



胡昊,柯式镇,贺秋利,等. 2026. 人造泥饼介电频谱实验及频散模型研究. 地球物理学进展, 41 (1): 0267-0276, doi:10.6038/pg2026JJ0059.
HU Hao, KE ShiZhen, HE QiuLi, *et al.* 2026. Experimental study on dielectric spectra of artificial mud cakes and research on dielectric dispersion models. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41 (1): 0267-0276, doi:10.6038/pg2026JJ0059.

人造泥饼介电频谱实验及频散模型研究

Experimental study on dielectric spectra of artificial mud cakes and research on dielectric dispersion models

胡昊^{1,2}, 柯式镇^{1,2*}, 贺秋利³, 石洪玮^{1,2}, 张宇航^{1,2}, 罗虎^{1,2}

HU Hao^{1,2}, KE ShiZhen^{1,2*}, HE QiuLi³, SHI HongWei^{1,2}, ZHANG YuHang^{1,2}, LUO Hu^{1,2}

1. 中国石油大学(北京)地球物理学院, 北京 102249

2. 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249

3. 中国石油集团测井有限公司, 西安 710077

1. *School of Geophysics, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China*

2. *State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China*

3. *China National Logging Corporation, Xi'an 710077, China*

摘要 在非常规油气资源的勘探开发中,扫频介电测井技术在识别稠油层、薄互层上具有巨大潜力。然而,当井眼内存在泥饼时,受限于较浅的探测深度,探测结果易受泥饼影响。研究泥饼的介电特性,是实现介电测井泥饼影响校正的基础。本研究通过测量具有不同电学特性的人造泥饼的介电频谱,揭示了泥饼的电学特性规律与影响因素,并首次建立了一种泥饼介电频散模型。实验采用自制压滤装置模拟泥浆失水过程制备泥饼,运用终端开路同轴反射法进行介电频谱测量,分别讨论了矿化度、黏土矿物含量和黏土矿物类型对泥饼电学性质的影响。实验结果表明,在低频段,泥饼的介电常数随蒙脱石占比、黏土矿物含量和矿化度的增加而增大。其中,与矿化度呈线性正相关,与黏土矿物含量呈二次函数递增关系。在高频段,介电常数随黏土矿物含量的增加而增大,而受黏土矿物类型和矿化度的影响较小。最后,基于SHSD模型,建立了适用于描述泥饼介电特性的频散模型,显著提高了低频段泥饼介电常数的预测准确性。研究成果可为扫频介电测井技术的环境校正及正反演研究提供理论模型与实验依据。

Abstract Dielectric logging technology is limited by its shallow probe depth, and the influence of mud cake cannot be ignored. By measuring the dielectric spectrum of 25 artificial mud cakes with different electrical properties, the electrical characteristics and dielectric dispersion model of mud cakes are revealed in this paper. The mud cake was prepared by mixing barite, bentonite, kaolin, sodium chloride and water, and the effect of salinity, clay mineral content and clay mineral type on the electrical properties of the mud cake was studied and discussed by using the terminal open-circuit coaxial reflection method. The experimental results show that in the low frequency band, the dielectric constant of mud cake increases with the increase of montmorillonite proportion, the increase with the increase of clay mineral content and salinity, and the relationship with salinity is linear positive, and the relationship with clay mineral content is more complex, showing a quadratic function increase. In the high frequency band, the dielectric constant increases with the increase of clay mineral content, and is less affected by clay mineral type and salinity. The modified Shaly

收稿日期 2025-04-30; 修回日期 2025-09-18.

投稿网址 <http://www.progeophysics.cn>

基金项目 国家自然科学基金“基于格子玻尔兹曼法的岩石电频散模型及微观机理研究”(42074126)和安徽省高校自然科学研究一般项目(KJ2021B02)联合资助。

第一作者简介 胡昊,男,1998年生,博士研究生,主要从事电法岩石物理方向研究. E-mail:huhao_cup@163.com

*** 通讯作者** 柯式镇,男,1967年生,博士,教授,主要从事岩石电学性质、测井方法及仪器的实验研究工作. E-mail:wksz@cup.edu.cn

关键词 人造泥饼;介电频谱;介电频散模型;同轴反射法;岩石物理

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi:10. 6038/pg2026JJ0059

CSTR:32085.14.pg2026JJ0059

Sand model (SHSD) dielectric dispersion model can effectively describe this law. The results of this study provide basic data and theoretical basis for environmental correction and forward and inverse research of sweep frequency dielectric logging data.

Keywords Artificial mud cake; Dielectric spectrum; Dispersion model; Coaxial line reflection method; Petrophysics

0 引言

介电测井技术与核磁共振测井技术、元素俘获能谱技术统称为“新三组合”测井技术,该技术利用地层中水与其他物质介电常数的巨大差异,通过测量地层介电常数,获取地层孔隙水体积及其他相关信息,在非常规油气藏的勘探开发中具有巨大的应用前景(郭向东等, 2022). 与电阻率测井相比,介电测井具有不受地层水矿化度影响、识别薄层能力强的优点,因此更适用于非常规复杂油气藏的测井中(刘海洋等, 2023). 该技术在碳酸盐岩中获取胶结指数(赖强等, 2015),页岩中估算饱和度和薄层分析(Tathed *et al.*, 2018),以及稠油油藏中评价剩余油饱和度(Han and Misra, 2021)等方面均取得了成功应用. 目前,最具代表性的仪器为斯伦贝谢公司推出的扫频介电测井仪 ADT(Array Dielectric Tool),该仪器采用贴井壁的测量方式,探测深度约 1 至 4 英寸(Hizem *et al.*, 2008, 梁忠奎等, 2015). 当介电测井仪器贴近井壁测量时,泥饼会直接与仪器的测量探头接触,其自身的介电特性会干扰仪器对地层真实介电信息的准确测量,因此,必须对泥饼的影响进行校正.

泥饼校正是介电测井过程的重点和难点,需要通过数值模拟进行大量正演计算,制作相应的校正图版. 肖飞等(2014)使用球面波模型和平面波模型,讨论了介电响应关于频率和收发距的规律,并假设泥饼的介电常数为 20. 刘晨昱(2023)从泥饼厚度、泥饼介电常数、电导率、地层相对介电常数、地层电导率和收发距六个维度出发,研究了泥饼对介电测井的响应影响,设置泥饼的介电常数范围为 10 ~ 50. 李郴等(2024)基于等效磁偶极子模型,建立了考虑泥饼的层状地层模型,分析了探头几何工程参数对转换图版的影响. 尽管已有大量数值模拟研究针对含泥饼井眼展开,但由于缺乏泥饼介电特性的实验研究,模拟中通常假定泥饼的介电常数在测井频率范围内保持固定. 这种假设虽然简化了模拟过

程,但也引入了显著误差. 事实上,泥饼介电常数在实际地层中受多种因素影响,如成分、测量频率、矿化度等,为校正泥饼对介电测井过程的影响,需要深入探讨泥饼的介电特性.

