

基于井间 ERT 的地层 CO₂ 迁移与泄漏监测实验研究

陈家辉¹, 邢兰昌^{1,2}, 贾宁洪^{3,4}, 姬泽敏^{3,4}, 郭红⁵

- (1. 中国石油大学(华东) 控制科学与工程学院, 山东 青岛 266580;
2. 中国石油大学(华东) 智能感知与测控技术山东省工程研究中心, 山东 青岛 266580;
3. 提高油气采收率全国重点实验室, 北京 100083; 4. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;
5. 海军航空大学青岛校区, 山东 青岛 266041)

摘要: 为解决井间 ERT 技术在 CO₂ 地质封存监测中实验方案以静态模拟为主、缺乏对 CO₂ 迁移和泄漏动态过程的模拟方法等问题, 搭建了井间 ERT 实验测试系统, 主要包括透明样品容器、CO₂ 注入控制装置、均匀光源、图像采集设备、SYSCAL PRO 高密度电法仪以及 Res2DInv 反演软件, 设计了“静态验证—动态实测”的实验方案, 静态实验阶段采用橡皮模拟 CO₂ 来验证井间 ERT 系统对 CO₂ 聚集区中心位置和面积的识别精度, 动态实验阶段以粗砂和细砂(石英砂)分别模拟 CO₂ 的储层和盖层, 开展了 CO₂ 迁移和泄漏模拟监测实验; 实验结果表明, 井间 ERT 实验系统可准确地捕捉 CO₂ 的分布范围、迁移轨迹及泄漏路径, 验证了所搭建 ERT 系统的可用性及所设计实验方案的可行性。

关键词: 井间 ERT; CO₂ 迁移; CO₂ 泄漏; 监测; 模拟实验

Experimental Study on Monitoring of CO₂ Migration and Leakage in Subsurface Based on Cross-Borehole ERT Technology

CHEN Jiahui¹, XING Lanchang^{1,2}, JIA Ninghong^{3,4}, JI Zemin^{3,4}, SHAO Hong⁵

- (1. College of Control Science and Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;
2. Shandong Provincial Engineering Research Center of Intelligent Sensing and Measurement and Control Technology, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;
3. State Key Laboratory of Enhanced Oil and Gas Recovery, Beijing 100083, China;
4. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China;
5. Qingdao Campus of Naval Aeronautical University, Qingdao 266041, China)

Abstract: Given the limitations in current cross-borehole Electrical Resistivity Tomography (ERT) technology, experimental studies for CO₂ geological storage monitoring—primarily focused on static simulations and lacking methods to simulate the dynamic processes of CO₂ migration and leakage—an experimental ERT testing system was established. The system comprises a transparent sample-chamber, a CO₂ injection control device, a uniform light source, an image acquisition system, a SYSCAL PRO high-density resistivity meter, and Res2DInv inversion software. A static-validation and dynamic-measurement experimental scheme was designed. In the static phase, circular rubber pieces were used to simulate CO₂ to verify the system's accuracy in identifying the central position and area of CO₂ accumulation zones. In the dynamic phase, coarse sand and fine sand (quartz sand) were employed to simulate the reservoir and caprock, respectively, enabling monitoring experiments of CO₂ migration and leakage. The results demonstrate that the cross-borehole ERT system can accurately

收稿日期:2025-09-24; 修回日期:2025-11-04。

基金项目:新型油气勘探开发国家科技重大专项(2024ZD140660408);国家自然科学基金项目(42574162);山东省自然科学基金项目(ZR2024ME090);中国石油科技重大专项(2021ZZ01)。

作者简介:陈家辉(2002-),男,硕士研究生。

通讯作者:邢兰昌(1983-),男,博士,副教授,博士生导师。

引用格式:陈家辉,邢兰昌,贾宁洪,等. 基于井间 ERT 的地层 CO₂ 迁移与泄漏监测实验研究[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(12):13-21.

capture the distribution extent, migration trajectory, and leakage pathway of CO₂, confirming both the usability of the developed system and the feasibility of the proposed experimental scheme.

Keywords: cross-borehole ERT; CO₂ migration; CO₂ leakage; monitoring; simulation experiment

0 引言

在全球温室气体减排行动中, 碳捕集与封存 (CCS, carbon capture and storage) 技术是应对大气 CO₂ 浓度升高的核心举措^[1-2]。其中, 地质封存是指将 CO₂ 封存于深部地质构造 (如咸水层、枯竭油气藏等) 中^[3]。封存的 CO₂ 可能会沿着断层、废弃井眼等路径进行迁移, 产生泄漏的风险。因此长期地监测地下 CO₂ 的赋存状态、迁移路径及其空间分布特征是保障封存安全的必然需求^[4-5]。

现有的地层 CO₂ 监测技术包括示踪剂法、地震监测、声波测井、电阻率层析成像 (ERT, electrical resistivity tomography) 等^[6]。其中 ERT 技术具有成本低、可长期运行、对孔隙流体敏感等优势, 在 CO₂ 地质封存监测领域呈现出巨大的应用潜力。相较于地震监测, ERT 克服了其对低饱和度 (如<20%) CO₂ 不敏感的局限性, 其可通过分析电阻率变化捕捉 CO₂ 羽流^[7-9]。井间 ERT 突破了地表探测深度的限制, 已应用于德国 CO₂-SINK、美国 Cranfield 等 CCS 项目^[10-14], 为监测注入地层的 CO₂ 迁移路径及空间分布提供了有效的技术手段。

国内外学者在矿井安全、地热开发、地下污染探测等领域开展了 ERT 技术的应用研究。文献 [15] 应用 2D 和 3D ERT 技术绘制垃圾填埋场浅层岩层污染图像, 描述了场地的地质特征, 为环境监测及解决填埋场环境影响提供了依据。文献 [16] 结合 ERT 的地面与井间工作模式, 全面探测浅层废弃富水矿井巷道, 为矿井安全管理及地质风险处理提供了关键支持。文献 [17] 利用 3D 井间 ERT 技术实时监测深层矿井突水过程中岩层断裂和渗流通道形成, 捕捉了前兆信息, 为突水预警及矿井安全提供了数据支持。文献 [18] 应用井间 ERT 技术实现了深层干热岩和地热田的实时成像监测, 为地热资源开发利用提供数据支持。文献 [19] 设计了新型三维井间 ERT 系统, 刻画了污染物羽流的边界及扩散过程, 估算了三维含油量和总泄漏量, 发展了地下有机污染物羽流三维精细刻画技术。

