

基于电—声复合传感器测量含水合物液膜厚度仿真研究

贺世超¹, 张新铭¹, 邢兰昌¹, 魏伟², 韩维峰², 王斌¹

(1. 中国石油大学(华东)控制科学与工程学院, 山东 青岛 266580;

2. 中国石油勘探开发研究院 新能源研究所, 河北 廊坊 065007)

摘要: 针对天然气输送管道内含水合物液膜的厚度测量问题, 基于电—声联合探测方法原理设计了集成同轴圆盘—双环电极和超声晶片的内嵌凹面式电—声复合传感器, 建立了数值仿真模型对传感器的结构和工作参数进行了优化, 并分别对含有离散分布水合物颗粒和水合物沉积层液膜的厚度进行了仿真测量, 讨论了电阻法和超声渡越时间法的适用性; 研究表明: 同轴圆盘—双环电极中的圆盘电极的半径、圆盘电极/内环电极的间距是影响电学测试空间灵敏度的主要结构参数, 超声波频率对声学测试空间灵敏度产生显著影响, 因此需要对凹面式电—声复合传感器的参数进行优化设计; 电阻法和超声渡越时间法分别适用于测量水合物以离散颗粒形态分布和以沉积层形态分布的液膜, 两类方法优势互补显著, 拓宽了电—声复合传感器的适用范围。

关键词: 天然气水合物; 液膜厚度; 电—声复合传感器; 内嵌凹面式; 离散颗粒; 沉积层

Simulation Study on Measurement of Hydrate-bearing Liquid Film Thickness Based on Electrical-acoustic Compound Sensor

He Shichao¹, Zhang Xinming¹, Xing Lanchang¹, Wei Wei², Han Weifeng², Wang Bin¹

(1. College of Control Science and Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

(2. Department of Alternative Energy, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Langfang 065007, China)

Abstract: To measure the liquid film thickness containing hydrate in natural gas pipelines, an embedded concave electrical-acoustic compound sensor was designed based on the principle of electrical-acoustic joint detection method. A numerical simulation model was established to optimize the structure and working parameters of the sensor, and the liquid film thickness with discrete hydrate particles and hydrate deposition layers was measured by simulation. Finally the applicability of the resistance method and ultrasonic transit time method was discussed. The radius of the disk-shaped electrode and the distance between the disk-shaped electrode and the inner ring electrode are the major structural parameters that affect the spatial sensitivity of the electrical test. The ultrasonic frequency has a significant impact on the spatial sensitivity of the acoustic test. Therefore, it is necessary to optimize the parameters of the concave electrical-acoustic compound sensor. The resistance method and ultrasonic transit time method are suitable for measuring the liquid film with discrete particles and sedimentary layer, respectively. The advantages of the two methods are complementary to each other, thus the application range of the electrical-acoustic compound sensor is greatly widened.

Keywords: natural gas hydrate; liquid film thickness; electrical-acoustic compound sensor; embedded concave; discrete particle; sedimentary layer

0 引言

液反应器等化工设备中^[1-2]。在一定的温度和压力条件下,

液膜广泛存在于石油化工管道、冷凝器、蒸发器、气 天然气输送管道中的天然气与液相中的自由水易形成天然

收稿日期: 2020-08-03; 修回日期: 2020-08-31。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51306212); 中国石油科技创新基金项目(2018D-5007-0214); 山东省自然科学基金项目(ZR2019MEE095); 中石油重大科技项目(ZD2019-184-001); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(20CX05005A)。

作者简介: 贺世超(1995-), 女, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要从事检测技术与控制工程方向的研究。

通讯作者: 邢兰昌(1983-), 男, 山东德州人, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事检测技术与自动化装置、计算机测控系统、天然气水合物与多相流相关检测理论与方法、多物理场耦合数值模拟方法等方向的研究。

引用格式: 贺世超, 张新铭, 邢兰昌, 等. 基于电—声复合传感器测量含水合物液膜厚度仿真研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(3): 48-53.

