文章编号:1000-4874(2004)04-0440-06

# 低渗透裂缝油藏渗吸法采油 数值模拟理论研究<sup>\*</sup>

殷代印<sup>1,2</sup> 蒲辉<sup>1</sup> 吴应湘<sup>2</sup>

(1.大庆石油学院石油工程学院,黑龙江大庆 163318;2.中科院力学研究所,北京 100080)

摘 要: 根据低渗透裂缝油藏渗吸法采油渗流机理,建立了双孔双渗渗吸法采油数学模型,并给出了数值解法和流动 系数的取值方法。通过实例验证,该方法计算的含水率指标与矿场实际值符合程度较高。在此基础上,定量分析了渗吸法采 油的主要影响因素,结论是:裂缝与基质渗透率比大于100,裂缝密度大于0.030条/m,油水粘度比小于15,毛管力较大的水湿 油藏适合渗吸法采油,能够提高水驱采收率1%以上。

 关键词:
 渗吸法采油;数值模拟;毛管力;流动系数;采收率

 中图分类号:
 TE319
 文献标识码:A

# Numerical simulation of imbibition oil recovery for low permeability fractured reservoir

YIN Dai-yin<sup>1,2</sup> PU Hui<sup>1</sup> WU Ying-xiang<sup>2</sup>

(1. Petroleum Engineering Department, Daqing Petroleum Institute, Daqing 163318, China; 2. Institute of Mechanics CAS, Beijing 100080, China)

**Abstract :** Based on mechanism of imbibition oil recovery in low permeability fractured reservoir, a mathematical model of dual porosity and dual-permibility imbibition oil recovery is established, and numerical solution method and the acquiring value method of flow coefficient are presented. Through the verification of practical example, the corresponding water cut index, which is calculated by this method, meets the practical value of field site satisfactorily. On the basis of it, the main influential factors of imbibition oil recovery are quantitatively analyzed. The conclusion is that : those hydrophilic reservoirs, of which the permeability ratio of fractures to matrix is more than 100, the fracture density is more than 0.030 item per meter and the viscosity ratio of oil to water is less than 15 and the capillary force is greater, is suitable for imbibition oil recovery, and imbibition oil recovery can enhance waterflooding recovery ratio more than 1%.

Key words: Imbibition oil recovery; numerical simulation; capillary pressure; flow coefficient; recovery ratio

\* 收稿日期: 2004-02-11 作者简介: 殷代印(1966~),男,山东金乡人,副教授,博士后。 1 引言

天然裂缝发育的低渗透砂岩油藏 .常规注水开 发过程中,注入水沿裂缝窜流,基质内部水驱效果很 差。为此,一些低渗透油田开展了渗吸法采油试验。 其主要做法是油水井同时开关周期性生产或注水井 转抽。渗吸法采油的机理是,停注初期,弹性力起主 要作用,裂缝压力下降快,基质压力下降慢,基质中 的油流向裂缝;到二者的压力基本达到平衡后,毛管 力引起的吸渗起主要作用<sup>[1~2]</sup>,基质与裂缝之间发 生油水交换,有效地采出基质中的剩余油<sup>[3]</sup>。这种 方法最早在前苏联一些油田进行矿场尝试,目前,大 庆朝阳沟油田、头台油田也开辟了小规模的生产试 验,取得了一定的效果。由于国内外对渗吸法采油 理论方面所做的研究较少,还没有取得规律上的认 识。在制定渗吸法采油方案和指标预测时,一般采 用双孔介质模型 Simbest II 软件进行计算,该软件在 计算渗吸法采油问题时,存在以下两个方面的缺陷: (1) 软件预测效果明显低于油田实际开发效果。 Simbest II 软件在计算过程中,采用单点"上游权"系 数的方法<sup>[4]</sup>.目的是为了消除计算过程中的含水饱 和度"滞后"现象,这种方法对于常规注水开发是正 确的。但在渗吸法采油过程中,停产期间,由于毛管 力的作用将引起油水间的逆向渗流,即自吸渗现 象<sup>[5]</sup>,水从裂缝高含水部位流向基质低含水部位,油 相则相反。这样,对于水相流动系数,高含水部位含 水饱和度逐渐降低."上游权"流动系数取值方法加 剧含水饱和度"滞后"现象,造成计算含水率偏高。 (2)毛管力大小对渗吸法采油效果影响不敏感。在 已有数学模型中<sup>[6~8]</sup>,毛管力只是作为连带条件用 于消去水相压力或油相压力,最终形成单一相的压 力方程以便求解,而渗吸法采油过程中,停注期间毛 管力是驱动项、其大小对裂缝与基质间的交渗量具 有重要的影响。

