

基于分段涂层 TDR 探针的含水合物多孔介质电学参数测量仿真研究

马子胜¹, 高亮¹, 邢兰昌¹, 魏伟², 韩维峰², 杨金秀³

(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;

3. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 针对海洋沉积物中天然气水合物饱和度评价需求, 提出了基于分段涂层 TDR 探针的沉积物介电常数和电导率同步测量新方法; 针对无涂层探针、全涂层探针以及分段涂层探针分别建立了模拟 TDR 测量响应的有限元数值模型, 仿真研究了涂层参数对介电常数和电导率测量性能的影响规律, 继而应用于含水合物多孔介质的测量并对误差进行了分析与校正; 研究结果表明: 探针涂层的厚度和介电常数直接影响采集电压信号的衰减程度, 因此需根据被测介质的电学性质对其进行优化设计; 在涂层厚度和介电常数已确定的条件下, 通过改变涂层间隙长度可以调节探针所适用的电导率测量范围; 当测量非均匀介质时, 可以通过增加涂层间隙的个数来提高电导率测量的准确度; 采用分段涂层探针测量含水合物多孔介质的介电常数和电导率时, 需要对涂层引起的误差进行校正。

关键词: 含水合物多孔介质; 时域反射法; 分段涂层探针; 介电常数; 电导率; 有限元法

Numerical Study on Electrical Parameter Measurement of Hydrate-bearing Porous Media Based on Segmentally Coated TDR Probe

MA Zisheng¹, GAO Liang¹, XING Lanchang¹, WEI Wei², HAN Weifeng², YANG Jinxiu³

(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; 3. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China),

Qingdao 266580, China)

Abstract: To meet the requirement of evaluating the saturation of natural gas hydrate in marine sediments, a new method based on segmentally-coated TDR probe was proposed for simultaneous measurement of the dielectric constant and conductivity of sediments. Finite element models were established for uncoated probe, fully-coated probe and segmentally-coated probe, respectively, to simulate the TDR measurement responses. The influences of coating parameters on the measurement performance of dielectric constant and conductivity were investigated numerically. The segmentally-coated TDR probe was then applied to the measurement of hydrate-bearing porous media and the measurement errors were analyzed and corrected. It has been shown that: the thickness and dielectric constant of the probe coating directly affect the attenuation of the collected voltage signal, thus it is necessary to optimize the design according to the electrical properties of the measured medium; under the condition that the coating thickness and dielectric constant are determined, the conductivity measurement range of the probe can be adjusted by varying the gap length of segmented coatings; for the measurement of inhomogeneous media, the accuracy of conductivity measurement can be improved by increasing the number of coating gaps; for the measurement of porous media containing hydrates with segmentally-coated TDR probe, it is necessary to correct the errors induced by the coating.

Keywords: hydrate-bearing porous medium; time domain reflectometry; segmentally-coated probe; dielectric constant; conductivity; finite element method

收稿日期:2023-02-28; 修回日期:2023-03-09。

基金项目:中石油“十四五”前瞻性基础性重大科技项目(2021DJ4901);中央高校基本科研业务费专项资金项目(20CX05005A);山东省自然科学基金项目(ZR2019MEE095);中国石油科技创新基金项目(2018D-5007-0214)。

作者简介:马子胜(1998-),男,硕士研究生。

通讯作者:邢兰昌(1983-),男,博士,副教授。

引用格式:马子胜,高亮,邢兰昌,等.基于分段涂层 TDR 探针的含水合物多孔介质电学参数测量仿真研究[J].计算机测量与控制,2023,31(12):42-48,56.

0 引言

天然气水合物被认为是一种储量丰富的战略新兴能源^[1-2]。野外获取和保存含水合物沉积物的真实样品难度大、成本高, 因此通常采用实验室内物理模拟实验的方式来研究水合物成藏模式与机理、水合物开采方案以及储层物性演变规律等问题。沉积物样品中的水合物饱和度是实验测试中的关键参数之一。目前, 实验室内测量水合物饱和度的主要方法有电阻率法^[3-4]、声速法^[5]、计算机断层扫描成像 (CT, computed tomography) 技术^[6]、时域反射法 (TDR, time domain reflectometry)^[7]等。在 TDR 法中, 通过测量高频电磁波在含水合物沉积物样品中的传播速度和衰减度来分别获得样品的介电常数和电导率, 与现有其他方法相比较, 利用 TDR 技术获取的响应参数多、成本低。现有的研究结果也表明, 基于 TDR 技术的水合物饱和度测量方法具有较大的应用潜力。

TDR 技术早期用于探测并定位电缆的损伤, 后来在土壤含水量、干密度测量等领域得到应用^[8-15], 近年来被进一步应用于沉积物中水合物饱和度的测量。Wright 等^[7]利用 TDR 技术监测了沉积物中水合物的生成和分解过程, 并建立了含水合物沉积物的介电常数与含水量之间的经验关系式。Kliner 等^[16]应用 TDR 原理测量了合成制冷剂 (R-11) 水合物样品的介电常数, 并建立了水合物含量与介电常数之间的关系式。业渝光等^[17]采用 TDR 与超声技术对水合物生成分解过程进行了联合探测。孙中明等^[18]利用 TDR 技术对四氢呋喃水溶液/水合物混合体系进行了测量, 建立了水合物含量与混合体系介电常数之间的关系式。王亚军^[19-20]等采用有限元方法建立了 TDR 测量过程的数值模型, 仿真研究了被测介质的电导率和介电常数对反射波形的影响规律, 后期开展了实验研究并建立了基于介电常数和电导率双参数的饱和度计算模型。高亮^[21]等以 TDR 探针的横截面为研究对象, 建立了有限元数值模型, 利用数值模型优化设计了 TDR 探针的个数、间距、直径等结构参数, 仿真分析了表观介电常数与水合物饱和度的关系。

