

输油管道热流固耦合研究

胡爽¹, 焦艳平¹, 张佩¹, 喻继伟²

(1. 兰州理工大学 石油化工学院, 兰州 730050; 2. 中国铁路兰州局集团有限公司兰州工务机械段, 兰州 730014)

摘 要: 为保证输油过程的安全运行, 以热油输送管道为研究对象, 建立管道的三维模型, 利用有限元分析软件 FLUENT 对原油在管道中的流动过程进行模拟。在模拟过程中, 通过改变流体的入口速度以及管道的外壁环境温度, 发现管道的温度变化情况与流体的入口速度无明显的关系, 管道的总变形量随流体的入口速度的增大而逐渐增大, 且总变形量主要集中在管道的弯头处; 管道内外壁温差越大, 管道温度变化越大, 热通量越大, 总变形量和应变越小。模拟结果可对有效避免事故发生的可能性提供解决思路, 可以使输油工程更加安全可靠。

关键词: 管道; 有限元模拟; 热流固耦合; 温度; 总变形量

中图分类号: TE832; TE88 文献标识码: A 文章编号: 1671-0460 (2021) 02-0496-06

DOI:10.13840/j.cnki.cn21-1457/tq.2021.02.054

Research on Thermal-Fluid-Solid Coupling of Oil Pipeline

HU Shuang¹, JIAO Yan-ping¹, ZHANG Pei¹, YU Ji-wei²

(1. School of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
2. Lanzhou Construction Machinery Section, China Railway Lanzhou Bureau Group Co., Ltd., Lanzhou 730014, China)

Abstract: In order to ensure the safe operation of the oil transportation process, the hot oil transportation pipeline was taken as the research object, a three-dimensional model of the pipeline was established, and the flow process of crude oil in the pipeline was simulated using the finite element analysis software FLUENT. In the simulation process, by changing the inlet velocity of the fluid and the ambient temperature of the outer wall of the pipe, it was found that the temperature change of the pipe had no obvious relationship with the inlet velocity of the fluid. The total deformation of the pipe gradually increased with the increase of the inlet velocity of the fluid, and the total deformation was mainly concentrated at the elbow of the pipe; the greater the temperature difference between the inner and outer walls of the pipe, the greater the temperature change of the pipe and the greater the heat flux, the smaller the total deformation and strain. The simulation results can provide a solution for effectively avoiding the possibility of accidents, and making the oil transportation project safer and more reliable.

Key words: Pipeline; Finite element simulation; Thermal-fluid-solid; Temperature; Total deformation

输油管道是国家工业发展的重要保障。相比其他运输介质, 油气具有一定的腐蚀性且易燃、易爆^[1-2], 因此原油输送是一项高危的工程, 一旦发生故障必将造成巨大的损失, 所以保证输油过程的安全可靠性是重中之重。当前输油管道以钢材为主, 其在强度、刚度、经济性等方面有较大的优势, 但其耐腐蚀性相对较差, 腐蚀破坏已成为一种常见的输油管道失效形式^[3], 2013 年青岛^[4]、2014 年台湾高雄^[5]均出现了由于腐蚀而引起的管道爆炸的破坏事件, 造成了很大的损失。针对腐蚀可能引起的问题, CHEN^[6-7]等对钢制管道的失效形态和失效压力进行了分析研究。黄坤等^[8]利用 ABAQUS 模拟软件和 MATLAB 软件, 对内外壁腐蚀缺陷对管道干涉作用的影响因素进行研究, 得到缺陷深度是主要因素, 长度次之, 宽度影响较小。马国光等^[9]通过逐步搜

索法, 得到了输油管道热力学最小输量和水力学最小输量。侯志强和于涛等^[10-11]利用 BP 神经网络等对油品管道的安全风险进行评估。赵新伟等^[12]简述国内外输油管道的研究进展, 提出管道的完整性管理研究。赵煜等^[13]利用 FLUENT 模拟软件, 对不同的输送压力下原油管道在土壤中的泄露范围和速度场进行了研究。

目前, 国内外学者对于输油管道的研究主要集中于输油管道的腐蚀、泄露、安全评价及安全可靠性预测等方面, 对管道在热油运输过程中可能引起的管道温度变化、总变形量等研究较少。本文建立简单的输油管道模型, 利用 FLUENT 软件, 通过改变原油的入口速度, 发现管道的温度变化情况与流体的入口速度无明显的关系, 管道的总变形量随流体的入口速度的增大而逐渐增大, 且总变形量主要

