

# 特低渗透油藏 CO<sub>2</sub> 非混相驱油机理研究

赵明国<sup>1</sup> 李金珠<sup>1</sup> 王忠滨<sup>2</sup>  
(东北石油大学提高油气采收率教育部重点实验室<sup>1</sup>, 大庆 163318; 胜利油田孤岛采油厂<sup>2</sup>, 东营 257231)

**摘 要** 针对大庆油田树 101 井区特低渗透油层,结合油藏条件,通过一系列室内实验,确定了 CO<sub>2</sub> 驱油机理。研究表明:随着 CO<sub>2</sub> 注入量增加,溶解油气比、体积系数和膨胀系数增大,黏度降低,束缚水体积膨胀。在 27 MPa 下注入 CO<sub>2</sub>,地层油体积膨胀 1.484 7 倍,残余油饱和度降低 11.43%,地层油黏度降低到原黏度的 48.51%,束缚水体积膨胀 1.132 4 倍。同时当地层压力从 27 MPa 降低到原始地层压力后,依靠溶解 CO<sub>2</sub> 膨胀能,可采出原油 15.49%。此外,注入 CO<sub>2</sub> 后,CO<sub>2</sub>-地层油的界面张力降低,CO<sub>2</sub> 可使地层油中的轻质烃抽提和汽化,从而提高采收率。

**关键词** 大庆油田 特低渗透油层 CO<sub>2</sub> 非混相驱 室内实验

**中图法分类号** TE357.7; **文献标志码** A

低渗透油气田广泛分布在我国的各个油气区,近 5 年来,探明储量中低渗透油藏储量的比重已增加到 50% ~ 60%,剩余石油资源中,中低渗透油藏储量占到 76.5%。由于低渗透油藏注水压力高、吸水能力差,通常需要进行油藏改造才能维持正常生产,如何经济高效开发低渗透油藏是当前世界油田开发中的一个难题<sup>[1]</sup>。

随着 CO<sub>2</sub> 驱油技术成熟,以及 CO<sub>2</sub> 气源的不断发现,大庆、吉林、胜利、苏北、中原等油田进行了 CO<sub>2</sub> 驱现场试验,都见到不同程度的注气效果。国内外 CO<sub>2</sub> 驱生产实践表明,注 CO<sub>2</sub> 已成为特低渗透油田改善开发效果、建立有效驱动体系的主要技术措施<sup>[2,3]</sup>。通过一系列实验定量研究大庆油田树 101 井区特低渗透油层 CO<sub>2</sub> 驱油机理,为提高 CO<sub>2</sub> 驱油提供依据。

## 1 实验条件

油:利用地面脱气油和煤油、地层油溶解气配制的地层模拟油气参数见表 1。

2010 年 12 月 6 日收到  
第一作者简介:赵明国(1963—),男,教授,博士,研究方向:低渗透油田开发、提高原油采收率。

| 表 1 模拟油高压物性参数                               |          |                                |            |                  |
|---------------------------------------------|----------|--------------------------------|------------|------------------|
| 油气比<br>/(m <sup>3</sup> · t <sup>-1</sup> ) | 体积<br>系数 | 密度<br>/(g · cm <sup>-3</sup> ) | Pb<br>/MPa | 黏度<br>/(MPa · s) |
| 25.4                                        | 1.117 4  | 0.778 7                        | 5.26       | 2.818            |

实验用水:按地层水组成配制的模拟水,矿化度为 5 888.4 mg/L。

实验温度:108℃。

## 2 实验仪器及设备

高压物性仪、高压配样器、高压计量泵、气体流量计、高压落球黏度计、气瓶、电子天平等。

## 3 地层油(水)注 CO<sub>2</sub> 膨胀实验

将 PVT 筒内模拟油(水)的压力升高至饱和压力,在 108℃ 下,向 PVT 筒内注入 CO<sub>2</sub>,搅拌均匀后,测定地层油(水)物性参数。之后,继续注入气体,重复上述过程。

