

基于流线应用特征线方法求解双重 孔隙介质二维两相渗流问题

谢伟伟^{1,2}, 王晓冬^{1*}, 李晨^{1,3}, 侯晓春¹, 田丰¹

(1.中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083; 2.非常规天然气地质评价与开发工程北京市重点实验室,北京 100083; 3.海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室,北京 100083)

摘要:对于双重孔隙介质中的二维两相渗流问题,缺少考虑裂缝-基质渗吸作用的解析解,引入传播时间的概念,将二维两相渗流问题简化为一维两相渗流问题,沿着流线利用特征线方法可实现对双重孔隙介质二维两相渗流问题的解析求解。以五点井网为例,分析了裂缝-基质渗吸作用对亲水的双重孔隙介质水驱开发效果的影响,并介绍了均质和非均质油藏条件下求解方法的差异。研究表明,双重孔隙介质中水驱前缘推进速度快,生产井迅速见水,但是由于裂缝-基质渗吸作用的存在,见水后生产井含水率上升速度减缓。基质系统中的原油都是利用裂缝-基质渗吸作用采出的,因此,水驱是开发亲水的裂缝-孔隙型碳酸盐岩油藏的有效方法。研究成果为双重孔隙介质中水驱开发特征的研究提供了一种方便快捷求解的解析模型。

关键词:五点井网 两相 流线 双重孔隙 渗吸 解析解

中图分类号:TE312

文献标识码:A

Application of characteristics method for two-dimensional, two-phase seepage problem in dual-porosity medium based on streamline

XIE Weiwei^{1,2}, WANG Xiaodong¹, LI Chen^{1,3}, HOU Xiaochun¹, TIAN Feng¹

(1.School of Energy Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing City, 100083, China; 2.Beijing Key Laboratory of Unconventional Natural Gas Geological Evaluation and Development Engineering, Beijing City, 100083, China; 3.Key Laboratory of Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Enrichment Mechanism, Ministry of Education, Beijing City, 100083, China)

Abstract: The two-dimensional, two-phase seepage problem in dual-porosity medium is hard to derive its analytical solution when the imbibition effect of fracture-matrix was considered. By introducing the concept of travel of time (TOF), the two-dimensional, two-phase problem is simplified into a one-dimensional, two-phase problem. Along the streamline, the characteristics method can be used to solve the analytical solution of dual-porosity medium. Taking the five-spot well pattern for example, the effect of imbibition of fracture-matrix on the water flooding development in the dual-porosity medium was analyzed, and the calculation methods of saturation distribution for homogeneous and heterogeneous reservoirs were given respectively. Research results shows that the advance speed of water flooding front in the dual-porosity medium is fast, and the water breakthrough quickly occurs in production well in the dual-porosity medium. However, the water cut increases slowly after water breakthrough because of the existence of imbibition effect. The crude oil in the matrix system is recovered by the imbibition effect of fracture-matrix, therefore, water flooding is an effective method to develop fracture-pore carbonate reservoirs. The research results provide an effective analytical model for the research on the development charac-

收稿日期:2017-08-31。

作者简介:谢伟伟(1990—),女,河南许昌人,在读博士研究生,从事石油与天然气工程方面的研究。联系电话:15120077426, E-mail: 15120077426@163.com。

*通讯作者:王晓冬(1963—),男,黑龙江延寿人,教授,博士。联系电话:13366070319, E-mail: wxd_cug@cugb.edu.cn。

teristics of water flooding in the dual-porosity medium.

Key words: five-spot well pattern; two-phase; streamline; dual porosity; imbibition; analytical solution

裂缝-孔隙型碳酸盐岩油藏是重要的油藏类型之一,勘探开发潜力巨大^[1]。对于亲水的裂缝-孔隙型碳酸盐岩油藏,大量实验证明存在于基质系统中的原油都是依靠裂缝-基质渗吸作用采出的^[2-4],因此,水驱是开发该类油藏的重要手段。基于渗吸作用研究裂缝-孔隙型碳酸盐岩油藏水驱开发效果^[5]具有重要的实际意义。