针对上述问题,本文从渗流理论出发,建立了能 够描述渗吸法采油特点的数学模型,并推导出了数 值解,对影响渗吸法采油效果的主要因素进行了定 量分析。

### 2 数学模型

#### 2.1 **模型基本条件**

(1)油藏中存在油水两相流体渗流;(2)储层是 双孔双渗介质,流体在裂缝和基质中连续流动,基质 和裂缝间存在流体交换;(3)油藏中岩石和流体均 可压缩;(4)考虑毛管力和重力的影响。

2.2 双孔介质中油水渗流微分方程

$$\nabla \cdot {}_{0}\nabla_{cf} + q_{0} = \frac{\partial}{\partial t}({}_{f \ 0}s_{cf})$$
(1)

$$\nabla \cdot {}_{w} \nabla_{wf} + q_{w} = \frac{\partial}{\partial t} ({}_{f w} s_{wf})$$
(2)

$$\nabla \cdot {}_{0} \nabla_{om} - q_{0} = \frac{\partial}{\partial t} ({}_{m \ 0} s_{om})$$
(3)

$$\nabla \cdot {}_{w} \nabla_{wf} - q_{w} = \frac{\partial}{\partial t} ({}_{m \ w} s_{wm})$$
(4)

式中油相、水相流体的流动方程分别是

$$\mathbf{V}_{ol} = - \quad _{ol} ( \nabla p_{ol} - _{0} g \nabla D) \tag{5}$$

$$\mathbf{V}_{wl} = - \quad _{wl} ( \nabla p_{wl} - _{wg} \nabla D) =$$

$$- _{ol}( \nabla p_{ol} - _{og} \nabla D) + _{wl} \nabla G_{owl}$$
(6)

记  $\nabla G_{owl} = \nabla p_{cowl} + (w - o)g \nabla D; ol = KK_{rol}/\mu_o; wf = KK_{rwl}/\mu_w; l = ol + wl, l = f, m$ ;下标 f、m 分别代表裂缝和基质。 油相、水相流体总的流速

$$\mathbf{V}_{Tl} = - \ _{l} ( \nabla p_{ol} - \ _{og} \nabla D) + \ _{wl} \nabla G_{owl} \quad (7)$$

由式(5)、(6)、(7)得

$$\mathbf{V}_{wl} = F_{wl} \mathbf{V}_{Tl} + F_{sl} \nabla G_{owl} \tag{8}$$

$$\mathbf{V}_{ol} = F_{ol} \mathbf{V}_{Tl} - F_{sl} \nabla G_{owl} \tag{9}$$

2004年第4期

式中: F<sub>wl</sub> = wl/ 1, F<sub>ol</sub> = ol/ 1, 1 = ol + wl, F<sub>sl</sub> 2.3 差分方程 = ol wl/ 1。 对式(10) ~ 将式(8)和式(9)代入式(1)、(2)、(3)、(4)得: 式,差分方程分别

$$abla \cdot ( {}_oF_{of}\mathbf{V}_{Tf}) - \nabla \cdot ( {}_oF_{sf} \nabla G_{owf}) + q_o =$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(-_{f-o}s_{of}) \tag{10}$$

 $abla \ \cdot ( \ _w F_{wf} \mathbf{V}_{Tf}) \ + \ \nabla \ \cdot ( \ _w F_{sf} \ \nabla \ G_{owf}) \ + \ q_w \ =$ 

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_{w}s_{wf}) \tag{11}$$

$$\nabla \cdot ( {}_oF_{om} \nabla_{Tm}) - \nabla \cdot ( {}_oF_{sm} \nabla G_{owm}) - q_o =$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(m_{o}s_{om}) \tag{12}$$

$$\nabla \cdot ( {}_{w}F_{wm}\nabla_{Tm}) + \nabla \cdot ( {}_{w}F_{sm} \nabla G_{owm}) - q_{w} = \frac{\partial}{\partial t} ( {}_{m w}S_{wm})$$
(13)

辅助方程

$$q_o = _{om}(p_{om} - p_{of}) \qquad (14)$$

$$q_w = + w_m (p_{wm} - p_{wf})$$
 (15)

$$p_{cowl} = p_{ol} - p_{wl} \tag{16}$$

$$s_{ol} + s_{wl} = 1$$
 (17)