国际上多个 CCS 项目推动了井间 ERT 技术从理论走向现场, 如美国 Mansfield 砂岩地层项目证实了 ERT 可监测远离井区的 CO₂, 但数据可靠性仍需验证^[10]; 日本长冈试验点利用中子测井进行数据验证, 发现 ERT 反演的 CO₂ 饱和度比实际值低 10%~15%^[11]; 德国 Ketzin 试验场采用垂直电阻率阵列与专用发射接收

装置, 证实 ERT 对超临界 CO₂ 饱和度变化敏感, 且与地震数据融合后的成像质量优于单一地震反演^[12]; 美国 Cranfield 项目在 3 000 m 深度实现了 CO₂ 运移动态成像监测^[13]; 西班牙 Hontomin 试验点的多通道监测展现出 ERT 的测量数据长期稳定性的优点^[14]。此外, 海洋深拖 ERT 技术也被证实其能够有效识别和定位封存区域的水合物, 监测封存区域内部结构和饱和度^[20]。

针对现场井间 ERT 监测存在成本高、地层内部多介质真实分布难以直接观测, 且监测方案缺乏实验验证支撑的问题, 研究人员开展了模拟实验研究。文献 [21] 通过模拟实验评估了井间 ERT 监测超临界 CO₂ 的能力, 证实了其作为 CO₂ 泄漏监测工具的有效性, 但发现重复数据采集会降低数据质量, 该下降趋势与实测接触电阻升高呈正相关, 为长期监测带来难题。文献 [22] 利用透明容器和井间 ERT 装置测试了含 CO₂ 的模拟地层样品, 得到了 CO₂ 分布图像; 同时通过分析光强信号计算饱和度, 结果显示计算值低于实际值。文献 [23] 以 SYSCALPRO 仪器搭建了小尺度井间 ERT 系统, 模拟监测不同 CO₂ 饱和度的深部咸水层及 CO₂ 侵入浅部含水层情况, 提出需重视 CO₂ 溶解导致孔隙水电导率变化的影响。文献 [24] 使用 TERRAMETER SAS 1000 商用仪器搭建数据采集装置, 在模拟封存 CO₂ 的圆筒形容器壁安装 4 个 ERT 电极阵列, 利用多个井间工作模式采集数据并反演 CO₂ 分布图像, 结果表明最优的工作模式受到 CO₂ 分布范围、区域形状等的影响。上述实验工作为推动井间 ERT 技术在 CO₂ 监测中的现场应用奠定了基础。但是, 在实验研究方面尚存在以下问题: 实验方案以静态模拟为主, 缺乏对 CO₂ 迁移、泄漏等动态过程的模拟方法, 难以复现 CO₂ 地质封存中动态实时监测场景。因此需要开展动态模拟实验方案设计、CO₂ 迁移与泄漏过程模拟、井间 ERT 反演成像性能优化等工作。

本文首先采用自主设计的样品容器与电极阵列, 结合高密度电法仪 SYSCAL PRO 及 Res2DInv 反演软件搭建井间 ERT 实验测试系统; 然后设计“静态验证—动态实测”递进式模拟实验方案, 分别对含理想绝缘物和含 CO₂ 的样品开展测试, 实现 CO₂ 在地层环境条件下运移与泄漏过程的模拟, 同时复现 CO₂ 地质封存实时监测的场景, 以验证所搭建 ERT 系统的可用性及所设计动态模拟实验方案的可行性。研究结果弥补了 CO₂ 地质封存井间 ERT 监测实验方案多为静态模拟、缺乏

CO₂ 动态运移与泄漏模拟的不足。

1 井间 ERT 技术

1.1 ERT 工作原理

ERT 技术的物理基础源于不同介质（如岩石、土壤、水、空气等）天然存在的电阻率固有差异。通过探测被测区域内的电阻率空间分布特征，来反演推知介质在区域内的赋存状态与分布规律^[25-26]。井间 ERT 通过井下电极阵列突破地表探测深度限制，可满足 CO₂ 地质封存的深部动态监测需求。

按照激励与测量方式可将 ERT 分为两类：电流激励电压测量和电压激励电流测量^[27]。井间 ERT 技术的实施过程为：在监测区域两侧井中布置电极阵列，施加激励信号，通过测量施加激励电极外其余电极的输出电压或电流，可获取反映被测场域内介质分布的数据，进而计算得到视电阻率；通过反演计算得到监测区域内真实的电阻率分布，从而获得地下介质的分布状况和地质构造特征^[28-29]。

1.2 井间 ERT 采集装置类型及工作方式

井间 ERT 常用的采集装置为二极、三极和四极装置。其中二极装置电极组合方式最为灵活，数据量最大，观测信号较强，采集效率高，但二极装置的井间区域空间分辨率不高，难以精准刻画小尺度介质异常，仅适用于大范围初步勘探场景^[30]；三极装置引入“公共电极”简化电极组合逻辑，有效减少冗余采集步骤，测量时间可缩短至二极装置的一半，但实际探测分辨率受到测量电极间距的影响较大，需要根据场地情况进行经验性控制^[31]。为了获得良好的空间分辨率，四极装置经常应用于精细程度需求高的探测场景中^[32]。井间 ERT 的四极装置结构如图 1 所示。

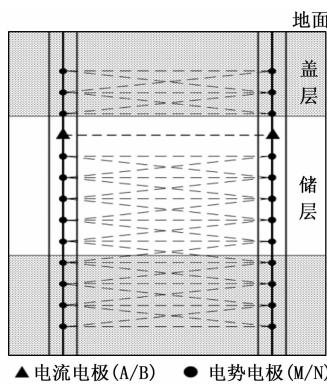


图 1 井间 ERT 系统四极装置工作原理图

井间 ERT 技术实施的四极工作方式主要有 3 种：AB-MN、AM-BN 和 AMN-B，如图 2 所示。不同工作方式下，井间区域敏感场的灵敏度分布不同。灵敏度分布的均匀程度直接影响反演成像的效果，分布越均匀则