近年来,已有多名学者在实验条件下对泥饼的性质展开研究. 曹广胜等(2023)对废弃泥浆脱出的泥饼进行成分分析,结果表明泥饼内主要固相颗粒为黏土矿物、石英、方解石. 顾军等(2019)使用仿地井筒模拟井壁泥饼,并通过 XRD(X-ray Diffraction)分析发现泥饼主要成分包括黏土矿物、岩屑与重晶石. 王平全等(2017)利用高温高压滤失仪,基于致密堆积理论制备了页岩地层低渗泥饼,并对其滤失造壁性能进行评价. 深入研究泥饼的介电特性,明确其对介电测井的影响程度和规律,是实现介电测井数据准确解释与地层精确评价的关键前提. 然而,当前泥饼实验研究主要集中在制备流程与评价滤失造壁性能,对其电学性质的研究相对匮乏,泥饼的介电特性与影响因素尚未明确(段云星和杨浩, 2021).

因此,本文在实验室的环境下,开展对泥饼介电特性的实验研究,以获取其介电频散规律和影响因素. 通过对 25 块泥饼介电频谱的测量与介电特性的研究,分析泥饼中黏土类型、矿化度、黏土矿物含量等因素对复介电常数的关系. 在对泥质砂岩介电频散模型(SHSD)进行修改后,利用粒子群优化算法对其中各参数进行拟合,成功将其运用在描述泥饼的介电频散特性上,进而建立了泥饼介电频散模型. 经验证,该模型考虑了泥饼的介电频散现象,能够准确捕捉测井频段内泥饼的介电特性. 综上所述,本文为扫频介电测井的正反演研究与泥饼校正提供了泥饼模型与丰富的数据支持,具有重要的理论与实际应用价值.

1 理论和实验方法

1.1 复介电常数频散机理

由安培-麦克斯韦定律可知,磁场由两种不同类型的电流产生,称为位移电流和传导电流,频率形式

的麦克斯韦方程可写为:

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J} - i\omega \boldsymbol{D},$$

(1)

式中, $\boldsymbol{H}$ 为磁场强度, $\boldsymbol{J}$ 为电流密度, $\boldsymbol{D}$ 为电位移矢量, ω 为角频率, $i^2 = -1$. 电流密度 $\boldsymbol{J}$ 还与电场强度 $\boldsymbol{E}$ 与介质的直流电导率 σ_{DC} 有关,即微观欧姆定律:

$$\boldsymbol{J} = \sigma_{\text{DC}} \boldsymbol{E},$$

(2)

电位移矢量与介电常数的本构关系为:

$$\boldsymbol{D} = \varepsilon \boldsymbol{E},$$

(3)

式中, ε 为介电常数,当介质中的电场携带的能量没有损耗时,相对介电常数是实数. 相反,当存在损耗能量时,介质的相对介电常数是一个与频率有关的复数,写为:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) + i\varepsilon''(\omega),$$

(4)

此时式(1)可以表示为:

$$\begin{aligned} \nabla \times \boldsymbol{H} &= -i\omega\varepsilon_0\left(\varepsilon'(\omega) + i\varepsilon''(\omega) + i\frac{\sigma_{\text{DC}}}{\omega\varepsilon_0}\right)\boldsymbol{E} \\ &= -i\omega\varepsilon_0\varepsilon^*(\omega)\boldsymbol{E}, \end{aligned}$$

(5)

式中, ε_0 为真空介电常量. 由此可知,复相对介电常数 $\varepsilon^*(\omega)$ 的虚部包括介电损耗和直流电导率两种类型的贡献,实部则对应介电常数本身. 完全描述介质对入射电场响应的物理量总是作为一对(介电常数、电导率)出现,在其他电测井方法中,由于频率很低,绝大部分情况下可以忽略介电常数的影响(陈爱新, 2006). 对于介电测井,测量频率在 20 MHz 至 1 GHz 之间,则需要重点关注物质的介电特性.

物质的介电特性由其极化性质所决定,在外加电场的作用下,物质内部的束缚电荷发生定向排列

或扭曲变形,形成电偶极矩,这些极化性质强烈依赖于外加电磁场的频率(许巍等, 2022). 在泥饼中,按照弛豫频率由低到高的顺序,依次存在以下四种极化现象:黏土表面的双电层极化、孔隙空间内的界面极化、水分子的转向极化以及广泛存在的电子极化. 这四种极化现象均对泥饼的介电常数产生贡献,且每种极化现象分别对应着不同类型的粒子,具体如图 1 所示. 随着外加电场频率增加,弛豫频率较低的极化过程逐渐无法与电磁场的变化频率保持同步,导致这些极化现象的强度逐渐减弱,在宏观层面,这一现象表现为介电常数的降低,造成介电频散现象. 介电常数下降速率最快处与虚部峰值位于同一频率,该频率即为弛豫频率,大多数极化类型在弛豫频率附近会使介电常数呈现平滑下降的态势.

介电常数的虚部同样会表现出频散的现象,由式(5)可知,虚部中的电导率项会随频率的增加而快速下降. 同时,在弛豫频率附近,粒子之间的摩擦加剧,产生电场能量的额外损失,使介电损耗增加. 电导率项和介电损耗项共同作用,造成了介电常数虚部的频散现象.

1.2 介电常数测量系统

实验采用终端开路同轴反射法进行介电测量,该方法适用于岩芯尺度的宽频介电精确测量(张天华等, 2012). 实验测量系统由上位机、阻抗分析仪(Agilent E4991B)以及探头套件(Keysight N1501A)组成,如图 2 所示. 上位机负责发送控制指令,并将

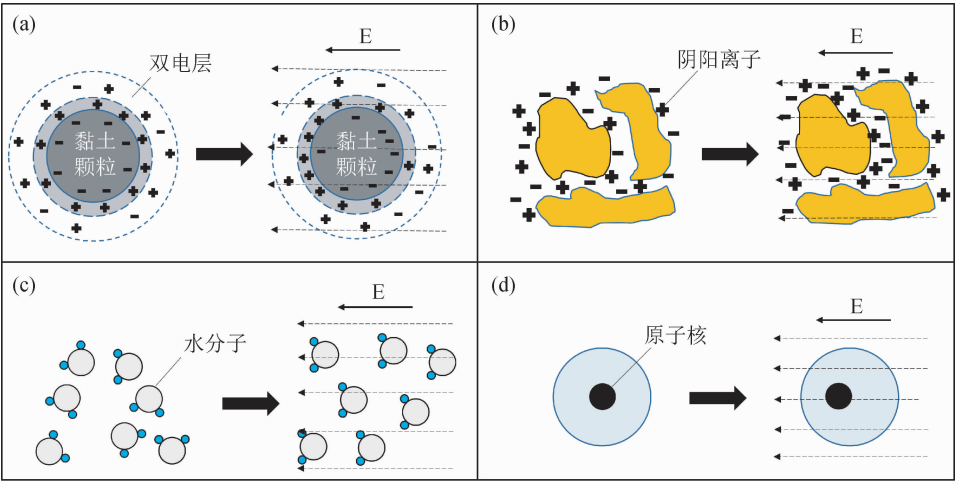


图 1 四种极化现象示意图

(a) 电子极化;(b) 转向极化;(c) 界面极化;(d) 双电层极化.

