

# 低渗油藏 CO<sub>2</sub> 混相驱启动压力梯度实验研究

章星,杨胜来,文博,李芳芳,陈浩,聂向荣,丁景臣

(中国石油大学 石油工程教育部重点实验室,北京 102249)

**摘要:**低渗透油藏开发过程中存在启动压力梯度,CO<sub>2</sub>混相驱过程复杂,需要进行深入研究。将CO<sub>2</sub>混相驱过程分为原始油相带、注气前缘带、混相油带和注气后缘带,主要采取短岩心驱替实验测定启动压力梯度。研究表明,低渗透岩心的压力梯度与流量关系图都呈凹型分布,存在非线性流动和线性流动。启动压力梯度的主要影响因素有流体粘度、有效渗透率、流体密度和气油比等。启动压力梯度与岩心渗透率成幂函数变化,指数为-0.482。

**关键词:**低渗透油藏;CO<sub>2</sub>混相驱;启动压力梯度;驱替相带;渗透率

中图分类号:TE349

文献标识码:A

## Experimental study on threshold pressure gradient of CO<sub>2</sub> miscible flooding in low permeability reservoir

Zhang Xing, Yang Shenglai, Wen Bo, Li Fangfang, Chen Hao, Nie Xiangrong, Ding Jingchen

(MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** Threshold pressure gradient exists in the development of low permeability reservoir. The process of CO<sub>2</sub> miscible flooding is very complicated, demanding further research. It can be divided into 4 zones including original oil phase zone, frontal phase zone of gas injection, miscible oil phase zone and trailing phase zone of gas injection. Indoor short core experiments are used to study the threshold pressure gradient of different flooding. Studies show that the pressure gradient-flow diagrams of low permeability core are in concave distribution which is divided into nonlinear flow and linear flow. The main factors of threshold pressure gradient are fluid viscosity, effective permeability, fluid density, gas oil ratio, and so on. The threshold pressure gradient and core permeability are based on power function, and the index is about -0.482.

**Key words:** low permeability reservoir; CO<sub>2</sub> miscible flooding; threshold pressure gradient; displacement phase zone; permeability

根据实际生产特征,低渗透油藏主要分为低渗透( $K=50\times 10^{-3}\sim 10\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ )、特低渗透( $K=10\times 10^{-3}\sim 1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ )、超低渗透( $K=1\times 10^{-3}\sim 0.1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ )和非渗透( $K<0.1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ )油藏<sup>[1-4]</sup>。在开发过程中,由于低渗透油藏岩心具有孔喉小、比表面大等特点,使得流体的渗流偏离达西定律,即流量-压力梯度曲线的直线段延长线不通过坐标轴原点,存在启动压力梯度<sup>[5-13]</sup>。

低渗油藏开发时由于存在启动压力高、注水开发困难等问题,一般通过注气方式开发。其中注CO<sub>2</sub>就是一种有效的注气方式,CO<sub>2</sub>混相驱在提高低渗透油藏采收率上是很有前景的<sup>[14-20]</sup>。在混相驱替的前提下,本文提出其驱替过程可以分为4个

驱替相带:原始油相带、注气前缘带、混相油带、注气后缘带。通过室内物理模拟实验,研究地层条件下CO<sub>2</sub>混相驱不同岩心中各个驱替带如何启动,确定其启动压力梯度的大小,分析不同驱替相带启动压力梯度的影响因素。

## 1 实验介绍

### 1.1 实验设备

主体实验装置为南通华兴石油仪器有限公司生产的SYS-III多级超高温两相驱替系统,恒温箱体内分成多个恒温空间,能够满足不同温度的实验要求。附属设备包括:美国生产的RUSKA无汞PVT仪(型号2730)、美国生产的ISCO-260D高精

