

文章编号:1009-9603(2021)01-0137-07

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2021.01.017

# CO<sub>2</sub>-原油混相带运移规律及其对开发效果的影响

曹小朋<sup>1,2</sup>,冯其红<sup>1</sup>,杨勇<sup>2</sup>,王森<sup>1</sup>,康元勇<sup>2</sup>,张传宝<sup>2</sup>

(1.中国石油大学(华东)石油工程学院,山东青岛266580;

2.中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院,山东东营257015)

**摘要:**CO<sub>2</sub>-原油混相带的运移规律对混相驱效果具有重要影响,目前尚未形成系统的认识。通过组分数值模拟和数学推导,研究了混相带运移变化规律及对采收率的影响。结果表明:混相带前缘突破前,前缘和后缘波及系数、无因次面积线性增大,无因次宽度达到峰值0.14后逐渐减小,而前缘和后缘指进系数增大速度越来越快;混相带前缘突破时,无因次面积达到最大约0.22;混相带后缘突破后,前缘和后缘波及系数上升速度大幅度下降,无因次面积、无因次宽度、指进系数逐渐减小后趋于稳定;混相带前缘突破前和后缘突破后,洗油效率和膨胀系数分别保持为常数,波及系数增大是影响开发效果的根本因素,可采取焖井、水气交替、耦合注采、封堵主流线区域等措施扩大波及系数。

**关键词:**CO<sub>2</sub>混相驱;混相带;运移规律;开发效果;波及系数

中图分类号:TE357.45

文献标识码:A

## Migration law of CO<sub>2</sub>-crude oil miscible zone and its influence on development effect

CAO Xiaopeng<sup>1,2</sup>, FENG Qihong<sup>1</sup>, YANG Yong<sup>2</sup>, WANG Sen<sup>1</sup>, KANG Yuanyong<sup>2</sup>, ZHANG Chuanbao<sup>2</sup>

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao City, Shandong

Province, 266580, China; 2. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield

Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

**Abstract:** The migration law of CO<sub>2</sub>-crude oil miscible zone has an important influence on the effect of CO<sub>2</sub> miscible flooding, but the influence has not been systematically understood yet. Through the compositional numerical simulation and mathematical derivation, this paper studies the migration law of the miscible zone and its influence on the recovery factor. The results show that the dimensionless area and the sweep efficiencies at the leading and trailing edges of the miscible zone increase linearly before the leading edge of the miscible zone is broken through. At the same time, the dimensionless width gradually decreases after reaching a peak value of 0.14 and the fingering coefficients at the leading and trailing edges grow faster and faster; the miscible area reached a maximum of 0.22 when the leading edge of the miscible zone is broken through. The rising speed of the sweep coefficient at the leading and trailing edges drop significantly after the trailing edge of the miscible zone is broken zone through. Meanwhile, the dimensionless area, dimensionless width, and fingering coefficients go down gradually and then stabilize. The oil displacement efficiency and expansion coefficient remain approximately constant before the breakthrough of the leading edge and after the breakthrough of the trailing edge, which means that the increase in the sweep efficiencies of the miscible zone is the primary factor affecting the development effect of CO<sub>2</sub> miscible flooding. For this purpose, before the miscible zone is broken through, measures such as soaking, water-alternating-gas injection, injection-production coupling, and plugging of the main flow line should be adopted to expand the sweep efficiency.

收稿日期:2020-10-07。

作者简介:曹小朋(1983—),男,山东东营人,高级工程师,在读博士研究生,从事油气田开发工程研究。E-mail:caoxiaopeng.slyt@sinopec.com。