Fig. 1 Schematic diagrams of four types of polarization phenomena

(a) Electronic polarization;(b) Orientation polarization;(c) Interfacial polarization;(d) Double-layer polarization.

幅值相角转换为介电常数. 测量金属同轴探头具有法兰结构, 由金属-玻璃-金属组成, 不锈钢材质的金属内芯被玻璃包裹, 最外层为铬镍铁合金, 探头底端通过柔性同轴线与阻抗分析仪相连. 阻抗分析仪的工作频段选择为 10 MHz ~ 3 GHz. 介电常数频散现象主要在低频段测量时发生, 因此, 在测量复介电常数时, 采用对数频率间隔取样. 以充分捕捉频散现象的特征, 实验共设置了 201 个频率取样点.

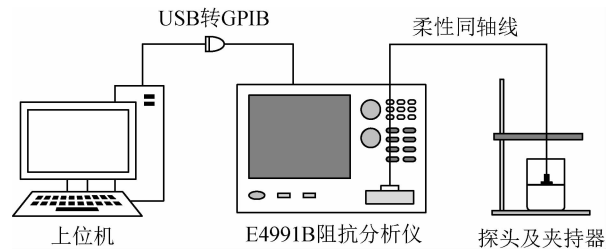


图 2 介电常数测量系统

Fig. 2 Dielectric constant measurement system

测量时, 将同轴探头与泥饼紧密贴合, 通过仪器测定的 S11 参数的幅值和相角计算待测介质的复介电常数, 当校准件与待测介质的介电常数数值大小接近时, 可以将同轴探头的终端与待测介质用等效电路模型描述. 如图 3 所示, 图中 C_f 表示填充介质同轴线内侧等效电容, C_0 表示终端开路边缘介质产生的电容, G 表示终端待测介质产生的电导. 在这种情况下, 根据传输线理论, 复介电常数的实部 ε' 和虚部 ε'' 可使用下式计算得出:

$$\varepsilon' = \frac{-2\tau \sin \varphi}{\omega Z_0 C_0 (1 + 2\tau \cos \varphi + \tau^2)} - \frac{C_f}{C_0}, \tag{6}$$

$$\varepsilon'' = \frac{1 - \tau^2}{\omega Z_0 C_0 (1 + 2\tau \cos \varphi + \tau^2)}, \tag{7}$$

式中, Z_0 为同轴线的特征阻抗, 单位为 Ω ; ω 为仪器发射电磁波的角频率, 单位为 rad/s ; τ 为幅值; φ 为相角; C_f 和 C_0 为探头参数, 通过标准标定获得, 单位为 F.

对于同一个探头, 特征阻抗 Z_0 和探头参数 C_f 、 C_0 均为固定值, 与待测物无关, 通过三种介电特性已知的标准件进行标定. 实验分别选取开路 (空气)、短路 (金属) 和去离子水作为标准件. 在进行标定时, ε' 和 ε'' 是已知值, 因此可以获得三个关于 Z_0 、 C_f 和 C_0 的方程, 通过求解方程组, 获得三个参数的值. 在校正完成后, 将仪器探头紧贴泥饼, 通过仪器在不同频率点下获得的 S11 参数幅值和相位, 通过式 (6)、(7) 计算泥饼复介电常数.

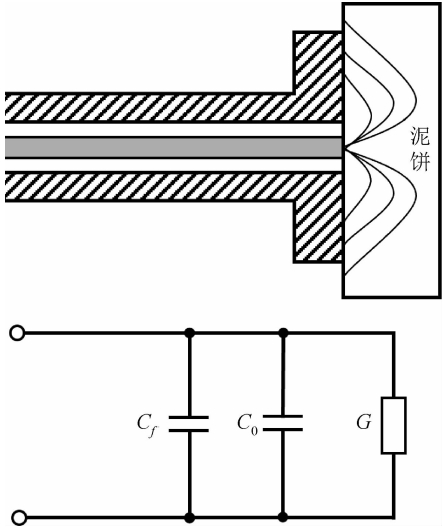


图 3 探头测量示意图及等效电路图

Fig. 3 Schematic diagram of probe measurement and equivalent circuit

1.3 样品制备与实验流程

实验共测量 25 块直径 5 cm、厚度约 1 cm 的人造泥饼. 其中, 5 块泥饼采用不同种类的黏土矿物制作, 用以探究黏土矿物类型的影响, 另外 20 块泥饼具有四种不同黏土质量分数, 每种质量分数包含五种矿化度. 人造泥饼使用自制的制备装置制作而成, 该装置通过压滤模拟井眼内泥浆失水形成泥饼的过程, 其结构如图 4 所示. 在制备过程中, 气泵提供 0.15 MPa 的压力至电缸内, 电缸推杆推动压滤装置内部活塞, 对泥浆加压 3 h. 泥浆中主要成分包括黏土矿物、API 重晶石和氯化钠, 其中各组分的质量分数根据研究需求进行调整. 实验完成后, 将泥饼置于 105 $^{\circ}\text{C}$ 的干燥箱中烘干. 根据烘干前后称重结果对比, 所有制备的泥饼含水质量分数为 $40\% \pm 5\%$.

泥饼中常见黏土矿物类型包括蒙脱石、伊利石和高岭石, 对黏土矿物而言, 阳离子交换容量 (CEC) 是其介电特性的主要影响因素 (Schmidt *et al.*, 2021). 因此, 在制作 5 块不同黏土矿物类型的泥饼时, 选用了钠基膨润土和高岭土, 二者的主要成分分别为阳离子交换容量较大的蒙脱石和较小高岭石. 泥饼固相物中黏土矿物质量分数分别为 20%、40%、60%、80%, 在每种黏土质量分数下, 泥饼孔隙水矿化度分别为 15000 mg/kg、30000 mg/kg、45000 mg/kg、60000 mg/kg、100000 mg/kg. 通过制备这 20 块不同组成成分的泥饼, 探究黏土矿物含量和矿化度对其介电特性的影响.

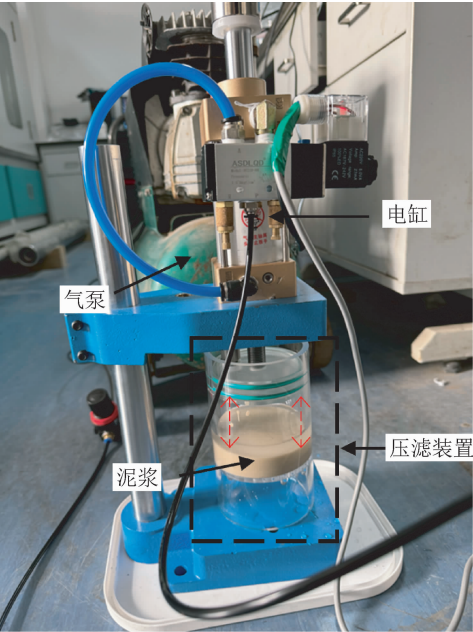


图4 人造泥饼制备装置示意图
Fig.4 Schematic diagram of the artificial mud cake preparation device

实验开始前,首先连接实验测量系统,并预热阻抗分析仪以降低测量误差.然后,设置阻抗分析仪与上位机的测量条件,包括测量模式、测量点、测量电压等参数,并利用三种校准件对探头参数进行标定.最后,将探头与待测泥饼紧密贴合,操作上位机进行测量.