越有利^[33]。通过数值模拟分析，AM-BN 工作方式的灵敏度均匀性最好^[34]，故选择 AM-BN 的工作方式。

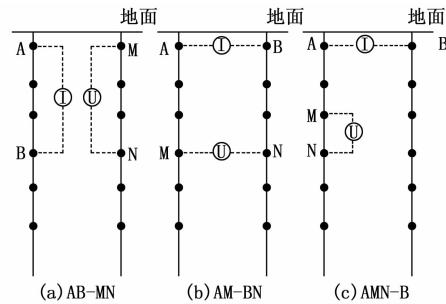


图 2 井间 ERT 四电极工作方式示意图

1.3 反演算法

ERT 反演成像常用的计算方法主要有线性反投影算法、Landweber 算法、Tikhonov 正则化算法及牛顿—拉夫逊算法等。1) 线性反投影算法 (LBP, linear back projection) 直接将观测数据反向投影到模型空间，计算简单快速，但忽略了电场的非线性，成像分辨率低，对复杂地电结构刻画能力差，易产生伪影，仅适用于初步定性分析^[35]。2) Landweber 算法基于梯度下降迭代修正模型，对初始模型要求低，但收敛速度慢且对噪声敏感，在高维或非均匀模型中收敛效率更低^[36]。3) Tikhonov 正则化算法引入正则化项增强解的稳定性，适用于含噪声的数据，但正则化参数难以选取，对尖锐边界刻画能力弱，易模糊异常区域^[36]。4) 牛顿—拉夫逊算法基于海森矩阵迭代，收敛快、精度高，适用于强非线性问题，但需计算和存储完整海森矩阵，计算量与内存需求大，对大规模电极阵列适用性差，依赖初始模型，易不收敛或陷入局部最优^[37-38]。

针对上述算法存在的问题所发展的平滑约束高斯—牛顿最小二乘法是更为理想的解决方案。该方法以高斯—牛顿法为框架，通过引入平滑约束构建最小二乘优化模型，克服了牛顿—拉夫逊算法对大规模电极阵列的适用性限制^[39-40]。可通过构建目标函数实现模型优化。其中，平滑约束最小二乘法基于以下方程：

$$(J^T J + \mu f) a = J^T b \quad (1)$$

其中： $f = f_x f_x^T + f_z f_z^T$ ， f_x 为水平滤波系数矩阵， f_z 为垂直平滑滤波系数矩阵， J 为偏导数矩阵， J^T 为 J 的转置矩阵， μ 为阻尼系数， a 为模型的修正量， b 为残差矢量。

该算法通过引入水平与垂直方向的平滑滤波矩阵，并结合可调节的阻尼系数，动态控制模型平滑程度，其能在抑制干扰的同时保留地电结构的关键边界特征。在多电极系统监测中兼顾效率、稳定性与分辨率，是本研究采用的核心反演方法。

2 井间 ERT 实验系统搭建

2.1 总体设计

井间 ERT 实验系统主要分为 3 个部分：样品容器与电极阵列、高密度电法仪 SYSCAL PRO、仪器控制和数据反演软件。其中，电极阵列固定于样品容器的预设位置。实验系统的工作原理如图 3 所示，SYSCAL PRO 仪器依据控制软件中预先配置的电极阵列工作方案，同步完成对实验样品的电流激励与电压信号采集；采集的原始数据传输至数据反演软件进行预处理和反演，最终获得电阻率分布图像。

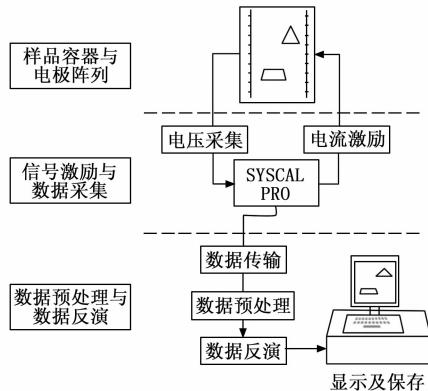


图 3 井间 ERT 实验系统工作原理图

2.2 硬件部分

2.2.1 样品容器

为便于验证井间 ERT 实验系统的成像效果，实验所用样品容器采用前后透明设计，可直接观察内部样品的分布状态。如图 4 所示，样品容器由夹板、透明板、U 型隔板及顶盖组成。样品容器为 $300 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 透明结构，两侧固定 8 对紫铜电极（间距 40 mm，宽度 7 mm），底部与顶部分别预留接口用于 CO_2 注入、溶液驱替及气密性测试。

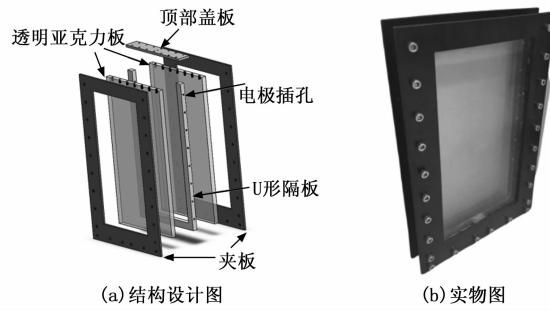


图 4 样品容器结构设计图与实物图

2.2.2 信号激励与数据采集

SYSCAL PRO 是 IRIS Instruments 公司针对高效电法勘探需求研制的高密度电法仪。实验系统采用 SYSCAL PRO 实现信号激励与数据采集，依照预设的电极选通模式获取电极数量、电压响应等原始数据。在