通信作者:冯其红(1969—),男,四川西充人,教授,博导。E-mail:fengqihong.upc@gmail.com。

基金项目:国家科技重大专项“渤海湾盆地济阳坳陷致密油开发示范工程”(2017ZX05072)。

**Key words:** CO<sub>2</sub> miscible flooding; miscible zone; migration law; development effect; sweep efficiency

CO<sub>2</sub>混相驱是一种有效提高原油采收率的技术<sup>[1-7]</sup>,矿场统计数据表明,CO<sub>2</sub>混相驱提高采收率幅度为10%~30%,可使高含水油藏的产量继续稳产15~20 a<sup>[8-15]</sup>。通过CO<sub>2</sub>与原油之间的萃取和凝析作用,二者可实现多次接触混相<sup>[16-18]</sup>,油藏中出现一定规模的CO<sub>2</sub>-原油混相带,油气界面张力消失,毛管压力等于0,理论上洗油效率能达100%,同时还存在膨胀作用、降黏作用等提高采收率机理。因此,CO<sub>2</sub>与原油相互作用形成混相带是混相驱提高采收率的根本原因。目前,中外对CO<sub>2</sub>-原油混相特征的研究主要集中在混相机理、混相过程、混相前缘移动规律等方面,尚缺少对混相带运移规律的系统研究。BOOTH通过数值模拟分析混相带的动态变化特征,证明混相带的面积在驱替过程中不断增大,并且沿主流线方向存在黏性指进现象<sup>[19]</sup>;李南等对混相带进行定义,分析驱替过程中混相带的波及规律<sup>[20]</sup>;陈志豪等对混相带的范围和表征参数进行定义,并分析混相带宽度的变化规律,但对混相带表征参数的定义较为简单,而且其将混相带宽度定义为混相带面积与前缘长度之比,不能准确反映混相带宽度变化受前缘、后缘共同影响的特征,同时其仅从宽度角度对混相带运移规律进行分析,有失全面<sup>[21]</sup>。在对CO<sub>2</sub>-原油混相带进行多参数准确表征的基础上,通过数值模拟系统研究混相带形成后的运移规律,并推导建立混相带表征参数与采出程度之间的关系式,明晰混相带运移特征对开发效果的影响,以期CO<sub>2</sub>混相驱矿场应用提供技术支持。

## 1 数值模拟模型建立与混相带表征

### 1.1 数值模拟模型

为研究CO<sub>2</sub>-原油混相带表征方法,参考胜利油田G区块实际参数<sup>[21]</sup>,建立二维油藏数值模拟模型,模型长、宽、高分别为200,200和8 m,渗透率取值为10 mD,井网形式为1/4五点井网;注入井定流量为0.001 PV/d,采油井定流压为G区块最小混相压力28.9 MPa,以确保地层压力始终高于该最小混相压力而实现CO<sub>2</sub>混相驱;流体组分模型使用CMG-Winprop软件包,在拟合PVT实验数据基础上建立。

### 1.2 混相带表征参数定义

目前,CO<sub>2</sub>-原油混相带的划分还没有形成标准。借鉴文献<sup>[20]</sup>对混相带的划分方法,即将油相

中CO<sub>2</sub>含量等于20%的位置定义为混相带前缘,将油气界面张力等于0.1 mN/m的位置定义为混相带后缘,前缘与后缘之间的区域即为混相带。根据该划分方法,首先通过数值模拟,计算得到任意驱替时刻油藏中油气界面张力和油相CO<sub>2</sub>含量分布图;然后,利用油相CO<sub>2</sub>含量分布图确定混相带前缘,利用油气界面张力分布图确定混相带后缘,则可得到混相带形态分布(图1)。

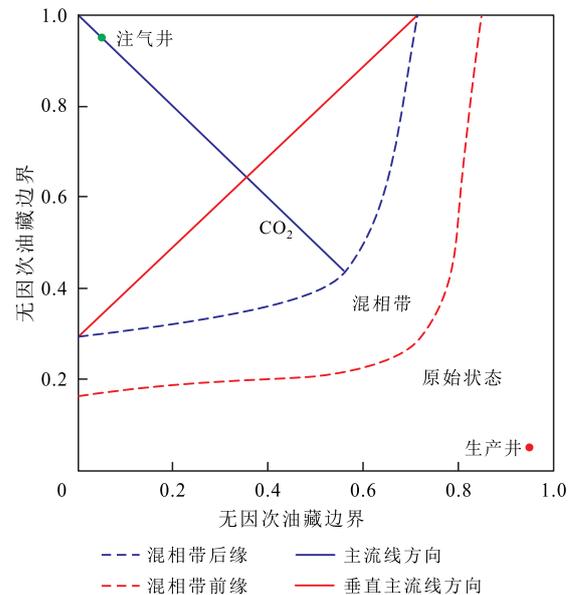


图1 混相带形态分布

Fig.1 Morphological distribution of miscible zone

为定量刻画CO<sub>2</sub>-原油混相带形态及其演变规律,需要进一步定义混相带形态的表征参数。根据CO<sub>2</sub>混相驱机理,CO<sub>2</sub>-原油混相带对采收率的影响主要取决于混相带的规模和形状特征。为此,定义2个特征参数表征混相带的规模,即混相带前缘(后缘)波及系数和无因次混相带面积;定义2个特征参数表征混相带的形状特征,即无因次混相带宽度和混相带前缘(后缘)指进系数。

