

# 蒸发气驱与凝析气驱过程组分变化计算模拟及分析

徐 芊

(匹兹堡大学 斯旺森工程学院, 宾夕法尼亚州 匹兹堡 15213)

**摘要:**为了优化注气驱方案设计,运用混相驱技术提高采收率,基于立方型状态方程和闪蒸计算理论,建立了蒸发气驱和凝析气驱烃类体系相态闪蒸计算模型。运用给定的温度与压力条件、原油组分和注入气组分,模拟多级接触混合过程中油气组分的变化,分析注气混相驱的动态变化,进而定量描述气液两相平衡的动态过程。通过绘制拟三元相图直观展示模拟注气过程中油气组分的变化,以判别注入气能否与地层原油实现混相或达到近混相状态。模拟结果表明:向原油中注入较轻质的气体,蒸发气驱机理主导气驱过程,但由于油气组分不匹配无法最终实现混相;向原油中注入重质组分较多的气体,混相机理复杂,应当是凝析和蒸发双重机理共同作用形成的近混相。建立的模型和编制的模块可以方便地应用于任意油气混相的实例计算,为实际开采提供重要参考。

**关键词:**混相驱 凝析气驱 蒸发气驱 相平衡 闪蒸计算 多级接触模拟

中图分类号:TE357.42

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2017)04-0099-06

## Modeling and analysis of the change of the equilibrium compositions in vaporizing- and condensing-gas drive processes

Xu Qian

(Swanson School of Engineering, University of Pittsburgh, Pennsylvania Pittsburgh 15213)

**Abstract:** In order to optimize the design of gas injection process and improve the oil recovery, a hydrocarbon phase behavior model was developed for flash calculation and phase stability analysis according to the theory of equation of state and miscible oil displacement. Under the setting experimental temperature and pressure, the composition change of injected gas and reservoir oil in the multiple-contact mixing process was simulated using designed composition of oil and gas. The behavior of the phase composition change during this process was discussed by use of pseudo-ternary phase diagram to determine if miscible displacement could be achieved. The simulation results showed that vaporizing-gas drive mechanism dominates if lean-gas is used as injected gas, and the vaporizing-gas drive is unable to achieve miscible displacement for the oil sample; if rich-gas is used as injected gas, the miscible process is not dominated by a single driving mechanism (vaporizing or condensing). The simulated results indicated a combined vaporizing/condensing mechanism to explain the phase behavior of two immiscible reservoir fluids in the transition zone. The developed model and modules are able to be applied in any oil and gas system at miscible conditions, and the calculation results cast light on production.

**Key words:** miscible displacement; condensing-gas drive; vaporizing-gas drive; phase equilibrium; flash calculation; multiple-contact mixing modeling

近年来,混相驱技术得到了广泛的研究与应用<sup>[1-10]</sup>,特别是近混相驱机理、固溶物沉积、WAG技术、油藏数值模拟技术和注入混合气体提高采收率等研究取得了长足的发展<sup>[3]</sup>。然而,如何利用该技术有效地提高采收率,还须在认清混相驱机理的前

提下,进一步通过定量模拟分析混相过程来实现。为此,笔者基于立方型状态方程和闪蒸计算理论,建立烃类体系相态闪蒸计算模型,在不同油气组成中,运用该模型进行组分计算,定量模拟蒸发气驱和凝析气驱2种过程;并以拟三元相图的形式显示

收稿日期:2017-03-23。

作者简介:徐芊(1994—),女,江苏扬州人,在读硕士研究生,从事提高采收率技术方面的研究。联系电话:(001)4122772207, E-mail: Rachel\_qianxu@yahoo.com。

