



基于ERT技术的含水合物沉积物可视化探测模拟实验

赵金环, 刘昌岭, 邹长春, 陈 强, 孟庆国, 刘 洋, 卜庆涛

An experimental study on visual detection of hydrate-bearing sediments based on ERT

ZHAO Jinhuan, LIU Changling, ZOU Changchun, CHEN Qiang, MENG Qingguo, LIU Yang, and BU Qingtao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2021060901>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

海洋天然气水合物储层蠕变行为的主控因素与研究展望

Controlling factors and research prospect on creeping behaviors of marine natural gas hydrate-bearing strata

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 3

海洋天然气水合物储层特性及其资源量评价方法

Characteristics of marine gas hydrate reservoir and its resource evaluation methods

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 44

江苏中部海岸晚第四纪沉积物的粒度与磁化率特征及其古环境意义

Characteristics of grain size and magnetic susceptibility of the Late Quaternary sediments from core 07SR01 in the middle Jiangsu coast and their paleoenvironmental significances

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 210

海洋沉积物中金属依赖型甲烷厌氧氧化作用研究进展及展望

Research progress and prospects of metal-dependent anaerobic methane oxidation in marine sediments

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 58

南海南部浅表层柱状沉积物孔隙水地球化学特征对甲烷渗漏活动的指示

Pore water geochemistry of shallow surface sediments in the southern South China Sea and its implications for methane seepage activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 112

南海北部神狐海域SH37岩芯浊流沉积及其物源分析

Turbidity deposits and their provenance: evidence from core SH37 in Shenhu area of the South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 101



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2021060901

基于 ERT 技术的含水合物沉积物可视化探测模拟实验

赵金环^{1,2}, 刘昌岭^{1,2}, 邹长春³, 陈强^{1,2}, 孟庆国^{1,2}, 刘洋³, 卜庆涛^{1,2}

1. 自然资源部天然气水合物重点实验室, 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237
2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237
3. 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京 100083

摘要: 基于电阻率响应特征的储层识别和饱和度估算是天然气水合物储层评价的关键技术之一, 在天然气水合物的勘探开发中发挥重要作用。本文开展了沉积物内水合物生成的物理模拟实验, 采用电阻率层析成像技术, 实现了分散状水合物和块状水合物生长过程的可视化探测, 研究了两种赋存形态水合物的电阻率响应特征。研究表明: 分散状水合物的高值电阻率零散分布, 块状水合物的高值电阻率聚集分布; 沉积物内的游离气导致块状水合物的电阻率层析成像位置发生偏移; 分散状水合物和块状水合物的电阻率响应特征差异明显, 与分散状水合物相比, 块状水合物电阻率随着水合物的生成升高较快。

关键词: 天然气水合物; 电阻率层析成像; 赋存形态; 电阻率响应

中图分类号: P733.6 **文献标识码:** A

An experimental study on visual detection of hydrate-bearing sediments based on ERT

ZHAO Jinhuan^{1,2}, LIU Changling^{1,2}, ZOU Changchun³, CHEN Qiang^{1,2}, MENG Qingguo^{1,2}, LIU Yang³, BU Qingtao^{1,2}

1. Key Laboratory of Gas Hydrate of Ministry of Natural Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266237, China
2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China
3. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: Reservoir evaluation of gas hydrate based on electrical response, as a key mean to discriminate natural gas hydrate and estimate its resource potential, plays an important role in the exploration and development of natural gas hydrate. The physical simulation experiment for gas hydrate formation in sediments was carried out in this paper to detect the morphology of dispersed hydrate and massive hydrate based on electrical resistivity tomography during the formation of hydrate. The resistivity responses of the two gas hydrate morphology were carefully studied. The results show that the high resistivity of dispersed hydrate has a scattered distribution pattern whereas the high resistivity of massive hydrate distributed in a concentrated pattern. The free gas in sediments may cause the position deviation of massive hydrate. The resistivity response characteristics of dispersed hydrate and massive hydrate change largely. Compared to the dispersed hydrate, the resistivity of massive hydrate increases rapidly with the formation of hydrate.

Key words: natural gas hydrate; electrical resistivity tomography; morphology; resistivity response

天然气水合物被视为 21 世纪可供开发的新能源。天然气水合物储层识别和饱和度估算是水合物资源勘探开发的重要任务之一^[1-2]。近几十年来, 世界范围内开展了大量的天然气水合物的实验模拟研究和现场勘探工作, 致力于通过了解含天然气水合物沉积物的物性参数演化识别水合物并估算饱和度^[3-12]。基于电学响应特征的储层定性与定量评价在天然气水合物的勘探开发中发挥着重要作

用, 是天然气水合物资源评价的重要手段之一。

随着越来越多的原位水合物样品被获取, 天然气水合物在沉积物内的赋存形态已基本明确, 分为孔隙型(分散状)和裂隙型(块状、脉状和层状等)。天然气水合物赋存形态多样性使得储层各向异性特征显著, 现场勘探获取的水合物饱和度相近时, 电阻率响应差异十分明显^[13-16], 极大地影响现场基于测井资料评估储层中水合物饱和度的准确性。

