模

量比(m)和内层泡沫体厚度比(n)条件下的检测系统灵敏度系数 S_1 如图6所示。

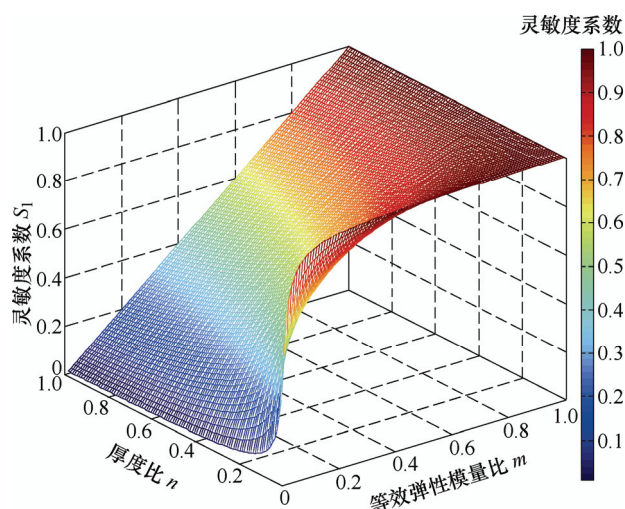


图6 不同材料等效弹性模量比(m)和内层泡沫体厚度比(n)条件下的检测系统灵敏度系数 S_1

从图6可知,采用外高内低材料密度组合下的清管器检测系统,其灵敏度系数变化规律:①检测系统灵敏度随内层泡沫厚度比的增加而减小,即内层泡沫厚度越大检测系统灵敏度越低;②检测系统灵敏度随等效弹性模量比的增加而增加,即内层泡沫体密度越接近外层泡沫体密度,检测系统灵敏度越高;③检测系统灵敏度系数始终小于1,即该结构形成的清管器系统灵敏度始终低于内外层密度相同的清管器系统灵敏度。

综上所述,采用泡沫体密度外高内低条件设计的清管器结构,内层泡沫体的存在会降低检测系统的灵敏度,内层泡沫体材料的等效弹性模量越低厚度越大,检测系统灵敏度越低,应在设计过程中避免出现内层泡沫体密度低于外层泡沫体的情况。

3.2.2 内高外低条件下的内层泡沫厚度影响分析

采用内层泡沫密度高于外层泡沫密度的清管器结构,其内外层泡沫体等效弹性模量比 $m = \frac{\bar{E}_2}{\bar{E}_1} > 1$,

内层泡沫体厚度与泡沫体整体厚度比 $n = \frac{L_2}{L} < 1$,则测得力信号可简化为

$$F = \frac{m}{n(1-m) + m} \frac{\bar{E}_1}{L} A \Delta x = S_2 \frac{\bar{E}_1}{L} A \Delta x \quad (9)$$

式中, S_2 为内高外低条件下检测系统灵敏度系数。

根据式(9)分析得到不同材料等效弹性模量比(m)和内层泡沫体厚度比(n)条件下的检测系统灵敏度系数 S_2 如图7所示。

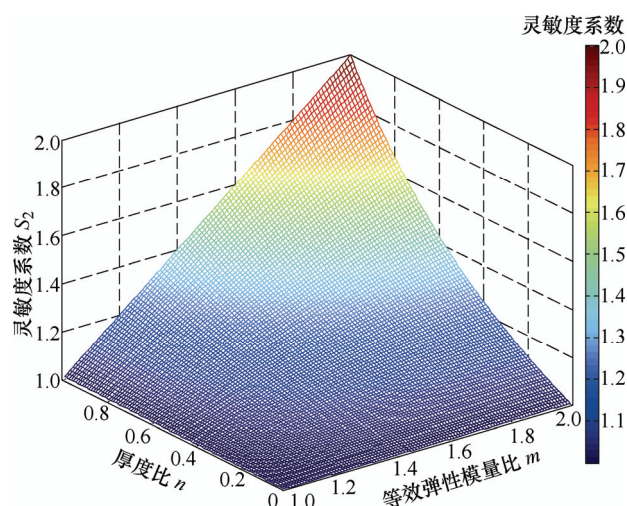


图7 不同材料等效弹性模量比(m)和内层泡沫体厚度比(n)条件下的检测系统灵敏度系数 S_2

从图7可知,采用外低内高材料密度组合下的清管器检测系统,其灵敏度系数变化规律:①检测系统灵敏度随内层泡沫厚度比 n 的增加而增加,即内层泡沫厚度越大检测系统灵敏度越高;②检测系统灵敏度随等效弹性模量比 m 的增加而增加,即内层泡沫体密度越高(等效弹性模量越大),检测系统灵敏度越高;③检测系统灵敏度系数始终大于1,即该结构形成的清管器系统灵敏度始终高于内外层密度相同的清管器系统灵敏度;④在理想条件下,当力传感器位于泡沫体表层时,即无外层泡沫体时($n=1$ 时),检测系统的灵敏度系数达到最大值 $S_{2\max} = m$ 。

综上所述,可以采用增加内层泡沫体材料密度以及增加内层泡沫体材料厚度的方式提升传感器灵敏度。但是,内层泡沫体密度越大,其刚性特征越明显,泡沫体的变形能力越弱,清管器系统的通过性将会减弱。另一方面,内层泡沫体材料越厚,力传感器距离清管器表面越近,这将会导致力传感器更容易被管道变形破坏,降低清管器检测系统的可靠性;减小检测系统的线性工作范围。因此,在设计泡沫智能清管器结构时,需要在充分考虑检测系统的灵敏度指标的基础上优化设计内层泡沫体密度和厚度。

