

# 低渗透油藏 CO<sub>2</sub> 驱试井曲线特征分析

苏玉亮<sup>1</sup>, 孟凡坤<sup>1</sup>, 周诗雨<sup>2</sup>, 郝永卯<sup>1</sup>, 周志为<sup>1</sup>, 童刚<sup>1</sup>

1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 青岛 266580
2. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司, 成都 610213

**摘要** 根据低渗透油藏 CO<sub>2</sub> 驱流体分布, 将渗流区划分为 CO<sub>2</sub> 区、CO<sub>2</sub>-原油过渡区和未波及原油区, 考虑过渡区内流体物性参数幂律变化, 建立变性质 CO<sub>2</sub> 驱三区复合油藏模型, 应用 Laplace 变换及 Stehfest 数值反演, 求得井底压力解, 绘制典型试井曲线, 研究试井曲线变化特征及其影响因素。结果表明, 过渡区流体流量、储容系数变化幂律指数和 CO<sub>2</sub> 区与过渡区交界面流量比、储容比分别影响 CO<sub>2</sub> 区与过渡区间的过渡段以及过渡区径向流直线段斜率; 储容系数变化幂律指数、交界面储容比越大, 过渡区与原油区间的过渡段开始时间越早, 过渡段峰值越小; 增大过渡区半径, 压力波在过渡区内传播时间增加, 过渡区径向流直线段延长, 过渡区向原油区过渡段曲线右移, CO<sub>2</sub> 注入压力降低。

**关键词** 低渗透油藏; CO<sub>2</sub> 驱; 三区复合油藏模型; 试井曲线

**中图分类号** TE341

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.18.005

## Characteristics analysis of well testing curve of CO<sub>2</sub> flooding in low permeability reservoir

SU Yuliang<sup>1</sup>, MENG Fankun<sup>1</sup>, ZHOU Shiyu<sup>2</sup>, HAO Yongmao<sup>1</sup>, ZHOU Zhiwei<sup>1</sup>, TONG Gang<sup>1</sup>

1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China
2. Chuanqing Drilling Engineering Co. Ltd., China National Petroleum Corporation, Chengdu 610213, China

**Abstract** On the basis of fluid distribution of carbon dioxide flooding in low permeability reservoir, the flowing areas are divided into CO<sub>2</sub> region, CO<sub>2</sub>-oil transition region and oil unswept region. Considering the power law variation of fluid physical parameters in the transition region, we establish a varied property carbon dioxide flooding three-zone composite reservoir well testing model, and obtain the solution of bottom hole pressure by applying Laplace transform and Stehfest numerical inversion. In this way, the characteristics of variation of the well testing curve and influential factors are investigated. The results show that the slope of curves representing the transition section between the CO<sub>2</sub> region and transition region and radial flow of the transition region is mainly affected by the power law exponent of mobility and storativity and mobility and storativity ratio in the CO<sub>2</sub>-transition region interface. The larger the storativity power law exponent and storativity ratio at the CO<sub>2</sub>-transition region interface is, the earlier the transition section between miscible region and oil unswept region begins, the lower the peak is. When the radius of the transition region is increased, the line of radius flow in the transition region becomes longer, the transition curve from the transition to oil unswept region shifts right, and CO<sub>2</sub> injection pressure decreases.

**Keywords** low permeability reservoir; CO<sub>2</sub> flooding; three-zone composite reservoir model; well testing curves

在低渗透油藏中采取 CO<sub>2</sub> 驱, 可利用其混溶、降黏及膨胀作用机制, 大幅提高原油采收率, 具有广阔的应用前景<sup>[1,2]</sup>。

由于 CO<sub>2</sub> 特殊的驱油特性, 使得在注 CO<sub>2</sub> 驱替过程中, 试井曲线呈现出复杂的形态变化。国内外对 CO<sub>2</sub> 驱试井已开展了一

收稿日期: 2015-02-09; 修回日期: 2015-06-27

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05051)

作者简介: 苏玉亮, 教授, 研究方向为低渗透油藏驱替机理及开采、注气提高采收率、深水油气田开发等, 电子信箱: suyuliang@upc.edu.cn; 孟凡坤(共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为油气田开发与 CO<sub>2</sub> 驱提高采收率, 电子信箱: mengfk09021021@163.com

引用格式: 苏玉亮, 孟凡坤, 周诗雨, 等. 低渗透油藏 CO<sub>2</sub> 驱试井曲线特征分析[J]. 科技导报, 2015, 33(18): 34-39.

些研究,Tang等<sup>[3]</sup>通过分析CO<sub>2</sub>注入井压力资料,发现压力变化表现出三区复合油藏特性,但没有基于这种现象建立数学模型来阐释CO<sub>2</sub>驱过程中压力传播规律;Ambastha等<sup>[4]</sup>建立了基本的三区复合油藏模型,但未针对CO<sub>2</sub>驱特点对模型进行适当的修正;在CO<sub>2</sub>试井研究方面,多借鉴稠油热采过程中的试井理论及方法<sup>[5-11]</sup>,结合CO<sub>2</sub>的物理化学性质加以必要的修正,对压力测试数据进行解释,而未考虑CO<sub>2</sub>与原油间的相互作用,对CO<sub>2</sub>-原油过渡区性质描述不足,难以真实反映CO<sub>2</sub>驱压力传播规律。本研究采用油藏数值模拟技术,分析CO<sub>2</sub>驱过程中CO<sub>2</sub>-原油过渡区内流体物性参数变化规律,同时基于多区复合油藏试井理论,分析低渗透油藏CO<sub>2</sub>驱试井曲线的变化特征及其影响因素。