模拟的结果,通过定量模拟和直观分析,更好地揭示注气混相驱的动态变化,以期与实际开采提供重要参考。

## 1 模型建立原理

基于立方型状态方程和闪蒸计算理论,建立烃类体系相态闪蒸计算模型。由此求出油相和气相的压缩因子、逸度及其组分变化,在给定的压力和温度条件下,分析相态的稳定性。

### 1.1 状态方程

1873年, Van 提出了用于真实气体的状态方程<sup>[11]</sup>,但是计算结果与实际偏差较大,因此,后人不断提出改进方程。笔者主要采用SRK和PR状态方程进行计算。

#### 1.1.1 SRK 状态方程

Soave 将 RK 状态方程中的分子引力修正项看成是关于  $T$  的函数,而不是仅仅依据物质特性的常数,同时还引入了偏心因子,将 RK 状态方程改进为<sup>[12]</sup>

$$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T)}{V(V+b)} \quad (1)$$

其中

$$a(T) = \left[ 1 - (0.48 + 1.574\omega - 0.176\omega^2)(1 - T_r^{0.5}) \right]^2 \quad (2)$$

$$b = 0.08664 \frac{RT_c}{P_c} \quad (3)$$

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad (4)$$

与 RK 状态方程相比,SRK 状态方程可以计算饱和和液体密度,因此可以用于混合物的气液平衡计算,但是对于液相体积的计算仍存在有误差。

#### 1.1.2 PR 状态方程

由于 SRK 状态方程无法准确计算液相体积,因此 Peng 等对 SRK 方程进行了修正,共同提出了 PR 状态方程<sup>[13]</sup>,其表达式为

$$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T)}{V(V+b) + b(V-b)} \quad (5)$$

其中

$$a(T) =$$

$$\left[ 1 + (0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2)(1 - T_r^{0.5}) \right]^2 \quad (6)$$

$$b = 0.07780 \frac{RT_c}{P_c} \quad (7)$$

PR 状态方程是关于 2 个常数的立方型状态方程,适用于极性物质和气液两相体系,使饱和蒸汽

压和气液两相密度的计算准确性大幅度提高。

### 1.2 相平衡闪蒸模型

在给定的温度和压力条件下,一个混合体系能否达到混相,或者分离成为两相,是相行为模型建立需要考虑的重要问题。如果这个体系以两相存在,应当求出该平衡状态下气液两相的量。平衡常数是预测两相是否存在的关键参数,其为组分  $i$  在气相中的物质的量分数与在液相中的物质的量分数的比值,其表达式为

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} \quad (8)$$

根据两相体系在平衡时的摩尔物质平衡和平衡常数的定义,Rachford 等建立了 Rachford-Rice 目标函数<sup>[14]</sup>,其表达式为

$$g(f_{ng}) = \sum_{i=1}^n \frac{c_i(K_i - 1)}{1 + f_{ng}(K_i - 1)} = 0 \quad (9)$$

式(9)为非线性方程,因此需要编制程序使用牛顿迭代法进行求解。其中  $K$  值是已知量,选用 PR 状态方程求出唯一的未知量  $f_{ng}$ 。预估  $K$  值是 Rachford-Rice 目标函数的初始步骤,在本次模拟分析中,笔者利用 Wilson 经验公式,在求解出气液两相的量之后,代入逸度及逸度系数的模型,利用求解的气液两相的逸度更新  $K$  值,当体系中各个组分的逸度趋于一致时,结束循环更新。

### 1.3 注气驱模型的建立

根据注气驱油机理和烃类体系相态闪蒸计算模型的建立步骤,分别针对蒸发气驱和凝析气驱建立注气驱动态模拟模型。

#### 1.3.1 蒸发气驱

在蒸发气驱过程中,向油藏中注入相对较轻质的气体组分(简称贫气),使得注入气对原油中的轻质及中等质量组分逐步抽提,注入气与原油接触后向前推移,通过多级接触进而实现混相或近混相。假设油藏压力为 20.68 MPa,油藏温度为 100 °C,注入气的物质的量为 1 mol,原油的物质的量为 0.4 mol,且注入气与原油的物质的量比始终为 1:0.4,组分  $i$  的物质的量分数计算公式为

$$c_i = \frac{n_i^g + n_i^o}{\sum_{i=1}^n n_i^g + \sum_{i=1}^n n_i^o} = \frac{y_i n_V^T + 0.4x_i n_V^T}{n_V^T + 0.4n_V^T} = \frac{y_i + 0.4x_i}{1.4} \quad (10)$$