**混相带前缘(后缘)波及系数** 混相带前缘(后缘)的波及面积与注采井组控制油藏面积( $A$ )之比定义为混相带前缘(后缘)的波及系数。该参数代表混相带作用范围的大小,从而实现对CO<sub>2</sub>混相驱波及效率的定量表征。

**无因次混相带面积** 将混相带前缘线与后缘线之间的油藏区域面积作为混相带面积( $S_d$ ),其与油藏面积 $A$ 之比定义为无因次混相带面积( $S$ )。该参数代表任意时刻混相带平面展布规模,实质上反映的是原油降黏和膨胀作用区域的范围,即可实现

对CO<sub>2</sub>混相驱洗油效率的定量表征。

无因次混相带宽度 设混相带前缘线与后缘线长度的平均值为 $L$ ,注采井组控制油藏区域边长为 $a$ ,则定义无因次混相带宽度为:

$$b = \frac{S_d}{La} \quad (1)$$

$b$ 代表混相带的宽窄变化,反映的是混相带前缘、后缘移动速度的相对大小,实质上是汽化-凝析作用及水动力弥散作用的强弱。

混相带前缘(后缘)指进系数 该系数为混相带前缘(后缘)沿主流线方向最大波及距离与垂直主流线方向最大波及距离的比值。混相带前缘指进系数反映的是混相带前缘向原油中的指进程度,混相带后缘指进系数反映的是气相区向混相带中的指进程度。指进系数越大,指进程度就越大,即沿主流线方向的波及程度越大,垂直主流线方向的波及程度越小,即指进系数反映了波及系数增大的方式。在相同的累积注入量下,若指进系数较大,说明波及系数主要靠主流线方向上的突进来增大,将导致见气时间较早,最终波及系数较低;若指进系数较小,说明波及系数靠整个混相带前缘或后缘均匀推进,见气时间较长,最终波及系数较大。

## 2 混相带运移规律

### 2.1 参数计算方法

根据CO<sub>2</sub>混相驱组分数值模拟结果,可计算出任意开发时刻各个混相带表征参数值,进而实现对混相带运移规律的定量研究。具体计算步骤为:①确定某开发时刻 $t$ ,调取数值模拟计算的CO<sub>2</sub>含量、油气界面张力分布图,通过线性插值分别求得CO<sub>2</sub>含量为20%、界面张力为0.1 dyn/cm的等值线,得到混相带前缘线和后缘线,二者之间即为 $t$ 时刻混相带区域。②分别以混相带前缘线和后缘线为边界进行数值积分,求得前缘和后缘的波及面积,进而得到前缘和后缘波及系数和无因次混相带面积。③计算混相带前缘线和后缘线长度,求取无因次混相带宽度。④根据混相带形态,求取前缘或后缘沿主流线方向(一般为注采井间连线方向)及垂直主流线方向的波及距离,求取前缘或后缘的指进系数。⑤对 $t+1$ 时刻重复步骤①—④,绘制不同混相带表征参数随时间变化曲线。

### 2.2 混相带波及系数变化规律

由混相带前缘和后缘波及系数随累积注入量的变化(图2)可见,混相带前缘和后缘突破前,随累

积注入量增大,前缘和后缘波及系数均线性增大,但前缘波及系数增大速度较快,说明混相带前缘的运移速度高于后缘。这是由于混相带前缘除了压力梯度驱动力之外,还存在水动力弥散作用。在混相带前缘突破(约0.4 PV)和后缘突破(约0.5 PV)后,波及系数上升速度大幅度下降,这是因为主流线方向形成运移优势通道,非主流线方向压力梯度不足,导致波及系数增幅变缓。

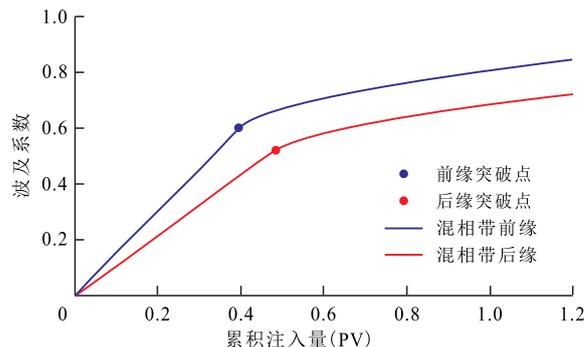


图2 混相带前缘和后缘波及系数随累积注入量的变化  
Fig.2 Variation in sweep efficiencies at leading and trailing edges of miscible zone with cumulative injection volume

