

特低渗油藏注 CO₂ 驱油微观机制

张英芝^{1,2}, 杨正明³, 唐立根³, 张硕³, 刘学伟³

1. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 100029
2. 中国大庆油田有限责任公司, 黑龙江大庆 163712
3. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007

摘要 利用核磁共振仪、原油气相色谱仪、细管实验和特低渗透岩心物理模拟实验,对细管实验的 CO₂ 非混相驱和混相驱驱替原油过程中的产出物和残余油进行取样分析,并结合核磁共振实验分析结果得到特低渗透油藏注 CO₂ 微观驱油机制。结果表明,CO₂ 非混相驱主要是萃取 C₁₈ 以前的组分,而 CO₂ 混相驱,不但可以萃取 C₁₈ 以前的组分,也能萃取 C₁₉—C₂₅ 的组分,初期主要萃取低碳分子的组分,随着驱替的进行,逐步萃取较高碳分子的组分;与原油组分和非混相驱的残余油组分相比,混相驱的残余油中轻质组分所占比例减少,中间组分和重质组分所占比例较大,导致残余油黏度变大;在非混相气驱和混相气驱时,由于残余油黏度发生变化和胶质沥青沉淀,使岩心孔隙中一部分流体变成不可动流体,核磁共振图谱发生左移。

关键词 特低渗透油田;非混相气驱;混相气驱;机制;核磁共振

中图分类号 TE311

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.35.003

Microscopic Mechanism of CO₂ Flooding in Extra-low Permeability Reservoir

ZHANG Yingzhi^{1,2}, YANG Zhengming³, TANG Ligen³, ZHANG Shuo³, LIU Xuewei³

1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 100029, China
2. Daqing Oilfield Company Limited, PetroChina, Daqing 163712, Heilongjiang Province, China
3. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development—Langfang, Langfang 065007, Hebei Province, China

Abstract By means of NMR, oil gas chromatography, slim tube experiments, and extra-low permeability core physical simulation experiments, the produced oil and residual oil acquiring from slim tube experiments both in CO₂ immiscible flooding and CO₂ miscible flooding are analyzed. Combined with the NMR results obtained from the physical simulation experiments for extra-low permeability core, the microscopic mechanism of CO₂ flooding in low permeability reservoirs is discovered. It includes three aspects: The components before C₁₈ are mainly extracted by CO₂ immiscible flooding, while the CO₂ miscible flooding not only could extract the components before C₁₈, but also could extract components C₁₉—C₂₅, low-carbon molecules are initially extracted, with the ongoing flooding, higher-carbon molecules are gradually extracted; Compared with crude oil and immiscible flooding residual oil, the components of miscible flooding residual oil consist of smaller proportion of light components and larger proportion of intermediate and heavy components, causing lager residual oil viscosity; The residual oil viscosity changes and the asphaltene precipitates caused by miscible and immiscible gas flooding make a part of pore fluid immobile and the graph of NMR shifted left.

Keywords extra-low permeability oilfield; immiscible gas flooding; miscible gas flooding; mechanism; NMR

0 引言

近 10 年来,在国内石油探明储量和未动用储量中,特低

渗透储量占了很大比例,投入开发的特低渗透油田也越来越多^[1]。特低渗透储层由于喉道半径细小,黏土含量较高,注水

收稿日期:2012-10-25;修回日期:2012-11-15

基金项目:国家油气重大专项(2011ZX05013-006);中石油重大攻关课题项目(2011B-1203)

