

低渗透油藏CO₂水气交替驱参数优化对提高采收率的影响分析

傅 程, 严 格, 张 威*, 朱 锐, 黄 柯, 陈 灏, 舒 醒

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2024年7月8日; 录用日期: 2024年8月15日; 发布日期: 2024年10月10日

摘要

在低渗透油藏中, 传统的采油方法往往效果有限。CO₂水气交替驱技术以其独特的优势, 为提高这类油藏的采收率提供了新思路。本文将深入探讨CO₂水气交替驱的关键参数, 分析其对采收率的影响, 并提出优化方法, 以期为油田开发提供科学指导。

关键词

低渗透油藏, CO₂水气交替驱, 参数优化, 采收率

Analysis of the Impact of CO₂ Water-Gas Intermittent Displacement Parameter Optimization on Enhanced Oil Recovery in Low Permeability Reservoirs

Cheng Fu, Ge Yan, Wei Zhang*, Rui Zhu, Ke Huang, Hao Chen, Xing Shu

School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Jul. 8th, 2024; accepted: Aug. 15th, 2024; published: Oct. 10th, 2024

Abstract

In low permeability oil reservoirs, traditional oil extraction methods often have limited effects. The CO₂ water-gas intermittent displacement technology, with its unique advantages, provides a new

*通讯作者。

approach to improve the recovery rate of such oil reservoirs. This paper will delve into the key parameters of CO₂ water-gas intermittent displacement, analyze their impact on the recovery rate, and propose optimization methods, in order to provide scientific guidance for oilfield development.

Keywords

Low Permeability Reservoirs, CO₂ Water-Gas Intermittent Displacement, Parameter Optimization, Recovery Rate

Copyright © 2024 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. 引言

低渗透油藏在全球石油资源中占有重要地位，但其开发效率往往受限于其复杂的地质特性和较低的渗透性。CO₂ 水气交替驱技术作为一种提高低渗透油藏采收率的有效方法，通过优化参数可以显著提升油藏的开发效果[1]。因此，本文旨在探讨 CO₂ 水气交替驱参数优化对提高低渗透油藏采收率的影响。

2. 低渗透油藏 CO₂ 水气交替驱概述

低渗透油藏在石油开采中因其岩石孔隙小、渗透率低而面临诸多挑战。这种油藏的原油流动速度慢，导致传统的采油技术难以有效提高其采收率[2]。CO₂ 水气交替驱技术，作为一种提高低渗透油藏采收率的创新方法，通过交替注入 CO₂ 和水来增加油层压力，降低原油粘度，从而提高油藏的驱油效率[3]。CO₂ 的注入能够形成混相或近混相状态，改善油水流动特性，而水的注入则有助于维持油层压力，减少 CO₂ 的损失。这种技术的应用，需要综合考虑地质条件、流体性质和操作参数，以确保最佳的驱油效果。

3. CO₂ 水气交替驱参数的影响因素

3.1. 气水比

气水比是 CO₂ 水气交替驱技术中的关键参数之一，它直接影响着驱油效率和油藏的最终采收率[4]。气水比指的是在交替注入过程中，CO₂ 和水的体积比。一个适宜的气水比能够最大程度地发挥 CO₂ 的溶解作用和膨胀效应，降低原油的粘度，增加其流动性，从而提高油藏的驱替效率。同时，气水比还涉及到油藏的能量补充和压力维持，合理的气水比可以避免由于注入压力过高而导致的油层破裂或水窜现象[5]。此外，气水比的优化还与油藏的地质特性、原油性质和注入流体的物理化学性质密切相关。在实际应用中，需要通过实验和模拟来确定最佳的气水比，以实现油藏开发的最大经济效益。