前苏联学者早在1960年提出双重孔隙介质的概念,用来模拟天然裂缝发育的油藏中裂缝-基质的分布特征,并建立了双重孔隙介质两相渗流数学模型。WARREN等对原始的双重孔隙介质模型进行了简化处理^[6],这种简化的模型为深入研究双重孔隙介质水驱开发特征奠定了基础。陈钟祥等以实验室渗吸经验公式为基础,考虑裂缝-基质渗吸作用,建立了双重孔隙介质两相渗流方程,并利用特征线方法计算一维两相渗流问题的半解析解^[7]。朱亚东等根据双重孔隙介质中的两相渗流理论,推导其水驱特征曲线的解析表达式^[8]。桓冠仁采用数值模拟手段,研究了裂缝系统渗滤速度与基质系统渗吸速度之比以及裂缝系统中重力与驱动力之比对双重介质中渗吸机理的影响^[9]。

对于双重孔隙介质两维两相渗流问题,其求解要比一维两相渗流问题更为复杂。流线模拟方法能够将两维渗流问题简化为一维渗流问题,从而降低求解难度,因此,流线模拟方法在双重孔隙介质水驱开发问题的求解中得到了广泛应用。在假定流线不变条件下,郭大立等利用特征线方法计算了双重孔隙介质中水平井两相渗流问题的解析解,并给出了水平井见水时间公式^[10],为利用水平井开发双重孔隙介质底水油藏提供了理论参考,但其计算仍是基于 $x-y$ 坐标系,仅适用于均质油藏中的稳态渗流问题。国外学者也基于流线模拟方法研究了双重孔隙介质的水驱开发问题^[11-12],DI等建立了双重孔隙介质流线模型,并对比分析流线模拟方法和有限差分方法计算结果的区别,发现流线模拟方法的计算速度要远高于有限差分方法^[13-14]。

通过总结前人研究成果发现,对于双重孔隙介质中的两维两相渗流问题,大多利用数值方法进行求解,缺少适用于快速分析的解析求解方法。基于此,通过引入传播时间(TOF)^[15]的概念,将两维问题简化为一维问题,沿着流线利用特征线方法实现对双重孔隙介质两维两相渗流问题的解析求解。

1 双重孔隙介质模型

目前比较典型的双重孔隙介质模型有3种,分别为WARREN-ROOT模型、DE SWAN模型和KAZEMI模型。以WARREN-ROOT双重孔隙介质模型为例,阐述双重孔隙介质中的水驱油机理,并在考虑裂缝-基质渗吸作用的影响下分析了双重孔隙介质两维两相渗流问题。

1.1 考虑渗吸的渗流模型

对于双重孔隙介质,裂缝系统渗透率远大于基质系统渗透率,裂缝系统作为主要的流动介质,而基质系统则作为主要的储集空间,同时由于岩石亲水而发生渗吸作用,从而使基质系统中的原油被置换到裂缝系统中。假设渗入裂缝系统的流体流量用正值表示,渗出裂缝系统的流体流量用负值表示,则基于实验室渗吸经验公式建立的裂缝-基质渗吸强度随时间变化的表达式为^[7]

$$q_o(t) = R\lambda \left[S_{wf} - \lambda \int_0^t S_{wf}(\tau) e^{-\lambda(t-\tau)} d\tau \right] \quad (1)$$

在沿着流线建立饱和度方程之前,需要引入传播时间^[15]的概念,它是流线数值模拟过程中需要使用的一个重要变量。粒子沿着流线运动,移动一段距离所需要的时间称作传播时间,可表示为

$$\tau(s) = \int_0^s \frac{\phi}{v} ds \quad (2)$$

基于式(2),建立流线坐标下质量守恒方程为

$$\frac{\partial S_{wf}}{\partial t} + f_{wf}'(S_{wf}) \frac{\partial S_{wf}}{\partial \tau} + \frac{R\lambda}{\phi_f} \left[S_{wf} - \lambda \int_0^t S_{wf}(x, \tau) e^{-\lambda(t-\tau)} d\tau \right] = 0 \quad (3)$$

