

基于分段涂层 TDR-两电极法联合的含水合物 多孔介质宽频电学参数测试仿真研究

王永辉¹, 邢兰昌^{1,2}, 朱作飞³, 魏伟⁴, 韩维峰⁴, 王云龙¹, 武晓菲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. 中国石油大学(华东)智能感知与测控技术山东省工程研究中心, 山东 青岛 266580;

3. 广州海洋地质调查局 三亚南海地质研究所, 海南 三亚 572025;

4. 中国石油勘探开发研究院 新能源研究所, 河北 廊坊 065007)

摘要: 含水多孔介质在不同频段主导极化机制的差异导致介电常数发生频散, 宽频段介电常数谱蕴含了多孔介质的多尺度结构特性及组分含量等重要信息; 电磁波时域反射法(TDR)适用于 MHz~GHz 频段、电极法适用于 MHz 以下的频段, 然而 TDR 探头和电极法中电极的结构差异导致两者的测试对象不一致, 所以测试数据无法联合解释; 针对含水合物海洋沉积物的宽频电学参数测试需求提出了一种基于分段涂层 TDR 法和两电极法联合的测试新方案; 设计了内嵌式分段涂层 TDR 探头并建立了用于 TDR 仿真测试的有限元数值模型, 设计正交实验确定了涂层最优参数为间隙数量 3、间隙长度 2 mm、涂层厚度 0.5 mm; 建立了用于两电极法仿真测试的有限元数值模型, 确定了用以将电阻抗转换为复电导率的探头几何因子; 根据仿真数据建立了针对内嵌式分段涂层影响的电学参数测量值校正模型; 以不同水合物饱和度条件下的多孔介质为被测对象开展 TDR-两电极法联合仿真测试, 获得了宽频段(mHz~GHz)电学参数; 结果表明: 利用 TDR 法测量得到的高频介电常数和电导率均随水合物饱和度的增大而减小, 校正后的平均相对误差分别为 2.44% 和 6.22%; 利用两电极法测量得到低频等效介电常数随水合物饱和度的增大而减小, 在双电层极化主导的频段校正后平均相对误差为 2.20%; 该研究成果为将来开发含水合物海洋沉积物宽频电学参数测试实验装置提供了理论和技术支撑。

关键词: 含水合物多孔介质; 宽频电学参数; 时域反射法; 两电极法; 有限元法

Numerical Simulation on Broadband Electrical Parameter Measurement of Hydrate-Bearing Porous Media Based on Segmented-Coating TDR and Two-Electrode Methods

WANG Yonghui¹, XING Lanchang^{1,2}, ZHU Zuofei³, WEI Wei⁴, HAN Weifeng⁴,
WANG Yunlong¹, WU Xiaofei¹

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

2. Shandong Provincial Engineering Research Center of Intelligent Sensing and Measurement and
Control Technology, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

3. Sanya Institute of South China Sea Geology, Guangzhou Marine Geological Survey, Sanya 572025, China;

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

收稿日期:2025-04-27; 修回日期:2025-06-06。

基金项目: 新型油气勘探开发国家科技重大专项(2024ZD140660408); 国家自然科学基金项目(42574162); 山东省自然科学基金项目(ZR2024ME090); 中石油“十四五”前瞻性基础性重大科技项目(2024DJ9601); 三亚市“崖州湾”菁英人才科技专项项目(SCKJ-JYRC-2023-06)。

作者简介: 王永辉(2000-), 男, 硕士研究生。

通讯作者: 邢兰昌(1983-), 男, 博士, 副教授, 博士生导师。

引用格式: 王永辉, 邢兰昌, 朱作飞, 等. 基于分段涂层 TDR-两电极法联合的含水合物多孔介质宽频电学参数测试仿真研究[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(10): 55-63, 89.

Abstract: The differences in dominant polarization mechanisms of water-bearing porous media across various frequency bands lead to dispersion in the dielectric permittivity. The broadband dielectric spectrum contains critical information about the multi-scale structural characteristics and components of porous medium. Time-domain reflectometry (TDR) is suitable for the frequencies ranging from MHz to GHz, while the electrode-based method is applicable to frequencies below MHz. However, the structural differences between TDR probes and electrodes result in the inconsistent of testing targets, making it impossible to jointly interpret test data. To address the broadband electrical parameter testing of hydrate-bearing marine sediments, this paper proposes a novel testing scheme combining segmented-coating TDR and two-electrode methods, designs an embedded and segmented-coating TDR probe, establishes a finite element numerical model for the TDR simulation, conducts orthogonal experiments, and obtains optimal parameters with the number of 3 for the gaps, with a gap length of 2 mm and a coating thickness of 0.5 mm. A finite element numerical model for the two-electrode method is developed to determine the probe's geometric factor for converting impedance into complex conductivity. According to simulation data, it established a correction model with electrical parameter measurement values influenced by embedded and segmented-coating. With porous media under different hydrate saturation conditions as the test object, joint simulation tests are conducted by using the TDR and two-electrode methods, so as to achieve electrical parameter testing with a broadband of MHz to GHz. Simulation results show that both the high-frequency dielectric permittivity and conductivity measured by the TDR method decrease as the hydrate saturation increases, with average relative errors of 2.44% and 6.22%, respectively. The low-frequency equivalent dielectric permittivity measured by the two-electrode method also decrease as the hydrate saturation increases, with the average relative error of 2.20% in the frequency band dominated by electrical-double-layer polarization. This research provides a theoretical and technical support for the future development of a broadband electrical parameter testing experimental apparatus for hydrate-bearing marine sediments.

