

# 非纯二氧化碳近混相驱可行性研究

张贤松<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>海洋石油高效开发国家重点实验室, 北京

<sup>2</sup>中海油研究总院有限责任公司, 北京

Email: zhangxs@cnooc.com.cn

收稿日期: 2020年11月11日; 录用日期: 2020年12月23日; 发布日期: 2020年12月31日

## 摘要

CO<sub>2</sub>近混相驱对地层压力、原油物性和注入气纯度等要求不高, 降低其操作成本, 更具有应用可行性。本文基于低渗油藏E区块油藏和非纯CO<sub>2</sub>气性质, 采用细管模拟及数值模拟等手段, 研究近混相驱界限、CO<sub>2</sub>纯度下限要求以及应用可行性。研究表明, 目标油藏最小近混相驱压力(MNMP)为(0.80~0.84) MMP、CO<sub>2</sub>纯度下限为57.6%; CO<sub>2</sub>纯度80%下采出程度比CO<sub>2</sub>纯度40%下提高了12.53%, 仅比纯CO<sub>2</sub>混相驱采出程度降低了3.88%, 进一步提高CO<sub>2</sub>纯度对采收率的提高幅度很有限, 说明CO<sub>2</sub>近混相驱开发效果接近于混相驱。考虑到提纯CO<sub>2</sub>成本, 推荐近混相注入气的合理纯度为80%。CO<sub>2</sub>近混相驱10年开发期采出程度高达58.28%, 比水驱提高了17.67%, 目标区块实施非纯CO<sub>2</sub>近混相驱开发可行性高。研究成果对我国低渗透油藏应用非纯CO<sub>2</sub>近混相驱开发技术具有重要指导意义。

## 关键词

低渗油藏, 近混相驱, 数值模拟, 近混相区间, CO<sub>2</sub>纯度, 开发效果

# The Feasibility Study on Near Miscible Flooding by Impure CO<sub>2</sub>

Xiansong Zhang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Offshore Oil Exploitation, Beijing

<sup>2</sup>CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing

Email: zhangxs@cnooc.com.cn

Received: Nov. 11<sup>th</sup>, 2020; accepted: Dec. 23<sup>rd</sup>, 2020; published: Dec. 31<sup>st</sup>, 2020

## Abstract

CO<sub>2</sub> near miscible flooding has low requirements on formation pressure, crude oil physical prop-

文章引用: 张贤松. 非纯二氧化碳近混相驱可行性研究[J]. 渗流力学进展, 2020, 10(4): 27-33.

DOI: 10.12677/apf.2020.104004

erties and injected gas purity, so it is more feasible due to reduce its operation difficulty and cost. In this paper, based on the properties of low permeability reservoir E block and impure CO<sub>2</sub> gas, the limit of near miscible flooding, the lower limit of CO<sub>2</sub> purity and the application feasibility are studied by means of slim tube simulation and numerical simulation. The results show that the minimum near miscible flooding pressure (MNMP) of the target reservoir is (0.80 - 0.84) MMP, and the lower limit of CO<sub>2</sub> purity is 57.6%; the recovery degree under 80% CO<sub>2</sub> purity is 12.53% higher than that under 40% CO<sub>2</sub> purity, only 3.88% lower than that of pure CO<sub>2</sub> miscible flooding. Further improving the purity of CO<sub>2</sub> has limited effect on oil recovery, which indicates that the development effect of CO<sub>2</sub> near miscible flooding is close to miscible flooding. Considering the cost of CO<sub>2</sub> purification, a reasonable purity is 80%. During the 10-year development period of CO<sub>2</sub> near miscible flooding, the recovery percent is as high as 58.28%, which is 17.67% higher than that of water flooding. The research results have important guiding significance for the application of impure CO<sub>2</sub> near miscible flooding technology in low permeability reservoirs in China.