气水合物, 从而在管壁上形成含天然气水合物的液膜。准确测量含水合物液膜的厚度对于天然气输送管道系统的安全高效运行具有重要意义。

国内外研究者针对管道中天然气水合物的生成、聚集、沉积规律开展了一系列的研究工作。Rao等^[3]开展了霜冻沉积实验并证实在水饱和气体系统中生成的水合物会沉积到管道冷壁面上, 水合物沉积过程与霜沉积类似。Joshi等^[4]发现随着水合物颗粒的逐渐生成, 出现颗粒在水中均匀悬浮状态到非均匀悬浮状态的过渡。Akhfash等^[5]直接观察了水相中的水合物颗粒分布, 发现随着水合物颗粒量的增加, 固态水合物颗粒呈现从均匀分布到非均匀分布的转变, 并且最终在管壁形成沉积层。Di等^[6-7]研究发现含水量和含气量对水合物的生成速度和沉积过程有显著影响, 不同的流速和流型下水合物的形成过程与沉积形态也不同。Ding等^[8]研究了管道内分层流、泡状流、段塞流、环状流等4种不同流型下水合物的聚集和沉积特性, 发现水合物形成之后继而在管壁上逐渐沉积生长, 不同流型下的水合物聚集和沉积程度不同。刘宝玉等^[9]利用欧拉双流体模型, 采用SIMPLE算法和标准 $k-\epsilon$ 湍流模型, 以Fluent为平台研究了管道中水合物浆液沿轴向和径向的流速变化, 发现当流速较小时管道底部出现流动或滑动的水合物淤积层, 当流速较大时管道底部固体颗粒随流体流动。任中波等^[10]对气体系主导体系、油基体系、部分分散体系、水主导体系等多相流管输送体系中的水合物沉积机理和影响因素进行了分析与讨论。

天然气输送管道中, 含水合物液膜厚度变化范围大、液膜中组分的物理性质复杂且各相空间分布存在多种形态, 若采用单一测量原理的技术对液膜厚度进行测量, 测量结果的可靠性和准确性无法得到保证。按照测量原理可将液膜厚度测量方法分为电学法^[11-13]、声学法^[14-16]、光学法、辐射法和成像法等, 各种测量方法均具有各自的优势和局限性。其中电学法和声学法具有准确度较高、响应较快、安全性高、性价比高等优点, 在实验室和工业现场广泛使用。电学法主要包括电阻法和电容法, 基于液膜电阻或电容与液膜厚度之间的关系, 研究者各自采用不同结构的电学传感器测量液膜厚度; 声学法主要包括超声渡越时间法、超声多普勒法等, 根据超声波传播的渡越时间、频率变化等参数对液膜厚度进行测量。电学法适用于测量较薄液膜的厚度, 测量精度高且安全高效, 但对于较厚液膜测量精度相对较低; 而声学法在测量较薄液膜时存在一定盲区, 更加适用于测量较厚的液膜^[17]。

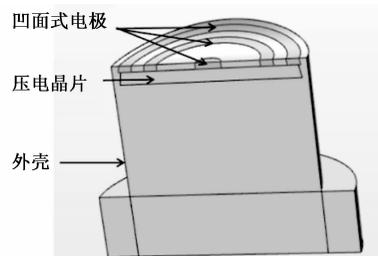
针对管道中含天然气水合物液膜的厚度测量问题, 以前期所提出的电-声联合探测方法为基础^[17-18], 首先设计凹面式电-声复合传感器的基本结构, 然后建立数值模型对电极结构参数和超声波频率进行优化, 最后分别对含有离散分布水合物颗粒和水合物沉积层液膜的厚度进行了仿

真测量。

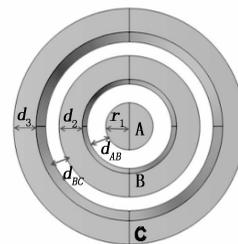
1 凹面式电-声复合传感器和数值模型

1.1 传感器基本结构

针对水平圆管中的液膜测量问题, 为了避免对待测液膜产生扰动作用, 设计了内嵌凹面式电-声复合传感器, 传感器结构如图1(a)所示, 传感器包括两部分: 电学部分和声学部分。电学部分是由一个圆盘电极A、内环电极B和外环电极C构成的凹面式同轴圆盘-双环电极, 相邻电极间填充绝缘材料。电极A、C构成激励电极对, 供以恒定的电流, 电极环C接地; 电极A、B构成测量电极对, 通过测量A、B两电极之间的电压 U_{AB} 计算电极间液膜的电阻值, 利用液膜厚度与液膜电阻之间的关系模型实现对液膜厚度的计算。声学部分采用活塞式压电晶片, 用来发射和接收超声波。凹面式电极的结构图及结构参数如图1(b)所示, 结构参数如下: r_1 为圆盘电极A的半径; d_{AB} 为A、B电极之间的距离; d_2 为环状电极B的宽度; d_{BC} 为B、C电极之间的距离; d_3 为环状电极C的宽度。