### 1 CO<sub>2</sub>-原油过渡区流体特点

根据CO<sub>2</sub>驱替过程中油藏流体性质的不同,可将油藏划分为CO<sub>2</sub>区、CO<sub>2</sub>-原油过渡区和未波及原油区<sup>[3-5,12,13]</sup>,建立低渗透油藏CO<sub>2</sub>驱三区复合物理模型如图1所示,三区半径分别为R<sub>1</sub>、R<sub>2</sub>和R<sub>3</sub>(R<sub>3</sub>→∞时为无限大油藏)。

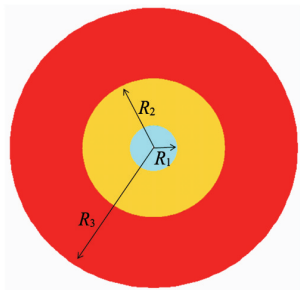


图1 低渗透油藏CO<sub>2</sub>驱三区复合物理模型示意

Fig.1 Schematic of three-zone composite model for CO<sub>2</sub> flooding in low permeability reservoir

复合油藏的内区为CO<sub>2</sub>区,外区为未波及原油区(简称原油区),两者之间为由CO<sub>2</sub>抽提出的原油轻质组分与溶解有CO<sub>2</sub>的原油共同形成的CO<sub>2</sub>-原油过渡区(简称过渡区),CO<sub>2</sub>区与原油区流体性质较为稳定,而过渡区流体性质受原油与

CO<sub>2</sub>双重影响,物理化学性质较为复杂。因此,采用油藏数值模拟技术,建立低渗透油藏CO<sub>2</sub>驱组分模型,模拟CO<sub>2</sub>驱替过程,分析过渡区内流体参数变化规律。模型中原油组分设置如表1所示,储层及流体物性参数如表2所示。

表1 原油组分设置

Table 1 Setup for composition of crude oil

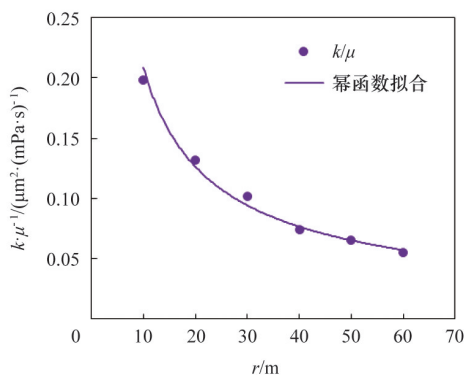
| 组分                          | 摩尔分数/% | 质量分数/% |
|-----------------------------|--------|--------|
| C <sub>1</sub>              | 28.99  | 4.93   |
| C <sub>2</sub>              | 7.97   | 2.54   |
| C <sub>3</sub>              | 7.15   | 3.34   |
| NC <sub>4</sub>             | 4.75   | 2.93   |
| NC <sub>5</sub>             | 4.12   | 3.15   |
| C <sub>6</sub> <sup>+</sup> | 43.20  | 81.70  |
| N <sub>2</sub>              | 2.18   | 0.65   |
| CO <sub>2</sub>             | 1.64   | 0.76   |

表2 储层及流体物性参数

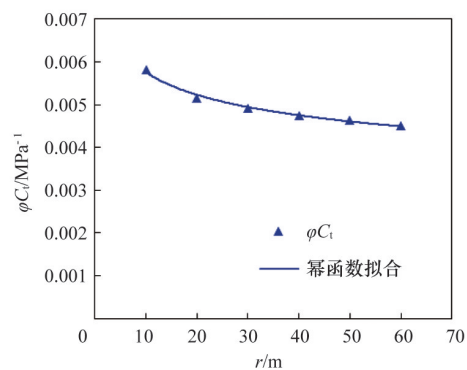
Table 2 Physical property parameters of the reservoir and fluid

| 参数                                   | 取值                 | 参数                                      | 取值                    |
|--------------------------------------|--------------------|---|-----------------------|
| 油藏面积/m <sup>2</sup>                  | 62500              | 原油黏度/(mPa·s)                            | 0.297                 |
| 油层厚度/m                               | 5                  | 原油压缩系数/MPa <sup>-1</sup>                | 2.6×10 <sup>-3</sup>  |
| 孔隙度/%                                | 15                 | CO <sub>2</sub> 黏度/(mPa·s)              | 0.04045               |
| 渗透率/10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup> | 10                 | CO <sub>2</sub> 压缩系数/MPa <sup>-1</sup>  | 4.36×10 <sup>-2</sup> |
| 原始地层压力/MPa                           | 21                 | 井径/m                                    | 0.1                   |
| 岩石压缩系数/MPa <sup>-1</sup>             | 4×10 <sup>-4</sup> | 日注入量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> ) | 1200                  |