**窜流系数** =  $4/L_x^2 + 4/L_y^2 + 4/L_z^2$ ;  $L_x$ ,  $L_y$ ,  $L_z$ 分别表示 x, y, z 方向上裂缝间的距离<sup>(9)</sup>。

 $F_{wl}V_{tt}$ 的物理含义是,驱动压力梯度引起的水相的流量。( $F_{sl} \bigtriangledown G_{owl}$ )的物理含义是,毛管力梯度和重力分离引起水相流体的流量,而毛管力梯度和重力分离引起油相流体的流量大小与之相等但方向相反,即等于 -  $F_{sl} \bigtriangledown G_{owl}$ 。渗吸法采油停注期间,只存在毛管力梯度,驱动压力梯度引起的总流量为零,而毛管力梯度引起的水相、油相流体流量大小为 $F_{sl} \bigtriangledown G_{ow}$ ,方向相反。这样,根据渗吸法采油的特点,各种驱动项引起的流动可以分开研究。

2.3 差分方程 对式(10)~(13)进行差分,采用全隐式差分格 式,差分方程分别为

$$abla$$
 (  $_{o}F_{of}V_{Tf}^{n+1}$ ) - (  $_{o}F_{sf}$   $G_{ovf}^{n}$ ) +  $q_{o}$  =

$$t(f_{o}s_{of}) \tag{18}$$

$$( {}_{w}F_{wf}\nabla_{T_{f}}^{n+1}) + ( {}_{w}F_{sf}\nabla G_{owf}^{n}) + q_{w} =$$

$$( {}_{o}c {}_{s}c)$$

$$(19)$$

$$_{o}F_{om}\mathbf{V}_{Tm}^{n+1})$$
 - ( $_{o}F_{sm}$   $G_{owm}^{n}$ ) -  $q_{o}$  =

$$t (m_{o}S_{om})$$
(20)  

$$wF_{wm}V_{Tm}^{n+1}) + (wF_{sm} \nabla G_{owm}^{n}) - q_{w} =$$

$$t (m_{w}S_{wm})$$
(21)

式中: 为空间差分算子,  $= \frac{i+1/2}{x_i} + \frac{i+1/2}{x_i} + \frac{j+1/2}{y_j} + \frac{k+1/2}{z_k};$ ,为时间差分算 子,  $t = \frac{n+1}{i\cdot j\cdot k} - \frac{n}{i\cdot j\cdot k}, V_{Tl}^{n+1} = -t(p_{ol}^{n+1} - og) + wl G_{owl}^{n}$ 。

#### 2.4 流动系数的取值

流动系数的取值方法将会对计算精度产生重要 的影响<sup>[10~11]</sup>,近年来,在单点"上游权"方法的基础 上,又提出了两点"上游权"和三点"上游权"方 法<sup>[12~13]</sup>,提高了常规数值模拟的精度,但不能解决 渗吸法采油停产期间对流问题,为此,本文提出了新 的流动系数取值方法。

(1) 油水两相流动系数 <sub>lij</sub> 取调和平均 <sub>lij</sub> = \_<u>2\_li\_li</u>\_.

$$li + lj$$

(2) 压差驱动项系数 F<sub>wlij</sub>、F<sub>0lij</sub>的取值仍采用
 "上游点"方法;

(3) 毛管力驱动项系数 Fslij的取值方法。

 $F_{slij} = k_{ij} \frac{k_{ml}k_{nvl}}{\mu_w k_{rol} + \mu_o k_{nvl}} = k_{ij \ owlij}$ ,式中与时间 无关的绝对渗透率项  $k_{ij}$ 取调和平均; owlij的取值采 用以下方法:当 owi < 0时, owlij = owlj;当 owi0时, owij = owi。即裂缝周围高含水饱和度区采用

综合含水率						平均日产油				
时间	实际值	计算值	直(%)	绝对误差(%)		实际值	计算值(t/d)		相对误差(%)	
	(%)	Simbest II	本方法	Simbest II	本方法	(t/ d)	Simbest II	本方法	Simbest II	本方法
98.12	84.7	83.6	83.4	- 1.1	- 1.3	2.2	2.4	2.4	9.09	9.09
99.12	78.8	83.9	79.6	6.1	0.8	2.6	2.0	2.5	- 23.07	- 3.81
00.12	71.2	79.7	73.9	8.5	2.7	2.9	2.0	2.6	- 31.03	- 10.34
01.12	70.3	75.8	71.4	5.5	1.1	2.8	2.3	2.7	- 17.86	- 3.57
02.12	72.3	74.1	71.2	1.8	- 0.9	2.7	2.5	2.8	- 7.41	3.70
表 2 不同毛管力曲线渗吸法采油采收率提高值数据表										
毛管力	〕曲线				$p_{c2}$	p <sub>c3</sub>		$p_{c4}$		
采收率提	高值(%)	2.2			0.2		2.4		2.6	

