中国科学: 技术科学 2015 年 第 45 卷 第 8 期: 857 ~ 864
论 文 www.scichina.com tech.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

# 裂缝性厚层油藏水窜问题研究

张召彬①, 林缅①*, 李勇①, 任芳祥②

① 中国科学院力学研究所, 北京 100190;
② 中国石油辽河油田公司, 盘锦 124010
* E-mail: linmian@imech.ac.cn

收稿日期: 2014-03-26; 接受日期: 2014-10-10
中国科学院战略性先导科技专项(B 类)(编号: XDB10020302, XDB10050400)、国家重点基础研究发展计划(编号: 2014CB239004)、国家科技重大专项(深层油气、非常规天然气成藏规律与有利勘探区评价技术)(编号: 2011ZX05008-004)和国家自然科学基金青年基金(批准号: 41102084)资助项目

**摘要** 对于辽河油田的裂缝性厚层油藏, 如何控制水窜是提高采收率的关键, 为此本文提出一种基于双重介质的快速算法, 并研究了裂缝性厚层油藏水窜产生的原因和控制水窜的方法. 该算法根据相邻节点间的压力平衡关系更新饱和度, 与流线方法相比, 该算法方便简洁, 回避了计算流线分布的困难; 与显式求解压力隐式求解饱和度(IMPES)方法相比, 该算法的计算精度与其相当, 但计算效率却比 IMPES 方法高出近 30 倍. 针对辽河油田的复杂地质体和纵横交错的水平井网, 通过考察影响水窜的主控因素, 本文定义了无量纲数$\Pi_g$和$\Pi_{ex}$(分别表征重力驱流动速度/生产速度, 裂隙基质交换速度/生产速度), 并计算了$\Pi_g$ 和$\Pi_{ex}$ 取值对水窜的影响, 得到了依赖$\Pi_g$和$\Pi_{ex}$ 的水窜强度分区图, 并分析了水窜强度随$\Pi_g$ 和$\Pi_{ex}$ 的变化趋势. 研究结果对提高辽河油田采收率具有一定的指导意义.

**关键词**
立体开发
双重介质
IMPES
快速算法
水窜

## 1 引言

兴隆台潜山内幕构造复杂, 含油幅度达 2345 m, 具有山体巨厚、岩性复杂、裂缝层控、非均质严重等特点, 为了实现储量全部动用和高效开发, 辽河油田提出了“四段七层、纵叠平错”的立体开发对策[1](图 1), 并初步尝试利用注水来补充地层能量. 然而注水后水窜现象非常严重, 生产井很容易见水, 造成采收率下降. 目前的当务之急是找到水窜产生的原因和控制水窜的方法, 然而, 目前研究水窜的方法[2~4], 如 Chaperon 方法、Efras 方法等都难以用于具有复杂井网的裂缝性厚层油藏. 那么, 针对具有复杂井网的裂缝性厚层油藏, 如何定量考量水窜的关键因素, 如何实现效率高、可操作性强的算法等, 都是急需解决的问题.

由于潜山储层地质情况复杂, 再加上纵横交错的立体井网, 使得传统的数模方法, 如 FI 方法[5~7], IMPES 方法[8,9]和流线方法[10~12]等, 或是计算量过大, 或是计算过程过于复杂, 难以实现有效的模拟. 我们知道, 所谓 FI 方法即全隐式方法, 对压力、速度、饱和度等均采用隐式求解, 无条件稳定[13]; IMPES 就是隐式求解压力场、显式更新饱和度的方法, 它比 FI 方法求解区域更大, 但是对复杂地层[13]和井网结构所需的时间步长较短. 以上两种方法的共同缺点是每一个时间步都需要求解压力, 反复迭代过程会占据大量 CPU 时间, 所以计算效率较低, 一般仅能用

**引用格式**: 张召彬, 林缅, 李勇, 等. 裂缝性厚层油藏水窜问题研究. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 857–864
Zhang Z B, Lin M, Li Y, et al. Numerical study of the water channeling problem in fractured thick oil reservoir (in Chinese). Sci Sin Tech, 2015, 45: 857–864, doi: 10.1360/N092014-00097

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

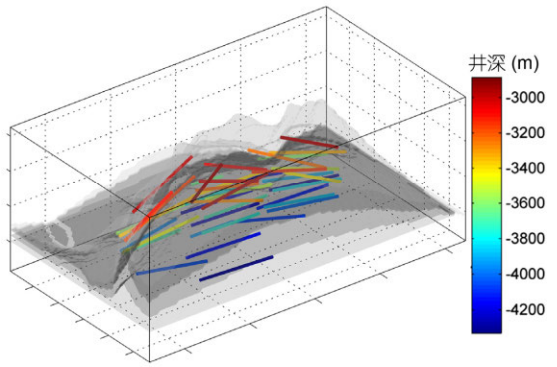


**图 1 (网络版彩图)潜山油藏地质体和三维立体井网, 其中颜色代表井的深度**

于求解二维平面问题或比较简单的三维问题.