基于数值模拟得到的结果,应用幂律公式拟合过渡区流体流量k/μ、储容系数φC<sub>i</sub>随半径大小的变化,结果如图2所示,可以看出拟合程度较好,故可认为过渡区的流体流量k/μ、储容系数φC<sub>i</sub>近似成幂律变化。因此,考虑过渡区流体流量k/μ、储容系数φC<sub>i</sub>的幂律变化,建立低渗透油藏CO<sub>2</sub>驱三区复合油藏模型,可以准确地模拟CO<sub>2</sub>驱替过程,反映真实的压力传播规律。



(a) 流体流量随半径变化



(b) 储容系数随半径变化

图2 过渡区流体流量与储容系数随半径变化

Fig. 2 Variation of fluid mobility and storage coefficient with the radius of CO<sub>2</sub>-oil transition area

## 2 CO<sub>2</sub>驱复合油藏模型

### 2.1 模型建立

假设:1) 地层为水平、均质、等厚,上下有不渗透隔层;2) 忽略重力及毛管力作用;3) 流动过程等温;4) 流体流动服从达西定律;5) CO<sub>2</sub>区及原油区内流体流量及储容系数恒定,过渡区内呈幂律变化。考虑井筒存储及表皮系数影响,建立变性质CO<sub>2</sub>驱三区复合油藏模型。

CO<sub>2</sub>区:

$$\frac{\partial^2 p_{D1}}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial p_{D1}}{\partial r_D} = \frac{\partial p_{D1}}{\partial t_D} \quad 1 \leq r_D < R_{D1} \quad (1)$$

式中,  $p_{D1}$ 、 $R_{D1}$ 分别为CO<sub>2</sub>区无因次压力和无因次半径;  $t_D$ 为无因次时间。

过渡区:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \left( \frac{k}{\mu} \right)_2 r \frac{\partial p_2}{\partial r} \right] = (\varphi C_t)_2 \frac{\partial p_2}{\partial t} \quad R_1 \leq r < R_2 \quad (2)$$

式中,  $p_2$ 为过渡区压力, MPa;  $(k/\mu)_2$ 为过渡区流体流量,  $10^{-3} \mu\text{m}^2 \cdot (\text{mPa} \cdot \text{s})^{-1}$ ;  $k$ 为油藏渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $(\varphi C_t)_2$ 为过渡区储容系数,  $\text{MPa}^{-1}$ ;  $\varphi$ 为地层孔隙度;  $R_1$ 、 $R_2$ 分别为CO<sub>2</sub>区和过渡区半径, m;  $t$ 为时间, h。

过渡区内流体流量、储容系数呈幂律变化,即

$$\left( \frac{k}{\mu} \right)_2 = \left( \frac{k/\mu \right)_1 \left( \frac{r_D}{R_{D1}} \right)^{-\theta_1} \quad (3)$$

$$(\varphi C_t)_2 = \frac{(\varphi C_t)_1}{F_{12}} \left( \frac{r_D}{R_{D1}} \right)^{-\theta_2} \quad (4)$$

式中,  $(k/\mu)_1$ 为CO<sub>2</sub>区流体流量,  $10^{-3} \mu\text{m}^2 \cdot (\text{mPa} \cdot \text{s})^{-1}$ ;  $(\varphi C_t)_1$ 为CO<sub>2</sub>区储容系数,  $\text{MPa}^{-1}$ ;  $\lambda_{12}$ 、 $F_{12}$ 分别为CO<sub>2</sub>区与过渡区交界面流量比和储容比;  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 分别为过渡区流体流量和储容系数变化幂律指数,表征过渡区内流体流量、储容系数的变化,当 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 均为0时,模型简化为性质恒定。

将式(3)、式(4)代入式(2),并进行无因次化,可得

$$\frac{\partial^2 p_{D2}}{\partial r_D^2} + \frac{1-\theta_1}{r_D} \frac{\partial p_{D2}}{\partial r_D} = \eta_{12} \left( \frac{r_D}{R_{D1}} \right)^{\theta_1-\theta_2} \frac{\partial p_{D2}}{\partial t_D} \quad R_{D1} \leq r_D < R_{D2} \quad (5)$$

式中,  $p_{D2}$ 、 $R_{D2}$ 分别为过渡区无因次压力和无因次半径;

$$\eta_{12} = \left( \frac{k}{\varphi \mu C_t} \right)_1 / \left( \frac{k}{\varphi \mu C_t} \right)_2 = \frac{\lambda_{12}}{F_{12}}$$

表征CO<sub>2</sub>区与过渡区交界面导压系数比。

原油区:

$$\frac{\partial^2 p_{D3}}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial p_{D3}}{\partial r_D} = \eta_{13} \frac{\partial p_{D3}}{\partial t_D} \quad R_{D2} \leq r_D < R_{D3} \quad (6)$$

式中,  $p_{D3}$ 、 $R_{D3}$ 分别为原油区的无因次压力和无因次半径;

$$\eta_{13} = \left( \frac{k}{\varphi \mu C_t} \right)_1 / \left( \frac{k}{\varphi \mu C_t} \right)_3 = \frac{\lambda_{13}}{F_{13}} \quad \lambda_{13} = \left( \frac{k}{\mu} \right)_1 / \left( \frac{k}{\mu} \right)_3$$

$$F_{13} = (\varphi C_t)_1 / (\varphi C_t)_3$$

分别为CO<sub>2</sub>区及原油区的导压系数比、流量比和储容比。

初始条件为

$$\begin{aligned} p_{D1}(r_D, 0) &= 0 & 1 \leq r_D < R_{D1} \\ p_{D2}(r_D, 0) &= 0 & R_{D1} \leq r_D < R_{D2} \\ p_{D3}(r_D, 0) &= 0 & R_{D2} \leq r_D < R_{D3} \end{aligned} \quad (7)$$