作者简介:张英芝,博士后,研究方向为低渗透油气田开发,电子信箱:zhangyingzhi99@sina.com

比较困难,导致地层能量补充不足,从而影响了特低渗透油藏开发效果^[2]。

近年来,实验研究和矿场实际表明,注 CO₂ 是特低渗透油藏有效开发的一个重要手段,人们在 CO₂ 驱渗流机制方面进行了大量的研究^[3-4]。利用细管实验、PVT 实验和物理模拟实验测定油藏 CO₂ 驱的最小混相压力,分析单纯 CO₂ 驱和水气交替注入开采机制,从而揭示了 CO₂ 非混相驱和混相驱的驱油机制^[5-6]。但尚少对 CO₂ 非混相驱和混相驱驱替原油过程中的产出物和残余油组分进行分析,并利用核磁共振进行气驱油机制分析。本文利用核磁共振仪、原油气相色谱仪、细管实验和特低渗透岩心物理模拟实验^[7],测试分析 CO₂ 驱替过程中的产出物和残余油组分,结合核磁共振实验分析原油在岩心中的微观分布,深化了特低渗透油藏注 CO₂ 微观驱油机制。

本文所用岩心取自大庆油田外围某一特低渗透区块,实验测得其最小混相压力为 25MPa。

1 CO₂ 驱油过程中产出物(原油)组分分析

利用原油气相色谱分析仪分别对细管实验中的非混相驱替和混相驱替的产出物(原油)进行连续取样分析,分析原油组分在不同驱替状况下的变化规律。

1.1 非混相驱条件下产出物(原油)组分变化规律

将模型饱和和地层原油,用纯度 99.99% 的 CO₂ 分别进行非混相驱替(18.37MPa),从 CO₂ 即将突破起,分别对非混相驱替的产出物连续取样,用气相色谱技术分析样品。分析对比 CO₂ 注入量分别为 0.5444、0.6184、0.7966、1.0433、1.2266 和 1.6102PV (PV 为孔隙体积)的 6 个产出物样品组分,说明不同驱替过程中产出物组分变化规律,分析结果如图 1 所示。

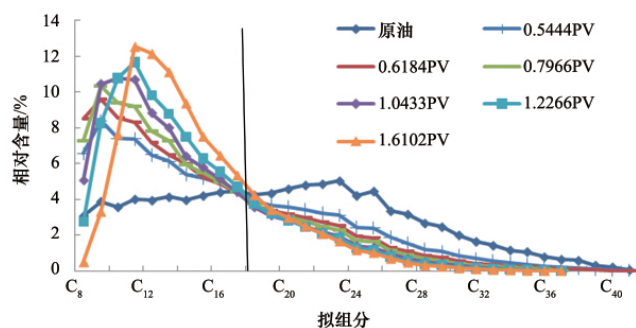


图 1 非混相驱状况下产出物组分变化曲线

Fig. 1 Component curves with immiscible flooding

由图 1 可看出,产出物相对组成曲线与原油相对组成曲线相交,因此产出物相对组成曲线成两部分。方便描述起见,左半部因表示轻质组成,定义为“轻组成波”;相应地,右半部分表示重质组分组成情况,定义为“重组成波”。由产出物相对组成曲线可知,“轻组成波”与原油组成曲线之间有近乎相同的交点,即 C₁₇;同时,随着注入量的增大,“轻组成波”振幅

不断增大,即主峰碳及其附近组分在产出物中所占的比例不断增大。“重组成波”则随驱替过程的延续不断远离原油组成,在图谱中表现为不断下移。由注入量为 1.6102PV 产出物相对组成可知,在延续驱替过程中“轻组成波”的振幅继续增大、“重组成波”继续下移规律的同时,“轻组成波”在周期变化不大的情况下右移,与原油的相对组成曲线的交点从 C₁₇ 移动至 C₁₈。

1.2 混相驱条件下产出物(原油)组分变化规律

在驱替压力为 25.18MPa 的混相驱过程中,从 CO₂ 即将突破起,连续记录出口产物中标准状况下的采出物组分,直至驱替实验结束,分析对比 CO₂ 注入量分别为 0.7173、0.7773、0.8276、0.8599、0.9229、0.9768、1.1912、1.3088 和 1.6791PV 的 9 个产出物样品组分,说明不同驱替过程中产出物组分变化规律,实验结果如图 2 所示。