流线法是基于流线求解驱替问题的一种高效数值方法. 相对于 IMPES 方法, 流线法的优点是计算效率高, 缺点是跟踪流线过程繁琐且存在不确定性. 目前流线法主要用于平面二维情形以及简单的三维井网[14~18].

综上所述, 目前国内外还没有一种算法适应于兴隆台潜山这样具有复杂井网的裂缝性厚层油藏. 为此本文基于双重介质模型提出了一套高效快速算法. 全文主要分为四部分, 首先提出基本方程、计算流程和分析计算效率; 其次与 IMPES 方法对比, 验证算法精度; 然后通过理论分析得到影响水窜产生的关键物理量, 定义了两个无量纲参数, 并针对兴隆台潜山油藏地质体和 41 口水平井进行建模, 研究了参数变化对水窜过程的影响; 最后通过计算得到了水窜控制优化分区图.

## 2 计算模型

压力求解是模拟过程中最耗时的部分, 因此要提高计算效率, 必须降低对压力求解的依赖. 有文献[9,19]基于单一介质和简单井网通过减少压力求解次数来提高效率. 事实上, 当油水总速度已知时, 油水各自的速度是由局部的黏性力、毛管力、重力等因素共同决定的. 因此, 本文提出利用油水局部受力平衡条件计算油水的速度和更新饱和度.

### 2.1 基本方程

基于三维两相等温不可压渗流, 油水运动满足达西定律, 即

$$\boldsymbol{v}_i = \frac{KK_{r,i}}{\mu_i}\nabla\left(pi-\rho igD\right),\ i=\mathrm{w},\ \mathrm{o}, \tag{1}$$

以及体积守恒

$$\nabla\boldsymbol{v}_{\mathrm{w}} + \nabla\boldsymbol{v}_{\mathrm{o}} = 0, \tag{2}$$

其中 $\boldsymbol{v}$ 为达西速度, $K$ 为裂隙渗透率, $K_r$ 为相对渗透率, $p$ 为压力, $g$ 为重力加速度, $\mu$为黏性系数, $\rho$为密度, $D$ 为相对于参考平面的高度, 下标 w 和 o 分别代表水和油.

联立方程(1)和(2)可求解压力场. 设任一时刻油水总速度已知, 即

$$\boldsymbol{v}_{\mathrm{sum}} = \boldsymbol{v}_{\mathrm{w}} + \boldsymbol{v}_{\mathrm{o}} \tag{3}$$

已知, 则联立(1)和(3)式, 可得压力梯度满足

$$\nabla p_{\mathrm{w}} = \frac{\boldsymbol{v}_{\mathrm{sum}} + f_{\mathrm{w}}\nabla\left(\rho_{\mathrm{w}}gD\right) + f_o\nabla\left(\rho_{\mathrm{o}}gD\right) - f_{\mathrm{o}}\nabla p_{\mathrm{cap}}}{f_{\mathrm{w}} + f_o}, \tag{4}$$

其中

$$f_{\mathrm{w}} = \frac{KK_{r,\mathrm{w}}}{\mu_{\mathrm{w}}}, \tag{5}$$

$$f_{\mathrm{o}} = \frac{KK_{r,\mathrm{o}}}{\mu_{\mathrm{o}}}, \tag{6}$$

分别为水和油的流度, $p_{\mathrm{cap}}=p_{\mathrm{o}}-p_{\mathrm{w}}$ 为毛管压力, 将(4)代入(1)式, 即得到在给定油水总速度条件下的油和水各自的速度, 即

$$\boldsymbol{v}_{\mathrm{w}} = f_{\mathrm{w}}\nabla p_{\mathrm{w}} - \nabla\left(\rho_{\mathrm{w}}gD\right), \tag{7}$$

$$\boldsymbol{v}_{\mathrm{o}} = f_{\mathrm{o}}\nabla p_{\mathrm{w}} + f_{\mathrm{o}}\nabla p_{\mathrm{cap}} - \nabla\left(\rho_{\mathrm{o}}gD\right). \tag{8}$$

这样即在总速度不变的条件下, 显式地得到了油水各自的速度场. 速度场已知后, 即可更新饱和度, 水的饱和度 $S_{\mathrm{w}}$ 满足

$$\nabla\boldsymbol{v}_{\mathrm{w}} + \phi\frac{\partial S_{\mathrm{w}}}{\partial t} = 0, \tag{9}$$

其中$\phi$ 为裂隙孔隙度, 油的饱和度 $S_{\mathrm{o}}$ 满足

$$S_{\mathrm{o}} = 1 - S_{\mathrm{w}}. \tag{10}$$

已知裂隙和基质系统的饱和度时, 裂隙和基质之间的交换速度可以由渗吸半周期来 $T$ 来定义[20]. 所谓渗吸半周期, 即由于流体交换, 使裂隙和基质含水饱和度之差减半所需的时间. $T$ 综合反映了裂缝基质流体交换的速度, 且易于在实验中测量. 由 $T$ 的定义可得时间 $\Delta t$ 后的裂隙含水饱和度的变化量$\Delta S_{\mathrm{w}}$ 为

$$\Delta S_{\mathrm{w}} = \left(\frac{\phi S_{\mathrm{w}} + \phi_m S_{\mathrm{w},m}}{\phi + \phi_m} - S_{\mathrm{w}}\right)\left(1 - \frac{1}{2^{\Delta t/T}}\right), \tag{11}$$

其中下标 $m$ 指基质系统的参数.