资助项目: 国家天然气水合物 127 专项“天然气水合物储层模拟与测试技术”(DD20190221); 国家自然科学基金“裂隙充填型水合物声学响应机理研究”(41906067); 山东省自然科学基金“基于声学-CT 联合探测的水合物分解及其声学响应机理研究”(ZR2019BD051)

作者简介: 赵金环(1987—), 女, 博士后, 主要从事油气测井解释和天然气水合物储层物性模拟实验研究, E-mail: 446103042@qq.com

通讯作者: 刘昌岭(1966—), 男, 研究员, 主要从事天然气水合物研究工作, E-mail: qdliuchangling@163.com

收稿日期: 2021-06-09; **改回日期:** 2021-08-23. 蔡秋蓉编辑

物理模拟实验结果同样表明,即使在相同平均水合物饱和度条件下,采用电测法获得的沉积物体系电阻率也不尽相同^[17-19]。目前,水合物物理模拟实验大部分采用的是传统的电阻率点测方法,获取的是测量电极周围沉积物的综合电学响应。然而,含水合物沉积物的电阻率响应不仅受沉积物固有性质、孔隙流体和孔隙尺度上水合物的分布模式的影响,而且还受水合物宏观赋存形态的控制^[20]。传统的电阻率点测不能反映水合物的赋存形态,一定程度上限制了水合物的有效识别和饱和度的准确估算。

电阻率层析成像技术(Electrical Resistivity Tomography, ERT)通过获取被测物体周围的电压信号,建立被测物体的电阻率分布图像,可用于直观地呈现水合物的分布情况。成像算法是电阻率层析成像技术的核心。对于非均质性和各向异性较强的水合物储层,成像算法是研究的重点,以期获得高分辨率和高准确度的水合物电阻率分布图像。目前,电阻率层析成像技术已在孔隙型水合物样品上进行应用^[21-26],而裂隙型水合物的电阻率成像还有待进一步的研究。

本文利用水合物电阻率层析成像实验装置,模拟分散状和块状水合物的生成过程;基于物理模拟实验测试结果,建立了含水合物沉积物电阻率层析成像反演方法,实现分散状和块状水合物的可视化;基于含不同赋存类型水合物沉积物的电阻率图像,揭示水合物生长规律,研究水合物赋存形态对电阻率响应特征的影响,以期为天然气水合物赋存

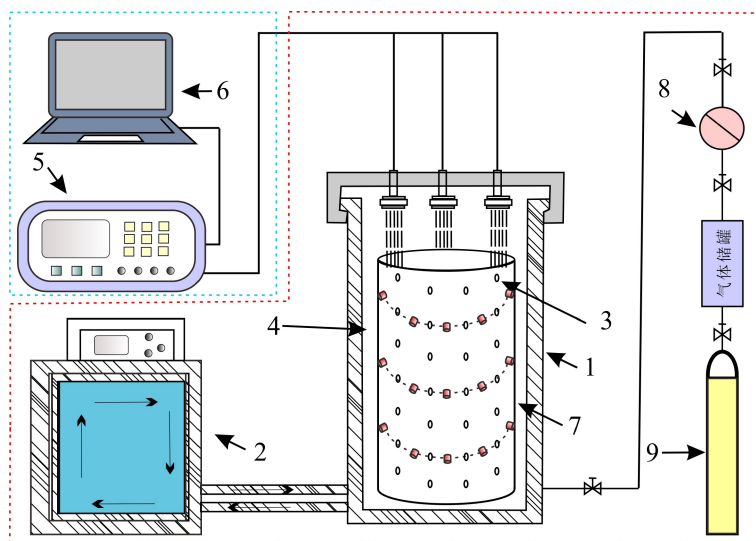
类型识别和饱和度估算提供支持。

1 实验

本研究采用的是青岛海洋地质研究所自主研制的水合物电阻率层析成像实验装置。实验装置可实时采集原位水合物生成和分解过程中电阻率层析成像数据。根据电阻率层析成像算法,重建不同时刻沉积物内水合物赋存形态电阻率图像。

1.1 实验装置

水合物电阻率层析成像实验装置包括水合物生成/分解和数据采集两个模块(图 1)。水合物生成/分解模块主要包括高压反应釜、恒温水浴槽和内筒,是水合物生成和分解的场所。高压反应釜和恒温水浴槽用于模拟水合物生成的高压低温环境。内筒为一直径 10 cm 的圆柱状绝缘筒,用于承装沉积物,筒壁和筒底部均布置透气不透水通道;数据采集模块主要包括测量电极、电桥仪和控制器,采集水合物生成/分解过程中的电学参数。测量电极布设在内筒的同一高度,径向均布 16 个测点、间距 22.5°;电桥仪与控制器的相互配合,完成电学参数的采集。水合物生成过程中电学数据的采集方式为四电极法,同一高度的 16 个电极中,选相邻的两个电极作为供电电极,其余电极相邻的两两一对作为测量电极,直至 16 个电极皆完成作为供电电极任务,每一轮次的采集可获取 208 个有效数据。