Keywords: hydrate-bearing porous media; broadband electrical parameters; TDR; two-electrode method; finite element method

0 引言

天然气水合物是由天然气与水在低温高压条件下形成的类冰状结晶物质,广泛分布于深海沉积物和陆地永久冻土带^[1]。天然气水合物具有清洁燃烧、能量密度高及储量大等特点,被认为是一种新型的潜在能源^[2-3]。由于天然气水合物赋存环境特殊,获取含水合物沉积物实物样品的成本高、风险大,因此实验室模拟成为研究天然气水合物的重要方式^[4]。为了获得沉积物中水合物饱和度,在实验室中可采用时域反射法(TDR, time domain reflectometry)^[5]、电阻率法^[6-7]等,首先需要获取沉积物电学响应参数,然后建立响应参数与水合物饱和度之间的关系模型。

利用 TDR 技术可对土壤的体积含水量、干密度等参数进行快速测量^[8-15]。针对孔隙中含水和水合物的沉积物,利用 TDR 技术可测量得到含水量,进而计算得到水合物饱和度^[5,16]。文献[17]采用 TDR 与超声联合测试技术对水合物生成和分解过程进行了测试。文献[18]在传统 TDR 探头的内探针上热敷了绝缘套管,建立了含高盐度孔隙水模拟沉积物的介电常数与含水量之间的经验关系式。文献[19]利用 TDR 技术对溶液中四氢呋喃水合物的生成和分解过程进行了测试,建立了基于介电常数计算水合物体积含量的经验模型。文献[20]提出了基于沉积物介电常数和电导率双参数的水合物饱和度计算模型,并利用实验数据对模型进行了检

验。文献[21]利用有限元数值模型优化设计了 TDR 探头的探针数量、间距、直径等几何参数,探讨了采用优化后的 TDR 探头获得的介电常数与水合物饱和度之间的定量关系。文献[22-23]设计了具有外夹式分段绝缘涂层的 TDR 探头(简称分段涂层 TDR 探头),针对海洋沉积物条件建立了采用单间隙分段涂层 TDR 探头获得的电导率和介电常数计算水合物饱和度的模型。

交变电场作用下,多孔介质(如海洋沉积物、土壤等)内部产生电极化现象。在不同的频段,其主导的极化机制不同,使得多孔介质的介电常数呈现出频散特性,宽频段介电常数谱蕴含了多孔介质的多尺度结构特性及组分含量等信息,因此测试宽频范围内多孔介质的电学参数、分析其变化规律对于定量描述多孔介质的特性具有重要意义^[24]。TDR 的工作频率通常处于 1 MHz~2 GHz 范围内^[25],不能得到 MHz 以下的电学参数。在低频段可采用电极法(如两电极法、四电极法),然而在高频电场作用下测量结果易受到导线电磁耦合效应的干扰。采用 TDR 和电极法进行测试,尽管可以分别获得高频和低频电学参数,但是如果 TDR 探头和电极法中的电极存在结构差异,则两种方法的测试对象并不一致,因此无法对测试数据进行联合解释。文献[26]在低频段(5 Hz~13 MHz)采用两电极和四电极阻抗测量系统、在高频段(20 MHz~1.3 GHz)采用开端同轴探头和网络分析仪,在宽频段内对土壤-水混合物

复介电常数进行测量。文献 [27] 在低频段和高频段分别采用了 LCR 表 (42 Hz~5 MHz) 和矢量网络分析仪 (0.3 MHz~8.5 GHz), 利用不同尺寸的同轴测试腔实现了对土壤-水混合物复介电常数的测量。文献 [28] 采用低频谱激电法和高频同轴传输线法在 1 mHz~10 GHz 范围内测量了含水多孔材料的电学参数。以上研究工作虽然实现了对被测对象宽频电学参数的测量, 但是在低频段和高频段测量时分别采用了不同的传感器, 所以未能保证被测对象的一致性。文献 [29] 提出联合使用 LCR 表和时域反射仪并结合同一探头对宽频段 (20 Hz~1 GHz) 复介电常数进行测量的方法。以上研究利用同一传感器实现了对被测介质宽频电学参数的测量, 但是所采用的传感器无法应用于高电导率海洋沉积物。综上所述, 目前尚缺少针对高电导率海洋沉积物的宽频 (mHz~GHz) 电学参数测试方法。

本文提出一种基于分段涂层 TDR 法和两电极法联合的测试新方案并开展数值仿真研究。首先设计了新型的内嵌式分段涂层 TDR 探头, 构建了有限元数值模型对涂层参数进行优化设计, 然后建立了内嵌式分段涂层影响的电导率和介电常数测量值校正模型, 最后以不同水合物饱和度条件下的多孔介质为被测对象开展了 TDR-两电极法联合仿真测试, 实现了宽频段 (mHz~GHz) 电学参数的测试。

1 TDR-两电极法联合测试方案

1.1 TDR 工作原理

TDR 技术的理论基础是传输线理论, 在同轴电缆一端发射的电磁脉冲信号沿着该电缆传输, 若电缆另一端的负载阻抗与同轴电缆的特性阻抗相同, 则脉冲信号传输过程中无反射, 若电缆某个位置处的阻抗或端点处负载阻抗发生变化, 则会引起脉冲信号的反射回传。图 1 所示为 TDR 系统的基本结构组成。TDR 探头可看作经过二维简化后的同轴电缆, 内探针可视作同轴电缆的中心导体, 两个外探针可视作同轴电缆的外导体, 内外探针之间的被测介质可视作同轴电缆的绝缘填充物。