?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

定义两个时刻 $t_1$ 和 $t_2$ 的饱和度场变化

$$\Delta S=\frac{\sum_i\left|S_{i,t1}-S_{i,t2}\right|}{M}, \tag{12}$$

其中 $M$ 为网格总数. 为控制压力场更新的频率, 定义 $\Delta S_{\text{threshold}}$, 当 $\Delta S>\Delta S_{\text{threshold}}$ 时更新压力场和速度场. 本文将在下一节研究该阈值取值对计算精度的影响.

### 2.2　计算流程

归纳饱和度更新和压力计算两部分, 整个计算流程如图 2 所示.

### 2.3　计算效率

采用相同的压力求解器, 分别利用本文算法和 IMPES 方法模拟同一驱替过程, 对比两者计算效率. 结果如图 3 所示. 可见本文算法相对于 IMPES 方法的速度提高 10 倍以上, 且速度提升幅度随着网格数的增加而急剧增加. 当网格数为 10000 时, 本文算法的计算效率已接近 IMPES 方法的 30 倍.

## 3　模型验证

相对于 IMPES 方法, 本文算法压力求解次数减少, 因此误差势必增大. 下面比较本文算法和 IMPES 的计算结果, 讨论本文算法的合理性.

定义本文算法计算产量的计算误差 $\Delta q$ 为 $\frac{|q_1-q_2|}{q_1+q_2}$ 的平均值, 其中 $q_1$ 为本文算法计算得到的瞬时产量, $q_2$ 为利用 IMPES 计算得到的瞬时产量. 同理可定义本文算法计算累积出液量的计算误差 $\Delta_V$.

产量误差 $\Delta q$ 和出液量误差 $\Delta_V$ 随着 $\Delta S_{\text{threshold}}$ 的变化如图 4 所示. 可以看出 $\Delta q$ 和 $\Delta_V$ 均随着 $\Delta S_{\text{threshold}}$ 的减小而减小. 当 $\Delta S_{\text{threshold}}=0.01$ 时, $\Delta_V<10^{-3}$ 而 $\Delta q<0.015$. 即用本文算法评估采收率时, 压力未及时更新所造成的额外误差小于 1‰, 而评估瞬时产量的误差也不超过 1.5%. 这个误差远小于数值模拟时其它因素造成的误差, 如地质建模的误差, 因此, 我们认为这个误差可以接受, 并在后续计算时取 $\Delta S_{\text{threshold}}=0.01$.

## 4　影响水窜的关键因素

我们知道, 水窜[21]主要源于底水锥进和水沿裂缝的高速窜流造成的水淹[22]. 其中底水锥进主要取决于重力驱流速和开发速度的竞争[2~4], 如图 5 所示, 水平井产量为 $Q$ 时, 底水以速度 $Q$ 向上补充, 造成底水水面拱起, 同时, 水平井附近拱起的底水在重力的驱动下, 以 $Q_g$ 的速度, 在远离水平井的位置向下流动. 底水能否到达生产井, 取决于 $Q$ 和 $Q_g$ 的竞争. 鉴于此, 我们定义无量纲数 $\Pi_g$

