

# CO<sub>2</sub> 注入对原油高压物性影响的理论模拟和实验研究

郭平\* 孙良田 李士伦 熊钰 孙雷  
(西南石油学院)

彭鹏商 岳陆  
(中原石油勘探开发科学研究院)

郭平等. CO<sub>2</sub> 注入对原油高压物性影响的理论模拟和实验研究. 天然气工业; 2000; 20(2): 76~79

**摘要** 膨胀试验作为单井吞吐工艺试验的重要评价手段之一, 在油田注 CO<sub>2</sub> 混相驱试验中已得到应用, 然而关于注气后原油物性参数的变化规律虽然已作了些研究, 但目前还不是很清楚, 文章在对 CO<sub>2</sub> 注气膨胀实验的  $p-x$  图、膨胀系数和原始相态参数进行拟合后, 计算出注气后原油的密度、分子量、泡点处气液相偏差因子和界面张力、原油粘度等的变化规律, 同时研究了  $pV$  关系和多级脱气的主要特征变化规律。

**关键词** 二氧化碳 膨胀 相态 驱动(油气藏) 脱气 高压物性

在 CO<sub>2</sub> 注气开采过程中, 可能出现多种驱油机理, 这些机理与相态有密切的关系。CO<sub>2</sub> 混相驱在国外已研究多年, 与天然气、烟道气或氮气相比, 成本大大降低, 因而倍受欢迎。油田整体注 CO<sub>2</sub> 由于

资源等问题未能在国内得到广泛推广使用, 但在我国江苏油田已成为一个主要的增产工艺技术。在同一个油田的不同井间由于流体类型的不同, 注入气后原油的膨胀能力不同, 注入气后原油粘度降低程

度, 与气藏采用其它方法计算的天然气储量数值接近, 相对误差仅 0.29%。

根据以上采用静态法、动态法等多种方法计算天然气储量, 计算结果天然气储量为数百亿立方米, 储量数值最大与最小值相对差值为 17.58%。从计算出的天然气储量数值与四川盆地现有天然气藏储量相比, 平落坝须二气藏是四川盆地储量大、丰度高的气藏之一。

### 3. 天然气产能较高

须二气藏已完井的 11 口气井, 其中 4 口气井(平落 1、2、10、12 井)进行了两次试井, 天然气产能少数气井变化不明显。多数气井生产几年后, 产层有一定的净化, 气井的天然气产能没有出现明显的下降。相反, 气井天然气产能与完井测试相比较还有一定的增加, 如平落 1、10、11、12 井, 分别增加 11.21%、51.34%、39.76% 和 7.64%。

## 结 论

(1) 平落坝须二气藏为统一的水动力系统, 裂缝

发育, 井间连通性好, 气井原始地层压力具有先期降压特征。

(2) 天然气气质好, 不含硫化氢, 天然气储量大为数百亿立方米, 储量丰度高为每平方公里数十亿立方米。

(3) 天然气产能高, 全气藏目前天然气每天无阻流量大于数百万立方米。

### 参 考 文 献

- 1 斯利德 H C 著, 徐怀大译, 罗英俊校. 实用油藏工程学方法. 北京: 石油工业出版社, 1982 年
- 2 达克 L P 著, 刘翔鄂等译, 谭国雄校. 油藏工程原理. 北京: 石油工业出版社, 1984 年
- 3 伊克库 C U 著, 冈秦麟, 袁庆峰等译, 秦同洛, 冈秦麟校. 天然气开采工程. 北京: 石油工业出版社, 1990 年
- 4 杨通佑, 陈元干等编著. 石油及天然气储量计算方法. 北京: 石油工业出版社, 1990 年
- 5 董宪章, 张朝琛, 张柏华合译. 油、气田开发与开采的研究方法. 北京: 石油化学工业出版社, 1975 年

(收稿日期 1999-11-05 编辑 韩晓渝)

