

# 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

李彦龙<sup>1,2)</sup>, 陈强<sup>1,2)</sup>, 吴能友<sup>1,2)</sup>, 刘昌岭<sup>1,2)</sup>

1) 自然资源部天然气水合物重点实验室, 青岛海洋地质研究所, 山东青岛, 266071;

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, 山东青岛, 266071

**关键词:** 电阻率层析成像; ERT; 天然气水合物;  
可视化探测

天然气水合物是重要的非常规能源, 通过室内模拟实验模拟水合物赋存环境条件, 观察水合物在沉积物中的合成/分解过程及其物性演化规律是揭示实际天然气水合物成藏/分解规律的重要途径。天然气水合物成藏过程中沉积物体系内部变化过程的可视化在线监测已成为天然气水合物室内模拟的重要发展方向之一 (Wu Nengyou et al., 2018)。目前已经发展的 X-CT 成像、Raman 成像、电子显微成像、核磁共振成像等技术手段为孔隙尺度的天然气水合物成藏/分解机理研究提供了基础, 但大岩芯尺度 (~cm) 或中试尺度 (~m) 的水合物系统成像观测技术仍有待进一步完善。

电阻率层析成像 (ERT) 具有非侵入、测量快等优势, 可以应用 ERT 技术实时提取沉积物体系的电导率场分布, 从而对水合物在沉积物中的合成/分解速率、合成/分解界面研究提供支撑 (孙海亮等, 2019)。因此, ERT 技术能够为孔隙尺度的微观探测与现场尺度的宏观探测搭起桥梁, 在天然气水合物岩芯尺度模拟探测中具有非常广阔的应用前景。

## 1 ERT 技术与装置的建立

为了实现天然气水合物成藏/开采过程的实时在线可视化观测, 青岛海洋地质研究所团队研发了系列天然气水合物成藏/开采过程电阻率层析成像测试实验系统, 主要有全三维 521L 反应釜系统 (刘昌岭等, 2019)、 $\Phi 30 \times 1100$  mm 一维反应釜系统及  $\Phi 50 \times 360$  mm 的平面一维系统。本文主要介绍

$\Phi 50 \times 360$  mm 规格的实验系统及其应用。

该实验系统的核心是水合物合成层析成像监测反应釜, 反应釜内部规格为  $\Phi 50 \times 360$  mm, 耐压 15 MPa, 反应釜内沿高程 2/3、1/3 位置处各布设一圈 16 个电阻层析成像测量电极, 采用相邻激励模式进行测量: 即采用相邻电极作为电流输入和输出端, 测量其它每两个相邻电极之间的电压值 (16 个测量电极交替激励可获得 104 个电压测量值), 基于测量的电压值阵列 (李彦龙等, 2019), 结合线性反投影算法, 就可以快速获取截面的相对电导率分布图像。同时, 实验系统配备气液供给系统、温控系统及温压测量系统, 反应过程中通过温控系统强制控温, 使反应釜内的温度处于恒定状态, 通过气液供给系统向反应釜补压。利用该实验系统可以测试不同工况下沉积物体系中水合物的合成/分解过程及其伴随的电导率场分布状态, 从而指示天然气水合物的合成/分解位置、速率等参数。

## 2 ERT 探测沉积物中的结冰过程

水合物在沉积物中的生成是一个漫长的过程。与水合物合成过程相比较, 冰的实验周期短, 并且无需高压条件, 国内外很多学者也尝试应用冰的结融过程替代水合物生成/分解过程, 以提高水合物模拟实现效率, 简化测试流程。

为了模拟接近海底真实条件下的沉积物体系, 本文采用浓度为 3.5% 的 NaCl 溶液作为孔隙水, 沉积物为粒径 0.15~0.5 mm 的天然海砂, 模拟饱和砂土中冰的形成过程, 一方面验证电阻层析成像技术在天然气水合物储层可视化监测中的可行性, 另一

注: 本文为国家自然科学基金资助项目 (编号: 41976074) 和山东省泰山学者特聘专家资助项目 (编号: ts201712079) 的成果。

收稿日期: 2020-01-10; 改回日期: 2020-02-10; 责任编辑: 周健。DOI: 10.16509/j.georeview.2020.s1.033

作者简介: 李彦龙, 男, 1989 年生, 助理研究员, 油气田开发工程专业, Email: ylli@qnlm.ac。

方面探讨结冰过程对电导率成像结果的影响因素。进而为电阻层析成像系统在水合物成藏-分解方面的应用提供一定的参考。

在反应釜中安装好样品后,开启恒温箱并设定温度为 $-10^{\circ}\text{C}$ ,开始降温结冰。图 1 为持续降温结冰过程典型时刻的电导率图像。总体而言,结冰过程导致沉积物体系电导率非均匀降低。导致沉积物截面上不同区域电导率分异的主要原因是结冰过程及其对盐离子重新分布的双重影响。冰生成过程中导致截面盐离子重新分布,沉积物外围盐离子浓度显著高于中心区域,这种盐离子浓度差只有在长时间的浓度差作用下,逐渐扩散才能消除。