表1 实验岩心数据

Table 1 Data of experimental cores

| 岩心编号   | 取样井井号 | 直径/cm | 长度/cm | 孔隙度/% | 气测渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$ |
|--------|-------|-------|-------|-------|--------------------------------|
| H-30   | 黑167  | 2.522 | 6.890 | 19.5  | 36.2                           |
| H-44   | 黑84   | 2.520 | 6.926 | 16.7  | 5.96                           |
| H-39-2 | 黑84   | 2.520 | 7.810 | 9.8   | 0.487                          |

度驱替泵、气体流量计等。

## 1.2 实验条件

实验岩心取自吉林油田<sup>[21-22]</sup>黑79区块,具体参数见表1。实验所用的原始油和水样是根据油田的要求,以某生产井实际数据为主配制而成;实验的其他用油按照实验要求配制。

## 1.3 实验方法

实验原理是利用“压差—流量”关系,通过改变岩心两端流体压差并测量其通过岩心的流量来求得“压差—流量”曲线,从而延长曲线线性段与压力梯度坐标轴上得到的截距值即为岩心的启动压力梯度。

步骤如下:(1)根据实验流程设计,连接好实验装置,升至地层温度;(2)岩心夹持器中装入相应测试岩样,加载所需的实验围压和回压;(3)饱和地层水,饱和实验流体造束缚水,稳定压力;(4)打开实验流体釜,调节进口压力;(5)按照升压力顺序进行,每个压力稳定30 min,记录出口流体流量及其所对应实际压力,测量3次,流量误差小于4%为合格。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 启动压力梯度

如图1所示,H-30的压力梯度—流量曲线分为非线性段和线性段。在压力梯度为0.072 6 MPa/m,出口流体流量为0.018 mL/min时,曲线出现拐点。当压力梯度小于0.072 6 MPa/m时,压力梯度与流量呈非线性变化,且变化较为平稳,原始油在大孔隙中流动,流体有效渗流能力较低。此时原始油在岩心孔隙中呈现非线性流动特征,不符合液体流动的达西定律。当压力梯度大于0.072 6 MPa/m时,压力梯度与流量呈线性增长变化,此时的液体流动符合达西定律。

从图1中还可以看出,随着岩心渗透率的减小,其压力梯度与原始油流量关系曲线线性段的斜率逐渐减小,线性段交于压力梯度坐标轴的值逐渐增大。岩心渗透率越小,原始油在岩心中流动阻力越大,原始油在岩心中的启动压力梯度越大。原

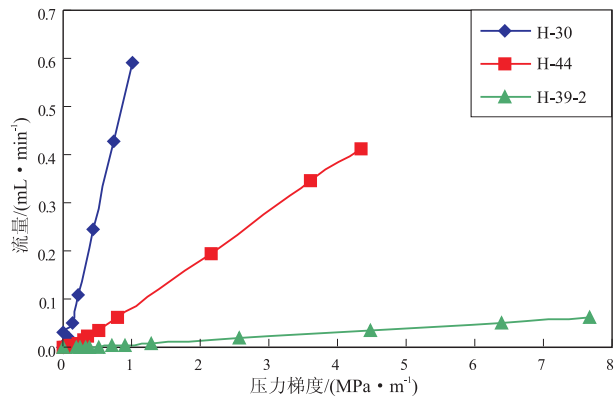


图1 不同岩心原始油相带的压力梯度与流量关系曲线

Fig. 1 Relationship between threshold pressure gradient and flow rate in original oil phase zone of different cores

始油非线性流动阶段随渗透率减小而增长,原始油从非线性流动转换为线性流动需要的压力梯度逐渐增大,曲线的曲率逐渐减小,启动压力梯度明显变大。

注气前缘带是指 $\text{CO}_2$ 与地层油或者是 $\text{CO}_2$ 及富含轻烃的流体与地层油混合后形成的驱替带,其主要特点是地层油中溶解有 $\text{CO}_2$ 气体。混相油带是指地层油溶解了充足的 $\text{CO}_2$ ,此时地层油与 $\text{CO}_2$ 呈单一流体形态。注气后缘带是指 $\text{CO}_2$ 驱替岩心中的残余地层油,残余地层油是未与 $\text{CO}_2$ 气体混合形成混相油从而未被 $\text{CO}_2$ 驱替出的剩余地层油。测定不同渗透率岩心不同驱替相带的启动压力梯度,实验结果见表2。