电磁波在介质中传播时的能量衰减受到介质电导率的直接影响。当被测多孔介质孔隙溶液盐度较高时 (如海洋沉积物), 电磁波沿着 TDR 探针传播时会发生迅速衰减, 导致反射回波无法准确测量。胡高伟^[22]等在传统 TDR 探头的中间探针上热敷绝缘套管, 基于实验数据建立了适用于高电导率的沉积物介电常数与含水量之间的经验关系式。McIsaac^[23]在中间探针上热敷了两段绝缘涂层, 将该探针应用于砂水混合物介电常数和电导率的测量。

针对具有高盐度孔隙水沉积物的水合物饱和度评价需求, 本文提出基于分段涂层 TDR 探针的沉积物介电常数和电导率同步测量新方法。以 COMSOL 为仿真平台, 针对无涂层探针、全涂层探针以及分段涂层探针分别建立了模拟 TDR 测量响应的有限元数值模型, 仿真研究了涂层参数对介电常数和电导率测量性能的影响规律, 在应用于含水合物多孔介质的基础上对测量误差进行了分析和校正。

1 TDR 原理与数值建模

1.1 工作原理

图 1 为全涂层探针和分段涂层探针的 TDR 系统示意图, 利用同轴电缆连接信号收发装置和三针式 TDR 探头。根据电磁波在波导中的传播规律, TDR 探头可看作同轴电缆, 其中间探针 (或称作内探针) 可视为同轴电缆的内导体, 外部探针视为同轴电缆的外导体, 内外探针之间的部分则视为同轴电缆的填充介质。如图 1 (a) 所示, 中间探针表面的绝缘涂层能够抑制高电导率介质对电磁波产生的衰减作用, 但同时也导致无法根据反射波波形计算被测介质的电导率参数。采用如图 1 (b) 所示的分段涂层探针则能够有效解决这一问题, 中间探针的涂层存在一定长度的间隙, 该探针既能一定程度上抑制高电导率介质对电磁波的衰减作用, 同时也能够使探针与被测介质直接接触, 从而使得反射信号波形中蕴含了被测介质的电导率信息。

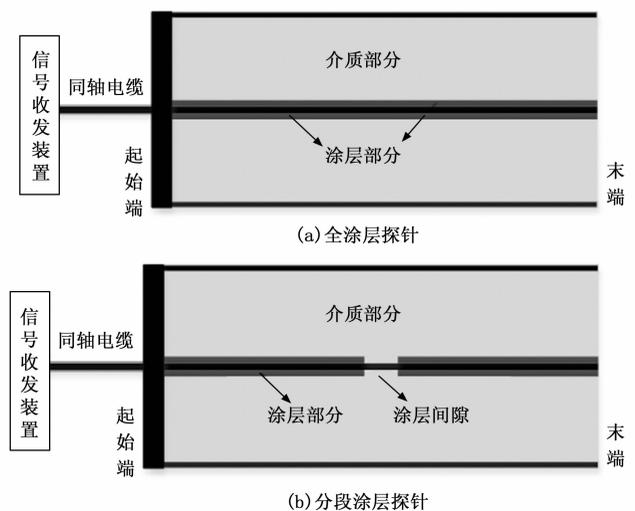


图 1 全涂层探针和分段涂层探针 TDR 系统示意图

参照探针结构模型, TDR 时域反射仪采用行程时间法来计算被测介质的介电常数^[24], 如式 (1) 和 (2) 所示。电磁脉冲信号的传播时间可由信号的传播速度和传播距离来计算, 传播速度取决于探针周围材料的介电常数。电磁脉冲从探针起始端传播到末端并返回到起始端所用的时间为 Δt , 将 Δt 代入式 (1) 可得电磁脉冲的传播速度 V_p , 将 V_p 代入式 (2) 即得到被测介质的表观介电常数 K_a ^[25]。

$$V_p = \frac{2L}{\Delta t} \quad (1)$$

$$\sqrt{K_a} = \frac{c}{V_p} \quad (2)$$

式中, L 为探针长度, c 为真空中电磁波的传播速度, 取值为 $c=3 \times 10^8$ m/s。

Topp 等^[26]提出了 Giese-Tiemann (G-T) 法, 根据 TDR 波形中各阶段的电压幅值计算被测介质的电导率, 如式 (3) 所示:

$$\sigma = \left(\frac{\epsilon_0 c}{L} \right) \left(\frac{Z_{TDR}}{Z_0} \right) \left(\frac{2V_0}{V_{mf}} - 1 \right) \quad (3)$$

式中, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m, 为真空中的介电常数, Z_0 为同轴传输线的输出阻抗, Z_{TDR} 为探针的特性阻抗, 与探针本身的性质有关, V_0 是入射脉冲电压, V_{mf} 是多次反射稳定后的反射电压值。