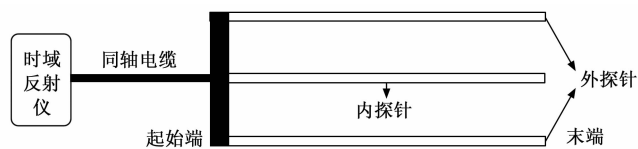


图 1 TDR 系统的基本结构组成

被测介质的介电常数影响电磁脉冲信号在其中的传播速度^[30], 可根据式 (1) 计算得到被测介质的介电常数 K_a :

$$\sqrt{K_a} = \frac{c\Delta t}{L} \quad (1)$$

其中: c 为电磁波在真空中的传播速度, 取值为 3

$\times 10^8$ m/s; L 为探针长度; Δt 为电磁脉冲从探针起始端到达末端并再次返回到起始端所需的时间。

TDR 探头部分被测介质的电阻值 (R_s) 可以由反射电压进行计算^[31], 如式 (2) 所示:

$$R_s = Z_c \frac{V_i(\infty) + V_r(\infty)}{V_i(\infty) - V_r(\infty)} \quad (2)$$

式中, Z_c 是同轴电缆的特性阻抗 (通常为 50 Ω); $V_i(\infty)$ 和 $V_r(\infty)$ 分别是电压波形稳定时电缆与探头界面处的入射电压和反射电压。被测介质的电导率 σ 可由式 (3) 计算:

$$\sigma = \frac{K}{R_s} = \left(\frac{K}{Z_c}\right) \left(\frac{1 - \rho_{\infty}}{1 + \rho_{\infty}}\right) \quad (3)$$

式中, K 为探头的几何常数; $\rho_{\infty} = V_r(\infty)/V_i(\infty)$, 是波形稳定时的反射系数。

为了消除同轴电缆即系统中其他的配件对总电阻的影响, 采用反射系数 ρ_{sample} 、短路反射系数 ρ_{short} 和开路反射系数 ρ_{open} 对式 (3) 中的反射系数 ρ_{∞} 进行修正, 如式 (4) 所示:

$$\rho_{\text{scaled}} = 2 \frac{\rho_{\infty} - \rho_{\text{open}}}{\rho_{\text{open}} - \rho_{\text{short}}} + 1 \quad (4)$$

将 ρ_{scaled} 代替式 (3) 中的 ρ_{∞} 得到修正后的电导率计算式, 如式 (5) 所示:

$$\sigma = \left(\frac{K}{Z_c}\right) \left(\frac{1 - \rho_{\text{scaled}}}{1 + \rho_{\text{scaled}}}\right) \quad (5)$$

1.2 分段涂层 TDR 探头新设计

传统的无涂层 TDR 探头只能用于测试低电导率的被测介质, 而采用全涂层探头不能得到被测介质的电导率^[22]。如图 2 所示, 外夹式分段涂层 TDR 探头的涂层覆盖在内探针的表面, 利用该探头可得到高电导率被测介质的介电常数和电导率。但是在实际应用时, 带有涂层的内探针外径存在变化 (即变径), 容易导致涂层脱落、内探针无涂层部分与被测介质接触不良等问题。

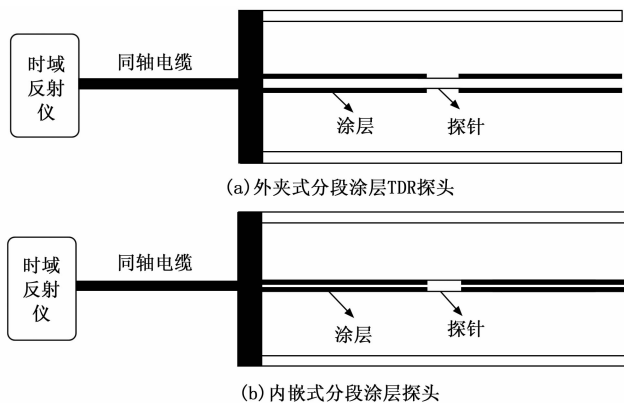


图 2 外夹式和内嵌式分段涂层 TDR 系统示意图

为了解决以上问题, 本文对涂层的引入方式进行了改进, 即在缩小探针内径的基础上施加绝缘涂层, 形成“内嵌式分段涂层” TDR 探头的新设计方案。在改进后

的 TDR 探头中, 涂层与探针之间的连接更为稳固, 增强了整体结构的稳定性, 避免了因插入被测介质引起的涂层脱落问题, 同时也改善了探针与被测介质的接触效果, 在实际应用中有助于提升测量的准确性与可靠性。

TDR 探头的涂层厚度、间隙长度以及间隙数量等影响其电导率测量范围^[23]。分段涂层具有绝缘性, 其厚度影响涂层与被测介质的相对体积占比, 当涂层厚度增加时, 绝缘层体积占比升高, 被测介质的等效电导率减小, 电磁脉冲在传播过程中的能量损耗降低。间隙长度决定了被测介质与探针裸露部分的接触面积, 当间隙长度增加, 探针与被测介质之间接触面积增大, 被测介质的等效电导率增大, 导致电磁脉冲能量损耗的增加。在间隙总长度一定的条件下, 间隙数量影响探针对被测介质分均匀电特性的探测能力, 多个间隙有助于克服非均质性的影响, 提升电参数测量的准确性。

为了提升分段涂层 TDR 探头对含水合物沉积物电导率的测量精度, 需对涂层的厚度、间隙长度和间隙数量等参数进行优化设计。具体设计方法如下: 首先, 基于 COMSOL 仿真平台建立内嵌式分段涂层 TDR 探头的有限元数值模型; 其次, 在间隙总长度确定的条件下, 通过分析间隙个数对电磁脉冲能量衰减的影响来确定间隙个数; 最后, 设计正交实验确定分段涂层的厚度和间隙长度。

1.3 两电极法工作原理

基于内嵌式分段涂层 TDR 探头的两电极法工作原理如图 3 所示, 阻抗分析仪通过同轴电缆的内导体连接探头的内探针, 同时通过外导体连接探头的外探针, 内外探针之间的物质为被测介质, 从而构成两电极测试系统。