### 2.3 无因次混相带面积变化规律

无因次混相带面积随累积注入量变化规律(图3)表明,混相带前缘突破之前,随累积注入量的增大,无因次混相带面积线性增大,在混相带前缘突破时达到最大(约0.22)。这是由于随注入量的增大,混相带前缘与原油的接触面不断增大,且由于水动力弥散作用混相带前缘运移速度大于后缘。混相带前缘突破与后缘突破之间,无因次混相带面积线性减小。混相带后缘突破之后,混相带前缘与后缘波及系数变化趋势相近,都难以向主流线两侧扩张,即混相带前缘与后缘向前运移速度一致,从而导致无因次混相带面积趋于稳定。

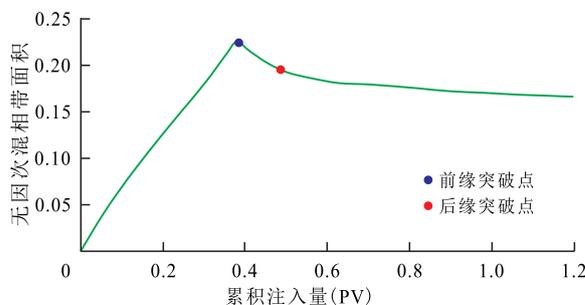


图3 无因次混相带面积随累积注入量的变化  
Fig.3 Variation in dimensionless area of miscible zone with cumulative injection volume

### 2.4 无因次混相带宽度变化规律

由无因次混相带宽度随累积注入量的变化(图4)可见,随累积注入量增加,无因次混相带宽度呈

先快速增大再快速减小又缓慢减小的趋势。注气前期无因次混相带宽度快速增大,主要是因为水动力弥散使混相带前缘运移速度大于后缘。随后,无因次混相带宽度增速变缓达到峰值后又缓慢回落,这是因为随着CO<sub>2</sub>-原油间多次接触的汽化-凝析作用逐步稳定,混相带内组分浓度梯度越来越小,水动力弥散作用越来越弱,导致混相带前缘与后缘运移速度趋于一致;同时,无因次混相带宽度还受前缘线和后缘线突进形态的影响,算例中当累积注入量达到0.25 PV后突进作用明显增强,即前缘线和后缘线平均长度增大速度加快,导致气窜之前无因次混相带宽度即达到峰值0.14左右。然后,随着前缘越来越接近生产井并最终突破,无因次混相带宽度又开始快速减小。最后,后缘突破后前缘线和后缘线长度也趋于稳定,使得无因次混相带宽度开始缓慢减小。

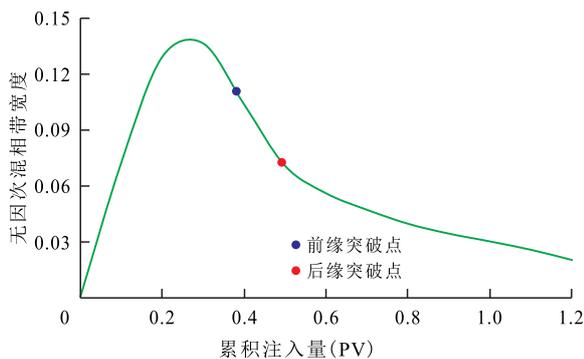


图4 无因次混相带宽度随累积注入量的变化

Fig.4 Variation in dimensionless width of miscible zone with cumulative injection volume

## 2.5 混相带指进系数变化规律

由混相带前缘和后缘指进系数随累积注入量的变化(图5)可见,见气前累积注入量越大,混相带前缘和后缘指进系数越大,且增大速度越来越快,说明指进程度越来越严重。这是因为随累积注入量的增大,主流线方向的压力梯度增大、渗流阻力

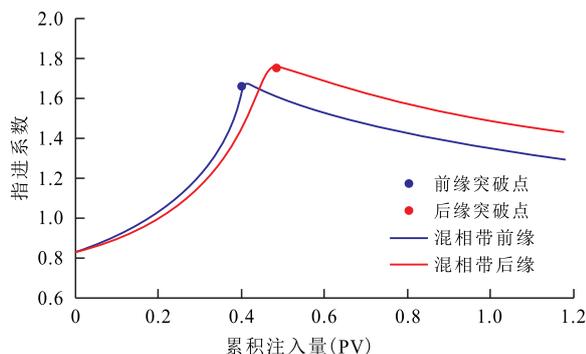


图5 混相带指进系数随累积注入量的变化

Fig.5 Variation in fingering coefficients at leading and trailing edges of miscible zone with cumulative injection volume

