

基于宽频电阻抗特性与阿尔奇公式的 含水合物饱和度计算模型

牛佳乐¹, 邢兰昌¹, 魏伟², 韩维峰², 曹胜昌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: 以自主设计开发的水合物电学参数测量装置为基础, 在频率范围 5 Hz~400 kHz 内测试了不同饱和度条件下的含四氢呋喃水合物海沙体系的宽频阻抗; 分析了水合物生成分解过程中模拟沉积物的宽频阻抗特性, 讨论了不同含水合物饱和度条件下的阻抗幅值频散特性及其与饱和度之间的定量关系, 建立了基于宽频阻抗幅值和阿尔奇公式的含水合物饱和度计算模型。研究结果表明: 1) 含水合物天然海沙体系的阻抗幅值呈现出频散特性, 频散特性受到孔隙壁与孔隙流体之间界面极化效应的影响, 阻抗幅值频散度与含水合物饱和度之间呈现近似线性关系; 2) 在测试频率 200~200 kHz 时, 阿尔奇公式中的胶接指数较为稳定, 饱和度指数与测试频率的对数之间呈现出近似线性的关系, 测试频率应作为含水合物饱和度计算模型的参数; 该研究为沉积物中含水合物饱和度的评价提供了新方法, 通过测量宽频阻抗幅值并应用所提出的模型, 综合多个频率的模型计算结果有望得到更加准确的饱和度评价价值。

关键词: 天然气水合物; 含水合物饱和度; 计算模型; 宽频电阻抗; 阿尔奇公式; 频散特性

A Calculation Model for Hydrate Saturation Based on Broadband Electrical Impedance and Archie's Formula

Niu Jiale¹, Xing Lanchang¹, Wei Wei², Han Weifeng², Cao Shengchang¹

(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: Based on the self-designed equipment for measuring the electrical parameters of hydrate, the broadband electrical impedance of sea sand with tetrahydrofuran hydrate of different saturations was measured in the frequency range of 5 Hz~400 kHz. The broadband impedance characteristics of the simulated sediments during hydrate formation and decomposition were analyzed, and the dispersion characteristics of the impedance amplitude under different hydrate saturations as well as the quantitative relation between the impedance amplitude and saturation were discussed. A calculation model of hydrate saturation based on broadband impedance amplitude and Archie formula was established finally. It has been shown that: 1) the impedance amplitude of hydrate bearing sea sand system presents dispersion characteristics, which is affected by the interface polarization effect between the pore wall and fluid, and the relation between the impedance amplitude dispersion and hydrate saturation is approximately linear; 2) at the test frequency of 200 ~ 200 kHz, the cementation index in Archie's formula is stable and the relation between saturation index and logarithm of the test frequency is approximately linear; thus the test frequency should be used as a parameter of the hydrate saturation calculation model. This study provides a new method for the evaluation of hydrate saturation in sediment. By measuring the broadband impedance amplitude and applying the proposed model, it is expected to obtain a more accurate and reliable saturation value by integrating the model calculation results of multiple frequencies.

Keywords: natural gas hydrate; hydrate saturation; calculation model; broadband electrical impedance; Archie's formula; frequency dispersion characteristics

收稿日期: 2020-02-19; 修回日期: 2020-03-03。

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: 牛佳乐(1994-), 男, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 主要从事检测技术与自动化装置方向的研究。

通讯作者: 邢兰昌(1983-), 男, 山东德州人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事检测技术与自动装置、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。

0 引言

天然气水合物是由一种或几种烃类气体和水组成的结晶状物质, 自然界中水合物广泛分布在海底浅层沉积物以及陆上冻土带, 其中海域水合物资源量占我国水合物总资源量的 90% 以上^[1-2]。因天然气水合物具有巨大的地质储量和清洁无污染的特点, 已成为一种重要的战略能源和潜在的未来资源^[3-5]。

含水合物饱和度的评价是天然气水合物资源储量估算、勘探开发的关键问题之一。由于天然气水合物电阻率极高, 当沉积物中的部分孔隙水被水合物取代时, 沉积物电阻率

会显著增大,理论和实践表明可以根据沉积物电阻率来估算含水合物饱和度^[6-8]。Spangenberg 等^[9]测量了甲烷水合物在玻璃珠表面生成过程中的电阻率变化,发现阿尔奇公式中的电阻率增大指数与水合物饱和度在双对数坐标系下存在非线性关系。Lee 等^[10]测量了含四氢呋喃水合物的砂、泥沙和黏土的电阻率,结果表明电阻率显著反映含水合物饱和度的变化,但是会受到微观分布模式等其他因素的影响。陈玉凤等^[11]测量了南海沉积物内甲烷水合物形成过程中的电阻率并利用阿尔奇公式建立电阻率与含水合物饱和度之间的关系,结果表明饱和度指数随含水合物饱和度变化而变化。上述研究显示由于受到沉积物的组分、水合物微观分布模式、孔隙水矿化度等因素的影响,基于电阻率数据并利用阿尔奇公式进行含水合物饱和度计算时遇到挑战。