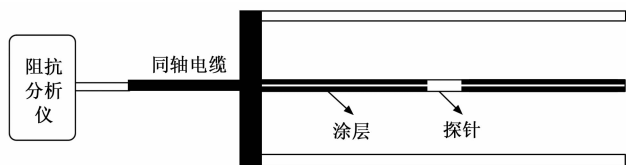


图 3 基于内嵌式分段涂层 TDR 探头的两电极法工作原理图

根据阻抗与复电导率之间的关系, 在测试得到阻抗的基础上利用式 (6) 可计算得到被测介质的复电导率。

$$\sigma^* = \frac{1}{\rho^*} = \frac{1}{K_g \times Z^*} \quad (6)$$

式中, σ^* 为复电导率; ρ^* 为复电阻率; Z^* 为阻抗; K_g 为几何因子, 与 TDR 探头和被测介质有效接触面积以及相邻探针间的距离密切相关。

2 内嵌式分段涂层 TDR 探头数值建模

2.1 TDR 探头优化

为了获得不同涂层参数条件下的 TDR 响应, 基于 COMSOL 多物理场仿真平台建立了有限元数值模型。

二维几何结构设计如下: 选取 TDR 探头起始端与末端之间的部分, 探针长度为 150 mm、探针直径为 3 mm、相邻探针间距为 15 mm。以涂层间隙数量为 1、间隙长度为 5 mm、厚度为 0.5 mm 为例, 几何模型如图 4 所示。使用自由四面体网格单元对模型的计算域进行划分, 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, 生成网格单元数量 2 332 个。采用 COMSOL 中射频模块中的“瞬态电磁波”物理场, 在探针起始端 (图 4 左侧) 设置集总端口作为边界条件, 施加中心频率为 6 GHz 的电磁脉冲信号。由于探针末端处于断路状态, 将其 (图 4 右侧) 设置为理想磁导体。在模型中将内/外探针视为理想电导体。

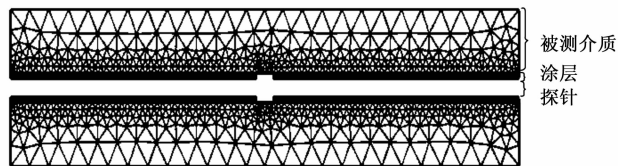


图 4 内嵌式分段涂层 TDR 探头二维几何结构和网格

数值模型涉及到以下材料: 不锈钢、不同浓度的氯化钠水溶液以及探针涂层。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, 其中相对磁导率的值均设置为 1。将不锈钢的相对介电常数设定为 1、电导率为 1.5×10^6 S/m; 涂层的电导率为 1×10^{-6} S/m, 涂层介电常数增加会引起极化损耗的增强, 加剧电磁脉冲信号的能量衰减, 因此涂层的介电常数不宜过大, 模型采用相对介电常数为 3.58 的聚烯烃^[22]; 模型中氯化钠水溶液的相对介电常数设定为 80, 其电导率受到温度和盐度的影响, 可根据式 (7) 计算^[31]得到:

$$\sigma = (5.6 + 0.27T - 1.5 \times 10^{-4}T^2)C_f - \left(\frac{2.36 + 0.099T}{1 + 0.21C_f} \right) (C_f)^{3/2} \quad (7)$$

式中, C_f 为氯化钠溶液的摩尔浓度; T 为氯化钠溶液的温度。

分别以空气和水 (介电常数分别为 1 和 80) 作为被测介质以验证模型的正确性^[22]。采用无涂层探头进行测量时, 经仿真计算, 空气和水对应的测量结果分别为 1.02 和 80.82, 最大相对误差为 2%, 验证了仿真模型的准确性。当采用分段涂层 (介电常数为 3.58) 探头进行测量时, 得到空气和水的介电常数测量值分别为 1.09 和 20.25。分析原因为: 引入分段涂层后, 涂层可视为被测介质的一部分, 因其介电常数大于空气的介电常数, 致使被测介质的等效介电常数大于实际值; 而涂层的介电常数小于水的介电常数, 导致被测介质的等效介电常数小于实际值。

为了对涂层间隙数量进行优化设计, 需要探究间隙数量对 TDR 响应的影响。采用涂层厚度为 0.5 mm、间隙总长度为 5 mm 的内嵌式分段涂层探头, 在间隙数量分别为 1、2、3、4 和 5 的条件下仿真测量电导率为 0.5 S/m 的氯化钠水溶液, 仿真测量结果如图 5 所示。由图 5 可得: 在被测介质均匀、间隙总长度一定的条件下, 随着间隙的增多, 电磁能量衰减增强, 这是因为间隙数量越多, 电磁脉冲在传播过程会遇到更多的阻抗不连续面, 在不连续面处产生能更多次能量反射, 从而引起最终稳定状态下反射信号强度的降低。因此涂层间隙的数量应尽量少, 以保证反射信号具有足够的强度。与此相反, 在测量非均匀介质时, 如被测介质的电导率沿着探针方向非均匀分布, 则更加需要增加间隙的数量, 从而更加全面地反映被测介质的整体导电性。综合权衡上述间隙数量的影响, 本文针对具有 3 个间隙的分段涂层 TDR 探头进行讨论。

