

油藏数值模拟重质油黑油模型

桓冠仁

(石油工业部石油勘探开发科学研究院)

摘 要

对于实际黑油油藏,尤其是对于重质油油藏,原油的密度、粘度和其它流体性质是随油层深度和平面位置变化的。例如,地层原油粘度值从油层顶部到油水界面可能变化几倍甚至更多。这种现象是由于原油的组份变化引起的。对于重质油油藏,由于重力分异作用和水对原油氧化作用的差异在原油中沥青质和胶质的含量随深度和到油水界面的距离变化。上述现象以及这类油藏的开采动态用带多池法的常规黑油模型不能逼真地加予模拟。

本文介绍一个四组份黑油模型,它用两个拟组份混合的概念来解决上述模拟问题。在这个模型里油被考虑为一个由两个含不同沥青质和胶质量的拟组份的混合物。在这种情况下,混合物的性质除开依赖于压力和温度外,还依赖于混合物中拟组份的质量分数。

本文应用了文献[1]中的闪蒸方法来解决这个问题。在模型中压力和四个组份(水、气和两个油拟组份)在单位地层体积中的质量作为求解的基本变量。虽然加进了较复杂的考虑,但模型仍应用常规黑油的PVT资料,而且由于在数值解法上采用 Sequential 隐式方法,使计算时间增加不多。

引 言

中国东部大多数油藏属于重质油油藏。在作油藏模拟时遇到一个困难的问题是如何模拟原油密度和粘度在油藏中随着深度和平面的变化。对于重质油油藏,原油含有大量的沥青质和胶质。这一因素大大影响了原油特性。在某些情况下,原油的粘度值从油层顶部到油水界面可能变化几倍甚至更多。引起这种现象的原因,一方面是由于在重力分异作用下原油中的沥青质和胶质含量随着深度增加而增加,另一方面由于越接近油水界面,水对油的氧化作用越强。传统的黑油模型是三个组份(水、油和气)的模型,它不可能逼真地模拟重质油油藏中的上述现象和动态。

我们已经在第8届SPE油藏数值模拟讨论会上发表了一种黑油模型的新方法^[1]。这种新方法的优点是,不仅可以解决黑油模拟中的过泡点压力问题,而且更重要的是在改变方程的未知变量后可以模拟更多个组份问题。

本文还是利用这种方法。首先,我们把油考虑成为二个拟组份的混合物。然后利用物质守恒原理可以写出4个方程,且利用新未知量的迭代增量的展开关系构造出第五方程式。在

“闪蒸”计算中，加入对地面油密度变化的考虑。

流体性质

在此模型中，考虑油是两个拟组份的混合物。变量 x 被定义为第一个拟组份在此混合物中的质量分数：

$$x = \frac{R_{o1}}{R_{o1} + R_{o2}} \quad (1)$$

在实验室里，我们利用不同的地面油密度可以获得一组PVT关系。在这种情况下，假设在给定的油藏中的两端极限情况的原油作为上述的两个油的拟组份，其它密度的地面原油被考虑为这两个拟组份的混合物。定义这两个极端情况下的地面油密度为 ρ_{ostc1} 和 ρ_{ostc2} ，利用简单体积混合原理把中间状态的地面油密度写成：

$$\rho_{ostc} = x_{stc} \cdot \rho_{ostc1} + (1 - x_{stc}) \cdot \rho_{ostc2} \quad (2)$$

那么，我们可以得到第一拟组份的质量分数与地面油的密度的关系：

$$x = \frac{x_{stc} \cdot \rho_{ostc1}}{\rho_{ostc}} = \frac{\rho_{ostc1} \cdot (\rho_{ostc} - \rho_{ostc2})}{\rho_{ostc} \cdot (\rho_{ostc1} - \rho_{ostc2})} \quad (3)$$

将 ρ_{ostc} 换成 x 后，我们可以认为对于一个给定的原油其流体性质作为 P 、 P_s 和 x 的函数。在三相状态下（油、气、水）

$$\rho_o^o = \rho_{os}^o(P, x) \quad (4)$$

$$\rho_o^g = \rho_{os}^g(P, x) \quad (5)$$

$$\mu_o = \mu_{os}(P, x) \quad (6)$$

在二相状态下（油、水）：

$$\rho_o^o = \rho_{os}^o(P_s, x) \cdot (1 + CO(P_s, x) \cdot (P - P_s)) \quad (7)$$

$$\rho_o^g = \rho_{os}^g(P_s, x) \cdot (1 + CO(P_s, x) \cdot (P - P_s)) \quad (8)$$

$$\mu_o = \mu_{os}(P_s, x) + C_\mu(P_s, x) \cdot (P - P_s) \quad (9)$$

这样，上述的所有关系都可以从常规的黑油PVT试验中得到，仅仅不同的是带有不同的地面油密度和利用了式(3)。

数学描述

这个模型是由对于水、气和两个油拟组份的四个物质守恒方程和一个相关的方程组成，后者将在下面的第五方程章节中加以描述。对于每个节点的有限差分形式的物质守恒方程为：

$$\Delta T_w \Delta \Phi_w + q_w = \frac{V}{\Delta t} \cdot \bar{\delta} R_w \quad (10)$$