基金项目: 甘肃省自然科学基金 (项目编号: 1610RJZA029)。

收稿日期: 2020-06-01

作者简介: 胡爽 (1992-), 男, 辽宁省沈阳市人, 在读硕士研究生, 研究方向: 化工管道安全技术。E-mail: 215015461@qq.com。

集中在管道的弯头处; 通过改变环境温度, 发现管道内外壁温差越大, 温度变化越大, 热通量越大, 总变形量和应变越小。针对模拟结果, 建议在弯头处添加固定约束等方法来减小管道的变形量, 可以有效地避免事故发生的可能性, 可以使输油工程更加安全可靠。

1 模型建立

1.1 物理模型

本文建立的输油管道的简单三维模型, 设置两个 90° 的弯头。管道的内径为 500 mm, 壁厚为 40 mm, 入口管道长度设置为 1 500 mm, 出口管道长度设置为 1 500 mm, 管道弯头的曲率半径设置为 1 250 mm。管道的三维模型及相关尺寸如图 1 所示。

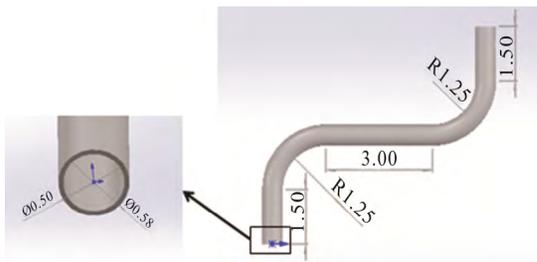


图 1 输油管道三维模型
Fig.1 Three-dimensional model of oil pipeline

1.2 网格划分

不同的网格划分方法会引起最终计算结果的差异, 为使计算可较好的收敛且网格疏密程度对计算结果的影响较小, 需要选取较适合本次模拟的网格进行计算分析^[14]。因本文模拟研究涉及传热计算, 故对流体网格划分设置了膨胀层, 并对弯头处的流体进行加密处理。流体共划分了 27 511 个节点, 57 467 个网格, 整体及局部的网格划分如图 2 所示。

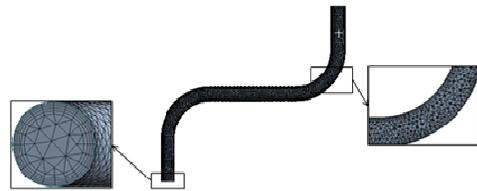


图 2 管道网格划分
Fig.2 Pipeline meshing

1.3 计算条件

本文使用标准的 k-omega 湍流模型, 并选中 Low-Re Corrections 选项, 进口流体设置为 velocity (速度入口), 出口流体采取 pressure (压力出口)。流体设置为液体燃油 (fuel oil liquid), 求解器使用 Simple 求解方式进行耦合计算机计算。其基本参数如表 1 所示。管道设置为钢 (steel), 其基本参数如表 2 所示。

表 1 液体燃油的基本物理参数
Table 1 Basic physical parameters of liquid fuel

密度/(kg·m ⁻³)	比热容/[J·(kg·K) ⁻¹]	导热系数/[W·(m·K) ⁻¹]	黏度/[kg·(m·s) ⁻¹]	潜热/(J·kg ⁻¹)	沸点/°C
960	1 880	0.12	0.048	124 000	315.85

表 2 管道材料的基本物理参数
Table 2 Basic physical parameters of pipeline materials

密度/(kg·m ⁻³)	比热容/[J·(kg·K) ⁻¹]	导热系数/[W·(m·K) ⁻¹]	泊松比	杨氏模量/Pa	剪切模量/Pa	体积模量/Pa
8030	502.48	16.27	0.3	2 × 10 ¹¹	7.692 3 × 10 ¹⁰	1.666 7 × 10 ¹¹

2 控制方程

管道输油过程处于流场、温度场及结构场的多物理场耦合过程, 在 Fluent 模拟过程中, 建立了流体流动模型、传热模型和力学模型。流场、固体区域及界面耦合控制方程如下。

2.1 流体控制方程^[15-17]

1) 质量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \alpha) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_g \alpha u_i) = 0 \quad (1)$$