## Keywords

Low Permeability Reservoir, Near Miscible Flooding, Numerical Simulation, Near Miscible Region, CO<sub>2</sub> Purity, Development Effect

Copyright © 2020 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

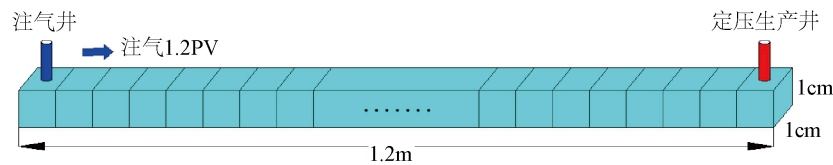
国内外大量研究和矿场应用[1] [2]表明,混相驱其驱油效率最高,对混相驱技术的研究与应用比较成功。对于中国大多数油藏属于陆相沉积,其油品和物性较差,还缺乏纯 CO<sub>2</sub> 气源,导致最小混相压力(MMP)较高,难以满足混相条件。与混相驱相比,CO<sub>2</sub> 近混相驱对地层压力、原油物性和注入气纯度等要求不高,大大提高其应用可行性[3] [4]。如果将非纯 CO<sub>2</sub> 注入油藏即能提高原油采收率,还能减轻温室气体排放,因此,探索非纯 CO<sub>2</sub> 近混相驱更有技术和环保意义。Dong 等人对 CO<sub>2</sub> 近混相驱进行了实验研究[5] [6],其驱油效率比混相驱并未明显下降。Parvazdavani 采用室内物模到油藏规模模拟手段,研究了近混相驱效果[7]。尚宝兵、杨胜来等人[8] [9] [10]研究了杂质气体对二氧化碳驱最小混相压力和原油物性的影响,得出了回注 CO<sub>2</sub> 伴生气可行性和注入方式,证明其应用。张贤松等[11]针对某海上低渗油藏 E 区块富含 CO<sub>2</sub> (24%~90 mol%),最小混相压力(MMP)高于地层压力,探讨了非纯 CO<sub>2</sub> 近混相驱的控制条件。与混相驱判别不同,近混相驱是介于混相驱和非混相驱之间的区域,如何界定该区域以及对 CO<sub>2</sub> 纯度要求具有应用价值。本文基于 E 区块 5 井油气样和油藏性质以及细管实验结果,建立细管模型和典型油藏模型,采用细管模拟及数值模拟等手段,研究了非纯 CO<sub>2</sub> 最小近混相压力及对 CO<sub>2</sub> 纯度的要求,以及应用 CO<sub>2</sub> 近混相驱开发可行性。结果表明,目标油藏近混相驱 CO<sub>2</sub> 纯度区间为下限为 57.6%~99%,其下限为 57.6%;CO<sub>2</sub> 纯度 80% 下近混相驱的采出程度比非混相 CO<sub>2</sub> (纯度 40% 下)提高了 12.53%,仅比混相驱 (CO<sub>2</sub> 纯度 100%)采出程度下降了 3.88%,说明 CO<sub>2</sub> 近混相驱开发效果接近于混相驱。进一步 CO<sub>2</sub> 纯度对采出程度的提高幅度较小,考虑进一步提纯 CO<sub>2</sub> 的成本更高,推荐目标区块近混相驱注入气的 CO<sub>2</sub> 纯度为 80%。研究成果对海上低渗油藏气驱高效开发提供技术依据,对陆地低渗油田 CO<sub>2</sub> 提高采收率技术应用也具有指导意义。

## 2. 最小近混相压力与 CO<sub>2</sub> 纯度下限

E 区块油藏富含 CO<sub>2</sub> 伴生气, 可作为 CO<sub>2</sub> 驱的气源, 回注油藏实施 CO<sub>2</sub> 驱。其油品及气体组成分析见表 1。为使非纯 CO<sub>2</sub> 注入气与地层原油达到近混相程度, 首先要研究不同纯度 CO<sub>2</sub> 对近混相区间及纯度下限所要求。本文基于细管实验结果[11], 建立长细管模型, 在模型始端和末尾端分别设置一口注入井和油井, 细管模型图如图 1 所示。

**Table 1.** Main property parameters of crude oil and well fluid  
**表 1.** 原油和井流体主要性质参数

气油比(闪蒸气/闪蒸油)	107.5 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
地层油体积系数	1.3357
地层油密度	0.6986 g/cm <sup>3</sup>
地层油粘度	0.29 mPa.s
C <sub>1</sub> +N <sub>2</sub>	42.92 mol%
CO <sub>2</sub> +C <sub>2</sub> ~C <sub>10</sub>	27.33 mol%
C <sub>11+</sub>	29.75 mol%



