

基于含水合物多孔介质复电导率的渗透率测试有限元仿真研究

张欢欢¹, 王 硕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: 渗透率是影响天然气水合物储层产气效率的关键参数, 野外尚缺少实时监测水合物储层渗透率动态变化的技术, 实验室内测试渗透率的方法存在成本高、周期长、可靠性低等问题; 研究了一种基于复电导率的含水合物沉积物渗透率测试新方法; 首先, 针对含水合物多孔介质建立了能够计算其渗透率和复电导率的有限元数值模型, 然后开展了不同水合物饱和度条件下的仿真实验, 获取了0~40%水合物饱和度时多孔介质的流场和电场响应参数, 分别探讨了孔隙中水合物及其饱和度变化对复电导率虚部和渗透率的影响规律和机理, 最后建立并验证了基于复电导率虚部的含水合物多孔介质渗透率评价模型, 为深入研究基于激发极化原理的含水合物沉积层渗透率测试新技术提供了理论和模型基础。

关键词: 天然气水合物; 多孔介质; 渗透率; 复电导率; 水合物饱和度; 有限元仿真

Finite-element Simulation Study on Permeability Measurement Based on Complex Conductivity of Hydrate-bearing Porous Medium

ZHANG Huanhuan¹, WANG Shuo¹, 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: Permeability is a key parameter influencing the gas production efficiency of gas hydrate reservoirs. There is still a lack of techniques for monitoring the dynamic variations of the permeability of hydrate reservoirs in real time in the field. The methods for testing permeability of hydrate-bearing samples in laboratory have several problems, such as high cost, long cycle and low reliability. A new method for measuring the permeability of hydrate-bearing sediments based on complex conductivity was studied. First, a finite element numerical model was established for the porous media containing hydrate to calculate its permeability and complex conductivity. Then, simulation experiments were carried out under different hydrate saturation conditions. The parameters of flow and electric fields for porous media with the hydrate saturation ranging from 0 to 40% were obtained, and the mechanisms of the influence of hydrate in pore space and its saturation on the imaginary part of complex conductivity and permeability were discussed. Finally, the permeability-evaluation model of hydrate-bearing porous media based on the imaginary part of complex conductivity was established and verified, which provides a theoretical and model basis for the in-depth study of the permeability measurement techniques of hydrate reservoirs based on the principle of induced polarization.

Keywords: natural gas hydrate; porous medium; permeability; complex conductivity; hydrate saturation; finite-element simulation

0 引言

天然气水合物是一种类冰状、笼型结构晶体化合物, 由水和气体(如甲烷、乙烷)在高压和低温条件下形成^[1]。

开发地层中天然气水合物通常基于打破水合物热力学平衡的原理, 如降压法、热激法和注入抑制剂法。水合物开采过程涉及到多个动力学过程, 如热量传递、水合物分解、流体流动等^[2]。储层渗透率是控制流体流动、影响地层传

收稿日期: 2023-03-14; 修回日期: 2023-03-28。

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: 张欢欢(1997-), 女, 硕士生。

通讯作者: 邢兰昌(1983-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师。

引用格式: 张欢欢, 王 硕, 邢兰昌, 等. 基于含水合物多孔介质复电导率的渗透率测试有限元仿真研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(12): 69-75.

热的关键因素,因此渗透率是影响天然气水合物藏产气效率的关键参数^[3]。

实验室内测量含水合物沉积物样品渗透率的方法主要包括流动测试(稳态法、非稳态法)、核磁共振(NMR)测试以及X-CT测试。Li等^[4]采用稳态注水法测量了含甲烷水合物和不含水合物石英砂的渗透率。吴伏波等^[5]在石英砂中制备了甲烷水合物,采用稳态法测量了不同水合物饱和度条件下的样品渗透率。Ahn等^[6]采用非稳态法测量了含甲烷水合物沉积物中甲烷和水的相对渗透率。张宏源等^[7]采用瞬态压力脉冲法测量了含CO₂水合物粉细砂样品的渗透率。Kleinberg等^[8]采用NMR测试法测量了含甲烷水合物砂岩的相对渗透率。Li等^[9]对含水合物砂岩进行了NMR测试,并探讨了水合物对砂岩渗透率的影响。张永超等^[10]利用NMR横向弛豫时间谱分析了水合物生成过程中样品的微观孔隙结构和水相渗透率演化规律。Jin等^[11]利用X-CT技术获得了含甲烷水合物沉积物的三维图像,研究了颗粒尺寸分布对绝对渗透率的影响。Seol和Kneafsey^[12]基于X-CT技术研究了水合物饱和度及其赋存模式对含水合物沉积物渗透率的影响。目前,在实验室内对含水合物沉积物样品进行渗透率测试尚存在以下问题:1)在流动测试过程中,含水合物沉积物样品极易受到温度和压力扰动的影响而引起水合物的分解与二次形成,导致样品状态不稳定;利用稳态法测量时,压力和流量达到稳定的过程耗费较长时间^[13],尤其对于黏土含量较高的情况;实施流动测试需要专用的实验装置,操作程序复杂度高且成本较高;2)采用NMR和X-CT测试技术则需要昂贵的分析测试仪器,数据处理方法依赖渗透率评价模型,模型的准确性直接影响渗透率测试结果的可靠性。