含水合物沉积物电学性质较为复杂且影响因素众多,单一频率条件下测试得到的电阻率数据信息量有限,忽略了被测介质的电容性和频散特性。交流阻抗法测试频率范围宽,能够获得被测介质的阻抗值,因此有望更加全面地刻画含水合物沉积物的电学特性^[12-13]。邢兰昌等^[12]测试了四氢呋喃 (THF) 水合物的生成和分解过程的阻抗谱,在建立阻抗谱等效电路模型的基础上分析了电路元件参数的变化规律。金学彬等^[14]对含甲烷水合物的天然海沙进行了阻抗谱测试,结果表明特定测试频率下的阻抗幅值与含水合物饱和度之间呈现近似线性关系。针对冻土区天然气水合物储层的特点,李栋梁等^[15]利用模拟混合气合成含水合物砂岩样品,在 1~200 kHz 频率范围内测试了样品的电阻和电容,分别讨论了水合物形成对岩芯电阻率和介电常数的影响规律。王彩程等^[16]在对含甲烷水合物的天然海砂体系进行阻抗谱测试的基础上探讨了含水合物饱和度对复电阻率频散特性的影响规律,建立了描述该复杂体系的复电阻率模型,利用该模型可以求解含水合物饱和度,但是模型的数值求解算法需要进一步研究。

本文利用自主设计开发的水合物电学参数测量装置在宽频率范围 (5 Hz~400 kHz) 内对含四氢呋喃 (THF) 水合物海沙体系进行了实验测试,分析了含水合物模拟沉积物宽频阻抗特性,并建立了基于宽频阻抗幅值和阿尔奇公式的含水合物饱和度实用计算模型,为沉积物中含水合物饱和度的评价提供了新的测试与计算方法。

1 实验装置与测量

1.1 实验装置

四氢呋喃 (THF) 在常压下呈液态,可与水以任意比例互溶,在常压下 4.4 °C 时即可生成与天然气水合物性质相似的水合物,无需高压装置,实验相对简单安全^[17],因此本文以 THF 水合物为研究对象开展模拟实验与测试。所采用的实验装置为自主设计开发的 THF 水合物电学参数测量装置^[18],其结构如图 1 所示。该测量装置主要由反应釜、低温箱、电学测量系统、温度测量系统和工控机及测控软件组成。

反应釜的材料为聚四氟乙烯,具有良好的耐腐蚀性。电学传感器为 4 个电极,均匀分布在反应釜四周;测温元件为 Pt100 热电阻,其测温精度为 A 级,通过反应釜盖插入反应釜内。采用 PCI-1721 信号发生卡输出 5~500 kHz 的正弦波来激励电学传感器;PCI-1714 数据采集卡用于采集阻抗测量电路的电压信号;PXI-632 低压多路切换开关用于电学传感器工作模式的切换。热电阻温度变送器输出标准的 4~20 mA 电流信号,进一步转换为 1~5 V 的电压信号后由 PCI-1714 数据采集卡采集。工控机及测控软件实现对整个装置的控制、对数据进行处理与显示。

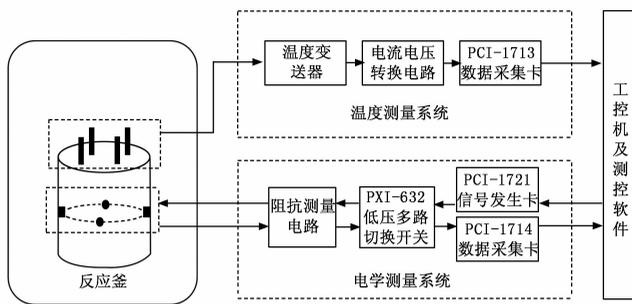


图 1 实验装置总体结构

1.2 传感器工作模式

电极在反应釜壁上的分布如图 2 所示,其工作模式设定如下:

- 1) 将 1 号电极依次与 2 号、3 号和 4 号电极形成工作电极对,测量各电极对间的阻抗值。
- 2) 将 2 号电极依次与 1 号、3 号和 4 号电极形成工作电极对,测量各电极对间的阻抗值。
- 3) 将 3 号电极依次与 1 号、2 号和 4 号电极形成工作电极对,测量各电极对间的阻抗值。
- 4) 将 4 号电极依次与 1 号、2 号和 3 号电极形成工作电极对,测量各电极对间的阻抗值。
- 5) 设置激励信号的频率为 21 个频率点: 5 Hz、6 Hz、10 Hz、20 Hz、40 Hz、60 Hz、100 Hz、200 Hz、400 Hz、600 Hz、1 kHz、2 kHz、4 kHz、6 kHz、10 kHz、20 kHz、40 kHz、60 kHz、100 kHz、200 kHz、400 kHz。

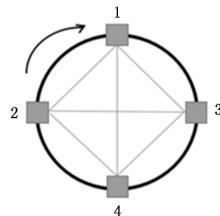


图 2 电学传感器工作模式图

1.3 实验步骤

- 1) 对天然海沙进行筛选、漂洗、烘干,然后称取 650 mL 的 60~80 目的海沙装入反应釜内待用。
- 2) 按照实验所需 THF 水合物饱和度分别计算 THF 和

蒸馏水的质量，按照质量分数 1% 计算所需 NaCl 的质量。

3) 用电子天平分别称取蒸馏水、THF 和 NaCl，并将三者混合搅拌，使其充分互溶。

4) 将搅拌均匀的混合溶液缓慢倒入反应釜内，并用玻璃棒搅拌，使溶液充分填满孔隙，然后静置反应釜 24 小时。

5) 待反应釜静置完毕后，将反应釜放入低温箱，设定温度为 $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，开启测控软件，对 THF 水合物的降温生成过程进行测试。

6) THF 水合物完全生成后，关闭恒温箱，对 THF 水合物的升温分解过程进行测试。

2 含水合物模拟沉积物宽频阻抗特性

2.1 THF 水合物饱和度计算

实验中在保证 THF 水合物完全生成的条件下，海沙中含水合物饱和度可以通过 THF 与蒸馏水的配比来计算^[19]。已知 THF 水合物的分子式为 $8\text{C}_4\text{H}_8\text{O} \cdot 136\text{H}_2\text{O}$ ，即每生成 1 mol 的 THF 水合物，需要消耗 1 mol 的 THF 和 17 mol 的 H_2O 。设初始状态下水和 THF 的体积分别为 V_w 和 V_{THF} ，水和 THF 的密度分别为 $\rho_w = 1\text{ g/cm}^3$ 和 $\rho_{\text{THF}} = 0.888\text{ g/cm}^3$ ，水和 THF 的摩尔质量分别为 $M_w = 18\text{ g/mol}$ 和 $M_{\text{THF}} = 72.11\text{ g/mol}$ ，海沙中 THF 水合物饱和度为 S_h ，则 THF 水合物完全生成后其物质的量 n_{THF} 为（海沙孔隙中存在剩余水）：

$$n_{\text{THF}} = \frac{\rho_{\text{THF}} V_{\text{THF}}}{M_{\text{THF}}} \quad (1)$$

剩余水的饱和度为：

$$S_{\text{余}} = \frac{\left(\frac{\rho_w V_w}{M_w} - 17 \times n_{\text{THF}}\right) \cdot M_w / \rho_w}{V_w + V_{\text{THF}}} \quad (2)$$

化简后得到 THF 水合物饱和度计算公式：

$$S_h = \frac{4.7683 V_{\text{THF}}}{V_w + V_{\text{THF}}} \times 100\% \quad (3)$$

2.2 水合物生成分解过程的阻抗变化特性

图 3 为 THF 水合物饱和度为 60% 时，其生成分解过程中电极之间的阻抗幅值和温度随实验进程的推进而变化的曲线，结合温度变化曲线可以将整个实验过程划分为 7 个阶段。

第一阶段为降温水合物未生成阶段（0~10 h），反应釜内模拟沉积物的温度从 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降低至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，400 Hz 频率下的阻抗幅值从 $300\ \Omega$ 增大到 $450\ \Omega$ 。温度下降降低了孔隙溶液中导电离子的活性，导电离子在外加电场作用下定向迁移速度降低，则被测介质阻抗幅值呈现增大的趋势。

