

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2020.05.010

# 沉积物中四氢呋喃水合物生成 / 解离过程的电阻率演变试验研究

马淑芝<sup>1,2</sup>, 李鸿博<sup>2</sup>, 孟航<sup>2</sup>, 张致能<sup>2</sup>

(1. 武汉地质资源环境工业技术研究院有限公司, 湖北 武汉 430078;

2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 天然气水合物是一种发展前景广阔的新型战略资源, 有关水合物开采的地质探测和监测技术受到广泛关注。研究沉积物中水合物生成和分解过程电阻率的变化特征, 对天然气水合物勘探和安全高效开采具有重要意义。本文利用自制的模型试验装置, 利用四氢呋喃水溶液, 模拟天然气水合物, 通过预埋在沉积物中的电阻率测试元件, 测量了水合物形成与分解过程中模拟沉积物中的电阻率, 据此分析了沉积物中水合物成核、形成与分解过程中各个阶段电阻率的变化规律, 并研究了不同四氢呋喃和水配比对水合物生成与分解过程中的阶段特征数据的影响规律。研究表明: 沉积物中电阻率与水合物含量密切相关, 电阻率不仅能够反映水合物的生成和分解过程, 而且可以直观反映沉积物中水合物的含量变化。本文揭示的电阻率演变特征对于天然气水合物开采过程的监测具有一定指导价值。

**关键词:** 四氢呋喃水合物; 生成与分解; 沉积物; 电阻率; 水合物饱和度; 模型试验

**中图分类号:** O742+.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2029 (2020) 05-0064-08

作为一种发展前景广阔的新型能源, 天然气水合物极有可能成为 21 世纪的新兴战略资源<sup>[1]</sup>, 有关水合物开采的地质探测和监测技术受到广泛研究。相对于临近的土层而言, 天然气水合物储层通常具有很高的电阻率。这种电性特征上的异常已被用来识别和评价天然气水合物储层<sup>[2-3]</sup>。在天然气水合物开采过程中, 水合物分解会导致固态水合物发生相变, 生成天然气和液态水, 气液两相流体的产生以及固体水合物的减少都会直接影响沉积物的电阻特性。因此, 可以通过实时监测电阻率的空间分布及演变特征, 获取实时水合物分解分布的状况信息。研究沉积物中水合物生成及分解过程的电阻率变化规律对海底天然气水合物的勘探与开采具有重要意义, 相关领域的研究与探索也倍受关注<sup>[3-6]</sup>。

白云风和赵仕俊等<sup>[3,7]</sup>设计了一种天然气水合物模拟试验装置, 模拟多孔介质中天然气水合物的生成和分解过程, 并能够实时测量天然气水合物电阻率的变化。陈玉凤等<sup>[8-9]</sup>采用南海海底的砂作为沉积物, 并用氯化钠溶液饱和, 在高压低温环境下通入高纯度甲烷气体生成水合物沉积物, 测量并分析了沉积物中水合物成核、形成与分解过程中的沉积物电阻率变化规律, 分析了水合物饱和度与沉积物电阻率的关系。李淑霞等<sup>[10-11]</sup>向石英砂中加入一定浓度的盐水模拟海底沉积物, 注入甲烷气体至预先设计的压力, 然后利用等容降温的方法生成水合物, 利用降压的方法使天然气水合物分解, 测量天然气水合物在形成和分解过程中的温度、压力和电阻率, 研究了水合物在生长和分解过程中的电阻率变化特征。以上结果

收稿日期: 2020-06-23

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0307700, 2017YFC0307705); 国家自然科学基金资助项目(41672309)

作者简介: 马淑芝(1974-), 女, 博士, 教授, 主要从事地质工程专业的教学与研究。E-mail: maszyy@163.com

证明, 电阻率随水合物变化存在特定的关联关系, 通过电阻率的测量可以反映水合物在沉积层中的状态及其变化, 对于水合物开采具有一定的指导意义。但上述试验研究中大都采用甲烷—水体系作为模拟天然气水合物的介质, 鉴于生成甲烷水合物温度低、压力高, 致使试验条件要求高, 设备操作难度较大, 且往往难于对水合物分解与外界因素的演变关系进行试验。