激发极化(IP)法是以地下岩、矿石在人工电场作用下发生的物理和电化学反应差异为基础的一种电法勘探方法。激发极化响应的测量可以在时域或频域内进行,在宽频范围内获取IP响应的方法称为谱激发极化法或复电导率法。研究表明通过IP响应获取的参数与控制多孔介质渗透率的几何长度尺度具有良好的相关性^[14-21]。Denicol和Jing^[22]通过实验研究了10 Hz~2 MHz范围内黏土矿物对砂岩样品复电阻率的影响规律,结果显示渗透率随着黏土含量的增加而降低。Tong和Tao^[23]研究了100 Hz~20 MHz范围内泥质砂岩样品的复电阻率与渗透率之间的关系,提出利用孔隙度、复电导率虚部与频率的关系参数来计算渗透率。Weller等^[24]在2.8 MHz~750 kHz范围内采用基于电阻率、极化率和平均弛豫时间所建立的幂律关系来预测各向同性/异性砂岩样品的渗透率。Revil等^[25]测量了1 Hz~45 kHz范围内枫丹白露砂岩的复电导率,并利用表面电导率、孔隙度和地层因子来预测渗透率。Norbisrath等^[26]分析了10 Hz~100 kHz范围内多种碳酸盐岩的复电阻率谱,并对渗透率进行了预测。Ahmed等^[27]在0.01 Hz~10 kHz范围内对黏土材料和碳酸盐样品的复电导率进行了测量,得到了阳离子交换量、孔隙度与渗透率的关系模型。

本文研究基于复电导率的含水合物沉积物样品渗透率测试新方法。首先梳理了代表性的复电导率参数与渗透率关系模型,然后建立了用于仿真测试含水合物沉积物样品复电导率和渗透率的有限元数值模型,开展了不同水合物饱和度条件下数值实验,基于仿真数据分析了饱和度对复电导率、渗透率的影响,最后建立了复电导率虚部与渗透率之间定量关系。

1 基于复电导率的渗透率模型

假设含水合物沉积物包含骨架颗粒、水合物和水等三相组分。绝对渗透率是指在不含水合物时沉积物多孔介质中流动的单相流体的渗透率。将存在水合物时的沉积物绝对渗透率称为有效绝对渗透率^[28],此处“有效”体现了水合物的存在对于沉积物绝对渗透率的影响。复电导率为复数,可采用模值和相角、实部和虚部的形式来表示:

$$\sigma^* = |\sigma| e^{i\varphi} = \sigma' + i\sigma'' \quad (1)$$

式中, σ^* 为复电导率(S/m); $|\sigma|$ 为复电导率模值(S/m); φ 为相角(rad); σ' 为复电导率实部(S/m); σ'' 为复电导率虚部(S/m)。

Börner等^[29]对各种泥质砂、粉砂和黏土进行了复电导率测量,由于复电导率虚部与比表面积呈现近似线性相关的关系,所以可用复电导率虚部来替换渗透系数计算式中的比表面积参数。

$$K = \frac{a}{FS_{por}^c} = \frac{a}{bF\sigma''^c} \quad (2)$$

式中, a 、 b 、 c 为拟合常数; F 为地层因子; K 为渗透系数(m/s)。

Slater和Lesmes^[30]研究了天然沉积物和人工砂/黏土混合物,认为渗透系数与复电导率虚部相关,但与地层因子没有相关性,并建立了渗透系数与复电导率虚部之间的关系模型。

$$K = \frac{m}{(\sigma'')^n} \quad (3)$$

式中, m 、 n 为可调参数, $m = (2.0 \pm 0.3) \times 10^{-4}$, $n = 1.1 \pm 0.2$ 。Slater和Glaser^[31]针对Börner模型适用岩性条件有限的问题,提出了利用地层因子和复电导率虚部计算渗透系数的模型。

$$K = \frac{a}{F\sigma''^b} \quad (4)$$

式中, a 、 b 为拟合常数。式(5)给出了渗透系数与渗透率的关系:

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \quad (5)$$

式中, ρ 为流体的密度(kg/m³); g 为重力加速度,(m/s²); μ 为流体动力黏度(Pa·s); k 为渗透率(m²)。

Revil和Florsch^[32]基于机理模型直接将复电导率虚部与地层因子结合得到了预测多孔介质渗透率的模型。

$$k = \frac{16(\sum^S)^2}{am^2F(F-1)^2(\sigma'')^2} \quad (6)$$

式中, a 为拟合常数, m 为胶结指数, Σ^s 为与 Stern 层有关的表面电导 (S)。

Weller 等^[19]测量了砂岩和松散沉积物样品的复电导率, 建立了基于地层因子和复电导率虚部的渗透率预测模型。

$$k = \frac{a}{F^c \sigma''^m} \quad (7)$$

式中, a 、 b 、 c 为拟合常数。考虑到地层因子在野外现场较难获得, 因此可采用 Debye 分解法得到的低频电导率来代替地层因子来计算渗透率。

$$k = \frac{a\sigma_0^c}{\sigma''^m} \quad (8)$$

式中, a 、 b 、 c 为拟合常数, σ_0 表示低频电导率 (S/m);

Revil^[33]根据水力半径与电荷密度的关系、复电导率虚部与电荷密度的关系以及地层因子与孔隙度的关系, 建立了渗透率、地层因子、复电导率虚部之间的关系模型。

$$k = \frac{1}{aF^3(\sigma''^b)^2} \quad (9)$$

式中, a 为拟合常数。

2 流场和电场的有限元数值建模

2.1 模型几何结构

建立图 1 所示的二维多孔介质几何结构来模拟含水合物沉积物样品。用圆面表示石英砂颗粒及水合物, 其中深灰色圆面代表石英砂颗粒, 浅灰色的区域为孔隙, 孔隙中小圆面代表水合物。通过调节小圆面的面积和位置可以改变水合物饱和度以及水合物微观分布模式。当模拟石英砂颗粒直径为 12 μm 时, 多孔介质模型几何结构的长度为 0.216 mm、宽度为 0.108 mm。

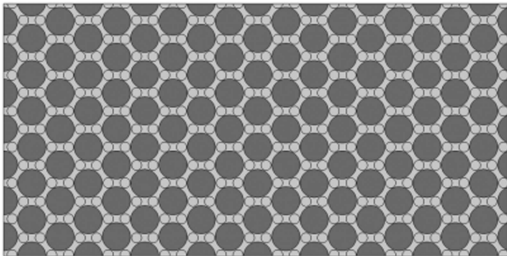


图 1 二维多孔介质模型几何结构

2.2 材料特性参数与模型边界条件

天然气水合物电导率和相对介电常数分别设定为 1×10^{-5} S/m 和 60^[34-36]。孔隙水相对介电常数设定为 80, 孔隙水电导率设定为 7.81×10^{-3} S/m^[37], 水的密度和动力黏度分别为 1 000 kg/m³ 和 0.001 Pa · s。

采用 COMSOL 中的 CFD 模块来计算多孔介质的渗透率。多孔介质模型的入口和出口均为压力边界, 其中入口压力设置为 1 000 Pa, 出口压力设置为 0 Pa (表压)。采用 AC/DC 模块来计算多孔介质的复电导率参数。在模型左端边界处施加正弦交流电压 $U = \sin(\omega t)$, 频率范围为 $10^{-3} \sim 10^6$ Hz, 模型右端边界处接地。

2.3 物理模型求解与参数计算

雷诺数是用来表征流体流动状态的无量纲数。在石英砂颗粒直径为 12 μm 、流速为 0.002 51 m/s 的条件下, 计算得到雷诺数为 0.542。

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} \quad (10)$$

式中, ρ 为流体密度 (kg/m³); u 为流速 (m/s); L 为特征长度 (对于圆球扰流, 特征长度为圆球的直径), (m); μ 为流体动力黏度 (Pa · s)。

假设水为不可压缩流体, 根据流体力学理论可以得到不可压缩流体的连续性方程:

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (11)$$

式中, \mathbf{u} 为速度矢量 (m/s)。不可压缩流体的动量方程为:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mu(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T)] + \mathbf{F} \quad (12)$$

式中, p 为压力 (Pa); \mathbf{I} 为单位矩阵; \mathbf{F} 是体积力矢量 (N/m³)。

通过对以上流动控制方程进行数值求解, 可以得到多孔介质出口边界处的质量流量, 进而得到渗流速度。基于达西定律 [式 (13)]、结合仿真数据可计算得到图 1 所示的多孔介质数值样品的绝对渗透率。

$$k = -\frac{u\mu L}{\Delta p} \quad (13)$$

式中, u 为渗流速度 (m/s); k 为绝对渗透率 (m²); Δp 为压力差 (Pa); L 为多孔介质的长度 (m)。

交变电场中总电流密度 \mathbf{J} 是传导电流密度 \mathbf{J}_c 与位移电流密度 \mathbf{J}_d 之和, 可由下式计算:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (14)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (15)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon \mathbf{E} \quad (16)$$

式中, σ 为电导率 (S/m); \mathbf{E} 表示电场强度矢量 (V/m); \mathbf{D} 表示电位移矢量 (C/m²); ϵ_0 表示真空中的绝对介电常数, 为 8.854×10^{-12} F/m; ϵ 表示相对介电常数。