第二阶段为水合物生成初期阶段（10~14 h），此阶段内水合物开始生成，模拟沉积物温度从 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高至 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ （放热效应），400 Hz 频率下的阻抗幅值从 $450\ \Omega$ 减小到 $440\ \Omega$ 。当温度减低到相平衡温度以下并持续一段时间后，THF 水合物会在孔隙中逐渐生成，消耗孔隙水使得孔隙水

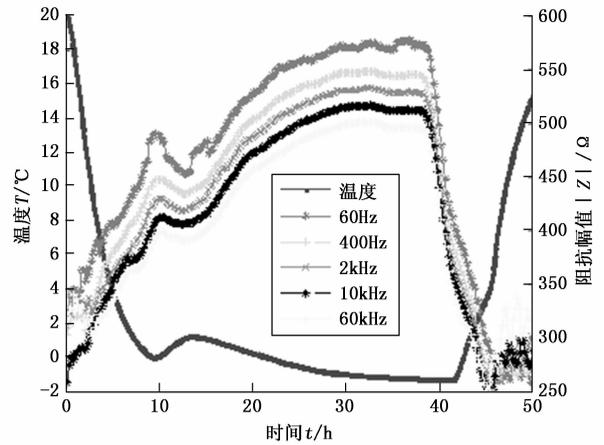


图 3 水合物生成分解过程阻抗幅值和温度变化曲线

中的离子浓度增大（排盐效应），导致被测介质的阻抗幅值减小。

第三阶段为水合物持续生成阶段（14~25 h），此阶段内水合物持续生成至所有的 THF 转化为水合物，400 Hz 频率下的阻抗幅值从 $440\ \Omega$ 增大到 $530\ \Omega$ 。随着 THF 水合物生成量的增加，水合物对孔隙的堵塞作用增强，被测介质的阻抗幅值增大。

第四阶段为温度稳定阶段（25~39 h），模拟沉积物温度逐渐降低至 $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ （设定温度）并稳定，400 Hz 频率下的阻抗幅值从 $530\ \Omega$ 增大到 $550\ \Omega$ 。水合物完全生成后，温度的降低导致阻抗幅值略有增大。

第五阶段为升温水合物未分解阶段（39~44 h），模拟沉积物温度从 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高至 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ （低于相平衡温度），水合物尚未分解，此阶段 400 Hz 频率下的阻抗幅值从 $550\ \Omega$ 减小到 $350\ \Omega$ 。温度的升高提高了孔隙溶液中导电离子的活性，导电离子在外加电场作用下定向迁移速度增大，则被测介质的阻抗幅值减小。

第六阶段为水合物分解阶段（44~46 h），模拟沉积物温度从 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高至 $4\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ （高于相平衡温度），THF 水合物开始分解，此阶段 400 Hz 频率下的阻抗幅值从 $350\ \Omega$ 减小到 $250\ \Omega$ 。随着水合物的分解，其水合物对孔隙的堵塞作用减弱，阻抗幅值减小。

第七阶段为持续升温阶段（46~50 h），此阶段内，模拟沉积物的温度从 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高至 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，被测介质阻抗幅值主要受温度影响，400 Hz 频率下的阻抗幅值从 $270\ \Omega$ 减小到 $250\ \Omega$ 。

图 4 给出了测试频率为 60 Hz 时通过 3 组电极对得到的阻抗幅值随时间变化的曲线。由图可知，在水合物生成分解过程中，3 组阻抗幅值的变化趋势一致，而且量值接近，其中 3 者最大差值为 $25\ \Omega$ ，占该时刻平均幅值的 4.5%。由于 THF 溶液与水可以任意比例互溶，即配置的混合溶液组分均匀，且填沙过程中注意将溶液均匀饱和于海沙孔隙中，所以在水合物生成分解过程中反应釜内水合物空间分布较为均匀，不同位置处的含水合物饱和度接近。