减小,导致驱动速度相对越来越高。同时,混相带前缘和后缘指进系数在累积注入量为0.3 PV左右开始急剧上升,此时有必要采取焖井、水气交替等措施抑制混相带的突进以延长见气时间。另外,见气之前气相前缘与混相带后缘之间的流度差大于混相带前缘与油相之间的流度差,但混相带后缘却表现出了更低的指进程度,说明混相带能有效地抑制气相区的指进。在混相带前缘和后缘突破之后,其对应的指进系数都开始下降,这是由于主流线方向的波及距离达到了最大,而主流线两侧的波及距离还在继续缓慢增大。

## 3 混相带运移对开发效果的影响

### 3.1 CO<sub>2</sub>混相驱提高采收率主控机理

原油采出程度取决于2个主要因素:一是混相带后缘(气相区)的波及系数及其洗油效率,二是混相带面积及其膨胀程度。假设累积注入量为 $V$ 时,采出程度为 $E_R$ ,混相带后缘波及系数为 $E_E$ ,洗油效率为 $E_D$ ,混相带前缘波及系数为 $E_F$ ,混相带膨胀系数为 $B$ ,则无因次混相带面积为:

$$S = E_F - E_E \quad (2)$$

当累积注入量变为 $V+dV$ 时,以上参数的变化量分别为 $dE_R, dE_E, dE_D, dE_F, dB, dS$ ,根据物质平衡原理有:

$$\begin{aligned} dE_R &= (E_D + dE_D)dE_E + (B + dB - 1)dS = \\ &= (E_D + dE_D)dE_E + (B + dB - 1)(dE_F - dE_E) = \\ &= (B + dB - 1)dE_F + (E_D + dE_D - B - dB + 1)dE_E \end{aligned} \quad (3)$$

当累积注入量变化量 $dV$ 较小时,驱替过程中的洗油效率和混相带膨胀系数变化量较小,可以忽略不计,即 $dE_D \approx 0, dB \approx 0$ ,则(3)式可简化为:

$$dE_R = (B - 1)dE_F + (E_D - B + 1)dE_E \quad (4)$$

(4)式表明,当 $E_D$ 和 $B$ 近似看作常数时, $dE_R$ 和 $dE_E$ 为线性关系,进行线性拟合即可求得此时 $E_D$ 和 $B$ ,具体方法如下:①由数值模拟计算结果,求取不同注气时刻(不同累积注入量)下对应的 $dE_R, dE_F$ 和 $dE_E$ 。②取任意注气时刻 $i$ 相邻累积注入量 $V_i, V_{i+0.5}$ 和 $V_{i+1}$ ,将对应的 $dE_R, dE_F, dE_E$ 分别代入(4)式建立二元一次方程组,联立求解得到 $E_D$ 和 $B$ 作为累积注入量 $(V_i + V_{i+1})/2$ 下对应的混相带洗油效率和膨胀系数。③依次求取不同累积注入量下的 $E_D$ 和 $B$ 值。由洗油效率、膨胀系数随累积注入量变化(图6)可

知,混相带前缘突破前及后缘突破后,洗油效率、膨胀系数分别保持为常数。混相带前缘突破前驱油方式为混相带驱,后缘突破后驱油方式转变为气相驱,因此后缘突破后洗油效率明显降低。混相带前缘突破前膨胀系数为常数,说明混相带中CO<sub>2</sub>相对含量为常数,气相前缘中的CO<sub>2</sub>不断凝析进入混相带。混相带后缘突破后,膨胀系数显著增大,说明混相带中CO<sub>2</sub>含量增加,这是混相带后缘处CO<sub>2</sub>不断凝析进入混相带,而混相带面积不断减小导致。混相带前缘突破后到后缘突破前,驱油方式由混相带驱逐渐过渡到气相驱,即洗油效率和膨胀系数发生变化阶段。

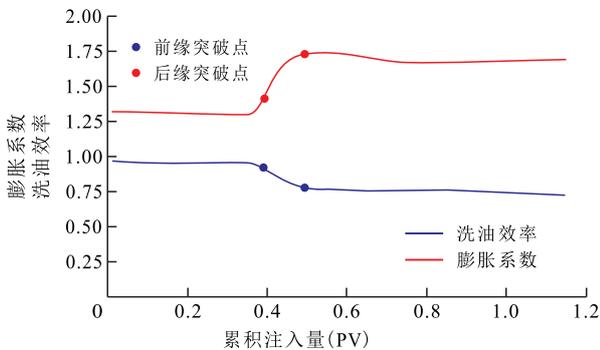


图6 洗油效率、膨胀系数随累积注入量变化

Fig.6 Variation in oil displacement efficiency and expansion coefficient with cumulative injection volume