$$\Delta T_{o1} \Delta \Phi_o + q_{o1} = \frac{V}{\Delta t} \cdot \delta R_{o1} \quad (11)$$

$$\Delta T_{o2} \Delta \Phi_o + q_{o2} = \frac{V}{\Delta t} \cdot \delta R_{o2} \quad (12)$$

$$\Delta T_o^g \Delta \Phi_o + \Delta T_g \Delta \Phi_g + q_o^g + q_g = \frac{V}{\Delta t} \cdot \delta R_g \quad (13)$$

式中:

$$T_w = \gamma \frac{k_{rw}}{\mu_w} \rho_w \quad (14)$$

$$T_{o1} = \gamma \frac{k_{ro}}{\mu_o} x \rho_o^o \quad (15)$$

$$T_{o2} = \gamma \frac{k_{ro}}{\mu_o} (1-x) \rho_o^o \quad (16)$$

$$T_g = \gamma \frac{k_{rg}}{\mu_g} \rho_g \quad (17)$$

$$T_o^g = \gamma \frac{k_{ro}}{\mu_o} \rho_o^g \quad (18)$$

在解方程时, 油相压力 P 和单位地层体积中的四个组份的质量 R_w , R_{o1} , R_{o2} 和 R_g 被看作基本求解变量。实际上, 质量未知变量为:

$$R_w = \phi \rho_w S_w \quad (19)$$

$$R_{o1} = \phi x \rho_o^o S_o \quad (20)$$

$$R_{o2} = (1-x) \phi \rho_o^o S_o \quad (21)$$

$$R_g = \phi \rho_o^g S_o + \phi \rho_g S_g \quad (22)$$

这个模型是全隐式模型, 所以我们的任意变量表示法是:

$$\bar{\delta} x = x^{n+1} - x^n \quad (23)$$

$$\delta x = x^{L+1} - x^L \quad (24)$$

式中, 上标 n 表示时间步标号, 上标 L 表示迭代次数。

时间差分可近似写成:

$$\bar{\delta} X = X^L - X^n + \delta X \quad (25)$$

在这个模型里, 对于迭代步直接求解的未知变量是 δP , δR_w , δR_{o1} , δR_{o2} 和 δR_g 。

闪 蒸 计 算

这和文献[1]中的闪蒸计算非常相类似。虽然在这个模型中我们划分了四个组份, 但是在闪蒸计算时我们仍可应用普通黑油模型的三个组份关系。此时把油考虑成为一个组份, 这个油

组份是两个拟组份的混合物，这样作仅仅是为了计算方便。“闪蒸”概念意味着瞬间达到平衡。

在组份模型中的闪蒸程序包中，压力、温度和组份质量或摩尔分数总是作为输入数据。用同样的方式，我们使用这一思想解决黑油问题。这里，压力，温度和三个组份质量分数中的两个作为闪蒸计算的输入参数。由 R_w ， R_o 和 R_g 可以算出组份的质量分数为：

$$C_w = \frac{R_w}{R_w + R_o + R_g} \quad (26)$$

$$C_o = \frac{R_o}{R_w + R_o + R_g} \quad (27)$$

式中：

$$R_o = R_{o1} + R_{o2} \quad (28)$$

除上面提到的外，利用式(1)第一拟组份质量分数也被定义为闪蒸计算的输入参数。

闪蒸计算按以下步骤进行：

1. 确定系统所处相态

由比较饱和条件下的气油质量比与溶解气部分密度与油部分密度比来判断油相态是处于饱和或未饱和状态。

$$\text{若 } \frac{R_g}{R_o} \geq \frac{\rho_{o,s}^g(P, x)}{\rho_{o,s}^o(P, x)} \quad \text{则为三相状态}$$

$$\text{若 } \frac{R_g}{R_o} < \frac{\rho_{o,s}^g(P, x)}{\rho_{o,s}^o(P, x)} \quad \text{则为两相状态}$$

2. 计算泡点压力

对于两相状态的系统，可以利用气油质量比计算泡点压力。正如人们所知道的，溶解气部分密度和油部分密度都是泡点压力和质量分数 x 的函数。这样，我们就可以利用这个关系反过来决定泡点压力。

$$\frac{\rho_{o,s}^g(P_s, x)}{\rho_{o,s}^o(P_s, x)} = \frac{R_g}{R_o} \quad (29)$$