内、外边界条件为

$$\frac{C_D \frac{dp_{wD}}{dt_D} - \left( \frac{\partial p_{D1}}{\partial r_D} \right)_{r_D=1}}{r_D=1} = 1 \quad p_{wD} = p_{D1} - S \left( \frac{\partial p_{D1}}{\partial r_D} \right)_{r_D=1} \quad (8)$$

$$\lim_{r_D \rightarrow \infty} p_{D3}(r_D, t_D) = 0 \quad \text{外边界无限大} \quad (9)$$

$$\left. \frac{\partial p_{D3}}{\partial r_D} \right|_{r_D=R_{D3}} = 0 \quad \text{外边界封闭} \quad (10)$$

式中,  $p_{wD}$ 为无因次井底压力;  $C_D$ 为无因次井筒存储系数;  $S$ 为表皮因子。

各区之间的衔接条件为

$$p_{D1} = p_{D2} \quad \frac{\partial p_{D2}}{\partial r_D} = \lambda_{12} \left( \frac{r_D}{R_{D1}} \right)^{\theta_1} \frac{\partial p_{D1}}{\partial r_D} \quad r_D = R_{D1} \quad (11)$$

$$p_{D2} = p_{D3} \quad \frac{\partial p_{D3}}{\partial r_D} = \frac{\lambda_{13}}{\lambda_{12}} \left( \frac{r_D}{R_{D1}} \right)^{-\theta_1} \frac{\partial p_{D2}}{\partial r_D} \quad r_D = R_{D2} \quad (12)$$

上述公式中各变量的无因次化均以CO<sub>2</sub>区物理参数为基础,表达式分别为

$$p_{Dn} = \frac{kh(p_i - p_n)}{1.842 \times 10^{-3} q \mu_i B_g} \quad n = 1, 2, 3$$

$$t_D = \frac{3.6kt}{\varphi \mu_i C_{ti} r_w^2} \quad r_D = \frac{r}{r_w} \quad C_D = \frac{C_w}{2\pi \varphi C_{ti} h r_w^2}$$

式中,  $h$ 为油藏厚度, m;  $p_i$ 为原始地层压力, MPa;  $q$ 为CO<sub>2</sub>注入量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $B_g$ 为CO<sub>2</sub>体积系数;  $\mu_i$ 为CO<sub>2</sub>气体黏度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;  $C_w$ 为井筒储集系数,  $\text{m}^3/\text{MPa}$ ;  $C_{ti}$ 为CO<sub>2</sub>区综合压缩系数,  $\text{MPa}^{-1}$ ;  $r_w$ 为井径, m。

### 2.2 模型求解

将无因次数学模型及边界条件进行Laplace变换

$$\bar{p}_D = \int_0^\infty e^{-st_D} p_D(r_D, t_D) dt_D$$

得到关于 $r_D$ 的虚宗量Bessel函数通解<sup>[14-16]</sup>

$$\bar{p}_{D1} = AI_0(r_D \sqrt{s}) + BK_0(r_D \sqrt{s}) \quad (13)$$

$$\bar{p}_{D2} = Cr_D^\gamma I_\nu(\delta r_D^\beta) + Dr_D^\gamma K_\nu(\delta r_D^\beta) \quad (14)$$

$$\bar{p}_{D3} = EI_0(r_D \sqrt{\eta_{13}s}) + FK_0(r_D \sqrt{\eta_{13}s}) \quad (15)$$

式中,

$$\gamma = \frac{\theta_1}{2} \quad \beta = \frac{\theta_1 - \theta_2 + 2}{2} \quad \nu = \frac{\theta_1}{\theta_1 - \theta_2 + 2} \quad \delta = \frac{\sqrt{R_{D1}^{\theta_2 - \theta_1} \eta_{12} s}}{\beta}$$

将式(13)~(15)代入式(7)~(12)所示边界条件,构建系数矩阵方程组,可求得待定系数 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$ 、 $F$ ,则井底压力Laplace空间解为

$$\bar{p}_{wD} = \left( \bar{p}_{D1} - S \frac{d\bar{p}_{D1}}{dr_D} \right) = A[I_0(\sqrt{s}) - S\sqrt{s}I_1(\sqrt{s})] + B[K_0(\sqrt{s}) + S\sqrt{s}K_1(\sqrt{s})] \quad (16)$$

对式(16)进行Stehfest数值反演,即可计算出每个无因次时间点 $t_D$ 所对应的井底压力。

### 2.3 模型验证

依据设置的油藏原油组分和储层及流体物性参数(表1、表2),建立低渗透油藏CO<sub>2</sub>驱数值模拟组分模型,对建立的三区复合油藏模型的正确性进行验证。

开井注入10天,确保压力波传播至边界,对模拟结果进行分析,结果显示CO<sub>2</sub>区半径为2.0 m,过渡区半径为22.5 m,

CO<sub>2</sub>区与过渡区交界面流体黏度为0.0956 mPa·s,综合压缩系数为3.57×10<sup>-2</sup> MPa<sup>-1</sup>。拟合后得到流体流量变化幂律指数 $\theta_1=0.06$ ,储容系数变化幂律指数 $\theta_2=0.24$ 。