本文利用自制的一维模型试验装置, 采用中砂细砂混合物作为沉积物, 尝试用四氢呋喃 (Tetrahydrofuran, THF) 替换甲烷, 模拟水合物的形成及分解过程。在特定的温度环境下生成 THF 水合物, 加热使其分解, 通过对电阻率测试数据的分析, 研究不同 THF 和水配比情况下 THF 水合物在生成与分解过程中的阶段特征, 推测引起沉积物电阻率变化的作用机理。本文结果将有助于建立沉积层电阻率变化与水合物形成/分解过程之间的关联, 为电阻率法测定和监测天然气水合物的开采提供分析依据。

## 1 室内模型试验

### 1.1 试验方法

THF 可以和水在任意浓度下生成 II 型气体水合物<sup>[12]</sup>, 与甲烷水合物的各项物性指标相近, 且试验室比生成甲烷水合物具有易操作性, 因此理论上 THF 可替代甲烷, 用于与天然气水合物相关的试验研究。本次试验采用 THF 水合物进行模型试验研究。

采用一维模型试验, 试验土层分含水合物沉积层 (模拟水合物储层) 和上覆层。沉积层土料参考已有文献<sup>[13-14]</sup>中生成 THF 水合物沉积物的颗粒级配, 选用粒径 0.075 ~ 0.25 mm 的细砂与粒径 0.25 ~ 0.5 mm 的中砂各 50% 组成, 上覆层以模拟开采过程中上覆土层对水合物分解过程中压重和气体阻断效应为目的, 土料采用黏土。不同成因不同区域的水合物地层组合千差万别, 储层和上覆层的厚度比差异大<sup>[15]</sup>, 本次模型试验在考虑自然界水合物储层和上覆层地质结构特征的前提

下, 为获取更显著的水合物生成与分解过程中电阻率的演变特征, 设计水合物沉积层厚度 17 cm, 上覆层厚度 6 cm。

在上述条件下, 通过改变试验体系的温度, 测定不同水合物饱和度下水合物分解过程中沉积物的电阻率演变, 并对其进行分析与讨论。分别设定在完全生成后或开始分解前水合物饱和度 (孔隙中水合物体积占孔隙总体积的百分比, 也是生成过程和分解过程中水合物饱和度最大值, 下文简称水合物饱和度) 为 40%, 60%, 80%, 100%, 根据四氢呋喃和水的物质量等之间关系, 得出配置用于生成不同水合物饱和度的溶液的水与四氢呋喃体积比<sup>[4]</sup>, 见表 1。

表 1 研究水合物饱和度的试验方案

水合物饱和度	100%	80%	60%	40%
$V_{H_2O}/V_{THF}$	3.78	4.98	6.97	10.95

### 1.2 试验装置

试验在圆柱形有机玻璃容器 (内径 20 cm, 高 50 cm) 内进行, 通过降温/升温操作, 模拟沉积层中 THF 水合物生成/分解, 实时测量并记录过程中的电阻率变化。土体电阻通过电阻率测试元件测量, 电阻率传感器及数据采集卡由广州磐索公司提供, 传感器直径 16 mm, 长度 40 mm, 采集卡采样频率 15 Hz。热源为边长 10 cm, 厚度 4 mm 的正方形防水硅胶加热板, 输出功率 45 W, 加热温度由加热板底部的温度探头连接温控器进行控制, 低温冷源为 BC/BD-207DTE 美菱牌冰柜。温度控制系统为控温范围 -20 ~ 200℃ 的智能数显温控器。装置示意图和实物分别见图 1 和图 2。