## 4 CO<sub>2</sub> 驱油机理研究

CO<sub>2</sub> 驱油的机理主要有地层油黏度降低、地层油膨胀、溶解气驱、降低界面张力、增加束缚水饱和

度、提高岩石渗透率、改变岩石润湿性和抽提作用等。

#### 4.1 地层油体积膨胀

注 CO<sub>2</sub> 之前,地层油在地层压力(22.05 MPa)下的高压物性参数见图 1 和图 2。从图可见,随着 CO<sub>2</sub> 注入量增加,饱和压力  $P_b$ 、溶解油气比  $R_s$ 、体积系数  $B_o$  和膨胀系数  $\alpha$  增大。如在 27 MPa 下注入 CO<sub>2</sub> 后(CO<sub>2</sub> 含量为 42.69%),溶解油气比为 223.44 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>,比注入 CO<sub>2</sub> 前增加 198.04 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>,体积膨胀系数为 1.484 7,在 CO<sub>2</sub> 波及的区域内,地层油体积可增加 48.47%,提高了可流动地层油的饱和度,同时降低残余油饱和度。树 101 井区平均地层束缚水饱和度为 36.3%,如果水驱残余油饱和度为 35%,水驱采收率为 45.05%。改用 CO<sub>2</sub> 驱后,在同样的残余油饱和度(35%)下,由于地层油溶解 CO<sub>2</sub>,实际的残余油饱和度只有 23.57%,相应残余油饱和度降低 11.43%,CO<sub>2</sub> 驱采收率可到达 63.00%,可见,由于地层油体积膨胀,CO<sub>2</sub> 驱比水驱可提高 17.95%。而且注入 CO<sub>2</sub> 量越多,地层油体积膨胀幅度越大,CO<sub>2</sub> 驱比水驱提高采收率的幅度越大。

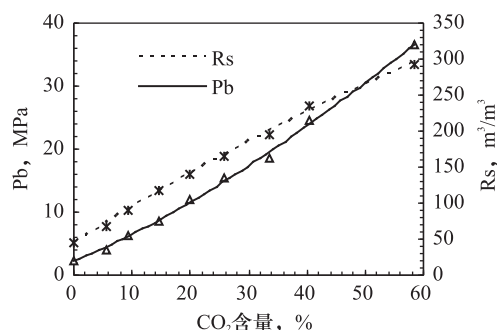


图 1 注 CO<sub>2</sub> 后地层油参数的变化

#### 4.2 地层油黏度降低

从图 2 可见,注入 CO<sub>2</sub> 后,地层油溶解 CO<sub>2</sub>,地层油黏度降低。注入 CO<sub>2</sub> 量越多,地层油黏度降低幅度越大<sup>[4]</sup>。如在 27 MPa 下注入 CO<sub>2</sub>,地层油黏度降低到 1.367 mPa·s,比地层压力下黏度(2.818 mPa·s)降低 1.451 mPa·s,降低到原黏度的 48.51%。根据达西定律,地层油的流动能力相

应增加 48.51%。因此,注入 CO<sub>2</sub> 后使地层油物性变好,原油流动能力增大,提高了原油产量。

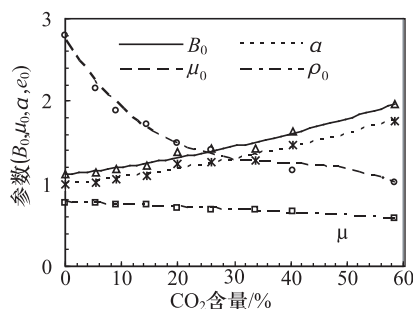


图 2 注 CO<sub>2</sub> 后地层油参数的变化

#### 4.3 溶解气驱

CO<sub>2</sub> 驱中,溶于地层油中的大量 CO<sub>2</sub> 具有溶解气驱的作用。随着压力下降,CO<sub>2</sub> 从液体中逸出,液体产生气体驱动力,提高了驱油效果<sup>[5]</sup>。如果注气压力为 27 MPa,生产压力为地层压力(22.05 MPa)。在生产过程中,由于压力降低,分离出的气体形成游离气,则地层孔隙中气体饱和度为 15.82%。因此,由于地层油中溶解气的膨胀而提高的采收率为 15.49%。