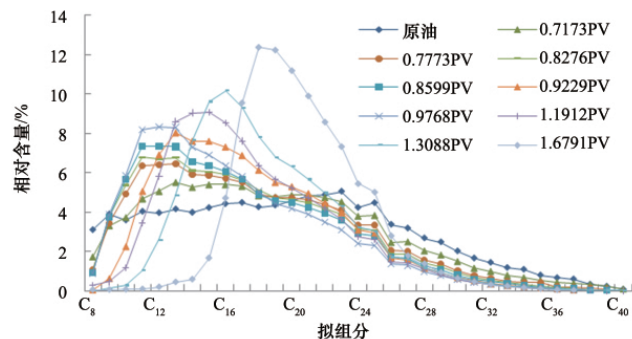


图 2 混相驱状况下产出物组分变化曲线

Fig. 2 Component curves with miscible flooding

根据产出物相对组成曲线与原油相对组成曲线的相交情况,仿照非混相驱过程的描述方法,交点为界,左半部相对组成曲线定义为“轻组成波”,右半部分相对组成曲线定义为“重组成波”。从注入量为 0.7173PV 起,产出物的“轻组成波”的振幅不断增大、右移,但该波的周期几乎不变;当注入量达到 0.9768PV 时,“轻组成波”振幅度增大的更多、右移的速度加快、波形的周期依旧变化甚微。实验结束时,产出物相对组成曲线与原油相对组成曲线的交点右移至 C₂₅ 处。“重组成波”则随驱替过程的延续不断远离原油相对组成曲线,在图谱中表现为不断下移;但由于“轻组成波”向右位移量的增加,“重组成波”的组分范围缩减,在图谱中表现为不断向重质组分方向靠近。

2 不同 CO₂ 驱替状况下残余油组分分析

利用原油气相色谱分析仪分别对细管实验中的非混相驱替(12.93、18.37MPa)和混相驱替(25.18MPa)的残余油进行取样分析,分析残余油组分在不同驱替状况下的变化规律。

由图 3 可以看出,非混相驱时,残余油组分随着驱替压力增加,曲线峰值向右偏移,与原油组分相比,残余油中轻质组分(<C₁₈)比例减少,中间组分比例增加,重质组分比例略有增

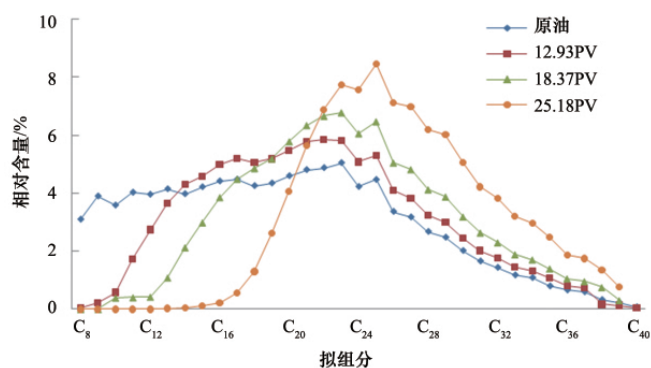


图3 不同压力驱替后残余油组分分析
 Fig. 3 Residual oil components with different pressure displacements