3. 计算密度

知道压力、温度、泡点压力和质量分数 x 后，可以很容易地计算出不同相态下的密度。

4. 计算饱和度

计算出泡点压力和密度后，下列的饱和度计算与文藏[1]的保持完全一样的形式。以下计算对于不同的相态分别用不同的公式计算。

(1) 两相状态：

$$\text{由于 } \frac{C_w}{C_o} = \frac{\rho_w S_w}{\rho_o S_o} \quad (30)$$

水的饱和度可以写成：

$$S_w = \frac{1}{1 + \frac{C_o \rho_w}{C_w \rho_o}} \quad (31)$$

(2) 三相状态：

由于

$$C_w = \frac{\rho_w S_w}{\rho_w S_w + (\rho_o^o + \rho_o^g) S_o + \rho_g S_g} \quad (32)$$

$$C_o = \frac{\rho_o^o S_o}{\rho_w S_w + (\rho_o^o + \rho_o^g) S_o + \rho_g S_g} \quad (33)$$

水和油的饱和度可以写成:

$$S_w = \frac{C_w \rho_o^o \rho_g}{\rho_w \rho_o^o + C_o \rho_w (\rho_g - \rho_o^o - \rho_o^g) + C_w \rho_o^o (\rho_g - \rho_w)} \quad (34)$$

$$S_o = \frac{C_o \rho_w \rho_g}{\rho_w \rho_o^o + C_o \rho_w (\rho_g - \rho_o^o - \rho_o^g) + C_w \rho_o^o (\rho_g - \rho_w)} \quad (35)$$

如同上面所提到的, 我们可以看到闪蒸计算的输出结果是系统的相态、泡点压力、密度和饱和度。

第五方程式

正如上面涉及的, 我们有四个方程但有五个未知变量, 因此必须再补充一个方程。我们可以从式(19)一(22)及式(1)的微分展开式找到 $L+1$ 迭代步 $\delta R_w, \delta R_{o1}, \delta R_{o2}$ 和 δR_g 与 $\delta P, \delta S_w, \delta S_o, \delta S_g, \delta P_i$ 和 δX 之间的关系。

饱和度之和的方程展开式为:

$$\delta S_w + \delta S_o + \delta S_g = 0 \quad (36)$$

利用正规链规则, 式(19)的展开式可以可成:

$$R_w + \delta R_w = (\phi \rho_w S_w) + S_w \frac{d(\phi \rho_w)}{dP} \delta P + (\phi \rho_w) \delta S_w \quad (37)$$

把式(37)改写为:

$$\delta S_w = a_0 + a_1 \delta P + a_2 \delta R_w \quad (38)$$

式中:

$$a_0 = \frac{R_w}{(\phi \rho_w)} - S_w \quad (39)$$

$$a_1 = -\frac{1}{(\phi \rho_w)} S_w \frac{d(\phi \rho_w)}{dP} \quad (40)$$

$$a_2 = \frac{1}{(\phi \rho_w)} \quad (41)$$

为了清楚起见省去式(37)一(41)及以下公式中所有有关上角标 L 。

根据不同相态写出式(20)一(22)的展开式。值得注意的是, 溶解气和油的部分密度不仅依赖于压力和泡点压力, 而且也依赖质量分数 x 。

从式(1)的展开式可以获得 x 的迭代量。

$$\delta x = \frac{1-x}{R_{o1} + R_{o2}} \delta R_{o1} - \frac{x}{R_{o1} + R_{o2}} \delta R_{o2} \quad (42)$$

可以利用式(42)消去(20)一(22)式展开式的 δx 。

1. 三相状态

在三相状态下, 油部分密度和溶解气部分密度依赖于压力和质量分数 x , 因此:

$$(R_{o1} + R_{o2}) + \delta R_{o1} + \delta R_{o2} = (\phi \rho_o^o S_o) + (\phi \rho_o^g) \delta S_o + S_o \frac{\partial(\phi \rho_o^o)}{\partial P} \delta P + (\phi S_o) \frac{\partial \rho_o^o}{\partial x} \delta x \quad (43)$$

$$R_g + \delta R_g = (\phi \rho_g^g S_o + \phi \rho_g S_g) + (\phi \rho_g^g) \delta S_o + (\phi \rho_g) \delta S_g + \left(S_o \frac{\partial(\phi \rho_g^g)}{\partial P} + S_g \frac{d(\phi \rho_g)}{dP} \right) \delta P + (\phi S_o) \frac{\partial \rho_g^g}{\partial x} \delta x \quad (44)$$

将式(43)改写为:

$$\delta S_o = b_0 + b_1 \delta P + b_2 (\delta R_{o1} + \delta R_{o2}) + b_3 \delta x \quad (45)$$

式中

$$b_0 = \frac{(R_{o1} + R_{o2})}{(\phi \rho_o^o)} - S_o \quad (46)$$

$$b_1 = - \frac{1}{(\phi \rho_o^o)} S_o \frac{\partial(\phi \rho_o^o)}{\partial P} \quad (47)$$

$$b_2 = \frac{1}{(\phi \rho_o^g)} \quad (48)$$

$$b_3 = - \frac{S_o \partial \rho_o^o}{\rho_o^o \partial x} \quad (49)$$

把式(45)代入式(44), 我们可以把式(44)改写成下式:

$$\delta S_g = c_0 + c_1 \delta P + c_2 (\delta R_{o1} + \delta R_{o2}) + c_3 \delta R_g + c_4 \delta x \quad (50)$$