3.2. 注气速度

注气速度是 CO₂ 水气交替驱过程中的另一个重要参数，它决定了 CO₂ 注入的速率和动态分布。适宜的注气速度可以确保 CO₂ 在油层中的均匀分布，避免局部的高压区形成，减少对油层结构的破坏[6]。过快的注气速度可能导致 CO₂ 迅速突破油层，降低驱油效率；而注气速度过慢，则可能无法及时补充油层能量，影响油藏的开采速度。注气速度的确定需要考虑油层的孔隙结构、渗透率以及原油的粘度等多种因素。通过调整注气速度，可以优化 CO₂ 在油层中的扩散和驱替效果，提高原油的采收率[7]。此外，注气速度还与油藏的地质条件、流体性质和生产设备的能力紧密相关，因此在实际操作中需要综合考虑这

些因素，通过实验和模拟来确定最佳的注气速度。

3.3. 关井油气比

关井油气比是评估 CO_2 水气交替驱过程中油藏性能的关键参数之一，它指的是在关井期间，注入的 CO_2 与产出的原油的体积比率[8]。这个比率对于理解和预测油藏的动态行为至关重要。一个合理的关井油气比有助于确保 CO_2 在油层中有足够的时间与原油接触，促进 CO_2 的溶解和膨胀，从而降低原油的粘度，增加其流动性。这不仅有利于提高原油的驱替效率，而且有助于提高油藏的最终采收率。然而，如果关井油气比过高，可能会导致 CO_2 的过量注入，增加了操作成本，同时也可能因为 CO_2 的快速突破而降低驱油效率[9]。相反，如果关井油气比过低，则可能无法充分利用 CO_2 的驱油潜力，导致油藏的采收率降低。因此，确定最佳的关井油气比需要综合考虑油藏的地质特性、原油的物理化学性质以及 CO_2 的注入条件。

3.4. 段塞注气量

段塞注气量是 CO_2 水气交替驱技术中一个至关重要的操作参数，它指的是在特定时间内注入油层的 CO_2 的体积[10]。这一参数直接关系到 CO_2 在油层中的分布均匀性及其与原油的接触效率。合理的段塞注气量可以确保 CO_2 在油层中形成有效的驱替前缘，促进原油的流动和采收。如果段塞注气量过大，可能会导致 CO_2 在油层中的不均匀分布，甚至引发油层的过早突破，降低驱油效率；而注气量过小，则可能无法达到预期的驱油效果，影响油藏的整体采收率。段塞注气量的优化需要考虑油层的孔隙结构、渗透率、原油的粘度以及油层的压力等多重因素。通过精确控制段塞注气量，可以提高 CO_2 的驱油效率，实现油层能量的有效补充，同时避免由于操作不当而造成的油层损害。此外，段塞注气量还与油藏的地质条件、原油性质以及注入策略紧密相关，因此在实际操作中需要通过精细的实验设计和数值模拟来确定最佳的注气量。

4. CO_2 水气交替驱参数优化方法

4.1. 正交试验设计法

正交试验设计法是一种在多因素实验中广泛应用的优化方法，它通过科学地安排实验，以最少的试验次数来评估多个因素对结果的影响及其交互作用。在 CO_2 水气交替驱参数优化中，正交试验设计法能够帮助工程师系统地研究气水比、注气速度、关井油气比和段塞注气量等关键参数对采收率的影响。通过精心设计的正交表，可以在不同水平的参数组合下进行实验，从而识别出最优的参数组合。该方法的优势在于能够高效地处理多个变量的交互作用，减少实验次数，节约时间和成本。同时，正交试验设计法还可以提供实验数据的统计分析，帮助工程师理解各参数对采收率的贡献度和敏感性。

4.2. 响应面分析法

响应面分析法(RSM)是一种在多变量优化问题中广泛应用的统计技术，它通过构建数学模型来探索和描述多个自变量与一个或多个响应变量之间的关系。在 CO_2 水气交替驱参数优化中，RSM 能够系统地分析和量化气水比、注气速度、关井油气比和段塞注气量等关键参数对采收率的影响。通过设计实验，收集数据，RSM 利用回归分析建立一个响应面模型，该模型能够预测不同参数组合下的采收率，并帮助识别最优的参数设置。RSM 的一个关键步骤是实验设计，通常采用中心组合设计(CCD)来确保实验的代表性和效率。通过 CCD，可以在参数的不同水平上进行实验，收集必要的数据来拟合响应面模型。模型的拟合质量可以通过统计检验来评估，如 F 检验和方差分析(ANOVA)。一旦模型被验证为可靠，就可以