AM-BN 的工作方式下，本文分别设置 3 种电极选通模式，如图 5 所示。

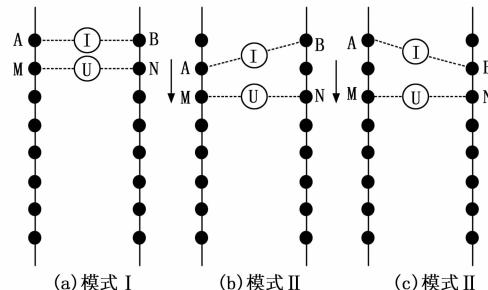


图 5 电极选通模式示意图

图 5 (a) 所示的模式 I 中，电流电极 (A 和 B) 位于相同的水平高度，激励电流通过 A、B 电极输入并在监测区域形成敏感场，电势电极 (M、N) 同样保持水平高度一致。该模式的操作逻辑为：首次运行时，选取第一组 A、B 电极，随后沿轴向从上至下依次搭配各组 M、N 电极完成数据采集；待第一组 A、B 电极对应的采集结束后，切换至第二组 A、B 电极启动第二次运行，重复上述 M、N 电极的选通逻辑，直至所有电流电极组均完成采集。

图 5 (b) 和 (c) 所示的模式 II 中，电势电极 (M 和 N) 仍维持水平高度一致，但电流电极 (A、B) 采用非水平布置。先以“A 电极高度低于 B 电极”的组合开展采集，再切换为“B 电极高度低于 A 电极”的组合继续采集。整体流程遵循与前述模式 II 一致的选通逻辑，循环执行直至所有电流电极组全部参与采集。

模式 III 本质上是模式 I 与模式 II 的融合，其电流电极选通逻辑兼顾水平布置与非水平布置两种形式，电势电极则保持与前两种模式一致的水平高度设置，可实现更全面的电极组合覆盖，获取更多的电极数据，本文实验采用模式 III。

2.2.3 辅助设备

- 1) CO_2 注入设备： CO_2 气体存储于迷你高压气瓶 (16 g/瓶)。气瓶连接量程 0~1.00 MPa、精度 0.05 MPa 的微调减压阀，经导管输出 CO_2 。

- 2) 均匀光源：石英砂孔隙中填充物质不同时，其对光线的吸收率存在差异，使样品在视觉上呈现可区分性，能直观呈现物质分布状态。在容器后方固定均匀光源以提升样品整体透光强度。

- 3) 图像采集相机：采用配备 6 400 万像素摄像头的相机作为图像采集设备，通过支架调整并固定位置。借助样品容器后方均匀光源照射，记录样品内物质分布状态，用于辅助分析 ERT 系统采集数据的反演结果，检验所开发系统识别监测对象分布区域的性能。

2.3 软件部分

SYSCAL PRO 采集的原始数据需经系列预处理与反演成像等步骤才能转化为反映样品内部电阻率分布的可视化图像。

首先进行原始数据的预处理, SYSCALPRO 仪器采集的原始数据(电极数量、电极空间分布、激励电流 I 和测量电压 U 等)需先完成格式转换与视电阻率计算, 为后续反演奠定基础。选用 ProsysⅢ软件, 确保原始数据传输、计算与格式转换的兼容性。具体操作如下: 通过 USB 数据线建立 SYSCAL PRO 仪器与工控机的连接, 下载原始数据。调用 ProsysⅢ, 在菜单栏“positions”下选择“ChangeElectrode Array”功能, 设置“hole surf”(本实验左侧电极的序号为 1~8, 右侧电极的序号为 9~16, 井间距 150 mm)以匹配本文实验系统的井间电极阵列结构; 基于仪器采集的原始数据, 根据式(2)、(3)计算视电阻率值, 其中 K 为四极装置系数, A' 、 B' 表示电流电极以地面为对称平面的镜像虚拟电极, AB 、 AN 等表示两电极之间的直线距离, 将计算后的视电阻率数据保存到.dat 格式的文件中, 该格式为反演软件的通用输入格式, 可确保数据结构与后续反演算法的兼容性。

$$K =$$

$$4\pi$$

$$\left(\frac{1}{AM} + \frac{1}{A'M} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{B'M} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{A'N} + \frac{1}{BN} + \frac{1}{B'N} \right) \quad (2)$$

$$\rho = K \frac{U}{I} \quad (3)$$

然后利用反演算法将其转化为具有物理意义的电阻率分布图像。本文以 Res2DInv 软件为平台, 利用平滑约束的高斯—牛顿最小二乘法^[41]实现预处理数据的反演。该算法通过调整模型中各矩形单元的电阻率, 最小化计算值与实测值的均方根误差, 兼顾反演精度与计算效率。具体操作如下: 在软件中设置 $f_x = 0.6$ 、 $f_z = 0.4$, 基于残差变化率动态调整 μ , 增大 f_x 可增强横向(储层方向)电阻率变化的平滑稳定性, 避免 CO₂ 水平迁移时反演图像出现“虚假边界”; 降低 f_z 则适度保留纵向(盖层方向)的电阻率梯度, 提升对 CO₂ 垂直泄漏路径的识别灵敏度。Res2DInv 默认初始阻尼系数为 0.1, 默认迭代过程中采用“固定步长调整”(即每次迭代 μ 按 1.2 倍递增或 0.8 倍递减)。本实验沿用该默认初始值, 但优化调整策略为基于视电阻率均方根误差(RMSE, root mean square error)变化率动态调整: 电阻率 RMSE 用于量化导入的预处理数据与迭代反演后计算所得视电阻率数据之间的偏差, 当迭代后 RMSE 波动幅度>2% 时, μ 减小至原来的 0.8 倍, 加快收敛

速度; 当 RMSE 波动幅度<0.5% 时, μ 增大至原来的 1.2 倍, 避免模型过度修正导致振荡; 若 RMSE 波动幅度>1%, 则维持 μ 不变, 确保反演过程稳定性。以连续五次迭代的 RMSE 波动幅度<0.3% 为收敛判据; 软件读取预处理后的.dat 格式文件, 自动识别电极空间分布、视电阻率数值等关键参数, 点击“Carry out inversion”执行反演算法, 计算完成后软件自动生成包含反演结果的.INV 文件, 点击“Display”下的“Show inversion results”输出二维电阻率分布图像, 图像以颜色梯度直观区分电阻率差异。

经 ProsysⅢ的预处理与 Res2DInv 的反演成像之后, 原始采集数据最终转化为反映样品内部电阻率分布的图像, 高电阻率区域对应 CO₂ 富集区, 低电阻率区域对应饱和 NaCl 水溶液的石英砂, 为后续分析 CO₂ 迁移路径、泄漏范围提供直接数据支撑。