基于式(3),得到双重孔隙介质中裂缝系统和基质系统的质量守恒方程,分别表示为

$$\frac{\partial S_{wf}}{\partial t_D} + f_{wf}'(S_{wf}) \frac{\partial S_{wf}}{\partial \tau_D} + \frac{R}{\phi_f} \left[S_{wf} - e^{-\tau_D} \int_0^{\tau_D} S_{wf}(t_D) e^{\tau_D} dt_D \right] = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial S_{wm}}{\partial t_D} - \frac{R}{\phi_m} \left[S_{wf} - e^{-\lambda t_D} \int_0^{t_D} S_{wf}(t_D) e^{\lambda t_D} dt_D \right] = 0 \quad (5)$$

其中

$$t_D = \lambda t \quad (6)$$

$$\tau_D = \lambda \tau \quad (7)$$

对于式(4),若忽略渗吸项即为孔隙型介质的渗流方程。形如式(4)的这种复杂的一阶拟线性双曲型偏微分方程,直接求解十分复杂,因此,可利用

特征线方法将偏微分方程转化为一组常微分方程进行求解。

1.2 特征线方法求解

对于双重孔隙介质中的裂缝系统,其毛细力效应可忽略不计,含水饱和度为0~1,相渗曲线呈对角线形式,则含水率和含水率导数的方程分别为^[7]

$$f_{wf} = \left(1 + \mu \frac{1 - S_{wf}}{S_{wf}}\right)^{-1} \quad (8)$$

$$f'_{wf}(S_{wf}) = \frac{\mu}{[\mu + (1 - \mu)S_{wf}]^2} \quad (9)$$

其中

$$\mu = \frac{\mu_o}{\mu_w} \quad (10)$$

式(4)的特征线方程为

$$\frac{d\tau_D}{dt_D} = f'_{wf}(S_{wf}) = \frac{\mu}{[\mu + (1 - \mu)S_{wf}]^2} \quad (11)$$

对于每条特征线,沿特征线含水饱和度分布为

$$\frac{dS_{wf}}{dt_D} = \frac{R}{\phi_f} \left[e^{-\tau_D} \int_0^{\tau_D} S_{wf}(t) e^{t_D} dt_D - S_{wf} \right] \quad (12)$$

基于上述变化,将偏微分方程(4)转化为2个常微分方程,即式(11)和式(12)。对于常微分方程组,利用积分方法求解,可得到水驱前缘推进速度以及含水饱和度分布。

1.2.1 前缘推进方程

双重孔隙介质中裂缝系统的前缘含水饱和度始终为0,因此,利用式(11)可以得到含水饱和度为0的水驱前缘的传播速度,也就是水驱前缘的推进速度,即

$$\tau_D = \frac{1}{\mu} t_D \quad (13)$$

1.2.2 特征线方程求解

通过引入TOF的概念,将两维两相渗流问题简化为沿着流线的一维两相渗流问题,进而可以参考郭大立等对双重孔隙介质中一维两相渗流问题的求解方法^[10],对式(11)和式(12)进行求解。

对式(12)两边同时求导,可得

$$S''_{wf} = \frac{R}{\phi_f} \left[-e^{-\tau_D} \int_0^{\tau_D} S_{wf}(t) e^{t_D} dt_D + S_{wf}(t) - S_{wf} \right] \quad (14)$$

对于过点 (τ_{D0}, t_{D0}) 的特征线,在该点处含水饱和度为 S_{w0} 。结合式(12)和式(14)以及初始条件 $S_{w0}(\tau_{D0}, 0) = 0$,得到特征线上的含水饱和度分布函数表达式,即

$$S_{wf}(\tau_D, t_D) = S_{w0}(\tau_{D0}, t_{D0}) \times \frac{\phi_f + Re^{-\frac{\phi_f + R}{\phi_f} \tau_D}}{\phi_f + Re^{-\frac{\phi_f + R}{\phi_f} \tau_{D0}}} \quad (15)$$

当 $t_D = \infty$ 时,可得

$$S_{wf}(\infty) = S_{w0}(\tau_{D0}, t_{D0}) \times \frac{\phi_f}{\phi_f + Re^{-\frac{\phi_f + R}{\phi_f} \tau_{D0}}} \quad (16)$$