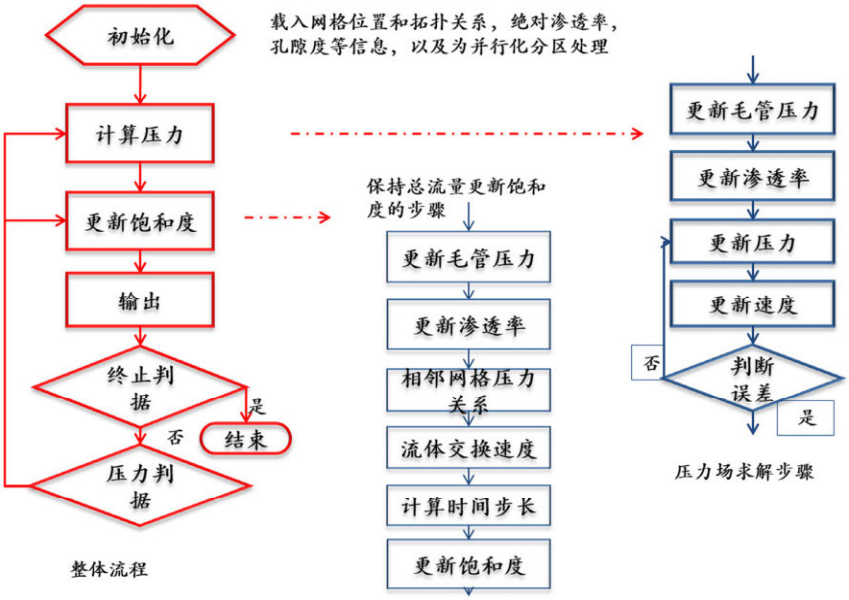


图 2　(网络版彩图)计算流程图



?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

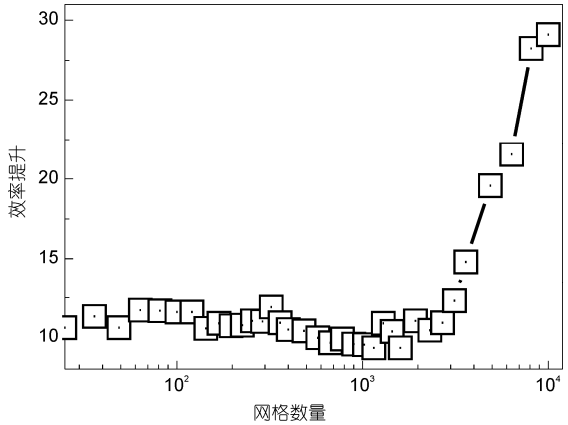


**图 3　本文算法与 IMPES 算法的计算效率之比随网格数的变化曲线**

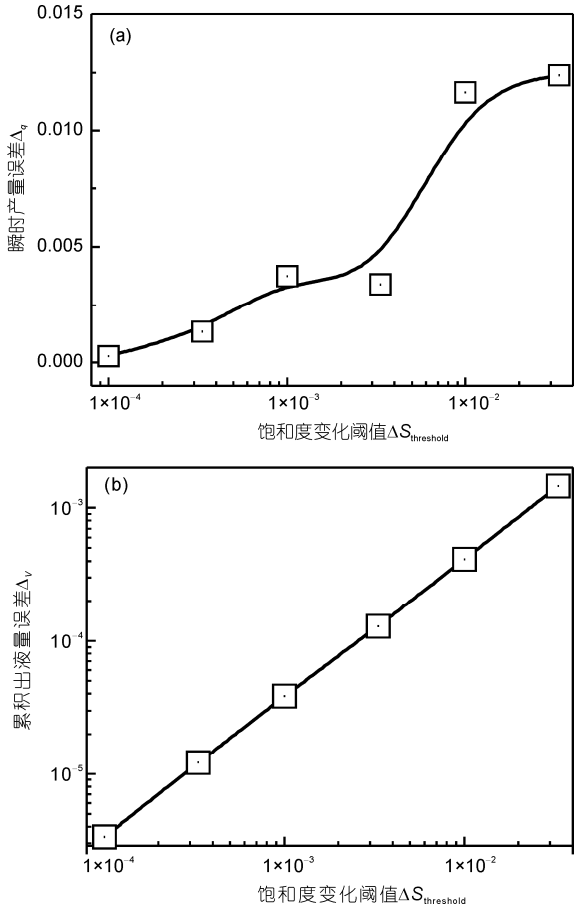


**图 4　计算误差随着$\Delta S_{threshold}$的变化曲线**

(a) 瞬时产量; (b) 累积出液量

$$\Pi_g \sim \frac{Q_g}{Q}, \tag{13}$$

根据 Darcy 定律, 可知

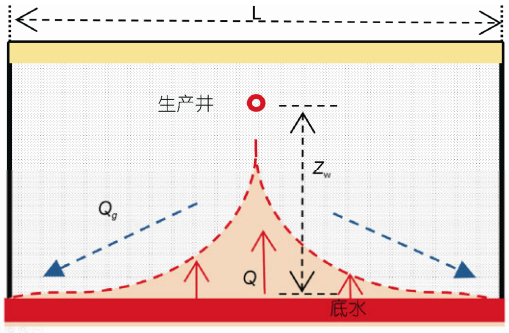


**图 5　(网络版彩图)底水锥进示意图**

$$Q_g \sim \frac{\Delta\rho g K Z_W^2}{\mu}, \tag{14}$$

其中$\Delta\rho$为油水密度差, $K$ 为渗透率, $Z_w$ 为水平井距油层底部的距离, $\mu$ 为粘度系数. 因此, 不妨定义

$$\Pi_g = \frac{\Delta\rho g K Z_W^2}{\mu Q}, \tag{15}$$

很明显$\Pi_g$刻画了重力驱流速和开发速度的竞争关系.