完成所有数据测量后,使用高斯滤波器对复介电常数数据进行平滑去噪预处理.高斯滤波器窗口

尺寸设置为 20,以在保留原始数据频谱特征的同时,减少数据中的震荡与毛刺噪声,便于进一步分析.

2 实验结果和分析

2.1 黏土类型的影响

当配方中仅使用高岭土而不添加膨润土时,泥饼各组分无法有效黏结,难以形成通常意义上的半固体泥饼.因此,仅展示了其余四种质量分数比例下泥饼介电频谱结果,其中矿化度为 45000 mg/kg,黏土矿物含量为 40%,测量复介电常数如图 5 所示.

黏土类型对相对介电常数实部的影响主要体现在 200 MHz 以下的频段.在此频段内,相对介电常数实部频散明显,且蒙脱石含量越高时,介电常数实部越大.这是由于蒙脱石具有较高的阳离子交换容量,在低频条件下双电层极化强度更大.随着频率的升高,双电层极化逐渐减弱,因此黏土类型的影响逐渐降低.当频率超过 200 MHz 后,黏土矿物类型对介电常数实部的影响小于 5%,此时泥饼的介电常数实部不再表现出频散特性,四块泥饼的相对介电常数均稳定在 40 左右,黏土类型的影响可忽略.相对介电常数虚部受黏土类型影响较小,随蒙脱石占比的增加而略有上升.这是由于蒙脱石占比增加使泥饼电导率上升,进而影响介电常数虚部导致的.

2.2 矿化度的影响

制备泥饼时,采用不同浓度的氯化钠溶液控制泥饼矿化度.测量不同矿化度泥饼的介电频谱,低频段的部分测量数据如表 1 所示.测量结果表明,当频

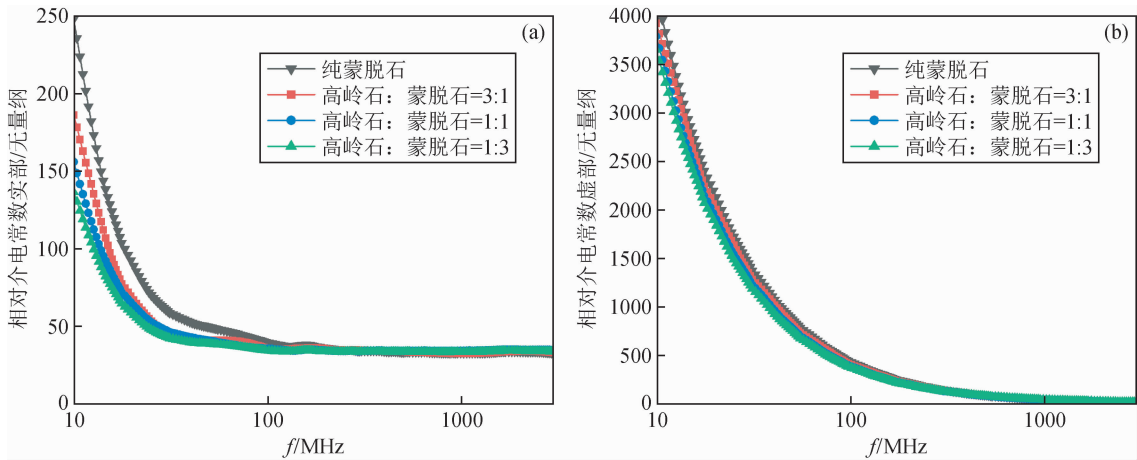


图5 不同黏土类型泥饼介电频谱
(a) 介电常数实部;(b) 介电常数虚部.
Fig.5 Dielectric spectra of mud cakes with different clay types
(a) Real part of dielectric constant;(b) Imaginary part of dielectric constant.

率低于 200 MHz 时,频散程度随矿化度的增加而增加,高盐度下 10 MHz 处的介电常数与 200 MHz 处相比存在数十倍的差异.此外,矿化度与相对介电常数实部之间具有明显的正相关性,矿化度越高时,相对介电常数实部值越大.

表 1 低频段不同矿化度泥饼的相对介电常数实部
Table 1 Relative dielectric constants of mud cakes with different salinities in the low-frequency band

矿化度 /(mg/kg)	频率/MHz			
	10	20	50	200
15000	129. 27	71. 65	55. 20	43. 26
30000	187. 91	84. 25	57. 61	42. 03
45000	329. 44	119. 46	60. 84	41. 27
60000	435. 27	158. 46	66. 60	41. 02
100000	871. 14	268. 79	84. 79	39. 49

选择黏土矿物含量为 60% 的五块泥饼,数据滤波后绘图如图 6 所示.从图 6a 中可以看出,随频率的增加,矿化度对介电常数实部的影响逐渐减弱,当频率高于 200 MHz 后,介电常数实部几乎不再受矿化度影响,介电常数不频散并逐渐趋于定值.这一现象表明,在以界面极化为主的低频段,矿化度的增加导致界面上离子浓度升高,从而增强了界面极化强度.当频率超过 200 MHz 后,界面极化现象逐渐消失,泥饼的介电常数实部主要由水分子的转向极化主导,此时矿化度对其影响较小.

介电常数虚部与泥饼矿化度之间存在显著的正相关,如图 6b 所示,当矿化度从 15000 mg/kg 提升至 100000 mg/kg 的过程中,相对介电常数虚部迅速增加,频散程度也随之增强.随着频率的升高,虚部逐渐趋于零.这一现象的原因在于,泥饼内矿化度的升高导致离子浓度增加,进而提高了泥饼的电导率,从而引起介电常数虚部的显著增加.

选取 ADT 仪器的四个工作频率作为参考点,泥饼矿化度与介电常数的关系如图 7 所示.在所选的四个频率下,矿化度与介电常数呈明显的线性正相关关系.以 24 MHz 频率为例,与矿化度为 15000 mg/kg 的泥饼相比,泥饼矿化度每增加 15000 mg/kg,相对介电常数实部平均增加 48.1%.随测量频率的升高,增幅逐渐减小,这表明矿化度对介电常数的影响程度也逐渐减弱.在 360 MHz 和 960 MHz 时,矿化度每增加 15000 mg/kg 所引起的介电常数平均变化幅度小于 2%,此时矿化度对介电常数几乎无影响.

2. 3 黏土矿物含量的影响

在研究黏土矿物含量影响时,泥饼内的黏土矿物完全使用膨润土,黏土矿物含量的具体定义为泥饼固相物中膨润土的质量分数.