式中

$$c_0 = \frac{1}{(\phi \rho_g)} \left(R_g - \frac{\rho_g^g}{\rho_o^o} (R_{o1} + R_{o2}) \right) - S_g \quad (51)$$

$$c_1 = - \frac{1}{(\phi \rho_g)} \left(S_o \frac{\partial(\phi \rho_g^g)}{\partial P} + S_g \frac{d(\phi \rho_g)}{dP} - \frac{\rho_g^g}{\rho_o^o} S_o \frac{\partial(\phi \rho_o^o)}{\partial P} \right) \quad (52)$$

$$c_2 = - \frac{\rho_g^g}{\phi \rho_g \rho_o^o} \quad (53)$$

$$c_3 = \frac{1}{(\phi \rho_g)} \quad (54)$$

$$c_4 = - \frac{S_o}{\rho_g} \left(\frac{\partial \rho_g^g}{\partial x} - \frac{\rho_g^g}{\rho_o^o} \frac{\partial \rho_o^o}{\partial x} \right) \quad (55)$$

先将式(42)代入式(45)和(50)消去 δX , 然后再将式(38), (45)和(50)代入式(36), 我们将获得下列的第五方程式:

$$A_0 + A_1 \delta P + A_2 \delta R_w + A_3 \delta R_{o1} + A_4 \delta R_{o2} + A_5 \delta R_g = 0 \quad (56)$$

式中

$$A_0 = a_0 + b_0 + c_0 \quad (57)$$

$$A_1 = a_1 + b_1 + c_1 \quad (58)$$

$$A_2 = a_2 \quad (59)$$

$$A_3 = b_2 + c_2 + (b_3 + c_4) \frac{(1-x)}{(R_{o1} + R_{o2})} \quad (60)$$

$$A_4 = b_2 + c_2 - (b_3 + c_4) \frac{x}{(R_{o1} + R_{o2})} \quad (61)$$

$$A_5 = c_3 \quad (62)$$

2. 两相状态

在两相状态下油相中的油部分密度和溶解气部分密度不仅仅依赖于压力 P 和质量分数 x , 而且也依赖于泡点压力 P_s , 因此:

$$\begin{aligned} (R_{o1} + R_{o2}) + \delta R_{o1} + \delta R_{o2} = & (\phi \rho_o^o S_o) + (\phi \rho_o^g) \delta S_o + S_o \frac{\partial(\phi \rho_o^o)}{\partial P} \delta P + (\phi S_o) \frac{\partial \rho_o^o}{\partial x} \delta x \\ & + (\phi S_o) \frac{\partial \rho_o^o}{\partial P_s} \delta P_s \end{aligned} \quad (63)$$

$$R_g + \delta R_g = (\phi \rho_g^o S_o) + (\phi \rho_g^g) \delta S_o + S_o \frac{\partial(\phi \rho_g^o)}{\partial P} \delta P + (\phi S_o) \frac{\partial \rho_g^o}{\partial x} \delta x + (\phi S_o) \frac{\partial \rho_g^o}{\partial P_s} \delta P_s \quad (64)$$

先用式(63)和(64)消去 δP_s , 然后重新整理得:

$$\begin{aligned} & \left(\left(\frac{\partial \rho_o^o}{\partial P_s} \right)^{-1} (R_{o1} + R_{o2} - \phi \rho_o^o S_o) - \left(\frac{\partial \rho_g^o}{\partial P_s} \right)^{-1} (R_g - \phi \rho_g^o S_o) \right) - S_o \left(\left(\frac{\partial \rho_o^o}{\partial P_s} \right)^{-1} \frac{\partial(\phi \rho_o^o)}{\partial P} \right. \\ & - \left(\frac{\partial \rho_g^o}{\partial P_s} \right)^{-1} \frac{\partial(\phi \rho_g^o)}{\partial P} \Big) \delta P + \left(\frac{\partial \rho_o^o}{\partial P_s} \right)^{-1} (\delta R_{o1} + \delta R_{o2}) - \left(\frac{\partial \rho_g^o}{\partial P_s} \right)^{-1} \delta R_g - (\phi S_o) \left(\left(\frac{\partial \rho_o^o}{\partial P_s} \right)^{-1} \frac{\partial \rho_o^o}{\partial x} \right. \\ & \left. - \left(\frac{\partial \rho_g^o}{\partial P_s} \right)^{-1} \frac{\partial \rho_g^o}{\partial x} \right) \delta x - \phi \left(\rho_o^o \left(\frac{\partial \rho_o^o}{\partial P_s} \right)^{-1} - \rho_g^o \left(\frac{\partial \rho_g^o}{\partial P_s} \right)^{-1} \right) \delta S_o = 0 \end{aligned} \quad (65)$$