水沿裂缝的高速窜流主要取决于裂隙基质交换速度 $Q_{ex}$ 和生产速度 $Q$ 的竞争关系. 如图 6 所示, 基质中的油首先进入裂缝网络, 然后沿裂缝到达生产井, 因而, $Q_{ex}$ 越大, 就会有越多的油被采出. 因此, 不妨定义无量纲数$\Pi_{ex}$

$$\Pi_{ex} \sim \frac{Q_{ex}}{Q}, \tag{16}$$

考虑到

$$Q_{ex} \sim \frac{V}{T}, \tag{17}$$

其中 $V$ 为地层储量, $T$ 为渗吸半周期. 不妨定义

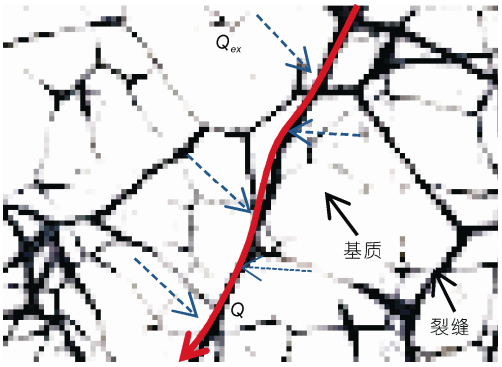


**图 6　(网络版彩图)油在双重介质中流动过程示意图**



?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$\Pi_{ex} = \frac{V}{TQ}, \tag{18}$$

很明显, 无量纲数$\Pi_{ex}$刻画了裂隙基质交换速度与生产速度的竞争关系.

本节以兴隆台潜山油藏为例, 综合考虑以上两无量纲参数对水窜的影响. 计算时采用三维地质模型和井网位置如图 1 所示. 其中孔隙度和渗透率沿着厚度方向分为四层, 图 1 中彩色线段为 41 口水平井. 地层主要参数列在表 1 中.

### 4.1　重力对水窜的影响

为考察$\Pi_g$的影响, 分析不同位置水平井的生产过程. 本文研究了区域内 41 口水平井同时生产的开发过程. 设每口井的产量为 100 方/d, 初始时刻各井的含油率均为 100%. 开发过程中各井含油率随时间变化如图 7 所示. 对比不同深度生产井含油率可见, 水平井的深度越深, 越容易被水淹, 开发效果越差. 进一步计算不同深度水平井的采收率, 结果如图 8 所示. 可见水平井的深度越深, 采收率越低. 分析原因可知: 水平井距离底水越近, 则$\Pi_g$越小, 重力作用越弱, 底水上升速度越快, 从而水窜越严重. 该计算结果和考虑底水锥进的理论公式的预测趋势一致[2~4].

**表 1　地层参数**

| 参数 | 取值 |
|---|---|
| 平均裂隙渗透率 $K_f$ | 14 mD |
| 平均裂隙孔隙度 $\Phi_f$ | 1% |
| 水密度 $\rho_w$ | 1000 kg m$^{-3}$ |
| 水黏性 $\mu_w$ | 0.31 mPa s |
| 平均基质渗透率 $K_m$ | 0.1 mD |
| 平均基质孔隙度 $\Phi_m$ | 4% |
| 油密度 $\rho_o$ | 850 kg m$^{-3}$ |
| 油黏性 $\mu_o$ | 0.51 mPa s |

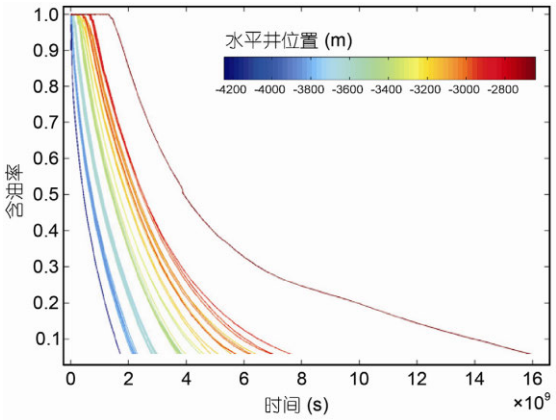


**图 7　不同深度水平井的含油率变化曲线**

### 4.2　裂隙-基质交换速度的影响

为考察$\Pi_{ex}$的影响, 我们分别计算了定产量 2 和 200 m$^3$/d 的生产过程. 图 9 分别显示了某一时刻裂隙和基质的含水饱和度分布云图. 由云图可知, 当产量为 2 m$^3$/d 时, 生产速度慢, $\Pi_{ex}$的值较大, 裂隙和基质中的流体有充足时间进行交换, 故裂隙和基质的饱和度几乎同步变化(图 9(a)); 而当产量为 200 m$^3$/d 时, 生产速度快, $\Pi_{ex}$的值较小, 裂隙基质交换不充分, 水在短时间内通过裂缝系统到达生产井, 导致基质中的含水饱和度上升缓慢(图 9(b)). 由此可见, 裂隙和基质中的流体是否有充足时间进行交换是基质中油能否被驱替的关键.

## 5　水窜控制优化分区图

根据以上计算结果分析可知, 控制水窜的主要因素有重力驱油的速度和裂隙-基质的交换速度, 下面我们通过一个算例来阐述一般情况下影响水窜的参数范围.