(a) 复合传感器



(b) 同轴圆盘-双环电极

图1 凹面式电-声复合传感器结构示意图

1.2 数值模型

向同轴圆盘-双环电极的激励电极间供以恒定的电流, 从而在液膜中建立敏感电场。电场中的恒定电流条件为:

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (1)$$

式中, J 为传导电流密度。导体内存在的电场与传导电流密度 J 的关系遵守欧姆定律:

$$J = \sigma E \quad (2)$$

式中, σ 为介质电导率, E 为电场强度。电场中的任一点处的电场强度 E 可用该点的电势 φ 来表征:

$$E = -\nabla \varphi \quad (3)$$

根据电场内的介质电导率及边界条件求解以上电场方

程, 可以获得电压、电流、电阻等电场参数, 进而可利用液膜厚度与液膜电阻之间的关系模型进行厚度计算。

描述声波传播的波动方程为:

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_0} (\nabla p) \right) - \frac{\omega^2 p}{\rho_0 c_s^2} = 0 \quad (4)$$

式中, ρ_0 为介质材料的密度, p 为声场中由于声扰动引起的声压, c_s 为介质材料的声速, ω 为角频率。结构力学方程表示为:

$$-\rho \omega^2 u - \nabla \cdot \sigma = F_v e^{i\varphi} \quad (5)$$

式中, ρ 为压电材料的密度, u 为位移, σ 为应力, F_v 为体积力, $e^{i\varphi}$ 为位相因子。电场方程表示为^[19]:

$$\nabla \cdot D_e = \rho_v \quad (6)$$

式中, D_e 为电位移, ρ_v 为体积电荷密度。

以 COMSOL Multiphysics 为软件平台建立凹面式电一声复合传感器及水平管道模型, 模型的几何结构如图 2 所示。模型几何结构的主要参数为: 传感器端面直径为 16 mm, 同轴圆盘—双环电极的外环电极 C 外径为 14 mm、超声晶片的直径为 15 mm, 管道的管径为 0.05 m、管长为 1 m。

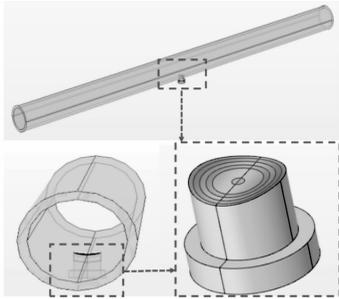


图 2 三维传感器及管道模型

通过 AC/DC 模块中的静电场物理接口来实现对电场的数值计算。在数值模型中, 金属电极材料设定为铜, 电导率设置为 5.998×10^7 S/m; 液膜中水的电导率设置为 0.025 S/m, 相对介电常数设为 81, 天然气水合物为不导电材料。声场的数值计算采用静电—固体力学—压力声学 3 个物理场接口, 通过声—结构边界条件来实现多物理场耦合。压电材料设定为 PZT-5H。管道中水的声速设定为 1 402 m/s, 密度设定为 1 000 kg/m³, 根据天然气输送管道中的温度和压力条件 (此处为 5 MPa 和 1 °C), 将天然气声速设定为 414 m/s, 密度设定为 39.8 kg/m³; 天然气水合物声速设定为 3 300 m/s, 密度设定为 912 kg/m³^[20]。

网格划分越精细, 则网格数量越多, 数值模型的求解时间越长。选取五组不同单元尺寸网格的模型 (最大单元尺寸变化范围为 2.00 mm ~ 1.00×10^2 mm, 最小单元尺寸变化范围为 2.00×10^{-2} mm ~ 1.80×10^1 mm) 对网格数量进行优化。以传感器结构参数 $r_1 = 1.0$ mm、 $d_{AB} = 1.0$ mm、 $d_2 = 1.0$ mm、 $d_{BC} = 1.0$ mm、 $d_3 = 1.0$ mm、管道内为单相水为例, 图 3 所示为五组网格划分条件下的模型计算结果。

