

低渗透油藏渗吸法采油的数值模拟

殷代印^{1,2}, 王国锋², 刘冠男³

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2. 大庆石油学院石油工程学院, 黑龙江大庆 163318; 3. 大庆油田有限责任公司第五采油厂, 黑龙江大庆 163517)

摘要: 针对渗吸法采油中的毛管力驱动项和流动系数的取值问题, 根据地下流体渗流特征, 建立了低渗透油藏渗吸法采油数学模型, 给出了数值解法. 定量分析了渗吸法采油的主要影响因素, 通过实例验证, 用该方法计算的各项动态指标与矿场实际值符合程度较高. 结果表明, 基质与裂缝渗透率之比小于 0.01, 油水黏度比小于 15, 毛管力较大的水湿油层比较适合于渗吸法采油, 能够提高水驱采收率 2% 左右.

关键词: 渗吸法采油; 毛管力; 数值模拟; 流动系数; 逆向渗流; 低渗透油藏

中图分类号: TE319 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1891(2004)02-0031-03

在常规注水开发过程中, 天然裂缝发育的低渗透砂岩油藏, 注入水沿裂缝窜流, 严重时, 可导致生产井爆性水淹, 被迫关井, 水驱采出程度很低. 为了提高低渗透裂缝性砂岩油藏水驱开发效果, 一些低渗透油田开展了渗吸法采油试验. 渗吸法采油主要是应用毛管力的吸渗作用^[1], 水从裂缝进入基质, 靠压差的调换, 油由基质流入裂缝, 再由裂缝通道被水驱到井底而采出^[2]. 这种方法最早在前苏联一些油田进行矿场尝试, 目前, 大庆头台、朝阳沟油田也进行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的研究较少, 因此, 还没有取得规律上的认识. 一般在制定渗吸法采油方案和指标预测时, 采用双孔介质模型 SimbestII 软件进行计算, 但该软件在渗吸法采油使用时, 存在缺陷^[3]. 针对毛管力驱动项和流动系数的取值问题, 笔者从渗流理论出发, 建立了能够描述渗吸法采油特点的数学模型, 推导出了数值解, 并定量分析了影响渗吸法采油效果的主要因素.

1 数学模型

1.1 基本条件

油藏中存在油水两相流体渗流; 储层是双孔单渗介质, 流体在裂缝中连续流动, 基质和裂缝间存在流体交换; 油藏中岩石和流体均可压缩; 考虑毛管力和重力的影响.

1.2 渗流微分方程

$$\nabla \cdot [\lambda_{of}(\nabla p_{of} - \rho_o g \nabla D)] + F_o q_T + \sigma F_s \Delta G_{cow} = \frac{\partial}{\partial t}(\varphi_f \rho_o s_{of}), \quad (1)$$

$$\nabla \cdot [\lambda_{wf}(\nabla p_{wf} - \rho_w g \nabla D)] + F_w q_T - \sigma F_s \Delta G_{cow} = \frac{\partial}{\partial t}(\varphi_f \rho_w s_{wf}), \quad (2)$$

$$- F_o q_T - \sigma F_{os} \Delta G_{cow} = \frac{\partial}{\partial t}(\varphi_m \rho_o s_{om}), \quad (3)$$

$$- F_w q_T + \sigma F_{ws} \Delta G_{cow} = \frac{\partial}{\partial t}(\varphi_m \rho_w s_{wm}), \quad (4)$$

式(1~4)中: $\lambda_{of} = KK_{rof} \rho_o / \mu_o$, $\lambda_{wf} = KK_{rwf} \rho_w / \mu_w$, $\lambda = \lambda_{om} + \lambda_{wm}$, $F_w = \lambda_{wm} / \lambda$, $F_o = \lambda_{om} / \lambda$, $F_s = \lambda_o \lambda_w / \lambda$; 下标 f, m 分别表示裂缝和基质; 窜流系数 $\sigma = 4/L_x^2 + 4/L_y^2 + 4/L_z^2$; L_x, L_y, L_z 分别表示 x, y, z 方向上裂缝间的距离;

收稿日期: 2003-07-17; 审稿人: 贾振歧; 编辑: 关开澄

作者简介: 殷代印(1966-), 男, 博士, 副教授, 主要从事油藏工程方面的研究.

q_T 为基质系统与裂缝系统之间的流体交换量, $q_T = \sigma\lambda_{om}(p_{om} - p_{of}) + \sigma\lambda_{wm}(p_{wm} - p_{wf})$; $\Delta G_{cow} = (p_{cm} - p_{cf})$, p_{cm} 和 p_{cf} 为基质系统与裂缝系统的毛管压力; F_o, F_w 为忽略重力和毛管力情况下, 即只有驱动压差作用时, 油、水相流体流量占总流体流量的百分数; $F_o q_T, F_w q_T$ 为驱动压力梯度引起的油、水相的流量, 且流动方向相同; $\sigma F_s \Delta G_{cow}, -\sigma F_s \Delta G_{cow}$ 为毛管力梯度引起油、水相的流量, 且大小相等而方向相反。