### 5.1　计算模型

设计算区域为正方形(如图 10 所示). 顶部为盖层, 中部地层为双重介质, 初始含水饱和度设为束缚水饱和度, 底部为底水. 计算区域竖直方向尺寸和水

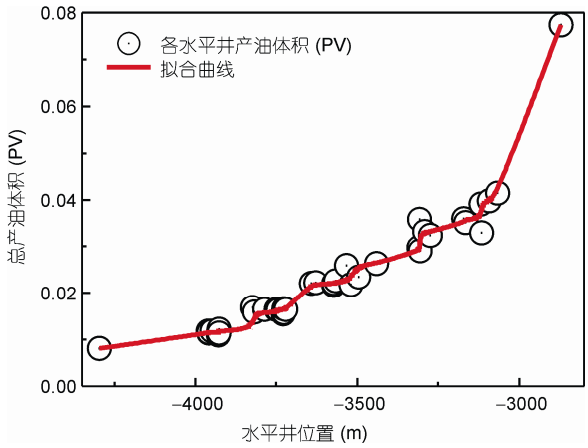


**图 8　总产油体积随着水平井位置的变化**



?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

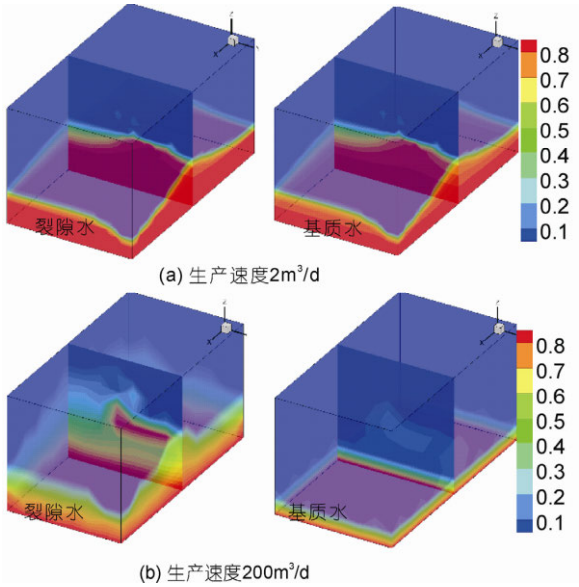


**图 9　某时刻裂隙水饱和度和基质水饱和度**

(a) 生产速度 2 $m^3/d$; (b) 生产速度 200 $m^3/d$

**图 10　计算条件设置示意图**

平方向相等，以模拟厚层情况．生产井在储层顶部．计算参数如表 2 所示．当生产井含水率达到 95%时输出采收率．

考察不同$\Pi_g$ 取值时生产井含水率和采油比例随时间的变化过程(如图 11(a)和(b)所示)，可见$\Pi_g$ 较小时，最终采油比例较低，而$\Pi_g$ 较大时，最终采油比例较高．同样观察$\Pi_{ex}$ 的影响(如图 11(a)和(c)所示)，可见$\Pi_{ex}$ 较小时，最终采油比例较低，而$\Pi_{ex}$ 较大时，最终采油比例较高．可见，增加$\Pi_g$ 和$\Pi_{ex}$ 的值均能够减弱水窜．

**表 2　无量纲参数取值范围**

| 无量纲参数参数 | 计算范围 |
|---|---|
| $\Pi_g$ | $[10^{-4}, 10^{2}]$ |
| $\Pi_{ex}$ | $[10^{-4}, 10^{2}]$ |