**Figure 1.** Model of thin tube simulation  
**图 1.** 细管模拟模型图

在低于 MMMP 下, 即在近混相及非混相段加密压力点, 在混相和非混直线段之间, 细管模拟得到一条新的直线段即近混相段, 其与混相和非混直线段交叉得到两个交点, 定义这两点之间的压力区间为近混相区间。以注纯 CO<sub>2</sub> 为例, 设定不同压力, 注入 1.2 PV 的纯 CO<sub>2</sub>, 细管模拟计算得到不同压力下对应的驱油效率。作不同压力与其驱油效率关系图, 得到明显的三段线性关系, 如图 2。将中间段线性关系做直线延长, 与其前后的直线段交点所对应压力点为近混相压力区间, 其中, 与非混相直线段交点所对应的压力为近混相压力下限, 定义为最小近混相压力(MNMP), 得到 E 区块纯 CO<sub>2</sub> 最小近混相驱压力为 27.05 MPa, 近混相压力区间为 27.05 MPa~33.64 MPa。

如同注纯 CO<sub>2</sub> 驱一样, 通过细管模拟得到某一 CO<sub>2</sub> 纯度下的驱油效率与注入压力关系, 获得不同 CO<sub>2</sub> 纯度下对应的 MMP 和 MNMP, 见表 2。根据不同 CO<sub>2</sub> 纯度下的 MNMP 和 MMP, 进一步得到 MNMP 为(0.8~0.84) MMP。

根据表 2 数据, 绘制 MMP 和 MNMP 与 P<sub>CO<sub>2</sub></sub> (CO<sub>2</sub> 纯度)之间关系曲线, 发现 MMP 和 MNMP 均与 CO<sub>2</sub> 纯度呈线性关系:

$$\text{MMP} = -0.1703P_{\text{CO}_2} + 49.86 \quad (1)$$

$$\text{MNMP} = -0.1516P_{\text{CO}_2} + 41.73 \quad (2)$$

对纵坐标压力平行于横坐标做直线, 与 MMP 和 MNMP 线相交, 交点所对应的 CO<sub>2</sub> 纯度即为该压力下近混相驱的 CO<sub>2</sub> 纯度上下限, 如图 3 所示。如目标油藏平均地层压力为 33 MPa, 近混相驱的 CO<sub>2</sub> 纯度

区间范围为 57.6%~99.0%，其中，CO<sub>2</sub> 纯度下限 57.6%。目标油藏产出气 CO<sub>2</sub> 含量为 24%~90%，CO<sub>2</sub> 近混相驱纯度窗口区间较宽，因此，注入伴生非纯 CO<sub>2</sub> 近混相驱的可行性和潜力较大。

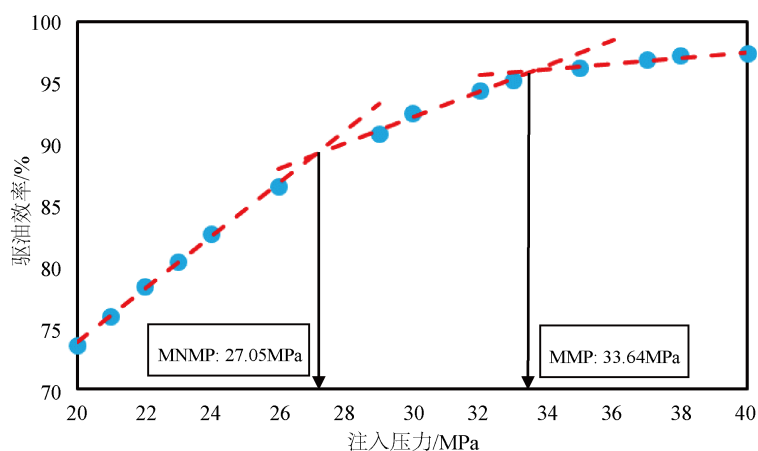


Figure 2. Relationship of displacement efficiency and injection pressure (pure CO<sub>2</sub>)

图 2. 驱油效率与注入压力关系图(纯 CO<sub>2</sub>)

