天然裂缝性油藏双孔双渗数学模型的求解与应用*

施　英[1], 李　勇[2], 姚　军[3]
(1. 西南石油大学; 2. 中国石油勘探开发研究院; 3. 石油大学(华东))

摘　要: 本文以渗流力学理论为基础, 通过调研国内外相关文献, 建立了天然裂缝性油藏双孔双渗储层的数学模型, 并利用有限差分法建立了全隐式的三维三相驱替的数值模型。并对部分参数的求解做了相应介绍。基于求解的数值模型, 利用C++ 语言编写了数值模拟软件。对国内某碳酸盐岩油田中某一油藏单元实际模拟应用, 验证了模型的正确性和可靠性。表明本文建立的模型及编写的数值模拟软件具有较普遍的适用性。

关键词: 裂缝; 双孔双渗; 油藏数值模拟; 全隐式

随着世界碳酸盐岩油气田的大规模开发, 系统深入研究天然裂缝性油气田的渗流模式及其在开发中的应用已成为重要课题。1960 年, 苏联的 Barenblatt 等人首次针对裂缝性油气藏提出了双重介质的概念, 并建立了描述流体在这类储集层内渗流的双孔双渗达西渗流的数学模型。双孔双渗模型, 它不仅视裂缝系统为质量传递的通道, 而且认为基质岩块也具有一定的渗流能力, 只是能力大小存在差异。在随后的几十年内在裂缝性油藏数值模拟方面发表了大量的文章。我国的裂缝性油藏数值模拟起步较晚, 到目前为止尚未见到用全隐式对双孔双渗渗流模型进行联立求解的文章。本文建立了天然裂缝性油藏双孔双渗渗流模型, 并对其进行了全隐式联立求解。

1　三维三相双孔双渗黑油渗流模型

1.1　模型的基本假设

1.1.1　双重介质中的裂缝和基岩为相互独立而又互相联系的水动力学渗流系统, 两种连续介质在空间上是重叠的, 岩块为主要储油空间, 裂缝为主要的油流通道。

1.1.2　岩块中的流体和裂缝交换并通过裂缝渗流, 同时岩块间也存在流体渗流。只有通过裂缝向井底供液。

1.2　裂缝内的渗流方程

$$\begin{cases}\nabla\cdot[\frac{\rho_0 KK_{ro}}{\mu_0}\nabla(P_o-\rho_o gD)]_f+Q_o+\tau_{mfo}=\frac{\partial}{\partial t}(\phi S_o\rho_o)_f\\ \nabla\cdot[\frac{KK_{rg}\rho_g}{\mu_g}\nabla(P_g-\rho_g gD)]_f+\nabla\cdot[R_{so}\frac{KK_{ro}\rho_g}{\mu_0}(P_o-\rho_o gD)]_f+Q_g+\tau_{mfg}+R_{so}\tau_{mfo}=\frac{\partial}{\partial t}(\phi S_g\rho_g+R_{so}\phi S_0\rho_0)_f\\ \nabla\cdot[\frac{KK_{rw}\rho_w}{\mu_w}\nabla(P_w-\rho_w gD)]_f+Q_w+\tau_{mfw}=\frac{\partial}{\partial t}(\phi S_w\rho_w)_f\end{cases}\quad(1)$$

其中τ_{mf}为岩块与裂缝之间的窜流量。

基岩内的渗流方程

$$\begin{cases}\nabla\cdot[\frac{\rho_o KK\,ro}{\mu_o}\nabla(P_o-\rho_o gD]_m-\tau_{mfo}=\frac{\partial}{\partial t}(\phi S_o\rho_o)_m\\ \nabla\cdot[\frac{KK_{rg}\rho_g}{\mu_g}\nabla(P_g-\rho_g gD)]_m+\nabla\cdot[R_{so}\frac{KK_{ro}\rho_g}{\mu_o}\nabla(P_o-\rho_o gD)]_m-\tau_{mfg}-R_{so}\tau_{mfo}=\frac{\partial}{\partial t}(\phi S_g\rho_g+R_{so}\phi S_o\rho_o)_m\\ \nabla\cdot[\frac{KK_{rw}\rho_w}{\mu_w}\nabla(P_w-\rho_w gD)]_m-\tau_{mfw}=\frac{\partial}{\partial t}(\phi S_w\rho_w)_m\end{cases}\quad(2)$$