由于两相状态下:

$$\delta S_o = -\delta S_w \quad (66)$$

然后将式(38)代入式(65), 得到两相状态下与式(56)具有相同形式的第五方程式, 仅仅不同的是带有下列不同的系数。

$$\begin{aligned} A_0 = & \left(\left(\frac{\partial \rho_o^o}{\partial P_s} \right)^{-1} (R_{o1} + R_{o2} - \phi \rho_o^o S_o) - \left(\frac{\partial \rho_g^o}{\partial P_s} \right)^{-1} (R_g - \phi \rho_g^o S_o) \right) \\ & + \phi \left(\rho_o^o \left(\frac{\partial \rho_o^o}{\partial P_s} \right)^{-1} - \rho_g^o \left(\frac{\partial \rho_g^o}{\partial P_s} \right)^{-1} \right) \left(\frac{R_w}{\phi \rho_w} - S_w \right) \end{aligned} \quad (67)$$

$$\begin{aligned} A_1 = & -S_o \left(\left(\frac{\partial \rho_o^o}{\partial P_s} \right)^{-1} \frac{\partial(\phi \rho_o^o)}{\partial P} - \left(\frac{\partial \rho_g^o}{\partial P_s} \right)^{-1} \frac{\partial(\phi \rho_g^o)}{\partial P} - \frac{S_w}{\rho_w} \frac{d(\phi \rho_w)}{dP_s} \right)^{-1} \\ & \rho_o^o \left(\frac{\partial \rho_o^o}{\partial P_s} \right)^{-1} - \rho_g^o \left(\frac{\partial \rho_g^o}{\partial P_s} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (68)$$

$$A_2 = \frac{1}{\rho_w} \left(\rho_o^o \left(\frac{\partial \rho_o^o}{\partial P_s} \right)^{-1} - \rho_g^o \left(\frac{\partial \rho_g^o}{\partial P_s} \right)^{-1} \right) \quad (69)$$

$$A_3 = \left(\frac{\partial \rho_o^o}{\partial P_s} \right)^{-1} - \left(\frac{\phi S_o (\rho - x)}{R_{o1} + R_{o2}} \right) \left(\left(\frac{\partial \rho_o^o}{\partial P_s} \right)^{-1} \frac{\partial \rho_o^o}{\partial x} - \left(\frac{\partial \rho_g^o}{\partial P_s} \right)^{-1} \frac{\partial \rho_g^o}{\partial x} \right) \quad (70)$$

$$A_4 = \left(\frac{\partial \rho_o^o}{\partial P_s} \right)^{-1} + \left(\frac{\phi S_o x}{R_{o1} + R_{o2}} \right) \left(\left(\frac{\partial \rho_o^o}{\partial P_s} \right)^{-1} \frac{\partial \rho_o^o}{\partial x} - \left(\frac{\partial \rho_g^o}{\partial P_s} \right)^{-1} \frac{\partial \rho_g^o}{\partial x} \right) \quad (71)$$

$$A_5 = - \left(\frac{\partial \rho_o^g}{\partial P_g} \right)^{-1} \quad (72)$$

Sequential 方法

在这个模型的 Sequential 方法中, 每一个迭代步的求解过程分为两步。第一步隐式计算压力, 即解一个线性代数方程组, 每一个节点带一个未知变量 δP 。第二步在同一迭代步中, 在解出压力解的基础上显式计算组份的质量含量。虽然在这个方法中网格节点间的传导率、毛管压力和重力项是随迭代步改变的, 但对于一个迭代步保持常数。因此, 物质平衡方程可以写成:

$$\Delta T_w \Delta \Phi_w + q_w + \Delta T_w \Delta \delta P = \frac{V}{\Delta t} (\delta R_w + R_w - R_w^n) \quad (73)$$

$$\Delta T_{o1} \Delta \Phi_o + q_{o1} + \Delta T_{o1} \Delta \delta P = \frac{V}{\Delta t} (\delta R_{o1} + R_{o1} - R_{o1}^n) \quad (74)$$

$$\Delta T_{o2} \Delta \Phi_o + q_{o2} + \Delta T_{o2} \Delta \delta P = \frac{V}{\Delta t} (\delta R_{o2} + R_{o2} - R_{o2}^n) \quad (75)$$

$$\Delta T_o^g \Delta \Phi_o + \Delta T_g \Delta \Phi_g + q_o^g + q_g + \Delta (T_o^g + T_g) \Delta \delta P = \frac{V}{\Delta t} (\delta R_g + R_g - R_g^n) \quad (76)$$