通过求解以上电场控制方程可得到通过多孔介质的电流值, 利用电流和电压的幅值可计算得到复电导率模值, 基于相关分析法可求得电压与电流的相位差。最终利用复电导率模值、相位差得到多孔介质的复电导率 [参见式 (1)]。

2.4 网格划分与优选

采用自由三角形网格对求解区域进行划分, 网格的数量与求解时间以及数值解的准确度密切相关。网格划分越精细则得到的解越精确, 但需要的内存更大、求解的时间更长^[38]。网格划分过于粗糙则会导致网格之间尺寸过渡不平稳, 进而导致数值计算的结果不准确、甚至模型无法求解运算, 所以需要网格数量进行优选。

饱和水多孔介质的网格依赖性检查结果如图 2 和 3 所示。由图可见, 随着网格数量的增加, 多孔介质的复电导

率虚部和绝对渗透率逐渐趋近于到稳定值。为得到准确的计算结果且尽量节省计算成本，本文选定网格的最大单元尺寸为 3.60×10^{-4} mm，最小单元尺寸为 8.64×10^{-6} mm，网格数量为 590 439。

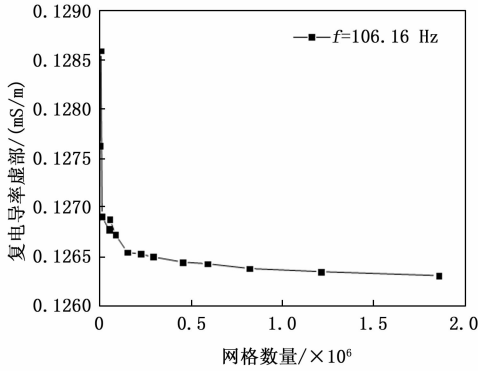


图 2 复电导率虚部随网格数量的变化

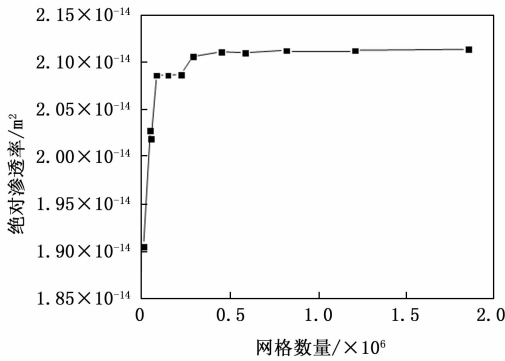


图 3 饱和水多孔介质绝对渗透率随网格数量的变化

3 数值仿真实验及数据分析

3.1 水合物饱和度对多孔介质复电导率虚部的影响

研究了水合物饱和度对含水合物多孔介质复电导率虚部的影响。图 4 展示了不同水合物饱和度条件下多孔介质复电导率虚部的频谱图。

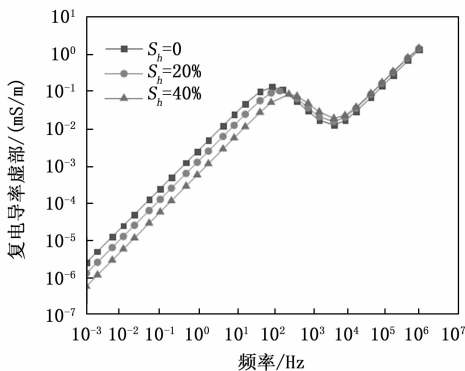


图 4 不同水合物饱和度条件下多孔介质复电导率虚部频谱

由图 4 可知，在 $10^{-3} \sim 10^2$ Hz 范围内复电导率虚部随频率升高而增大，在该频段内双电层极化占据主导地

位^[39-40]，极化作用随频率的升高而增强。双电层包括 Stern 层和 Diffuse 层。石英砂颗粒表面携带的负电荷吸附溶液中的阳离子形成阳离子层，即为 Stern 层；Stern 层之外的溶液中电荷在静电力以及自身热运动的共同作用下形成 Diffuse 层。在外电场的作用下，双电层中离子的平衡状态被打破，从而引起双电层的极化^[41-43]。

将复电导率虚部到达极大值时的频率记作峰值频率，峰值频率处多孔介质的双电层极化作用达到最强。由图 4 可知，在高于峰值频率的频段内复电导率虚部先减小后增大，双电层极化作用逐渐减弱，同时界面极化（Maxwell-Wagner 效应）作用逐渐增强，双电层极化与界面极化作用两者相互竞争，最终结果为复电导率虚部先降低后升高，在高频段（如 10 kHz 以上）界面极化作用占据主导地位^[44]。