其中

$$x_i = \frac{n_i^o}{\sum_{i=1}^n n_i^o} \quad (11)$$

$$y_i = \frac{n_i^g}{\sum_{i=1}^n n_i^g} \quad (12)$$

蒸发气驱动态模拟模型建立步骤为:①将  $c_i$  值和  $K$  值代入相平衡闪蒸模型中,求解得到  $x_i$  和  $y_i$ , 根据  $c_i$  值来更新计算  $K$  值;②每一次注入气与原油接触之后,  $y_i$  发生变化,富化后的气相与新鲜原油多级接触,不断得到新的  $y_i$  值;③将  $y_i$  中的  $N_2, C_1—C_2$  视作拟组分  $Y_1, C_3—C_6$  视作拟组分  $Y_2, C_7+$  视作拟组分  $Y_3$ , 按照同样的标准将液相组分  $x_i$  划分为拟组分  $X_1, X_2$  和  $X_3, c_i$  划分为拟组分  $C_1, C_2$  和  $C_3$ , 则可以在拟三元相图上将每一次接触以坐标形式展现,循环计算直至  $Y_2$  值不再有明显变化。

### 1.3.2 凝析气驱

与蒸发气驱动态模拟模型建立方法类似,向原油中注入重质组分较多的气体(简称富气),富气中的中间组分进入平衡油相,通过多级接触,原油富化,从而实现混相。模拟假设条件和  $c_i$  的计算公式均与蒸发气驱模型相同。

凝析气驱动态模拟模型的建立步骤与蒸发气驱模型类似,不同之处是油气接触后,气相组成  $y_i$  不变,油相组成  $x_i$  发生变化,不断得到新的  $x_i$  值,循环计算直至  $X_2$  值不再有明显变化。

## 2 计算实例

### 2.1 实验用原油和注入气体组成

蒸发气驱实验注入气为气体1,实验用油为原油1,凝析气驱实验注入气为气体2和3,实验用油为原油2和3,实验所用油气组成来源于文献[15-16],具体数据如表1和表2所示。

表1 注入气体各组分的物质的量分数  
Table1 Molar concentration of compositions of injected gas

气体编号	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$nC_4$	$nC_5$
1	90.66	4.92	2.46	0.98	0.98
2	66.40	3.60	16.70	6.65	6.65
3	75.88	4.12	11.14	4.43	4.43

表2 原油各组分的物质的量分数  
Table2 Molar concentration of compositions of reservoir oil

原油编号	$N_2$	$CO_2$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$iC_4$	$nC_4$	$iC_5$	$nC_5$	$C_6$	$C_7(1)$	$C_7(2)$	$C_7(3)$	$C_7(4)$	$C_7(5)$
1	0.70	0.60	33.40	5.00	5.50	2.10	3.90	2.00	2.80	4.40	9.60	9.90	8.70	6.80	4.60
2	0.70	0.60	33.40	5.00	2.84	1.09	2.02	1.03	1.45	2.27	12.02	12.40	10.90	8.52	5.76
3	0.79	0.68	37.86	5.67	0.53	0.20	0.38	0.19	0.27	0.43	12.85	13.25	11.64	9.10	6.16

### 2.2 蒸发气驱注气过程

将气体1注入原油1中,油与气多级接触共41次,应用蒸发气驱动态模拟模型,求出每次接触最终平衡时气相和液相的物质的量分数。选取第1次和最后1次接触,以及中间较明显的几次接触过程绘制拟三元相图。

由第1次接触的拟三元相图(图1a)可见,处于A点的原油与B点的注入气进行第1次接触后,形成的混合物总组成位于C点,但由于C点处于气液两相区,此时混合物会分离成气液两相;平衡时气、液相组成在拟三元相图上分别位于D点和E点。