\*郭平, 作者简介见本刊 1999 年第 5 期。地址: (637001) 四川省南充市。电话: (0817) 2603433 转 3014、2942。

度不同,油气相间界面张力降低程度也不同。对于适合于注 CO<sub>2</sub> 的最好流体应是在相同 CO<sub>2</sub> 注入比下,原油体积膨胀量大、粘度下降多、界面张力下降多的流体,因此存在优选的问题。当然在优选时要考虑的因素很多,就典型的室内评价实验就有注气膨胀高压物性(PVT)和气—液平衡实验(多次接触混相、升泡试验)、细管试验、岩心驱替试验三大类<sup>[1]</sup>。单井吞吐的主要机理是体积膨胀、粘度降低、溶解气驱、相间界面张力降低、相对渗透率的改善和井周围地层渗透率的改善。膨胀试验作为评价单井吞吐可行性的重要手段之一已得到应用。关于注入后流体的相态行为变化情况目前国内外虽有所研究,但还不够系统和全面,本文根据总公司推荐行业标准<sup>[2]</sup>在注气前进行了泡点、*pV* 关系和多级脱气试验测试分析;然后进行了注 CO<sub>2</sub> 膨胀试验测试研究,并得到了相应的研究结果;最后对实验结果进行了模拟,并计算出了注气后原油的密度、分子量、泡点处气液相偏差因子和界面张力、原油粘度等的变化规律,同时研究了注气后原油的 *pV* 关系和多级脱气的主要特征变化规律,使我们对注气膨胀试验原油物性变化规律及驱替机理有更全面的理解。

## 试验研究

### 1. 常规 PVT 分析

在进行相态模拟时,我们必须知道原油在未注气时的相态行为,因此在进行注气膨胀试验前进行了常规 PVT 分析测试。根据总公司的行业标准 SY/T 5542—92<sup>[2]</sup>进行地层原油的常规分析,在分析内容上主要进行了配样、井流物组成分析、*pV* 关系测试和多级脱气测试分析,取得了常规的主要 PVT 参数,为相态模拟打下基础。

在进行实验研究过程中使用的主要设备有 RUSKA PVT 仪、RUSKA 粘度仪、Anton Paar 密度仪、HP6890 和岛津 GC—14A 色谱仪、TG—328A 电子天平。

### 2. 注 CO<sub>2</sub> 膨胀试验

膨胀试验是将原始地层原油稳定在泡点压力下,在此压力下加入不同量的 CO<sub>2</sub>,并进泵提高 PVT 井筒压力,直到达到泡点压力,从而测定加入 CO<sub>2</sub> 使原油的泡点压力(*p—x* 相图)和体积膨胀系数的变化,当然也可以测试其它一些物性参数的变化。

膨胀试验使用的设备和常规 PVT 一样,除了要加入 CO<sub>2</sub> 这一点不同外,其余操作和测试均同常规 PVT 测试过程。

## 模拟和预测研究

### 1. 模拟预测的理论模型

#### (1) 相平衡的理论模型<sup>[3]</sup>

关于 PVT 的模拟计算已不是一个新的问题,本文进行拟合计算时使用的油气相平衡理论模型为:

$$f_{iV}(p, x_1, \dots, x_n) - f_{iL}(p, y_1, \dots, y_n) = 0$$

$$Z_i - x_i L - y_i V = 0$$

$$L + V - 1 = 0$$

$$k_i = y_i / x_i$$

#### (2) 膨胀试验各级油体系组成计算<sup>[2]</sup>

$$Z_{j,i} = \frac{Z_{j-1,i} + N_{CO_2j} Z_{CO_2,i}}{1 + N_{CO_2j}}$$

#### (3) 粘度计算<sup>[4]</sup>

原油粘度采用下式进行回归和计算:

$$\begin{aligned} & [(\mu - \mu_0) + 10^{-4}]^{0.25} \\ & = A_1 + A_2 \quad + A_3 \quad ^2 + A_4 \quad ^3 + A_5 \quad ^4 \\ & = 4.60105 T_c^{1/6} M_w p_c^{2/3} \\ & = m V_c \end{aligned}$$