1-高压反应釜;2-恒温水浴槽;3-气孔;4-电极;5-控制器;
6-数据采集软件;7-内筒;8-气体质量流量控制器;9-甲烷气瓶;

图 1 水合物电阻率层析成像实验装置

Fig.1 Experiment device of hydrate electrical resistivity tomography

1.2 实验方法及条件

(1) 分散状水合物

将充分饱水(浓度为3.5%的NaCl溶液)的石英砂(>500 μm)填入内筒后放入高压反应釜,密封反应釜;向密封反应釜内充入甲烷气体(纯度99.99%)至实验压力;稳定后,开启水浴循环进行系统降温,开始水合物生成实验。实验过程中,实时采集含分散状水合物沉积物体系的电阻率层析成像数据。

(2) 块状水合物

为提高实验效率,实验将已经制备好的圆柱状

水合物装入沉积物内,以模拟块状的裂隙型水合物。参照已有的裂隙充填型水合物合成实验^[27],将去离子水冰粉装入圆柱状模具后,放入液氮中冷却;然后将其放入水合物样品制备反应釜,密闭后充入甲烷气(纯度99.99%)至水合物生成所需的压力;将反应釜放入循环水浴控温装置中进行降温,生成圆柱状水合物。水合物开始生成后,釜内的压力会不断地降低。水合物的生成是一个从成核到不断生长的过程,十分耗时。在压力下降过程中,也就是冰粉还未完全转换成水合物时,开釜后取出的圆柱状水合物样品为冰粉与水合物的混合物(图2)。

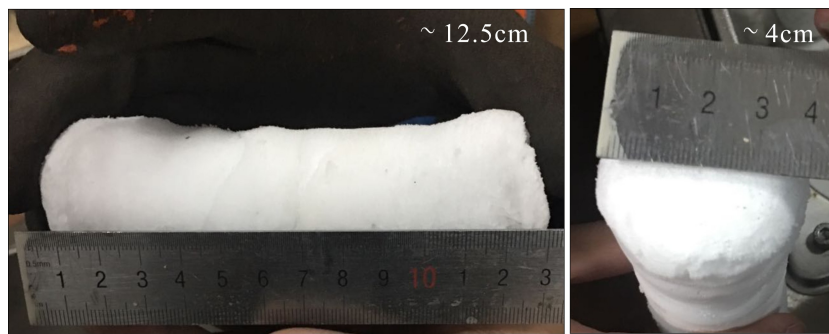


图2 圆柱状水合物样品(模拟块状水合物)

Fig.2 Photos of cylindrical hydrate sample which simulates massive hydrate

为了避免圆柱状水合物与沉积物接触导致水合物分解,将充分饱水(浓度为3.5%的NaCl溶液)的石英砂(>500 μm)放入恒温箱进行预冷,并提前开启水浴循环进行高压反应釜系统的降温。待温度稳定后,取出压力还处在下降过程中的圆柱状水合物,放入液氮中冷却,尽量降低水合物的分解。取出部分预冷后的石英砂填入内筒,将圆柱状水合物埋入石英砂中,并将内筒整体放入反应釜内,快速密封反应釜,并迅速向反应釜内充入甲烷气体至实验压力,尽量避免水合物的分解。由于装样过程和充入的室温环境下的甲烷气体导致沉积物体系温度升高,高于水合物稳定存在的温度范围,水合物将存在分解现象。维持水浴循环的低温对沉积物体系进行降温。随着温度的降低,水合物将继续生成。实验过程中,实时采集含块状水合物沉积物体系的电阻率层析成像数据。

2 层析成像反演算法

本文电阻率层析成像图像重建算法采用引入了正则化矩阵和参数获取稳定解、收敛速度快的高斯牛顿迭代方法求解目标函数。电阻率层析成像属于非线性的不适定反问题,反问题等价于非线性

最优化问题,其最小化目标函数为:

$$S = \|GX - d\|^2 + \lambda^2 \|CX\|^2 \quad (1)$$

其中: G 为加权灵敏度矩阵; X 为模型参数; d 为测量数据; λ 为正则化参数; C 为光滑度矩阵。

第 $i+1$ 次迭代得到的新模型为第 i 次模型 X 与修正量 ΔX 之和,则目标函数可写为:

$$S = \|F(\Delta X + X_i) - d\|^2 + \lambda^2 \|C(\Delta X + X_i)\|^2 \quad (2)$$