将储层及流体物性参数(表1)及数值模拟结果代入到外边界封闭条件下的模型中,绘制过渡区流体性质恒定及物性参数呈幂律变化两种情况下的压力导数曲线,与数值模拟得到的无因次化后的结果进行对比,如图3所示。由于CO<sub>2</sub>区和原油区的流体性质恒定,两压力导数曲线重合,初期数值模拟结果受数值弥散的影响,与两曲线间存在微小偏差;在过渡区内,流体流量 $k/\mu$ 、储容系数 $\varphi C_v$ 呈幂律变化下的压力导数曲线拟合效果明显优于性质恒定的情况。由此可见,考虑过渡区物性参数呈幂律变化所建模型的模拟结果总体拟合较好,更接近于实际情况。

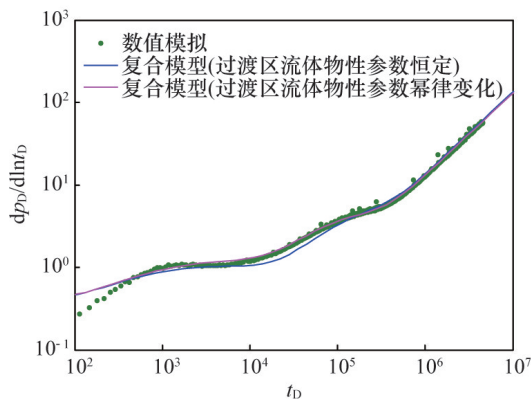


图3 复合油藏模型与数值模拟结果对比

Fig. 3 Comparison between results of the model and numerical simulation results

### 3 CO<sub>2</sub>驱试井曲线形态及影响因素

#### 3.1 流动阶段划分

CO<sub>2</sub>驱三区复合无限大油藏典型试井曲线如图4所示,在不同的渗流区内试井曲线呈现不同的延展规律,根据压力导数曲线的形态变化,可将曲线分为7段,其变化特征为:

1) 第I段为纯井筒影响期,表征续流段影响;纯井筒集集效应影响结束后,受CO<sub>2</sub>区作用,导数曲线向下倾斜,为第

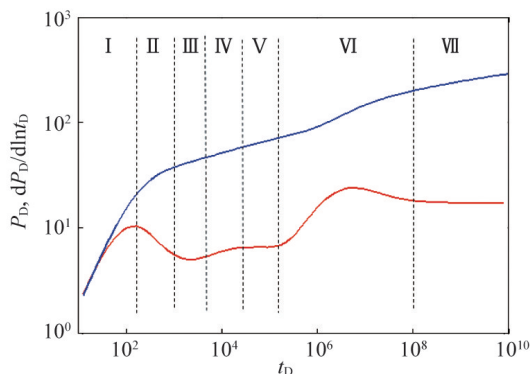


图4 CO<sub>2</sub>驱试井流动阶段划分

Fig. 4 Division of flow periods for CO<sub>2</sub> flooding well testing

II段,是压力波向CO<sub>2</sub>区传播的过渡段。

2) 第III段、第V段及第VII段为水平直线段,反映CO<sub>2</sub>区、过渡区以及原油区内径向流动特征。

3) 第IV段与第VI段为CO<sub>2</sub>区与过渡区及过渡区与原油区之间的过渡段,受CO<sub>2</sub>区与过渡区及过渡区与原油区流度比、储容比综合影响,呈弯曲状曲线。

#### 3.2 过渡区流体流度

在过渡区内,不同的驱替状态可能导致流体流度呈现不同的幂律变化规律,而过渡区内流度变化主要表现为幂律指数 $\theta_1$ 、CO<sub>2</sub>区与过渡区交界面流度比 $\lambda_{12}$ 的不同。因此,令各区域间储容比恒定( $\theta_2=0$ ),CO<sub>2</sub>区半径 $R_1=10$  m,过渡区半径 $R_2=100$  m,无因次井筒存储系数 $C_0=100$ ,表皮因子 $S=1$ ,研究CO<sub>2</sub>区与过渡区交界面流度比 $\lambda_{12}$ 恒定、流度变化幂律指数 $\theta_1$ 不同,以及CO<sub>2</sub>区与过渡区交界面流度比 $\lambda_{12}$ 不等、流度变化幂律指数 $\theta_1$ 相等两种条件下流度随无因次半径的变化,结果如图5所示。可以看出,CO<sub>2</sub>区与过渡区交界面流度比 $\lambda_{12}$ 恒定,过渡区与原油区交界面流度比随幂律指数 $\theta_1$ 的增大而减小;流度变化幂律指数 $\theta_1$ 相同,过渡区内流度变化曲线平行。

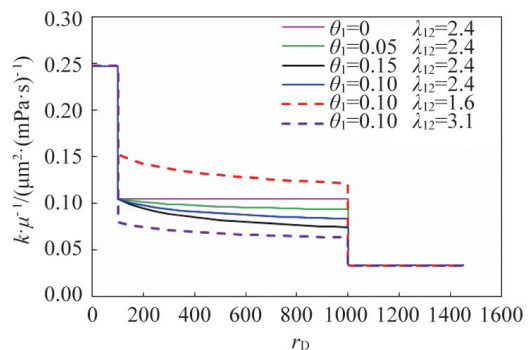


图5 不同 $\theta_1$ 及 $\lambda_{12}$ 下流体流度随无因次半径变化

Fig. 5 Variation of fluid mobility with dimensionless radius at different  $\theta_1$  and  $\lambda_{12}$