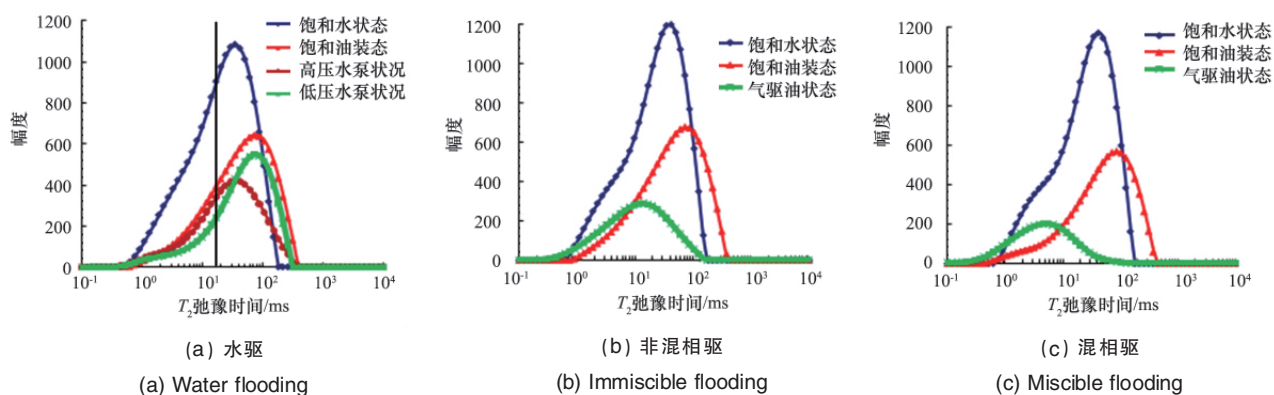


图4 特低渗透岩心水驱、非混相驱和混相驱的核磁共振图谱
 Fig. 4 NMR graphs with water flooding, immiscible flooding and miscible flooding

核磁共振图谱中的饱和水状态是指岩样干燥抽真空,驱替饱和模拟水,核磁共振测量的图谱可以表征岩样的孔隙结构特征,用 11ms 作为 T_2 谱的截止值,将图形分成两部分, T_2 弛豫时间小于 11ms 的部分为不可动流体, T_2 弛豫时间大于 11ms 的部分为可动流体。饱和油状态是油驱水,模拟地层条件下的原油饱和度的分布,核磁共振测量得到的图谱可以得到原油在岩心中的分布状况。水驱油状态或气驱油状态是指水驱或 CO_2 气驱的最终状态,核磁共振测量图谱得到的是岩心中残余油的分布状况。饱和油状态得到的核磁共振图谱与水驱油状态或气驱油状态下得到的核磁共振图谱的差值就是原油被采出或被动用的部分。

从图 4(a)中可以看出:(1) 9# 岩样为混合润湿,在小孔隙中一部分为水充填,一部分为油充填,总体上表现为亲水特性。(2) 在低压(15MPa)和高压(20MPa)下,特低渗透油藏的原油采出程度分别为 28%和 30%,水驱主要动用大孔隙中的可动流体。在高压水驱下,采出的原油基本来自大孔隙中的原油,小孔隙中的原油基本没有被动用;而在低压水驱下,采出的原油大部分来自大孔隙中的原油,也有一部分为小孔隙中的原油,这主要是渗吸作用。因此,在特低渗透油藏开发过程中,也需要考虑渗吸的作用提高特低渗透油藏动用效果。

加。而在混相驱的残余油组分,与原油组分和非混相驱的残余油组分相比,残余油中轻质组分($<C_{20}$)比例减少,中间组分和重质组分比例较大,导致残余油黏度变大。

3 特低渗透岩心水驱和 CO_2 驱微观机制的核磁共振研究

在某一特低渗透区块同一小层取渗透率和孔隙度非常接近的 3 块岩样,分别为 9#(渗透率为 $4.52 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度为 10.55%)、11#($4.58 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度为 10.58%)、12#(渗透率为 $4.62 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度为 10.62%),作为驱替的平行样,分别进行水驱(包括低压水驱和高压水驱)、 CO_2 非混相驱和 CO_2 混相驱 4 组实验,并利用低磁场核磁共振仪测试其驱替结果,如图 4 所示。

(3) 驱替压力的增加不能使采收率有很大程度的提高。所以,对于特低渗透油藏来说,提高水驱注入压力不是有效提高采收率的方法。

从图 4(b)中可以看出:(1) 特低渗透油藏非混相气驱的采出程度为 48%,与水驱相比,提高了 18%—20%,非混相气驱采出了大孔隙中 75%的原油。(2) 由于残余油黏度发生变化,使得孔隙中一部分流体变成不可动流体,不可动流体在原有的基础上增加了 31.1%。

从图 4(c)中可以看出:(1) 特低渗透油藏混相气驱的采出程度为 64%,与水驱相比,提高了 34%—36%,与非混相气驱相比,提高了 16%,混相气驱采出了大孔隙中 92.5%的原油。(2) 由于残余油黏度发生变化和胶质沥青沉淀现象,使得孔隙中一部分流体变成不可动流体,不可动流体在原有的基础上增加了 76.5%。