### 2.2 驱替相带

岩心H-30在3个驱替相带的实验过程中其渗透率是一致的,因此排除了岩心渗透率对启动压力梯度的影响。从图2可以看出,曲线斜率从小到大依次为:原始油相带、注气前缘相带、混相油带。这表明在相同压力梯度下,出口端流量从小到大的驱替相带依次为:原始油相带、注气前缘相带、混相油带。

形成这一现象的原因主要是每个驱替相带的油气比不一样,直接影响到实验流体的物理性质。

表2 不同岩心不同驱替相带的启动压力梯度数据

Table 2 Experimental data of threshold pressure gradient in different phase zones of different cores

| 岩心编号   | 气测渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$ | 启动压力梯度/( $\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$ ) |         |         | 启动压力平方梯度/( $\text{MPa}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ ) |
|--------|--------------------------------|---|---------|---------|---|
|        |                                | 原始油相带                                       | 注气前缘带   | 混相油带    |   |
| H-30   | 36.2                           | 0.043 5                                     | 0.033 6 | 0.017 5 | 0.006 9   |
| H-44   | 5.96                           | 0.142 6                                     | 0.110 1 | 0.050 8 | 0.011   |
| H-39-2 | 0.487                          | 0.392 8                                     | 0.300 5 | 0.142 5 | 0.063 2   |

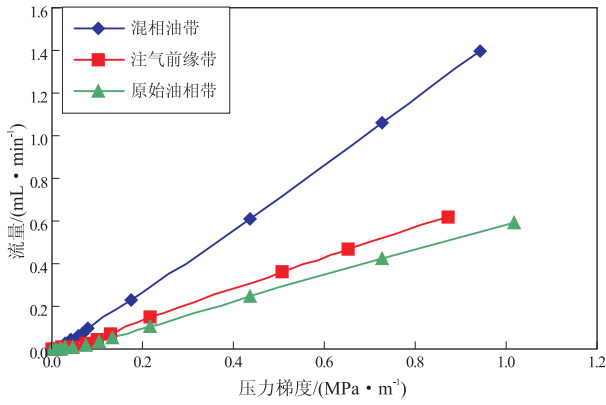


图2 岩心 H-30 不同驱替相带的压力梯度与流量关系曲线

Fig.2 Relationship between threshold pressure gradient and flow rates in different phase zones of core H-30

随着气油比的增大,流体的粘度显著下降,密度有大幅度下降,流体流动能力更强,使得流体由非线性流动到线性流动所需要的压力差越小,启动压力梯度也就越小。

### 2.3 渗透率

如图3,对3块岩心在混相油带中的散点值进行回归,启动压力梯度与岩心渗透率成幂函数关系,方程式为: $y = 0.106 1x^{-0.482 1}$ ,相关系数为: $R^2 = 0.989 4$ 。随着岩心渗透率变小,启动压力梯度变大。当渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,启动压力梯度显著增大,超过0.14 MPa/m。当岩心渗透率大于 $30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,启动压力梯度则十分小,小于0.02 MPa/m,且平稳变化。此时只需要较小的流动压差,流体就能从非线性流动转变成线性流动。

岩心渗透率对各个驱替相带的启动压力梯度影响较大。岩心的孔隙大小、孔隙喉道结构及其分布都会影响流体的渗流速度。低渗透储层孔隙很小,喉道很细,孔隙连通性差,孔喉比也较大,渗透率的贡献值主要由占孔隙体积比例较小、较粗的喉