不同流度变化幂律指数 $\theta_1$ 下压力及压力导数曲线如图6所示。当幂律指数 $\theta_1$ 不为0时,过渡区径向流直线段不再保持水平,而是存在一定斜率,并随幂律指数 $\theta_1$ 的增加而增大,

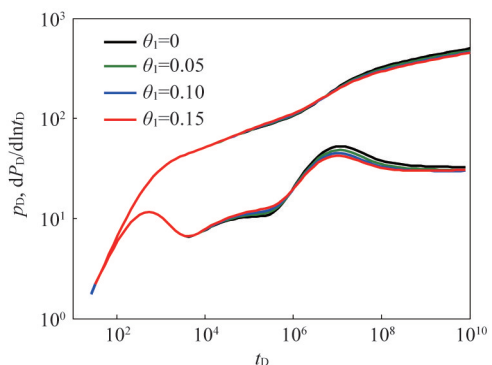


图6 流度变化幂律指数 $\theta_1$ 对试井曲线影响

Fig. 6 Influence of mobility power law exponent  $\theta_1$  on well testing curves

反映出过渡区内流体流度的渐变特性。由于过渡区与原油区界面流度比随幂律指数 $\theta_1$ 的增大而减小,使得过渡区与原油区间的过渡段峰值不断降低,但过渡区与原油区间储容比恒定,过渡段开始及峰值出现时间近似相同。

$\text{CO}_2$ 区与过渡区界面流度比 $\lambda_{12}$ 主要影响 $\text{CO}_2$ 区与过渡区过渡段试井曲线形态,如图7所示。随 $\text{CO}_2$ 区与过渡区界面流度比 $\lambda_{12}$ 的增大, $\text{CO}_2$ 区与过渡区间的过渡段曲线斜率增加。由于过渡区流度变化幂律指数 $\theta_1$ 相同,过渡区内流体流度有相同的递减规律,过渡区径向流直线段平行。过渡区与原油区界面流度比随 $\text{CO}_2$ 区与过渡区界面流度比 $\lambda_{12}$ 的增大而减小,使得过渡区与原油区间过渡段曲线长度持续缩短,开始时间滞后。 $\text{CO}_2$ 区与过渡区界面流度比 $\lambda_{12}$ 越大,过渡区内流体流度越小,流体流动能力越弱,注入压力增加。

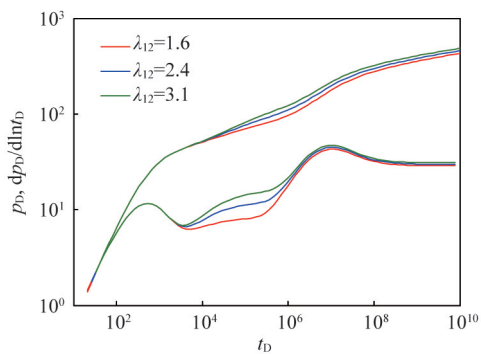


图7  $\text{CO}_2$ 区与过渡区界面流度比 $\lambda_{12}$ 对试井曲线影响  
Fig. 7 Influence of  $\text{CO}_2$  and transition region interface mobility ratio  $\lambda_{12}$  on well testing curves

### 3.3 过渡区储容系数

与过渡区内流度变化类似,储容系数变化也主要表现为其幂律指数 $\theta_2$ 与 $\text{CO}_2$ 区与过渡区界面储容比 $F_{12}$ 的不同。假定各区域间流度比恒定( $\theta_1=0$ ),井筒存储、表皮系数及各区域半径大小均与第3.2节相同。当 $\text{CO}_2$ 区与过渡区界面储容比 $F_{12}$ 恒定、储容系数变化幂律指数 $\theta_2$ 不同,以及幂律指数 $\theta_2$ 相同、 $\text{CO}_2$ 区与过渡区界面储容比 $F_{12}$ 不同时,储容系数随无因次半径的变化如图8所示。储容系数变化幂律指数 $\theta_2$ 相同,过渡区内储容系数变化曲线平行; $\text{CO}_2$ 区与过渡区界面储

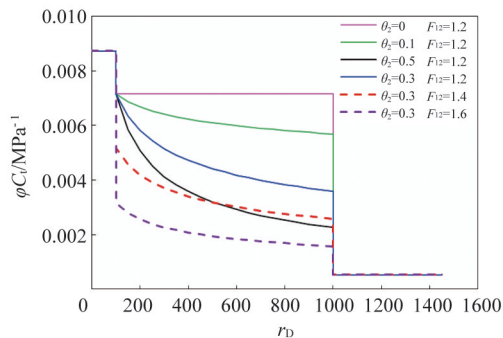


图8 不同 $\theta_2$ 及 $F_{12}$ 下储容系数随无因次半径变化  
Fig. 8 Variation of fluid storage coefficient with dimensionless radius at different  $\theta_2$  and  $F_{12}$