表1 渗吸法采油试验区开发指标数据计算对比表

"下游点'取值,基质内部低含水饱和度区采用"上游 4 影响渗吸法采油效果的主要因素 点'取值。

## 3 模型验证

为了检验理论方法的准确性,编制了相应的数模 软件,以朝阳沟油田渗吸法采油试验为例进行了实际 验证计算,计算结果见表 1。试验区基本参数及生产 概况为:面积 2.1 Km<sup>2</sup>,油层平均渗透率 0.9 ×10<sup>-3</sup> µm<sup>2</sup>,孔隙度 9.7%;基质系统平均渗透率 0.36 ×10<sup>-3</sup> µm<sup>2</sup>,孔隙度 8.1%;裂缝系统平均渗透率 39.1 ×10<sup>-3</sup> µm<sup>2</sup>,孔隙度 1.6%,地下水粘度 0.86mPa s,地下原油 粘度 9.0mPa s。试验区 1994 年投产,到 1998 年 12 月,综合含水上升到 84.7%。1999 年 1 月至6 月试验 区停产,对 4 口水井进行了转抽作业,然后恢复生产。 到 2002 年 12 月,4 口转抽井累积产油 10498t,平均日 产油 4.5t/d,是其它生产井平均单产的 2 倍,取得了 良好的开发效果。

根据计算结果,本文提出的理论方法在计算渗吸 法采油含水率指标时,误差较小,而 Simbest II 软件计 算值明显偏高,不能正确反映渗吸法采油的效果。

#### 4.1 基质毛管力

理论分析表明<sup>[14~16]</sup>,对于水湿油藏,随着基质 毛管力的增大,渗吸强度增大,裂缝与基质间的渗吸 量增加,渗吸法采油效果变好。为了定量研究基质毛 管力的影响,分以下4种情况分别预测开发效果,毛 管力曲线见图1,计算结果见表2。(1)毛管力 *P*<sub>c1</sub> 为 实际曲线;(2)毛管力 *P*<sub>c2</sub>假设为零,即中性油藏;(3) 毛管力 *P*<sub>c3</sub>为实际曲线向上平移0.02Mpa;(4)毛管力 *P*<sub>c4</sub>的最大值等于 *P*<sub>c3</sub>的最大值,最小值等于 *P*<sub>c1</sub>的最 小值,即增大毛管力曲线的斜率。根据计算结果,实 际油藏条件下,与常规注水相比,渗吸法采油采收率 提高值为2.2%,效果明显;如果油藏为中性,毛管力 不存在,采收率提高值仅为0.2%,渗吸法采油效果 不大;增大毛管力值或曲线斜率时,采收率提高值由 2.2%分别增加到2.4%和2.6%。

#### 4.2 裂缝与基质渗透率比

朝阳沟油田渗吸法采油试验区裂缝与基质渗透 率比  $K_{f}/K_m = 110$ ,随着  $K_{f}/K_m$ 的减小,渗吸法采油 改善开发效果的作用逐渐变差,当  $K_{f}/K_m = 10$ 时,采



图 1 毛管力与含水饱和度关系曲线



图 2 无因次渗吸量与无因次时间的关系 收率提高幅度仅为 0.4%,与常规注水开发几乎没有 差别。其原因是,随着 *K/K*。减小,裂缝与基质渗透 率差异变小,注入水沿裂缝的窗流程度降低,渗吸法 采油与常规注水的差别明显降低。根据计算结果,当 裂缝与基质渗透率的比值大于 100 时,采收率提高幅 度在 2.0%以上,这样的油藏比较适合渗吸法采油。

#### 4.3 裂缝密度

朝阳沟油田实际裂缝密度为 0.064 条/m,如果其 它模拟参数不变,当裂缝密度减小到 0.030 条/m 时, 采收率提高幅度由 2.2%下降到 1.4%。这是因为, 随着裂缝密度降低,裂缝间距增大,裂缝与基质间的 渗吸面积和窜流系数 减小,渗吸量降低。

#### 4.4 油水粘度比

渗吸法采油过程中,裂缝与基质间渗吸量的大小 与原油粘度成反比。朝阳沟油田实际油水粘度比为 10.5,如果裂缝密度为 0.030 条/m,其它参数不变,改 变油水粘度比,分别预测渗吸法采油开发效果,计算 结果见图 2。从图 2 中看出,随着油水粘度比的增 大,采收率增值逐渐降低,导致渗吸法采油效果变差, 当油水粘度比大于 15 时,采收率增值低于 1 %,不适 合渗吸法采油。