继续注入气体,推动初次接触后位于D点的平衡气相进一步接触新鲜原油,随着注入气的不断推移,将会发生多级接触,由每隔8次左右绘制一次的前40次接触过程的拟三元相图(图1b)可以看出,在多级接触过程中,原油1的组成沿着泡点线不断改变。

分析最后1次接触的拟三元相图(图1c)可知,

此时位于B点的注入气与位于D点的平衡气相极其接近,AB的连线和DE的连线重合,说明此时原油组成已经不再发生明显的变化。由于气体与原油的组分不相匹配,即注入气的组分较轻,在蒸发气驱主导的情况下,无法形成混相,并且前几次接触之后,原油组成已不再发生明显变化。

### 2.3 凝析气驱注气过程

设计4组注气驱方案模拟注气驱过程,方案1—4分别为:气体2注入到原油2、气体3注入到原油2、气体2注入到原油3和气体3注入到原油3。对方案1进行详细分析,其他3组方案分析中间接触过程的拟三元相图。

将气体2注入到原油2中,油气多级接触一共58次,求出每次接触最终平衡时气相和液相的组分,绘制第1次和最后1次接触,以及中间较明显的几次接触过程的拟三元相图(图2)。

第1次接触的拟三元相图(图2a)表明,处于A点的原油与B点的注入气进行第1次接触后,形成

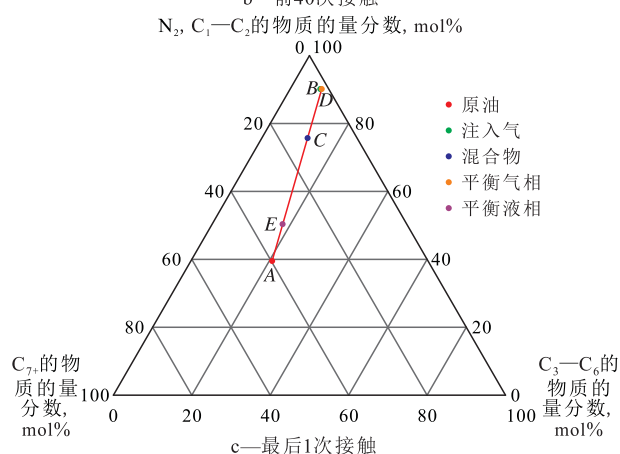
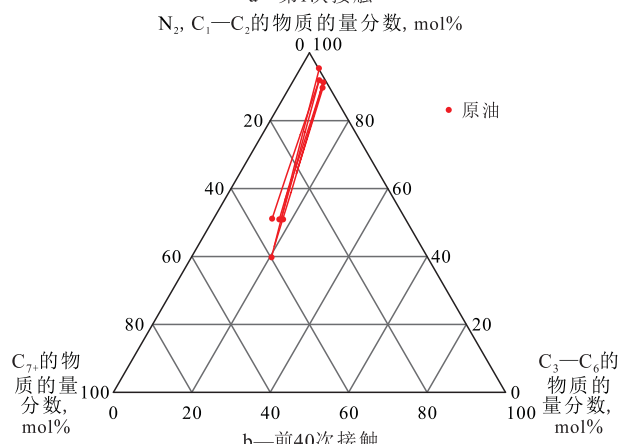
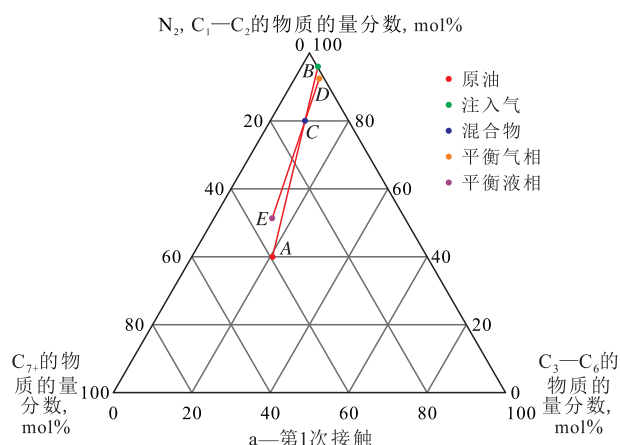


