

枯竭气藏改建储气库关键技术

施润琪¹, 朱发海², 吴凡², 袁川², 黄金龙²

¹中国石化江苏油田分公司勘探开发研究院, 江苏 扬州

²中石化经纬有限公司华东测控分公司, 江苏 扬州

收稿日期: 2023年5月29日; 录用日期: 2023年6月28日; 发布日期: 2023年7月5日

摘要

从储气库多周期大流量强注强采的基本特点出发, 综合采用室内实验和数值模拟等技术手段, 重点研究了枯竭气藏改建储气库圈闭密封性机理, 应用圈闭密封性评价、库容参数评价、注采能力评价和储气库运行参数评价4项储气库建设特色关键技术。提高枯竭气藏型地下储气库建库地质方案设计的科学性和可靠性, 优化储气库运行参数。

关键词

气藏开发, 储气库, 密封性, 库容参数, 产能评价

Key Technologies of Gas Storage Reconstruction for Depleted Gas Reservoir

Runqi Shi¹, Fahai Zhu², Fan Wu², Chuan Yuan², Jinlong Huang²

¹Exploration and Development Research Institute of Jiangsu Oilfield, SINOPEC, Yangzhou Jiangsu

²Huadong Measurement and Control Company of Sinopec Jingwei Co., Ltd., Yangzhou Jiangsu

Received: May 29th, 2023; accepted: Jun. 28th, 2023; published: Jul. 5th, 2023

Abstract

Based on the basic characteristics of multi-cycle, large flow, strong injection and strong production of gas storage, this paper focuses on the sealing mechanism of gas storage trap for reconstruction of depleted gas reservoir by means of laboratory experiments and numerical simulation techniques, and applies four key characteristic technologies of gas storage construction, including

trap sealing evaluation, storage capacity parameter evaluation, injection and production capacity evaluation and gas storage operating parameter evaluation to improve the science and reliability of geological scheme design of underground gas storage for depleted gas reservoirs and optimize the operating parameters of gas storage.

Keywords

Depleted Gas Reservoir, Gas Storage, Airtightness, Storage Capacity Parameter, Productivity Evaluation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

地下储气库是将天然气重新注入地下可以保存气体的空间而形成的天然气气藏，是集季节调峰、事故应急供气、国家能源战略储备等功能于一身的能源基础性设施[1] [2]。

我国的天然气资源区与消费市场分离，建库资源分布不均，资源区主要集中在中西部地区，而天然气的主要用户市场在东部地区，重点消费市场区域内优质建库目标十分稀缺。储气设施具有战略储备、安全保供的重要作用。

本文以 Y 气藏为例，应用 4 项储气库建设特色关键技术，验证了该气藏改建地下储气库的可行性。

2. 圈闭密封性评价

2.1. 盖层密封性研究

1) 盖层泥岩突破压力空间分布

通过力学实验预测突破压力：当加载的压力为单轴抗压强度(UCS)的 65%时，岩石内部开始产生微裂缝，可认为其对应的应力为岩石的突破压力。

通过计算 Y 气藏盖层的 $UCS \approx 73 \text{ MPa}$ ，转换突破压力 P 为 47.75 Mpa，远高于气藏原始地层压力 37.4~38.3 MPa。

2) 盖层泥岩突破压力空间分布

通过三轴加载压缩与渗透率同步测试，分析盖层泥岩在注气过程中内部微观结构变化导致的渗透率变化特征，揭示损伤机理。当加载至 60 MPa 时(峰值强度的 72%)，渗透率大幅度提升，表明样品内部产生连续通道裂缝。

2.2. 断层密封性研究

1) 断层静态封闭性研究

断层泥岩涂抹分析法是定量确定断层密封性的一种方法，其中断层泥比率(SGR)是一个重要参数，该方法可以定量表征砂泥岩互层断层带内泥质的质量分数[3]。

计算公式是：

$$SGR = \sum \text{泥岩厚度} / \text{垂直断距} \times 100\% \quad (1)$$

由计算可知:

① 北东走向大断层纵向延伸至厚层泥岩盖层顶部、断层断距大, 整体封堵性较好, SGR 大于 0.6。

② 西南部断层断距逐渐减小, 造成泥岩涂抹程度减小, 断层密封性减弱。北西向小断层密封性较差, SGR 小于 0.3。

2) 断层动态密封性评价

断层开启与封闭状态主要由断面上正应力和流体压力的关系确定。断层面所受到正应力的大小决定了断层面结构间的紧密度, 从而决定了断层的开启与封闭状态(图 1)。如果断层面受到的压力越大, 断层面的紧闭程度就越好; 反之就越差[4] [5] [6]。