辅助方程

$S_{of}+S_{wf}+S_{gf}=1$　$S_{om}+S_{wm}+S_{gm}=1$　$p_{cowf}=p_{of}-p_{wf}$　$p_{cowm}=p_{om}-p_{wm}$　$p_{cgof}=p_{gf}-p_{of}$　$p_{cgom}=p_{gm}-p_{om}$

上述模型共有12 个方程, 通过将辅助方程代入

* 收稿日期: 2007- 09- 15

作者简介: 施英, 1973 年生, 工程师; 1996 年毕业于原江汉石油学院, 现从事油气田开发油气藏工程研究。

基岩和裂缝的渗流方程使模型只剩下六个方程，含有六个未知参数，因此方程是封闭的，代入边界条件和初始条件可求解该模型。初始条件为压力和饱和度的初始设置，边界条件分为内边界和外边界，内边界又分为定压和定产边界，外边界分为封闭和定压边界，具体情况本文不再赘述。模型中一般采用S_{wf}、S_{gf}或P_{bf}、S_{wm}、S_{gm}或P_{bm}、P_{of}和P_{om}作为未知量。

2 基岩与裂缝系统间的窜流量计算

本文采用 Gilman & Kazemi 方法计算基岩与裂缝间的窜流量，并对其进行适当修改并作全隐式求解。具体如下：

油组分：$-\tau_{mfo} = -\lambda_o(\Phi_{om} - \Phi_{of})$ (3)

水组分：$-\tau_{mfw} = -\lambda_w(\Phi_{wm} - \Phi_{wf})_m$ (4)

气组分：$-\tau_{mfg} - R_{so}\tau_{mfo} = -\lambda_g(\Phi_{gm} - \Phi_{gf}) - \lambda_o R_s(\Phi_{om} - \Phi_{of})_m$ (5)

式中τ_{mfo}、τ_{mfw}、τ_{mfg}分别为基岩与裂缝间油、水、气的窜流量。

其中

$$\lambda_w = 0.001127\sigma K_m V_b\left[w\left(\frac{K_{rw}\rho_w}{\mu_w}\right)_m + (1-w)\left(\frac{K_{rw}\rho_w}{\mu_w}\right)_f\right] \quad (6)$$

$\sigma = 4\left[\frac{1}{L_x^2} + \frac{1}{L_y^2} + \frac{1}{L_z^2}\right]$，$L_x$、$L_y$、$L_z$是岩块在三个方向的尺寸，单位为m；w = 0 或 1，w 的取值取决于上游是裂缝还是基岩。w = 1 表示窜流是从基岩流向裂缝的，如果 w = 0，则表示窜流是从裂缝到基岩。

3 渗流模型的求解

若空间差分项直接以流动势表示，则差分方程为

$$\begin{cases}\Delta T_{of}^{n+1}\Delta\Phi_{of}^{n+1} + T_{omf}^{n+1}(\Phi_{om}^{n+1} - \Phi_{of}^{n+1}) + Q_o^{n+1} = \frac{V_M}{\Delta t}[(\varphi b_o S_o)^{n+1} - (\varphi b_o S_o)^n]_f \\ \Delta T_{gf}^{n+1}\Delta\Phi_{gf}^{n+1} + R_{so}^{n+1}\Delta T_{of}^{n+1}\Delta\Phi_{of}^{n+1} + T_{gmf}^{n+1}(\Phi_{gm}^{n+1} - \Phi_{gf}^{n+1}) + R_{so}^{n+1}T_{omf}^{n+1}(\Phi_{om}^{n+1} - \Phi_{of}^{n+1}) + Q_g^{n+1} \\ = \frac{V_M}{\Delta t}\{[(R_{so}\varphi b_o S_o)^{n+1} - (R_{so}\varphi b_o S_o)^n] + [(\varphi b_g S_g)^{n+1} - (\varphi b_g S_g)^n]\}_f \\ \Delta T_{wf}^{n+1}\Delta\Phi_{wf}^{n+1} + T_{wmf}^{n+1}(\Phi_{wm}^{(n+1)} - \Phi_{wf}^{n+1}) + Q_w^{n+1} = \frac{V_M}{\Delta t}[(\varphi b_w S_w)^{n+1} - (\varphi b_w S_w)^n]_f\end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases}\Delta T_{om}^{n+1}\Delta\Phi_{om}^{n+1} + T_{omf}^{n+1}(\Phi_{om}^{n+1} - \Phi_{of}^{n+1}) = \frac{V_M}{\Delta t}[(\varphi b_o S_o)^{n+1} - (\varphi b_o S_o)^n]_m \\ \Delta T_{gm}^{n+1}\Delta\Phi_{gm}^{n+1} + R_{so}^{n+1}\Delta T_{om}^{n+1}\Delta\Phi_{om}^{n+1} - T_{gmf}^{n+1}(\Phi_{gm}^{n+1} - \Phi_{gf}^{n+1}) - R_{so}^{n+1}T_{omf}^{n+1}(\Phi_{om}^{n+1} - \Phi_{of}^{n+1}) \\ = \frac{V_M}{\Delta t}\{[(R_{so}\varphi b_o S_o)^{n+1} - (R_{so}\varphi b_o S_o)^n] + [(\varphi b_g S_g)^{n+1} - (\varphi b_g S_g)^n]\}_m \\ \Delta T_{wm}^{n+1}\Delta\Phi_{wm}^{n+1} - T_{wmf}^{n+1}(\Phi_{wm}^{(n+1)} - \Phi_{wf}^{n+1}) = \frac{V_M}{\Delta t}[(\varphi b_w S_w)^{n+1} - (\varphi b_w S_w)^n]_m\end{cases} \quad (8)$$