由图 4 可知，随着水合物饱和度的增加（0~40%），复电导率虚部的峰值频率逐渐增加，在低于峰值频率范围内，复电导率虚部随水合物饱和度增加而降低，在高频段（如 $500 \sim 10^6$ Hz）呈现相反变化趋势。分析产生上述现象的原因为：低频段双电层极化占据主导地位，多孔介质复电导率虚部由颗粒表面电导率的虚部所决定，而颗粒表面电导率虚部随水合物饱和度的增大而减小^[45-46]，则多孔介质复电导率虚部随之减小；在高频段双电层极化作用随频率升高而逐渐减弱，同时界面极化作用逐渐增强，水合物饱和度的增大会引起界面极化作用的增强^[46]，从而使得多孔介质复电导率虚部随水合物饱和度增加而增大。

3.2 水合物饱和度对多孔介质渗透率的影响

研究了水合物饱和度对含水合物多孔介质有效绝对渗透率的影响。多孔介质有效绝对渗透率随水合物饱和度变化的曲线如图 5 所示。

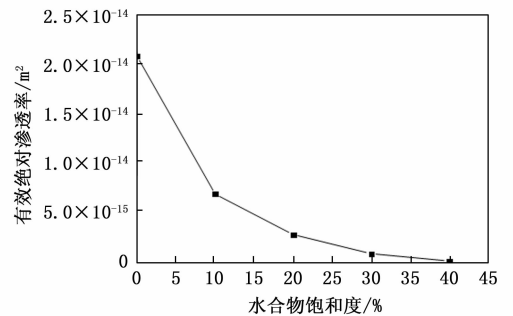


图 5 有效绝对渗透率随水合物饱和度变化的曲线

由图 5 可知，多孔介质有效绝对渗透率随水合物饱和度的增加而降低，其原因为水合物饱和度增加使得多孔介质中流体流动的孔隙空间减小，从而导致流体可流通的孔隙的等效半径减小^[47-48]。当水合物饱和度较低时（如图中所示的 20% 以下范围），多孔介质有效绝对渗透率下降速率相对较高，这与公开发表的研究结果相一致^[49-51]。对于孔隙充填型水合物微观分布模式，水合物形成导致流体流动通道迂曲度的增加。由于水合物更容易在大孔隙中形成且

大孔隙对渗透率的贡献度更高, 因此在水合物生成初期, 其饱和度的增加引起更为显著的有效绝对渗透率下降。随着水合物饱和度的升高, 水合物占据的小孔隙逐渐增多, 则水合物饱和度升高对渗透率的影响逐渐降低。

3.3 复电导率与渗透率关系模型

上文所述基于复电导率的渗透率模型主要适用于饱和度的多孔介质, 尚未考虑非水饱和的条件。在本文所研究的含水合物多孔介质中, 水合物与水共同存在于多孔介质的孔隙空间中, 可将之看作非水饱和的多孔介质, 因此需要建立相应的复电导率与渗透率关系模型, 以适应不同水合物饱和度的实际情况。

Weller 等^[19]提出的渗透率计算模型(式(7))通用性较强, 本文以该模型为基础建立非水饱和条件下的渗透率计算模型。Slater 和 Lesmes^[30]所报道的结果显示, 渗透系数变化超过了 4 个量级, 复电导率虚部的变化超过了 3 个数量级, 而地层因子仅变化了三倍, 所以认为在渗透率模型中地层因子的作用可以近似忽略。基于此认识, 本研究将该模型中的参数 c 置 0, 仅保留参数 a 和 b (如式(17)所示):

$$k = \frac{a}{\sigma^m} \quad (17)$$

采用数值仿真数据对参数 a 和 b 进行拟合, 最终建立了基于复电导率虚部的含水合物多孔介质渗透率计算模型。

图 6 展示了不同水合物饱和度(0~40%)条件下多孔介质复电导率虚部与有效绝对渗透率的关系。由图 6 可见, 有效绝对渗透率和复电导率虚部之间的关系可采用幂函数进行拟合。利用最小二乘拟合法得到参数 a 、 b 的值分别为 6.291×10^{-5} 、 -10.497 ($R^2 = 0.987$)。针对本文所研究的含水合物多孔介质所建立的渗透率计算模型如式(18)所示:

$$k = \frac{6.282 \times 10^{-5}}{\sigma^{-10.497}} \quad (18)$$

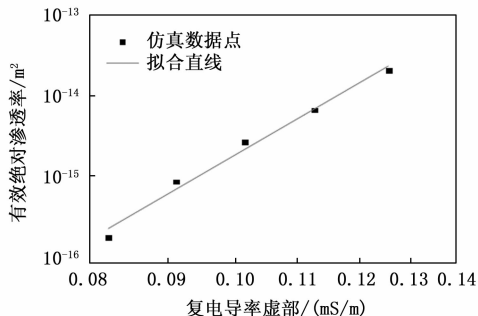


图 6 含水合物多孔介质复电导率虚部与有效绝对渗透率的关系

将通过流场数值计算得到的渗透率作为参考值、利用式(18)计算得到的渗透率为测量值, 计算得到渗透率的平均绝对误差为 $7.61 \times 10^{-16} \text{ m}^2$, 平均相对误差为 16.59%, 均方根误差为 $1.28 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 。图 7 对比了渗透率参考值与测量值。由图 7 可见, 基于复电导率虚部的渗透率模型计算值相对误差处于 $\pm 25\%$ 以内。分析误差的来源主要包括