4 结论

(1) CO_2 非混相驱主要是萃取 C_{18} 以前的组分,而 CO_2 混相驱,不但可以萃取 C_{18} 以前的组分,也能萃取 C_{18} — C_{25} 的组分,初期主要萃取低碳分子的组分,随着驱替的进行,逐步萃取较高碳分子的组分。

(2) 与原油组分和非混相驱的残余油组分相比,混相驱的残余油中轻质组分所占比例减少,中间组分和重质组分所占比例较大。因此,混相驱后的残余油黏度要比非混相驱后的残余油黏度要大,也大于原油初始黏度。

(3) 在高压水驱下,采出的原油基本来自大孔隙,小孔隙中的基本没有被动用;而在低压水驱下,采出的原油大部分来自大孔隙,也有一部分来自小孔隙,这主要是渗吸作用。因此,在特低渗透油藏开发过程中,也需要考虑渗吸的作用,提高特低渗透油藏动用效果。驱替压力的增加,不能使采收率有很大程度的提高。所以,对于特低渗透油藏来说,提高水驱注入压力不是有效提高采收率的方法。

(4) 非混相气驱和混相气驱由于残余油黏度发生变化和胶质沥青沉淀现象,使得孔隙中一部分流体变成不可动流体,核磁共振图谱发生左移现象。

参考文献 (References)

- [1] 胡文瑞. 低渗透油气田概论[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
Hu Wenni. Theory of low-permeability reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009.
- [2] 孙焕泉, 杨勇. 低渗透砂岩油藏开发技术[M]. 北京: 石油工业出版社,

2008.

Sun Huanquan, Yang Yong. Development technology in low-permeability sand reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.

- [3] 杨正明, 张英芝, 郝明强, 等. 低渗透油田储层综合评价方法[J]. 石油学报, 2006, 27(2): 64-67.
Yang Zhengming, Zhang Yingzhi, Hao Mingqiang, et al. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(2): 64-67.
- [4] 王家禄. 油藏物理模拟[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
Wang Jialu. Reservoir physical simulation [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [5] Bachu S, Adams J. Sequestration of CO₂ in geological media in response to climate change: Capacity of deep saline aquifers to sequester CO₂ in solution [J]. *Energy Conversion and Management*, 2003, 44 (5): 3151 - 3175.
- [6] Metz B, Davison O, de Coninck H C, et al. IPCC Special report on carbon dioxide capture and storage[R/OL]. [2012-08-31]. http://library.wmo.int/pmb_ged/IPCC_CO2_e.pdf.
- [7] 姜洪福, 雷友忠, 熊霄. 大庆长垣外围特低渗透扶杨油层 CO₂ 非混相驱油试验研究[J]. 现代地质, 2008, 22(4): 659-663.
Jiang Hongfu, Lei Youzhong, Xiong Xiao. *Geoscience*, 2008, 22(4): 659-663.

(责任编辑 刘志远)

· 学术动态 ·



“第十一次全国营养科学大会 暨 DRIs 国际研讨会”征文

中国营养学会“第十一次全国营养科学大会暨 DRIs 国际研讨会”将于 2013 年 5 月 15—17 日在杭州举办。

征稿范围:(1) 不同人群的营养需要研究;(2) 有关营养需要量研究的方法学;(3) 营养素的生物利用率、代谢、生理功能;(4) DRIs 相关的营养基因组学,代谢组学研究;(5) 膳食营养与非传染性慢性病;(6) 食物新资源、食物成分和相关健康食品研究;(7) 食物中的植物化学物的生物学功能及其摄入量;(8) 营养状况调查和评价;(9) 营养不良及改善;(10) 营养相关政策;(11) 循证营养学;(12) 营养素和食物成分安全性评价;(13) 其他相关内容。

论文提交日期:2013 年 1 月 31 日。

联系电话:010-83554781-816,810,826。

电子信箱:cns2012@vip.126.com。

大会网站:www.cnsoc.org/cn/news_info.asp?nid=1492。