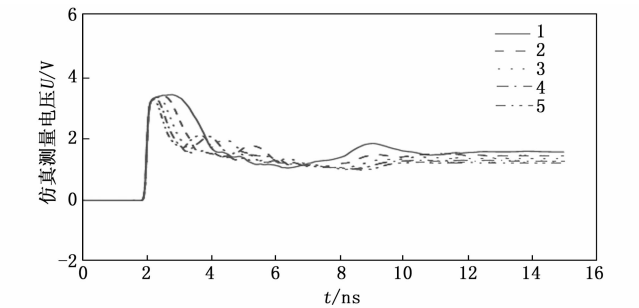


图 5 不同间隙数量条件下的 TDR 响应曲线

在确定涂层间隙数量的前提下, 以下采用正交实验法对涂层的厚度和间隙长度进行优化设计。正交实验是工艺优化设计和分析的常用方法, 能够高效地处理多因素优化问题^[32]。本文选取涂层厚度和间隙长度为两个关键因素, 设涂层厚度的范围为 0.1~1.3 mm, 将其划分为 5 个代表性水平; 设涂层间隙长度的范围为 2~10 mm, 将其划分为 5 个代表性水平。利用接收到的反射电压的幅值来分析电磁能量的衰减程度, 本文以 15 ns 时刻的仿真电压幅值作为评价指标, 构建五水平两因素的正交实验, 记为 $L_{25}(5^2)$, 共计 25 组实验, 正交实验水平因素设计如表 1 所示。

表 1 正交实验水平因素设计

水平	因素	
	厚度/mm	间隙长度/mm
1	0.1	2
2	0.3	4
3	0.5	6
4	0.9	8
5	1.3	10

正交实验结果如表 2 所示, 表中 K_1 、 K_2 、 K_3 、

K_4 、 K_5 分别表示两个因素的不同水平下的电压值之和, k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 、 k_5 分别是 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 、 K_5 的平均值, 其数值越大表明电磁能量衰减程度越低。 R 为极差, 由各列 k (即 $k_1 \sim k_5$) 的最大值减去最小值所得, R 较大表明电磁能量衰减程度受该因素影响越大, 即表 2 中的涂层间隙长度这一因素影响相对较大。

表 2 正交实验结果

序号	水平		电压/V
	厚度/mm	间隙长度/mm	
1	1	1	2.781 7
2	1	2	2.478 4
3	1	3	2.253 3
4	1	4	2.069 8
5	1	5	1.917 2
6	2	1	3.459 2
7	2	2	2.888 5
8	2	3	2.511 9
9	2	4	2.232 1
10	2	5	2.018 9
11	3	1	3.544 8
12	3	2	2.945 2
13	3	3	2.656 5
14	3	4	2.274 3
15	3	5	2.049 7
16	4	1	3.569 6
17	4	2	2.966 3
18	4	3	2.579 4
19	4	4	2.296 6
20	4	5	2.067 1
21	5	1	3.567 9
22	5	2	2.980 7
23	5	3	2.584 4
24	5	4	2.289 6
25	5	5	2.061 7
K_1	11.500 4	16.923 2	—
K_2	13.110 6	14.259 1	—
K_3	13.470 5	12.585 5	—
K_4	13.479 0	11.162 4	—
K_5	13.484 3	10.114 6	—
k_1	3.833 5	5.641 1	—
k_2	4.370 2	4.753 0	—
k_3	4.490 2	4.195 2	—
k_4	4.493 0	3.720 8	—
k_5	4.494 8	3.371 5	—
R	0.661 3	2.269 5	—

分析表 2 中的 k 值可得: 增大探针的涂层厚度可以抑制电磁能量的衰减, 但涂层厚度达到一定值以后 (如高于 0.5 mm), k 值变化不再显著。分析原因为: 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, 从而降低了电磁能量的导电损耗; 但是当涂层达到一定厚度时, 被测介质中涂层所占据的体积比例已足够高, 涂层厚度的增加

对被测介质等效电导率的影响不显著。在实际使用中,涂层厚度的增加会引起内嵌式分段涂层 TDR 探头内探针刚度的降低,所以涂层厚度应尽量小。综合考虑涂层厚度对电磁能量的导电损耗和探针刚度的影响,本文确定最佳的涂层厚度为 0.5 mm。

分析表 2 中的 k 值得:增大涂层间隙的长度会导致电磁能量损耗的增大。原因在于涂层间隙长度越大,探针与被测介质的接触面积越大,被测介质的等效电导率越高,产生的导电损耗越大。在实际使用中,过窄的涂层间隙会引起探针加工精度不足、加工成本高等问题。综合考虑间隙长度对电磁能量衰减的影响、加工精度和成本的限制,本文确定最佳的间隙长度为 2 mm。

2.2 几何因子确定

在两电极法中,本文采用了上文的 TDR 探头,将内探针作为一个电极、将两个外探针作为另一个电极。本节以 COMSOL 为仿真平台建立了三针式两电极法的仿真测试模型,以氯化钠水溶液为被测介质,通过仿真标定确定了用于将阻抗转换为电导率的几何因子,即式(6)中的 K_g 。

图 6 为无涂层三针式两电极法仿真测试模型,图中被测介质的体积为 $\Phi 43 \times 150$ mm。使用自由四面体网格单元对模型的计算域进行划分,设置网格单元的边长最大和最小值分别为 0.67 mm 和 0.18 mm,生成网格单元数量 1 184 187 个。将内探针设置为电压边界并施加 1 V 的电压,将两个外探针的设置接地边界,将模型的侧表面设置为电绝缘边界。

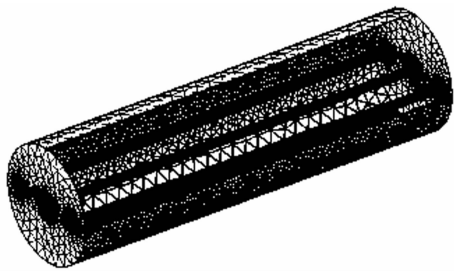


图 6 无涂层三针式两电极法仿真模型几何结构和网格

针对不同质量分数(0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%)的氯化钠水溶液,利用式(7)计算其电导率,将计算值作为数值模型中被测介质的电导率设定值。通过仿真模型求解获得被测介质电导的仿真测量值,结合式(6)对电导的仿真测量值和电导率设定值进行线性拟合,即可得到 K_g (图 7 中的拟合直线斜率 $K_g = 0.3913$ m)。