容比 $F_{12}$ 恒定,过渡区与原油区界面储容比随幂律指数 $\theta_2$ 的增大而减小。

储容系数变化幂律指数 $\theta_2$ 对试井曲线的影响如图9所示。对比不同流度变化幂律指数 $\theta_1$ (图6)和储容系数变化幂律指数 $\theta_2$ 下的压力导数曲线,发现两者对过渡区径向流直线段的影响效果趋同,直线斜率均随幂律指数的增加而增大,反映出过渡区内流体流度、储容系数的幂律递减特点。与图6不同的是,由于随幂律指数 $\theta_2$ 的增大,过渡区与原油区界面储容比减小,使得 $\text{CO}_2$ 区与原油区间过渡段开始时间及峰值出现时间提前,峰值减小。

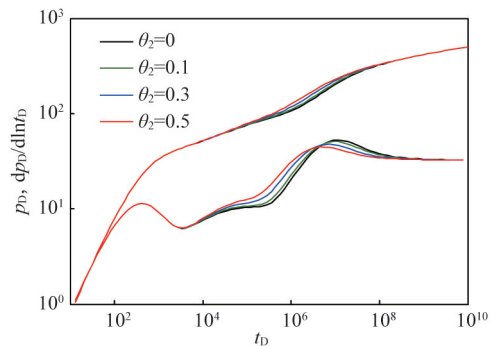


图9 储容系数变化幂律指数 $\theta_2$ 对试井曲线影响  
Fig. 9 Influence of storativity power law exponent  $\theta_2$  on well testing curves

类似于 $\text{CO}_2$ 区与过渡区界面流度比,其储容比 $F_{12}$ 也主要影响 $\text{CO}_2$ 区与过渡区及过渡区与原油区间的过渡段曲线形态,如图10所示。 $\text{CO}_2$ 区与过渡区界面储容比 $F_{12}$ 越大, $\text{CO}_2$ 区与过渡区间的过渡段曲线斜率愈大。在过渡区与原油区间的过渡段,由于过渡区与原油区界面储容比随 $\text{CO}_2$ 区与过渡区界面储容比 $F_{12}$ 的增加而减小,使过渡段出现时间提前,峰值减小。

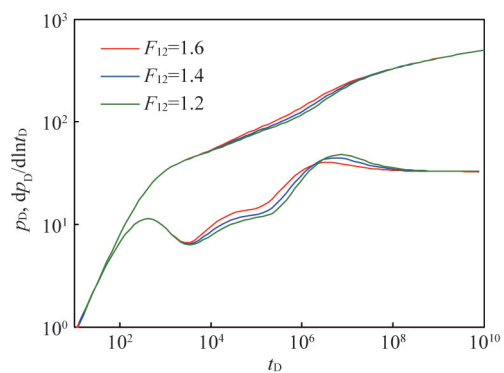


图10  $\text{CO}_2$ 区与过渡区界面储容比 $F_{12}$ 对试井曲线影响  
Fig. 10 Influence of  $\text{CO}_2$  and transition region interface storativity ratio  $F_{12}$  on well testing curves

### 3.4 过渡区半径

$\text{CO}_2$ 驱替过程中,由于 $\text{CO}_2$ 不断向过渡区扩散,使得过渡区半径 $R_2$ 不断增大,假定 $\text{CO}_2$ 区半径 $R_1=10$  m,各区间流度比、

储容比恒定( $\theta_1=0, \theta_2=0$ ), 研究过渡区半径 $R_2$ 分别为50、100、200 m时试井曲线的形态变化, 如图11所示。由于 $CO_2$ 区半径 $R_1$ 恒定, 各曲线重合; 过渡区半径 $R_2$ 增大时, 压力波在过渡区内传播时间增加, 过渡区径向流直线段增长, 过渡区与原油区间过渡段开始时间推迟, 当过渡区半径 $R_2$ 较小时, 过渡段会掩盖过渡区内的径向流; 因各区间流度比、储容比恒定, 过渡区与原油区间的过渡段曲线平行, 峰值大小相等, 随过渡区半径 $R_2$ 增大呈右移特征。注入压力随过渡区半径 $R_2$ 的减小而增加, 说明 $CO_2$ 与原油之间相互作用越充分, 越有利于后续 $CO_2$ 的注入。

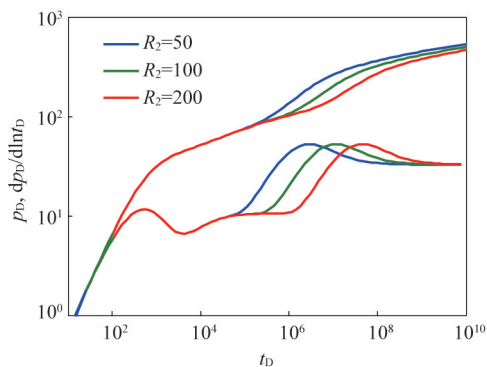


图11 过渡区半径 $R_2$ 对试井曲线影响

Fig. 11 Influence of transition region radius  $R_2$  on well testing curves

#### 4 结论

1) 基于 $CO_2$ 驱数值模拟组分模型过渡区内流体物性参数随半径变化拟合结果, 考虑过渡区内流体流度、储容系数幂律变化, 建立了低渗透油藏 $CO_2$ 驱变性质三区复合油藏模型, 其结果与数值模型吻合较好, 验证了模型的正确性。