1.3 差分方程

式(1~4)的差分方程分别为

$$\Delta[\lambda_o(\Delta p_{of}^{n+1} - \rho_o g)] + F_o q_T + \sigma F_s \Delta G_{cow} = \Delta_t(\rho_o \phi_t s_{of}), \quad (5)$$

$$\Delta[\lambda_w(\Delta p_{wf}^{n+1} - \rho_w g)] + F_w q_T - \sigma F_s \Delta G_{cow} = \Delta_t(\rho_w \phi_f s_{wf}), \quad (6)$$

$$-F_o q_T - \sigma F_s \Delta G_{cow} = \Delta_t(\rho_o \phi_m s_{om}), \quad (7)$$

$$-F_w q_T + \sigma F_s \Delta G_{cow} = \Delta_t(\rho_w \phi_m s_{wm}), \quad (8)$$

式(5~8)中: Δ 为空间差分算子, $\Delta\varphi = \frac{\varphi_{i+\frac{1}{2}} - \varphi_{i-\frac{1}{2}}}{\Delta x_i} + \frac{\varphi_{j+\frac{1}{2}} - \varphi_{j-\frac{1}{2}}}{\Delta x_j} + \frac{\varphi_{k+\frac{1}{2}} - \varphi_{k-\frac{1}{2}}}{\Delta x_k}$; Δ_t 为时间差分算子,

$\Delta_t\varphi = \frac{\varphi_{i,j,k}^{n+1} - \varphi_{i,j,k}^n}{\Delta t_n}$. 可应用 IMPES 方法求解差分方程组^[4], 即用交替方向线松弛法求解压力, 用一步压力多步饱和度法求解相饱和度。

1.4 流动系数的取值

(1) 油水两相流动系数 λ_{ij} 取调和平均值, 即 $\lambda_{ij}^n = \frac{2\lambda_i^n \lambda_j^n}{\lambda_i^n + \lambda_j^n}$; (2) 毛管力驱动项系数 F_{sij} 的取值:

$F_{sij} = K_{ij} \frac{K_{ro}^n K_{rw}^n}{\mu_w K_{ro}^n + \mu_o K_{rw}^n} = K_{ij} K_{owij}^n$, 式中与时间无关的绝对渗透率 K_{ij} 取调和平均值; λ_{owij}^n 的取值采用以下方法: 当 $\lambda_{owi}^n \geq 0$ 时, $\lambda_{owij}^n = \lambda_{owj}^n$; 当 $\lambda_{owi}^n < 0$ 时, $\lambda_{owij}^n = \lambda_{owi}^n$.

2 实例

2.1 概况

试验区位于茂11区块, 面积为 2.1 km^2 , 油层平均渗透率为 $0.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 孔隙度为 9.7% . 基质系统平均渗透率为 $0.36 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 孔隙度为 8.1% ; 裂缝系统平均渗透率为 $39.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 孔隙度为 1.6% , 地下水黏度为 $0.86 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 地下原油黏度为 $9.0 \text{ mPa} \cdot \text{s}$. 1994年投产, 截至1996年12月, 综合含水率上升为 84.7% ; 1997年1月至4月试验区停产, 对4口水井转抽作业, 然后恢复生产。

2.2 开发效果及模型验证

截至2000年1月, 在4口转抽油井中3口井效果很好, 累积产油 $1.0498 \times 10^4 \text{ t}$, 平均产油 6.5 t/d , 远高于头台油田同期平均单井产量 $1 \sim 2 \text{ t/d}$. 3口转抽井的生产数据见表1. 对比理论计算与生产实际资料, 地层压力相对误差为 4.90% , 产液量相对误差为 3.2% , 含水率绝对误差为 0.9% , 各项指标

表1 头台油田转抽井开发数据

井号	转前累积注水/ 10^4 m^3	后累积产液/ 10^3 t	转后累积产油/ 10^3 t
茂09-19	1.6632	3.377	1.188
茂64-91	3.8817	10.095	5.913
茂65-92	2.4098	8.089	3.397

与矿场实际值符合程度较好, 该理论方法能够比较准确地描述渗吸法采油动态特征。

3 渗吸法采油的主要影响因素

3.1 基质渗透率与裂缝渗透率的比值 K_m/K_f

头台油田渗吸法采油试验区的 $K_m/K_f = 0.009$, 采收率提高幅度为 2.2% . 随着 K_m/K_f 的增加, 渗吸法采油开发效果逐渐变差, 当 $K_m/K_f > 0.1$ 时, 渗吸法采油与常规注水开发几乎没有差别, 采收率提高幅度为 0.4% . 这是因为, 一方面, 当 K_m/K_f 增大时, 裂缝与基质渗透率差异减小, 注入水沿裂缝的窜流程度

降低,渗吸法采油与常规注水的差别减小;另一方面,当 K_m/K_f 增大时,意味着微裂缝密度降低,裂缝不发育,单位体积油层中裂缝与基质间的渗吸面积减小,渗吸量降低.根据计算结果,采取渗吸法采油的油藏 K_m/K_f 应小于 0.01,这样,采收率提高幅度能够达到 2%.