3 含水合物多孔介质仿真联合测试

3.1 TDR 法仿真测试

在基于 TDR 法的仿真测试过程中,被测介质本质上包含了内嵌式分段涂层和真实的被测物质,内嵌式分

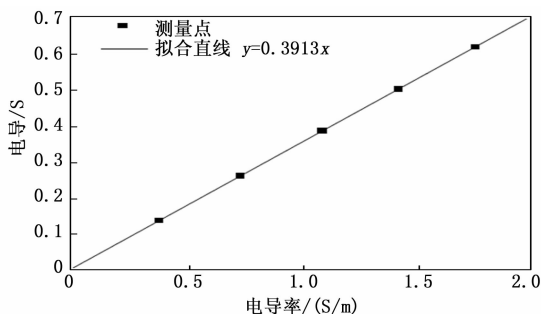


图 7 几何因子 K_g 拟合求取

段涂层对 TDR 响应以及介电常数和电导率的测量结果均产生影响,所以需要针对涂层的影响进行介电常数和电导率测量值的校正。

选取空气、乙醇、四氢呋喃、乙二醇、水为仿真被测介质,其介电常数范围为 1~80,覆盖了含水合物沉积物的介电常数变化区间。利用基于内嵌式分段涂层探头的 TDR 法对各被测介质的介电常数进行仿真测量(即 2.1 节中的 TDR 仿真模型),测量结果与实际值列于表 3。

表 3 基于 TDR 法仿真测量被测介质的介电常数

	空气	四氢呋喃	乙醇	乙二醇	水
介电常数实际值	1.00	7.58	24.55	37.70	80.00
介电常数仿真测量值	1.09	5.83	9.67	12.33	20.25

通过对表 3 所列出的介电常数实际值和仿真测量值进行多项式拟合(决定系数 $R^2 = 0.9956$),得到了适用于内嵌式分段涂层 TDR 法的介电常数测量值校正公式如式(8)所示,该校正公式适用于介电常数在 1~80 区间内的被测介质,可有效地修正内嵌式分段涂层 TDR 探头对介电常数的测量结果。

$$K_c = 0.1294K_m^2 + 1.4646K_m - 2.1102 \quad (8)$$

式中, K_m 为介电常数的仿真测量值; K_c 为校正后的介电常数值。

选取不同浓度的氯化钠水溶液为仿真被测介质,利用基于内嵌式分段涂层探头的 TDR 法对电导率进行仿真测量,测量结果如表 4 所示。

表 4 基于 TDR 法仿真测量氯化钠水溶液的电导率

氯化钠水溶液					
质量分数/%	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
电导率实际值/(S/m)	0.35	0.67	0.99	1.29	1.59
电导率仿真测量值/(S/m)	0.12	0.18	0.21	0.23	0.25

通过对表 4 所列出的电导率仿真测量值和式(7)电导率计算值进行多项式拟合(决定系数 $R^2 = 0.9996$),得到了适用于内嵌式分段涂层 TDR 法的电导率测量值校正公式如式(9)所示,该校正公式适用于电导率在

0.35~1.59 S/m 内的被测介质, 可有效地修正内嵌式分段涂层 TDR 探头对电导率的测量结果。

$$\sigma_c = 60.1743\sigma_m^2 - 12.6568\sigma_m + 1.0013 \tag{9}$$

式中, σ_m 为电导率的仿真测量值; σ_c 为校正后的电导率值。

以下以含水合物多孔介质为被测对象, 利用内嵌式分段涂层 TDR 法对其介电常数和电导率进行仿真测量, 在对测量值进行校正的基础上评价测量误差。

多孔介质的孔隙度设置为 0.4, 其孔隙水的电导率设置为 5 S/m。根据式 (10) 所示的三相幂律模型可计算不同水合物饱和度条件下多孔介质的介电常数^[23]。

$$K_a^\alpha = (1 - \varphi)\epsilon_s^\alpha + \varphi(1 - S_h)\epsilon_w^\alpha + \varphi S_h\epsilon_h^\alpha \tag{10}$$

式中, φ 为多孔介质的孔隙度; α 为经验参数, 取值 0.5 时为 CRIM (复折射率方法) 模型; ϵ_s 为多孔介质骨架 (如海砂) 的介电常数, 取值为 5; ϵ_w 为孔隙水的介电常数, 取值为 80; ϵ_h 为水合物的高频介电常数, 取值为 3; S_h 为水合物饱和度。将式 (10) 计算结果作为介电常数设定值, 针对水合物饱和度为 0~0.4 的多孔介质进行介电常数仿真测试, 利用式 (8) 对测量值进行校正, 介电常数最终测量结果与设定值的对比如图 8 所示。分析图 8 可知, 含水合物多孔介质的介电常数随水合物饱和度的增大而减小, 这是因为水合物的介电常数远低于孔隙水, 当水合物饱和度增加时, 高介电常数的孔隙水被低介电常数的水合物逐步替代, 导致多孔介质的整体极化能力减弱, 等效介电常数降低。校正后的介电常数平均相对误差为 2.44%。

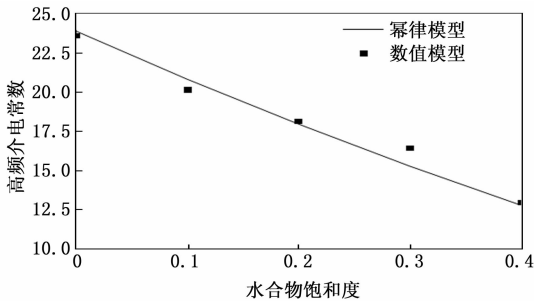


图 8 水合物饱和度不同时多孔介质介电常数仿真测量值与设定值对比

利用式 (11) 所示阿尔奇公式计算不同水合物饱和度条件下多孔介质的电导率。

$$\frac{\sigma_w}{\sigma_t} = \frac{ab}{\varphi^m(1 - S_h)^n} \tag{11}$$

式中, σ_w 为孔隙水的电导率; σ_t 为多孔介质的电导率; a 、 b 为岩性系数, 取值分别为 1.0 和 1.14; m 为胶结指数, 取值为 1.4; n 为饱和度指数, 取值为 1.85^[22]。针对水合物饱和度为 0~0.4 的多孔介质进行电导率仿真测试, 利用式 (9) 对测量值进行校正, 电导率最终测量结果与设定值的对比如图 9 所示。分析图 9 可知,