#### 4.4 增加束缚水饱和度

从图 3 可见,随着 CO<sub>2</sub> 压力增加,地层水中溶解气量  $R_s$  增加,体积膨胀系数  $\alpha$  增大,使部分束缚水变成流动水。树 101 井区束缚水饱和度为 36.3%,如注气压力为 27 MPa,水中溶解气量( $R_s$ )为 51.846 2,水体积膨胀系数( $\alpha$ )为 1.132 4,束缚水饱和度增加到 41.11%,这样 4.81% 的束缚水变成流动水,这部分水在岩心孔道占据油流动孔道,使地层油流出地层,采收率相应可提高 4.81%。注气压力越高,水中溶解的 CO<sub>2</sub> 越多,束缚水体积膨胀越大,采收率提高越多。

此外,由于 CO<sub>2</sub> 溶于水后形成碳酸,与油层岩石的碳酸盐矿物起反应,溶解地层基质提高渗透率。在 27 MPa 及地层温度下,进行 2 块岩心 CO<sub>2</sub> 驱后岩石渗透率变化实验,结果岩石渗透率提高 0.5% 以上。其次,CO<sub>2</sub> 注入过程中,在一定压差下,对油层的无机垢堵塞具有较强的冲刷作用,可有效地疏通因污染造成的地层堵塞,提高岩层的渗

透率。

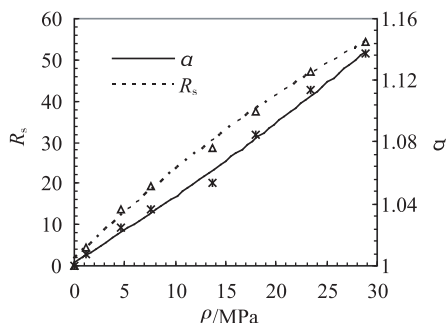


图3 注  $\text{CO}_2$  后,水膨胀系数的变化

#### 4.5 界面张力降低

在分别测量了油层温度、不同压力条件下的饱和  $\text{CO}_2$  原油与  $\text{CO}_2$  气间的界面张力后,从图4可见,注入  $\text{CO}_2$  后, $\text{CO}_2$ -地层油的界面张力降低,油气界面张力随压力增高而减少。如 27 MPa 下注入  $\text{CO}_2$ ,原油- $\text{CO}_2$  界面张力为  $0.862\ 3\ \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ ;而在 22.05 MPa 下,界面张力为  $1.321\ 2\ \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ 。界面张力的降低,不仅降低了驱油中的毛管阻力,而且减小了将油滴从岩石表面剥离下来所需克服的粘附功<sup>[6]</sup>,因此粘附在岩石表面和滞留于孔隙中的残余油更容易被采出。

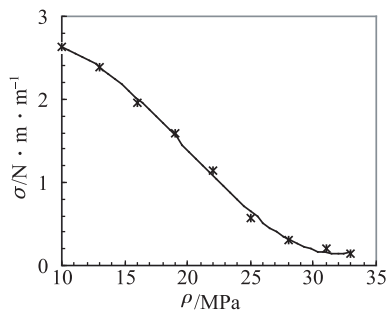


图4 地层温度下, $\text{CO}_2$ /地层油界面张力

#### 4.6 $\text{CO}_2$ 对地层油的抽提作用

地层油中轻质烃与  $\text{CO}_2$  间具有很好的互溶性,在多孔介质中流动时,可以引起  $\text{CO}_2$  和地层油之间各组分变化,生成可混性流体。在一定压力下, $\text{CO}_2$  能使地层油中的轻质烃抽提和汽化, $\text{CO}_2$  抽提时主要是地层油中  $\text{C}_{20}$  以下组分。随着压力增加, $\text{CO}_2$  抽提剩余油中的较重质成份,从而提高采收率。

通过以上可见, $\text{CO}_2$  非混相驱油的主要机理是地层油膨胀、黏度降低、溶解气驱,其次为降低界面张力、增加束缚水饱和度、提高岩石渗透率、抽提作用等。上述结果是在  $\text{CO}_2$  完全饱和地层油的情况下获得的,实际  $\text{CO}_2$  驱中,由于  $\text{CO}_2$  波及区域限制以及未完全饱和地层油,各个驱油机理对提高采收率的贡献达不到以上的理想值。

## 5 结论

(1) 随着  $\text{CO}_2$  注入量增加,溶解油气比、体积系数和膨胀系数增大,黏度降低,束缚水体积膨胀。在 27 MPa 下注入  $\text{CO}_2$ ,地层油体积膨胀 1.484 7 倍,改善了原油的性质,提高了原油产量及采收率。