3 CO₂ 监测实验设计与结果分析

3.1 实验方案设计

为解决 CO₂ 监测实验研究以静态实验为主、动态场景模拟单一、实验方案需优化的问题, 以深部咸水层储存 CO₂ 场景为背景依据, 设计了“静态验证—动态实测”的递进式 CO₂ 监测实验方案。静态实验以不同尺寸与位置的圆形橡皮(理想绝缘物)为对象, 验证井间 ERT 实验系统成像结果对目标物体的中心定位精度、分布面积反演准确性。实验所用圆形橡皮的电阻率约为 $5.00 \times 10^6 \Omega \cdot m$; 动态实验中注入的 CO₂ 气体($20^\circ C$ 、 $0.6\sim0.8 \text{ MPa}$) 电阻率约为 $1.00 \times 10^4 \Omega \cdot m$, 相对于孔隙水电阻率(本实验 $0.18 \Omega \cdot m$)来讲, 橡皮与 CO₂ 均为显著的高阻体。动态实验则在静态实验验证系统性能可靠的前提下, 模拟 CO₂ 地层运移及泄漏过程, 检验系统动态数据连续性与反演准确性。

实验按照“样品制备、数据采集、反演成像、结果验证”四步流程操作, 具体如下: 在样品容器中填充石英砂、放置橡皮(静态)或注入 CO₂(动态), 构建模拟地层环境; 通过均匀光源与相机获取样品的实际分布, 同时利用 SYSCAL PRO 仪器在电极选通模式Ⅲ下采集数据; 用 ProsysⅢ将原始数据转换为.dat 格式并计算视电阻率, 导入 Res2DInv 反演; 以实际照片为参照, 引入均方误差(MSE, mean square error)、峰值信噪比(PSRN, peak signal to noise ratio)、相关系数(CC, correlation coefficients)和结构相似度(SSIM, structural similarity)等 4 个图像质量评价指标, 分别从误差大小、图像失真、线性关联及结构相似 4 个维度对结果图像进行评价, 验证 ERT 系统的可靠性及实验方案的有效性。

在实验开始前，需完成准备工作。首先，石英砂经清洗烘干后，筛选 $0.20 \sim 0.30$ mm 细砂与 $0.30 \sim 0.45$ mm 粗砂，模拟地层环境中 CO_2 的储层与盖层。其次，采用真空法测试样品容器气密性，关闭底部阀门、开启顶部阀门并连接注射器，将容器完全浸没在水中，抽气后观察 1 分钟。无液体渗入则气密性良好；若渗入，则处理渗漏部位后重复气密性检测。

3.2 静态实验测试

3.2.1 样品制备

实验中用于制备实验样品的材料包括质量分数为 4% 的 NaCl 水溶液、细砂、直径为 50 mm 和 80 mm 的圆形橡皮。样品制备步骤如下：1) 配制 NaCl 水溶液；2) 将石英砂与橡皮放入样品容器中进行测试，共制备两种静态测试样品，样品一中放置两块橡皮，如图 6 (a) 所示，样品二中放置三块橡皮，如图 7 (a) 所示；(3) 用注射器将 NaCl 水溶液从顶部缓慢注入样品容器中，当溶液完全充满样品容器后安装上顶盖。

3.2.2 反演图像分析

图 6 (b) 和图 7 (b) 分别给出了样品一和样品二的反演结果。位于边缘的区域包含了非完整的数据集，从而使得反演图像中产生了伪影，因此图中仅呈现了位于阵列中间的 6 对电极的覆盖区域。

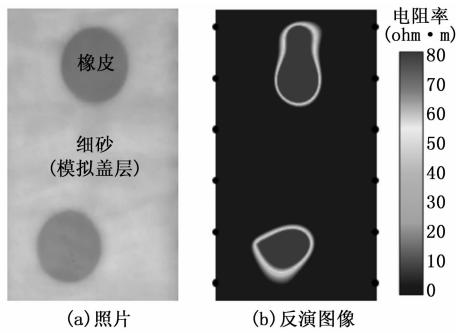


图 6 样品一的照片与反演图像

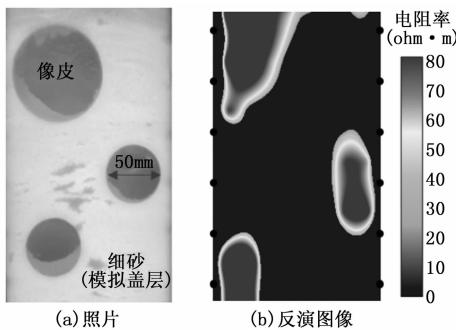


图 7 样品二的照片与反演图像

在样品一中，反演图像中高阻体中心与橡皮中心的最大偏差值为 3.3 mm，相对偏移率（偏差值与井间距之比）为 2.20%；此外，两块橡皮面积之和为 39.26 cm^2 ，反演得到的高阻体面积为 38.22 cm^2 ，面积绝对偏差为

1.04 cm^2 ，相对偏差（绝对偏差与橡皮总面积之比）为 2.64%。在样品二中，反演图像中高阻体中心与橡皮中心的最大偏差值为 4.1 mm，相对偏移率为 2.73%；此外，3 块橡皮总面积为 89.53 cm^2 ，反演得到的高阻体面积为 85.97 cm^2 ，绝对偏差为 3.56 cm^2 ，相对偏差为 3.97%。

表 1 静态试验图像质量评价指标

样品	MSE	PSRN/dB	CC	SSIM
一	0.014 1	21.358 6	0.856 4	0.965 5
二	0.018 0	17.563 5	0.765 8	0.847 9

从图像质量量化评价结果来看，样品一成像结果的 MSE 为 0.014 1，显著低于样品二成像结果的 0.018 0，说明高阻体（橡皮）分布面积较小的场景下，反演图像与实际分布的像素级误差更小；样品一成像结果的 PSNR 达 21.358 6 dB，高于样品二成像结果的 17.563 5 dB，结合 PSNR “数值越高图像失真就越小”的评价标准，可证实少量、规则分布的高阻体更易被系统精准成像；同时，两类样品成像结果的 CC、SSIM 均高于 0.75，表明反演图像在亮度、对比度及结构细节上与实际橡皮分布高度一致，验证了系统对绝缘物中心定位及面积识别的可靠性。