将式(15)代入特征线方程(11),积分求解可得

$$\tau_D - \tau_{D0} = \frac{\phi_f \mu}{(R + \phi_f)[(1 - \mu)S_{wf}(\infty) + \mu]} \times \left[\frac{(R + \phi_f)}{\phi_f} (t_D - t_{D0}) + \ln \frac{(1 - \mu)S_{wf}(t_D) + \mu}{(1 - \mu)S_{w0}(\tau_{D0}, t_{D0}) + \mu} - \frac{(1 - \mu)S_{wf}(\infty) + \mu}{(1 - \mu)S_{wf}(t_D) + \mu} + \frac{(1 - \mu)S_{wf}(\infty) + \mu}{(1 - \mu)S_{w0}(\tau_{D0}, t_{D0}) + \mu} \right] \quad (17)$$

求解了裂缝系统含水饱和度分布后,便可求得式(1)中的裂缝-基质渗吸强度,进而求解基质系统含水饱和度,最终得到式(5)的解为

$$S_{wm}(t_D) = S_{wmi} + RS_{w0}(\tau_{D0}, t_{D0}) \frac{\phi_f}{\phi_m} \frac{1 - e^{-\frac{R + \phi_f}{\phi_f} t_D}}{1 - e^{-\frac{R + \phi_f}{\phi_f} \tau_{D0}}} \quad (18)$$

利用特征线方法,沿着流线坐标实现了对两维两相渗流问题的解析求解。流线模拟方法的应用可以将双重孔隙介质的解析解推广到任意二维面积井网问题的求解当中。

2 五点井网模型

五点井网模型示意如图1a所示,其井排距均为 a 。在计算过程中,无论是均质还是非均质油藏,都可以考虑为稳态渗流问题,也就是说井网的流线可以认为是始终保持不变的(图1b)。

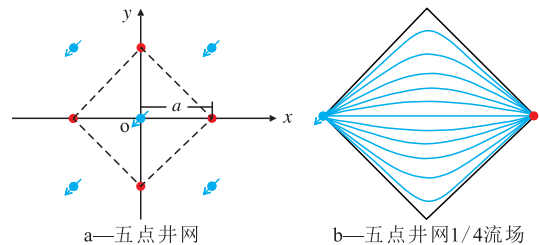


图1 五点井网示意

Fig.1 Sketch of five-spot well pattern

2.1 均质油藏

对于均质油藏中稳态渗流问题的求解,为了便于计算和推导,首先定义无量纲量

$$p_d = \frac{2\pi Kh(p - p_i)}{q\mu B} \quad (19)$$

$$x_d = \frac{x}{a} \quad (20)$$

$$y_d = \frac{y}{a} \quad (21)$$

利用压力叠加原理,得到均质油藏中五点井网压力分布函数,其表达式为

$$2p_d(x_d, y_d) = \ln \frac{\cosh \pi y_d + \cos \pi x_d}{\cosh \pi y_d - \cos \pi x_d} + (-1)^m \sum_{m=1}^{\infty} \ln \left[\frac{\cosh \pi(y_d - m) + \cos \pi x_d}{\cosh \pi(y_d - m) - \cos \pi x_d} \right] + (-1)^m \sum_{m=1}^{\infty} \ln \left[\frac{\cosh \pi(y_d + m) + \cos \pi x_d}{\cosh \pi(y_d + m) - \cos \pi x_d} \right] \quad (22)$$

利用达西公式可求得渗流速度函数的表达式为

$$v_{xd} = \frac{\pi \cosh \pi y_d \sin \pi x_d}{\sinh^2 \pi y_d + \sin^2 \pi x_d} + \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \left[\frac{\pi \cosh \pi(y_d - m) \sin \pi x_d}{\sinh^2 \pi(y_d - m) + \sin^2 \pi x_d} + \frac{\pi \cosh \pi(y_d + m) \sin \pi x_d}{\sinh^2 \pi(y_d + m) + \sin^2 \pi x_d} \right] \quad (23)$$

根据流函数定义,可得

$$-\frac{2\pi h}{qB} \psi(x_d, y_d) = \arctan \frac{\sin \pi x_d}{\sinh \pi y_d} + \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \left[\arctan \frac{\sin \pi x_d}{\sinh \pi(y_d - m)} + \arctan \frac{\sin \pi x_d}{\sinh \pi(y_d + m)} \right] \quad (24)$$