分析图 3 可知: 当网格数量较少时, 相同液膜厚度对应的液膜电阻值存在较大的变化, 此时网格数量对仿真结果影响较大; 当网格划分较密时, 相同厚度液膜的电阻值非常相近, 可认为网格数量不再显著影响电阻值计算结果, 此时选择模型 4 (最大单元尺寸为 3.50 mm, 最小单元尺寸为 5.00×10^{-2} mm) 的网格密度建立数值模型。

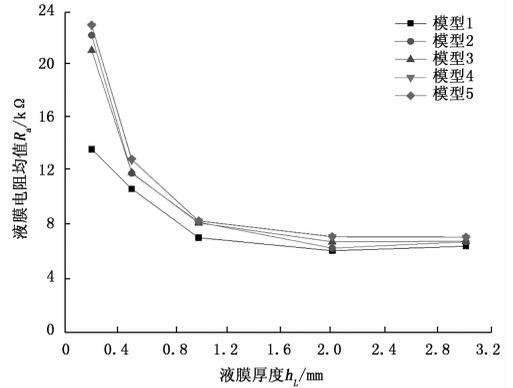


图 3 不同网格划分条件下模型计算的液膜电阻随厚度变化

2 传感器参数优化

2.1 电极结构参数

在不同电极结构参数 (r_1 、 d_2 、 d_3 、 d_{AB} 和 d_{BC}) 条件下, 通过仿真求解数值模型获得液膜厚度处于 0.2 mm 至 4.0 mm 范围内的液膜电阻值。通过分析仿真数据可知, r_1 和 d_{AB} 是影响液膜电阻测量值以及传感器电学测量性能的主要结构参数。基于以上分析结果, 将同轴圆盘—双环电极的 d_2 、 d_3 和 d_{BC} 均设为固定值 1 mm, 保持外环电极 C 的外径为 14 mm, 则 r_1 和 d_{AB} 满足关系 $r_1 + d_{AB} = 4$ mm。

考虑到三维模型结构相对复杂, 数值运算时间较长, 故将三维模型简化为管道横截面二维模型。其中管道横截面高度方向为 y 轴, 宽度方向为 x 轴。选取 $(r_1, d_{AB}) = (1.0$ mm, 3.0 mm)、(1.5 mm, 2.5 mm)、(2.0 mm, 2.0 mm)、(2.5 mm, 1.5 mm)、(3.0 mm, 1.0 mm) 五组电极结构参数进行仿真计算。以下通过分析结构参数对传感器灵敏度及敏感场特性的影响来确定最优的结构参数。

电学测试空间灵敏度通过以下方式计算: 假设管道中充满水时, 测量电极间的电压为 $U_{AB(\omega)}$, 将一个不导电的圆形实心颗粒置于管道内不同位置 (x_i, y_i) 处, 此时测量电极间的电压为 $U(x_i, y_i)$, 该输出电压与圆形颗粒所处的位置有关, 则定义位置 (x_i, y_i) 的电学测试空间灵敏度 S_i 为:

$$S_i = \frac{U(x_i, y_i)}{U_{AB(\omega)}} \times 100\% \quad (7)$$

在 y 轴 (沿管道高度方向) 的不同位置处放置测试颗粒, 由测量电极输出电压计算对应位置处的空间灵敏度。图 4 显示了灵敏度沿 y 轴的分布规律曲线。由图可见: 随着 r_1 数值的增大 (同时 d_{AB} 数值减小), 相同位置处的灵敏

度减小, 当 r_1 为 1 mm、 d_{AB} 为 3 mm 时各位置处的灵敏度较高; 靠近电极区域内液膜电阻对于液膜厚度变化更为敏感, 为高灵敏度区域。

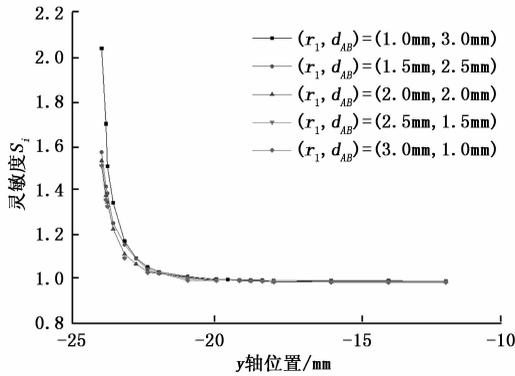


图4 五组结构参数下的沿 y 轴的电学测试空间灵敏度

综合分析五组电极结构参数对电场灵敏度的影响, 最终确定凹面式电极结构参数为 $r_1 = 1.0$ mm、 $d_{AB} = 3.0$ mm、 $d_2 = 1.0$ mm、 $d_{BC} = 1.0$ mm 和 $d_3 = 1.0$ mm。