4 结论

针对石油天然气管道完整性管理应用中,现有智能清管器通过性较差,聚氨酯泡沫清管器无法实现智能检测的问题,设计了一种既能对管道进行变形检测又具备泡沫清管器良好通过性的新型泡沫智能清管器。该泡沫智能清管器通过将力传感器置于

泡沫体内,利用管道变形作用下泡沫变形将力信号耦合至力传感器,力学性能的理论分析和标定装置的试验验证结果如下。

(1) 该泡沫清管器能感应管道变形数据,在变形量小于 1/2 传感器埋深时变形检测结果呈良好线性关系。

(2) 采用内外层密度相同的清管器结构检测灵敏度不受传感器深度影响,可增加传感器埋深保护传感器,从而提升系统可靠性。

(3) 采用内高外低的清管器结构可以通过减小传感器埋深和增大内层泡沫密度提升检测灵敏度,但应注意结构改变对检测系统可靠性及线性工作范围的影响。该新型泡沫清管器可以实现变形的快速检测和定位,减少前期清管次数,节省成本;同时由于泡沫清管器的良好通过性,可以提升清管作业的安全性。

参 考 文 献

- [1] 戚爱华. 我国油气管道运输发展现状及问题分析[J]. 国际石油经济, 2009, 17(12): 57-59, 84.
QI Aihua. Current situation and problem analysis of China's oil and gas pipeline transportation[J]. International Petroleum Economics, 2009, 17(12): 57-59, 84.
- [2] SOLGHAR A A, DAVOUDIAN M. Analysis of transient PIG motion in natural gas pipeline[J]. Mécanique & Industries, 2013, 13(5): 293-300.
- [3] 赵弘, 马明, 苏鑫. 基于 CFD 清管器结构的管内流场模拟及优化设计[J]. 油气储运, 2015, 34(5): 562-566.
ZHAO Hong, MA Ming, SU Xin. Internal flow field simulation and design optimization based on CFD pipeline pig structure[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(5): 562-566.
- [4] 马书义, 武湛君, 刘科梅, 等. 管道变形损伤超声导波检测试验研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(14): 1-8.
MA Shuyi, WU Zhanjun, LIU Kemei, et al. Experimental investigation of deformation damage detection in pipes using ultrasonic guided waves. [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(14): 1-8.
- [5] QUARINI J, SHIRE S. A review of fluid-driven pipeline pigs and their applications[J]. Journal of Process Mechanical Engineering, 2007, 221(1): 1-10.
- [6] 李成钢, 张敬安, 郑辉, 等. 油气管道清管器分类研究[J]. 化学工程与装备, 2013(10): 97-99.
LI Chenggang, ZHANG Jingan, ZHENG Hui, et al. Classification of oil and gas pipeline Pig[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2013(10): 97-99.
- [7] 刘刚, 陈雷, 张国忠, 等. 管道清管器技术发展现状[J]. 油气储运, 2011, 30(9): 646-653, 633.
LIU Gang, CHEN Lei, ZHANG Guozhong, et al. Pipeline pigging technology development status quo[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2011, 30(9): 646-653, 633.
- [8] 张磊, 李宜震, 王冲, 等. 清管器应用及分类简析[J]. 化学工程与装备, 2013(7): 173-176.
ZHANG Lei, LI Yizhen, WANG Chong, et al. Application and classification of pigs[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2013(7): 173-176.
- [9] KISHAWY H A, GABBAR H A. Review of pipeline integrity management practices[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2010, 87(7): 373-380.
- [10] 朱喜平. 天然气长输管道清管技术[J]. 石油工程建设, 2005, 31(3): 12-16.
ZHU Xiping. Natural gas long-distance pipeline pigging technology[J]. Petroleum Engineering Construction, 2005, 31(3): 12-16.
- [11] TOLMASQUIM S T. Design and control of pig operations through pipelines[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2008, 62(3): 102-110.
- [12] 吕惠建, 于达, 郑荣荣. 油气管道清管器的研发进展[J]. 管道技术与设备, 2012(4): 43-46.
LÜ Huijian, YU Da, ZHENG Rongrong. Research progress of pigs in oil and gas pipeline[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2012(4): 43-46.
- [13] CANAVESE G, SCALTRITO L, FERRERO S, et al. A novel smart caliper foam pig for low-cost pipeline inspection— Part A : Design and laboratory characterization[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2015, 127: 311-317.
- [14] 陈传胜. 天然气长输管道在线内检测前的清管技术[J]. 天然气与石油, 2013, 31(5): 1-4.
CHEN Chuansheng. Gas pipeline pipeline before pipeline testing[J]. Natural Gas and Oil, 2013, 31(5): 1-4.
- [15] 曲杰, 胡焱松, 岳凯, 等. 硬质聚氨酯泡沫在多轴压缩试验下的力学特性研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(20): 89~97.
QU Jie, HU Yansong, YUE Kai, et al. Research on the mechanical properties of rigid polyurethane foam in the multiaxial compression experiment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(20): 89-97.
- [16] 胡西洋, 沈功田, 卢超, 等. 漏磁检测仪检测通道一致性评价试验[J]. 无损检测, 2015, 37(9): 26-29.
HU Xiyang, SHEN Gongtian, LU Chao, et al. Magnetic flux leakage detector detection channel consistency evaluation test[J]. Nondestructive Testing, 2015, 37(9): 26-29.

作者简介: 熊毅(通信作者), 男, 1982 年出生, 博士, 讲师, 硕士研究生导师。主要研究方向为安全检测、动态风险分析。
E-mail: xiongyi@cup.edu.cn