当流函数为常数时,式(24)就代表了一条流线,给定一系列不同的 x 值,即可求出相应的 y 值,这些点就构成了流线。由于五点井网的对称性,取一个标准井网单元的 1/4 作为研究对象,其结果与研究一个完整的井网单元是相同的。

需要注意的是, τ_D 与五点井网模型中无量纲量之间的关系为

$$\tau_D = \frac{2\pi \lambda h a^2 \phi_f}{qB} \int \frac{1}{v_{xd}} dx_d \quad (25)$$

基于TOF的定义,建立井网坐标与流线坐标之间的关系。以位于 x 轴上的主流线为例,分析流线在 $x-y$ 坐标系中的位置与流线坐标之间的关系,主流线的速度分布以及TOF分布如图2所示。由于

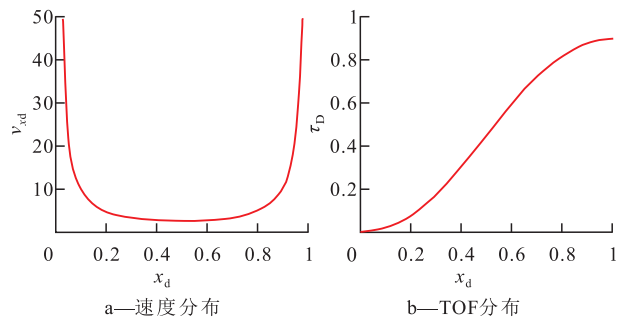


图2 五点井网主流线的速度分布和TOF分布

Fig.2 Distribution of velocity and TOF along the main streamline in five-spot well pattern

已假定五点井网的流场保持不变,那么对于任意一条流线来说,沿着流线的速度分布也保持不变,则流线坐标与井网坐标之间的对应关系也保持不变。基于这个原则,求得沿着流线坐标的含水饱和度分布后,可以根据 τ_D 与 (x_d, y_d) 之间的对应关系得到两维平面上的含水饱和度分布。

2.2 非均质油藏

对于非均质油藏中的五点井网,无法利用压力叠加原理求得解析流场。因此,对于非均质油藏中两维两相渗流问题的求解可以利用半解析的方法,即数值求解压力方程,解析求解饱和度方程,具体计算步骤包括:①将五点井网化成正交网格系统 (i, j) , 并利用差分方法离散化求解压力方程,得到正交网格系统 (i, j) 中的压力分布。②在压力场基础之上,利用达西公式求得速度场。③已知速度场后,通过 Pollock 方法追踪流线,得到五点井网中的流线分布。在追踪流线的同时,得到沿着流线的 TOF 分布,并记录每条流线上 TOF— (i, j) 的对应关系。④沿着流线 n , 利用式(15)、式(17)和式(18)可以求得任意时刻、任意 τ_D 位置处的含水饱和度。⑤利用流线 n 上的 τ_D —TOF, 以及 TOF— (i, j) 的对应关系, 就可以得到流线流经网格 (i, j) 的含水饱和度。⑥重复计算步骤④和⑤, 即可求得每一条流线上的含水饱和度场分布, 最终得到五点井网不同位置处的含水饱和度分布。

3 算例分析

对于均质油藏中的五点井网,参数取值包括: $q = 100 \text{ m}^3/\text{d}$, $a = 100 \text{ m}$, $h = 10 \text{ m}$, $\phi_m = 0.15$, $\phi_f = 0.05$, $\lambda = 6.9315 \times 10^{-4} \text{ d}^{-1}$ 。利用解析解即式(15)一式(18),沿着流线求得裂缝系统和基质系统含水饱和度的变化,然后利用式(25)建立的 $\tau_D - x_d$ 关系,进而求得五点井网不同位置处的含水饱和度分布。

3.1 主流线开发指标计算

以主流线为例,利用解析解分析裂缝系统和基质系统含水饱和度的变化(图3)。对比 $R = 0$ (不考虑裂缝-基质渗吸作用)和 $R = 0.1$ (考虑裂缝-基质渗吸作用)这2种情况的计算结果可以发现,当注入时间较短时,含水饱和度分布的差异并不大,随着注入时间的增长,渗吸作用的存在导致含水饱和度分布的差异越来越大,因此,在实际计算中,应当考虑渗吸作用的影响。