图1 蒸发气驱拟三元相图

Fig.1 Pseudoternary diagram of vaporizing-gas drive

的混合物总组成位于C点,C点处于气液两相区,分离之后形成的平衡气相和液相的组成分别位于D点和E点。

继续注入气体,推动初次接触后的位于E点的平衡液相与新鲜注入气体再次接触,随着注入气的不断推移,将会发生多级接触,由特征较明显的前3次接触和在此之后每隔8次左右接触绘制一次的拟三元相图(图2b)可以看出,多级接触过程中原油2的组成沿着泡点线不断变化。

凝析气驱最后1次接触的拟三元相图(图2c)表明,位于A点的原油和平衡液相E点已经几乎重合,

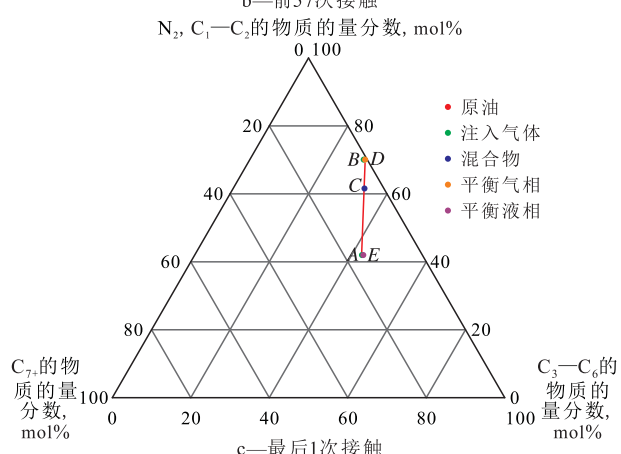
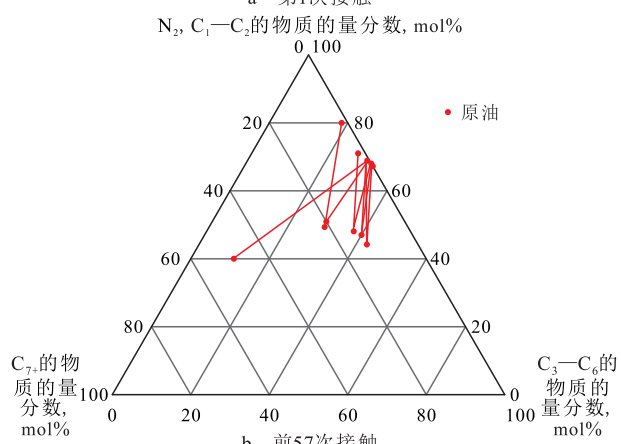
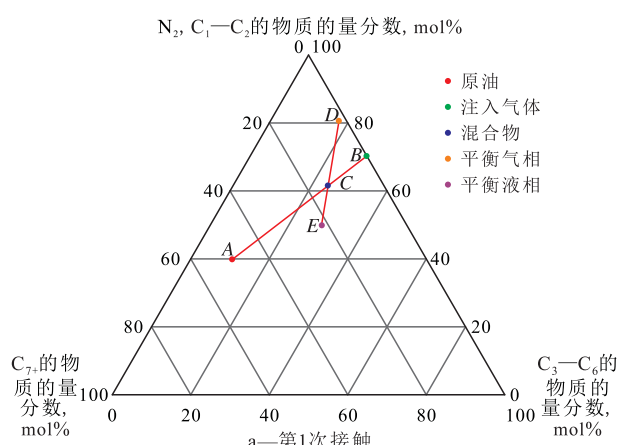