2.2 超声波频率

超声波频率影响声场分布和指向性特征, 从而影响液膜厚度测量下限和超声回波信号的质量, 继而影响液膜厚度测量的准确度。频率较低时超声波传播过程中能量衰减系数较小, 但是指向性和分辨率下降, 测量精度相应降低, 一般用于液体介质的超声波换能器中心频率为 1~5 MHz^[21]。以下对管道内为单相水时的工况进行数值模拟, 计算超声波频率分别为 1.00 MHz、1.25 MHz、1.50 MHz、2.50 MHz、3.5 MHz 时的声压级分布, 继而计算声学测试空间的灵敏度。

管道内分别为单相水和空气时, 计算管道底部与顶部的声压级差分别为 $\Delta SPL(\omega)$ 和 $\Delta SPL(g)$ 。在管道内坐标 (x_j, y_j) 处放置与水具有明显声学特性差异的测试颗粒后, 计算此时管道底部与顶部的声压级差为 $\Delta SPL(x_j, y_j)$, 则坐标位置为 (x_j, y_j) 处的声学测试空间灵敏度 S_j 为^[22]:

$$S_j = \frac{\Delta SPL(x_j, y_j) - \Delta SPL(\omega)}{\Delta SPL(g) - \Delta SPL(\omega)} \times 100\% \quad (8)$$

声学测试场的平均灵敏度 S_a 和标准差 S_σ 分别计算如下^[22]:

$$S_a = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n S_j \quad (9)$$

$$S_\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (S_j - S_a)^2} \quad (10)$$

式中, n 为测试点总个数。平均灵敏度 S_a 越大, 则传感器总体灵敏度越高; 灵敏度标准差 S_σ 越小, 则表示声场中灵敏度空间分布更为均匀。

在 y 轴的不同位置处放置测试颗粒, 计算超声波频率不同时测试场平均灵敏度及灵敏度标准差, 如图 5 所示。

分析图 5 可知: 灵敏度标准差 S_σ 随超声波频率的升高而增大, 频率为 1 MHz 时取得最小值, 此时声场中灵敏度分布最为均匀; 平均灵敏度 S_a 随频率的升高缓慢增大, 但总体变化幅度较小。综合平均灵敏度和灵敏度标准差两个参数, 最终选取超声波的频率为 1 MHz, 此时的声学测试场灵敏度分布最为均匀且平均灵敏度较高。

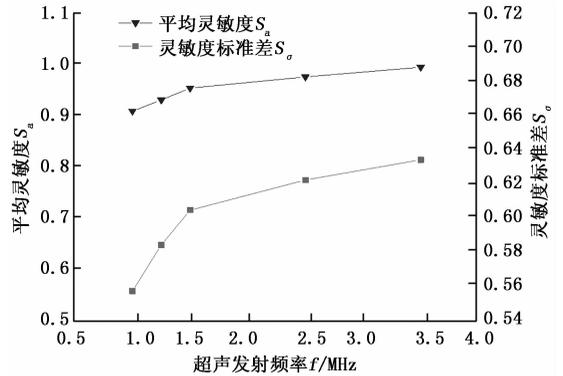


图5 不同超声波发射频率下的灵敏度参数

3 含水合物液膜厚度测量

3.1 水合物分布形态影响

以半径为 0.2 mm 的实心球体模拟天然气水合物颗粒, 探讨液膜中不同水合物颗粒空间分布条件下传感器的电学和声学测量特性。根据管道中水合物的聚集沉积机理^[24-25], 模拟了水合物颗粒在液膜中的 3 种空间分布形态: 分布形态 a, 颗粒以一定的间隙较为均匀地分散在液膜中; 分布形态 b, 颗粒向壁面聚集, 颗粒间存在一定间隙, 在液膜中呈现非均匀聚集状态; 分布形态 c, 颗粒沉积到管道底部壁面上, 形成水合物沉积层。图 6 所示为液膜和水合物沉积层在管道中的分布形态示意图 (分布形态 c)。其中液膜厚度为 h_L , 水合物层厚度为 h_{CH} 。