其中：$T = \left[\frac{\Delta Y\Delta Z}{\Delta X}K\right]\cdot\left[\frac{\rho K_r}{\mu}\right]$；$\Phi = P + \rho g D$，$\Phi$为流动势。

对于任意一个从t^n到t^{n+1}的时间步长，在用全隐式求解时，设任意变量X，定义任意两次迭代 l 和 l+1 之间的 X 差值为

$\bar{\delta}X = X^{l+1} - X^l$

即 $X^{l+1} = X^l + \bar{\delta}X$

而且 当 l = 0 时，$X^0 = X^n$

经过多次迭代

当 $|X^{l+1} - X^l| < \epsilon$ 时 $X^{l+1} = X^{n+1}$

其中ϵ为所给的精度要求。

由前述可知：$\delta X = X^{n+1} - X^n$

所以在迭代过程中：$\delta X \approx X^l - X^n + \bar{\delta}X$

因此在从t^n到t^{n+1}的时间步的迭代过程中，式(7)、(8)变为

$$\begin{cases}\Delta T_{of}^{l+1}\Delta\Phi_{of}^{l+1} + T_{ofm}^{l+1}(\Phi_{om}^{l+1} - \Phi_{of}^{l+1}) + Q_o^{l+1} = \frac{V_M}{\Delta T}[(\varphi b_o S_o)^l - (\varphi b_o S_o)^n + \bar{\delta}(\varphi b_o S_o)]_f \\ \Delta T_{gf}^{l+1}\Delta\Phi_{gf}^{l+1} + R_{so}^{l+1}\Delta T_{of}^{l+1}\Delta\Phi_{of}^{l+1} + T_{gmf}^{l+1}(\Phi_{gm}^{l+1} - \Phi_{gf}^{l+1}) + R_{so}^{l+1}T_{omf}^{l+1}(\Phi_{om}^{l+1} - \Phi_{of}^{l+1}) + Q_g^{l+1} \\ = \frac{V_m}{\Delta t}\{[(R_{so}\varphi b_o S_o)^l - (R_{so}\varphi b_o S_o)^n + \bar{\delta}(R_{so}\varphi b_o S_o)] + [(\varphi b_g S_g)^l - (\varphi b_g S_g)^n + \bar{\delta}(\varphi b_g S_g)]\}_f \\ \Delta T_{wf}^{l+1}\Delta\Phi_{wf}^{l+1} + T_{wmf}^{l+1}(\Phi_{wmf}^{l+1} - \Phi_{wf}^{l+1}) + Q_w^{l+1} = \frac{V_M}{\Delta t}[(\varphi b_w S_w)^l - (\varphi b_w S_w)^n + \bar{\delta}(\varphi b_w S_w)]_f\end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases}\Delta T_{om}^{l+1}\Delta\Phi_{om}^{l+1}-T_{omf}^{l+1}(\Phi_{om}^{l+1}-\Phi_{of}^{l+1})=\dfrac{V_M}{\Delta T}[(\varphi b_o S_o)^l-(\varphi b_o S_o)^n+\overline{\delta}(\varphi b_o S_o)]_m\\ \Delta T_{gm}^{l+1}\Delta\Phi_{gm}^{l+1}+R_{so}^{l+1}\Delta T_{om}^{l+1}\Delta\Phi_{om}^{l+1}-T_{gmf}^{l+1}(\Phi_{gm}^{l+1}-\Phi_{gf}^{l+1})-R_{so}^{l+1}T_{omf}^{l+1}(\Phi_{om}^{l+1}-\Phi_{of}^{l+1})\\ =\dfrac{V_m}{\Delta t}\{[(R_{so}\varphi b_o S_o)^l-(R_{so}\varphi b_o S_o)^n+\overline{\delta}(R_{so}\varphi b_o S_o)]+[(\varphi b_g S_g)^l-(\varphi b_g S_g)^n+\overline{\delta}(\varphi b_g S_g)]\}_m\\ \Delta T_{wm}^{l+1}\Delta\Phi_{wm}^{l+1}-T_{wmf}^{l+1}(\Phi_{wmf}^{l+1}-\Phi_{wf}^{l+1})=\dfrac{V_M}{\Delta t}[(\varphi b_w S_w)^l-(\varphi b_w S_w)^n+\overline{\delta}(\varphi b_w S_w)]_m\end{cases}\tag{10}$$