图2 方案1凝析气驱拟三元相图

Fig.2 Pseudoternary diagram of condensing-gas drive in plan 1

位于B点的注入气和平衡气相D点也几乎重合,AB的连线和DE的连线基本重合,说明此时原油组成已经不再发生明显的变化,在此方案下无法达到混相。

方案2—4多级接触过程的拟三元相图(图3)呈现与方案1类似的特征:原油与气体在几次接触后,平衡后的液相不断与新鲜的注入气接触,原油组分沿着泡点线移动,气、液组分逐渐接近一个极限值,之后又互相远离,无法形成混相。这个现象在文献[5]中有所提及,Zick通过实验数据模拟和状态方程预测得出的结论为:很多富气驱并非仅依靠单纯的



凝析机理实现混相,而是通过凝析与蒸发双重机理的共同作用,实现近混相,而非真正的混相<sup>[4]</sup>。因此,笔者推测方案1—4这4组注气驱的接触结果,是由于凝析与蒸发共同作用而导致的近混相。

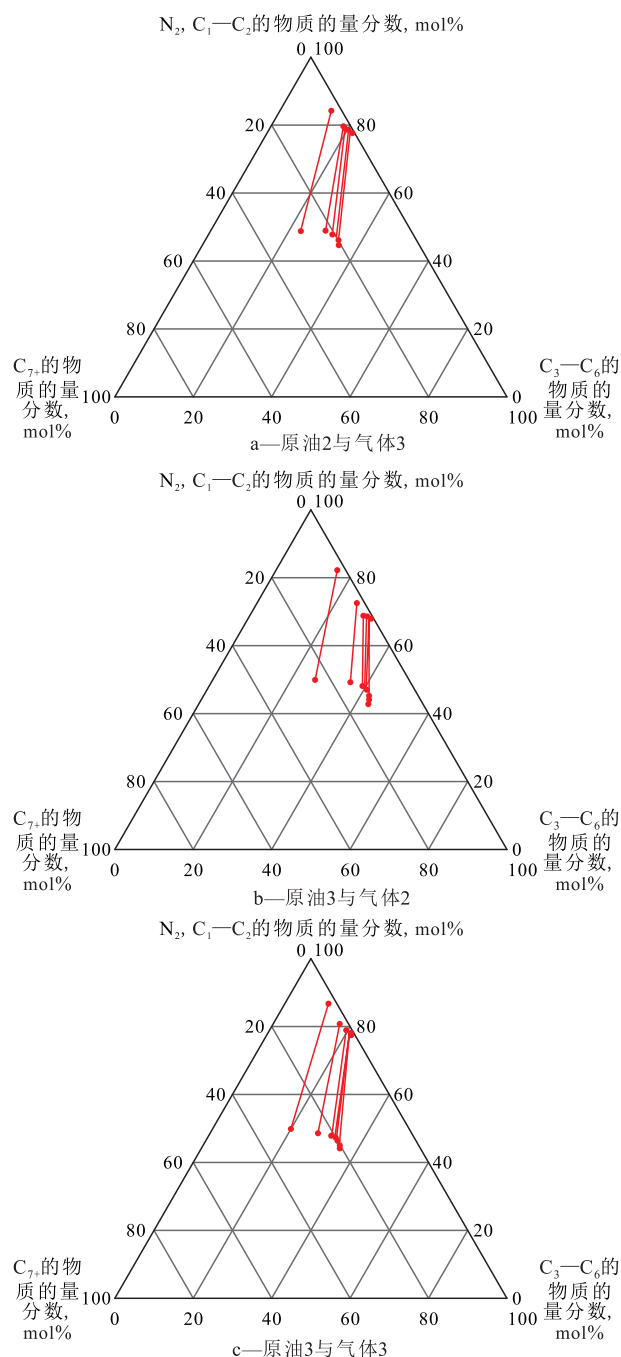


图3 方案2—4凝析气驱多级接触过程拟三元相图

Fig.3 Pseudoternary diagram of multiple-contact of condensate-gas drive in plans 2 to 4