3.2 油水黏度比 μ_o/μ_w

渗吸法采油过程中,裂缝与基质间渗吸量的大小与原油黏度成反比.在不同油水黏度比条件下,与常规注水相比,采收率提高值见图 1.从图 1 中看出,随着 μ_o/μ_w 的增大,采收率增加值逐渐降低,导致渗吸法采油效果变差,当油水黏度比大于 15 时,采收率增加值低于 1%,不适合渗吸法采油.

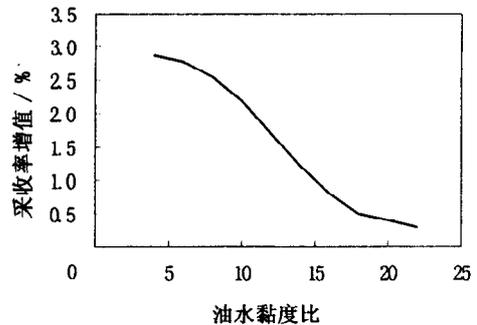


图 1 无因次渗吸量与无因次时间的关系

3.3 基质系统的毛管力

对于亲水油层,随着基质系统毛管力的增大,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,见图 2.毛管力大小可分成:(1)毛管力 p_{c1} 为实际毛管力曲线;(2)毛管力 p_{c2} 为实际毛管力曲线向上平移 0.02 MPa 的毛管力;(3)增大毛管力曲线的斜率,毛管力 p_{c3} 的最大值等于 p_{c2} 的最大值,毛管力 p_{c3} 的最小值等于实际毛管力的最小值;(4)假设毛管力 p_{c0} 为 0,根据表 2,如果不考虑毛管力的作用,采收率提高值仅为 0.2%,渗吸法采油效果不大;当毛管力为实际值时,采收率提高值达到 2.2%,效果明显;当增大毛管力值和曲线斜率时,采收率提高值增加.

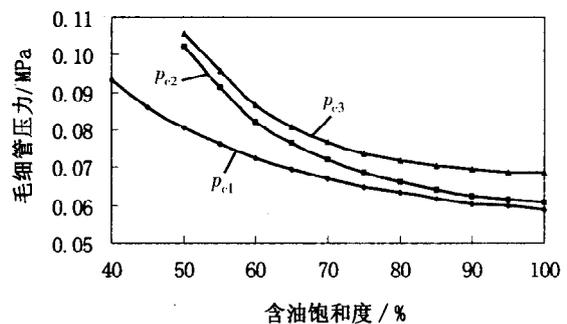


图 2 毛管力与含水饱和度

表 2 不同毛管力下水井转抽开发效果

p_{c0}/MPa			p_{c1}/MPa			p_{c2}/MPa			p_{c3}/MPa		
R_1	R_2	ΔR									
22.1	22.3	0.2	22.5	24.7	2.2	22.6	25.0	2.4	22.5	25.1	2.6

注: R_1 为常规采油采收率; R_2 为渗吸法采油采收率; ΔR 为二者的差值.

3.4 渗吸法采油开始的时间

对于 K_m/K_f 较低的油藏,连续注水时大量的水流经裂缝系统作无效消耗,因此渗吸法采油开始的时间越早,无效注水量越少,而裂缝与基质间的累积渗吸量增大,渗吸法效果好;对于 K_m/K_f 较高的油藏,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,否则将会降低采油速度.

4 结论

(1) 渗吸法采油只适合于水湿的裂缝性储层,基质渗透率与裂缝渗透率的比值应该小于 0.01,采收率提高幅度能够达到 2%.

(2) 油水黏度比越小、基质的毛管力越大,裂缝性砂岩油藏渗吸法采油的效果越好;当油水黏度比大于 15 时,采收率增加值低于 1%,不适合渗吸法采油.

(3) 对于基质渗透率与裂缝渗透率的比值较低的油藏,用渗吸法采油的适当时间是开发早期;对于基质渗透率与裂缝渗透率的比值较高的油藏是开发中晚期.

参考文献:

[1] 计秉玉. 垂向非均质油层周期注水力学机理研究[J]. 石油学报, 1993, 14(4): 54-58.
 [2] Kleppe, J, Morse R A. Oil Production from Fractured Reservoir by Water Displacement[R]. SPE AIME 5084, 1974.
 [3] 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.
 [4] 宋考平, 宋洪才, 吴文祥, 等. 油藏数值模拟理论基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996. 108-114.