静态实验研究结果表明实验系统具有识别绝缘物中心位置和分布区域面积的能力，为后续动态实验中分析 CO_2 富集区域变化提供了可靠基础。

3.3 动态实验测试

3.3.1 样品制备

实验中用于制备实验样品的材料包括质量分数为 4% 的 NaCl 水溶液、细砂、粗砂和纯度为 99% 的 CO_2 气体。样品制备的具体步骤如下：1) 制备 NaCl 水溶液，与 3.2.1 中制备方法相同；2) 在样品容器中填充粗砂和细砂分别模拟 CO_2 地质封存的储层和盖层；3) 通过底部阀门向样品容器中注入 CO_2 气体， CO_2 存储于初始压力 6.0 MPa 的迷你高压气瓶中，气瓶出口连接量程为 $0 \sim 1.00$ MPa、精度为 0.05 MPa 的微调减压阀，实现注入压力的控制出口压力稳定在 $0.5 \sim 0.6$ MPa 区间内，利用 CO_2 与空气的密度差异逐步驱替容器内空气；4) 以 0.2 mL/s 流速向样品容器中注入 NaCl 水溶液，促使溶液优先渗入细砂区域，最终 NaCl 水溶液完全充满细砂部分，而粗砂部分则被 CO_2 气体完全占据；5) 在测试过程中持续缓慢地注入 NaCl 水溶液，驱替储层内的 CO_2 以模拟 CO_2 在地层中的运移和泄漏过程。

实验制备了两种类型的含 CO_2 石英砂样品。样品三模拟 CO_2 运移，如图 8 (a) 所示，填装细砂直到接近样品容器的第 5 对电极（从上至下）附近时，更换粗

砂继续填充, 使石英砂形成一个条带状的 CO_2 储层区域。样品四模拟 CO_2 泄漏, 如图 9 (a) 所示, 在储层上方的盖层中插入内径为 5 mm 的薄壁透明玻璃管模拟裂隙, 其余填装步骤与样品三类似。

3.3.2 反演图像分析

样品三与样品四不同时刻的反演结果分别如图 8 (b) 和 (d) 及图 9 (b) 和 (d) 所示。

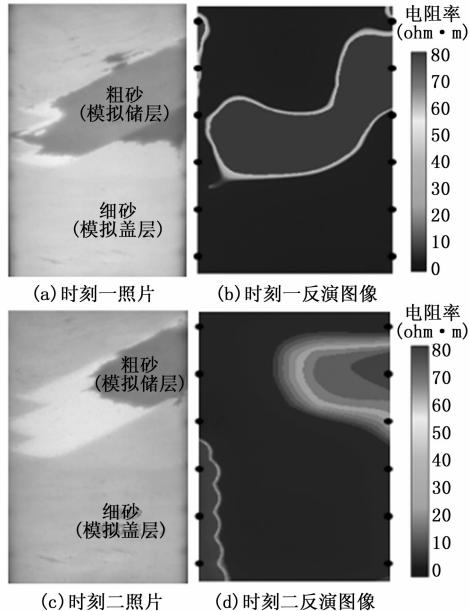


图 8 样品三的照片与反演图像

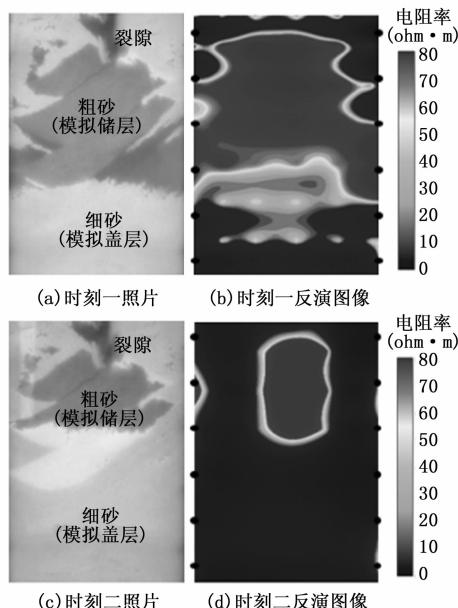


图 9 样品四的照片与反演图像

结合表 2 量化指标分析, 两类样品不同时刻成像结果的 MSE 均小于 0.4, $PSRN$ 均大于 13, 成像效果较好, 为分析 CO_2 运移与泄漏过程中富集区域的变化提供了图像数据支撑。如图 8 (a) 和图 9 (a) 所示, 在

CO_2 运移与泄漏初期 (时刻 1), 模拟储层中形成稳定的高阻区域, 两类样品不同时刻成像结果的 CC 均大于 0.55, 反演图像与 CO_2 实际分布的线性相关性较强, 可初步证实系统对 CO_2 分布区域中心的定位能力。如图 8 (c), 随着 NaCl 溶液的注入 (时刻 2), 样品三中 CO_2 向右侧迁移且分布区域逐步缩小, 反演图像可跟踪 CO_2 分布区域中心的移动轨迹, 可见反演图像能够展示 CO_2 的运移方向; 如图 9 (c), 样品四中 CO_2 沿盖层中裂隙向上迁移, 反演图像中 CO_2 分布区域沿裂隙呈现缩小趋势, 可见反演图像能够捕捉 CO_2 泄漏过程中的迁移方向。此外, 样品三和四的反演图像边缘均有不同程度的伪影, 但均集中于边界处, 不干扰对 CO_2 富集区域的分布及其迁移方向的判断。

表 2 动态试验图像质量评价指标

样品	时刻	MSE	$PSRN/\text{dB}$	CC	$SSIM$
三	1	0.350 6	14.686 5	0.575 3	0.686 3
	2	0.335 9	13.934 8	0.593 6	0.696 8
四	1	0.340 2	13.558 7	0.652 1	0.511 8
	2	0.286 5	15.354 7	0.632 2	0.403 2