2) 动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_f v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_f v_j v_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \rho_f \overline{v_i v_j} \right) + S_i \quad (2)$$

3) 能量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho_f h)}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_f v_j h + \rho_f v_j \overline{h'}) = x_j \frac{\partial p}{\partial x_j} - \rho_f \overline{v_j v_j} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + S_E \quad (3)$$

其中: ρ_f —流体密度, kg·m⁻³;
 v —流体时均速度, m·s⁻¹;
 v' —脉动速度, m·s⁻¹;
 h —流体焓;
 p —流体的静压, Pa;
 μ —湍流黏度, Pa·s;
 S_i —能量源项,
 S_E —动量源项, 在本文研究过程中为 0。

2.2 固体控制方程^[18]

$$M \frac{d^2 r}{dt^2} + C \frac{dr}{dt} + Kr = F \quad (4)$$

式中: M —质量矩阵;

C — 阻尼矩阵;
 K — 刚度矩阵;
 r — 位移矢量;
 F — 力矢量。

2.3 传热控制方程^[19]

$$Q = kA\Delta t_m \quad (5)$$

式中: Q — 传热速率;
 k — 传热系数;
 A — 传热面积;
 Δt_m — 传热的平均温差。

2.4 耦合控制方程

流固交界面处应满足流体与固体的位移、热量、温度、应力等相^[20]:

$$\begin{cases} n_f \cdot T_f = n_s \cdot T_s \\ r_f = r_s \\ q_f = q_s \\ T_f = T_s \end{cases} \quad (6)$$

式中: 下标 f — 流体;
 下标 s — 固体;
 q — 热流量;
 T — 温度场。

3 模拟结果与讨论

3.1 原油流场分析

设置流体介质为液体原油 (fuel oil liquid), 入口速度设置为 1 m/s, 原油初始化计算入口温度设置为 50 °C, 流体的速度云图、速度矢量图如图 3、图 4 所示, 流体的压力云图如图 5 所示, 流体的温度云图如图 6 所示。

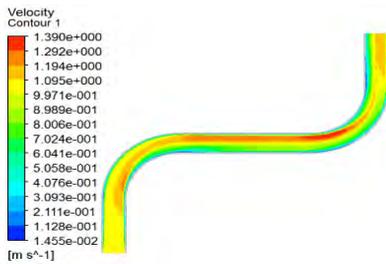


图 3 流体的速度云图
Fig. 3 Fluid velocity cloud

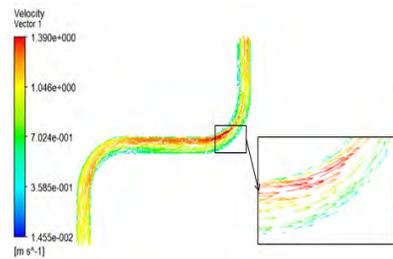


图 4 流体的速度矢量图
Fig.4 Fluid velocity vector

由图 3 和图 4 的速度云图和速度矢量图可知, 当入口速率为 1 m·s⁻¹, 流体的速度在入口管道和出口管道处较平稳, 在直管部分流体的速度较大, 在第二个弯头处流体的速度最大, 当改变流体的入口速度, 流体速度有同样的规律。

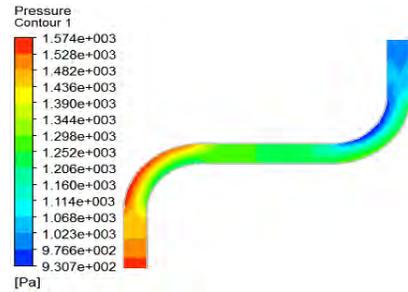


图 5 流体的压力云图
Fig.5 Pressure cloud of fluid

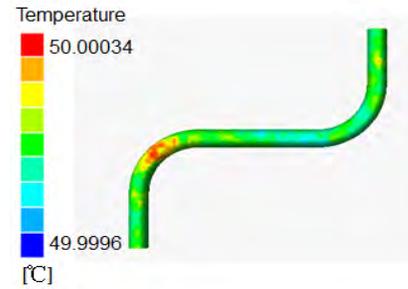


图 6 流体的温度云图
Fig.6 Fluid temperature cloud

由图 5 压力云图可知, 流体入口的压力较大, 随着流体的流动, 压力逐渐降低。在第一个管道弯头流体的外侧, 流体的压力大于内侧; 在第二个管道弯头流体的内侧, 流体的压力小于外侧。由图 6 的流体温度云图可知, 入口流体为 50 °C, 在管道内的流体温度基本保持不变, 第一个弯头的温度较高。