### 3.2 CO<sub>2</sub>混相驱采出程度模型建立

为研究混相带运移规律对开发效果的影响,进一步推导建立混相带表征参数与采出程度之间的关系式。由(3)式,混相带前缘突破之前采出程度与混相带前缘波及系数、后缘波及系数和无因次混相带面积的关系可简化为:

$$E_R = E_{D0}E_E + (B_0 - 1)S = E_{D0}E_E + (B_0 - 1)(E_F - E_E) = (B_0 - 1)E_F + (E_{D0} - B_0 + 1)E_E \quad (5)$$

其中,洗油作用对采出程度的贡献为 $E_{D0}E_E$ ,膨胀作用对采出程度的贡献为 $(B_0 - 1)S$ 。

而混相带后缘突破之后采出程度与混相带前缘波及系数、后缘波及系数和无因次混相带面积的关系为:

$$E_R - E_{RM} = (B_M - 1)(E_F - E_{FM}) + (E_{DM} - B_M + 1)(E_E - E_{EM}) \quad (6)$$

也可写为:

$$E_R = (B_M - 1)E_F + (E_{DM} - B_M + 1)E_E + a \quad (7)$$

$$a = E_{RM} - (B_M - 1)E_{FM} - (E_{DM} - B_M + 1)E_{EM} \quad (8)$$

### 3.3 混相带对采出程度影响机理

利用(5)和(7)式分别对混相带前缘突破前、后缘突破后采出程度变化进行拟合,由结果(图7)可以看出,采出程度模型计算结果与数值模拟结果拟合精度高,说明其对开发效果预测具有可靠性。

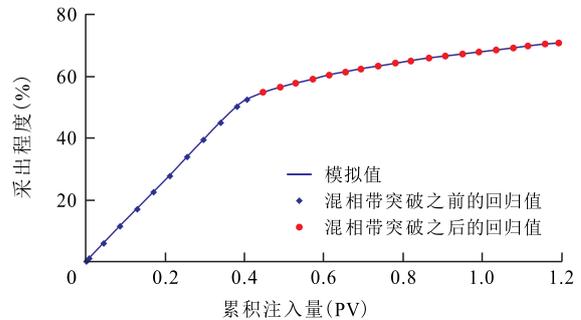


图7 采出程度模型计算结果与数值模拟结果拟合曲线

Fig.7 Fitting results of recovery with cumulative injection at leading and trailing edges of miscible zone

由图7亦可见,混相带突破前后采出程度增长速度出现明显差异。混相带前缘突破前,洗油效率和膨胀系数可以看作常数,由(5)式可知,采出程度与混相带前缘、后缘波及系数和无因次混相带面积之间保持线性关系。根据混相带运移规律,混相带前缘突破前混相带前缘、后缘波及系数和无因次混相带面积均随累积注入量增加而快速增大,因此采出程度保持快速增大。同时,混相带前缘、后缘指进系数也在快速增大,但并未对采出程度造成负面影响,说明见气前混相带形态对采出程度的增速没有影响,其主要是通过影响见气时间长短影响波及系数进而影响采收率。

混相带后缘突破后,采出程度增速显著降低,这是因为由(7)式可知,采出程度与混相带前缘、后缘波及系数之间保持线性关系,而根据混相带运移规律,此时混相带前缘、后缘波及系数增大速度均明显降低。同时,洗油效率和膨胀系数虽然仍可看作常数,但膨胀系数增大、洗油效率减小。膨胀系数增大,导致(7)式 $E_F$ 的系数 $(B_M - 1)$ 增大,但 $E_E$ 的系数 $(E_{DM} - B_M + 1)$ 减小;洗油效率减小,导致(7)式 $E_E$ 的系数 $(E_{DM} - B_M + 1)$ 减小。同时,混相带指进系数缓慢减小,主要是混相带向主流线两侧扩展导致,其根本作用还是扩大了混相带波及系数。

综合以上分析,相对于原油膨胀和洗油增强等机理,混相带波及系数增大是影响CO<sub>2</sub>混相驱开发效果的根本因素。矿场应用过程中,应将措施重点放在扩大混相带波及系数方面,如在临近混相带前缘突破前采取焖井、水气交替等措施抑制混相带前缘的突进,在混相带后缘突破后采取耦合注采、封

堵主流线区域等措施扩大非主流线区域波及系数。

## 4 结论

定义混相带前缘(后缘)波及系数、无因次混相带面积、无因次混相带宽度和混相带前缘(后缘)指进系数等参数,可实现对混相带运移规律的详细表征。

混相带前缘突破前,前缘和后缘波及系数、无因次面积线性增大,无因次宽度达到峰值0.14后逐渐减小,而前缘和后缘指进系数增大速度越来越快;混相带后缘突破后,前缘和后缘波及系数上升速度大幅度下降,无因次面积、无因次宽度、指进系数逐渐减小后趋于稳定。