将式(73)–(76)代入第五方程式(56), 我们可以得到只含一个 δP 变量的压力方程。

$$\begin{aligned} \Delta (A_2 T_w + A_3 T_{o1} + A_4 T_{o2} + A_5 T_g) \Delta \delta P + \frac{A_1 V}{\Delta t} \delta P = A_2 \left(\frac{V}{\Delta t} (R_w - R_w^n) \right. \\ \left. - \Delta T_w \Delta \Phi_w - q_w \right) + A_3 \left(\frac{V}{\Delta t} (R_{o1} - R_{o1}^n) - \Delta T_{o1} \Delta \Phi_o - q_{o1} \right) + A_4 \left(\frac{V}{\Delta t} (R_{o2} - R_{o2}^n) \right. \\ \left. - \Delta T_{o2} \Delta \Phi_o - q_{o2} \right) + A_5 \left(\frac{V}{\Delta t} (R_g - R_g^n) - \Delta T_g \Delta \Phi_g - q_g \right) - \frac{A_0 V}{\Delta t} \end{aligned} \quad (77)$$

在求解出 δP 的基础上, 从式(73)–(76)可以显示求出 $\delta R_w, \delta R_{o1}, \delta R_{o2}$ 和 δR_g 。然后紧跟着进行一次闪蒸计算。利用闪蒸计算出的饱和度、泡点压力和其它参数的当前值, 我们可以重新计算下一个迭代步的方程系数, 以此类推, 重复上述过程直至迭代收敛。

试验算例

我们选择了一个在 X 和 Z 方向带有 8×5 个节点数的剖面模型来试验上述方法。这个试验的主要参数是从中国东部的一个实际油田选来的。在这个例子中, 我们可以看到对于重质油油藏来说, 油的密度和粘度是随着地层深度变化而变化的。为了进行机理研究, 将生产井放置在剖面的较高处, 以便最初生产较轻的原油, 将注水井放置在剖面的较低处, 以便保持油藏的压力, 并且将较重的油从油水界面驱到生产井。

流体的 PVT 资料、特殊岩心分析资料和基本参数显示在表 1—5, 计算结果显示在表 6 和图 1。

计算结果表明生产出来原油的地面密度是随着注入水的体积倍数增加而增加, 尤其是在

最初时间里，并且在注入 2 倍孔隙体积的水之后，在生产井附近，地面原油密度在油层上部的高于油层下部的。可以用在最终水驱阶段油层上部通过的驱替油的油量总是多于油层下部通过的驱替油油量，以致于较重的油被保持在油层上部来解释后一现象。

表 1 模 型 描 述

(网格系统深度, 米)

	M = 1	2	3	4	5	6	7	8
$I_z = 1$	1860	1880	1900	1920	1940	1960	1980	2000
2	1862	1882	1902	1922	1942	1962	1982	2002
3	1864	1884	1904	1924	1944	1964	1984	2004
4	1866	1886	1906	1926	1946	1966	1986	2006
5	1868	1888	1908	1928	1948	1968	1988	2008

表 2 饱 和 度 函 数

油、水函数

S_w	K_{rw}	K_{row}	$P_{cow,at}$
0.22	0.0	1.0	0.4763
0.228	0.0	0.99	0.4700
0.30	0.07	0.40	0.2722
0.40	0.15	0.125	0.2041
0.50	0.24	0.0649	0.1701
0.60	0.33	0.0480	0.1361
0.80	0.65	0.0	0.06805
0.90	0.83	0.0	0.03402
1.00	1.00	0.0	0.0

油、气函数

S_g	K_{rg}	K_{rog}	$P_{cog,at}$
0.0	0.0	1.0	0.0
0.04	0.0	0.60	0.01361
0.10	0.022	0.33	0.03402
0.20	0.10	0.10	0.06805

表 3 基 本 数 据

几何参数

X 和 Z 方向的网格数	8 × 5
垂向有效厚度, 米	2
X 方向的网格步长, 米	500

岩石和流体数据

岩石压缩系数, 1/大气压	5.878×10^{-5}
水的压缩系数, 1/大气压	4.409×10^{-5}
未饱和油的压缩系数, 1/大气压	1×10^{-4}
油藏气的粘度, 厘泊	0.02
油藏水的粘度, 厘泊	0.96
未饱和油、气和水的粘度压缩系数, 1/大气压	0.0
地面水密度, 克/厘米 ³	0.99536

参考压力为一个绝对大气压时的孔隙度	0.3
水平渗透率, 毫达西	4000
垂直渗透率, 毫达西	400
初始条件:	
油、气界面深度, 米	无
油、水界面深度, 米	2010
油、水界面毛管压力, 大气压	0.0
1980米深度的初始油藏压力, 绝对大气压	196
井的数据	
生产井在X方向的网格位置	1
注水井在X方向的网格位置	8
生产井和注入井在Z方向的射开层位	1—5
年产液速度, PV (油藏孔隙体积分数)	0.02
年注水速度, PV	0.02
总注入体积, PV	2