### 3 结论

基于立方型状态方程和闪蒸计算理论,建立烃类体系相态闪蒸计算模型。利用编写的程序模块,可以求出油相和气相的压缩因子、逸度及其组分变

化。在给定的压力和温度下,能够分析相态的稳定性。

基于蒸发气驱与凝析气驱驱油机理,对两过程中气、液组分的变化进行定量模拟。实现了对多级接触混相驱替过程中,气液两相平衡动态组分变化的准确计算,并以拟三元相图的形式,分析总结计算结果。计算实例表明:向原油注入贫气,蒸发气驱机理主导气驱过程,但由于该油与气组分不匹配,最终无法实现混相;向原油注入富气,理论上凝析气驱机理主导气驱过程,但模拟结果与Zick近混相模型计算结果相似,说明这个过程混相机理较复杂,并不是单一的蒸发或凝析气驱机理主导,往往由多种机理共同作用。

#### 符号解释:

$p$  —— 压力, MPa;  $R$  —— 普适常数, J/(mol·K);  $T$  —— 温度, °C;  $V$  —— 体积, cm<sup>3</sup>;  $b$  —— 体积效应的修正项;  $a$  —— 分子引力修正项;  $\omega$  —— 偏心因子;  $T_r$  —— 对比温度;  $T_c$  —— 临界温度, °C;  $p_c$  —— 临界压力, MPa;  $K_i$  —— 平衡常数;  $i$  —— 组分;  $y_i$  —— 组分  $i$  在气相中的物质的量分数;  $x_i$  —— 组分  $i$  在液相中的物质的量分数;  $g(f_{ng})$  —— Rachford-Rice 目标函数;  $n$  —— 组分个数;  $c_i$  —— 组分  $i$  的物质的量分数;  $f_{ng}$  —— 混合物中气相的物质的量分数;  $n_i^g$  —— 组分  $i$  在气相中的物质的量, mol;  $n_i^l$  —— 组分  $i$  在液相中的物质的量, mol;  $n_v^r$  —— 气相的总物质的量, mol。

致谢:在论文的编写过程中,得到中国石油大学(北京)赵海宁副教授的指导与帮助,特此致谢。

#### 参考文献:

[1] 王生奎. 扎而则油田富气混相驱机理研究及应用效果评价[D]. 成都:西南石油大学, 2011.  
Wang Shengkui. The mechanism study and field application effect evaluation of the enrich-gas miscible flooding in Zarzaitine oil-field[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2011.

[2] 李绍杰. 低渗透滩坝砂油藏CO<sub>2</sub>近混相驱生产特征及气窜规律[J]. 大庆石油地质与开发, 2016, 35(2): 110-115.  
Li Shaojie. Performances and gas breakthrough law for CO<sub>2</sub> near-miscible flooding in the low-permeability bar and shoal oil reservoirs [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(2): 110-115.

[3] 程杰成, 刘春林, 汪艳勇, 等. 特低渗透油藏二氧化碳近混相驱试验研究[J]. 特种油气藏, 2016, 23(6): 64-67.  
Cheng Jiecheng, Liu Chunlin, Wang Yanyong, et al. Near-miscible CO<sub>2</sub> flooding test in ultra-low permeability oil reservoir [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016, 23(6): 64-67.

[4] 谭光天. 注烃混相驱提高石油采收率机理及其在葡北油田应用研究[D]. 成都:西南石油大学, 2005.