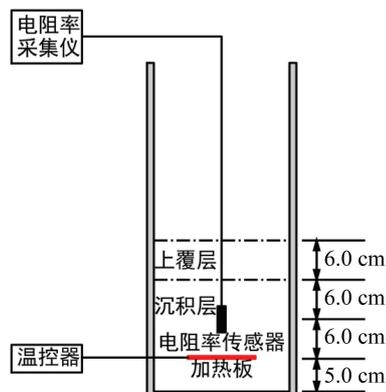


图 1 试验装置示意图



图2 有机玻璃筒及试验样品

### 1.3 试验步骤

1.3.1 样品制备 先向有机玻璃容器中填入约为5 cm 配制好的砂土，用小锤砸实后在表面用铁丝划毛，再按照上述方法依次向筒中填土，共计填入四次，制备好的沉积层厚度为17 cm。在填土的过程中按图1所示位置埋设加热板和电阻率传感器，加热板连接线从试验玻璃容器侧壁小孔穿过，电阻率传感器连接线从玻璃容器中心向上直接引出。用胶头滴管将按表1配制好的THF溶液小心滴入砂土层，直至溶液刚好浸没沉积层顶部，滴入过程中应保持缓慢低速，避免产生冒泡、跑砂等现象，保证TFH溶液均匀地饱和沉积层。

1.3.2 水合物生成 借鉴张大平<sup>[16]</sup>研究结果，为保证较短时间合成THF水合物又能避免冰晶的生成，水合物生成过程中控温至 $-7^{\circ}\text{C}$ 。将装有沉积层的玻璃试样筒放入设定温度为 $-7^{\circ}\text{C}$ 的外置冷源，冷冻48 h形成水合物沉积层。

1.3.3 水合物分解 将浸泡在水中48 h以上饱和黏土装入已形成水合物沉积层的玻璃筒内，压实制备6 cm厚的上覆层。此操作在冷源内进行，避免沉积层温度的变化。考虑到分解过程中会释放THF气体，水合物模拟地层制备好后，将试验设备搬至通风情况良好的环境。启动加热板对水合物进行分解。沉积层温度逐步上升，当温度达到了四氢呋喃水合物的相平衡温度（在一个标准大

气压下的相平衡温度为 $4.4^{\circ}\text{C}$ ），固态四氢呋喃水合物开始逐步分解。为快速完成分解试验，加热板温控设置在 $110^{\circ}\text{C}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 THF水合物生成过程与讨论

2.1.1 THF水合物生成过程的阶段性特征 为研究THF水合物在生成过程中沉积物电阻率的变化特征及水合物饱和度对其影响，按生成水合物过程中电阻率—时间曲线的特征，在分析其解离过程的基础上，将其进行分段，如图3所示。

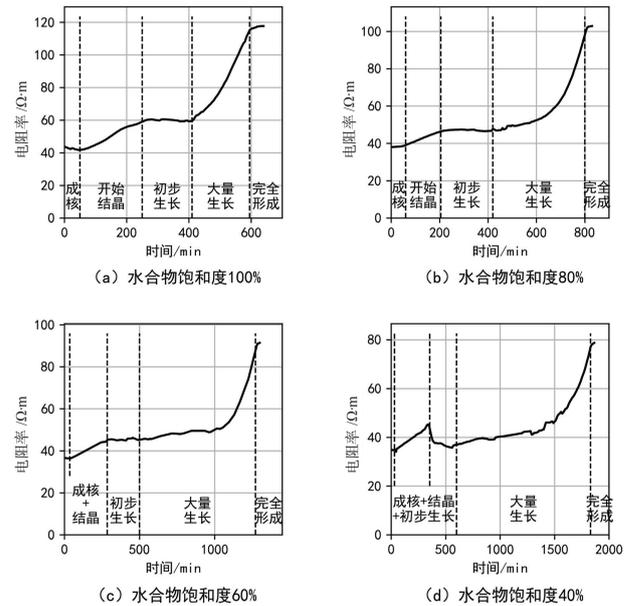


图3 水合物生成过程中电阻率变化曲线图

从图3可以看出，在降温过程中，水合物生成过程中的电阻率变化大致相同，可分为5个阶段。在短暂的减小后开始上升，待增大至一定值后上升速率大幅下降类似形成一个持续时间较长的平台期，此后电阻率以较大的上升速率快速增大，直至一个稳定值后趋于平缓。随着水合物饱和度的减小，电阻率的平均上升速率减小，电阻率达到稳定所需时间延长，最终稳定值减小。