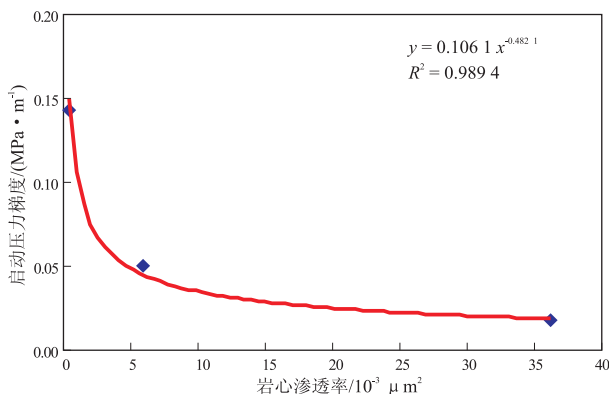


图3 混相油相带的启动压力梯度与渗透率关系

Fig.3 Relationship between threshold pressure gradient and permeability in miscible oil phase zone

道提供。而孔隙较小、喉道较细、孔隙连通性差是造成低渗透非达西渗流的重要因素。

## 3 结论

1) 实验表明,低渗透岩心的压力梯度与流量关系图都呈凹型分布,存在非线性流动阶段和线性流动阶段,2个流动阶段之间存在一个拐点,存在启动压力梯度。

2) 各个驱替相带主要是由于具有不同的流体粘度、有效渗透率、密度、气油比等,进而通过这些因素来影响其启动压力梯度。

3) 启动压力梯度与岩心渗透率成幂函数变化,指数为-0.482。对于低渗透油藏,只要确定相应的回归系数和指数值,就可以确定其数学表达式,从而研究启动压力梯度对低渗透油田开发指标的影响。

### 参考文献:

- [1] 张仲宏,杨正明,刘先贵,等. 低渗透油藏储层分级评价方法及应用[J]. 石油学报,2012,33(3):437-441.
- [2] 陈志海. 特低渗透油藏储层微观孔喉分布特征与可动油评价:以十屋油田营城组油藏为例[J]. 石油实验地质,2011,33(6):657-661.
- [3] 朱志强,曾溅辉,王建君. 低渗透砂岩石油渗流的微观模拟实验研究[J]. 西南石油大学学报:自然科学版,2010,32(1):16-20.
- [4] 田华,张水昌,柳少波,等. 致密储层孔隙度测定参数优化[J]. 石油实验地质,2012,34(3):334-339.
- [5] 熊伟,雷群,刘先贵,等. 低渗透油藏拟启动压力梯度[J]. 石油勘探与开发,2009,36(2):232-236.
- [6] 王晓冬,侯晓春,郝明强,等. 低渗透介质有启动压力梯度的不稳态压力分析[J]. 石油学报,2011,32(5):847-851.
- [7] 李爱芬,张少辉,刘敏,等. 一种测定低渗油藏启动压力的新方法[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2008,32(1):68-71.
- [8] 姜瑞忠,王平,卫喜辉,等. 低流量油藏启动状况影响因素研究[J]. 特种油气藏,2012,19(5):111-114.
- [9] 胡勇. 气体渗流启动压力实验测试及应用[J]. 天然气工业,2010,30(11):48-50.
- [10] 章星,杨胜来,张洁,等. 致密低渗气藏启动压力梯度实验研究[J]. 特种油气藏,2011,18(5):103-104,134.
- [11] 何勇明,王涛,刘春燕,等. 分段启动压力对宝浪油田驱动压差的影响[J]. 西南石油大学学报:自然科学版,2012,34(3):121-124.
- [12] 甄思广,王厉强,杨彬,等. 低渗透气藏含启动压力指数方程及应用[J]. 断块油气田,2012,19(2):218-220.
- [13] 田敏,李晓平,李楠,等. 低渗透油藏油水两相非线性渗流规律[J]. 特种油气藏,2011,18(6):92-95.
- [14] 刘玉章,陈兴隆. 低渗油藏 CO<sub>2</sub> 驱油混相条件的探讨[J]. 石油勘探与开发,2010,37(4):466-470.