裂缝系统中前缘位置含水饱和度为0,因此裂

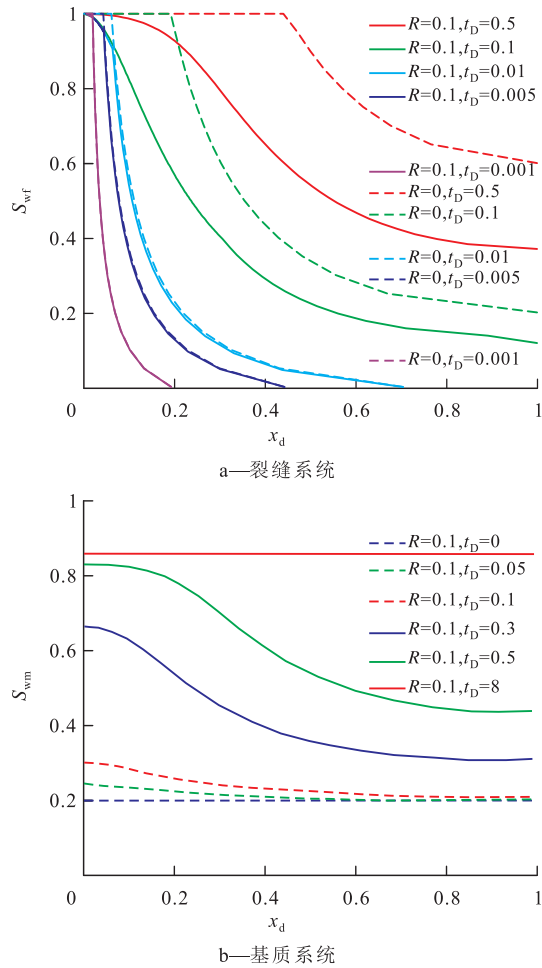


图3 主流线含水饱和度分布

Fig.3 Distribution of water saturation along the main streamline

缝系统中前缘推进速度很快,生产井会快速见水。在注水前期,基质系统含水饱和度增加缓慢;注水一段时期后,基质系统含水饱和度增加速度显著增大,基质系统中大部分原油都是在这一阶段由渗吸作用进入裂缝系统从而被采出;注水后期含水饱和度增加速度又再次变缓,这是由于注水后期基质系统中的大部分原油已被置换出去,渗吸作用减弱。

由主流线含水率变化(图4)可见,在注水前期,

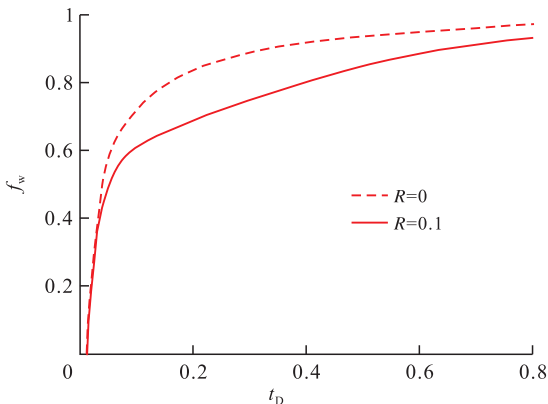


图4 主流线含水率变化

Fig.4 Variation of water cut of the main streamline

裂缝-基质渗吸作用对含水率的变化影响不大,随着注水开发的持续进行,当考虑渗吸作用时,含水率的平均上升速度明显变慢,也就是说裂缝-基质渗吸作用有利于提高双重孔隙介质的采收率。

3.2 水驱前缘以及含水饱和度分布

由考虑裂缝-基质渗吸作用和不考虑裂缝-基质渗吸作用时不同时刻下井网水驱前缘位置(图5a)可以发现,对于双重孔隙介质来说,渗吸作用对前缘位置的推进并没有影响,这一点也可以通过前缘推进方程(13)看出。也就是说,对于双重孔隙介质,渗吸作用对井网的面积波及系数没有影响,但是能够提高油藏的驱油效率。