图 8 展示了矿化度为 45000 mg/kg 时黏土矿物含量对泥饼介电频谱的影响,泥饼内黏土矿物含量越高时,相对介电常数也越高,且在频率较低时差异更为显著.这是由于当泥饼中黏土含量增加时,对介电常数实部的影响主要由两种因素构成:一方面,黏土矿物具有更大的比面,增加了泥饼内的界面极化现象,宏观表现为低频介电常数的增加;另一方面黏土矿物具有阳离子交换的能力,交换后的黏土颗粒表面呈现负电性,形成双电层结构,双电层中扩散层的离子可以自由移动,在外加电场的作用下产生极化,从而进一步增大低频情况下的介电常数.在频率超过 200 MHz 后,各黏土矿物含量的泥饼介电常数实部几乎不频散,但与矿化度和黏土类型的影响效果不同,泥饼高频介电常数仍随黏土含量的增加而显著增加.这说明,即使在高频条件下,黏土矿物含量对介电常数的影响仍然存在.

与矿化度的影响相比,黏土矿物含量对泥饼相对介电常数虚部较小,呈现出随黏土矿物含量的增加而增加的趋势(见图 8b),当测量频率达到 3 GHz 时,各个黏土矿物含量的泥饼相对介电常数虚部均趋于 0.

黏土矿物含量变化时,四个工作频率下的介电常数如图 9 所示,由于黏土的增加会同时增强泥饼内部的双电层极化与界面极化,黏土矿物含量与介电常数不再是简单的线性关系,而是与二次函数关系吻合.在 960 MHz 的测量频率下,黏土矿物含量为 80% 的泥饼相对介电常数实部为 42.40,而黏土矿物含量 20% 的泥饼相对介电常数实部为 35.95,二者相对差异约为 16%,这表明即使在高频条件下,黏土矿物含量对介电常数的影响仍不可忽略.

3 泥饼介电频散模型

3. 1 泥饼频散模型

所有测量结果均表明,泥饼在介电测井频段内表现出显著的介电频散现象,因此建立介电频散模型对于描述泥饼的介电特性至关重要.泥饼的主要组成包括重晶石、黏土矿物和水,介电特性与含水泥质砂岩相近.因此,采用 SHSD 模型将各组分混合为泥饼介电模型.该模型基于 Bergman 理论,在 SMD 模型的基础上进行了扩展,是一种描述泥质砂岩介

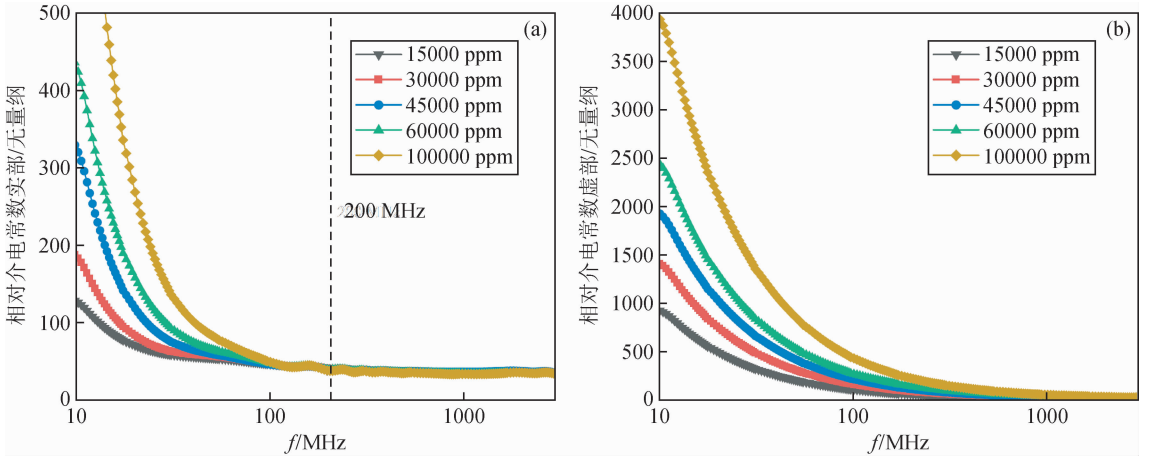


图6 不同矿化度泥饼介电频谱

(a) 介电常数实部; (b) 介电常数虚部.

Fig. 6 Dielectric spectra of mud cakes with different salinities

(a) Real part of dielectric constant; (b) Imaginary part of dielectric constant.

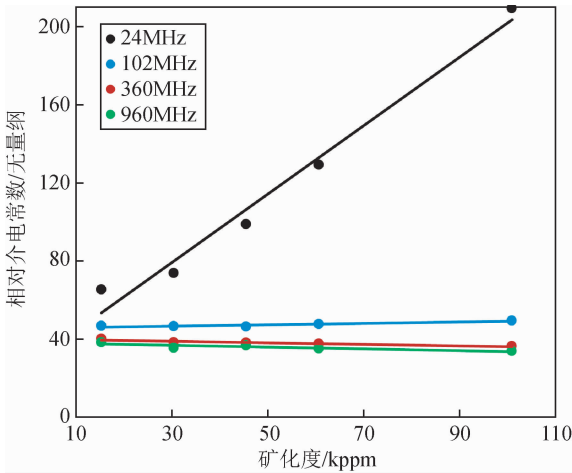


图7 四种工作频率下矿化度与介电常数的关系

Fig. 7 Relationship between salinity and dielectric constant at four working frequencies

电特性的模型,由骨架相、泥质相、水相组成,并考虑了黏土带来的额外电学特性影响 (Han *et al.*, 2012). 为了将该模型运用到泥饼的介电频散特性的描述中,泥饼中的重晶石被类比于泥质砂岩的骨架,黏土矿物类比于泥质砂岩中的泥质,组成了描述泥饼介电频散的数学模型. 其中,黏土矿物和水是频散相,重晶石为非频散相,泥饼介电频散模型的基本形式为:

$$\varepsilon^* = (\phi_w + p_c)^\mu \varepsilon_e^* + [1 - (\phi_w + p_c)^\mu] \varepsilon_r - \varepsilon_r \Gamma\left(\phi_w + p_c, \mu, \frac{\varepsilon_e^*}{\varepsilon_r}\right), \quad (8)$$

式中, ϕ_w 为含水孔隙度; p_c 为黏土体积分数; ε_r 为重晶石介电常数; μ 为弯曲度指数,它由胶结指数 m 和饱和度指数 n 共同决定,代表着黏土内水相的迂曲程度; ε_e^* 为导电相复介电常数,由水相和黏土相结合组成,有:

$$\varepsilon_e^* = \phi_w \times \varepsilon_w^* + p_c \times \varepsilon_c^*, \quad (9)$$

式中, ε_w^* 和 ε_c^* 分别为水和黏土的复介电常数.