对目标函数进行泰勒展开后,忽略高阶项,并令其偏导为零,则有:

$$X_{i+1} = X_i + (J^T J + \lambda C^T C)^{-1} J^T (X_i - d) + \lambda C^T C X_i \quad (3)$$

其中, J 为雅可比矩阵。

当新模型的解与测量数据的均方根误差满足精度时,迭代终止, X_i 即所求模型。

3 实验结果

水合物物理模拟实验开展了多组重复试验,验证实验装置和层析成像反演算法的可靠性,本文选取其中的一组数据进行分析。需要说明的是,压力的变化对电阻率的影响可忽略不计^[26],而温度的变化对孔隙水中导电离子的移动影响较大,不可忽略。在层析成像反演过程中,已将常温条件下的电

阻率作为参考值对测量数据进行了温度校正。因此,分散状与块状水合物生成的起始温压条件的不同不影响水合物赋存形态差异引起的电学响应差异的研究。

对比分散状水合物和块状水合物的电阻率图像可以发现,分散状水合物的高值电阻率分布存在明显的零散性,块状水合物的高值电阻率分布则是相对比较聚集,且随着水合物的不断生成,分散状水合物的零散性和块状水合物的聚集性变得更加明显。利用二维电阻率图像上这一特性可初步判断水合物的赋存形态。

3.1 分散状水合物

实验过程中压力维持稳定 10 h 后,进行了一次补压和升温,使沉积物体系内的气水重新分布,促进水合物的生成(图 3)。反应过程中随着水合物生成,体系压力下降明显,经补压升温后,水合物继续生成。初始状态下,各层的平均电阻率在 $1.55 \Omega \cdot \text{m}$ 左右,属正常海底沉积物电阻率分布范围内(图 4)。分散状水合物生成过程中内筒内不同高度沉积物

介质的电阻率分布情况如图 5 所示。随着时间的推移,孔隙水不断固化成水合物,每层不同位置的电阻率和平均电阻率皆逐渐升高,局部电阻率升高明显,尤其是上部层位。分析认为,水合物的聚集特征受气源的供给和输导通道共同控制^[28]。Chen 等研究认为沉积物中水合物首先在气水接触面生长,天然气聚集区域将形成大量的水合物^[29]。考虑实验装置内筒上部为开口式,上部气水接触充分,下部层位依赖内筒侧壁的气孔进气,气水接触相对较弱。从电阻率图像上可以观测到上部水合物最早生成,生成速度相对较快,且随着时间的变化,大量水合物聚集。

从分散状水合物生成过程中电阻率图像的变化可以看出,水合物围绕水合物优先生成区域不断扩张生长;层与层之间的电阻率和层内的电阻率不同指示了水合物的生长具有明显的非均质性。国内外学者利用电阻率层析成像技术在研究水合物生成/分解规律以及物性演化规律时也曾发现了水合物的上述生长行为^[22-23]。

随着时间的变化,分散状水合物部分区域(图 5

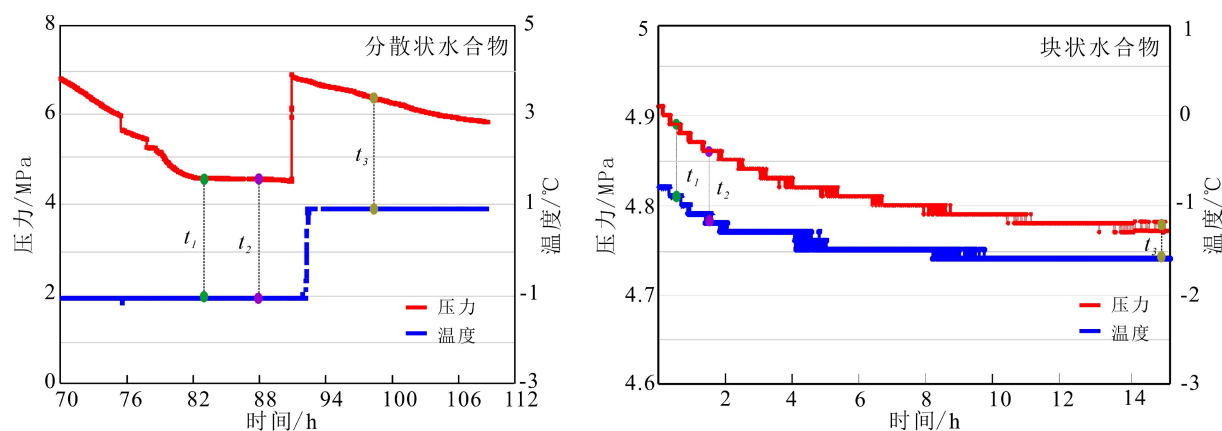


图 3 分散状和块状水合物生成过程中温度和压力的变化

Fig.3 Temperature and pressure during formation of dispersed hydrate and massive hydrate