1.2 有限元数值建模与模型检验

1.2.1 模型几何结构与网格

基于 COMSOL 多物理场仿真平台对不同条件下的 TDR 响应过程进行建模和仿真, 选取 TDR 探针起始端与末端之间的部分进行建模。为了缓解“集肤效应”^[21] 引起的电场能量过度集中以及为了避免因探针直径过大而对被测样品产生干扰的问题, 对二维几何结构进行如下设计: 探针的长度 L 为 150 mm、探针直径为 3 mm、相邻探针间距为 15 mm, 网格划分结果如图 2 所示, 模型中涂层部分网格划分较为密集, 介质部分相对稀疏, 最大网格单元的尺寸为 6.16 mm, 最小网格单元的尺寸为 0.012 mm。

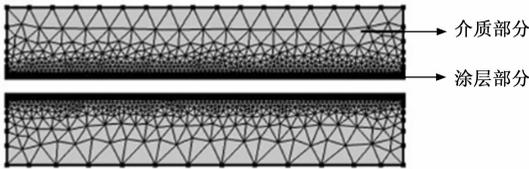


图 2 涂层以及被测介质部分模型网格划分

1.2.2 模型参数设置

1) 激励信号: 在 TDR 激励信号选择方面, 为了保证电磁波信号的能量传输效率, 激励信号的波长不能小于 TDR 探头长度^[27], 且频率较低 (如 ~MHz) 时的界面极化作用使得被测介质的表观介电常数受到被测介质电导率的影响发生频散^[28]。为了克服上述问题, 则要求激励信号频率应高于某一最低发射频率 (如 2 GHz)。为了将激励信号波形与反射信号波形区分开, 要求激励信号时域波形宽度较窄。本文利用高斯脉冲对正弦波信号进行调制得到激励信号, 其时域表达式如式 (4) 所示, 激励信号的波形宽度受正弦波信号频率的影响。

$$V_0(t) = e^{-[(t-t_0)/\delta]^2} \sin(2\pi ft) \quad (4)$$

式中, V_0 为 TDR 探针的激励信号, f 为正弦波频率, 大小为 6 GHz, t_0 和 δ 分别为高斯脉冲的峰值时间和标准差。

2) 材料及其物理参数: 模型中涉及到以下材料: 空气、不同浓度的氯化钠水溶液、不同水合物含量的石英砂、以及探针的涂层。材料的主要物理参数包括: 相对介电常数、电导率和相对磁导率, 其中相对磁导率值均设为 1。通常将空气的相对介电常数设定为 1、电导率为 0; 涂层的电导率为 1.00×10^{-6} S/m, 相对介电常数的变化范围为 3.58 ~ 80; 氯化钠水溶液的相对介电常数受到温度和浓度的影响, 可通过式 (5) 进行计算^[29], 其电导率可根据式 (6) 计算得到^[30]。

$$\epsilon(T, C_f, \omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_r(T, C_f) - \epsilon_\infty}{1 - i\omega\tau(T, C_f)} - \frac{i\sigma(T, C_f)}{\omega\epsilon_0} \quad (5)$$

$$\sigma(T, C_f) = (5.6 + 0.27T - 1.5 \times 10^{-4} T^2) C_f -$$

$$\left(\frac{2.36 + 0.099T}{1 + 0.214C_f} \right) (C_f)^{3/2} \quad (6)$$

其中: T 为氯化钠溶液的温度 (°C), C_f 表示氯化钠溶液的浓度 (mol/L), 本文中氯化钠溶液浓度变化范围为 0 ~ 0.11 mol/L, f 表示外加电场的频率 (Hz), τ 为弛豫时间 (s), $\epsilon_r(T, C_f)$ 表示氯化钠溶液静态相对介电常数, ϵ_∞ 表示频率趋于无限大时氯化钠溶液的相对介电常数, ϵ_0 表示真空介电常数 (F/m), $\sigma(T, C_f)$ 表示氯化钠溶液的电导率 (S/m)。

对于具有不同水合物含量的模拟沉积物, 在已知水合物饱和度和孔隙度的前提下, 可通过式 (7) 计算含水量, 采用 Wright^[7] 所提出的经验式 (8) 来计算其相对介电常数:

$$S_h = \left(\frac{\varphi - \theta_v}{\varphi} \right) \times 100\% \quad (7)$$

$$\theta_v = -11.9677 + 4.506072566K_a - 0.14615K_a^2 + 2.1399 \times 10^{-3}K_a^3 \quad (8)$$

式中, φ 为多孔介质的孔隙度, θ_v 为含水量, S_h 为水合物饱和度。

利用阿尔奇公式计算含水合物多孔介质的电导率^[31], 该公式描述了多孔介质电阻率 (或电导率)、孔隙度与含水量饱和度的关系, 如式 (9)、式 (10) 所示:

$$I = \frac{\sigma_0}{\sigma_i} = \frac{b}{S_w^n} \quad (9)$$

$$F = \frac{\sigma_w}{\sigma_0} = \frac{a}{\varphi^m} \quad (10)$$

将两式联立, 结合含水饱和度 (S_w) 与水合物饱和度 (S_h) 的关系 ($S_h = 1 - S_w$), 得到式 (11):

$$S_h = 1 - \left(\frac{ab\sigma_i}{\varphi^m \sigma_w} \right)^{1/n} \quad (11)$$