#### 4.5 渗吸法采油开始的时间

根据渗吸法采油原理,只有裂缝系统被水饱和, 才会引起基质与裂缝间的油水交换,因此,渗吸法采 油开始的最早时间是生产井见水时刻。对于 *K<sub>f</sub>/ K<sub>m</sub>* 较高的油藏,常规注水时大量的水流经裂缝系统做无 效消耗,因此渗吸法采油开始的时间越早,无效注水量越少,渗吸法效果好;对于 *K<sub>f</sub>/ K<sub>m</sub>*较低的油藏,渗吸法采油降低无效水量和提高采收率的幅度较低,开始的时间不宜过早,应选择在中高含水期,生产并含水达到 70%以上,否则将会降低采油速度。

# 5 结论

 (1)建立了双孔双渗渗吸法采油数学模型,给出 了流动系数新的取值方法,提高了计算精度;

(2) 渗吸法采油适合于水湿裂缝性油藏,其效果 与毛管力大小和毛管力曲线斜率成正比;

(3) 采取渗吸法采油的裂缝油藏,若裂缝与基质 渗透率比大于100,裂缝密度大于0.030条/m,油水 粘度比小于15,则采收率提高幅度能够达到1%以 上;

(4)对于裂缝与基质渗透率比较高的油藏,采用 渗吸法采油的适当时间是开发早期;对于裂缝与基质 渗透率比较低的油藏是开发中晚期。

#### 参考文献:

- BROWNSCOMBE E R and DYES A B. Water imbibition displacement, a possibility for the spraberry [J]. Drill and Prod. Prac. API, 1952, 7(5): 383-390.
- [2] MATTAX C C and KYTE J R. Imbibition oil recovery from fractured[J]. Water Drive Reservoir. SPEJ, 1992, 6: 177-184.
- [3] 郭大立,等.计算各向异性岩心渗透率的方法研究[J]. 水动力学研究与进展,2004,19(1):61-64.
- [4] THOMAS and J METIN K. Dependence of Waterflood Remain ing Oil Saturation on Relative Permeablility, CapillaryPressure, and Reservior Parameters in Mixed Wet[R], Turbidite Sands. SPE30763, 1995.
- [5] 殷代印,翟云芳.裂缝性砂岩油藏周期注水数学模型及 注水效果的影响因素[J].大庆石油学院学报,2000,24 (1):88-90.
- [6] 程林松,等.考虑水驱油藏润湿性变化的数值模拟方法[J].水动力学研究与进展,2003,18(6):786-791.
- [7] 姜汉桥,等.不完全可逆变形介质油藏流体渗流模型及
   其数值解[J].水动力学研究与进展,2003,18(3):343-348.
- [8] YU Ding and RENARD G. A New Representation of Wells in Numerical Reservoir Simulation[R]. SPE25248, 1993.
- [9] DI DONATO, HUANG G and BLUNT M J. Streamline Base Dual Porosity Simulation of Fractured Reserviors [R].

SPE84036, 2003.

- [10] 闵涛,等. 河流水质纵向弥散系数反问题的迭代算法[J].水动力学研究与进展,2003,18(5):547-552.
- [11] HIRASAKI GJ. The Use of Variable Weighting to Eliminate Numerical Diffusion in Two Dimensional Two Phase Flow in Porous Media [R]. SPE10499, 1982.
- [12] TODD M R, O DHLL P M and HIRASAKI GJ. Methods for increased accuracy in numerical reservior simulators[J]. Soc. Pet. Eng., 1972, 12(6): 515-530.
- [13] JAMES C and ROLAND B. Reduction of Grid-Orientation Hfects in Reservior Simulation With Generalized Upstream Weighting[R]. SPE11593,1954.
- [14] SCHECHTER D S, ZHOU D and ORR F M. Capillary Imbibition and Gravity Segregation in Low IFT Systems [R]. Paper SPE 22594 presented at the 1991 SPE Annual Technical Corr ference and Exhibition, Dallas, Oct. 69.
- [15] CUIEC L E, BOURBIAUX B J and KALA YDJ IAN F J. Imbibition in Low-Permeability Porous Media: Understanding and Improvement of Oil Recovery [R]. paper SPE/ DOE 20259 presented at the 1990 SPE/ DOE Symposium on Enhanced Oil Recovery, Tulsa, April 22-25.
- [16] DU Prey L E. Gravity and capillarity effects on imbibition in porous media[J]. SPEJ, 1978, 18: 195-206.

www.cnlki.net