以上特征反映了THF水合物形成的不同阶段。以水合物饱和度100%（图3-a）为例，第一阶段（0~50 min），电阻率缓慢减小，由43.8减小至

41.7  $\Omega\cdot\text{m}$ , 减少速率为 2.50  $\Omega\cdot\text{m}/\text{h}$ 。此阶段体现了 THF 水合物晶体成核过程。随着沉积物温度的降低, 逐渐接近常压下 THF 水合物的结晶温度, 沉积物孔隙中弱极性的水和 THF 开始成核, 造成溶液中的残余离子浓度有所增大, 导致电阻率有所减小。

第二阶段 (50 ~ 250 min), 电阻率明显增大。由 41.72 增长至 59.04  $\Omega\cdot\text{m}$ , 平均增长速率为 5.20  $\Omega\cdot\text{m}/\text{h}$ 。此阶段 THF 开始结晶生长 (晶核不断形成、晶体开始生长), 孔隙中的液态水被导电性较差的 THF 水合物晶体所替换。此时, 水合物成核产生的离子溶度增加造成电阻率减小的影响效应小于水合物晶体形成造成电阻率增大的影响效应, 后者占据主导地位, 沉积物电阻率逐渐增大。

第三阶段 (250 ~ 410 min), 电阻率基本稳定, 在 59.04 ~ 60.58  $\Omega\cdot\text{m}$  范围内波动。此阶段水合物进一步生长, 孔隙中的液态水和 THF 持续结晶, 结晶平衡的残余离子溶度增大、电阻率减小的效应, 与水合物晶体形成造成电阻率增大的影响效应逐渐平衡, 沉积物电阻率保持稳定。

第四阶段 (410 ~ 595 min), 电阻率随时间快速增长, 由 59.53 增长至 115.00  $\Omega\cdot\text{m}$ , 平均增长速率为 17.99  $\Omega\cdot\text{m}/\text{h}$ 。此阶段水合物大量生长, 随着反应时间的进一步增长, 四氢呋喃水合物晶体逐渐增多, 水合物晶体逐步占据全部孔隙, 削弱了孔隙连通性, 使得残余水溶液不能彼此连通,

导致沉积物电阻率快速增大。

第五阶段 (595 ~ 644 min), 电阻率逐渐保持平稳阶段, 电阻率自 115.00 缓慢增长至 117.72  $\Omega\cdot\text{m}$ , 并基本维持稳定不变。此阶段水合物完全形成, 反应进行了约 11 h, 孔隙溶液中的四氢呋喃和纯水基本消耗完毕, 原本分散于各孔隙内的四氢呋喃水合物已相互联结生长, 趋于致密化整体, 沉积物电阻率不再增长。特别是在电阻率基本稳定以后, 电阻率传感器无法采集数据。这可能是由于完全形成结晶物以后, 继续降温会使得固体发生体积变化, 造成土体与传感器之间的不良接触形成的。

对比图 3 中不同水合物饱和度的电阻率变化曲线, 虽然水合物生成过程中电阻率变化的大致趋势相同, 但也存在一定区别。水合物饱和度越高, 分段特征越明显。考虑到试验时为了达到水合物快速生成, 将样品至于  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$  的环境, 在该温度下, 除水合物生成外, 也会有冰晶生成, 水合物饱和度越低, 水合物生成曲线的阶段特征受冰晶生成的影响越大, 使得电阻率变化呈现不规则状 (图 3-d)。

2.1.2 不同水合物饱和度对生成过程特征数据的影响 为了更好地反映不同水合物饱和度对生成过程的影响, 将 2.1.1 中典型分段结果特征数据随不同水合物饱和度的变化进行汇总 (表 2), 并绘制图 4。