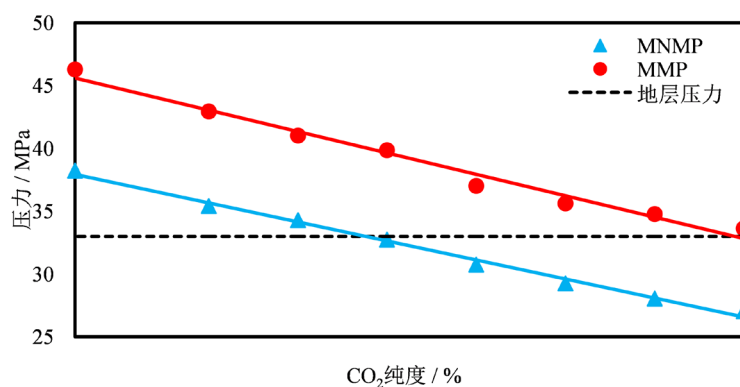


Figure 3. CO<sub>2</sub> purity plate of near-miscible flooding

图 3. 近混相驱 CO<sub>2</sub> 纯度图版

Table 2. MNMP and MMP with different CO<sub>2</sub> purity

表 2. 不同 CO<sub>2</sub> 纯度下的 MNMP 和 MMP

CO <sub>2</sub> 纯度 / %	MNMP / MPa	MMP / MPa	MNMP / MMP	混相程度
100	27.05	33.64	0.80	混相驱
90	28.04	34.78	0.81	近混相
80	29.27	35.63	0.82	
70	30.74	37.01	0.83	
60	32.73	39.86	0.82	
50	34.30	41.03	0.84	非混相
40	35.42	42.95	0.82	
24	38.24	46.28	0.83	

根据 E 区块 5 井和 4 井四个井段的资料, 得到不同井段近混相  $\text{CO}_2$  纯度下限稍有差异, 分析其原因主要与各个井段所处的油藏条件有关。随井深增加, 油藏温度和压力增加,  $\text{CO}_2$  近混相驱纯度下限也随之增加, 见表 3。

**Table 3.** Comparison of reservoir conditions and oil properties

**表 3.** 油藏条件及原油物性对比

井号	5 井 1 段	4 井 2 段	5 井 2 段	4 井 3 段
纯度下限, %	64	52	43	34
油藏中深, m	3319	3324	3489	3503
油藏温度, $^{\circ}\text{C}$	112.1	114.2	116.7	122.5
油藏压力, MPa	31.96	33.85	34.04	36.53

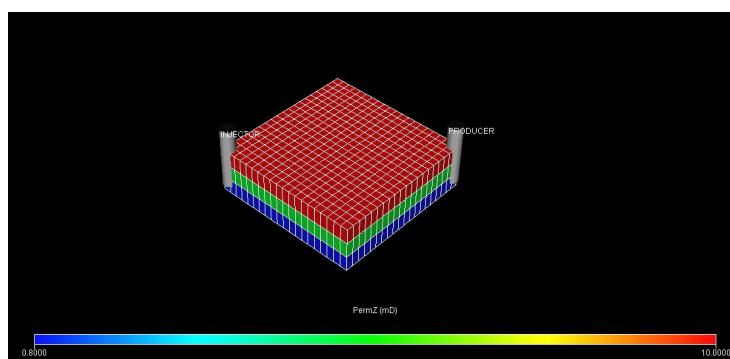
### 3. 不同条件和方式的开发效果

采用 Eclipse 数值模拟软件, 建立典型油藏模型, 网格尺寸为  $10\text{ m} \times 10\text{ m} \times 20\text{ m}$ , 初始地层压力 33 Mpa, 初始含油饱和度为 60%。纵向上设置三层, 模型参数见表 4。建立一注一采的布井方式, 如图 4 所示。