$$V_c^e = [x_i V_{ci}^e]$$

式中: $f_{iL}$ 、 $f_{iV}$ 为组分 *i* 在平衡液相和气相中的逸度; $p$  为系统压力,MPa; $Z_i$ 、 $x_i$ 、 $y_i$  为分别代表组分 *i* 在系统中、平衡液相中、平衡气相中的摩尔分数; $L$ 、 $V$  为分别表示系统中液相和气相占的摩尔分数; $k_i$  为第 *i* 组分的平衡常数; $\mu$ 、 $\mu_0$  为原油在高压下和在低压下的粘度,mPa·s; $A_1 \dots A_5$ 、 $e$  为粘度计算回归系数; $V_c$ 、 $V_{ci}$  为混合物和组分 *i* 的临界体积; $M_w$  为原油摩尔质量,g/mol; $T_c$  为临界温度,K; $p_c$  为临界压力,MPa; $V_c$  为临界体积,L/mol; $Z_{j,i}$ 、 $Z_{CO_2,i}$  为原油第 *j* 级注气第 *i* 组分摩尔组成和注入气中 CO<sub>2</sub> 的摩尔组成; $N_{CO_2j}$  为原油第 *j* 级注入气量与第 *j—1* 级注气原油摩尔数之比。

#### (4) *pV* 关系计算

$$V_r = V / V_b$$

式中: $V_r$  为各级压力下相对体积; $V$  为地层条件下油气两相总体积,L; $V_b$  为泡点压力下的原油体积,L。

#### (5) 多级脱气计算

体积系数( $B_0$ ):

$$B_0 = V_0 / V_s$$

式中: $V_0$  为地层条件下油体积,L; $V_s$  为脱气原油在标准条件下的油体积,L。

气油比 ( $GOR, m^3/m^3$ ):

$$GOR = V_{gas}/V_s$$

式中:  $V_{gas}$  为该压力以下各级累积放出气量的总和, L。

分子量 ( $M_w, g/mol$ ):

$$M_w = \sum x_i M_i$$

式中:  $M_i$  为  $i$  组分的分子量,  $g/mol$ 。

界面张力<sup>[5]</sup> ( $\sigma, mN/m$ ):

$$\sigma = \left\{ \sum [V_i] (x_i L - y_i V) \right\}^4$$

式中:  $[V_i]$  为组分  $i$  的等张比容;  $L$ 、 $V$  分别为液相和气相密度,  $mol/cm^3$ 。

(6) 膨胀试验

体积膨胀系数 ( $B_{sj}$ ):

$$B_{sj} = V_{bj}/V_b$$

式中:  $V_{bj}$  为第  $j$  级注气后在泡点下的体积, L;  $V_b$  为未注气前原油在泡点压力下的体积, L。

膨胀试验粘度、密度、界面张力计算方法同前, 只体系不同而已。

### 2. 模拟计算及预测

本文选用我国中原油田文 65—84 井的实际资料进行分析和计算, 实测井流物组成见表 1, 此井地层温度为 89.0 °C, 地层压力为 21.48 MPa, 原始泡点压力为 11.45 MPa, 使用 PR 状态方程对实验数据进行模拟, 其拟合结果对比参见图 1—a、b、c。从这些图中可看出, 总体来说其拟合的效果较好, 最好的是  $pV$  关系曲线和膨胀试验的模拟, 以及多级脱气过程中的体积系数。

在注入气含量达到 65% 时, 其  $pV$  关系相对体积在 3 MPa 时由原来的 2.253 3 变到 7.175 0, 说明注入气后使原油的体积膨胀率增加了 2.18 倍。在膨胀试验中, 使泡点压力升高了 1.544 倍, 体积膨胀了 1.55 倍。

进行拟合后, 又进行了其它参数的预测, 从中可

以看出: 随着  $CO_2$  注入比例的提高, 原油分子量变小, 当  $CO_2$  含量达到 65% 时, 分子量变化由 129.33  $g/mol$  变到 73.78  $g/mol$ ; 偏差因子变化不大, 但密度有所增加, 主要原因是泡点压力提高较多; 偏差因子及密度的关系如下:

$$\rho = \frac{M_w}{V} = \frac{p}{ZRT}$$

式中:  $\rho$  为油相密度,  $g/cm^3$ ;  $Z$  为油相偏差因子;  $R$  为气体常数, 取 8.31 MPa·L/(kmol·K);  $T$  为体系温度, K;  $V$  为体系体积, L。