2) 流体流度、储容系数变化幂律指数 $\theta_1, \theta_2$ 增大, 过渡区径向流直线段斜率增加, 过渡区与原油区间的过渡段峰值减小;  $CO_2$ 区与过渡区交界面流度比 $\lambda_{12}$ 和储容比 $F_{12}$ 越大, 则 $CO_2$ 区与过渡区间的过渡段曲线斜率越大; 过渡区与原油区间的过渡段开始时间随幂律指数 $\theta_2$ 及储容比 $F_{12}$ 的增大而提前。

3) 过渡区半径 $R_2$ 增大, 压力波在过渡区内传播时间增加, 过渡区径向流直线段延长, 过渡区与原油区间的过渡段开始时间推迟, 呈右移特征, 注入压力减小, 有利于 $CO_2$ 的后续注入。

#### 参考文献 (References)

- [1] 苏玉亮. 油藏驱替机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.  
Su Yuliang. Displacement mechanism in oil reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009.
- [2] 高慧梅, 何应付, 周锡生. 注二氧化碳提高原油采收率技术研究进展[J]. 特种油气藏, 2009, 16(1): 6-12.  
Gao Huimei, He Yingfu, Zhou Xisheng. Research progress on  $CO_2$  EOR technology[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2009, 16(1): 6-12.
- [3] Tang R W, Ambastha A K. Analysis of  $CO_2$  pressure transient data with two- and three-region analytical radial composite models[C]. SPE

Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, USA, October 2-5, 1988.

- [4] Ambastha A K, Jr Ramery H J. Pressure transient analysis for a three-region composite reservoir[C]. SPE Rocky Mountain Regional Meeting, Casper, Wyoming, USA, May 18-21, 1992.
- [5] 王敬瑶. 二氧化碳驱试验区试井测试资料分析及应用[J]. 大庆石油学院学报, 2011, 35(3): 85-90.  
Wang Jingyao. Analysis of well testing data of carbon dioxide flooding zone and its application[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2011, 35(3): 85-90.
- [6] 朱建伟, 邵长金, 廖新维, 等. 注二氧化碳混相驱试井模型及压力分析[J]. 油气井测试, 2011, 20(4): 1-4.  
Zhu Jianwei, Shao Changjin, Liao Xinwei, et al. Miscible flooding well test model with carbon dioxide injection and its pressure analysis[J]. Well Testing, 2011, 20(4): 1-4.
- [7] 马代鑫, 刘慧卿, 邵连鹏, 等. 火烧油层注气井试井分析理论模型[J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(5): 72-74.  
Ma Daixin, Liu Huiqing, Shao Lianpeng, et al. Theoretical model of well test analysis for gas injection wells of in-situ combustion[J]. Petroleum Geology and Recovery efficiency, 2006, 13(5): 72-74.
- [8] 刘永良, 贾永禄, 康毅力, 等. 考虑热损失的稠油热采三区复合油藏试井模型[J]. 大庆石油地质与开发, 2008, 27(1): 78-82.  
Liu Yongliang, Jia Yonglu, Kang Yili, et al. Three-zone composite reservoir well testing model for heavy oil thermal recovery with consideration of heat loss[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2008, 27(1): 78-82.
- [9] 张林, 贾永禄, 张福祥, 等. 考虑二次压力梯度非线性渗流三区复合油藏模型分析[J]. 大庆石油学院学报, 2011, 35(5): 54-59.  
Zhang Lin, Jia Yonglu, Zhang Fuxiang, et al. Analysis of considering quadratic pressure gradient nonlinear percolation in three-zone composite reservoir[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2011, 35(5): 54-59.
- [10] 刘慧卿, 李景梅, 赵鹏, 等. 热力采油井现代试井分析方法研究[J]. 石油钻探技术, 2003, 31(4): 4-6.  
Liu Huiqing, Li Jingmei, Zhao Peng, et al. Study on modern well test analysis methods for thermal recovery wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2003, 31(4): 4-6.
- [11] Onyekonwu M O. Interpretation of in-situ combustion thermal oil recovery falloff tests[D]. Stanford: Stanford University, 1985.
- [12] Tabrizy V A. Investigated miscible  $CO_2$  flooding for enhancing oil recovery in wettability altered chalk and sandstone rocks[D]. Stavanger: University of Stavanger, 2012.
- [13] Holm L W, Josendel V A. Mechanisms of oil displacement by carbon dioxide[J]. Journal of Petroleum Technology, 1974, 26(12): 1427-1436.
- [14] Issaka M, Ambastha A K. An improved three-region composite reservoir model for thermal recovery well test analysis[C]. PETSOC Annual Technical Meeting, Calgary, Alberta, Canada, June 8-11, 1997.
- [15] 宋考平, 王雷, 计秉玉. 非牛顿-牛顿复合油藏渗流试井解释方法[J]. 石油学报, 1996, 17(1): 82-86.  
Song Kaoping, Wang Lei, Ji Bingyu. Well test analysis of a compound reservoir with non-newtonian and newtonian fluid flow[J]. Acta Petrolei Sinica, 1996, 17(1): 82-86.
- [16] 宋考平, 祝俊峰, 刘泽俊, 等. 多区复合油藏非牛顿幂律流体试井解释[J]. 石油学报, 1997, 18(2): 81-86.  
Song Kaoping, Zhu Junfeng, Liu Zejun, et al. Well test analysis for a compound reservoir with non-newtonian power law fluid flow[J]. Acta Petrolei Sinica, 1997, 18(2): 81-86.

(责任编辑 韩星明)