**Table 4.** Permeability and porosity parameters of typical models

**表 4.** 典型模型渗透率和孔隙度参数

层名	孔隙度	渗透率 mD	层厚 m
I-1	0.25	10	20
I-2	0.22	5	20
I-3	0.15	0.8	20



**Figure 4.** Vertical permeability diagram of typical reservoir model

**图 4.** 典型油藏模型垂向渗透率示意图

#### 3.1. 不同混相程度

设计不同  $\text{CO}_2$  纯度, 数值模拟得到  $\text{CO}_2$  气驱过程中的含油饱和度变化。图 5 为 3 种  $\text{CO}_2$  纯度下(不同混相状态)驱替中同一时刻的含油饱和度变化图,  $\text{CO}_2$  纯度为 40% 代表非混相驱,  $\text{CO}_2$  纯度为 80% 代表近混相驱,  $\text{CO}_2$  纯度为 100% 代表混相驱。可以看出,  $\text{CO}_2$  近混相驱其驱油效率和波及范围上居中, 更接近于混相驱。

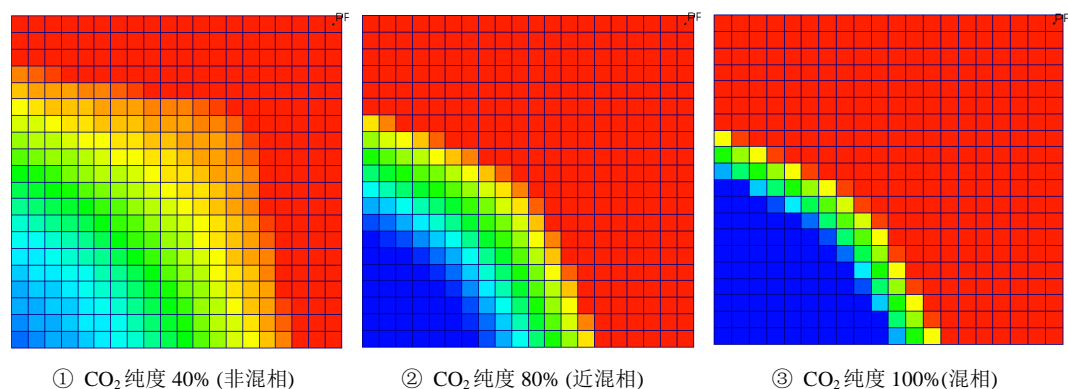


Figure 5. Oil saturation of gas flooding with different CO<sub>2</sub> purity  
图 5. 不同 CO<sub>2</sub> 纯度下气驱含油饱和度图

表 5 为不同 CO<sub>2</sub> 纯度下气驱采出程度效果对比, 当 CO<sub>2</sub> 纯度为 40% 时, 累计采出程度为 42.27%, 而当 CO<sub>2</sub> 纯度 80% 下采出程度达到 54.8%, 是前者的 1.29 倍; 纯 CO<sub>2</sub> 混相驱采出程度为 58.68%, 比 CO<sub>2</sub> 纯度 80% 下近混相驱仅提高了 3.88%, 提高幅度有限, 纯度高于 80% 后, 进一步提高纯度对采出程度的提高幅度较小, 这说明 CO<sub>2</sub> 近混相驱开发效果接近于混相驱。考虑到 CO<sub>2</sub> 提纯成本, 推荐 E 区块 CO<sub>2</sub> 驱近混相注入气的理想纯度为 80%。

Table 5. Simulation results of different CO<sub>2</sub> purity flooding schemes  
表 5. 不同 CO<sub>2</sub> 纯度气驱方案模拟计算结果

CO <sub>2</sub> 纯度%	混相方式	累计采油量 m <sup>3</sup>	采出程度%
40	非混相	121737.6	42.27
60	近混相	142300.8	49.41
80	近混相	157824.0	54.80
90	近混相	163958.4	56.93
100	混相	168998.4	58.68

### 3.2. 不同开发方式

根据油藏特征与上述研究结果, 采用如下注气参数[12] [13]: CO<sub>2</sub> 纯度为 80%, 注气速度为 0.08 HCPV/a, 数值模拟计算 CO<sub>2</sub> 近混相驱和水驱两种开发方式 10 年开发期内的采出程度, 计算结果见表 6。CO<sub>2</sub> 近混相驱开发 10 年期采出程度高达 58.28%, 比水驱提高了 17.67%, 表明非纯 CO<sub>2</sub> 近混相驱可获得更好的开发效果。