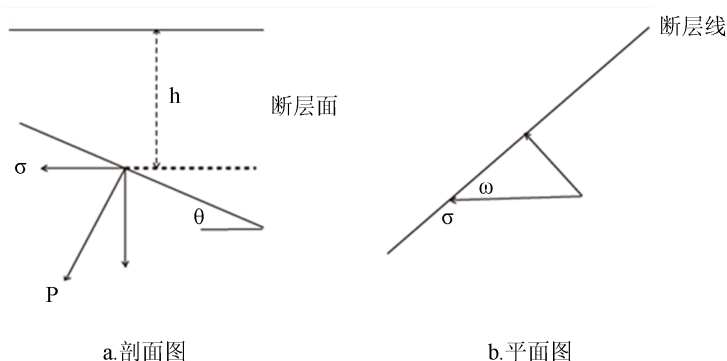


Figure 1. Schematic diagram of fault plane pressure
图 1. 断层面压力示意图

断层面压力计算公式为:

$$P = h(\rho_{\alpha} - \rho_{\beta})g \cos \theta + \sigma \sin \theta \sin \omega \quad (2)$$

式中: P 是断层面承受的正压力, MPa; h 是断层面的埋深, m; ω 是地应力与断层走向间的夹角, °; g 是重力加速度, m/s^2 ; ρ_{β} 是地层水密度, g/cm^3 ; ρ_{α} 是上覆地层的平均密度, g/cm^3 ; θ 是断层面倾角, °; σ 是水平地应力, MPa。

断层封闭系数(I_f)指断层面所受正应力与流体压力的比值, 即

$$I_f = P / f \rho_w g h \quad (3)$$

式中: h 是断层面的埋深, m; ρ_w 为水的密度, 1.0 g/cm^3 ; f 为异常压力系数。

当 $I_f \leq 1$ 时, 断层开启, 成为油气运移的通道, I_f 值越小, 断层开启程度就越高。当 $I_f > 1$ 时, 断层呈封闭状态, I_f 值越大, 断层封闭程度就越高。

根据 Y 气藏断层参数计算断面的开启压力为 45.8 MPa, 高于气藏原始地层压力, 因此 Y 储气库上限压力用原始地层压力不会破坏密封性, 其作为储气库是安全的。

2.3. 圈闭动态密封性评价

储气库寿命一般为 50 年, 在储气库设计过程中, 需要模拟储、盖层在多周期交变载荷下, 储、盖层的损伤情况。选择泥岩样品, 进行三轴加卸载同步渗透实验, 通过分析渗透的变化, 揭示样品的损伤过程, 建立损伤演化模型, 模拟储气库注采过程中盖层的损伤情况。

样品载荷增加, 泥岩渗透系数增加; 样品内部产生微裂缝损伤, 形成连续裂缝, 直至样品破坏; 总加卸载循环 60 次后, 样品破坏(图 2)。

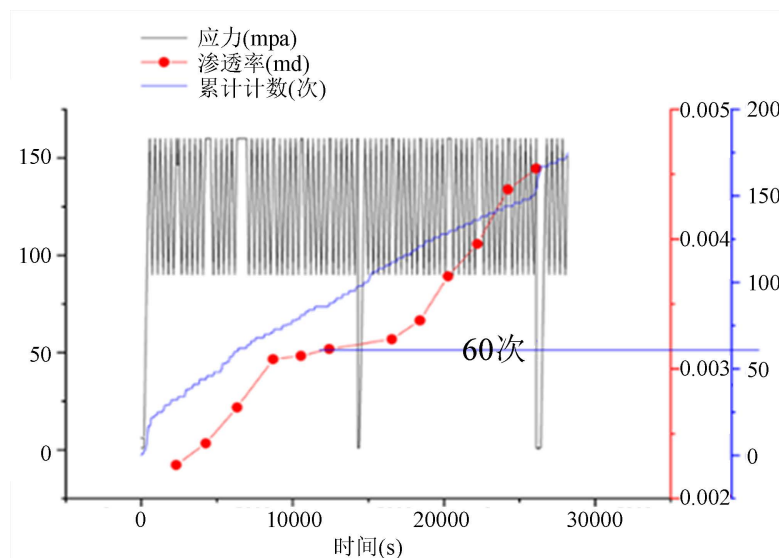


Figure 2. Cap rock mudstone damage curve under triaxial loading
图 2. 盖层泥岩三轴加载损伤曲线

