

二氧化碳深部盐水层地质封存物理模拟探索性研究

杨美萍^{1, 2} 程丽媛^{1, 2} 刘斯墨^{1, 2} 刘 博^{1, 2}

1. 山西省煤炭地质一四八勘查院有限公司 山西太原 030053

2. 山西省二氧化碳地质封存技术创新中心 山西太原 030053

摘要: 二氧化碳深部盐水层的地质封存物理模拟技术, 旨在利用人工智能的建模辅助工具; 通过模拟二氧化碳封存时的结构变化特点, 以期准确把握二氧化碳收集与封存的成效。采用地质封存处理的二氧化碳可以保持较长时间的结构稳定性, 并能够有效缓解二氧化碳聚集带来的温室效应, 体现出二氧化碳深部盐水层地质封存模拟技术的应用优势。基于此, 本文探讨二氧化碳深部盐水层地质封存物理模拟的可行性方案。

关键词: 二氧化碳深部盐水层; 地质封存; 物理模拟

一、二氧化碳深部盐水层地质封存的机理

(一) 基本原理

采用盐水层作为介质封存二氧化碳气体, 主要分为地球化学封存、地质圈闭封存、水动力封存的三种常见表现形式。二氧化碳深部盐水层的地质封存, 指的是在封闭地层或者构造圈当中密封二氧化碳, 然后借助毛细管的渗透压力作用, 将气态的二氧化碳密封于孔隙之间, 其原理类似于油藏存储。经过封存处理的二氧化碳气体将会与附近的围岩结构发生进一步的反应, 并生成全新的矿物质^[1]。二氧化碳在逐渐扩散的过程中, 借助水动力作用将其封存于地表之下, 从而使得大量的二氧化碳气体无法逸出, 达到减缓温室效应发生的目的。

在沉积盆地的特殊地形环境当中, 广泛分布着含盐地下水的赋存地层。此类盐溶地下水不适宜用于农业种植中的灌溉或者工业生产, 同时也不适宜人类进行饮用。但是此种形式的地下咸水层具有良好的二氧化碳储存潜力, 技术人员只要确定地层本身的储层封闭性能良好, 就可以实现二氧化碳的长期封存效果。二氧化碳在咸水

层的空间区域内发生较大幅度的运移, 该过程主要涉及热流固化的多场耦合作用。并且由于注入二氧化碳的密度小于地层中的咸水密度, 因此受到浮力的作用二氧化碳会垂直向上运动; 当其运动至低渗透性的盖层或者封闭断裂、背斜等地质构造时便会停止, 然后在超临界的状态下封存于深部咸水层。注入地层深部的二氧化碳少部分就会在盐水层的作用下快速溶解, 其溶解量主要取决于咸水层内温度、压力与含盐量等指标^[2]。

(二) 地质封存与时间的关系

二氧化碳的地质封存与时间推移的关系密切, 尤其是在水动力封存的作用机制下, 经过很短时间就会呈现出比较显著的气体封存效果。但是在矿化封存或者溶解性气体封存的作用机制下, 注入地层深部的二氧化碳需要经过相对漫长的时间才能够发生性状的改变。因此, 技术人员需要明确二氧化碳地质封存与时间推移之间的关系, 并采取有效措施加以改进。采用三维建模的方法评估二氧化碳地质封存的实施成效, 可确保技术人员在诸多的封存方案中选取最佳的形式。

二氧化碳地质封存的效果与时间推移之间的关系密切, 二氧化碳在停止注入地层的情况下, 其封存比率主要取决于地质构造及水动力等方面因素, 上述的地质封存机理比较类似于油田赋存地层的技术原理^[3]。现阶段的国内研究人员普遍认为, 注入气体与水分的油田储层将会发生一定程度的性状改变, 上述研究成果将会为油气藏内的二氧化碳注入潜力研究提供有效参考。并且值得注意的是, 国内很多的研究人员指出“多相流”的地质封存效果通常取决于油藏压力以及储层本身的物理特性指标, 进一步决定了二氧化碳在某一地层深部的封存

基金项目:

1. 山西省重点研发计划项目 (202102090301009);
2. 山西省二氧化碳地质封存技术创新中心。

作者简介:

1. 杨美萍 (1995 —), 女, 山西人, 硕士研究生, 主要从事二氧化碳地质封存研究;
2. 程丽媛 (1989 —), 女, 山西人, 中级工程师, 硕士研究生, 主要从事二氧化碳地质封存研究、煤层气勘查, 为本文通讯作者。