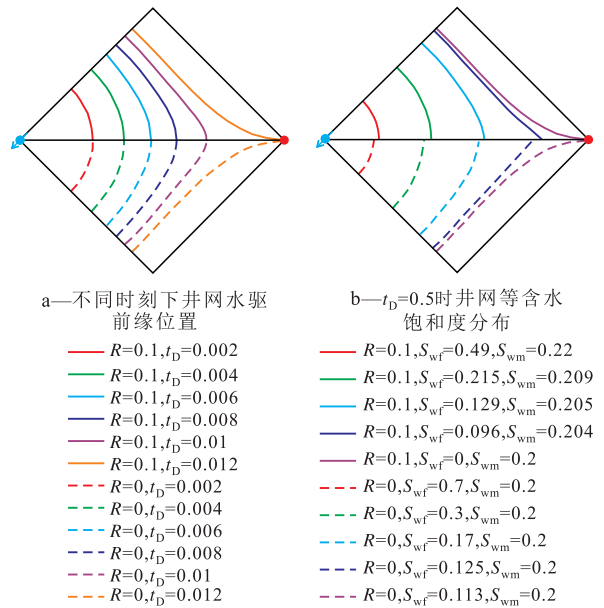


图5 井网水驱前缘位置及等含水饱和度面分布

Fig.5 Position of water flooding front and distribution of iso-saturation surface of five-spot well pattern

通过计算不同流线上的含水饱和度分布,进而得到井网的含水饱和度分布。分析 $t_D = 0.5$ 时井网等含水饱和度面分布(图5b)可以发现,渗吸作用对于井网含水饱和度的分布有较大影响,不考虑渗吸作用时,基质系统含水饱和度始终为束缚水饱和度,而裂缝系统含水饱和度远高于考虑渗吸作用时裂缝系统含水饱和度的值。因此,渗吸作用对双重孔隙介质水驱开发过程起到了积极的作用,有利于减缓见水后的含水率上升速度,提高油藏采收率。

4 结论

通过引入传播时间的概念,将双重孔隙介质中的两维两相渗流问题简化为一维两相渗流问题,而一维两相渗流问题可很容易地得到解析解。以五点井网为例,分析如何利用解析解求取双重孔隙介

质中面积井网含水饱和度分布。

对于亲水的双重孔隙介质,水驱前缘推进速度快,油井见水时间早,但由于渗吸作用的存在,见水后含水率平均上升速度相对缓慢,此外,基质系统中的原油都是利用渗吸作用采出的,因此,水驱是开发亲水的裂缝-孔隙型碳酸盐岩油藏的有效方法。

所提出的计算方法也可以推广到非均质油藏中,不同的是,对于非均质油藏来说,流场分布和传播时间的计算需要用数值求解方法,在得到流场分布和传播时间分布后,含水饱和度分布依然可以利用所提出的解析解进行计算。

符号解释:

q_o —— 裂缝-基质渗吸强度, s^{-1} ; t —— 时间, s ; R —— 由渗吸作用从单位岩块中最终渗出的油量百分比; λ —— 与渗吸作用相关的常数, s^{-1} ; S_{wf} —— 裂缝系统含水饱和度; τ —— 沿着流线的传播时间, s ; s —— 粒子沿着流线的距离坐标, m ; ϕ —— 油藏孔隙度; v —— 流体渗流速度, m/s ; f_{wf} —— 裂缝系统含水率; ϕ_f —— 裂缝系统孔隙度; x —— 直角坐标系中 x 方向上的距离, m ; S_{wm} —— 基质系统含水饱和度; ϕ_m —— 基质系统孔隙度; μ —— 油水粘度比; μ_o —— 油相粘度, $Pa \cdot s$; μ_w —— 水相粘度, $Pa \cdot s$; (τ_{D0}, t_{D0}) —— 特征线起始点的坐标; S_{wD0} —— 特征线上 (τ_{D0}, t_{D0}) 位置处对应的裂缝系统含水饱和度; S_{wmD} —— 基质系统中的束缚水饱和度; a —— 相邻两井的井距, m ; p —— 油藏压力, Pa ; p_d —— 无量纲油藏压力; K —— 油藏渗透率, m^2 ; h —— 油藏的厚度, m ; p_i —— 原始油藏压力, Pa ; q —— 井的流量, m^3/s ; B —— 原油体积系数; y —— 直角坐标系中 y 方向上的距离, m ; m —— 井排序号; v_{ad} —— x 方向上的无量纲渗流速度; ψ —— 流函数。