表 4 PVT性质

地面原油密度 克/厘米 ³	饱和压力 绝对大气压	油部分密度 克/厘米 ³	溶解气部分密度 克/厘米 ³	自由气密度 克/厘米 ³	油粘度 厘泊
ρ_{sto}	P_s	ρ_o^s	ρ_g^s	ρ_g	ρ_o
0.83	1	0.86408	0.0	0.00129	11
	11	0.83568	0.00668	0.01423	7.5
	51	0.80689	0.02346	0.06599	5.0
	101	0.78070	0.04370	0.13069	4.5
	201	0.73859	0.08000	0.26009	3.2
0.91	1	0.88781	0.0	0.00129	45
	11	0.86093	0.00612	0.01423	32.5
	51	0.83105	0.02127	0.06599	15.5
	101	0.80889	0.03853	0.13069	13
	201	0.76858	0.06995	0.26009	8
0.94	1	0.92611	0.0	0.00129	70
	11	0.90385	0.0056	0.01423	60
	51	0.87851	0.01875	0.06599	39.5
	101	0.84728	0.03325	0.13069	26.5
	201	0.82747	0.06094	0.26009	14

表 5 与深度的函数关系

深度 米	地面原油密度 克/厘米 ³	温度 °C	饱和压力 绝对大气压
H	ρ_{sto}	T	P_s
1850	0.8955	74	159
1900	0.9120	76	140
1950	0.9285	78	120
1980	0.9385	79.2	118
2010	0.9400	80.4	117

表 6 计 算 结 果

在网格块中水饱和度

初 始

0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.3377	1.0	1.0
0.22	0.22	0.22	0.22	2.22	0.3739	1.0	1.0
0.22	0.22	0.22	0.22	0.2334	0.4203	1.0	1.0
0.22	0.22	0.22	0.22	0.2438	0.4928	1.0	1.0
0.22	0.22	0.22	0.22	0.2541	0.5653	1.0	1.0

注入水倍数为 2 时

0.3615	0.3716	0.3797	0.3911	0.4139	0.4815	1.0	1.0
0.4113	0.4279	0.4406	0.4604	0.4889	0.5524	1.0	1.0
0.5027	0.5136	0.5225	0.5385	0.5935	0.6219	1.0	1.0
0.5938	0.6003	0.6049	0.6167	0.6378	0.6902	1.0	1.0
0.6855	0.6875	0.6877	0.6950	0.7118	0.7570	1.0	1.0

在网格块中地面原油密度

初 始

0.8988	0.9054	0.9120	0.9186	0.9252	0.9318	0.94	0.94
0.8994	0.9080	0.9126	0.9192	0.9258	0.9325	0.94	0.94
0.9001	0.9067	0.9133	0.9199	0.9265	0.9331	0.94	0.94
0.9007	0.9073	0.9139	0.9205	0.9271	0.9338	0.94	0.94
0.9014	0.9080	0.9146	0.9212	0.9278	0.9345	0.94	0.94

注入水倍数为 2 时

0.9174	0.9184	0.9216	0.9248	0.9281	0.9320	0.94	0.94
0.9100	0.9164	0.9202	0.9241	0.9282	0.9327	0.94	0.94
0.9098	0.9148	0.9193	0.9238	0.9285	0.9334	0.94	0.94
0.9092	0.9142	0.9190	0.9238	0.9288	0.9340	0.94	0.94
0.9085	0.9136	0.9187	0.9238	0.9289	0.9344	0.94	0.94