效果受到较为复杂因素的影响。

如下图，为二氧化碳地质封存与时间推移之间的关系图：

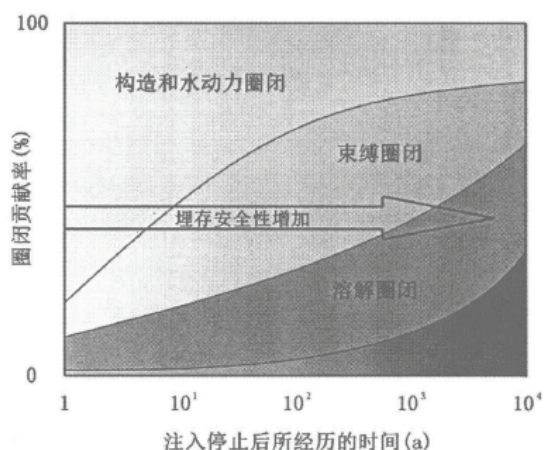


图1 二氧化碳地质封存与时间推移的关系曲线图

(三) 超临界二氧化碳

超临界流体具有特殊的化学性质与物理性质，其不能够等同于任何形式的液体或者气体。超临界二氧化碳的密度指标比较接近液体，但是其黏度指标更加趋近于气体，因此具备快速扩散的特性。超临界二氧化碳的物质表面几乎不存在任何的张力作用，决定了其能够快速渗透于分子空间。即便是处于临界温度以下的空间环境，超临界二氧化碳也不会立即转化为液态物质，从而体现了超临界二氧化碳的良好可控性^[4]。

具体针对二氧化碳的地质封存比例及其效果在实施详细分析的过程中，通常涉及到超临界二氧化碳的作用机制原理。超临界二氧化碳的密度将会随着压力增大而发生急剧的改变，并且随着温度升高而逐渐减小。当流体处于临界点时，二氧化碳的物质密度指标就会频繁波动。此时即便是微小的温度或者压力改变，也会导致超临界二氧化碳的密度持续变化。由于以上的多个层面因素影响，决定了超临界二氧化碳的地质封存条件具备特殊性，技术人员应当考虑超临界二氧化碳在深部盐水层实现地质封存的外部条件作用机制。

二、二氧化碳深部盐水层地质封存的物理模拟技术实现方案

(一) 前期准备

二氧化碳深部盐水层地质封存的物理模拟实验需要配备相应的材料、仪器与设备，其中的地层压力测量系统属于核心设备。地层压力测量系统的核心部分在于“土压力盒”，即为土压力传感器。电阻应变式的土压力计具有体积较小、灵敏度较高、构造简单便携等优势，

尤其适用于挡土墙、路基、隧道、坝体等工程的静态测试领域。对于测定物质接触应力的自动传感器而言，其应当与待测物体的结构表面保持平齐状态。自动传感器还可用于测定“土体自由场”，具体需要保证传感器设备的摆放平整，避免传感器的承压面偏离正常的位置或角度。技术人员在埋设自动传感器的操作中，应保证传感器与周边土体的密度指标接近。

对于本次实验还需要准备“渗透压力测量系统”，因为本次实验所模拟的地层含有饱和度较高的盐水物质。基于此，技术人员应当准确测定地层的渗透压力。具体可以采用渗压计作为辅助，将地层应变作用力转化为电阻变化值，技术人员既可以进一步明确盐水层封存二氧化碳的渗透压力指标。二氧化碳在深部盐水层范围内的地质封存实验通常涉及到仪器超载能力、接桥方式、仪器设备的灵敏系数、系统滞后性、系统输出指标等各项参数。在本次的实验研究阶段，拟采用灵敏度较高的仪器设备作为支持，技术人员应当透过二氧化碳在深部盐水层中的运移特征指标，做到准确归纳二氧化碳地质封存的内在规律性。

(二) 实验步骤

首先，制备圆柱形的二氧化碳深部盐水层封存试样，试样规格为32mm直径、67mm高度；其次，分别利用0.3mm左右直径的河砂骨料以及0.4mm左右直径的石英砂骨料作为介质，与纯水进行充分的混合，并控制在8:1的砂石骨料与纯水混合比例。在本次实验中，技术人员主要采用河砂骨料模拟“砂岩层”用于封存二氧化碳，以期进一步观察地层中二氧化碳的迁移规律；最后，利用砂岩为主的模拟材料开展“固结不排水”的三轴压缩试验，借助自动传感仪器获取材料抗压强度与抗剪强度的变化值。在上述实验进行的全过程中，技术人员应完整记录各项的数据指标，为二氧化碳深部盐水层的地质封存方案设计提供科学数据的支持。

例如在某次二氧化碳地质封存的实验进行阶段，拟在膏岩模拟层的上部（距离注入井2.5cm左右高度）匀速注入二氧化碳气体。技术人员需要在此区域布置5个大小相同的电阻应变片，各电阻应变片的间隔控制在3cm，运用电阻应变片测定注入膏岩层的二氧化碳应变分布规律，进一步判断注入二氧化碳与地层应力分布之间的关系曲线。此外，技术人员需要将土压力盒布置在距离装置底面5.5cm左右的位置，并需要增加自动渗压计装置。采用动态测试的方法，做到准确把握含水砂岩层在水平方向以及竖直方向上的渗透压力指标变化规律。