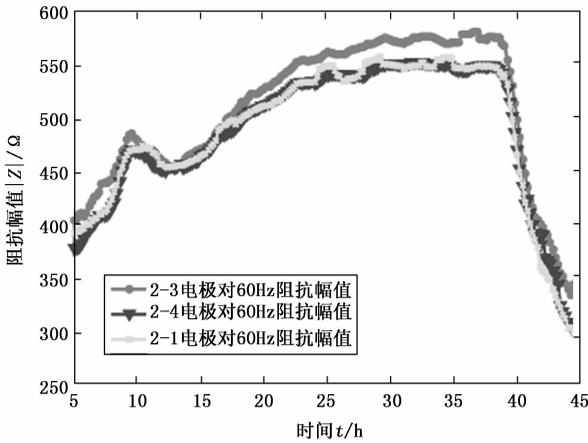


图 4 不同电极对的阻抗幅值曲线

2.3 阻抗频散特性与水合物饱和度的关系

图 5 为在 5 Hz~400 kHz 频率范围内 THF 水合物饱和度不同时模拟沉积物阻抗幅值随频率变化的曲线。由图可知: 阻抗幅值随着测试频率的增大而减小。分析原因如下: 1) 在外加电场作用下, 多孔介质孔隙流体中原来达到平衡状态的离子会重新分布在孔隙壁的表面, 阳离子顺着电场方向移动, 阴离子逆着电场方向运动, 同时孔隙壁也会感生出束缚电荷, 使得孔隙流体中的导电离子堆积在孔隙壁上, 孔隙壁与流体界面产生界面极化效应^[20], 频率越低容抗越大; 2) 随着测试频率的增大, 界面极化效应逐渐减弱, 孔隙壁对孔隙流体中导电离子的束缚能力变弱, 容抗减小继而导致阻抗幅值减小。

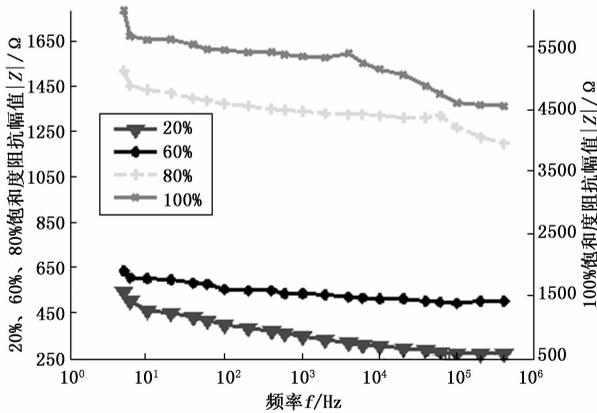


图 5 含水合物模拟沉积物阻抗幅值频散曲线

为了定量分析含水合物饱和度对阻抗幅值频散特性的影响, 将 0.1 kHz 和 10 kHz 的阻抗幅值分别记为低频和高频频幅值 (实际计算时, 高频点与低频点可适当选取), 按照式 (4) 计算不同饱和度阻抗幅值的频散度^[16,21]。

$$|Z|_{PFE} = \frac{|Z|_L - |Z|_H}{|Z|_L} \times 100\% \quad (4)$$

式中, $|Z|_{PFE}$ 为阻抗幅值频散度; $|Z|_L$ 为低频阻抗幅值; $|Z|_H$ 为高频阻抗幅值。

图 6 所示为阻抗幅值频散度与含水合物饱和度的关系

图。由图可知, 在实验条件下阻抗幅值频散度随着含水合物饱和度的增大而逐渐减小, 而且两者呈现出近似线性关系, 因而可以将频散度作为特征参数来估算含水合物饱和度的大小, 其表达式为:

$$|Z|_{PFE} = -0.35S_h + 0.43 \quad (5)$$

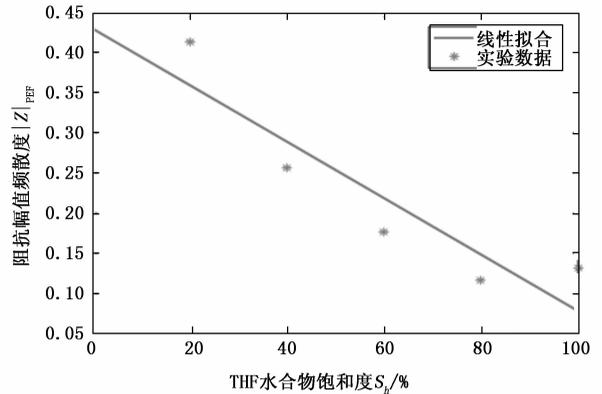


图 6 阻抗幅值频散度与含水合物饱和度关系曲线

3 基于阿尔奇公式的含水合物饱和度模型

通过上述分析可知, 模拟沉积物的阻抗幅值与含水合物饱和度之间存在密切的关系, 并且受到频率的影响, 因此考虑建立不同频率下阻抗幅值与含水合物饱和度之间的定量关系模型, 即含水合物饱和度计算模型。