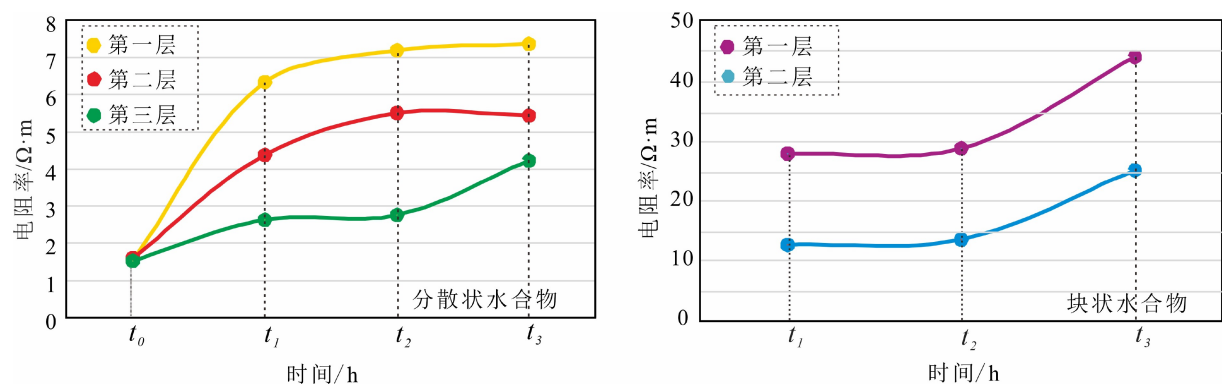


图 4 分散状和块状水合物生成过程每层平均电阻率的变化

Fig.4 Average resistivity of each layer during formation of dispersed hydrate and massive hydrate

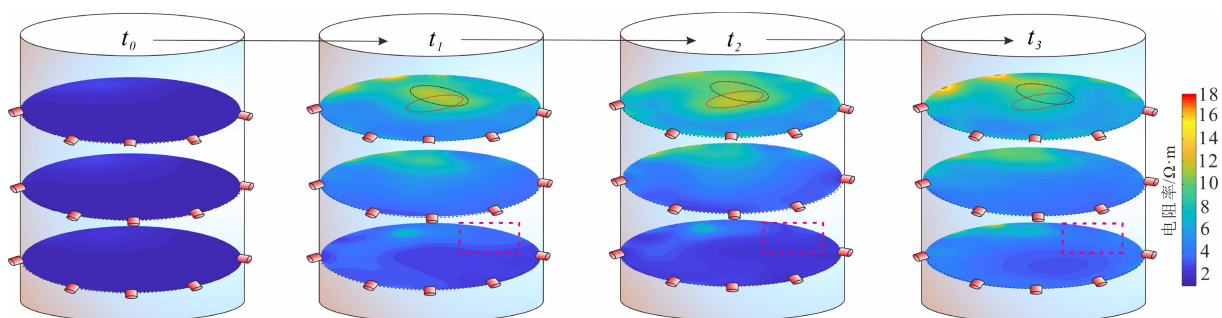


图 5 分散状水合物生成过程中不同时刻电阻率图像

Fig.5 The changes of resistivity distribution of dispersed hydrate with time

中椭圆形区域)电阻率明显降低,尤其是 t_3 时刻。分析认为是由于水合物生成过程中的排盐效应导致孔隙流体电阻率降低^[30]。水合物生成过程中孔隙流体被水合物圈闭,被圈闭的这部分流体对含水水合物沉积物的导电贡献相当于水合物^[31]。也就是说,当矿化度升高的孔隙流体被水合物圈闭后,同样会呈现出高电阻率值。图 5 中的长方形区域,电阻率出现了升高(t_1)-降低(t_2)-升高(t_3)的特征。图 5 中 t_3 时刻方形区域周围并没有形成高电阻率值的圈闭现象,认为图 5 中 t_3 时刻长方形区域电阻率的升高是水合物的影响。因此,不同时刻电阻率图像的对比可以明确受水合物影响引起的电阻率的变化,对水合物的有效识别十分有利。

3.2 块状水合物

受实验装置硬件条件的影响,块状水合物仅成功获取 2 层测量数据。块状水合物生成过程中内

筒内沉积物介质不同高度的电阻率分布情况如图 6 所示。加压稳定后,块状水合物的大小呈现准确,位置稍微有些偏差。实验发现,随着时间的变化圆柱体水合物电阻率不断增加。非圆柱体水合物区域处的电阻率值在温压条件达到后的 1.5 h(t_1 时刻),电阻率值即达到 $20 \Omega \cdot \text{m}$,而在分散状水合物生成过程历经几十个小时后,电阻率仅有 $5 \sim 7 \Omega \cdot \text{m}$ (图 3,图 4)。Lei 和 Seol 通过对热刺激法和降压法开采的实验模拟,认为外界压力会迫使水合物分解产生的气体滞留在沉积物孔隙内^[32]。圆柱体水合物放入釜内后,受温度影响水合物仍在分解,分解产生的游离气被滞留在沉积物内,驱替了部分孔隙水。游离气为不导电介质,造成其他区域的电阻率值过大,进而导致圆柱体水合物的位置发生偏移。同时,孔隙内的游离气与孔隙水接触充分,促进了水合物再次生成,导致非圆柱体水合物区域处的电阻率值升高较快。