如下图，为本次实验中应变片的分布位置图：

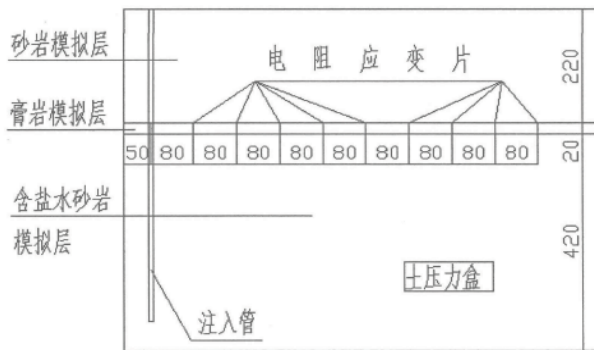


图2 二氧化碳封存实验中的应变片分布位置图

(三) 结果分析

本次实验主要利用人工智能的数据采集仪读取数据结果，借助自动传感器将采集到的数据传送至计算机控制中心。其中的自动数据采集仪规格为datatakerDT6，该仪器读取数据的间隔频率为每秒钟1次。为了方便进行随身携带，对于本次实验主要采用了较小体积的电阻式传感设备，技术人员需依据计算机控制中心的交互设备显示数值进行全面的记录。

同时，负责本次实验的技术人员还应当考虑到传感器在输出数据阶段的漂移因素影响，在正式开始本次实验之前预先实施半个小时左右的测定初始值操作。技术人员需要等待传感器的输出指标趋向于稳定，才能够将二氧化碳匀速注入模拟封存地层，进而读取显示设备上的数值。

三、二氧化碳深部盐水层地质封存的物理模拟技术改进路径

(一) 引进三维建模平台

依据以上的实验研究得出，二氧化碳地质封存的模拟实验平台主要设计为三维建模装置，采用人工智能的三维建模原理予以实现。具体应当将一定压强的二氧化碳注入小孔，直至模拟层的下部，然后利用压力表与流量计读取气体的注入速度及压力指标。在实验进行的阶段，位于盖层表面的应变片能够准确显示应力变化数值，而位于饱和盐水层深部的渗流计与压力盒主要用来读取孔隙水压力、土体压力等指标^[5]。在此前提下，技术人员能够全面记录模拟实验得出的渗流场以及压力场指标，进一步得出清晰且完整的二氧化碳运移变化规律。

(二) 对比正交试验结果

目前在实施二氧化碳封存实验的过程中，三维实验

平台的设计与实现方案仍存在有待改进之处。未来在技术创新发展的趋势下，改进二氧化碳深部盐水层地质封存物理模拟方法的重点在于引进正交试验措施，并需要详细对比水平注入井、竖直注入井的测量数据差异。技术人员即可依据实验对比得出的数据结果，对于现有的实验方案进行优化。例如，技术人员能够通过改变水平注入井长度，明确盐水层中注入二氧化碳的最佳存储量与速度指标。与传统的二维平面建模做法相比，依托人工智能理论建构的三维立体模型具有动态性与直观性的显著优势。技术人员还需要通过对比各次正交试验的结果数据，判断其中各次实验数据的差异性，从中得出实验环境条件的影响程度。

结束语

综上所述，缓解全球持续变暖危机的重要途径即为二氧化碳的地质封存。但是现场开展大规模封存实验的成本较高而且效率较低，因此亟待采用物理模拟的替代性手段。近些年以来，国内研究人员主要针对二氧化碳深部盐水层的地质封存物理建模技术方案展开探究，旨在采用混合物质作为封存载体，详细分析二氧化碳注入含水砂岩时的物质迁移规律。未来在技术转型的进程中，二氧化碳深部盐水层的地质封存技术手段还会实现进一步的丰富及完善，为改善自然生态平衡提供科学研究数据的支撑。

参考文献

- [1] 邓鼎天, 聂向荣, 张田茹等.CO₂提高煤层气采收率及其煤层封存机理研究[J].山西化工, 2025, 45(05): 56-62.
- [2] 李少虎, 郑满城, 卢铁等.沉积凹陷深部咸水层二氧化碳封存地质特征研究[J].中国井矿盐, 2025, 56(03): 17-18+25.
- [3] 潘志彦, 郇林军, 郑佳祎等.超临界二氧化碳在深部盐水中溶解封存及影响因素[J].应用科技, 2025, 52(01): 77-83+97.
- [4] 张广奇, 徐玉兵, 刘曾奇等.CO₂地质封存技术研究进展[J].当代化工研究, 2024(17): 41-43.
- [5] 许志鹏, 谭羽非, 张甜甜等.超临界二氧化碳用于地热开采的研究综述[J].煤气与热力, 2024, 44(07): 16-27.