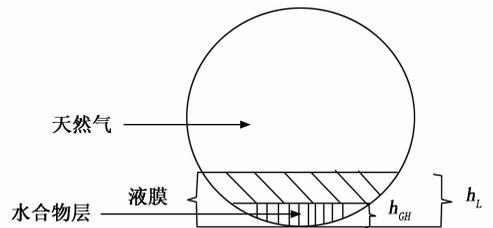


图6 含水合物沉积层液膜的示意图

当水合物颗粒分散在连续液相中时 (分布形态 a、b), 液膜电阻对于液膜厚度变化敏感, 利用电阻法进行液膜厚度测量效果较好。当水合物颗粒以沉积形态贴于传感器表面 (分布形态 c), 若沉积量较大并完全覆盖某一电极时, 电流则无法在液膜中形成通路导致电阻法失效, 此时可应用超声法进行液膜厚度测量。针对离散分布的水合物颗粒, 以下采用电学法进行测量, 对于沉积分布的水合物, 采用声学法进行测量。

3.2 水合物颗粒离散分布

图 7 所示为水合物颗粒处于离散分布状态时液膜中的电流线分布图。当水合物颗粒量一定时，液膜越厚则导电通路等效面积越大、平均电流密度越小，图中显示为电流线越稀疏。

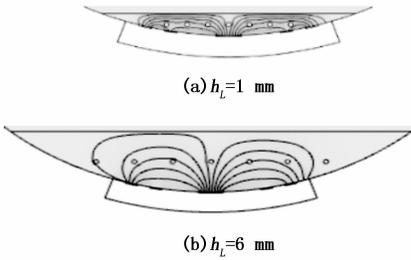


图 7 含水合物颗粒液膜中的电流线分布

图 8 所示为水合物截面体积含率 β_{GH} 分别为 0、0.044 8%、0.083 2%、0.108 8% 时，液膜电阻值随液膜厚度变化情况。分析图 8 可知：当 β_{GH} 不变时，随着液膜厚度的增大，液膜电阻值逐渐减小，灵敏度逐渐减小；当液膜厚度不变时，随着 β_{GH} 的增加，液膜混合介质的平均电导率减小，液膜的电阻值增大。

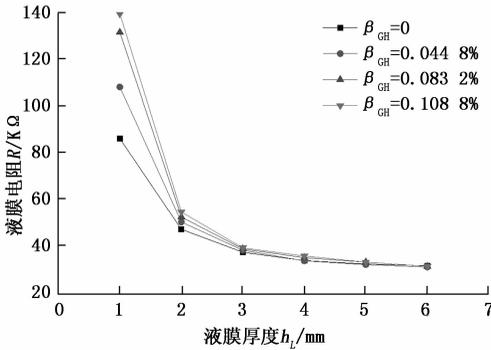


图 8 液膜厚度与液膜电阻的关系

前期针对平底容器研究了液膜厚度测量方法，通过理论推导得到了液膜电阻值的计算式^[17]，借鉴该模型计算了本文中液膜厚度的理论值，进而获得了不同水合物体积含率条件下液膜厚度计算值。如图 9 所示，当水合物截面体积含率 $\beta_{GH}=0.044 8\%$ 时，液膜厚度计算值的相对误差为 $-8.20\% \sim -9.27\%$ ，当 $\beta_{GH}=0.108 8\%$ 时，液膜厚度计算值的相对误差为 $-9.82\% \sim -9.83\%$ 。

3.3 水合物沉积分布

参照图 6，水合物沉积到管道底部并将传感器覆盖，此时超声波首先入射到水合物沉积层中，然后传播到达水合物-水界面并透射入水中，最后超声波到达水-天然气界面。通过分析界面回波信号获得超声波在水合物层和水层中的传播时间，结合传播速度即可获得含水合物沉积层液膜的厚度。