式中, σ_0 为水饱和状态下多孔介质电导率, σ_w 为孔隙水电导率, σ_i 为沉积物电导率, b 、 n 分别为岩性系数和饱和度指数 (本文 b 取值为 1.14, n 取值为 1.85), F 为地层因子, φ 为孔隙度, m 为胶结指数 (本文取值为 1.4), a 为岩性系数 (通常取值为 1)。

3) 边界条件: 模型采用有限元计算软件 COMSOL 中射频模块下的“瞬态电磁波”物理场。为了对被测区域施加激励信号, 在探针顶端设置集总端口 (lump wave port) 作为边界条件, 施加 6 GHz 的电磁脉冲 (EM Wave) 信号。参照图 1 所示, 探针末端处于断路状态, 故将探针末端处的边界条件设置为理想磁导体 (perfect magnetic conductor)。同轴传输线中电磁波信号在具有导电边界的有限空间中传播^[14], 而内外探针分别作为内导体和外导体, 因此将探针设置为理想电导体 (perfect electric conductor)。

在设置集总端口时, 需要解决传输激励信号的电缆末端与探针起始端之间的阻抗匹配问题。基于形状规则的同轴电缆特性阻抗计算方法, TDR 探头的特性阻抗 Z_{TDR} 是内探针半径 r 、外探针半径 R 以及内外探针之间介质的相对介电常数 ϵ_1 的函数^[14], 如式 (12) 所示:

$$Z_{\text{TDR}} = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_1}} \ln \frac{R}{r} \quad (12)$$

1.2.3 模型检验

根据不同类型的探针建立了三种 TDR 仿真模型, 其中包括无涂层探针模型、全涂层探针模型以及分段涂层探针模型。分别以空气和水作为被测介质以验证模型的正确性, 涂层材料的介电常数为 3.58, 涂层厚度为 0.5 mm, 将仿真所得结果与实际值进行对比分析, 如表 1 所示。

表 1 相对介电常数实际值与仿真值对比

被测介质	实际值	无涂层探针 (仿真值)	全涂层探针 (仿真值)	分段涂层探针 (仿真值)
水	80	82.99	25.40	26.63
空气	1.00	1.02	1.12	1.11

将实际值作为仿真过程中被测介质的参数设定值, 采用无涂层探针测量时, 仿真计算结果相比设定值稍微偏大, 最大相对误差为 3.74%, 由于仿真结果在可允许的误差范围内, 验证了仿真模型的正确性。以水为被测介质, 采用全涂层探针和分段涂层探针测量得到的介电常数均小于实际值, 这是因为引入涂层后, 涂层也成为了被测介质的一部分, 涂层部分的介电常数小于水的介电常数, 导致等效的被测介质的介电常数比实际值小。以空气为被测介质, 采用全涂层探针和分段涂层探针测量得到的介电常数均大于实际值, 这是由于涂层部分的介电常数大于空气的介电常数, 导致等效的被测介质的介电常数比实际值大。

2 TDR 探针涂层影响仿真研究

2.1 全涂层探针涂层性质的影响规律

2.1.1 全涂层探针与无涂层探针对比

为了探究全涂层 TDR 探针在高电导率被测介质中的测量规律, 首先采用无涂层的 TDR 探针, 以不同电导率的氯化钠溶液为被测介质, 记录探针起始端不同时刻的电压值, 采样周期为 1/60 ns, 将某一时刻采集到的电压值与之前所采集的电压值进行累加作为该时刻的 TDR 波形电压值, 得到与时域反射仪测量结果类似的波形, 如图 3 所示。采用涂层厚度为 0.5 mm 的全涂层探针在不同电导率的氯化钠溶液中仿真结果如图 4 所示, 涂层为相对介电常数 3.58 的聚烯烃材料。

由图 3 可见, 曲线两个拐点所在时刻分别是激励信号首次到达起始端时刻和末端反射信号首次到达探针起始端的时刻 (即末端反射点), 随着被测介质电导率的增大, 电压波形曲线整体下移并变得逐渐平滑, 当电导率达到 0.60 S/m 后, 从波形中无法得到末端反射点位置, 这是因为电磁波信号受到高电导率被测介质的影响, 信号幅值衰减程度较大, 从而不能计算出介质的介电常数。因此考虑外加涂层来抑制高电导率被测介质对电磁波信号的衰减。由图 4 可见, 采用全涂层探针能够测量出电导率高达 1.20 S/m 被测介质的介电常数, 但随着被测介质电导率的增加,