3. 多因素耦合的注采能力评价

3.1. 动态模型法确定产能

建立 Y 气藏地质模型, 拟合 2020 年以来的 Y5 井产量、压力等生产历史, 修正符合 Y5 井生产特性的动态模型。设计三个不同的采出制度, 每个工作制度测试时间 3 天, 模拟每一制度下稳定的井底流压, 压差趋势性较好。

根据拟稳定流原理, 建立二项式产能方程, 得到井底流压为大气压时气井的绝对无阻流量。

3.2. 节点分析法确定注采能力

Y 储气库根据气藏特征结合配套管网外输要求, 确定井口最低压力 9 MPa, 进而确定储气库上限压力 and 下限压力分别为 38.3 MPa 和 17.2 MPa。利用多因素耦合系统确定气井的 IPR、冲蚀曲线, 计算不同地层压力下的注采气量。

通过常规井不同管径在井口最小压力 9 MPa 时对应地层压力的采气量, 其产气能力随地层压力下降而减小。气井的注气能力随地层压力增加而显著降低。直井选择 $\Phi 88.9$ mm 油管, 气井协调合理产能 $(19.95 \sim 91.13) \times 10^4$ m³/d, 水平井选择 $\Phi 114.3$ mm 油管, 气井协调合理产能 $(51.8 \sim 208) \times 10^4$ m³/d。

4. 储气库运行参数评价

1) 库容确定

利用气藏压降法计算气藏动态储量, 累积采出量与压力降呈良好的线性关系, 确定 Y 气藏动态储量 1.67 亿方。

结合 Y5 井试井数据, 用 3 口定向井通过数值模拟预测生产动态, 做累计产气与压降关系曲线 (P/Z~Gp), 回归得到动态储量(库容)为 2.8×10^8 m³。

2) 上限压力确定

气库上限压力确定原则主要是不破坏储气库的封闭性, 同时, 兼顾气库的目标工作气量与气井产能, 以及对注气压缩机性能参数的影响。目前国内储气库上限压力一般取原始地层压力, 综合分析, Y 储气

库合理上限地层压力确定为 38.3 MPa。

3) 下限压力确定

满足调峰能力需求、满足处理及外输压力需求、避免边水影响、尽量减少垫气量。采用节点系统分析方法, 预测了不同产量下气井的井底流压、地层压力, 在满足单井最低调峰产量 15 万方/天的条件下, 储气库下限地层压力为 17.2 MPa。

4) 有效工作气量

上限地层压力 38.3 MPa, 下限地层压力 17.2 MPa 时, 设计库容参数如下。动态库容: 2.8 亿方; 工作气量: 1.4 亿方。

5. 结论

1) 根据 Y 气藏断层参数计算断面的开启压力为 45.8 MPa, 气藏原始地层压力 37.4~38.3 MPa, 因此 Y 储气库上限压力用原始地层压力不会破坏密封性, 其作为储气库是安全的。

2) 利用多因素耦合系统确定气井的 IPR、冲蚀曲线, 计算不同地层压力下的注采气量, 确定 Y 储气库的注采气能力。

3) 通过储气库运行参数、井型井数论证、上下限压力及优化储气库建库方案, 确定了储气库库容 2.8 亿方, 工作气量 1.4 亿方, 库容利用率 50%。

参考文献

- [1] 丁国生, 李春, 王皆明, 等. 中国地下储气库现状及技术发展方向[J]. 天然气工业, 2015, 35(11): 107-112.
- [2] 马新华, 郑得文, 申瑞臣, 等. 中国复杂地质条件气藏型储气库建库关键技术与实践[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(3): 489-499.
- [3] 胡俊坤, 李晓平, 宋代诗雨. 水驱气藏动态储量计算新方法[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(3): 628-632.
- [4] 何云峰, 杨小腾. 活跃边水气藏水侵系数与稳产期关系研究[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(1): 124-128.
- [5] 王怒涛, 唐刚, 任洪伟. 水驱气藏水侵量及水体参数计算最优化方法[J]. 天然气工业, 2005, 25(5): 75-77.
- [6] 奥立德, 林波. 朱家墩储气库密封性评价[J]. 复杂油气藏, 2021, 14(3): 86-90.