建立的泥饼模型可分为三部分:第一部分代表泥饼中盐水和黏土对介电常数的贡献,并与体积分数权重相乘,组成导电相;第二部分代表泥饼中重晶石对介电常数的贡献,同样以体积分数权重相乘;第三部分代表泥饼内部孔隙界面对介电常数的额外贡献,其中 $\Gamma\left(\phi_w + p_c, \mu, \frac{\varepsilon_e^*}{\varepsilon_r}\right)$ 为几何表征贡献函数,该

函数考虑了孔隙形状与界面极化强度对介电常数的贡献. 几何表征贡献函数在 Gkortsas 提出的计算方法上进行了改进,将原方法中的水相复介电常数替换为泥饼导电相复介电常数 (Gkortsas *et al.*, 2018). 因此有:

$$\Gamma(s) = \int_0^1 \frac{Cs'^{-b}(1-s')^e}{s-s'} ds', \quad (10)$$

$$s = \left(1 - \frac{\varepsilon_e^*}{\varepsilon_r}\right)^{-1}, \quad (11)$$

式中, C, e, b 为三个与含水孔隙度有关的参数,与 SMD 模型内各参数的计算方法相同 (Stroud *et al.*, 1986).

3.2 模型效果验证

为了验证泥饼介电频散模型的有效性,将实验

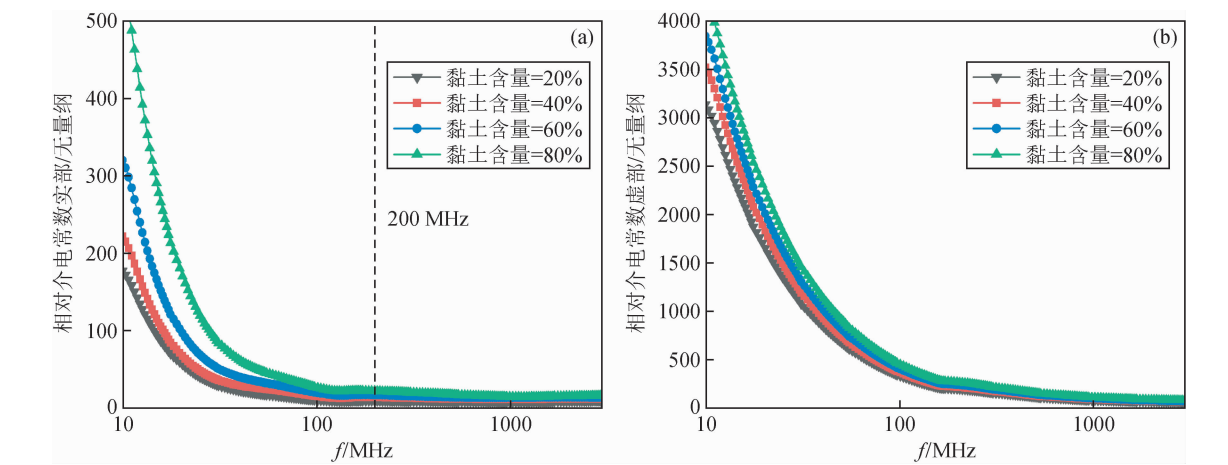


图8 不同黏土矿物含量泥饼介电频谱
(a) 介电常数实部; (b) 介电常数虚部.
Fig. 8 Dielectric spectra of mud cakes with different clay mineral contents
(a) Real part of dielectric constant; (b) Imaginary part of dielectric constant.

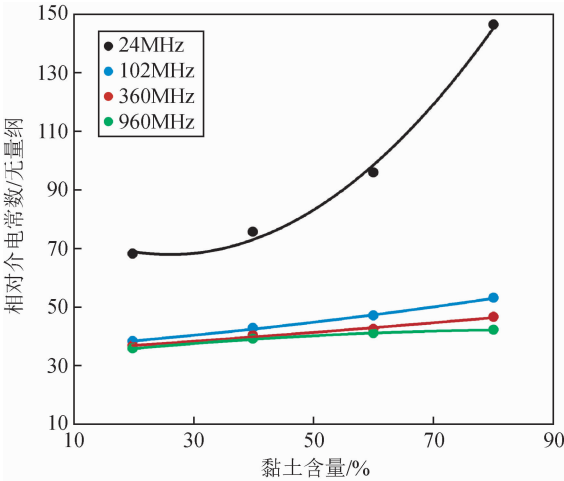


图9 四种介电测井仪器工作频率下黏土矿物含量与介电常数的关系
Fig. 9 Relationship between clay mineral content and dielectric constant at four working frequencies of dielectric logging instruments

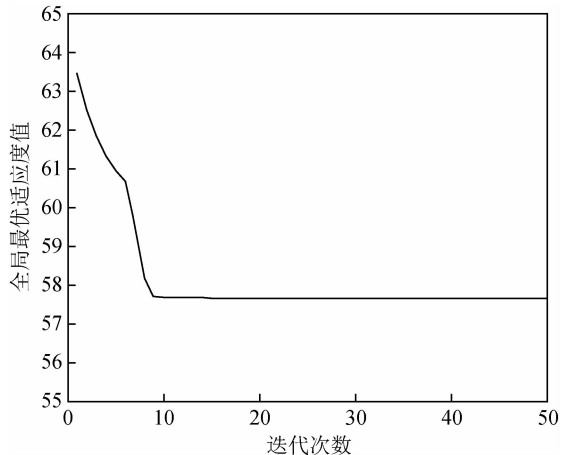


图10 优化过程中的适应度曲线
Fig. 10 Fitness curve of the optimization process

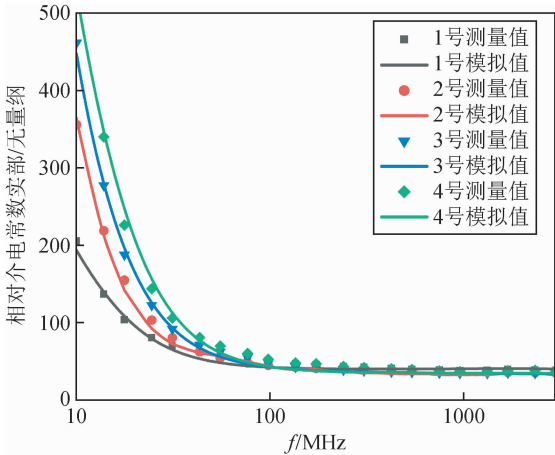


图11 不同条件下模型模拟值与实验测量值对比
Fig. 11 Comparison between model-simulated values and experimental measured values

测量数据与模型计算结果进行了对比分析. 其中, 泥饼含水孔隙度基于 1 GHz 频率下的介电测量数据, 通过 CRIM 模型联合反演获得. 在该频段, 混合物的等效介电常数主要取决于各组分的体积占比及其介电常数, 因此可采用 CRIM 模型对含水孔隙度进行计算(李冰等, 2021). 计算公式为:

$$\phi_w = \frac{\sqrt{\epsilon_{1\text{ GHz}}} - p_c \sqrt{\epsilon_c} - (1 - p_c) \sqrt{\epsilon_r}}{\sqrt{\epsilon_w} - \sqrt{\epsilon_r}}, \quad (12)$$