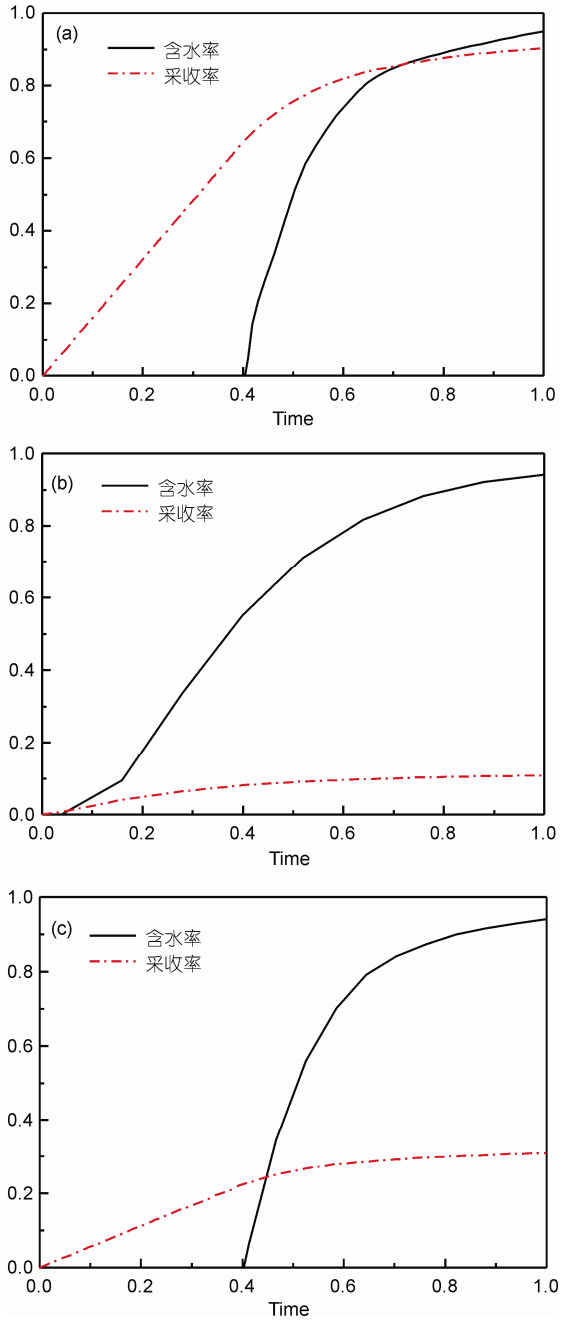


**图 11　驱替过程**

(a) $\Pi_g$=10, $\Pi_{ex}$=10; (b) $\Pi_g$=0.01, $\Pi_{ex}$=10; (c) $\Pi_g$=10, $\Pi_{ex}$=0.01



?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

### 5.2　分区图

为了更好地表征参数$\Pi_g$, $\Pi_{ex}$ 和采收率在生产过程中的关联性, 我们将采收率随$\Pi_g$ 和$\Pi_{ex}$ 的变化过程绘制于同一曲面(图 12). 依据图 12 可将参数划分为 3 个区域:

1) 区域 1. $\Pi_g$>0.1 且$\Pi_{ex}$>0.1, 裂隙和基质中的油均被排出, 采收率较高, 水窜控制达到最优;

2) 区域 2. $\Pi_g$>0.1 且$\Pi_{ex}$<0.1, 底水锥进得到控制, 裂隙中的油被排出; 交换速度很小, 基质中油未动用;

3) 区域 3. $\Pi_g$<0.1 且$\Pi_{ex}$>0.1, 底水锥进很强, 裂隙中的油排出较少; 交换速度虽然较大, 但底水锥进使生产井快速见水, 致使基质中的油亦未动用;

4) 区域 3. $\Pi_g$<0.1 且$\Pi_{ex}$<0.1, 水窜非常严重, 采收率极低, 实际生产必须避开该参数区域.

下面考察辽河油田的地质条件和井网状况下$\Pi_g$ 和$\Pi_{ex}$ 所处区域. 单井生产情况, 无量纲参数为$\Pi_{ex}\approx$ 22, $\Pi_g\approx$0.97, 即图中区域 1 的 A 点, 此时水窜可忽略. 41 口井同时生产情况, 无量纲参数为$\Pi_{ex}\approx$0.54, $\Pi_g\approx$ 0.023, 即图中区域 3 的 B 点, 此时容易发生水窜, 有必要调整开发方案, 使生产参数向区域 1 靠近.

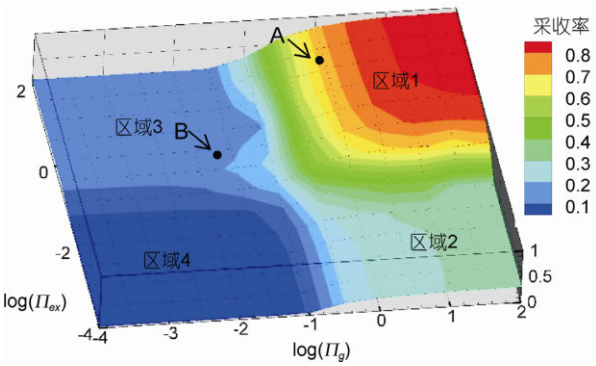


**图 12　采收率随着无量纲数$\Pi_g$ 和$\Pi_{ex}$ 的变化**

## 6　结论

1) 提出适用于辽河油田兴隆台潜山油藏复杂三维立体井网的算法, 该算法的核心是饱和度更新和压力场求解相互独立. 饱和度更新前无需实时计算压力场. 可根据相邻节点间的压力平衡关系更新饱和度;

2) 与 IMPES 方法相比, 该算法所得到的累计出液量误差很小. 当$\Delta S_{threshold}$=0.01 时, 误差小于 $10^{-3}$; 该算法的效率优势随着网格数的增加而增强. 在网格数为 10000 时, 计算速度提升 30 倍左右;

3) 定义了表征重力驱油速度和裂隙-基质的流体交换速度的两个无量纲参数$\Pi_g$ 和$\Pi_{ex}$. 绘制了裂缝性厚层油藏的水窜控制优化分区图. 根据采收率将$\Pi_g$ 和$\Pi_{ex}$ 对水窜的影响划分为 4 个区域, 可方便地用于生产过程的优化.