含水合物多孔介质的电导率随水合物饱和度的增大而减小, 这是因为水合物电导率极低, 远低于孔隙水电导率, 随着水合物饱和度的增加, 高电导率的孔隙水被电导率极低的水合物逐步替代, 从而导致多孔介质整体电导率的降低。校正后的电导率平均相对误差为 6.22%。

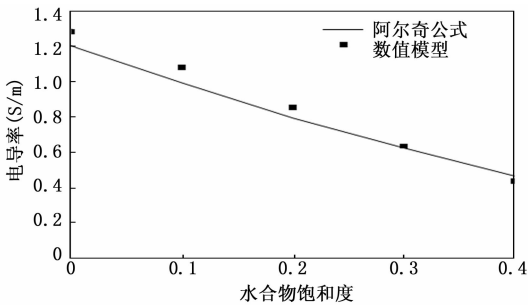


图 9 水合物饱和度不同时多孔介质电导率仿真测量值与设定值对比

3.2 两电极法仿真测试

在基于两电极法的仿真测试过程中, 被测介质本质上包含了内嵌式分段涂层和真实的被测物质, 内嵌式分段涂层对阻抗测量值、几何因子产生影响, 所以需要针对涂层的影响进行复电导率测量值的校正。以不同浓度的氯化钠水溶液为仿真被测介质, 利用基于内嵌式分段涂层探头的两电极法对电导率进行仿真测量 (参考 2.2 节中的两电极法仿真模型), 测量结果如表 5 所示。

表 5 基于两电极法仿真测量氯化钠水溶液的电导率

氯化钠水溶液					
质量分数/%	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
电导率实际值/(S/m)	0.35	0.67	0.99	1.29	1.59
电导率仿真测量值/(S/m)	0.05	0.09	0.13	0.17	0.21

通过对表 5 所列出的电导率仿真测量值和式 (7) 电导率计算值进行多项式拟合 (决定系数 $R^2 = 0.999\ 0$), 得到的适用于内嵌式分段涂层三针式两电极法的电导率测量值校正公式, 如公式 (12) 所示, 该校正公式适用于电导率在 0.35~1.59 S/m 内的被测介质, 可有效地修正两电极法电导率测量的结果。

$$\sigma_{ce} = 7.5592\sigma_{me} \tag{12}$$

式中, σ_{me} 为电导率的仿真测量值; σ_{ce} 为校正后的电导率值。

以下以含水合物多孔介质为被测对象, 利用内嵌式分段涂层三针式两电极法对其低频复电导率、低频等效介电常数进行仿真测量, 在对测量值进行校正的基础上评价测量误差。

在仿真中, 设定多孔介质孔隙度为 0.4, 孔隙水电导率为 5 S/m, 水合物饱和度为 0~0.4、测试频率范围设置为 10 mHz~1 MHz。利用式 (13) 计算不同水合

物饱和度条件下的复电导率^[33-34]：

$$\sigma^* = \frac{1}{F} [S_w^n \sigma_w + (F-1) \sigma_s^*] \quad (13)$$

式中, F 为地层因子; S_w 为含水饱和度, $S_w = 1 - S_h$; $\sigma^* s$ 为多孔介质骨架颗粒表面复电导率。非饱和多孔介质复电导率实部与虚部^[35-36]可分别如式 (14) 和 (15) 所示：

$$\sigma' = \frac{S_w^n}{F} \left(\sigma_w + \beta_{(+)} \frac{Q_v}{S_w} \right) \quad (14)$$

$$\sigma'' = \left(1 - \frac{1}{F} \right) \sigma''_s \quad (15)$$

$$\sigma''_s = S_w^{n-1} \frac{1}{F\varphi} \beta_{(+)}^i f_{\beta} Q_v \left(\frac{\varphi}{1-\varphi} \right) \quad (16)$$

式中, $\beta_{(+)}$ 为孔隙水中反离子的迁移率; Q_v 为单位孔隙水体积内双电层过剩电荷的总积电荷密度; ρ_s 为骨架颗粒的密度; σ''_s 为矿物颗粒表面复电导率; $\beta_{(+)}$ 为 Stern 层中反离子的迁移率; f_{β} 为分配系数。利用式 (17) 可以由复电导率计算得到等效复介电常数^[37]：

$$\epsilon^*(\omega) = \frac{\sigma^*(\omega)}{i\omega\epsilon_0} \quad (17)$$

式中, ϵ^* 为含水合物多孔介质的复介电常数; ω 为电场角频率; ϵ_0 为真空中绝对介电常数, 取值为 8.851×10^{-12} F/m。

对含水合物多孔介质进行复电导率仿真测试, 利用式 (13) 对测量值进行校正, 低频等效介电常数最终测量结果如图 10 所示。分析图 10 可知: 1) 在双电层极化主导的频段 (如 < 100 Hz), 随着水合物饱和度的增加, 双电层极化强度减弱, 含水合物多孔介质低频等效介电常数随之减小, 这是因为水合物生成会引起孔隙水含量的减少, 而双电层极化主要发生在多孔介质颗粒表面与孔隙水的界面处, 孔隙水量的减少会削弱颗粒表面双电层极化的强度, 从而使得等效介电常数随水合物饱和度的增加而减小; 2) 当频率处于 100 Hz $\sim$ 1 kHz 范围内, 双电层极化响应处于弛豫过程中, 等效介电常数随着频率的增加急剧减小, 即呈现频散特性。图 11 以水合物饱和度 0.1 为例, 对比了介电常数谱的仿真测量