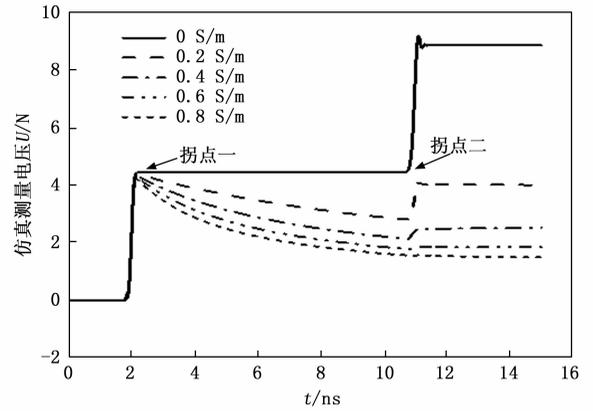


图 3 不同电导率氯化钠溶液中无涂层探针 TDR 波形

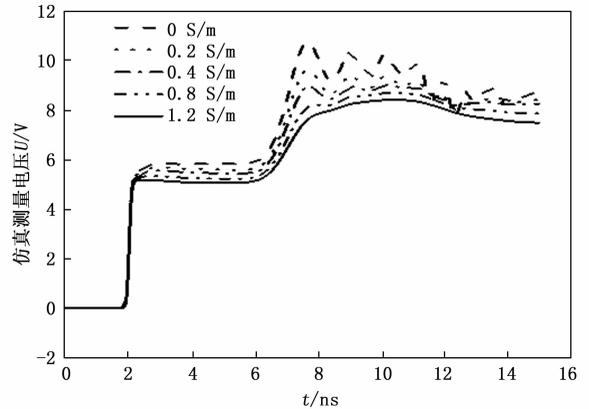


图 4 0.5 mm 厚全涂层探针 TDR 波形

多次反射后电压稳定时幅值几乎无衰减, 此时根据波形无法获得准确的电导率参数。这是因为此时的被测介质包括涂层和氯化钠溶液, 由于涂层电导率较低, 使得等效的被测介质的电导率减小, 从而降低了信号的衰减。与图 3 无涂层探针相比, 采用全涂层探针测量介电常数时, 有效地提高了对被测介质电导率的适用范围。

2.1.2 全涂层材料介电常数的影响

为了探究涂层介电常数对 TDR 响应的影响规律, 控制涂层相对介电常数的变化范围为 3.58~80, 采用涂层厚度为 0.5 mm 的全涂层探针在电导率为 0.60 S/m 的氯化钠溶液中仿真测量结果如图 5 所示。

由图 5 仿真计算结果可知, 随着涂层介电常数的增加, 曲线整体下移, 末端反射点向右移动。这是因为受涂层影响, 等效被测介质的表观介电常数随着涂层介电常数的增大而增大。随着涂层介电常数的增加, 末端反射点识别难度变大, 导致不易测量出被测介质的介电常数。这是因为电磁波传播过程中能量受到被测介质的影响产生损耗, 主要包括导电损耗和极化损耗, 涂层介电常数的增加提高了材料的极化能力, 导致极化损耗增加, 从而导致信号幅值的衰减程度升高^[32-34]。综上所述, 涂层材料的介电常数不应过大, 下文涂层材料的相对介电常数均为 3.58。

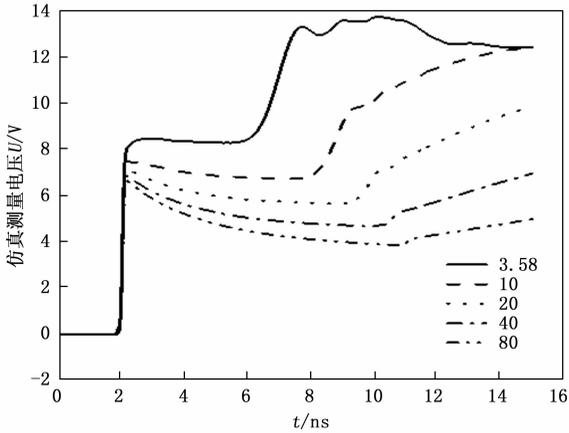


图 5 涂层材料介电常数不同全涂层探针 TDR 波形

2.2 分段涂层探针涂层性质影响规律

2.2.1 分段涂层间隙长度的影响

考虑到采用全涂层探针无法得到被测介质电导率参数，将全涂层改为具有一个间隙的分段涂层（涂层的厚度为 0.5 mm），探究涂层间隙的长度对 TDR 测量响应的影响规律。采用间隙长度为 1 cm 的分段涂层探针测量不同电导率的氯化钠溶液，仿真测量结果如图 6 所示。改变涂层间隙的长度，测量 0.60 S/m 的氯化钠溶液，仿真测量结果如图 7 所示。

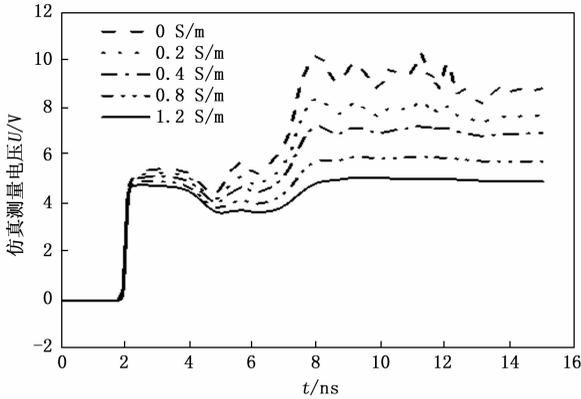


图 6 涂层间隙为 1cm 时分段涂层探针 TDR 波形

由图 6 可见，与无涂层探针（图 3）相比，采用间隙长度为 1 cm 的分段涂层探针能够在电导率高达 1.20 S/m 的被测介质中同时测量介电常数和电导率参数，提高了被测介质电导率的适用范围。分析原因为分段涂层探针在涂层间隙处与被测介质直接接触，受到被测介质导电性的影响，电磁波每经过一次间隙都会发生一定的衰减，从而可以根据波形最终稳定时的幅值计算被测介质的电导率。波形在涂层间隙对应的时刻会产生起伏，在确定末端反射点时需要与间隙处波形的变化点区分开。这是因为电磁波经过涂层间隙前后，由于传播路径上的阻抗发生了两次变化，分别产生与入射信号异相和同相的反射信号，则分别引起电压幅值的下降和上升。