参考文献:

- [1] 黄娟,叶德燎,韩彧.超深层油气藏石油地质特征及其成藏主控因素分析[J].石油实验地质,2016,38(5):635-640.
HUANG Juan, YE Deliao, HAN Yu. Petroleum geology features and accumulation controls for ultra-deep oil and gas reservoirs [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(5): 635-640.
- [2] 许建红,马丽丽.低渗透裂缝性油藏自发渗吸渗流作用[J].油气地质与采收率,2015,22(3):111-114.
XU Jianhong, MA Lili. Spontaneous imbibition in fractured low permeability reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(3): 111-114.
- [3] 李爱芬,凡田友,赵琳.裂缝性油藏低渗透岩心自发渗吸实验研究[J].油气地质与采收率,2011,18(5):67-69.
LI Aifen, FAN Tianyou, ZHAO Lin. Experimental study of spontaneous imbibition in low permeability core, fractured reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(5): 67-69.

- [4] 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[J].特种油气藏,2013,20(6):109-111.
DING Zupeng, LIU Yuetian, QU Yaguang. 3D macro physical experiment of matrix-fracture coupling flow in fractured reservoirs [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013, 20(6): 109-111.
- [5] 曹立迎,刘传喜,孙建芳,等.低渗透碳酸盐岩稠油油藏热复合化学方法提高采收率实验[J].油气地质与采收率,2016,23(3):101-105.
CAO Liying, LIU Chuanxi, SUN Jianfang, et al. EOR experiment of thermal compound chemical technology in low permeability carbonate heavy oil reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(3): 101-105.
- [6] WARREN J E, ROOT P J. The behavior of naturally fractured reservoirs [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1963, 3(3): 245-255.
- [7] 陈钟祥,刘慈群.双重孔隙介质中二相驱替理论[J].力学学报,1980,12(2):152-165.
CHEN Zhongxiang, LIU Ciqun. Theory of fluid displacement in a medium with double-porosity [J]. Acta Mechanica Sinica, 1980, 12(2): 152-165.
- [8] 朱亚东,李功治.裂缝性油藏驱替特征曲线研究及其应用[J].大庆石油地质与开发,1985,4(1):29-39.
ZHU Yadong, LI Gongzhi. Characteristic curve of water-oil displacement and its application to fractured reservoirs [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1985, 4(1): 29-39.
- [9] 桓冠仁.论双重介质两相驱替机理[J].石油勘探与开发,1982,9(1):48-65.
HUAN Guanren. A discussion of the mechanism of the displacement of oil by water in a medium with double porosity [J]. Petroleum Exploration and Development, 1982, 9(1): 48-65.
- [10] 郭大立,刘慈群.裂缝性底水油藏中水平井两相渗流模型[J].石油勘探与开发,1995,22(6):44-46.
GUO Dali, LIU Ciqun. Two-phase flow in a horizontal well penetrating a naturally fractured reservoir under bottom water drive [J]. Petroleum Exploration and Development, 1995, 22(6): 44-46.
- [11] MORENO J, KAZEMI H, GILMAN J. Streamline simulation of countercurrent water-oil and gas-oil flow in naturally fractured dual-porosity reservoirs [R]. SPE 89880, 2004: 1-14.
- [12] AI-HARBI M H. Streamline-based production data integration in naturally fractured reservoirs [D]. College Station: Texas A & M University, 2005.
- [13] DI DONATO G, HUANG W, BLUNT M. Streamline-based dual porosity simulation of fractured reservoirs [R]. SPE 84036, 2003: 1-11.
- [14] DI DONATO G, LU H, TAVASSOLI Z, et al. Multirate-transfer dual-porosity modeling of gravity drainage and imbibition [J]. SPE Journal, 2007, 12(1): 77-88.
- [15] DATTA-GUPTA A, KING M J A. A semianalytic approach to tracer flow modeling in heterogeneous permeable media [J]. Advances in Water Resources, 1995, 18(1): 9-24.