由此推断,ERT 不仅可以指示沉积物体系结冰过程(开始结晶、大量生成、生成结束),而且能够定性识别冰在沉积物内部的生成位置。由于结冰过程与水合物合成过程有一定的相似性,因此电阻率层析成像技术可以在岩芯尺度或中试尺度用来识别天然气水合物在沉积物中的合成阶段、合成位置、饱和度等信息,从而为水合物成藏过程模拟提供一定的数据支撑。

### 3 ERT 模拟泥底辟外围水合物的成藏过程

泥底辟既能为水合物成藏提供充分的气源,又能促使地层温度场改变,影响水合物藏的稳定性。如南海北部海域天然气水合物赋存区内泥底辟发育,并与围岩不整合接触形成明显的直立柱状构造,是导致该区域海域天然气水合物藏横向分布表现出强非均质性特征的重要影响之一(苏明等, 2014; 杨睿等, 2017)。因此,探索泥底辟外围水合物形成过程及其动态分布规律对于丰富天然气水合物动态成藏系统具有重要意义。

为此,笔者首先将饱和盐水(3.5%)的天然海滩砂沉积物装入反应釜并压实,取此时( $1^{\circ}\text{C}$ )的沉积物截面平均电导率值作为水合物生成过程的电阻层析测量参考值。然后,从反应釜下端盖中央缓慢向反应釜内注入纯度为 99.9%、温度为  $15^{\circ}\text{C}$  的甲烷气体,注入过程中排出反应釜内的部分孔隙水,当反应釜内部压力达到设定值(8 MPa)时,沉积物孔隙中的气水处于不均匀分布状态,从而达到模拟泥底辟热流体上侵过程的目的。

为了识别沉积物体系中水合物的优先合成位置及其随时间的转移规律,据前文所述的层析成像

获取方法,获取典型时刻的电导率图像分布规律,并用起始时刻电导率场减去当前电导率场做差值,即可得到电导率相对变化量场图(图 2)。

由图 2 可知,随着时间的持续,电导率场发生非均质变化,指示水合物在沉积物截面的非均质生成过程。电导率相对变化量场图正异常区域随时间不断发生变化,一方面指示沉积物体系中水合物的合成过程始终处于非均质状态,水合物生长位置随着气-水消耗过程始终在发生变化,另一方面也说明在盐水沉积物体系中,由于排盐效应和水合物合成本身的竞争的作用会导致局部电导率值和体电导率值的波动,但整体电导率场仍然受水合物合成作用的绝对控制,随着水合物合成量的增大,电导率场图正异常区域不断转移并扩大。电导率场图负异常区域始终存在但是不断被压缩,一方面证明排盐效应贯穿水合物合成过程始终,另一方面也进一步说明沉积物体系的电导率场受水合物合成作用的主导控制作用。本文实验周期内模拟泥底辟外围水合物生成过程中边界效应的影响较弱,模拟结果能较好的反应气体侧向扩散过程中泥底辟核外沉积物中水合物的环带状分布特征。

### 4 主要结论

ERT 技术在岩芯尺度的天然气水合物合成-分解过程观测方面具有非常广阔的应用前景,能够为孔隙尺度室内建模和矿场尺度现场建模搭起桥梁。可为多种工况的水合物成藏模式研究和开采机理研究提供依据。然而,为了满足不同复杂工况下的天然气水合物成藏-开采过程模拟,ERT 技术在软硬件方面都需要进一步升级改造,测试反演基础理论也需要进一步改进。如:如何将电导率偏移场准确的转化为水合物饱和度场;如何针对数据采集过程改善硬件系统,提高测量信号的精度、信噪比和工作的稳定性;如何在测量速率和测量精度之间权衡等。

### 参 考 文 献 / References

- 李彦龙,孙海亮,孟庆国,刘昌岭,陈强,邢兰昌. 2019. 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. 天然气工业, 39 (10): 132~138.
- 刘昌岭,李彦龙,刘乐乐,胡高伟,陈强,吴能友,孟庆国. 2019. 天然气水合物钻采一体化模拟实验系统及降压法开采初步实验. 天然气工业, 39 (6): 165~172.

苏明, 杨睿, 吴能友, 王宏斌, 梁金强, 沙志彬, 丛晓荣, 乔少华. 2014. 南海北部陆坡区神狐海域构造特征及对水合物的控制. 地质学报, 8(3): 318~326.