3.2 管道热分析

设置流体介质为液体原油 (fuel oil liquid), 原油初始化计算入口温度设置为 50 °C 下管道的温度变化云图如图 7 所示: (a) 入口速度设置为 1.5 m·s⁻¹, 环境温度为 45 °C; (b) 入口速度设置为 2.5 m·s⁻¹, 环境温度为 45 °C; (c) 入口速度设置为 1.5 m·s⁻¹, 环境温度为 25 °C。

由图 7 (a) (b) (c) 所示, 管道的温度从管道内壁到管道外壁逐渐降低; 对比图 7 (a) 和 (b), 只改变流体的入口速度, 管道温度的变化情况基本一致; 对比图 7 (a) 和 (c), 只改变环境温度, 管道内外温差越大, 温度梯度越大。

速度无明显关系。管道内外壁温差越大, 温度变化越大, 热通量越大

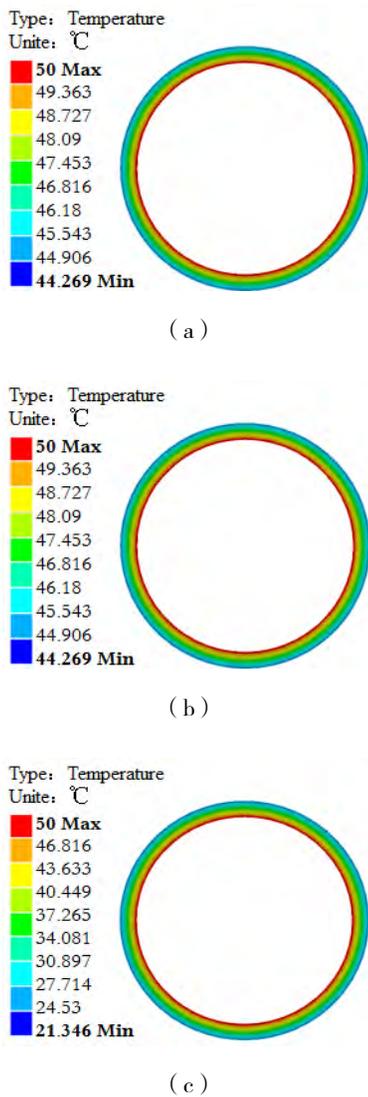


图 7 管道的温度变化云图

Fig.7 Temperature change cloud of the pipeline

热通量又叫热流密度, 表示通过单位面积的热能。设置流体介质为液体原油 (fuel oil liquid), 原油初始化计算入口温度设置为 50 °C 下管道的热通量变化云图如图 8 所示: (a) 入口速度设置为 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 环境温度为 45 °C; (b) 入口速度设置为 $2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 环境温度为 45 °C; (c) 入口速度设置为 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 环境温度为 25 °C。

通过对比图 8 (a) 和 (b), 只改变流体的入口速度, 管道热通量的变化情况基本一致; 通过有规律地改变流体的入口速度, 热通量的变化并无规律; 对比图 8 (a) 和 (c), 只改变环境温度, 管道内外温差越大, 热通量越大。