如图 7 所示，随着间隙长度的增加，信号幅值的衰减

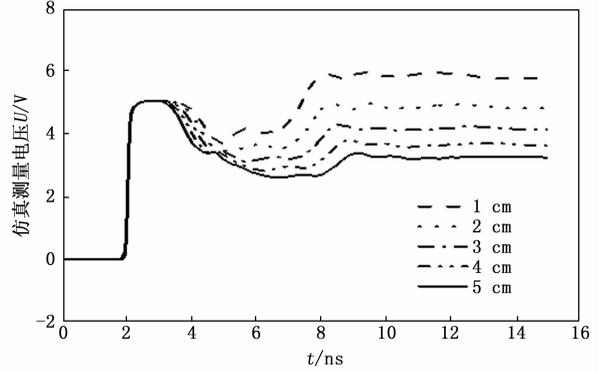


图 7 涂层间隙长度不同时分段涂层探针 TDR 波形

程度增大，波形上的末端反射点向右移动，电磁波的传播速度降低。随着涂层间隙的增大，探针与被测介质直接接触的面积增大，导致等效的被测介质的电导率越高，波形最终衰减程度也越高。波形上末端反射点向右移动是由于在涂层间隙部分探针与氯化钠溶液直接接触，随着间隙长度的增加，接触面积越大，导致等效的被测介质的介电常数变大。图 7 所示的间隙长度变化范围内，波形的末端反射点仍可识别，但衰减程度逐渐增大，可见间隙长度影响探针所适用的被测介质电导率范围。

2.2.2 分段涂层厚度的影响

为了探究分段涂层探针中涂层厚度对 TDR 响应的影响，采用具有一个间隙（长度 1 cm）、不同厚度的分段涂层探针，在电导率为 0.60 S/m 的氯化钠溶液中的仿真测量结果如图 8 所示。

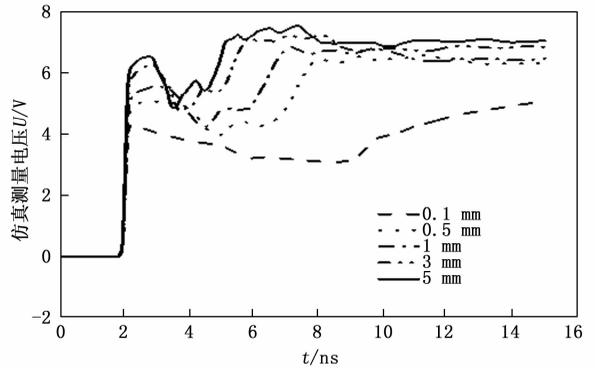


图 8 涂层厚度不同时分段涂层探针 TDR 波形

由图 8 可见，随着涂层厚度的增加，电压信号幅值增大，说明能量衰减程度降低，波形末端反射点向左移动显示电磁波传播速度增大。电压幅值增大的原因是此时的被测介质包括涂层和氯化钠溶液，涂层厚度的增加使得被测介质中涂层部分所占体积比例增大，导致被测介质的等效电导率减小，从而减小了电磁波能量的导电损耗，降低了信号幅值的衰减程度。末端反射点向左移动的原因为被测介质中涂层部分所占体积比例增大，导致等效的被测介质的介电常数减小。

2.2.3 分段涂层间隙个数的影响

为了实现对被测介质多个位置处电导率的测量, 在全涂层探针的基础上可以设置不同个数的间隙, 这些间隙在涂层上等距离分布。以下设定每个间隙的长度为 1 cm, 涂层厚度为 0.5 mm, 被测介质为 0.60 S/m 的氯化钠溶液, 仿真测量结果如图 9 所示。

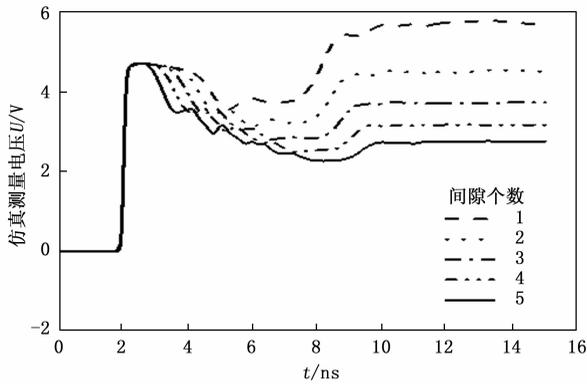


图 9 涂层间隙个数不同时分段涂层探针 TDR 波形

由图 9 可见, 随着涂层上间隙数量的增加, 波形的末端反射点逐渐右移, 即电磁波传播速度逐步降低, 信号幅值衰减升高。电磁波传播速度降低是因为随着间隙个数的增加, 等效的被测介质中氯化钠溶液占比增大, 导致等效被测介质的介电常数增加。信号衰减程度升高是因为探针在多个间隙处与被测介质的氯化钠溶液直接接触, 增大了探针与氯化钠溶液的接触面积, 导致等效的被测介质的电导率增大, 增强了对电磁波的衰减作用。采用多个间隙的优势在于, 探针能够在多个位置处与被测介质直接接触, 从而提高了对非均质被测介质的电导率测量准确度。