阿尔奇公式描述了多孔介质电阻率、孔隙度与含水饱和度之间的关系, 可以表示为以下两个表达式^[22]:

$$F = \frac{R_o}{R_w} = \frac{a}{\phi^m} \quad (6)$$

式中, F 为地层因子, R_o 为饱和水多孔介质电阻率, R_w 为孔隙水电阻率, ϕ 为多孔介质的孔隙度, a 为岩性系数, m 为胶结指数。

$$I = \frac{R_t}{R_o} = \frac{b}{S_w^n} \quad (7)$$

式中, I 为电阻率增大指数, R_t 为含水多孔介质的电阻率, S_w 为含水饱和度, b 为岩性系数, n 为饱和度指数。

本文模拟沉积物孔隙中只存在水和 THF 水合物, 因此在计算得到含水饱和度后即可得到含水合物饱和度, 即 $S_h = 1 - S_w$ 。上述公式中参数 a 、 b 、 m 、 n 的取值会影响水合物饱和度的计算结果, 因而确定参数的合理取值是利用阿尔奇公式准确计算水合物饱和度的关键。当沉积物中不含泥质成分时, a 值通常取值为 1^[23]。

在已知模拟沉积物的孔隙度 ϕ 的条件下, 为了确定胶结指数 m 的值, 需要测量模拟沉积物完全水饱和时的阻抗幅值 $|Z_o|$ 和孔隙水的阻抗幅值 $|Z_w|$, 并分别代替式 (6) 中的 R_o 和 R_w , 进而计算得到地层因子 F , 最终求解出 m 。

图 8 给出了测试频率范围内胶结指数 m 的值。考虑到 m 与储层物性、孔隙结构等有关, 因此利用图 8 选择合适的频率范围使得 m 为一稳定值, 即在测试频率 200~

200 kHz时, m 较为稳定, 其平均值为 1.35。

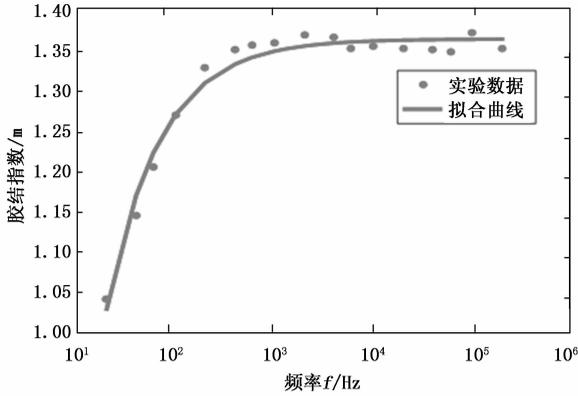


图 7 胶结指数 m 与频率 f 的关系曲线

为了求解岩性系数 b 和饱和度指数 n , 将式 (6) 与式 (7) 联立, 并用模拟沉积物阻抗幅值 $|Z_t|$ 代替 R_t , 得到变形后的阿尔奇公式:

$$\frac{|Z_t|}{|Z_w|} = \frac{ab}{\varphi^m S_w^n} \quad (8)$$

对式 (8) 两边同时取对数, 并将 $a=1$ 、 $m=1.35$ 和 $\varphi=0.4$ 代入, 得到式 (9):

$$\lg\left(\frac{|Z_t|}{|Z_w|}\right) = -n \lg(S_w) - 1.35 \lg(0.4) + \lg(b) \quad (9)$$

利用不同测试频率下的实验数据对式 (9) 进行线性拟合则可得到岩性指数 b 和饱和度指数 n 。

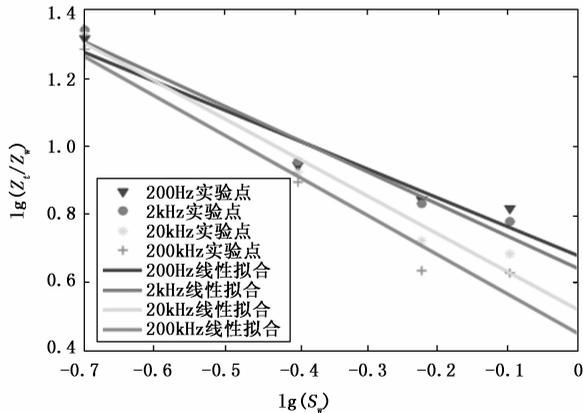


图 8 不同测试频率下实验数据的线性拟合

由图 8 可知: 不同频率拟合出的直线截距差别不显著, 考虑到岩性系数 b 由多孔介质自身的物理性质所决定, 所以将各个截距值取平均作为 b 的取值, 即 $b=1.13$; 当测试频率不同时拟合直线的斜率不同, 说明饱和度指数 n 受到频率的影响, 因此将 n 与 $\lg(f)$ 进行线性拟合 (如图 9 所示), 表达式如下:

$$n = 0.12 \lg(f) + 0.57 \quad (10)$$

在确定了阿尔奇公式中 4 个参数 a 、 b 、 m 、 n 后, 即可得到基于阻抗幅值和频率的含水合物饱和度计算模型:

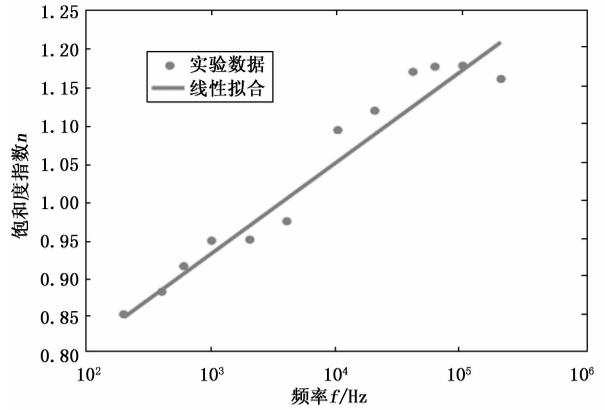


图 9 饱和度指数 n 与 $\lg(f)$ 的线性拟合

$$S_h = 1 - \left(\frac{1.13 |Z_w|}{|Z_t| \varphi^{1.35}} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (11)$$

式中, f 为测试频率, 其范围为 200 Hz~200 kHz。

4 结束语

以自主设计开发的水合物电学参数测量装置为基础, 首先建立了四氢呋喃水合物模拟实验的步骤与宽频电阻抗测试方法, 然后在频率范围 5 Hz~400 kHz 内测试了不同饱和度条件下的含水合物海沙体系的宽频阻抗。基于测试数据分析了水合物生成分解过程中模拟沉积物的宽频阻抗特性、不同含水合物饱和度条件下的阻抗幅值频散特性及其与饱和度之间的定量关系, 最后建立了基于宽频阻抗幅值和阿尔奇公式的含水合物饱和度计算模型。通过研究得到以下结论:

1) 含水合物天然海沙体系的阻抗幅值呈现出频散特性, 在频率 5 Hz~400 kHz 范围内该频散特性受到孔隙壁与孔隙流体之间界面极化效应的影响, 阻抗幅值频散度与含水合物饱和度之间呈现近似线性关系。

2) 在测试频率 200~200 kHz 时, 阿尔奇公式中的胶结指数 m 较为稳定, 因此限定了所建立模型的频率应用范围; 饱和度指数与测试频率的对数之间呈现出近似线性的关系, 因此在含水合物饱和度计算模型中应加入测试频率这一参数。

本文的研究为沉积物中含水合物饱和度的评价提供了新的测试与计算方法, 所提出的含水合物饱和度计算模型适用于较宽频率范围的阻抗幅值, 从而扩展了阿尔奇公式的应用范围。实际应用中, 可同时测量多个测试频率的阻抗幅值并应用所提出的模型对含水合物饱和度进行计算, 综合多个计算结果进而获得更加可靠的饱和度评价。此外, 还可将上述模型与声学测试数据/声学模型相联合^[24], 建立电声联合模型, 如阿尔奇公式与权重方程联合, 综合电声测试数据以期获得更加可靠的储层含水合物饱和度评价结果。

参考文献:

[1] Makogon Y F. Natural gas hydrates - A promising source of en-

- ergy [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2010, 2 (1): 49-59.
- [2] 杨胜雄, 梁金强, 刘昌岭, 等. 海域天然气水合物资源勘查工程进展 [J]. *中国地质调查*, 2017, 4 (2): 1-8.
- [3] Chong Z R, Yang S H B, Babu P, et al. Review of natural gas hydrates as an energy resource: Prospects and challenges [J]. *Applied Energy*, 2015, 162: 1633-1652.
- [4] 周守为, 李清平, 吕鑫, 等. 天然气水合物开发研究方向的思考与建议 [J]. *中国海上油气*, 2019, 31 (4): 1-8.
- [5] 吴时国, 王吉亮. 南海神狐海域天然气水合物试采成功后的思考 [J]. *科学通报*, 2018, 63 (1): 2-8.
- [6] 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.
- [7] 赵军, 武延亮, 周灿灿, 等. 天然气水合物的测井评价方法综述 [J]. *测井技术*, 2016, 40 (4): 392-398.
- [8] 宁伏龙, 刘力, 李实, 等. 天然气水合物储层测井评价及其影响因素 [J]. *石油学报*, 2013, 34 (3): 591-606.
- [9] Spangenberg E, Kulenkampff J, Naumann R, et al. Pore space hydrate formation in a glass bead sample from methane dissolved in water [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32 (24): 1-4.
- [10] 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, 115 (B11): 226-234.
- [11] 陈玉凤, 李栋梁, 梁德青, 等. 南海沉积物天然气水合物饱和度与电阻率的关系 [J]. *石油学报*, 2013, 34 (3): 507-512.
- [12] 邢兰昌, 陈强, 刘昌岭. 基于电化学阻抗谱测试方法研究四氢呋喃水合物的生成和分解过程 [J]. *岩矿测试*, 2015, 34 (6): 704-711.
- [13] 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 (6): 124-129.
- [14] 金学彬, 陈强, 邢兰昌, 等. 多孔介质中甲烷水合物聚散过程的交流阻抗谱响应特征 [J]. *天然气工业*, 2016, 36 (3): 120-127.
- [15] 李栋梁, 卢静生, 梁德青. 祁连山冻土区天然气水合物形成对岩芯电阻率及介电常数的影响 [J]. *新能源进展*, 2016, 4 (3): 179-183.
- [16] 王彩程, 邢兰昌, 陈强, 等. 含甲烷水合物多孔介质的复电阻率频散特性与模型 [J]. *科学技术与工程*, 2017, 17 (18): 46-54.
- [17] Iida T, Mori H, Mochizuki T, et al. Formation and dissociation of clathrate hydrate in stoichiometric tetrahydrofuran-water mixture subjected to one dimensional cooling or heating [J]. *Chemical Engineering Science*, 2001, 56 (16): 4747-4758.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 肖占山, 徐世浙, 罗延钟, 等. 岩石复电阻率频散特性的机理研究 [J]. *浙江大学学报 (理学版)*, 2006 (5): 584-587.
- [21] 童茂松, 李莉, 王伟男, 等. 泥质砂岩的复电阻率实验研究 [J]. *测井技术*, 2005 (3): 188-190, 283.
- [22] Archie G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics [J]. *Transactions of the AIME*, 1942, 146 (1): 54-62.
- [23] 邹良志. 阿尔奇公式中参数的影响因素分析 [J]. *国外测井技术*, 2013 (4): 23-27, 3.
- [24] 邢兰昌, 祁雨, 朱泰, 等. 含甲烷水合物沉积物电-声响应特性联合探测: 装置开发与实验研究 [J]. *新能源进展*, 2018, 6 (2): 119-129.
- US A : IEEE Computer Society, 1995: 240-249.
- [4] Livani M, Kaiser J. EDF consensus on CAN bus access for dynamic real-time applications [A]. *Proceedings of the 6th International Workshop on Parallel and Distributed Real-Time Systems (WPDRTS' 98)* [C]. Orlando, Florida, USA, 1998.
- [5] 谌介人, 彭军, 吴敏, 等. CAN 总线中 EDF 调度算法的研究与改进 [J]. *计算机测量与控制*, 2008, 16 (11): 1678-1681.
- [6] 袁睿, 檀明, 周晶晶. EDF 调度算法可调度性分析方法的改进研究 [J]. *计算机应用研究*, 2013, 30 (8): 2429-2431.
- [7] Liu C L, Layland J W. Scheduling algorithms for multiprogramming in a Hard real-time environment [J]. *Journal of the ACM*, 1973, 20 (1): 40-61.
- [8] 胡京津. 汽车 CAN 网络系统动态调度机制的研究与实现 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.
- [9] SAE (1993). *Class C Application Requirement Considerations* [Z]. SAE J2056/1.

(上接第 241 页)

使用时消息可调度的判定条件。实验证明了本文的双幂函数分区调度算法对消息的截止周期进行合理的分配, 从而克服了传统 EDF 算法在调度方面的不足, 优化了消息的最坏响应时间, 提高系统实时性, 对于 EDF 调度算法在实际中更好的应用于 CAN 总线通信优化中起着指导作用。

参考文献:

- [1] 张凤登. 现场总线技术与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [2] Tindell K W, Burns A, Wellings A J. Calculating controller area network (CAN) message response times [J]. *Control Engineering Practice*, 1995, 3 (8): 1163-1169.
- [3] Zuberi K M, Shin K G. Non-preemptive scheduling of messages on controller area network for real-time control applications [A]. *Proceedings of the 1st IEEE Real-Time Technology and Applications Symposium (RTAS' 95)* [C]. Chicago, IL,