- Tan Guangtian. Mechanism of enhanced oil recovery by hydrocarbon miscible flooding and its application in Pubei oilfield [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2005.
- [5] Zick A A. A combined condensing/vaporizing mechanism in the displacement of oil by enriched gases [R]. New Orleans: the 61st Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, 1986.
- [6] Stalkup F I. Displacement behavior of the condensing/vaporizing gas drive process [R]. Dallas: the 62nd Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, 1987.
- [7] 郝宏达, 侯吉瑞, 赵凤兰, 等. 低渗透非均质油藏二氧化碳非混相驱窜逸控制实验[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(3): 95-100.
- Hao Hongda, Hou Jirui, Zhao Fenglan, et al. Experiments of gas channeling control during CO<sub>2</sub> immiscible flooding in low permeability reservoirs with heterogeneity [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(3): 95-100.
- [8] 郭平, 苑志旺, 廖广志. 注气驱油技术发展现状与启示[J]. 天然气工业, 2009, 29(8): 92-96.
- Guo Ping, Yuan Zhiwang, Liao Guangzhi. Status and enlightenment of international gas injection EOR technology [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(8): 92-96.
- [9] 张广权, 孙兵, 杨小松, 等. 龙凤山凝析气藏开发技术政策研究[J]. 特种油气藏, 2016, 23(6): 72-76.
- Zhang Guangquan, Sun Bing, Yang Xiaosong, et al. Development strategy of Longfengshan condensate gas reservoir [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016, 23(6): 72-76.
- [10] 张安刚, 范子菲, 宋珩, 等. 计算凝析气顶油藏油气界面移动距离的新方法[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(1): 102-105.
- Zhang Angang, Fan Zifei, Song Heng, et al. A new computing method of moving range of the oil-gas contact in oil reservoir with condensate gas cap [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1): 102-105.
- [11] Van der Waals J D. On the continuity of the gas and liquid state [D]. Netherlands: Leiden University, 1873.
- [12] Soave G. Equilibrium constants from a modified Redlich-Kwong equation of state [J]. Chemical Engineering Science, 1972, 27(6): 1 197-1 203.
- [13] Peng D Y, Robinson D B. A new two-constant equation of state [J]. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 1976, 15(1): 59-64.
- [14] Rachford H H, Rice J D. Procedure for use of electrical digital computers in calculating flash vaporization hydrocarbon equilibrium [J]. Petroleum Transactions, AIME, 1952, 195(1): 327-328.
- [15] Hearn C L, Whitson C H. Evaluating miscible and immiscible gas injection in the Safah field [R]. San Antonio: SPE Reservoir Simulation Symposium, 1995.
- [16] Li Y. Fast and robust phase behavior modeling for compositional reservoir simulation [D]. Austin: the University of Texas at Austin, 2007.

编辑 常迎梅

(上接第77页)

- [14] 李秀兰. 优势渗流通道中的高速非达西渗流动态特征分析[J]. 石油地质与工程, 2009, 23(6): 93-96.
- Li Xiulan. Dynamic characteristics analysis of non-Darcy flow with high velocity in preferred flowing path [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2009, 23(6): 93-96.
- [15] 王鸣川, 石成方, 朱维耀, 等. 优势渗流通道识别与精确描述[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(1): 79-84.
- Wang Mingchuan, Shi Chengfang, Zhu Weiyao, et al. Identification and accurate description of preponderance flow path [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(1): 79-84.
- [16] 姜汉桥, 姚军, 姜瑞忠. 油藏工程原理与方法[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2006.
- Jiang Hanqiao, Yao Jun, Jiang Ruizhong. Principle and method of reservoir engineering [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2006.
- [17] Cui C, Xu J, Wang D, et al. Layer regrouping for water-flooded commingled reservoirs at a high water-cut stage [J]. Petroleum Science, 2016, 13(2): 272-279.
- [18] 李维国, 同登科. 数值计算方法[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2009.
- Li Weiguo, Tong Dengke. Numerical calculation method [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2009.
- [19] Buckley S E, Leverett M C. Mechanism of fluid displacement in sands [J]. Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, 1942, 146(1): 107-116.
- [20] 张建国, 杜殿发, 侯健, 等. 油气层渗流力学[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2009.
- Zhang Jianguo, Du Dianfa, Hou Jian, et al. Fluid mechanics in porous medium [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2009.

编辑 王星