推导建立混相带表征参数与采出程度之间的关系式,计算结果表明,相对于原油膨胀和洗油效果增强等机理,混相带波及系数增大是影响CO<sub>2</sub>混相驱开发效果的根本因素,在临近混相带前缘突破前应采取焖井、水气交替等措施抑制混相带前缘的突进,在混相带后缘突破后应采取耦合注采、封堵主流线区域等措施扩大非主流线区域波及系数。

### 符号解释

- $a$ ——注采井组控制油藏区域边长, m;  
 $A$ ——油藏面积, m<sup>2</sup>;  
 $b$ ——无因次混相带宽度;  
 $B$ ——混相带膨胀系数;  
 $B_M$ ——混相带后缘突破之后的膨胀系数;  
 $B_O$ ——混相带前缘突破之前的膨胀系数;  
 $E_D$ ——洗油效率;  
 $E_{D0}$ ——混相带前缘突破之前的洗油效率;  
 $E_{DM}$ ——混相带后缘突破之后的洗油效率;  
 $E_F, E_E$ ——任意时刻混相带前缘、后缘波及系数;  
 $E_{FM}, E_{EM}$ ——混相带后缘突破时混相带前缘、后缘波及系数;  
 $E_R$ ——采出程度;  
 $E_{RM}$ ——混相带后缘突破时的采出程度;  
 $i$ ——注气时刻;  
 $L$ ——混相带前缘线与后缘线长度的平均值, m;  
 $S$ ——无因次混相带面积;  
 $S_d$ ——混相带面积, m<sup>2</sup>;  
 $V$ ——累积注入量, PV。

### 参考文献

[1] 沈平平, 江怀友, 陈永武, 等. CO<sub>2</sub>注入技术提高采收率研究[J].

特种油气藏, 2007, 14(3): 1-4, 11.

SHEN Pingping, JIANG Huaiyou, CHEN Yongwu, et al. EOR study of CO<sub>2</sub> injection[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2007, 14(3): 1-4, 11.

[2] GOZALPOUR F, REN S R, TOHIDI B. CO<sub>2</sub> EOR and storage in oil reservoir[J]. Oil & Gas Science and Technology, 2005, 60(3): 537-546.

[3] HOSSEINI S A, ALFI M, NICOT J P. Analysis of CO<sub>2</sub> storage mechanisms at a CO<sub>2</sub>-EOR site, Cranfield, Mississippi[J]. Greenhouse Gases Science & Technology, 2018, 26(3): 53-57.

[4] 王业飞, 高苗, 谭龙, 等. 裂缝-基质模型CO<sub>2</sub>混相注入提高原油采收率[J]. 油气地质与采收率, 2018, 25(5): 87-92.

WANG Yefei, GAO Miao, TAN Long, et al. Experimental investigation of miscible CO<sub>2</sub> injection for enhanced oil recovery in fracture-matrix model[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(5): 87-92.

[5] 张海龙. CO<sub>2</sub>混相驱提高石油采收率实践与认识[J]. 大庆石油地质与开发, 2020, 39(2): 114-119.

ZHANG Hailong. Practice and understanding of enhancing the oil recovery by CO<sub>2</sub> miscible flooding[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(2): 114-119.

[6] 李向良. 温度和注入压力对二氧化碳驱油效果的影响规律实验[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(1): 84-87, 92.

LI Xiangliang. Experimental study on the effect of temperature and injection pressure on CO<sub>2</sub> flooding[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1): 84-87, 92.

[7] 唐人选, 梁珀, 吴公益, 等. 苏北复杂断块油藏二氧化碳驱油效果影响因素分析及认识[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(1): 98-103.

TANG Renxuan, LIANG Po, WU Gongyi, et al. Analyzing and understanding the influencing factors of CO<sub>2</sub> flooding effect in the Subei complex fault block reservoirs[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(1): 98-103.

[8] 吕雷, 王珂. 二氧化碳驱油在我国的发展现状及应用前景[J]. 精细石油化工进展, 2012, 13(12): 26-29.

LÜ Lei, WANG Ke. Development status and application prospect of CO<sub>2</sub> flooding technology in China[J]. Advances in Fine Petrochemicals, 2012, 13(12): 26-29.

[9] 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.