(2)  $\text{CO}_2$  驱中,溶于地层油中的大量  $\text{CO}_2$  具有溶解气驱的作用。从 27 MPa 降低到原始地层压力,依靠溶解气膨胀能,可采出原油 15.49%。

(3) 27 MPa 下注入  $\text{CO}_2$ ,原油与  $\text{CO}_2$  界面张力降低到  $0.862\ 3\ \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ 。油气界面张力随压力增高而减少。

(4) 地层油中轻质烃与  $\text{CO}_2$  间具有很好的互溶性,在一定压力下, $\text{CO}_2$  能使地层油中的轻质烃抽提和汽化,从而提高采收率。

## 参 考 文 献

- 1 李士伦,周守信,杜建芬,等. 国内外注气提高石油采收率技术回顾和展望. 西南石油院学报,2002;24(2):12—15
- 2 李 军,蒋 海,胡月华. 注气提高采收率注入参数优化研究. 重庆科技学院学报(自然科学版),2009;11(1):19—21
- 3 江怀友,沈平平,陈立滇,等. 北美石油工业二氧化碳提高采收率现状研究. 中国能源,2007;29(7):30—33
- 4 李星涛,郭 肖,王万彬. 低渗透油藏注  $\text{CO}_2$  提高采收率技术探讨. 重庆科技学院学报(自然科学版),2010;12(1):27—29
- 5 赵明国,王 东. 大庆油区芳48断块  $\text{CO}_2$  吞吐室内实验. 油气地质与采收率,2008;15(2):89—91
- 6 祝春生,程林松. 低渗透油藏  $\text{CO}_2$  驱提高地层油采收率评价研究. 钻采工艺,2007;30(6):55—56

(下转第 1446 页)

## Experimental Analysis of Serpentine-flow Flat-plate Solar Collector

LI Jun-xian, WANG Hui-tao, WANG Hua, BAO Gui-rong

(Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, P. R. China)

**[Abstract]** A serpentine-flow flat-plate solar collector of small volume and large temperature difference is designed and developed in order to explore the flat-plate solar collector used in high temperature situation. And experiment of stagnation and instantaneous efficiency is carried out. The results shown that stagnation temperature can reach  $170.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  and heat loss coefficient is  $5.239\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ . Efficiency of solar collector between 52% — 55% when inlet temperature of working fluid is  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . By comparison the temperature trend of various parts of the collector the corrective measure is proposed to improve performance of serpentine-flow flat-plate solar collector in high temperature conditions.

**[Key words]** solar energy      serpentine-flow flat-plate collector      experiment of stagnation      thermal efficiency

(上接第 1440 页)

## The Study on CO<sub>2</sub> Immiscible Mechanism in Low Permeability Reservoir

ZHAO Ming-guo<sup>1</sup>, LI Jin-zhu<sup>1</sup>, WANG Zhong-bin<sup>2</sup>

(Key Laboratory of Enhanced Oil & Gas Recovery, Ministry Education<sup>1</sup>, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, P. R. China;

Gudao Oil Production Plant of Shengli Oil field<sup>2</sup>, Dongying 257231, P. R. China)

**[Abstract]** Because Shu101 well area of Daqing Oilfield is low permeability reservoir, with reservoir conditions, through a series of laboratory experiments, the CO<sub>2</sub> flooding mechanism is determined. Research shows that with the increased CO<sub>2</sub> injection, dissolved gas oil ratio, volume expansion coefficient and coefficient increases, viscosity decreases, bound water volume expansion. When injection CO<sub>2</sub> with 27 MPa, 1.484 7 times the volume expansion of oil formation, the residual oil saturation decreased 11.43%, formation of oil viscosity decreases the viscosity of 48.51% to the original, bound water volume expansion 1.132 4 times. At the same time reducing the formation pressure from 27 MPa to the original formation pressure, the expansion will depend on dissolved CO<sub>2</sub> can be taken out of crude oil 15.49%. In addition, after the injection of CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>-formation reduces the interfacial tension of oil, CO<sub>2</sub> can lead light hydrocarbons in the formation of oil extraction and vaporization, thereby improving oil recovery.

**[Key words]** Daqing Oilfield      low permeability reservoir      CO<sub>2</sub> immiscible      laboratory experiment