两方面, 即模型忽略了地层因子、参数拟合过程引入了误差。在处理水文地质工程问题时发现, 地层在多空间尺度上均表现出非均质性, 其渗透率值在短距离内可能发生数量级的变化。一般认为渗透率模型的计算值在实测值上下各一个数量级内的结果是合理可接受的^[52]。因此, 本文提出的基于复电导率虚部的渗透率模型准确度较高, 具有较大的应用潜力。

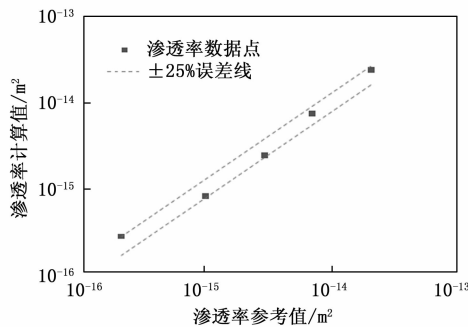


图 7 基于复电导率的渗透率模型计算结果误差评价

4 结束语

含水合物沉积层的渗透率是影响储层产气效率的关键参数之一。目前, 野外现场缺少实时监测水合物储层渗透率动态变化的技术, 实验室内对含水合物沉积物样品进行渗透率测试的方法也存在系列问题。本文研究基于复电导率的含水合物沉积物渗透率测试新方法, 采用有限元数值模拟技术开展了不同水合物饱和度条件下仿真实验, 在探讨饱和度对复电导率、渗透率影响的基础上初步建立了基于复电导率虚部的渗透率评价模型, 为深入研究基于激发极化原理的含水合物沉积层渗透率测试新方法提供了坚实的基础。

在考虑水合物饱和度影响的基础上, 下一步将系统研究水合物微观分布模式、黏土类型、黏土含量、黏土分布状态、孔隙水盐度等因素对复电导率、渗透率的影响规律和机理, 进而建立完善的基于复电导率参数的含水合物沉积物渗透率评价模型。

参考文献:

- [1] SLOAN E D. Gas hydrates: review of physical/chemical properties [J]. Energy & Fuels, 1998, 12 (2): 191-196.
- [2] ZHAO J, FAN Z, DONG H, et al. Influence of reservoir permeability on methane hydrate dissociation by depressurization [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 103: 265-276.
- [3] LI B, LI X S, LI G, et al. Measurements of water permeability in unconsolidated porous media with methane hydrate formation [J]. Energies, 2013, 6 (7): 3622-3636.
- [4] LI G, LI X S, LÜ Q N, et al. Permeability measurements of quartz sands with methane hydrate [J]. Chemical Engineering Science, 2019, 193: 1-5.