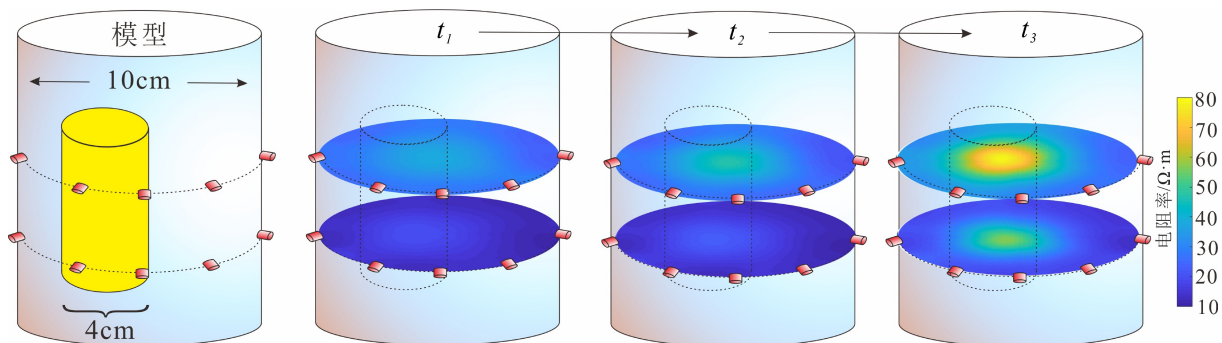


图 6 块状水合物生成过程中不同时刻电阻率图像

Fig.6 The changes of resistivity distribution of massive hydrate with time

4 讨论

在相同沉积物样品体积条件下,分散状水合物在压力下降 0.5 MP 的情况下,平均电阻率升高了 $1.22 \Omega \cdot \text{m}$;块状水合物在压力下降约 0.12 MP 的情况下,平均电阻率升高了 $14.37 \Omega \cdot \text{m}$ (图 3,图 4)。对

比分散状水合物和块状水合物,块状水合物电阻率升高较快,而从压力下降情况可知块状水合物生成量又较少。Liu 等人通过数值模拟研究了水合物形态对含天然气水合物沉积物电阻率特性的影响,发现低水合物饱和度范围内裂隙型水合物电阻率同样存在急剧增加的现象^[33]。

电阻率测量是经数值解法求出测量电极周围介质的电场分布,然后求取电阻率的计算公式。测量电极周围存在不同赋存形态的水合物时,电场的分布不同,求取的电阻率也将不同。分散状水合物是指水合物以颗粒形式分布于粒间孔隙内,在含量较少的情况下,对导电路径(孔隙水)的堵塞作用不明显;当大量的水合物生成后,沉积物内的导电路径将被逐渐堵塞。块状水合物模拟实验的沉积物中,圆柱体水合物为冰粉、孔隙水、水合物和气的混合。圆柱体水合物是用去离子水制成的冰粉生成的,压实后的孔隙空间也很小,可被视为体积相对较大的不导电介质,即使水合物生成量相对较低,对导电路径的阻碍作用也会比较明显,对获取的电学响应的贡献突出,电阻率升高的就会较快。

不同赋存形态的水合物饱和度估算需要采用不同的电阻率岩石物理模型^[12,33-34]。对于取心难度较大的水合物储层,水合物的赋存形态很难获得。电阻率层析成像技术在孔隙尺度的微观探测与现场尺度的宏观探测中具有广阔的前景^[25]。刘洋等人已研发了一种新的电阻率层析成像阵列,应用于含水合物沉积物的电阻率成像模拟实验装置^[26]。结合本文研究,电阻率层析成像技术可作为识别水合物赋存形态的一种手段应用于现场水合物储层,为选取电阻率岩石物理模型提供依据,提高基于现场测井资料评估储层中水合物饱和度的准确性。

5 结论

(1)利用电阻率层析成像结果可初步判断沉积物中水合物的赋存形态。分散状水合物的高值电阻率分布具有零散性,块状水合物的高值电阻率分布比较聚集,且随着水合物的不断生成,电阻率高值的零散性和聚集性将越加明显。

(2)分散状水合物不同时刻电阻率图像的对比,可以明确由水合物生成所引起的电阻率的变化。被滞留在沉积物内的游离气对沉积物的电阻率影响较大,影响了块状水合物电阻率层析成像的位置,多物理参数的联合探测将有助于区分游离气和水合物对沉积物电阻率响应的影响。

(3)水合物的赋存形态是影响电阻率响应特征的重要因素,分散状水合物和块状水合物的电阻率响应特征差异明显;相对于分散状水合物,块状水合物作为大体积的不导电介质,对导电路径的堵塞作用明显,导致块状水合物电阻率随着水合物的生成升高较快。