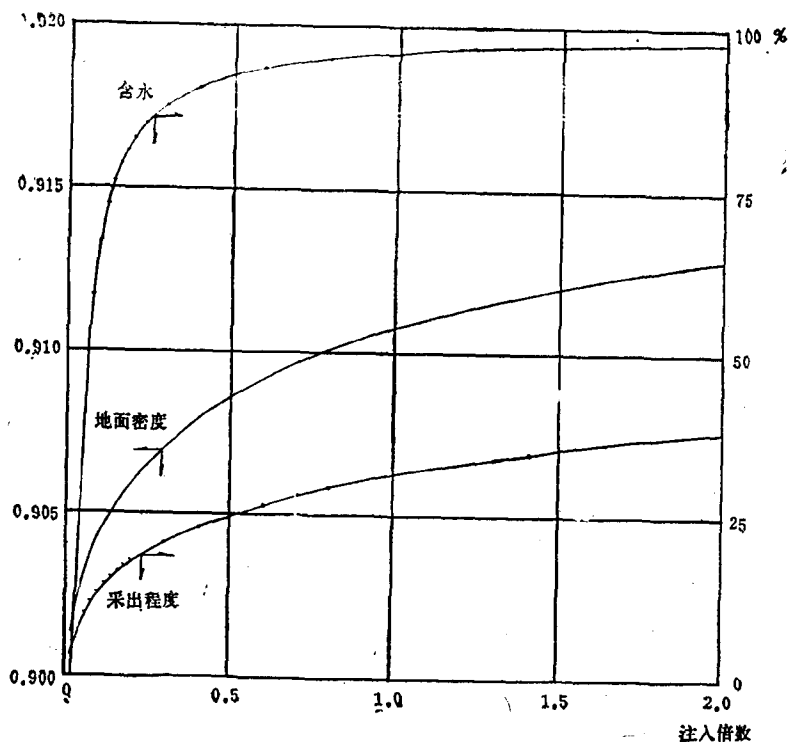


图1 地面原油密度、含水和原油采出程度与注入水占孔隙体积倍数的函数关系

参 考 文 献

1. Huan G. R. : "A Flash Black Oil Model", paper SPE 13521, The SPE 1985 Middle East oil Technical Conference and Exhibition, Bahrain, March, 1985.
2. Lo T. S. and Youngren G. K. : "A New Approach to Limited Compositional Simulation: Direct Solution of the Phase Equilibrium Equations", paper SPE 13518, Eighth SPE Symposium on Reservoir Simulation, Dallas, Texas, February, 1985.
3. Chappellear, J. E. and Nalen J. S. : "Second Comparative Solution Project-A Three-Phase Coning Study", paper SPE 10489, Sixth SPE Symposium of Reservoir Simulation, New Orleans, 1982.
4. Coats, K. H. : "An Equation of State Compositional Model", SPE 8284, Annual Fall Technical Conference and Exhibition of SPE of AIME, Las Vegas, Nevada September, 1979.
5. Coats, K. H. : "A Highly Implicit Steamflood Model", SPE Journal, October, 1978, 369.
6. Thomas, G. W. and Thurman, D. H. : "Reservoir Simulation Using an Adaptive Implicit Method", SPE 10120, 56th Annual Fall Technical Conference and Exhibition of SPE of AIME, San Antonio, Texas, October, 1981.
7. Bansal, P. P., Harper, J. L., McDonald, A. E., Moreland, E. E., Odeh, A. S. and

- Trimble, R. H. : "A Strongly Coupled, Fully Implicit, Three Dimensional, Three Phase Reservoir Simulator", SPE 8329, 54th Annual Technical Meeting of SPE, Las Vegas, Nevada, September, 1979.
8. Watts, J. W. : "A Compositional Formulation of the Pressure and Saturation Equations", SPE 12244, Seventh SPE Symposium of Reservoir Simulation, San Francisco, CA, November, 1983.
9. Odeh, A. S. : "Comparison of Solutions to a Three-Dimensional Black-Oil Reservoir Simulation Problem", JPT, (January, 1981), 13.
10. Nolen, J. S. and Berry, D. W. : "Tests of the Stability and Time-Step Sensitivity of Semi-Implicit Reservoir Simulation Techniques", Trans. AIME, (1972) 253.

符号表

英文字母

CO	——未饱和油压缩系数
C_w, C_o	——水、油组份的质量分数
C_μ	——未饱和油粘度压缩系数
k_{rp}	——P相相对渗透率
P	——油相压力
P_{oow}, P_{cog}	——油-水、油-气毛管压力
P_b	——泡点压力
q_c^c	——P相中C组份的注入和采出质量速度
R_c	——单位地层体积中C组份的质量
S_p	——P相饱和度
T_p^c	——P相中C组份的传导率
V	——节点网格总体积
x	——在油藏条件下第一拟油组份占总的油组份的质量分数
x_{sto}	——在地面条件下第一拟油组份占总的油组份的体积分数

希腊字母

Δ	——空间差分算子
Δt	——时间步长
$\bar{\delta}$	——时间差分算子
δ	——迭代差分算子
μ_p	——P相的粘度
ρ_P^c	——C组份在P相中的部份密度
ρ_{oto}	——油罐条件下油的密度
ρ_{oto1}	——第一拟组份的油在油罐条件下的密度
ρ_{oto2}	——第二拟组份的油在油罐条件下的密度
Φ_p	——P相的流动势

- ϕ —— 孔隙度
 γ —— 传导率中的不变部分

差分标志

$$\Delta T \Delta X = \Delta_x T_x \Delta_x X + \Delta_y T_y \Delta_y X + \Delta_z T_z \Delta_z X$$

$$\Delta_x T_x \Delta_x X = T_{x,i+1/2}(X_{i+1} - X_i) - T_{x,i-1/2}(X_i - X_{i-1})$$

式中 $T_{x,i+1/2}$ —— 在网格节点 i 和 $i+1$ 之间 X 方向的传导率

上标

g —— 气相或气组份 (对于 R_g)

O —— 油相或油组份 (对于 R_o)

W —— 水相或水组份 (对于 R_w)

$o1$ —— 第一拟组份

$o2$ —— 第二拟组份

L —— 迭代次数

下标

g —— 气组份

n —— 时间步次数

o —— 油组份

w —— 水组份