式中, ϵ_w 、 ϵ_r 和 ϵ_c 分别为水、重晶石和黏土的相对介电常数实部. 其中, 重晶石的介电常数经实验测量为 6. 水的介电常数根据 Klein-Swift 模型计算得出, 该模型考虑了温度和氯化钠浓度对水介电常数的影响 (Klein and Swift, 1977). 黏土的介电常数使用

Debye 模型计算:

$$\varepsilon_c^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + i\omega(1/2\pi f_c)}, \quad (13)$$

式中, ε_∞ 为高频介电常数, 设置为 5; f_c 为极化频率, 最优拟合结果为 10 MHz; ε_s 为低频介电常数, 该参数描述了双电层极化 (EDL) 影响, 受泥饼中黏土矿物含量和矿化度的影响, 该参数的值根据测量结果, 使用粒子群优化算法反演得出. 寻优过程中, 使用实验测量与模型计算结果的 L2 范数作为评价函数. 图 10 展示了粒子群算法寻优时的适应度曲线, 随着迭代次数的增加, 全局最优适应度迅速收敛, 当迭代次数超过 15 次后, 适应度曲线趋于稳定, 表明已获得了 ε_s 的最佳拟合值.

把上述获取的参数代入式 (8), 并与实验测量结果进行对比, 以验证模型的适用性. 在此过程中, 采用相对均方根误差 (RRMSE) 作为评估指标. RRMSE 是归一化后的预测差异程度, 常用于表征模型预测值与实验测量值之间的平均误差水平. 部分情况下的 RRMSE 结果与模型参数如表 2 所示, 结果显示, 模拟值与测量值相对均方根误差均小于 10%, 满足误差要求.

表 2 模型参数反演结果与相对均方根误差
Table 2 Inversion results of model parameters and relative root mean square error

序号	黏土含量 /%	矿化度 /(mg/kg)	ϕ_w	ε_s	RRMSE/%
1	80	15000	0.74	2909.4	8.1603
2	40	60000	0.7	1944.1	7.1457
3	60	60000	0.7	5329.5	5.2262
4	80	45000	0.71	7765.7	8.4628

图 11 展示了表 2 中四块样品在全频段内的模拟值与测量值对比情况. 结果表明, 模型预测介电常数在低频区域的频散特性与实验观测结果一致. 相较于使用单一固定值作为泥饼全频段的介电常数, 使用该模型显著提高了低频情况下泥饼介电常数的估计准确程度. 此外, 当泥饼的矿化度或黏土矿物含量在实验范围内发生变化时, 该模型能够准确地捕捉介电常数在全频段内的变化趋势, 与实测数据表现出良好的一致性.

4 结 论

泥饼介电特性的认识是进行介电测井泥饼校正

的基础, 并进一步决定了介电测井反演数据的准确性. 本文通过对泥饼宽频介电常数的实验测量与分析, 深入研究了泥饼的介电特性及影响因素, 得出以下结论:

- (1)泥饼介电频散特性分析表明, 相对介电常数实部在低频段 (< 200 MHz) 呈现显著频散现象, 其数值随频率升高呈下降趋势. 当频率超过 200 MHz 后, 实部数值趋于稳定, 频散效应快速衰减. 虚部在整个测试频段内均表现出明显频散特征.
- (2)泥饼的介电常数受其构成黏土类型的显著影响. 当黏土总量中膨润土比例增加时, 相对介电常数的实部和虚部均有所提高. 当测量频率高于 200 MHz 时, 黏土矿物类型对相对介电常数实部的影响小于 5%, 可以忽略不计.
- (3)矿化度影响研究实验表明, 在低频段, 矿化度增加会导致相对介电常数的实部和虚部均显著增大. 然而, 当频率升高至 200 MHz 以上后, 矿化度对实部的影响基本消失.
- (4)黏土含量变化对介电特性具有全频域性影响. 随着黏土矿物含量的增加, 相对介电常数实部与虚部均呈现上升趋势, 这一现象在低频段尤为显著. 即使在高频条件下, 黏土含量变化仍能引发可观测的介电响应差异.
- (5)新构建的介电频散模型与实验数据的相对均方根误差小于 10%, 表明模型具有较高的预测精度. 该模型可作为模拟泥饼宽频介电常数的新方法, 进一步支撑扫频介电测井的正演模拟与反演解释工作.

致 谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

Cao G S, Yi W Y, Zhao X X, *et al.* 2023. Analysis of composition of mud cake from waste drilling fluid. *Contemporary Chemical Industry (in Chinese)*, 52(7): 1632-1635, 1640, doi: 10.13840/j.cnki.cn21-1457/tq.2023.07.002.

Chen A X. 2006. Analysis of environment influence in electromagnetic logging while drilling. *Oil Geophysical Prospecting (in Chinese)*, 41(5): 601-605, doi: 10.3321/j.issn:1000-7210.2006.05.022.

Duan Y X, Yang H. 2021. Review of mud cake formation mechanism and evaluation method of drilling fluid. *Science Technology and Engineering (in Chinese)*, 21(27): 11443-11454, doi: 10.3969/j.issn.1671-1815.2021.27.001.

Gkortsas V M, Venkataramanan L, Fellah K, *et al.* 2018. Comparison of different dielectric models to calculate water saturation and estimate textural parameters in partially saturated cores. *Geophysics*, 83(5): E303-E318, doi: 10.1190/geo2018-0100.1.

Gu J, Li L W, Sun D X. 2019. Experimental study on the influence of well inclination angle of coalbed methane well on the cementation strength of cement-formation interface. *Coal Geology & Exploration* (in Chinese), 47 (3) : 208-216, doi: 10. 3969/j. issn. 1001-1986. 2019. 03. 032.

Guo X D, Cui H J, Wu Y L, *et al.* 2022. Application of “ new three-combination ” logging technology for evaluation of tight sandstone reservoir in ordos basin. *Well Logging Technology* (in Chinese), 46 (3) : 346-351, doi: 10. 16489/j. issn. 1004-1338. 2022. 03. 015.

Han M, Cuadros J, Suarez A P, *et al.* 2012. Continuous estimate of cation exchange capacity from log data: a new approach based on dielectric dispersion analysis. // *Proceedings of the SPWLA 53rd Annual Logging Symposium*. Cartagena: OnePetro, SPWLA-2012-101.

Han Y F, Misra S. 2021. Stochastic inversion based interpretation of multifrequency electromagnetic logs from a European organic-rich shale formation. // *Misra S, Han Y F, Jin Y T, et al eds. Multifrequency Electromagnetic Data Interpretation for Subsurface Characterization*. Amsterdam: Elsevier, 241-271.

Hizem M, Budan H, Devillé B, *et al.* 2008. Dielectric dispersion: a new wireline petrophysical measurement. // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Denver: OnePetro, SPE-116130-MS, doi: 10. 2118/116130-MS.

Klein L, Swift C. 1977. An improved model for the dielectric constant of sea water at microwave frequencies. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 25 (1) : 104-111, doi: 10. 1109/tap. 1977. 1141539.