使用它来预测最优的参数组合，并通过图形响应面来直观展示不同参数对采收率的贡献和交互作用。

4.3. 人工智能优化方法

人工智能优化方法在 CO_2 水气交替驱参数优化中展现出了巨大的潜力。这种方法利用机器学习、深度学习等先进的算法，通过分析大量的历史数据和模拟结果，建立起预测模型来识别最优的参数组合。与传统的优化方法相比，人工智能能够处理更为复杂的非线性关系，并且能够快速地从海量数据中学习和提取特征，从而更准确地预测不同参数设置下的采收率。在实际应用中，人工智能优化方法可以集成地质、油藏工程和生产操作等多个领域的数据，进行综合分析。例如，通过训练神经网络，可以模拟不同气水比、注气速度和关井气油比等参数对油藏动态的影响，进而预测最佳的操作策略。

5. 结语

在本文中，对低渗透油藏 CO_2 水气交替驱参数优化进行了深入分析，明确了气水比、注气速度、关井气油比和段塞注气量等关键参数对提高采收率的影响。同时，探索了正交试验设计法、响应面分析法和人工智能优化方法在参数优化中的应用。本研究的创新之处在于将人工智能技术引入到优化过程中，与传统方法相比，这一技术在处理复杂多参数系统时展现出更高的效率和精确度。

相较于之前的研究，本研究在优化方法上进行了显著改进，特别是在正交试验设计法和响应面分析法的应用上，通过引入新的数学模型和算法，提升了优化的准确性和可靠性。此外，人工智能的引入，不仅优化了参数选择过程，还大幅降低了计算成本和时间，为低渗透油藏的高效开发提供了新的视角。

基金项目

基金号：cstc2024ycjh-bgzxm0215；名称：致密油藏纳米流体提高采收率机理研究；单位：重庆科技学院；负责人：傅程。

参考文献

- [1] 李敏, 关华, 胡世勇, 等. 特低渗透油藏 CO_2 混相驱和非混相驱水气交替注采参数优化[J]. 非常规油气, 2021, 8(1): 60-66.
- [2] 程旭阳. 低渗透油藏高含水期 CO_2 驱工程参数优化研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
- [3] 孙丽丽, 李治平, 窦宏恩, 等. 超低渗透油藏 CO_2 驱注入参数优化的实验研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(12): 66-70.
- [4] 汤瑞佳, 陈龙龙, 江绍静, 等. 低渗透油藏强化 CO_2 /水交替注入驱油效果实验研究[J]. 非常规油气, 2024, 11(4): 70-78.
- [5] 韩文成. 低渗透油藏 CO_2 驱开发规律及采收率预测研究[J]. 石化技术, 2024, 31(5): 281-282+93.
- [6] 郭红强, 杜敏, 姚健, 等. 延长低渗透油藏 CO_2 驱油参数优化数值模拟研究[J]. 非常规油气, 2024, 11(1): 78-84.
- [7] 杨勇, 曹小朋, 韩文成, 等. 胜利油田高 89 地区特低渗透油藏 CO_2 驱非线性渗流规律研究[J]. 油气地质与采收率, 2023, 30(2): 36-43.
- [8] 曹小朋, 熊英, 冯其红, 等. 低渗透-致密油藏 CO_2 驱油与封存协同评价方法[J]. 油气地质与采收率, 2023, 30(2): 44-52.
- [9] 赵博文. 裂缝对低渗透油藏 CO_2 驱油影响的可视化实验研究[J]. 非常规油气, 2022, 9(6): 87-93+99.
- [10] 王石头, 马国伟, 郎庆利, 等. 低渗透裂缝性油藏 CO_2 驱气窜形成机理及防治技术研究[J]. 能源化工, 2022, 43(3): 29-34.