4　井的处理

由于模型假设只有裂缝向井底供液, 所以井的处理只是裂缝的渗流方程中产量项的处理。假设所有井为定液量生产, 则当井穿过多个网格时, 第 k 层各相产量的计算公式为:

$$Q_{ok}^{n+1}=\left(M_{olk}^n+\frac{\partial M_{olk}^n}{\partial P_{of}}\delta P_{of}+\frac{\partial M_{olk}^n}{\partial S_{wf}}+\frac{\partial M_{olk}^n}{\partial X_{gf}}\delta X_{gf}\right)Q_l\tag{11}$$

$$Q_{wk}^{n+1}=\left(M_{wlk}^n+\frac{\partial M_{wlk}^n}{\partial P_{of}}\delta P_{of}+\frac{\partial M_{wlk}^n}{\partial S_{wf}}\delta S_{wf}+\frac{\partial M_{wlk}^n}{\partial X_{gf}}\delta X_{gf}\right)Q_l\tag{12}$$

$$Q_{gk}^{n+1}=\left(M_{glk}^n+\frac{\partial M_{glk}^n}{\partial P_{of}}\delta P_{of}+\frac{\partial M_{glk}^n}{\partial S_{wf}}+\frac{\partial M_{glk}^n}{\partial X_{gf}}\delta X_{gf}\right)Q_l\tag{13}$$

对于生产井, $M_{olk}=\dfrac{[WI\lambda_o]_k}{\sum_{j=1}^{m}[WI(\lambda_o+\lambda_w)]_j}$, $M_{wlk}=\dfrac{[WI\lambda_w]_k}{\sum_{j=1}^{m}[WI(\lambda_o+\lambda_w)]_j}$, $M_{wlk}=\dfrac{[WI(\lambda_{gd}+\lambda_g)]_k}{\sum_{j=1}^{m}[WI(\lambda_o+\lambda_w)]_j}$, $WI=\dfrac{2\pi\Delta z}{\ln\dfrac{r_e}{r_w}+s}$、$\lambda_l=\dfrac{Kk_{rl}\rho_l}{u_l}$　$l=o,w,g$、$r_e=0.208\Delta x$。

则, 当给定全井产液量时, 第 k 层产油量的全隐式计算公式为:

$$Q_{ok}^{l+1}=\left(M_{olk}^l+\frac{\partial M_{olk}^l}{\partial P_{of}}\delta P_{of}+\frac{\partial M_{olk}^l}{\partial S_{wf}}+\frac{\partial M_{olk}^l}{\partial X_{gf}}\delta X_{gf}\right)Q_l\tag{14}$$