同时随着注入  $CO_2$  的增加, 原油粘度降低, 这正是  $CO_2$  驱油机理之一。当  $CO_2$  在油中含量达到 65% 时, 粘度由原来的 1.693 1 mPa·s 降到 0.820 2 mPa·s, 几乎是降了 50%, 这说明了  $CO_2$  降粘效果是明显的, 界面张力下降也很明显, 由原来的 8.248 6 mN/m 降到 0.000 7 mN/m, 这也是驱油的主要机理之一, 是初始界面张力的  $8.486 \times 10^{-5}$  倍; 体积膨胀了 1.55 倍, 对驱油是很有利的。

PVT 数据在油气田开发中已得到广泛的应用, 描述流体的特性常常用高压物性参数来衡量, 为了能研究注入气体对流体 PVT 特性的影响, 我们在不同注入比例下进行了  $pV$  关系模拟和多级脱气模拟, 从而给出了其曲线的变化规律, 它一方面为油田开发应用提供参考, 同时对研究注入气后流体的 PVT 实验测试有指导意义。

表 1 中原油田文 65—84 井流物组成

组分名称	组分含量	组分名称	组分含量
$CO_2$	1.01	iC <sub>5</sub>	1.57
$N_2$	0.48	nC <sub>5</sub>	1.63
C <sub>1</sub>	29.20	C <sub>6</sub>	4.37
C <sub>2</sub>	2.51	C <sub>7</sub> <sup>+</sup>	54.76
C <sub>3</sub>	2.07	$M_{C_7}^+$	209.9
iC <sub>4</sub>	0.74	C <sub>7</sub> <sup>+</sup>	0.850 5
nC <sub>4</sub>	1.66		

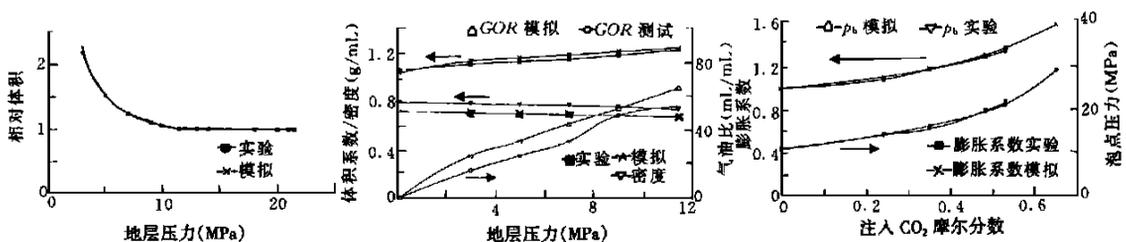


图 1 实验和模拟结果对比图

模拟有在不同注入比条件下的  $pV$  关系曲线和原油粘度变化如图 2-a,随着注入量增加,  $pV$  关系曲线在向上升,因为注入后使油变轻,弹性增大了,这正是注气弹性气驱机理之一;此过程中粘度随着

注入量增加曲线向下方移动,在高于泡点压力下粘度差别较大,而在低压下粘度趋于一致,这是在低压下油中的溶解气放出而使原油的性质趋于一致的原因,同时这正说明要发挥注气的效果应在较高地层