Lai Q, Xie B, Liang T, *et al.* 2015. Application of array dielectric tool to complex carbonate reservoir evaluation. *Xinjiang Petroleum Geology* (in Chinese), 36 (1) : 112-115, doi: 10. 7657/XJPG20150123.

Li B, Guo S L, Yue G H, *et al.* 2021. Study on effective permittivity of two-phase mixture based on GPR numerical simulation. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 36 (2) : 736-745, doi: 10. 6038/pg2021EE0493.

Li C, Deng S G, Li Z Q, *et al.* 2024. Application analysis of electromagnetic wave propagation logging in formation dielectric constant measurement. *Chinese Journal of Radio Science* (in Chinese), 39 (1) : 156-166, doi: 10. 12265/j. cjors. 2023020.

Liang Z K, Sun A Y, Tian X D, *et al.* 2015. Evaluation results of water-flooded zone by using dielectric scanner logging technique. *Special Oil & Gas Reservoirs* (in Chinese), 22 (4) : 101-103, 136, doi: 10. 3969/j. issn. 1006-6535. 2015. 04. 026.

Liu C Y. 2023. Study on the effect of mudcake and its correction method in sweep-frequency dielectric logging [Master's thesis] (in Chinese). Beijing: China University of Petroleum (Beijing).

Liu H Y, Liu Y, Zeng G R, *et al.* 2023. Methods for identifying fluid properties of deep tight sandstones in Turpan-Hami Basin. *Natural Gas Exploration and Development* (in Chinese), 46 (2) : 110-117, doi: 10. 12055/gaskk. issn. 1673-3177. 2023. 02. 014.

Schmidt F, Wagner N, Landmark S, *et al.* 2021. Impact of the cation exchange capacity on dielectric relaxation spectra of water saturated clays. // *2021 13th International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances (ISEMA)*. Kiel: IEEE, 1-7.

Stroud D, Milton G W, De B R. 1986. Analytical model for the dielectric response of brine-saturated rocks. *Physical Review B*, 34 (8) : 5145-5153, doi: 10. 1103/PhysRevB. 34. 5145.

Tathed P, Han Y F, Misra S. 2018. Hydrocarbon saturation in Bakken Petroleum System based on joint inversion of resistivity and dielectric dispersion logs. *Fuel*, 233: 45-55, doi: 10. 1016/j. fuel. 2018. 06. 019.

Wang P Q, Jing Y J, Peng Z, *et al.* 2017. New method for evaluating filtration and mud cake building performance of drilling fluid for shale drilling. *Drilling Fluid & Completion Fluid* (in Chinese), 34 (2) : 51-56.

Xiao F, Guo W G, Zhang X, *et al.* 2014. Research on working parameters and algorithm of dielectric logging tool. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 29 (6) : 2785-2790, doi: 10. 6038/pg20140647.

Xu W, Wei R, Huang H, *et al.* 2022. Numerical simulation of polarization effect in low-frequency interface of oil-gas reservoirs. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 57 (6) : 1481-1488, doi: 10. 13810/j. cnki. issn. 1000-7210. 2022. 06. 024.

Zhang T H, Al-Ofi S, Akbar M. 2012. Error quantification of a plug scale lab dielectric spectroscopy setup and its application in material characterization. *Progress in Geophysics*, 27 (2) : 582-595, doi: 10. 6038/j. issn. 1004-2903. 2012. 02. 022.

附中文参考文献

曹广胜, 伊苇艺, 赵小萱, 等. 2023. 废弃钻井液脱出泥饼成分分析. *当代化工*, 52 (7) : 1632-1635, 1640, doi: 10. 13840/j. cnki. cn21-1457/tq. 2023. 07. 002.

陈爱新. 2006. 随钻电磁波测井环境影响分析. *石油地球物理勘探*, 41 (5) : 601-605, doi: 10. 3321/j. issn:1000-7210. 2006. 05. 022.

段云星, 杨浩. 2021. 钻井液泥饼形成及评价研究综述. *科学技术与工程*, 21 (27) : 11443-11454, doi: 10. 3969/j. issn. 1671-1815. 2021. 27. 001.

顾军, 李林蔚, 孙德兴. 2019. 煤层气井井斜角对隔水层界面胶结强度影响试验. *煤田地质与勘探*, 47 (3) : 208-216, doi: 10. 3969/j. issn. 1001-1986. 2019. 03. 032.

郭向东, 崔宏俊, 武延亮, 等. 2022. “ 新三组合 ” 测井技术在鄂尔多斯盆地致密砂岩储层评价中的应用. *测井技术*, 46 (3) : 346-351, doi: 10. 16489/j. issn. 1004-1338. 2022. 03. 015.

赖强, 谢冰, 梁涛, 等. 2015. 介电扫描测井在复杂碳酸盐岩储集层评价中的应用. *新疆石油地质*, 36 (1) : 112-115, doi: 10. 7657/XJPG20150123.

李冰, 郭士礼, 岳光华, 等. 2021. 双相混合物等效介电常数探地雷达数值研究. *地球物理学进展*, 36 (2) : 736-745, doi: 10. 6038/pg2021EE0493.

李椰, 邓少贵, 李智强, 等. 2024. 电磁波传播测井地层介电常数测量应用分析. *电波科学学报*, 39 (1) : 156-166, doi: 10. 12265/j. cjors. 2023020.

梁忠奎, 孙爱艳, 田晓冬, 等. 2015. 介电扫描测井技术对水淹层评价效果分析. *特种油气藏*, 22 (4) : 101-103, 136, doi: 10. 3969/j. issn. 1006-6535. 2015. 04. 026.

刘晨昱. 2023. 扫频介电测井泥饼影响及其校正方法研究 [硕士论文]. 北京: 中国石油大学 (北京).

刘海洋, 刘源, 曾贵蓉, 等. 2023. 吐哈盆地深层致密砂岩流体性质识别方法. *天然气勘探与开发*, 46 (2) : 110-117, doi: 10. 12055/gaskk. issn. 1673-3177. 2023. 02. 014.

王平全, 敬玉娟, 彭真, 等. 2017. 针对页岩气井钻井液的新型滤失造壁性能评价方法. *钻井液与完井液*, 34 (2) : 51-56.

肖飞, 郭文阁, 张旋, 等. 2014. 介电测井仪工作参数及算法研究. *地球物理学进展*, 29 (6) : 2785-2790, doi: 10. 6038/pg20140647.

许巍, 魏然, 黄航, 等. 2022. 油气储层低频界面极化效应数值模型. *石油地球物理勘探*, 57 (6) : 1481-1488, doi: 10. 13810/j. cnki. issn. 1000-7210. 2022. 06. 024.

张天华, Al-Ofi S, Akbar M. 2012. 岩芯尺度的宽频介电常数频谱实验室测量设备的误差分析及其在物质测量中的应用 (英文). *地球物理学进展*, 27 (2) : 582-595, doi: 10. 6038/j. issn. 1004-2903. 2012. 02. 022.