- [5] 吴伏波, 李淑霞, 王志强, 等. 含甲烷水合物多孔介质渗透率的实验研究 [C] //2018 油气田勘探与开发国际会议 (IFEDC 2018) 论文集, 2018: 947-954.
- [6] AHN T, LEE J, HUH D G, et al. Experimental study on two-phase flow in artificial hydrate-bearing sediments [J]. *Geosystem Engineering*, 2005, 8 (4): 101-104.
- [7] 张宏源, 刘乐乐, 刘昌岭, 等. 基于瞬态压力脉冲法的含水合物沉积物渗透性实验研究 [J]. *实验力学*, 2018, 33 (2): 263-271.
- [8] KLEINBERG R L, FLAUM C, GRIFFIN D D, et al. Deep sea NMR: Methane hydrate growth habit in porous media and its relationship to hydraulic permeability, deposit accumulation, and submarine slope stability [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, 108 (B10): 2508.
- [9] LI C H, ZHAO Q, XU H J, et al. Relation between relative permeability and hydrate saturation in Shenhu area, South China sea [J]. *Applied Geophysics*, 2014, 11 (2): 207-214.
- [10] 张永超, 刘昌岭, 刘乐乐, 等. 水合物生成导致沉积物孔隙结构和渗透率变化的低场核磁共振观测 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41 (3): 193-202.
- [11] JIN Y, HAYASHI J, NAGAO J, et al. New method of assessing absolute permeability of natural methane hydrate sediments by microfocus X-ray computed tomography [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2007, 46 (5R): 3159.
- [12] SEOL Y, KNEAFSEY T J. Methane hydrate induced permeability modification for multiphase flow in unsaturated porous media [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, 116 (B8): B08102.
- [13] CHOI J H, MYSHAKIN E M, LEI L, et al. An experimental system and procedure of unsteady-state relative permeability test for gas hydrate-bearing sediments [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, 83: 103545.
- [14] BÖRNER F D, SCHÖN J H. A relation between the quadrature component of electrical conductivity and the specific surface area of sedimentary rocks [J]. *The Log Analyst*, 1991, 32 (5): 612-613.
- [15] LESMES D P, MORGAN F D. Dielectric spectroscopy of sedimentary rocks [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2001, 106 (B7): 13329-13346.
- [16] BINLEY A, SLATER L D, FUKES M, et al. Relationship between spectral induced polarization and hydraulic properties of saturated and unsaturated sandstone [J]. *Water Resources Research*, 2005, 41 (12): W12417.
- [17] KEMNA A, BINLEY A, CASSIANI G, et al. An overview of the spectral induced polarization method for near-surface applications [J]. *Near Surface Geophysics*, 2012, 10 (6): 453-468.
- [18] ATTWA M, GÜNTHER T. Spectral induced polarization measurements for environmental purposes and predicting the hydraulic conductivity in sandy aquifers [J]. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, 2013, 10 (4): 5315-5354.
- [19] WELLER A, SLATER L, BINLEY A, et al. Permeability prediction based on induced polarization: insights from measurements on sandstone and unconsolidated samples spanning a wide permeability range [J]. *Geophysics*, 2015, 80 (2): D161-D173.
- [20] 时鹏. 基于复电导的渗透率预测与部分饱和地层的动电性质分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [21] 邢兰昌, 王 硕, 张欢欢, 等. 含水合物沉积物渗透率评价方法 [P]. PCT/CN2022/116966. 2022-09-05.
- [22] DENICOL P S, JING X D. Effects of water salinity, saturation and clay content on the complex resistivity of sandstone samples [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1998, 136 (1): 147-157.
- [23] TONG M, TAO H. Permeability estimating from complex resistivity measurement of shaly sand reservoir [J]. *Geophysical Journal International*, 2008, 173 (2): 733-739.
- [24] WELLER A, NORDSIEK S, DEBSCHÜTZ W. Estimating permeability of sandstone samples by nuclear magnetic resonance and spectral-induced polarization [J]. *Geophysics*, 2010, 75 (6): E215-E226.
- [25] REVIL A, KESSOURI P, TORRES-VERDIN C. Electrical conductivity, induced polarization, and permeability of the Fontainebleau sandstone [J]. *Geophysics*, 2014, 79 (5): D301-D318.
- [26] NORBISRATH J H, WEGER R J, EBERLI G P. Complex resistivity spectra and pore geometry for predictions of reservoir properties in carbonate rocks [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, 151: 455-467.
- [27] AHMED A S, REVIL A, ABDULSAMAD F, et al. Induced polarization as a tool to non-intrusively characterize embankment hydraulic properties [J]. *Engineering Geology*, 2020, 271: 105604.
- [28] 王自豪, 万义钊, 刘乐乐, 等. 含水合物沉积物相对渗透率研究进展 [J]. *海洋地质前沿*, 2022, 38 (2): 14-29.
- [29] BÖRNER F D, SCHOPPER J R, WELLER A. Evaluation of transport and storage properties in the soil and groundwater zone from induced polarization measurements [J]. *Geophysical Prospecting*, 1996, 44 (4): 583-601.
- [30] SLATER L, LESMES D P. Electrical-hydraulic relationships observed for unconsolidated sediments [J]. *Water Resources Research*, 2002, 38 (10): 1-13.
- [31] SLATER L D, GLASER D R. Controls on induced polarization in sandy unconsolidated sediments and application to aquifer characterization [J]. *Geophysics*, 2003, 68 (5): 1547-1558.
- [32] REVIL A, FLORSCH N. Determination of permeability from spectral induced polarization in granular media [J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 181 (3): 1480-1498.
- [33] REVIL A. Spectral induced polarization of shaly sands: Influence of the electrical double layer [J]. *Water Resources Research*, 2012, 48 (2): W02517.
- [34] HAUKALID K, FOLGERØ K, BARTH T, et al. Hydrate formation in water-in-crude oil emulsions studied by broad-band