综上所述, 管道的温度变化情况和热通量变化情况与管道内外温差有一定的关系, 与流体的入口

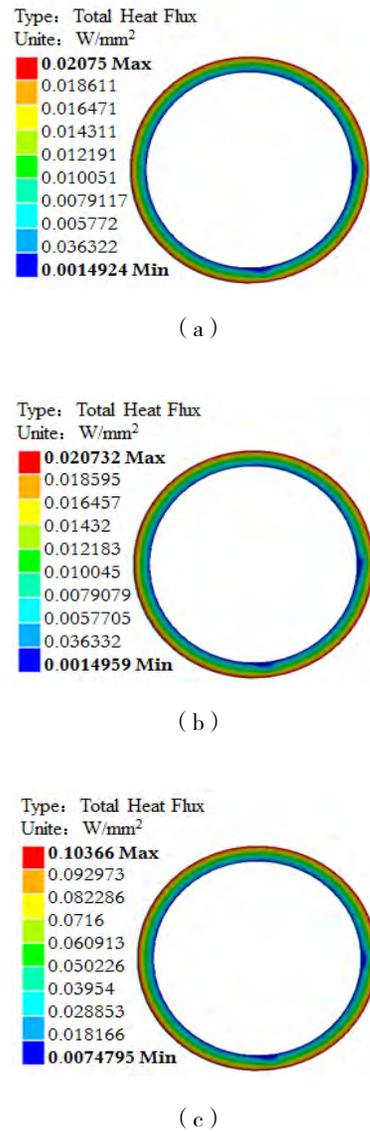


图 8 管道的热通量云图

Fig.8 Heat flux cloud of pipeline

3.3 管道应力分析

设置流体介质为液体原油 (fuel oil liquid), 入口和出口的截面设置为固定约束, 原油初始化计算入口温度设置为 50 °C 下管道的总变形量如图 9 所示: (a) 入口速度设置为 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 环境温度为 45 °C; (b) 入口速度设置为 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 环境温度为 45 °C; (c) 入口速度设置为 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 环境温度为 45 °C; (d) 入口速度设置为 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 环境温度为 45 °C。管道的应变云图如图 10 所示: (a) 入口速度设置为 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 环境温度为 45 °C (b) 入口速度设置为 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 环境温度为 25 °C。

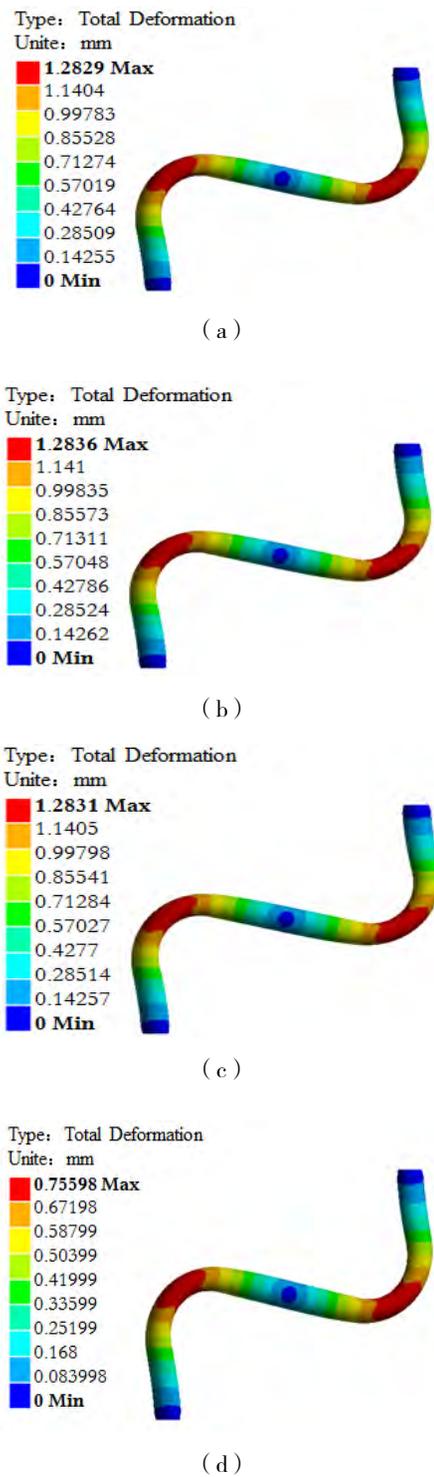


图9 管道的总变形量
Fig.9 Total deformation of the pipeline

由图9(a)(b)(c)(d)所示,管道的总变形量主要集中在管道的弯头处,较大变形量可能存在较大的安全隐患,故可以在弯头或靠近弯头的部位添加支架等固定约束来降低管道弯头的总变形量。通过对比图9(a)(b)和(c),保持环境温度不变,流体的入口速度不同,管道的总变形量也不同;对