[15] 苏玉亮,吴晓东,侯艳红,等. 低渗透油藏 CO<sub>2</sub> 混相驱油机制及影响因素[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2011,35(3):99-102.

[16] 娄兆彬,李道轩,吴修利,等. 扎尔则油田泥盆系 F4 顶层油藏注富气混相驱实验[J]. 断块油气田,2012,19(2):213-217.

[17] 郭平,徐阳,牛保伦,等. 胜利油田高 89 区块低渗油藏 CO<sub>2</sub> 近混相驱替机理研究[J]. 特种油气藏,2012,19(2):104-106.

[18] 张明安. 芳 48 区块低渗透油田 CO<sub>2</sub> 驱影响因素数值模拟[J]. 东北石油大学学报(大庆石油学院学报),2011,35(1):64-67,118.

[19] 钟张起,史运芳,刘鹏程,等. 低渗透油藏 CO<sub>2</sub> 驱注入时机研究[J]. 断块油气田,2012,19(3):346-349.

[20] 何应付,高慧梅,周锡生. 改善特低渗透油藏注二氧化碳驱油效果的方法[J]. 断块油气田,2011,18(4):512-515.

[21] 周卓明,王保华,朱廷祥,等. 长岭断陷火石岭组烃源岩特征及勘探远景分析[J]. 石油实验地质,2011,33(6):613-616.

[22] 张彦霞,王保华,陆建林. 长岭断陷营城组火山岩储层物性及影响因素研究[J]. 石油实验地质,2011,33(2):177-181.

(编辑 韩 或)

(上接第 578 页)

[27] Renshaw C E, Schulson E M. Universal behavior in compressive failure of brittle materials[J]. Nature,2001,412(6850):897-900.

[28] Nygard R, Gutierrez M, Bratli R K, et al. Brittle-ductile transition, shear failure and leakage in shales and mudrocks[J]. Marine and Petroleum Geology,2006,23(2):201-212.

[29] 黄英华,潘懿,唐绍辉. 硬石膏常规三轴压缩性能试验研究[J]. 中国非金属矿工业导刊,2008(6):34-36.

[30] Zhao J, Labiouse V, Dudt J P, et al, Eds. Rock Mechanics in Civil and Environmental Engineering [C]//European Rock Mechanics Symposium EUROCK 2010. Leiden, The Netherlands: CRC Press/Balkema,2010.

[31] 石油地质勘探专业标准化委员会. SY/T 5748-1995 岩石中气体突破压力测定[S]. 北京:中国石油天然气总公司,1996.

(编辑 黄 娟)

(上接第 582 页)

[15] David F, Gere D R, Scanlan F, et al. Instrumentation and applications of fast high-resolution capillary gas chromatography[J]. Journal of Chromatography A,1999,842(1/2):309-319.

[16] 何宏,靳世久,孙青林,等. 气测录井自动监测系统研究[J]. 南开大学学报:自然科学版,2002,35(3):24-28.

[17] 张厚福,方朝亮,高先志,等. 石油地质学[M]. 北京:石油工业出版社,1999:25-28,215-224.

[18] Holdway D, Heggie D T. Direct hydrocarbon detection of produced formation water discharge on the northwest shelf, Australia[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science,2000,50(3):387-402.

[19] 王立东,罗平. 气测录井定量解释方法探讨[J]. 录井技术,2001,12(3):1-10.

[20] 李永新,王红军,王兆云. 影响烃源岩中分散液态烃滞留数量因素研究[J]. 石油实验地质,2010,32(6):588-595.

[21] 李凤霞,崔茂荣,王丽华,等. 综合录井技术在实时监测钻井事故中的应用[J]. 断块油气田,2007,14(3):66-68.

(编辑 黄 娟)