对于水合物沉积层厚度分别为 0.5 mm 和 3.5 mm 时的液

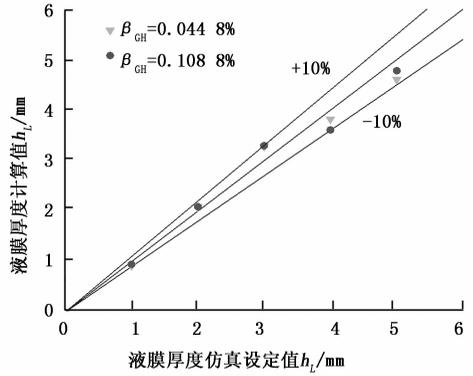


图 9 水合物颗粒离散分布时液膜厚度测量结果

膜厚度进行了仿真测量，图 10 对比了液膜厚度计算值与理论值（仿真设定值）。当水合物层厚度为 0.5 mm 时，液膜厚度计算值和设定值之间的相对误差为 $0.67\% \sim 3.35\%$ ，当水合物层厚度为 3.5 mm 时，液膜厚度计算值和设定值之间的相对误差为 $-5.52\% \sim 1.47\%$ ，与水合物层较薄时的情况相比较，液膜厚度计算准确度有所降低。

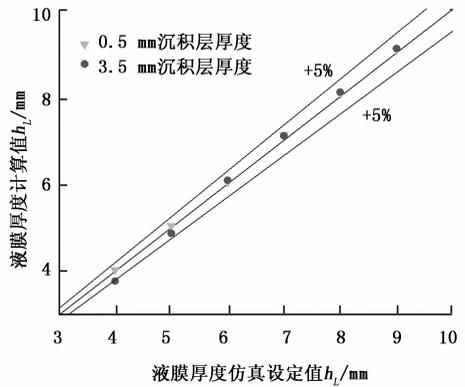


图 10 含水合物沉积层液膜厚度测量结果

4 结束语

基于电-声联合探测方法的原理设计了集成同轴圆盘-双环电极和超声晶片的内嵌凹面式电-声复合传感器并建立了数值仿真模型，利用数值模型对传感器参数进行了优化，继而含水合物液膜的厚度进行了仿真测量。得到的主要结论如下：

1) 同轴圆盘-双环电极中的圆盘电极的半径、圆盘电极/内环电极的间距是影响电学测试空间灵敏度的主要结构参数，超声波频率对声学测试空间灵敏度产生显著影响，因此需要对凹面式电-声复合传感器的参数进行优化设计；

2) 电阻法和超声渡越时间法分别适用于测量水合物以离散颗粒形态分布和以沉积层形态分布的液膜，两类方法优势互补显著拓宽了电-声复合传感器的适用范围。

对于水合物颗粒分散在连续水中所形成的液膜，液膜电阻对液膜厚度变化比较敏感，利用电阻法进行液膜厚度

测量可以取得较好的效果。在此条件下,如果采用超声波法,超声波传播过程会受到水合物颗粒的干扰,使得超声回波波形变得复杂且不规则,导致无法准确获得水合物/水、水/天然气之间界面的位置,从而限制了超声渡越时间法测量液膜厚度准确度的提高。当液膜中的水合物以沉积层形态覆盖在电极表面时,采用电学法将遇到电流无法在液膜中形成通路的问题,从而导致电阻法失效,此时则可以采用超声渡越时间法,与水合物颗粒/水混合物相比较,声波在单一水合物层中能量衰减更小,更有利于获得高强度的超声回波信号,进而提高液膜厚度测量的准确度。

下一步将从以下两方面开展研究工作:建立三维数值模型并系统地考察液膜中液体电导率、电场频率、温度、压力等因素对内嵌凹面式电一声复合传感器响应特性的影响;搭建实验系统并开展含水合物液膜厚度测量实验,基于电一声复合传感器工作原理,结合数值仿真数据和实验测试数据,建立含水合物液膜厚度的计算模型,最终形成实用的测量技术。

参考文献:

[1] Jung E G, Boo J H. A numerical modeling for the steady-state performance of a micro heat pipe using thin liquid film theory [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2018, 126: 557-566.

[2] Reza N, Mohammad B S. Advanced heat transfer analysis of a U-shaped pulsating heat pipe considering evaporative liquid film trailing from its liquid slug [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 138: 475-489.