表 2 不同水合物饱和度生成过程特征数据统计表

饱和度	电阻率初值 $\Omega\cdot\text{m}$	电阻率终值 $\Omega\cdot\text{m}$	生成期 *			大量生长期		
			时长 min	电阻率终值 $\Omega\cdot\text{m}$	增长速率 $\Omega\cdot\text{m}/\text{h}$	起始时间 min	时长 min	增长速率 $\Omega\cdot\text{m}/\text{h}$
100%	43.80	117.72	595	115.00	7.45	410	185	17.99
80%	38.01	102.85	800	97.92	4.86	420	380	8.24
60%	36.61	91.40	1272	88.00	2.58	500	772	3.32
40%	34.86	78.73	1830	76.88	1.44	600	1230	1.95

\* 注: 生成期为完全生成前的整个过程, 包括前 4 个阶段。

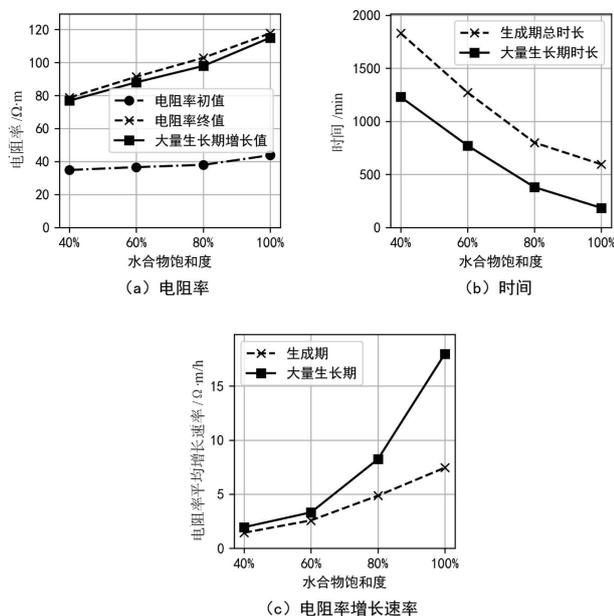


图4 生成过程特征数据随水合物饱和度变化曲线图

从图3、图4和表2可以看出:

(1) 在试验开始,水合物还未形成时,沉积物电阻率初值随水合物饱和度降低依次下降,但总体差别不大(图4-a);

(2) 在THF水合物生成过程结束后,沉积物电阻率稳定值也随水合物饱和度降低而下降,沉积物的电阻率与水合物饱和度呈正相关(图4-a);

(3) 随水合物饱和度降低,水合物生成过程中各阶段耗时基本都呈现增加趋势,生成期总时长和大量生长期时长与水合物饱和度基本呈负相关(图4-b);

(4) 随水合物饱和度降低,整个生成期和大量生长期的电阻率增长平均速率呈指数型降低趋势(图4-c)。

## 2.2 THF水合物分解过程与讨论

随着四氢呋喃水合物的分解,电阻率较大的固态水合物分解成电阻率较小的液态四氢呋喃和水,导致沉积物电阻率降低,分解过程中电阻率随时间变化曲线如图5所示。

2.2.1 THF水合物分解过程的阶段性特征 在分解试验初期,电阻率传感器仍无法有效采集数据,随着加热进行,电阻率传感器与含水合物沉积物重新紧密接触,开始正常获得数据。初始有效电

阻率数据与水合物生成过程结束时电阻率数据基本相等。仍以水合物饱和度100%的试验结果为例分析水合物分解过程(图5-a),根据分解过程中电阻率的变化曲线特征,将整个过程分为四段,分别为:

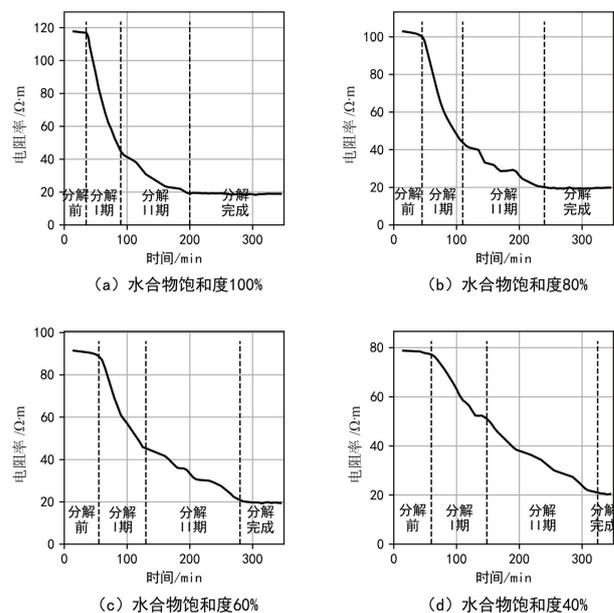


图5 水合物分解过程中电阻率变化曲线

第一阶段(0~35 min):电阻率基本保持不变,此阶段为分解前水合物还未达到分解需要的相平衡条件,没有产生分解。

第二阶段(35~90 min):随时间电阻率迅速下降,此阶段为分解I期,由于已达到分解条件且沉积物中水合物含量较高,单位时间分解量大,电阻率下降速率大。

第三阶段(90~200 min):电阻率下降速率随分解时间的延续逐渐减小,此阶段为分解II期,随着分解进展,沉积物中水合物含量下降,单位时间分解总量持续下降,电阻率下降速率慢慢降低,曲线趋于平缓。

第四阶段(200~345 min):电阻率随时间变化幅度很小,此阶段为分解完成后的平稳期。

分解期包括第二阶段(分解I期)与第三阶段(分解II期),两个阶段历时约1:2,而相应电阻率下降比为3:1,说明分解初期分解速度远远超过分解后期。对比不同水合物饱和度分解过程电阻率随时间的变化曲线,都可明显的分为电阻率基

本不变的分解前期、电阻率不断下降的分解期和电阻率基本不变的分解完成期, 但分解期 I、II 随着水合物饱和度的降低, 分段越不明显。图 5-b、图 5-c 和图 5-d 中 (水合物饱和度为 80%、60%、40%) 分解期均是按 100% 水合物饱和度的第二、三阶段同样的时间比 (1:2) 划分成分解 I 期和分

解 II 期。

2.2.2 不同水合物饱和度对分解过程特征数据的影响 为了更好地反映不同水合物饱和度对分解过程的影响, 将 2.2.1 中典型分段结果的特征数据随不同水合物饱和度的变化进行汇总 (表 3), 并绘制图 6。

表 3 不同水合物饱和度分解过程特征数据统计表

饱和度	分解开始前时间 min	分解持续时间 min	电阻率终值 $\Omega \cdot m$	分解期电阻率下降值 $\Omega \cdot m$	分解 I 期占分解期下降电阻率比率 %	分解 I 期电阻率变化速率 $\Omega \cdot m/h$	分解 II 期电阻率变化速率 $\Omega \cdot m/h$	分解期电阻率降低速率 $\Omega \cdot m/h$
100 %	35	165	18.88	97.84	73.67	78.63	14.05	35.58
80 %	45	195	19.77	80.04	70.34	51.97	10.96	24.63
60 %	55	225	19.44	67.97	63.97	34.78	9.80	18.13
40 %	60	265	20.41	56.22	46.64	17.82	10.19	12.73

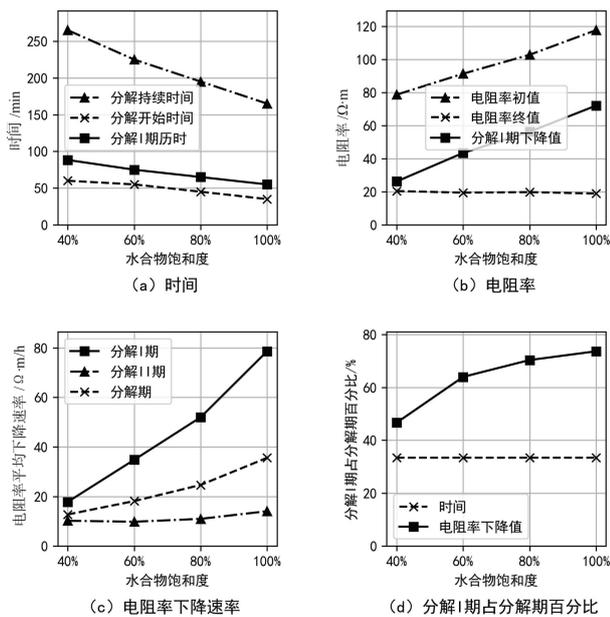


图 6 分解过程特征数据随水合物饱和度变化曲线图

从图 5、图 6 和表 3 可以看出:

(1) 随水合物饱和度的增大, 开始分解所需要的时间、分解持续时间和分解 I 期历时均依次减小 (图 6-a), 基本呈负相关。

(2) 在四氢呋喃水合物分解过程结束后, 不同水合物饱和度的沉积物电阻率稳定值均比同一样品在生成水合物之前的初值要小; 不同水合物饱和度分解后电阻率大小差别很小, 且与水合物饱和度之间并非单调增或减 (图 6-b)。

(3) 随水合物饱和度的增大, 分解 I 期电阻率下降值依次增大, 参与分解的水合物多, 电阻率下降值大 (图 6-b)。

(4) 随着水合物饱和度的增大, 分解过程中 (特别是分解 I 期) 电阻率的下降速率越来越大 (图 6-c), 同时也越早达到稳定值 (图 6-a)。

(5) 在设定分解 I 期和分解 II 期时间比相同的条件下 (分解 I 期占分解期总时长的 1/3), 随水合物饱和度的增大, 分解 I 期电阻率下降值占总分解期电阻率下降值的比例不断增大 (图 6-d), 反映出水合物饱和度越大, 分解初期分解越强烈, 整个分解进程更紧凑。

以上试验结果表明, 水合物生成时沉积物电阻率先减小再增大后逐渐稳定, 水合物在分解过程中, 电阻率逐渐步小, 在生成与分解过程中电阻率曲线特征与文献<sup>[8-11]</sup>类似, 说明四氢呋喃可以替代甲烷用于室内水合物电阻率相关的试验研究, 且更简单易操作。

### 3 结论

本文考虑沉积层水合物含量不同, 针对水合物生成与分解过程中电阻率变化规律进行了模型试验和分析。水合物的生成和解离过程中电阻率呈现规律性变化, 与水合物结晶、水溶液离子浓

度和土层内水合物饱和度相关。

水合物低温生成过程中电阻率在短暂的减小后开始上升,待增大至一定值后,基本不变,形成一个持续时间较长的平台期,此后电阻率以较大的上升速率快速增大,直至生成全部结晶。可分为水合物晶体成核、THF 开始结晶生长、水合物进一步生长、水合物大量生长和水合物完全形成五个阶段。随水合物饱和度越低,水合物生成过程耗时越长,电阻率初始值和结束时电阻率稳定值越高,电阻率增长平均速率越低。

水合物分解过程中,沉积层中电阻率先基本不变后迅速下降,总体上曲线斜率由大变小,下降中途斜率可能会有小波动,电阻率逐渐下降至

稳定值后保持不变。随着沉积物中的水合物饱和度增加,电阻率传感器初始电阻率值变大,电阻率的下降速率增快,趋于稳定值所需要的时间减少。

沉积物中四氢呋喃水合物生成与分解过程中电阻率的变化规律与天然气水合物规律一致,表明可以利用四氢呋喃代替甲烷,进行与天然气水合物电阻率测试及由电阻率分析水合物生成与分解过程及机制等相关的室内研究。本文揭示的电阻率演变特征对于研究天然气水合物形成与分解机理、水合物在自然界中的分布规律等具有重要的理论意义,同时,对于天然气水合物的勘探及开采过程的监测具有一定指导价值。