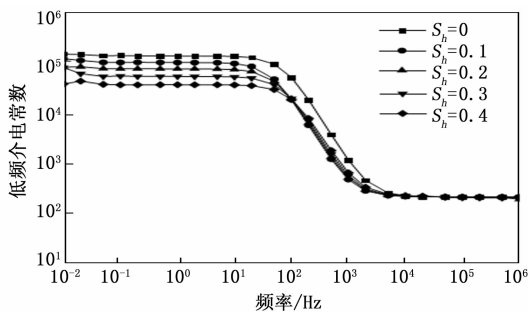


图 10 不同水合物饱和度条件下多孔介质的低频介电常数谱

结果与设定值。分析图 11 可知: 对于水合物饱和度为 0.1 的情况, 在频率低于 200 Hz 的双电层极化主导频段, 最大相对误差为 3.39% 。对于水合物饱和度范围 $0 \sim 0.4$, 平均相对误差为 2.20% 。需要说明的是: 式 (13) $\sim$ (16) 所表示的理论模型仅适用于低频双电层极化机制, 而图 11 所示高频段 (如 > 1 kHz) 的主导极化机制为界面极化, 所以仿真测试值与设定值偏差较大。

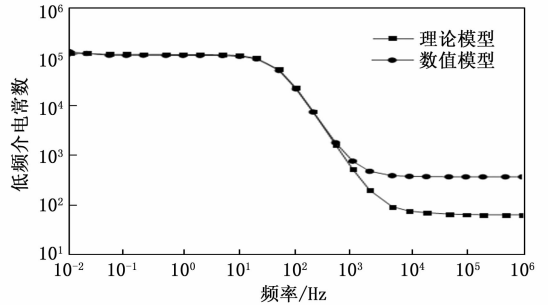


图 11 水合物饱和度为 0.1 时多孔介质低频等效介电常数谱仿真测量值与设定值对比

4 结束语

提出了基于分段涂层 TDR 法与两电极法联合的测试新方案并开展了数值仿真研究, 设计了新型内嵌式分段涂层 TDR 探头, 构建了有限元模型优化涂层参数, 建立了测量值校正模型, 以不同水合物饱和度多孔介质为对象开展了联合仿真测试, 获得了宽频段 (mHz $\sim$ GHz) 电学参数。研究表明: 1) 增大探针的涂层厚度能够抑制电磁能量的衰减, 但涂层厚度达到一定值后其影响不再显著; 增大涂层间隙的长度会导致电磁能量损耗的增大。涂层越厚则探针刚度越低、涂层间隙越小则探针加工难度和成本越高, 因此需要结合实际应用场景进行参数优化设计; 2) 嵌入式分段涂层对高频介电常数、低频介电常数、电导率的测量值均产生显著的影响, 因此必须针对 TDR 法和两电极法分别建立测量值校正模型; 3) 利用 TDR 法测量得到的高频介电常数和电导率均随水合物饱和度的增大而减小, 校正后的平均相对误差分别为 2.44% 和 6.22% ; 利用两电极法测量得到低频等效介电常数随水合物饱和度的增大而减小, 在双电层极化主导的频段校正后平均相对误差为 2.20% 。下一步将探讨环境因素 (如温度、压力等) 对电学参数测试结果的影响, 并研制 TDR-两电极法联合测试实验装置, 针对含水合物海洋沉积物开展不同条件下的宽频电学参数测试, 为全面认识沉积物电学特性和建立水合物饱和度评价模型提供实验支撑。

参考文献:

[1] SLOAN E D. Fundamental principles and applications of

- natural gas hydrates [J]. *Nature*, 2003, 426 (6964): 353–359.
- [2] 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 and Engineering*, 2009, 12 (5): 745–771.
- [3] 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 and Engineering*, 2011, 14 (1): 76–112.
- [4] 韦昌富, 颜荣涛, 田慧会, 等. 天然气水合物开采的土力学问题: 现状与挑战 [J]. *天然气工业*, 2020, 40 (8): 116–132.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] HYNDMAN R D, YUAN T, MORAN K. The concentration of deep sea gas hydrates from downhole electrical resistivity logs and laboratory data [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 172 (1/2): 167–177.
- [8] TOPP G C, DAVIS J L. Measurement of soil water content using time-domain reflectometry (TDR): a field evaluation [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] 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.
- [19] 孙中明, 刘昌岭, 赵仕俊, 等. 时域反射技术测量 THF 水合物体系含水量的实验研究 [J]. *海洋地质前沿*, 2012, 28 (5): 64–70.
- [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] 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.
- [23] 马子胜. 基于分段涂层 TDR 探头的海洋沉积物水合物饱和度测量技术 [D]. 青岛: 中国石油大学 (华东), 2024.
- [24] LEROY P, REVIL A, KEMNA A, et al. Complex conductivity of water-saturated packs of glass beads [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2008, 321 (1): 103–117.
- [25] ROBINSON D A, JONES S B, WRAITH J M, et al. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry [J]. *Vadose Zone Journal*, 2003, 2 (4): 444–475.
- [26] KLEIN K, SANTAMARINA J C. Methods for broadband dielectric permittivity measurements (soil-water mixtures, 5 Hz to 1.3 GHz) [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1997, 20 (2): 168–178.
- [27] BOBROV P P, REPIN A V, RODIONOVA O V. Wide-band frequency domain method of soil dielectric property measurements [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53 (5): 2366–2371.

(下转第 89 页)