## 参考文献


1　任芳祥. 油藏立体开发探讨. 石油勘探与开发, 2012, 03: 320–325

2　张振军. 底水油藏水平井底水锥进影响因素分析. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2011, 02: 56–58

3　王小玮, 祁丽莎, 幸明刚, 等. 底水油藏水平井底水锥进理论研究. 石油地质与工程, 2013, 01: 104–105+108

4　Hatiboglu C, Babadagli T. Primary and secondary oil recovery from different-wettability rocks by countercurrent diffusion and spontaneous imbibition. SPE Reserv Eval Eng, 2008, 11: 418–428

5　Monteagudo J, Firoozabadi A. Comparison of fully implicit and IMPES formulations for simulation of water injection in fractured and unfractured media. Int J Numer Meth In Eng, 2007, 69: 698–728

6　Sun P, Xue G, Wang C, et al. Fast numerical simulation of two-phase transport model in the cathode of a polymer electrolyte fuel cell. Commun Comput Phys, 2009, 6: 49

7　Wu Y S, Qin G. A generalized numerical approach for modeling multiphase flow and transport in fractured porous media. Commun Comput Phys, 2009, 6: 85

8　Coats K. Impes stability: Selection of stable timesteps. SPE J, 2003, 8: 181–187

9　Chen Z, Huan G, Ma Y. Computational methods for multiphase flows in porous media. Philadelphia: SIAM, 2006

10　Arihara N. Reservoir simulation technology by streamline-based methods. J Jpn Petrol Inst, 2005, 48: 325–335

11　Aarnes J E, Kippe V, Lie K A. Mixed multiscale finite elements and streamline methods for reservoir simulation of large geomodels. Adv Water Resour, 2005, 28: 257–271




?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

12 Obi E O I, Blunt M J. Streamline-based simulation of carbon dioxide storage in a North Sea aquifer. Water Resour Resh, 2006, 42, doi: 10.1029/2004WR003347
13 Kou J S, Sun S Y. A new treatment of capillarity to improve the stability of IMPES two-phase flow formulation. Comput Fluids, 2010, 39: 1923–1931
14 Berenblyum R, Shapiro A, Jessen K, et al. Black oil streamline simulator with capillary effects. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, 2003
15 何应付, 尹洪军, 刘莉, 等. 复杂边界非均质渗流场流线分布研究. 计算力学学报, 2007, 05: 708–712
16 尹洪军, 周洪亮, 李美方, 等. 水平井井网渗流场的流线分析. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2009, 28: 82–84
17 李海生, 蔡强, 刘曰武. 渗流场流线构造方法研究. 计算机工程与应用, 2010, 46: 233–236
18 李再钧, 宫鹏骐, 王宇, 等. 多裂缝渗流场流线模拟方法. 断块油气田, 2012, 19: 225–227
19 Chen Z, Huan G, Li B. An improved IMPES method for two-phase flow in porous media. Transport Porous Med, 2004, 54: 361–376
20 丁祖鹏, 刘月田, 屈亚光. 裂缝油藏基质裂缝耦合渗流三维宏观物理实验. 特种油气藏, 2013, 06: 109–111, 136, 147
21 侯玮, 郭杰. 复杂断块油藏单井水窜动态诊断与综合识别. 断块油气田, 2011, 06: 772–775
22 张贤松, 丁美爱, 张媛. 水平井水窜类型识别方法及适应性分析. 特种油气藏, 2012, 05: 78–81, 154–155

# Numerical study of the water channeling problem in fractured thick oil reservoir

ZHANG ZhaoBin[1], LIN Mian[1], LI Yong[1] & REN FangXiang[2]

[1] *Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*
[2] *LiaoHe Oilfield of China National Petroleum Corporation, Panjin 124010, China*

For the fractured thick oil reservoir of LiaoHe oilfield, water channeling controlling is the key issue of the enhanced oil recorvery in next stage. A high-speed numerical method is proposed in this work and is used in the study of the cause of water channeling and how to control water channeling. Water saturation is updated by calculating the pressure balance of adjacent grid so that pressure solving in each step is not needed. The method is more concise than streamline method for the non-necessity of streamline calculation. Moreover, it is 30 times faster than the traditional IMPES method with comparable precision. Specific to the complex geologic body and horizontal well network, by the investigation of the controlling factors of water channeling, two dimensionless number, $\Pi_g$ and $\Pi_{ex}$ are defined to represent the ratio of gravity-driven flow vs. production flow and the ratio of fracture-matrix exchange flow vs. production flow. The influences of $\Pi_g$ and $\Pi_{ex}$ on water channeling are studied numerically. A zone chart of the strength of water channeling, which depends on $\Pi_g$ and $\Pi_{ex}$, is obtained. The variation tendency of water channeling with $\Pi_g$ and $\Pi_{ex}$ is analyzed. The result of the research has guiding significance for enhanced oil recorvery of LiaoHe oilfield.

**three-dimensional development, dual-media, IMPES, high-speed algorithm, water channeling**

doi: 10.1360/N092014-00097



?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net