#### 参考文献:

- [1] Chong Z, Yang S, Babu P, et al. Review of natural gas hydrates as an energy resource: prospects and challenges[J]. Appl. Energy. 2016, 162: 1633-1652.
- [2] 胡旭东. 含天然气水合物泥质砂岩储层声波速度及电阻率模型研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- [3] 白云凤. 天然气水合物电阻率测量方法的研究 [D]. 北京: 中国石油大学, 2009.
- [4] 李鸿博. 水合物分解引发沉积地质环境参量场演变的模型实验研究 [D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2020.
- [5] 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.
- [6] 李小森, 冯景春, 李刚, 等. 电阻率在天然气水合物三维生成及开采过程中的变化特性模拟实验 [J]. 天然气工业, 2013, 33(7): 18-23.
- [7] 赵仕俊, 白云凤, 张娟. 基于电阻率测量一维天然气水合物模拟试验装置 [J]. 石油机械, 2009, 37(3): 16-19.
- [8] 陈玉凤, 周雪冰, 梁德青, 等. 沉积物中天然气水合物生成与分解过程的电阻率变化 [J]. 天然气地球科学, 2018, 29(11): 1672-1678.
- [9] 陈玉凤, 李栋梁, 梁德青, 等. 含天然气水合物的海底沉积物的电学特性实验 [J]. 地球物理学进展, 2013, 28(2): 1041-1047.
- [10] Li S, Xia X, Xuan J, et al. Resistivity in Formation and Decomposition of Natural Gas Hydrate in Porous Medium[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2010, 18(1): 39-42.
- [11] 李淑霞, 夏晔冉, 郝永卯, 等. 电阻率测试技术在沉积物-盐水-甲烷水合物体系中的应用 [J]. 实验力学, 2010, 25(1): 95-99.
- [12] Pinder K. A kinetic study of the formation of the tetrahydrofuran gas hydrate[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering 1965, 43(5): 271-274.
- [13] 张磊. 含四氢呋喃水合物沉积物力学性质实验研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2012.
- [14] 张旭辉, 鲁晓兵, 王淑云, 等. 四氢呋喃水合物沉积物静动力学性质试验研究 [C]// 第七届全国青年岩土力学与工程会议. 北京, 2011: 303-308.
- [15] Li H, Ma S. Effect of thickness ratio of overlaying layer to hydrate bearing stratum upon the settlement of seabed sediments during Natural Gas Hydrate Dissociation[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 526, 012135.
- [16] 张大平. 加速合成四氢呋喃水合物实验研究及水合物地层钻探扰动有限元分析 [D]. 吉林: 吉林大学, 2011.

## Experimental Study on the Evolution of Resistivity in the Formation/Dissociation Process of Tetrahydrofuran Hydrate in Sediments

MA Shu-zhi<sup>1,2</sup>, LI Hong-bo<sup>2</sup>, MENG Hang<sup>2</sup>, ZHANG Zhi-neng<sup>2</sup>

1. Wuhan ITRI of GEO-Resources and Environment Co.,Ltd, Wuhan 430078, China;

2. Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** Natural gas hydrate is a novel strategic resource with greater development prospects. Geological exploration and monitoring technology related to hydrate exploitation has received much research attention across the world. The formation and decomposition of hydrates in submarine sediments will cause changes in the electrical resistivity of sediments. Therefore it is of great significance to investigate the evolution characteristics of the changes in electrical resistivity during the formation and decomposition of hydrates in sediments, beneficial for the exploration and the safe and efficient extraction of natural gas hydrates. This paper uses the tetrahydrofuran aqueous solution to simulate natural gas hydrates on a home-built apparatus on lab scale. The transient electrical resistivity during gas hydrate formation/decomposition is being measured with resistivity measuring units that have been pre-buried in the sediments. Then this paper deduces the changes in electrical resistivity over various stages of the nucleation, formation and decomposition of hydrates in sediments as well as the influence of different tetrahydrofuran and water ratio on the characteristic data of different stages during hydrate formation and decomposition. The results show that the resistivity in sediments is closely related to the hydrate content. The resistivity not only reflects the formation and decomposition process of hydrate, but also directly reflects the content change of hydrate in sediment. The characteristics of electrical resistivity evolution revealed in this paper will help monitor the existence status of natural gas hydrate during the exploitation process.

**Key words:** tetrahydrofuran hydrate; formation and decomposition; sediment; electrical resistivity; hydrate saturation; model experiment