通过以上分析可知, 井间 ERT 系统可捕捉 CO_2 的分布范围、迁移轨迹及泄漏路径, 但在 CO_2 富集区域边界还原与形态识别方面尚存在不足。如图 8 (c) 所示, 在样品三中, 随着 CO_2 的运移, 实际 CO_2 区域边界逐渐呈现出不规则的毛刺状, 反演图像中该区域边界为平滑曲面; 如图 9 (c) 所示, 在样品四中, 随着 CO_2 的泄漏, 实际 CO_2 区域逐渐呈现出类梯形分布, 反演图像中该区域表现为类椭圆形。这一点也体现在动态测试样品成像结果的 $SSIM$ 始终低于静态测试样品 (动态测试样品最高为 0.696 8, 静态测试样品最低为 0.965 5), 表明动态场景下图像结构细节的还原度仍有提升空间。分析上述问题产生的原因: 1) 算法局限性, 传统 ERT 数据平滑约束反演方法虽然速度快、鲁棒性好, 但会对电阻率的变化起到一定平滑作用, 不利于识别电阻率场的尖锐界面^[42]; 2) 电极配置数量的制约, 由于实验条件的限制, 系统中仅采用了 8 对电极, 增加电极个数有利于增大采集的原始数据量, 进而可能降低 MSE 、提升 CC 与 $SSIM$, 优化边界识别精度。

4 结束语

搭建了井间 ERT 实验测试系统, 该系统包含透明样品容器、 CO_2 注入控制装置、均匀光源、图像采集设备、SYSCAL PRO 高密度电法仪及 Res2DInv 反演软件。设计了“静态验证—动态实测”实验方案, 利用井间 ERT 系统开展了 CO_2 模拟监测实验: 静态实验阶段以圆形橡皮模拟 CO_2 , 通过对比反演图像与橡皮实际分布, 验证了系统对绝缘物中心定位及面积识别的精度;

动态实验阶段以粗砂、细砂分别模拟 CO₂ 地质封存的储层与盖层，通过注入 NaCl 水溶液驱替 CO₂ 来模拟其运移和泄漏过程，对比不同时刻的反演图像与 CO₂ 实际分布，验证了系统对 CO₂ 运移泄漏过程中迁移方向的辨识能力。实验结果表明，井间 ERT 系统可准确捕捉动态过程中 CO₂ 的分布范围、迁移轨迹及泄漏路径，证实了所搭建系统的可用性及“静态验证—动态实测”实验方案的可行性。

参考文献：

- [1] 邹才能, 李士祥, 熊波, 等. 碳中和“超级能源系统”内涵、路径及意义——以鄂尔多斯盆地为例 [J]. 石油勘探与开发, 2024, 51 (4): 1–13.
- [2] 袁土义, 马德胜, 李军诗, 等. 二氧化碳捕集、驱油与埋存产业化进展及前景展望 [J]. 石油勘探与开发, 2022, 49 (4): 828–834.
- [3] 李德生, 李伯华. “双碳”背景下石油地质学的理论创新与迈向能源发展多元化新时代 [J]. 地学前缘, 2022, 29 (6): 1–9.
- [4] 侯梅芳. 碳中和目标下中国能源转型和能源安全的现状、挑战与对策 [J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2023, 45 (2): 1–10.
- [5] MA J, LI L, WANG H, et al. Carbon capture and storage: History and the road ahead [J]. Engineering, 2022, 14: 33–43.
- [6] BASHIR A, ALI M, PATIL S, et al. Comprehensive review of CO₂ geological storage: exploring principles, mechanisms, and prospects [J]. Earth-science Reviews, 2024 (249): 104672.
- [7] 徐同晖, 吴陈芋潼, 邢兰昌, 等. 井间 ERT 监测数据远程传输与数据处理平台设计与开发 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (11): 273–279.
- [8] 刘四新, 倪建福. 井间电磁法综述 [J]. 地球物理学进展, 2020, 35 (1): 153–165.
- [9] 冯锐, 李智明, 李志武, 等. 电阻率层析成像技术 [J]. 中国地震, 2004, 20 (1): 13–30.
- [10] BRYANT I D, CHEN M Y, RAGHURAMAN B, et al. Utility and reliability of cemented resistivity arrays in monitoring waterflood of the mansfield sandstone, Indiana, USA [C] //SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2001.
- [11] NAKATSUKA Y, XUE Z, GARCIA H, et al. Experimental study on CO₂ monitoring and quantification of stored CO₂ in saline formations using resistivity measurements [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2010, 4 (2): 209–216.
- [12] SCHMIDT-HATTENBERGER C, BERGMANN P, KIESSLING D, et al. Application of a vertical electrical resistivity array (VERA) for monitoring CO₂ migration at the Ketzin site: first performance evaluation [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2011, 4: 3363–3370.
- [13] CARRIGAN C R, YANG X, LABRECQUE D J, et al. Electrical resistance tomographic monitoring of CO₂ movement in deep geologic reservoirs [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2013, 18: 401–408.
- [14] VILAMAJO E, RONDELEUX B, QUERALT P, et al. A land controlled-source electromagnetic experiment using a deep vertical electric dipole: experimental settings, processing, and first data interpretation [J]. Geophysical Prospecting, 2015, 63 (6): 1527–1540.
- [15] CHAMBERS J E, KURAS O, MELDRUM P I, et al. Electrical resistivity tomography applied to geologic, hydrogeologic, and engineering investigations at a former waste-disposal site [J]. Geophysics, 2006, 71 (6): B231–B239.
- [16] MAILLOL J M, SEGUIN M K, GUPTA O P, et al. Electrical resistivity tomography survey for delineating uncharted mine galleries in West Bengal, India [J]. Geophysical Prospecting, 2010, 47 (2): 103–116.
- [17] 刘斌, 李术才, 李树忱, 等. 电阻率层析成像法监测系统在矿井突水模型试验中的应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29 (2): 297–307.
- [18] FIKOS I, VARGEMEZIS G, ZLOTNICKI J, et al. Electrical resistivity tomography study of Taal volcano hydrothermal system, Philippines [J]. Bulletin of Volcanology, 2012, 74 (8): 1821–1831.
- [19] 毕现行, 郭秀军, 孙计同, 等. 基于三维井间电阻率层析成像技术的加油站储油区泄露污染羽精细刻画与量化分 [J]. 地球物理学进展, 2025, 40 (1): 398–408.
- [20] 邱宁, 路川岳, 潘春梧, 等. 海洋深拖电阻率层析成像用于海底水合物法 CO₂ 封存监测 [J]. 环境工程学报, 2025, 19 (3): 751–760.
- [21] BREEN S J, CARRIGAN C R, LABRECQUE D J, et al. Bench-scale experiments to evaluate electrical resistivity tomography as a monitoring tool for geologic CO₂ sequestration [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2012, 9: 484–494.
- [22] LOCHBUEHLER T, BREEN S J, DETWILER R L, et al. Probabilistic electrical resistivity tomography of a CO₂ sequestration analog [J]. Journal of Applied Geophysics, 2014, 107: 80–92.
- [23] BOSCH D, LEDO J, QUERALT P, et al. Core-scale electrical resistivity tomography (ERT) monitoring of CO₂-brine mixture in Fontainebleau sandstone [J]. Journal of Applied Geophysics, 2016, 130: 23–36.
- [24] KREMER T, VIERIA C, MAINEULT A. ERT monitoring of gas injection into water saturated sands: Model-