[3] Rao I, Sloan E D, Koh C A, et al. Laboratory experiments and modeling for hydrate formation and deposition from water saturated gas systems [A]. *Proceedings of the 7th international Conference on Gas Hydrates* [C]. Edinburgh, United Kingdom, 2011.

[4] Joshi S V, Grasso G A, Lafond P G, et al. Experimental flow-loop investigations of gas hydrate formation in high water cut systems [J]. *Chemical Engineering Science*, 2013, 97: 198-209.

[5] Akhflash M, Boxall J A, Aman Z M, et al. Hydrate formation and particle distributions in gas-water systems [J]. *Chemical Engineering Science*, 2013, 104: 177-188.

[6] Di L M, Aman Z M, Kozielski K, et al. Underinhibited hydrate formation and transport investigated using a single-pass gas-dominant flowloop [J]. *Energy & Fuels*, 2014, 28 (11): 7274-7284.

[7] Di L M, Aman Z M. Hydrate formation in gas-dominant systems using a single-pass flowloop [J]. *Energy & Fuels*, 28 (5): 3043-3052.

[8] Ding L, Shi B, Lv X, et al. Hydrate formation and plugging mechanisms in different gas-liquid flow patterns [J]. *Industri-*

al & Engineering Chemistry Research, 2017, 56 (14): 4173-4184.

[9] 刘宝玉,侯朋朋,商丽艳,等.天然气水合物垂直管内流动特性的数值模拟 [J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2018, 39 (6): 664-670.

[10] 任中波,刘德俊,黄东维.多相流管输体系中水合物沉积机理研究进展 [J]. *化工进展*, 2019, 38 (10): 4403-4413.

[11] Tohru F. Measurement of time varying thickness of liquid film flowing with high speed gas flow by a constant electric current method (CECM) [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1998, 184: 363-377.

[12] 许松林,郭凯.刮膜式分子蒸馏装置中的液膜状态实验 [J]. *天津大学学报*, 2010, 43 (6): 544-548.

[13] Almbrok A A, Aliyu A M, Lao L, et al. Gas/liquid flow behaviours in a downward section of large diameter vertical serpentine pipes [J]. *Multiphase Flow*, 2016, 78: 25-43.

[14] Lu Q, Suryanarayana N V, Christodoulou C. Film thickness measurement with an ultrasonic transducer [J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 1993, 7 (4): 354-361.

[15] Chen Z Q, Hermanson J C, Shear M A, et al. Ultrasonic monitoring of interfacial motion of condensing and non-condensing liquid films [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2005, 16 (6): 353-364.

[16] 马明飞.基于超声的气液两相流参数检测研究 [D].青岛:中国石油大学(华东),2016.

[17] 张新铭,邢兰昌,牛佳乐,等.基于电一声联合的液膜厚度测量方法研究 [J]. *计算机测量与控制*, 2020, 28 (3): 38-43.

[18] 朱泰,邢兰昌,祁雨,等.基于LabVIEW的天然气水合物电一声联合探测实验装置测控软件开发 [J]. *计算机测量与控制*, 2019, 27 (6): 124-129.

[19] 李德明,翟路生,金宁德.内嵌贴片式两相流相含率超声传感器敏感场特性 [A].第31届中国控制会议论文集D卷 [C]. 2012: 1155-1160.

[20] Waite W F, Winters W J, Mason D H. Methane hydrate formation in partially water-saturated Ottawa sand [J]. *American Mineralogist*, 2004, 89 (8-9): 1202-1207.

[21] 江杰,罗长海.超声波流量计换能器参数的选择 [J]. *自动化仪表*, 2012, 33 (10): 76-79.

[22] 苏茜.油气水多相流相含率超声测量机理与方法 [D].天津:天津大学,2017.

[23] 赵于,毕勤成,吕海财,等.应用伽马射线对垂直上升管内环状液膜及扰动波特性研究 [J]. *热能动力工程*, 2014, 29 (1): 53-57.

[24] Wang Z, Zhang J, Sun B, et al. A new hydrate deposition prediction model for gas-dominated systems with free water [J]. *Chemical Engineering Science*, 2017, 163: 145-154.

[25] Charlton T B, Di L M, Zerpa L E, et al. Simulating hydrate growth and transport behaviour in gas-dominant flow [J]. *Energy & Fuels*, 2018, 32 (2): 1012-1023.