对于公式中的偏导数项, 可以略去$\dfrac{\partial\lambda_{of}}{\partial P_{of}}$及$\dfrac{\partial\lambda_{wf}}{\partial P_{of}}$, 其余的可分别按照前面讨论差分方程时的方法处理。对于三相渗流情况, 展开式(14)可得

$$Q_{ok}^{l+1}=\left(M_{olk}^l+\frac{\partial M_{olk}^l}{\partial S_{wf}}\delta S_{wf}+\frac{\partial M_{olk}^l}{\partial S_{gf}}\delta S_{gf}\right)Q_l=\left(\begin{aligned}&M_{olk}^l+\left(\frac{[\Delta ZK\frac{\rho_o}{\mu_o}]_k^l}{\sum_{j=1}^m[\Delta ZK(\frac{k_{ro}\rho_o}{\mu_o}+\frac{k_{rw}\rho_w}{u_w})]_j^l}\left(\frac{\partial k_{ro}}{\partial S_{wf}}\right)_k-\frac{[\Delta ZK\frac{k_{ro}\rho_o}{u_o}]_k^l\left([\Delta ZK\frac{\rho_o}{u_o}]_k^l\left(\frac{\partial k_{ro}}{\partial S_{wf}}\right)_k+[\Delta ZK\frac{\rho_w}{u_w}]_k^l\left(\frac{\partial k_{rw}}{\partial S_{wf}}\right)_k\right)}{\left(\sum_{j=1}^m[\Delta ZK(\frac{k_{ro}\rho_o}{u_o}+\frac{k_{rw}\rho_w}{u_w})]_j^l\right)^2}\right)\delta S_{wf}\\&+\left(\frac{[ZK\frac{\rho_o}{u_o}]_k^l}{\sum_{j=1}^m[\Delta ZK(\frac{k_{ro}\rho_o}{u_o}+\frac{k_{rw}\rho_w}{u_w})]_j^l}\left(\frac{\partial k_{ro}}{\partial S_{gf}}\right)_k-\frac{[\Delta ZK\frac{k_{ro}\rho_o}{u_o}]_k^l[\Delta ZK\frac{\rho_o}{u_o}]_k^l\left(\frac{\partial k_{ro}}{\partial S_{gf}}\right)_k}{\left(\sum_{j=1}^m[\Delta ZK(\frac{k_{ro}\rho_o}{u_o}+\frac{k_{rw}\rho_w}{u_w})]_j^l\right)^2}\right)\delta S_{gf}\end{aligned}\right)Q_l\tag{15}$$

同理可求得其他相产量项的展开式。

按照网格的标准排列方式, 三维三相双孔双渗模型形成的线性方程组的系数矩阵为一块状七对角矩阵, 每个矩阵块是 6×6 的小矩阵。利用块不完全 LU 分解的预处理共轭梯度法可对该方程组进行求解。

5　应用实例

利用 C++ 语言编写了全隐式求解三维三相裂缝性油藏双孔双渗模型的数值模拟软件, 利用该软件, 对国内某碳酸盐岩油田中某一油藏单元进行了模拟, 油藏网格划分及井位情况如图 1 所示。

储层模型的建立完全基于油藏描述的成果。在纵向上划分为四段, 裂缝系统的渗透率根据裂缝渗透率等值线场离散获得, 岩块系统的渗透率根据对该区裂缝发育程度的认识, 取对应层裂缝渗透率的 0.025 倍作为初始值; 岩块、裂缝系统的孔隙度场依据储量计算参数取值中各单井的测井解释结果, 然后通过插值产生。另外, 根据井的测试分析表明, 该单元的油水界面位于 5756－5962m 之间。

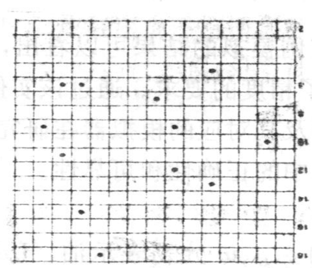

图 1　油藏的网格划分与井位

模型中,原油的高压物性数据取某单井测试结果的值,溶解油气比为 44m^3/m^3,饱和压力 15.7MPa,地下原油体积系数 1.0883,饱和压力下原油体积系数 1.24,地层原油密度 0.8968g/cm^3,地层原油粘度 37.55mPa.s,地面原油粘度 3000mPa.s,地层水体积系数为 1.0316,密度 1.12kg/m^3。孔洞系统的油水相渗曲线通过历史拟合后确定,裂缝系统的相渗曲线取对角线。

模拟区块的实际原始地质储量为 639.54 万方,拟合值为 624.79 万方,相对误差为 2.31%。图 2、图 3 给出了综合含水率、累积产油量、地层平均压力随时间变化的拟合曲线,拟合与实际生产的变化趋势基本一致。