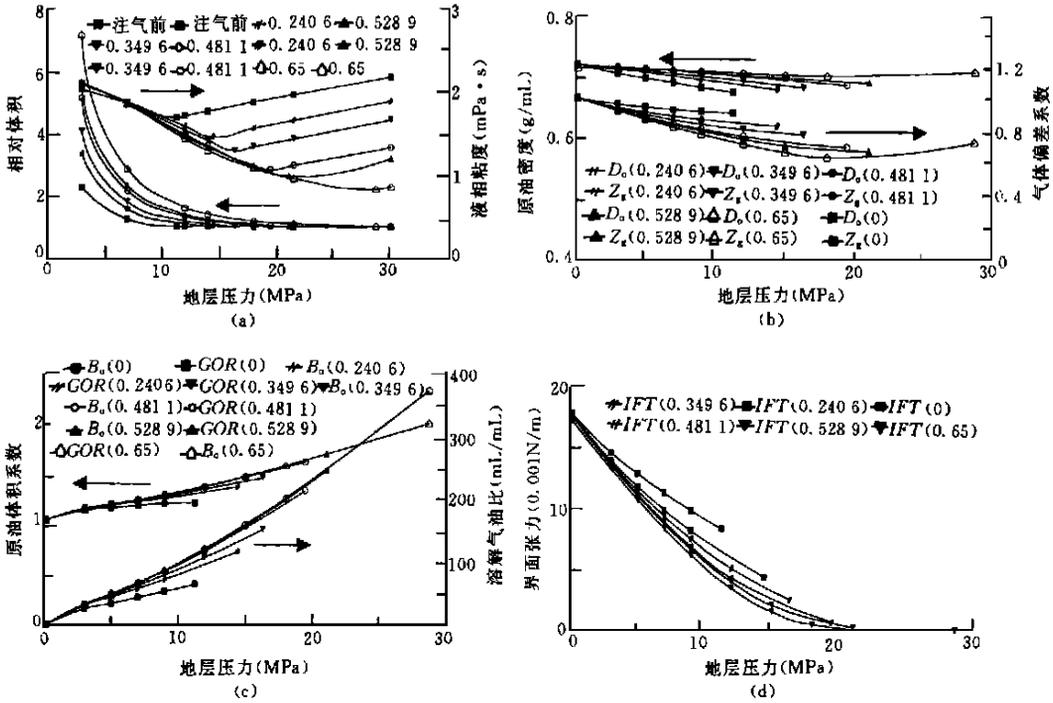


图 2 实验和模拟结果对比图

压力下进行驱替试验。

多级脱气是原油的一个重要 PVT 分析过程,图 2-b、c、d 分别给出了在不同注入气含量下多级脱气原油密度、气体偏差因子、原油体积系数、溶解气油比、界面张力的变化规律。无论多大的注入比例,在低压下均集中于一点,这说明油气性质在低压下差异变小,这和  $pV$  关系中的低压力下液相粘度变化一样,这都说明较高压力有利于驱油和发挥  $CO_2$  的驱油作用;从密度来看,注入量增加使曲线密度变平,即在高压下密度增加,这主要是由于压力加大的原因;从气体偏差系数来说,随注入气体量的增加,曲线整体向下移,在低压区相同压力下,气体的密度越来越重,这是因为由于  $CO_2$  的注入量越大,从原油中抽提中间组分更多,使与泡点平衡的气相变重了,压缩系数就变小了;从体积系数和气油比来看,由于注入气的增加,使油中溶解气量增多,体积系数变大,曲线向上方走,而曲线的分布和形态越来越象挥发油的特征,从气油比看,最高的溶解气油比已达到

$373.78 \text{ m}^3/\text{m}^3$  (65%  $CO_2$ ),当然这和其它参数的变化是相匹配;界面张力的变化趋势是曲线向下走,在同一压力下注入量越多,变化的幅度变小,在同一注入比下压力越高,则界面张力越小,这同样有利于驱油。

参 考 文 献

- 1 高振环,刘中春,杜兴家. 油田注气开采技术. 北京:石油工业出版社,1994
- 2 SY/T 5542-92. 地层原油物性分析方法无汞仪器分析法. 北京:石油工业出版社,1993
- 3 郭天民. 多元气-液平衡与精馏. 北京:化学工业出版社,1983
- 4 Computer Modeling Group. CMGPROP 95.00 User's Guide,1994;8
- 5 郭平,孙良田,孙雷. 多孔介质毛细管压力对凝析油气相态影响研究. 石油勘探与开发,1994;21(4)

(收稿日期 1999 - 11 - 05 编辑 韩晓渝)

.....