- ling and inversion of cross-hole laboratory data [J]. Journal of Applied Geophysics, 2018, 158: 11–28.
- [25] 孙启国, 孙 奥, 李照威. 基于响应面法的油气润滑 ECT 传感器优化设计 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (11): 250–255.
- [26] 田 园. ERT 技术在红壤包气带水分运动研究中的应用 [D]. 桂林: 桂林理工大学, 2023.
- [27] 张思佳. 基于 ERT 测量数据特征提取的气液两相流型识别 [D]. 北京: 华北电力大学, 2024.
- [28] 郝 达. 基于扩散模型与多模态学习的 ERT 图像重建算法 [D]. 沈阳: 辽宁大学, 2024.
- [29] 李昱函. ERT 用于水泥基材料注浆过程监测研究 [D]. 济南: 济南大学, 2023.
- [30] 蒋林城, 肖宏跃, 丁尚见, 等. 跨孔电阻率法装置灵敏度分析及分辨率讨论 [J]. 地球物理学进展, 2018, 33 (2): 815–822.
- [31] 沈 平. 井间电阻率成像方法研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2018.
- [32] GOES BJM, MEEKES JAC. An effective electrode configuration for the detection of DNAPLs with electrical resistivity tomography [J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2004, 9 (3): 127–141.
- [33] BING Z, GREENHALGH S A. Cross-hole resistivity tomography using different electrode configurations [J]. Geophysical Prospecting, 2000, 48 (5): 887–912.
- (上接第 12 页)
- [24] SHERMIN T, LU G, TENG S W, et al. Adversarial network with multiple classifiers for open set domain adaptation [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2020, 23: 2732–2744.
- [25] PANAREDA BUSTO P, GALL J. Open set domain adaptation [C] //Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2017: 754–763.
- [26] ZHANG W, LI X, MA H, et al. Open-set domain adaptation in machinery fault diagnostics using instance-level weighted adversarial learning [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17 (11): 7445–7455.
- [27] YU X, ZHAO Z, ZHANG X, et al. Deep-learning-based open set fault diagnosis by extreme value theory [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 18 (1): 185–196.
- [28] ZHANG W, LI X, MA H, et al. Universal domain adaptation in fault diagnostics with hybrid weighted deep adversarial learning [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17 (12): 7957–7967.
- [29] ZHANG Y, ZHANG H, CHEN B, et al. Integrating intrinsic information: a novel open set domain adaptation network for cross-domain fault diagnosis with multiple un-
- [34] 吴陈芋潼, 徐同晖, 邢兰昌, 等. 井间 ERT 电极阵列优化及监测实验系统设计与开发 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (11): 38–45.
- [35] 杨 强, 潘 鑫, 程 磊, 等. 不同测量模式的电阻层析成像方法及其冲击损伤检测 [J]. 空天技术, 2025, (2): 34–47.
- [36] 阎春生, 廖延彪, 田 莹. 层析成像图像重建算法综述 [J]. 中国光学, 2013, 6 (5): 617–632.
- [37] 闫永利, 陈本池, 赵永贵, 等. 电阻率层析成像非线性反演 [J]. 地球物理学报, 2009, 52 (3): 758–764.
- [38] 陈国旗, 李承峰, 刘昌岭, 等. 基于 CT 的含水化合物沉积物电阻率测量系统设计与开发 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (8): 72–77.
- [39] JIA N, WU C, HE C, et al. Cross-Borehole ERT monitoring system for CO₂ geological storage: laboratory development and validation [J]. Energies 2024, 17, 710.
- [40] 刘 奇. 基于电阻率成像技术的地质灾害监测数据融合算法研究 [D]. 南昌: 东华理工大学, 2022.
- [41] 韦凯耀. 土壤铬污染场迁移监测技术及参数反演研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2023.
- [42] BINLEY A, TSO M, IGLESIAS M, et al. Efficient multi-scale imaging of subsurface resistivity with uncertainty quantification using ensemble Kalman inversion [J]. Geophysical Journal International, 2021, 225: 887–905.
- known faults [J]. Knowledge-Based Systems, 2024, 112100.
- [30] DENG M, DENG A, SHI Y, et al. Intelligent fault diagnosis based on sample weighted joint adversarial network [J]. Neurocomputing, 2022, 488: 168–182.
- [31] BENDALE A, BOULT T E. Towards open set deep networks [C] //Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016: 1563–1572.
- [32] LIU H, CAO Z, LONG M, et al. Separate to adapt: open set domain adaptation via progressive separation [C] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2019: 2927–2936.
- [33] SAITO K, YAMAMOTO S, USHIKU Y, et al. Open set domain adaptation by backpropagation [C] //Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV), 2018: 153–168.
- [34] ZHONG J, JIAO Q, WU S, et al. Cluster-based adversarial decision boundary for domain-adaptive open set recognition [J]. Knowledge-Based Systems, 2024, 289: 111478.
- [35] ZHAO C, SHEN W. Dual adversarial network for cross-domain open set fault diagnosis [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 221: 108358.