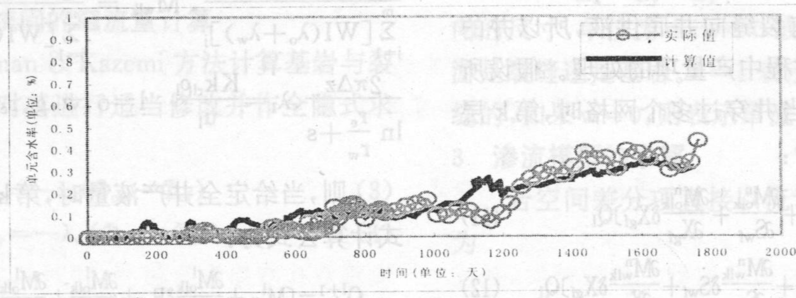

图 2 综合含水率拟合曲线

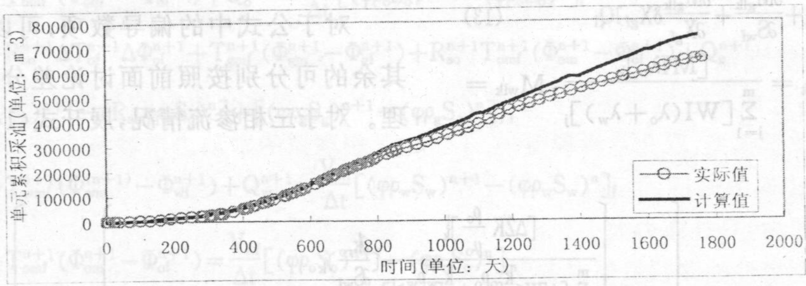

图 3 累积产油量拟合曲线

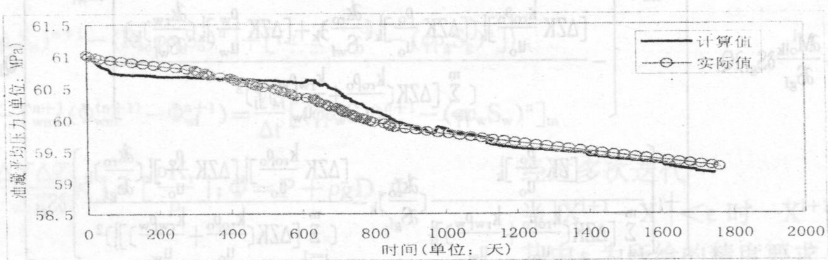

图 4 地层平均压力拟合曲线

6 结论

①本文建立了天然裂缝性三维油藏油、气、水三相的渗流模型及其全隐式的数值模型,通过块不完全 LU 分解的预处理共轭梯度法可对线性矩阵进行求解。

②从对实例模拟的结果可以看出,整体模拟效果较好,达到了精度的要求。通过该实例的计算,证实了本文模型及其对应的模拟器在研究天然裂缝性油藏数值模拟中的正确性和可靠性。

符号注释:

下标中的 o、g、w 分别表示油、气及水的参数,m、f 分别表示基岩系统与裂缝系统的参数,r 表示相对的;ρ 表示密度,Kg/m^3;K 为渗透率,μm^2;P 为压力,atm;Q 为井的产量,m^3/d;τ 为双重介质间窜流量;μ 为粘度,mPa.s;t 为时间,d;S 为饱和度;g 为重力加速度,m/s^2;R_s 为溶解气油比;Φ 为孔隙度;P_{cow}、P_{cgo} 表示油水及油气之间的毛管压力,atm;r_e、r_w 分别为井泄油半径和井筒半径,mm;s 为表皮因子;ΔX、ΔY、ΔZ 为网格在 X、Y、Z 方向的网格大小,m。

[参考文献]

[1] Warren, J. E. and Root, P. J. The Behavior of Naturally Fractured Reservoirs, SPEJ (Sept. 1963), PP. 245-255; AIME, Vol 228.