LI Shilun, TANG Yong, HOU Chengxi. Present situation and development trend of CO<sub>2</sub> injection enhanced oil recovery technology[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2019, 9(3): 1-8.

[10] 陈祖华, 孙雷, 杨正茂, 等. 草舍泰州组油藏CO<sub>2</sub>混相驱效果及二次气驱可行性研究[J]. 油气藏评价与开发, 2019, 9(3): 47-50, 56.

CHEN Zuhua, SUN Lei, YANG Zhengmao, et al. Effect of CO<sub>2</sub> miscible displacement and feasibility study of secondary gas flooding of Taizhou formation in Caoshe oilfield[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2019, 9(3): 47-50, 56.

[11] 曹绪龙, 吕广忠, 王杰, 等. 滩坝砂特低渗透油藏CO<sub>2</sub>驱油技术及应用[J]. 油气藏评价与开发, 2019, 9(3): 41-46.

CAO Xulong, LÜ Guangzhong, WANG Jie, et al. Technology and

- application of CO<sub>2</sub> flooding in extra-low permeability beach-bar sand reservoir[J].Reservoir Evaluation and Development, 2019, 9(3):41-46.
- [12] 刘婷.CO<sub>2</sub>驱油提高采收率技术的研究现状与分析[J].化工自动化及仪表, 2017, 44(4):341-342, 364.  
LIU Ting.Research and analysis of technologies for enhancing oil recovery by CO<sub>2</sub> drive[J].Control and Instruments in Chemical Industry, 2017, 44(4):341-342, 364.
- [13] 敖文君,孔丽萍,王成胜,等.高含水油藏注气驱提高采收率技术研究[J].复杂油气藏, 2016, 9(4):52-57.  
AO Wenjun, KONG Liping, WANG Chengsheng, et al.Study on enhanced oil recovery in high water-cut reservoir by gas flooding [J].Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2016, 9(4):52-57.
- [14] 王福顺,牟珍宝,刘鹏程,等.超稠油油藏CO<sub>2</sub>辅助开采作用机理实验与数值模拟研究[J].油气地质与采收率, 2017, 24(6):86-91.  
WANG Fushun, MOU Zhenbao, LIU Pengcheng, et al.Experiment and numerical simulation on mechanism of CO<sub>2</sub> assisted mining in super heavy oil reservoirs [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(6):86-91.
- [15] 孙焕泉,王海涛,吴光焕,等.稠油油藏注CO<sub>2</sub>提高采收率影响因素研究[J].石油实验地质, 2020, 42(6):1 009-1 013.  
SUN Huanquan, WANG Haitao, WU Guanghuan, et al.CO<sub>2</sub> EOR factors in heavy oil reservoirs [J].Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(6):1 009-1 013.
- [16] 杨付林,喻鹏.细管实验确定最小混相驱压力技术标准[J].特种油气藏, 2019, 26(6):118-122.  
YANG Fulin, YU Peng.Technical standard of minimum miscible flooding pressure determination with slim tube experiment [J].Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(6):118-122.
- [17] 齐桂雪.CO<sub>2</sub>萃取作用对最小混相压力的影响实验研究[J].油气藏评价与开发, 2019, 9(6):51-55, 60.  
QI Guixue.Effect of CO<sub>2</sub> extraction on minimum miscibility pressure [J].Reservoir Evaluation and Development, 2019, 9(6):51-55, 60.
- [18] 蒋永平.CO<sub>2</sub>复合驱油分子动力学模拟及微观机理研究[J].石油实验地质, 2019, 41(2):274-279.  
JIANG Yongping.Molecular dynamics simulation and microscopic mechanism of CO<sub>2</sub> composite flooding [J].Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(2):274-279.
- [19] BOOTH R J S.On the growth of the mixing zone in miscible viscous fingering [J].Journal of Fluid Mechanics, 2010, 16(15):527-539.
- [20] 李南,田冀,任仲瑛.低渗透油藏CO<sub>2</sub>混相区域波及规律研究[J].油气井测试, 2014, 23(4):1-3, 8.  
LI Nan, TIAN Ji, REN Zhongying.The research on spread rule of CO<sub>2</sub> miscible region in low permeability reservoir [J].Well Testing, 2014, 23(4):1-3, 8.
- [21] 陈志豪,郝永卯,季迎春,等.CO<sub>2</sub>-原油混相带形成机理与表征方法[J].油气地质与采收率, 2020, 27(1):57-61.  
CHEN Zhihao, HAO Yongmao, JI Yingchun, et al. Formation mechanism and characterization method of CO<sub>2</sub>-crude oil miscible zone [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(1):57-61.

编辑 刘北羿