- permittivity measurements [J]. *Energy & Fuels*, 2017, 31 (4): 3793–3803.
- [35] DU FRANE W L, STERN L A, WEITEMEYER K A, et al. Electrical properties of polycrystalline methane hydrate [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38 (9): 1–5.
- [36] WAITE W F, SANTAMARINA J C, CORTES D D, et al. Physical properties of hydrate-bearing sediments [J]. *Reviews of geophysics*, 2009, 47 (4): 1–38.
- [37] SEN P N, GOODE P A. Influence of temperature on electrical conductivity on shaly sands [J]. *Geophysics*, 1992, 57 (1): 89–96.
- [38] 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.
- [39] LI J, KE S, YIN C, et al. A laboratory study of complex resistivity spectra for predictions of reservoir properties in clear sands and shaly sands [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 177: 983–994.
- [40] 张树立, 邢兰昌, 魏伟, 等. 含水合物沉积物复电导率测试实验系统设计与开发 [J]. *实验室研究与探索*, 2022, 41 (1): 89–95.
- [41] SCHWARZ G. A theory of the low-frequency dielectric dispersion of colloidal particles in electrolyte solution [J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1962, 66 (12): 2636–2642.
- [42] 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.
- [43] 陈震, 赵孔双, 刘昊. 非导电球形粒子悬浮液宽频介电谱—薄双电层理论的计算机模拟 [J]. *化学学报*, 2006 (17): 1780–1784.
- [44] 牛佳乐, 邢兰昌, 魏伟, 等. 基于宽频电阻抗特性与阿尔法
- (上接第 27 页)
- [8] 吴旭, 王东辉, 杨元元. 基于 FPGA 的 CMP 电涡流终点检测装置设计 [J]. *计算机测量与控制*, 2017, 25 (4): 28–30, 39.
- [9] 吕春峰, 刘伟文, 姜盈盈, 等. 栅式电涡流传感器在桥梁挠度测量中的应用 [J]. *计算机测量与控制*, 2014, 22 (5): 1340–1341.
- [10] 周琦, 段发阶, 叶德超, 等. 电涡流式汽轮机自锁叶片叶尖间隙测量研究 [J]. *仪表技术与传感器*, 2020 (9): 36–40.
- [11] 孙志敬, 刘欢, 侯文峰. 电涡流位移传感器在压缩机中的应用 [J]. *机床与液压*, 2021, 49 (19): 68–71.
- [12] 徐健. 8 mm 电涡流位移/振动传感器探头的国产化设计 [J]. *自动化仪表*, 2006 (1): 68–70.
- [13] WANG L. Compressive pressure and noncontact gap measurements based on 2-D coil covered by polydimethylsiloxane film [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2015, 64 (8): 2259–2264.
- [14] POLIAKINE J, CIVET Y, PERRIARD Y. Design and manufacturing of high inductance planar coils for small scale sensing applications [J]. *Procedia Engineering*, 2016, 168: 1127–1130.
- [15] WANG L. Potential of using coil-shaped conductive polymer composite to measure temperature and noncontact gap [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 1–6.
- [16] 黄平捷. 多层导电结构厚度与缺陷电涡流检测若干关键技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [17] THEODOULIDIS T. Analytical model for tilted coils in eddy-current nondestructive inspection [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2005, 41 (9): 2447–2454.
- [18] 雷银照. 用坐标变换方法求解倾斜圆环线圈时谐电磁场的解析解 [J]. *电工技术学报*, 2010.
- [19] 张玉宝, 胡树丞. 基于 ANSYS 有限元方法的低频涡流检测仿真 [J]. *传感器与微系统*, 2020, 39 (3): 46–49.
- [20] 周海婷, 厚康, 潘红良, 等. 基于有限元仿真电涡流传感器的结构优化 [J]. *电子测量技术*, 2016, 39 (7): 15–19.
- [21] 杨坚, 张善猛, 曾励, 等. 基于 ANSYS 的电涡流位移传感器仿真分析 [J]. *工程机械*, 2021, 52 (3): 40–44.
- 奇公式的含水合物饱和度计算模型 [J]. *计算机测量与控制*, 2020, 28 (8): 250–255.
- [45] XING L, QI S, XU Y, et al. Numerical study on complex conductivity characteristics of hydrate-bearing porous media [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2021, 95: 104145.
- [46] XING L, NIU J, ZHANG S, et al. Experimental study on hydrate saturation evaluation based on complex electrical conductivity of porous media [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 208: 109539.
- [47] DAI S, SEOL Y. Water permeability in hydrate-bearing sediments: A pore-scale study [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41 (12): 4176–4184.
- [48] 李世龙, 李刚, 魏纳, 等. 含甲烷水合物的石英砂渗透率实验和分形模型对比研究 [J]. *新能源进展*, 2020, 8 (4): 264–271.
- [49] CHEN Y, SUN B, CHEN L, et al. Simulation and observation of hydrate phase transition in porous medium via microfluidic application [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019, 58 (12): 5071–5079.
- [50] LUO Y, SUN Y, LI L, et al. Image-based pore-network modeling of two-phase flow in hydrate-bearing porous media [J]. *Energy*, 2022, 252: 124044.
- [51] XU J, BU Z, LI H, et al. Pore-scale flow simulation on the permeability in hydrate-bearing sediments [J]. *Fuel*, 2022, 312: 122681.
- [52] ROBINSON J, SLATER L, WELLER A, et al. On permeability prediction from complex conductivity measurements using polarization magnitude and relaxation time [J]. *Water Resources Research*, 2018, 54 (5): 3436–3452.