**THEORETICAL SIMULATION AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE INFLUENCE OF CO<sub>2</sub> INJECTION ON PVT OF CRUDE OIL**

Guo Ping, Sun Liangtian, Li Shilun, Xiong Yu and Sun Lei (Southwest Petroleum Institute), Peng Pengshang and Yue Lu (Zhongyuan Petroleum Exploration and Development Research Institute). *NATURAL GAS IND.* v. 20 no. 2, pp. 76 ~ 79, 3/25/2000. (ISSN 1000-0976; **In Chinese**)

**ABSTRACT:** As one of the important measures for evaluating the steam huff and puff test of an individual well, the expansion test has been applied in carbon dioxide miscible flood test in oil fields. Although some studies about the changing law of the physical parameters of crude oil after carbon dioxide being injected have been made, yet the law is not very clear at present. In this paper, through matching the P - X diagram, expansion coefficients and original phase state parameters in the expansion test of CO<sub>2</sub> injection, the changing laws of the density, molecular weight and viscosity of the crude oil as well as the deviation factor and interfacial tension of the gas-liquid phase at the bubble point after carbon dioxide being injected are calculated and the PV relation and the changing law of main characteristics in the multistage degassing are studied.

**SUBJECT HEADINGS:** Carbon dioxide, Expansion, Phase state, Drive (reservoir), Degassing, PVT

**Guo Ping's introduction:** See v. 19, no. 5, 1999. Add: Nanchong, Sichuan (637001), China Tel: (0817) 2603433—3014 or 2942

.....

**ANALYSIS OF THE VIBRATION IN GAS PIPELINE SYSTEM**

Li Changjun and Wang Yuchun (Southwest Petroleum Institute) and Wang Yuanchun (Huabei Petroleum Survey and Design Institute)). *NATURAL GAS IND.* v. 20, no. 2, pp. 80 ~ 83, 3/25/2000. (ISSN 1000-0976; **In Chinese**)

**ABSTRACT:** In gas transmission line, vibration will occur due to the interaction of gas medium and pipeline system. Because the vibration of pipeline has a great threat against production and safety, the analysis of this phenomenon is favourable for

the rational design and management of pipeline system and for taking reliable vibration-proof measures. The main causes of the vibration in pipeline system are in two respects: The first is the vibrant force of the medium acted on pipeline system, i. e. exciting signal, such as the vibrant force caused by the gas flow at the compressor's inlet and outlet and at the ramified and node points as well as the action of pig passing through pipeline bridge, etc.; The second is the response to the exciting signal, which is relating to the characteristics of the pipeline system, i. e. the rigidity, support, quality and equipments of the system besides the waveform of the exciting signal. For analyzing the vibration in gas transmission line system, the change of flow parameters is analyzed first according to the unsteady state flow of the gas in pipeline system and then the acting force of the gas flow on pipeline system is determined, and based on this and in the light of the borne pressure in pipeline system, the vibration is analyzed by using intensive quality method and finally the calculation example is given out. The practice in applying this method shows that the method proposed in this paper can be used for analyzing the vibration in gas transmission station and pipeline.

**SUBJECT HEADINGS:** Natural gas, Gathering line, Vibration, Unsteady state flow, Equation, Calculation, Analysis

**Li Changjun's introduction:** See v. 14, no. 6, 1994. Add: Teaching and Research Section of Oil and Gas Storage and Transport, Southwest Petroleum Institute, Nanchong, Sichuan (637001), China Tel: (0817) 2603435—3460

.....

**A COMPARISON AMONG THE PLANS OF PIPELINE CROSSING OVER LARGE-MEDIUM RIVER**

Chen Zhongke (Gas Transmission Company, Sichuan Petroleum Administration). *NATURAL GAS IND.* v. 20, no. 2, pp. 83 ~ 86, 3/25/2000. (ISSN 1000-0976; **In Chinese**)

**ABSTRACT:** Gas and oil transmission pipeline is the main artery of energy source of national economy and it is very important to ensure a smooth and steady transmission and feeder. The safety of pipeline crossing over large-medium rivers is the key to the safe running of the pipe network, therefore, to adopt the safe, advanced, easy-to-operate and manage and low-cost design plan for the construction of pipeline crossing over river is directly relating to the technical and economic benefits of pipeline construction department and pipeline management department,