比图9(c)和(d),图10(a)和(b),保持流体的入口速度不变,只改变环境温度,管道内外温差越大,总变形量和应变越小。

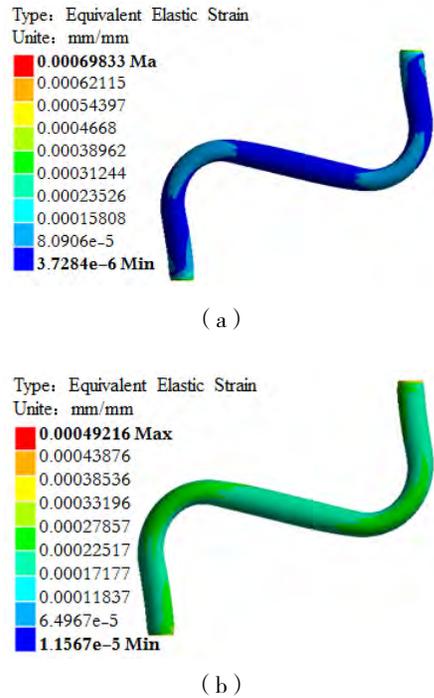


图10 管道的应变云图
Fig.10 Strain cloud of pipeline

设置流体介质为液体原油 (fuel oil liquid),原油初始化计算入口温度设置为 50 ℃,环境温度为 45 ℃,管道的总变形量随入口流体速度的变化情况如图11所示。

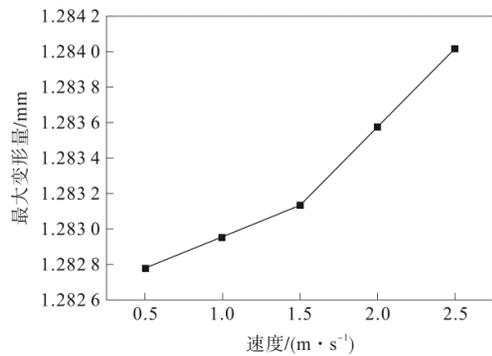


图11 管道的总变形量随入口速度的变化情况
Fig.11 Variation of the total deformation of the pipeline with the inlet velocity

由图11所示,保持原油初始化计算入口温度设置为 50 ℃,入口和出口的截面设置为固定约束,环境温度为 45 ℃不变,当流体的速度在一定的范围内,管道的总变形量随流体的入口速度的增大而逐渐增大。

(下转第 504 页)

等离子、质量浓度为 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Eu 溶液作为参比, 之后将 Eu 加入待测溶液中。比较待测溶液的 Eu 发射强度和参比溶液的 Eu 发射强度, 从而将得到的比值对样品中的重金属测定结果进行校正。根据上述的步骤, 得到表 10 的结果。

表 10 内标法对含 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 共存离子的 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 标准溶液的校正结果
Table 10 Correction results of $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ standard solution containing $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ coexisting ions by internal standard method

测定结果/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	Pb	Cd	Se	Ni	Hg	Cr
测定值	0.83	0.82	0.81	0.84	0.78	0.82
标准值	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
校定值	0.93	0.94	0.92	0.93	0.91	0.97

根据上述的结果看出, 上述校正的结果大部分偏差在 10% 以内, 说明校准可有效改善干扰离子的影响。

3 结论

通过微波消解处理样品, 然后再采用 ICP-OES

分析样品中的重金属离子, 具有高精密度、高回收率和低检测限等特点, 并得到最优的微波消解参数。同时通过研究, 还对样品中的钙镁离子干扰问题进行了实验, 提出了内标法来修正测定结果。

参考文献:

- [1] 潘佳钊, 郭鹏然, 程斌, 等. 基于 MP-AES 的在线检测技术在地表水中重金属监测中的应用[J]. 分析测试学报, 2017, 36(4): 529-533.
- [2] 顾晓明, 张晓赞, 苏明玉, 等. 原子荧光法和电感耦合等离子体质谱法测定水中铅的比较[J]. 污染防治技术, 2017, 30(5): 62-64.
- [3] 王建滨, 黄荣华. 在线 ICP-MS 检测地表水中 19 种元素[J]. 环境监控与预警, 2018, 10(2): 23-25.
- [4] 付金娥, 滕红丽, 郭力城. 微波消解-ICP-OES 分析白骨壤果实中微量元素[J]. 药物分析杂志, 2015, 35(1): 41-45.
- [5] 赵科明, 兰青, 陈英, 等. ICP-OES 测定阳极泥 6 种金属的 3 种消解方法[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(3): 100-104.
- [6] 虞洁, 梁惠贞. ICP-MS 法测定岩矿样品中 23 种痕量元素的方法研究[J]. 当代化工, 2018, 47(12): 2704-2707.
- [7] 何霜, 李姗, 王志雄, 等. 基于微波消解的 ICP-OES/ICP-MS 法测定茶叶中 30 种矿物质元素[J]. 食品工业科技, 2017, 38(12): 1-6.
- [8] 何恬叶, 张颖红, 胡子文. 微波消解 ICP-OES 法测定土壤样品中 22 种元素[J]. 分析实验室, 2018, 37(1): 84-87.