3 含水合物多孔介质 TDR 测试数值实验

分别采用无涂层探针、全涂层探针和分段涂层探针在水合物饱和度为 0.4 的多孔介质中进行仿真测试, 结果如图 10 所示。设定多孔介质的孔隙度为 0.4, 涂层厚度为 0.5 mm, 分段涂层间隙个数为 1, 间隙长度为 1 cm。利用以上水合物饱和度、孔隙度对被测介质的含水量进行计算, 计算结果为 24%, 采用 Wright 经验公式^[7]计算得到该条件下含水合物多孔介质的相对介电常数为 11.61。设孔隙水电导率 σ_w 为 8.46 S/m 时, 由式 (11) 计算得含水合物多孔介质电导率 σ_r 为 0.80 S/m。

由图 10 可见, 当采用无涂层 TDR 探针时, 无法识别曲线中的末端反射点, 此时无法得到含水合物多孔介质的介电常数。分别采用全涂层探针和分段涂层探针进行测试, 测得曲线的衰减程度明显降低, 此时能够观察到末端反射点的位置, 因此可以实现对介电常数的测量。与全涂层探针相比较, 分段涂层探针还能够对电导率进行测量。

对于全涂层探针和分段涂层探针, 信号从探针起始端传播到末端并返回到起始端所用的时间分别为 $\Delta t_1 = 3.1$ ns、 $\Delta t_2 = 3.3$ ns, 结合式 (1) 和 (2) 计算可得含水合物多孔

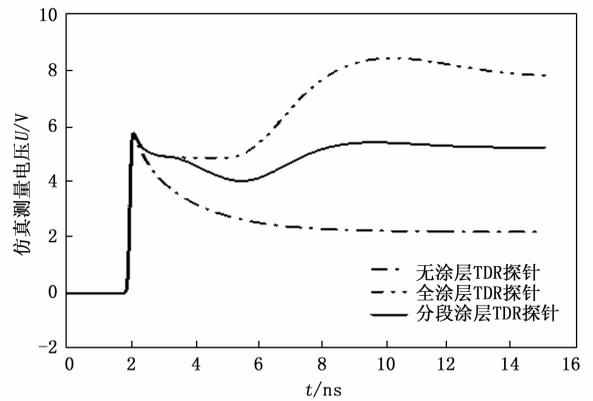


图 10 水合物饱和度为 0.4 时多孔介质中 TDR 测量波形

介质的相对介电常数分别为 9.61 和 10.89, 相对误差分别为 17.23% 和 6.20%。介电常数的测量值均小于设定值, 这是因为采用全涂层探针和分段涂层探针时, 被测介质包括涂层和含水合物多孔介质, 涂层的引入减小了等效被测介质的介电常数。与全涂层相比, 采用分段涂层探针测得介电常数偏大, 这是因为当采用分段涂层探针时, 被测介质中涂层部分所占比例有所降低, 导致等效被测介质的介电常数相对较大, 故采用分段涂层探针测量得到的介电常数误差较小。

当被测介质电导率为 0.80 S/m 时, 由于电导率较高, 采用无涂层探针无法实现对电导率的测量。采用分段涂层探针测量得到多孔介质的电导率为 0.11 S/m (结合式 (3) 进行计算), 相对误差为 86.25% (小于设定值)。分析其原因为分段涂层的引入导致等效被测介质的电导率显著降低。

当采用改进后的分段涂层探针对含水合物沉积物进行仿真测量时, 介电常数和电导率的测量误差均较大, 需要对测量结果进行误差校正。采用分段涂层探针对不同饱和度和条件下的多孔介质进行测量, 基于对测量值和实际值的关系建立了分段涂层探针所测量的表观介电常数和电导率的校正公式, 如式 (13) 所示:

$$\begin{cases} K_a' = -0.0338K_s^2 + 0.4573K_s + 2.204 \\ \sigma' = 14.043\sigma_p - 0.7368 \end{cases} \quad (13)$$

式中, K_s 为表观介电常数的测量值, σ_p 为电导率的测量值, K_a' 和 σ' 分别为校正后的表观介电常数和电导率。利用式 (12) 对图 10 测量结果进行校正, 校正后的 K_a' 和 σ' 分别为 11.23 和 0.81 S/m, 相对误差分别为 3.28% 和 1.23%。

4 结束语

针对具有高盐度孔隙水沉积物的水合物饱和度评价需求, 提出基于分段涂层 TDR 探针的沉积物介电常数和电导率同步测量新方法。采用有限元数值模拟的方法, 针对无涂层探针、全涂层探针以及分段涂层探针分别建立了模拟 TDR 测量响应的数值仿真模型, 研究了涂层参数对介电常数和电导率测量性能的影响规律, 在应用于含水合物多孔介质的基础上对测量误差进行了分析和校正, 主要得到以下结论:

1) 当被测介质电导率较高时, 采用无涂层探针无法得

到介电常数和电导率、采用全涂层探针无法得到电导率，而采用分段涂层探针能够同时得到介电常数和电导率；

2) 当被测介质一定时，分段涂层探针的涂层厚度越大、涂层介电常数越小，检测到的电压信号衰减程度越低，应根据被测介质的电学性质对涂层厚度和介电常数进行优化设计；

3) 在分段涂层探针涂层厚度和介电常数一定时，可以通过改变分段涂层的间隙长度来调节其所测量电导率的范围；

4) 在非均质被测介质中，可以通过增加涂层间隙数量来测量不同位置处的电导率，从而提高对非均质介质的电导率测量准确度；

5) 采用分段涂层探针测量含水合物多孔介质的介电常数和电导率时，需要对涂层引起的误差进行校正。

下一步将以所建立的分段涂层结构和数值仿真模型为基础，针对含水合物沉积物的实验装置对分段涂层进行优化设计及加工，结合 TDR 工作原理及实验测试数据建立分段涂层探针的 TDR 响应反演分析方法，进而实现对具有高盐度孔隙水含水合物沉积物介电常数和电导率的同步测量，为准确评价沉积物中水合物饱和度提供有效的测试手段。

参考文献：

[1] REAGAN M T, MORIDIS G J, COLLETT T S, et al. Toward production from gas hydrates: current status, assessment of resources, and simulation-based evaluation of technology and potential [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2009, 12 (5): 745-771.

[2] MORIDIS G, COLLETT T S, POOLADI-DARVISH M, et al. Challenges, uncertainties and issues facing gas production from gas hydrate deposits [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2011, 14 (1): 76-112.

[3] LEE J Y, SANTAMARINA J C, RUPPEL C. Parametric study of the physical properties of hydrate-bearing sand, silt, and clay sediments: 1. Electromagnetic properties [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2010, B11 (115): 226-234.

[4] 邢兰昌, 祁雨, 刘昌岭, 等. 电声联合探测实验系统测试结冰-融冰动态过程 [J]. 实验室研究与探索, 2018, 37 (5): 4-9, 30.

[5] 胡高伟, 业渝光, 张剑, 等. 沉积物中天然气水合物微观分布模式及其声学响应特征 [J]. 天然气工业, 2010, 30 (3): 120-124.

[6] JIN S, NAGAO J, TAKEYA S, et al. Structural investigation of methane hydrate sediments by microfocus X-ray computed tomography technique under high-pressure conditions [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2006, 45 (24/25/26/27/28): L714-L716.

[7] WRIGHT J F, NIXON F M, DALLIMORE S R, et al. A method for direct measurement of gas hydrate amounts based on the bulk dielectric properties of laboratory test media [C] // Proceedings of the 4th International Conference on Gas Hydrates.

Yokohama, 2002: 745-749.

[8] TOPP G C, DAVIS J L. Measurement of soil water content using time-domain reflectometry (TDR): a field evaluation 1 [J]. Soil Science Society of America Journal, 1985, 49 (1): 19-24.

[9] DAVIS J L, CHUDOBIAK W J. In situ meter for measuring relative permittivity of soils [J]. Geological Survey of Canada, 1975, Part A (1): 75-79.

[10] TOPP G C, DAVIS J L, ANNAN A P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines [J]. Water Resources Research, 1980, 16 (3): 574-582.

[11] DALTON F N, HERKELRATH W N, RAWLINS D S, et al. Time-domain reflectometry: simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe [J]. Science, 1984, 224 (4652): 989-990.

[12] BAKER J M, ALLMARAS R R. System for automating and multiplexing soil moisture measurement by time-domain reflectometry [J]. Soil Science Society of America Journal, 1990, 54 (1): 1-6.

[13] REGALADO C M, CARPENA R M, SOCORRO A R, et al. Time domain reflectometry models as a tool to understand the dielectric response of volcanic soils [J]. Geoderma, 2003, 117 (3/4): 313-330.

[14] 陈伟. TDR 探头设计及含水量和干密度的联合监测技术 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.

[15] TAN X, WU J W, HUANG J S, et al. Design of a new TDR probe to measure water content and electrical conductivity in highly saline soils [J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, 18 (3): 1087-1099.

[16] KLINER J R, GROZIC J L. Determination of synthetic hydrate content in sand specimens using dielectrics [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43 (6): 551-562.

[17] 业渝光, 张剑, 胡高伟, 等. 天然气水合物超声和时域反射联合探测技术 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008 (5): 101-107.

[18] 孙中明. 沉积物中水合物饱和度及其相应力学特性的实验研究 [D]. 青岛: 中国石油大学 (华东), 2013.

[19] 王亚军, 贺世超, 邢兰昌, 等. 基于 TDR 的多孔介质中含水/水合物饱和度测量方法仿真研究 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (8): 83-87.

[20] 王亚军, 魏伟, 邢兰昌, 等. 基于 TDR 双参数的沉积物中水合物饱和度测量 [J]. 新能源进展, 2021, 9 (5): 402-409.

[21] 高亮, 王亚军, 邢兰昌, 等. 基于有限元模型的 TDR 探头优化及水合物饱和度测量的数值实验 [J]. 实验室研究与探索, 2022, 41 (5): 43-49.

[22] 胡高伟, 业渝光, 刁少波, 等. 时域反射技术测量海洋沉积物含水量的研究 [J]. 现代地质, 2010, 24 (3): 622-626.

[23] MCISAAC G. Time domain reflectometry measurement of water content and electrical conductivity using a polyolefin coated TDR probe [D]. Ontario: University of Waterloo, 2010.

(下转第 56 页)