参考文献 (References)

- [1] 刘昌岭,郝锡萃,孟庆国,等. 气体水合物基础特性研究进展[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(9): 1-10. [LIU Changling, HAO Xiluo, MENG Qingguo, et al. Research progress in basic characteristics of gas hydrate [J]. Marine Geology Frontiers, 2020, 36(9): 1-10.]
- [2] 孙运宝,蔡峰,李清,等. 海洋浅表层天然气水合物资源评价[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(9): 87-93. [SUN Yunbao, CAI Feng, LI Qing, et al. Evaluation of natural gas hydrate resources in shallow marine sediments [J]. Marine Geology Frontiers, 2020, 36(9): 87-93.]
- [3] Pearson C, Murphy J, Hermes R. Acoustic and resistivity measurements on rock samples containing tetrahydrofuran hydrates: Laboratory analogues to natural gas hydrate deposits [J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 1986, 91(B14): 14132-14138.
- [4] 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): B11104.
- [5] Sun Y, Goldberg D, Collett T, et al. High-resolution well-log derived dielectric properties of gas-hydrate-bearing sediments, Mount Elbert gas hydrate stratigraphic test well, Alaska north slope [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(2): 450-459.
- [6] Li F G, Sun C Y, Li S L, et al. Experimental studies on the evolvement of electrical resistivity during methane hydrate formation in sediments [J]. *Energy & Fuels*, 2012, 26(10): 6210-6217.
- [7] Collett T S, Lee M W, Zyrianova M V, et al. Gulf of Mexico gas hydrate joint industry project leg II logging-while-drilling data acquisition and analysis [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 34(1): 41-61.
- [8] 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. [CHEN Yufeng, LI Dongliang, LIANG Deqing, et al. Relationship between gas hydrate saturation and resistivity in sediments of the South China Sea [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2013, 34(3): 507-512.]
- [9] Du Frane W L, Stern L A, Constable S, et al. Electrical properties of methane hydrate sediment mixtures [J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 2015, 120(7): 4773-4783.
- [10] Lim D, Ro H, Seo Y J, et al. Electrical resistivity measurements of methane hydrate during N₂/CO₂ gas exchange [J]. *Energy & Fuels*, 2017, 31(1): 708-713.
- [11] Liu H, Guo P, Zhan S Y, et al. Experimental investigation into formation/dissociation characteristics of methane hydrate in consolidated sediments with resistance measurement [J]. *Fuel*, 2018, 234: 985-995.
- [12] 卜庆涛,刘圣彪,胡高伟,等. 含水合物沉积物声学特性—实验模拟与数值模拟的对比分析[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(9): 56-67. [BU Qingtao, LIU Shengbiao, HU Gaowei, et al. Acoustic characteristics of hydrate-bearing sediments: a comparative analysis of experimental and numerical simulations results [J]. Marine Geology Frontiers, 2020, 36(9): 56-67.]
- [13] Lee M W, Collett T S. Gas hydrate saturations estimated from fractured reservoir at Site NGHP-01-10, Krishna-Godavari Basin,