(上接第 500 页)

4 结论

1) 通过改变流体的入口速度, 发现管道的温度变化情况与流体的入口速度无明显的关系; 通过改变管道内外壁温差, 发现温差越大, 温度变化越大, 热通量越大。

2) 只改变流体的入口速度, 管道的总变形量随流体的入口速度的增大而逐渐增大, 且总变形量主要集中在管道的弯头处; 只改变管道内外壁的温差, 发现管道内外温差越大, 总变形量和应变越小。

参考文献:

- [1] 孙菲. 油气储运工程现状及其关键技术研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(1): 198-199.
- [2] 栾锡武. 世界油气资源现状与未来发展方向[J]. 中国地质调查, 2016, 3(2): 1-9.
- [3] 李鹤林, 吉玲康, 田伟. 高强度钢管和高压输送: 我国油气输送管道的重大技术进步[J]. 中国工程科学, 2010, 12(5): 84-90.
- [4] 鲁明程, 肖寒, 左兵. 基于青岛“11·22”中石化输油管道泄漏爆炸事故预防研究[J]. 科技视界, 2017(34): 149+154.
- [5] 王宁. 对输油管道爆燃事故多发的反思[J]. 现代职业安全, 2014(8): 42.
- [6] CHEN Y, ZHANG H, ZHANG J, et al. Failure assessment of X80 pipeline with interacting corrosion defects[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2015, 47: 67-76.
- [7] FILHO J E A, MACHADO R D, BERTIN R J, et al. On the failure pressure of pipelines containing wall reduction and isolated pit corrosion defects[J]. *Computers & Structures*, 2014, 132:22-33.

- [8] 黄坤, 杨磊, 李安然. 油气管道内外壁腐蚀缺陷干涉作用影响因素研究[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 199-204+223.
- [9] 马国光, 蒲鑫. 塔河油田重质原油外输管道安全输量分析[J]. 科学与技术, 2019, 19(36): 147-152.
- [10] 侯志强, 赵鹏, 曾春雷. 石化港区油品管道安全风险评技术研究报告[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(2): 371-377.
- [11] 于涛, 李传宪, 张杰, 等. 基于 MEA-BP 神经网络热油管道预测模型研究[J]. 当代化工, 2020, 49(4): 751-756.
- [12] 赵新伟, 李鹤林, 罗金恒, 等. 油气管道完整性管理技术及其进展[J]. 中国安全科学学报, 2006(1): 129-135.
- [13] 赵煜, 吕孝飞, 郭文敏, 等. 埋地原油管道稳态泄漏数值模拟[J]. 石油机械, 2019, 47(6): 114-120.
- [14] 康顺, 石磊, 戴丽萍, 等. CFD 模拟的误差分析及网格收敛性研究[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(12): 2009-2013.
- [15] 李静雅, 徐力生, 徐蒙. 基于 CFD-DPM 耦合法新型差压密度计中水泥浆液流动特性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(5): 1308-1315.
- [16] YU R L, LIANG R, ZHOU W H, et al. Stress analysis of a filter screen based on dimensional analysis and finite element analysis[J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2020, 14(1): 168-179.
- [17] 张雪平, 齐凤升, 邢作霞, 等. 基于风电消纳电热储能装置热流固耦合研究[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(4): 689-695.
- [18] 党园, 姜东飞, 谷倩倩, 等. 基于 COMSOL 热流固耦合的金属氧化物避雷器密封结构优化[J]. 高电压技术, 2020, 46(3): 852-859.
- [19] 袁哲, 徐东, 刘春宝, 等. 基于热流固耦合过程的液力缓速器叶片强度分析[J]. 吉林大学学报(工学版), 2016, 46(5): 1506-1512.
- [20] 张文涛, 李珂, 罗凯. 基于热流固耦合理论斜-平面曲轴止推片润滑性能分析[J]. 润滑与密封, 2019, 44(10): 77-82.