(下转第 77 页)

临界值计算表

砂粒直径(mm)		Φ73mm 油管	Φ139.7mm 套管	Φ177.8mm 套管
0.4	临界速度(m/min)	56	56	56
	临界排量(L/min)	169	678	1122
0.8	临界速度(m/min)	79	79	79
	临界排量(L/min)	238	857	1583

3　油层套损井涂料砂防砂工艺的改进

随着油田的开发,地应力不断变化,加上管材腐蚀等各种因素的影响,套管错断、变形时有发生,造成机械防砂无法进行,而涂料砂防砂一般都留有砂塞,需要钻塞下泵生产,对于套变后,大直径的钻头下不去,限制了涂料砂防砂工艺在套损井上应用。针对套损井的具体井况,改进了涂料砂现场施工工艺。在充填涂料砂 24 小时后,将井筒中的涂料砂冲出,根据室内试验,涂料砂在 60℃ 情况下 72 小时固化,然后将固化剂循环替至油层位置,关井候凝。这样,在井筒中不留砂塞,并在炮眼附近形成坚固的挡砂墙,达到防砂的目的。

T5-c20 井是临盘油田田家断块的一口套损井。该井 2006 年 7 月上作业时出砂严重,套管在 1613.73m 变形。利用该技术施工获得成功。目前,日产液量 4.4t,日产原油 2.6t,含水 40%。该技术目前不仅运用到套破井中,而且为了增强固化效果,2006 年在临盘 5 口井 L71-4、S84-11、P47-1、T18-7、P12-30 上也运用了该技术,除 L71-4 外,其余 4 口井目前都取得了很好的增油效果。

4　涂料砂防砂留塞工艺

传统的涂料砂防砂工艺是在填完涂料砂后钻塞下泵生产,然而对于注采对应好,地层能量充足,高含水的防砂井,如果将塞面钻至油层以下,则该井含水将居高不下,因此考虑到油水存在密度差异,采用不将油层砂面全部钻完的方法,改变地层流体的渗流方向,在保证施工成功的同时降低油井含水。目前在 L2-603 上试验。该井防砂前含水 89.8%,生产井段 1610m 至 1613m,在施工中钻塞至 1611m。从现在的生产情况来看,虽然日液降到 15.9t,但因含水下降(89.8%-84.1%)日油增加 1.6t。该井的成功为临盘下步同类井的施工提供了宝贵的经验。

5　结论

①涂料砂防砂施工中采用合理的充填排量和充填压力,从而选择合理的充填模式,能够提高防砂的有效率。

②挤压式充填能够提高涂料砂的充实强度,确保充填颗粒与空洞周壁紧密镶嵌。

③对于套变井采用涂料砂防砂后的不留塞工艺,取得理想的防砂效果,值得推广。

[参考文献]

[1]　张明明.环氧树脂涂料砂防砂研究.油田化学,1989,6(3).

[2]　薛峰.化学防砂新工艺的矿场试验研究,2001,8(8):61-64.

(上接第 72 页)

[2]　Kazemi H., Merrill L. S et al, Numerical Simulation of Water-Oil Flow in Naturally Reservoirs, SPEJ Dec 1976, 317-326, AIME, Vol. 261.

[3]　Gilman J. R. Kazemi H. Improvements in Simulation of Naturally Fractured Reservoirs, SPE paper on 10511 6th SPE Symposium Reservoir Simulation, (Feb, 1982).

[4]　Saidi A. M. Simulation of Naturally Fractured Reservoirs, SPE 12270 Proc. 7th Reservoir simulation Symposium (Nov. 16-18 1983), San Francisco.

[5]　Thomas, L. K. Dixon, T. N. and Pierson. R. G. Fractured Reservoir Simulation, SPEJ (Feb, 1983) 42-54; AIME. 275.

[6]　柏松章.碳酸盐岩潜山油田开发.北京:石油工业出版社.1996:211-234.

[7]　尹定.全隐式三维三相裂缝黑油模型.石油学报,1992;13(1):61-68.

[8]　王瑞河.双重介质拟组分模型.石油学报,1991;12(3):83-92.

Solution and Application to the Dual-Permeability Model of the Naturally Fractured Reservoirs

SHI Ying, LI Yong, YAO Jun

Abstract: Based on the fluid flow mechanism and the comprehensive investigation of the related papers, the dual-permeability flow model is established, which the fully implicit method is used for establishing the numerical model of there-dimensional and three-phase reservoirs. Some of parameters are explained in detail. Using C++ programming language, a reservoir simulator is developed. And the simulator is applied to one unit of a carbonate oil field in China. A reasonable result is received, and verify its accuracy. At the same time the result show that the model and the simulator have extensive applicability.

Key Words: Fracture; Dual-permeability; Reservoir Simulation; Fully Implicit Method