- India [J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 2009, 114 (B7): B07102.
- [14] Cook A E, Anderson B I, Rasmus J, et al. Electrical anisotropy of gas hydrate-bearing sand reservoirs in the Gulf of Mexico [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 34 (1): 72-84.
- [15] Wang X J, Liu B, Qian J, et al. Geophysical evidence for gas hydrate accumulation related to methane seepage in the Taixinan Basin, South China Sea [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 168: 27-37.
- [16] 王秀娟, 钱进, LEE M. 天然气水合物和游离气饱和度评价方法及其在南海北部的应用[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37 (5): 35-47. [WANG Xiujuan, QIAN Jin, LEE M. Methods for estimation of gas hydrate and free gas saturations and application to the northern slope of south China sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37 (5): 35-47.]
- [17] Spangenberg E, Kulenkampff J. Influence of methane hydrate content on electrical sediment properties [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33 (24): L24315.
- [18] 陈强, 刘昌岭, 邢兰昌, 等. 孔隙水垂向不均匀分布体系中水合物生成过程的电阻率变化[J]. *石油学报*, 2016, 37 (2): 222-229. [CHEN Qiang, LIU Changling, XING Lanchang, et al. Resistivity variation during hydrate formation in vertical inhomogeneous distribution system of pore water [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37 (2): 222-229.]
- [19] 陈国旗, 李承峰, 刘昌岭, 等. 多孔介质中甲烷水合物的微观分布对电阻率的影响[J]. *新能源进展*, 2019, 7 (6): 493-499. [CHEN Guoqi, LI Chengfeng, LIU Changling, et al. Effect of microscopic distribution of methane hydrate on resistivity in porous media [J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2019, 7 (6): 493-499.]
- [20] Lei L, Liu Z C, Seol Y, et al. An investigation of hydrate formation in unsaturated sediments using X - Ray computed tomography [J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 2019, 124 (4): 3335-3349.
- [21] Walsh M, Ogra K, Hazineh W, et al. Laboratory and high-pressure flowloop investigation of gas hydrate formation and distribution using electrical tomography[C]//*Proceedings of the 8th International Conference on Gas Hydrates*. Beijing, 2014.
- [22] Priegnitz M, Thaler J, Spangenberg E, et al. Characterizing electrical properties and permeability changes of hydrate bearing sediments using ERT data [J]. *Geophysical Journal International*, 2015, 202 (3): 1599-1612.
- [23] 李彦龙, 孙海亮, 孟庆国, 等. 沉积物中天然气水合物生成过程的二维电阻层析成像观测[J]. *天然气工业*, 2019, 39 (10): 132-138. [LI Yanlong, SUN Hailiang, MENG Qingguo, et al. 2-D electrical resistivity tomography assessment of hydrate formation in sandy sediments [J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39 (10): 132-138.]
- [24] 孙海亮, 李彦龙, 刘昌岭, 等. 电阻层析成像技术及其在水合物开采模拟实验中的应用[J]. *计量学报*, 2019, 40 (3): 455-461. [SUN Hailiang, LI Yanlong, LIU Changling, et al. Electrical resistance tomography and the application in the simulation experiment of hydrate mining [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2019, 40 (3): 455-461.]
- [25] 李彦龙, 陈强, 吴能友, 等. 电阻率层析成像技术在岩芯尺度水合物可视化探测中的应用[J]. *地质论评*, 2020, 66 (S1): 84-86. [LI Yanlong, CHEN Qiang, WU Nengyou, et al. Core-scale application of electrical resistivity tomography technology on visual detection of natural gas hydrate [J]. *Geological Review*, 2020, 66 (S1): 84-86.]
- [26] 刘洋, 陈强, 邹长春, 等. 气体水合物生成实验过程动态监测: 一种新的ERT方法及其效果分析[J/OL]. *现代地质*, 2021 (2021-07-21). https://t.cnki.net/kcms/detail?v=3uoqIhG8C46NmWw7YpEsKHTPvOGrUOOqX1coEOzL8AGxgg6Tl8ilwBvSZDnERhKJYb36_bwg5WzpUaR_8lt7MjRABTSiWpU2. [LIU Yang, CHEN Qiang, ZOU Changchun, et al. Dynamic monitoring of experimental process of gas hydrate formation: a new ERT method and its effect analysis[J/OL]. *Geoscience*, 2021 (2021-07-21). https://t.cnki.net/kcms/detail?v=3uoqIhG8C46NmWw7YpEsKHTPvOGrUOOqX1coEOzL8AGxgg6Tl8ilwBvSZDnERhKJYb36_bwg5WzpUaR_8lt7MjRABTSiWpU2.]
- [27] 景鹏飞, 胡高伟, 卜庆涛, 等. 基于岩石物理模拟与声学实验识别孔隙—裂隙充填型水合物[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40 (6): 208-218. [JING Pengfei, HU Gaowei, BU Qingtao, et al. Identification of pore-filling and fracture-filling hydrate by petrophysical simulation and acoustic experiment [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40 (6): 208-218.]
- [28] 苏丕波, 梁金强, 张伟, 等. 南海北部神狐海域天然气水合物成藏系统[J]. *天然气工业*, 2020, 40 (8): 77-89. [SU Pibo, LIANG Jinqiang, ZHANG Wei, et al. Natural gas hydrate accumulation system in the Shenhu sea area of the northern South China Sea [J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40 (8): 77-89.]
- [29] Chen L T, Li N, Sun C Y, et al. Hydrate formation in sediments from free gas using a one-dimensional visual simulator [J]. *Fuel*, 2017, 197: 298-309.
- [30] Ren S R, Liu Y J, Liu Y X, et al. Acoustic velocity and electrical resistance of hydrate bearing sediments [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2010, 70 (1-2): 52-56.
- [31] Lei L, Seol Y, Choi J H, et al. Pore habit of methane hydrate and its evolution in sediment matrix-Laboratory visualization with phase-contrast micro-CT [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 104: 451-467.
- [32] Lei L, Seol Y. High-saturation gas hydrate reservoirs-a pore scale investigation of their formation from free gas and dissociation in sediments [J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 2019, 124 (12): 12430-12444.
- [33] Liu T, Liu X W, Zhu T Y. Joint analysis of P-wave velocity and resistivity for morphology identification and quantification of gas hydrate [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 112: 104036.
- [34] Peng C, Zou C C, Lu Z Q, et al. Evidence of pore - and fracture - filling gas hydrates from geophysical logs in consolidated rocks of the Muli area, Qinghai-Tibetan Plateau permafrost, China [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124 (7): 6297-6301.