Table 6. Comparison of effects with different development patterns  
表 6. 不同开发方式开发效果对比

方式	累计采油量 m <sup>3</sup>	累计增油量 m <sup>3</sup>	采出程度%
近混相驱	167846.4	94924.8	58.28
水驱	116956.8	44035.2	40.61

## 4. 结论与建议

(1) 近混相驱最小近混相压力为(0.8~0.84) MMP, CO<sub>2</sub> 纯度在 57.6% 以上即可达到近混相, 目标区块

满足 CO<sub>2</sub> 近混相驱潜力空间大。

(2) 高于 80% 后, 继续增大 CO<sub>2</sub> 纯度, 其采出程度提高幅度较小, CO<sub>2</sub> 近混相驱注入气的合理纯度为 80%。CO<sub>2</sub> 纯度 80% 下近混相驱采出程度比纯度 40% 下非混相驱提高了 12.53%, 比纯 CO<sub>2</sub> 混相驱仅下降了 3.88%, CO<sub>2</sub> 近混相驱开发效果接近于混相驱。

(3) 目标区块 CO<sub>2</sub> 近混相驱开发 10 年期采出程度高达 58.28%, 比水驱提高了 17.67%, 非纯 CO<sub>2</sub> 近混相驱具有很高的应用可行性。

## 基金项目

海洋石油高效开发国家重点实验室开放基金课题“非纯条件下二氧化碳驱最小近混相压力及分项相态机理研究(编号: 2015YXKJ001)”部分研究成。

## 参考文献

- [1] 李士伦, 汤勇, 侯承希. 注 CO<sub>2</sub> 提高采收率技术现状及发展趋势[J]. 油气藏评价与开发, 2019, 9(3): 1-8.
- [2] 罗二辉, 胡永乐, 李保柱等. 中国油气田注 CO<sub>2</sub> 提高采收率实践[J]. 特种油气藏, 2013, 20(2): 1-7+42.
- [3] 李菊花, 李相方, 刘斌等. 注气近混相驱油藏开发理论进展[J]. 天然气工业, 2006, 26(2): 108-110.
- [4] 程杰成, 刘春林, 汪艳勇等. 特低渗透油藏二氧化碳近混相驱试验研究[J]. 特种油气藏, 2016, 23(6): 64-67.
- [5] Dong, M., Huang, S.S. and Srivastava, R. (2001) A Laboratory Study on Near-Miscible CO<sub>2</sub> Injection in Steelman Reservoir. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, **40**, 53-60. <https://doi.org/10.2118/01-02-05>
- [6] 李向良. 二氧化碳驱油藏产出气回注的可行性及其对驱油效果的影响[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(3): 72-76.
- [7] Parvazdavani, M. (2015) Lab and Field Scale Modeling of Near Miscible CO<sub>2</sub> Injection in Different Porous Mediums. *Journal of Petroleum Science & Technology*, **5**, 53-68.
- [8] 尚宝兵, 廖新维, 赵新亮, 等. 杂质气体对二氧化碳驱最小混相压力和原油物性的影响[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(6): 92-94+98.
- [9] Yang, S.L., Chen, H., Hang, D.Z., et al. (2013) Mechanism of Produced Gas Reinjection during CO<sub>2</sub> Flooding by Chromatographic Analysis. *Journal of Dispersion Science and Technology*, **34**, 342-346. <https://doi.org/10.1080/01932691.2012.667290>
- [10] Chen, H., Yang, S.L., Ren, S.S., et al. (2013) Crude Oil Displacement Efficiency of Produced Gas Reinjection. *International Journal of Green Energy*, **10**, 566-573. <https://doi.org/10.1080/15435075.2011.654149>
- [11] 张贤松, 陈浩, 李保振, 等. 低渗油藏非纯 CO<sub>2</sub> 最佳近混相驱控制条件探讨[J]. 中国海上油气, 2017, 29(6): 75-78.
- [12] 罗成栋. 海上“三低”油藏 CO<sub>2</sub> 注气开发适应性评价[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2014, 36(3): 127-132.
- [13] 周君, 张鑫, 刘云鹏. 欢 50 块二氧化碳驱可行性研究[J]. 石油地质与工程, 2013, 27(2): 127-129.