孙海亮, 李彦龙, 刘昌岭, 邢兰昌, 孟庆国. 2019. 电阻层析成像技术及其在水合物开采模拟实验中的应用. 计量学报, 40 (3): 455~461.

杨睿, 刘丽华, 郭攀, 刘杰. 2017. 琼东南海域海底浅层水合物层识别研究. 地质论评, 63(supp.1): 185~186.

Wu Nengyou, Liu Changling, Hao Xiluo. 2018. Experimental simulations

and methods for natural gas hydrate analysis in China. China Geology, 1(1): 61~71.

**LI Yanlong, CHEN Qiang, WU Nengyou, LIU Changling:**  
**Core-scale application of electrical resistivity tomography technology on visual detection of natural gas hydrate**  
**Keywords: electrical resistivity tomography; ERT; natural gas hydrate; visual detection**

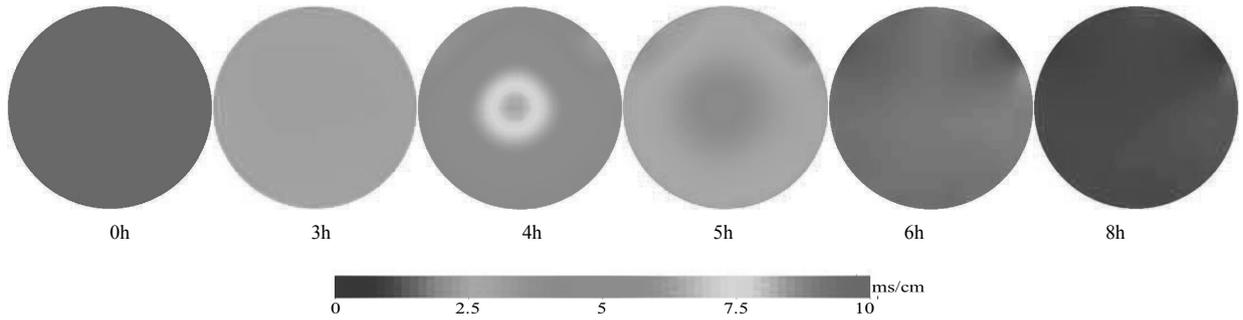


图 1 冰生成过程各时刻电导率图像

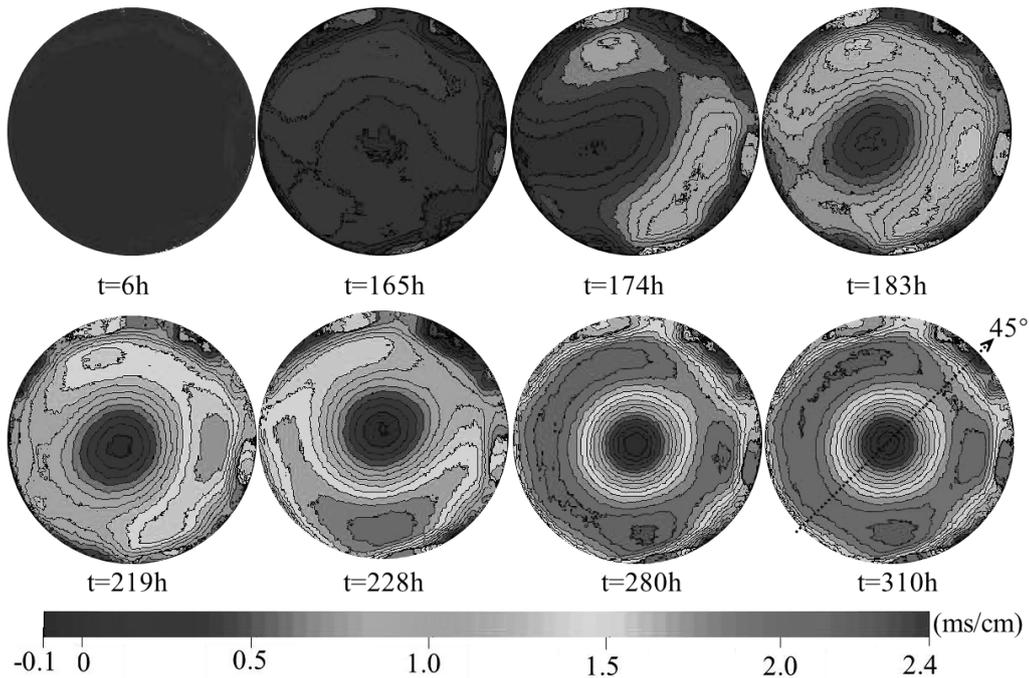


图 2 模拟泥底辟外围水合物生长过程中的电导率偏移场变化规律