

基于流线的聚合物驱热降解数值模拟

赵林,姜汉桥,李俊键,陆祥安,张振涛,李金鸿,裴艳丽
(中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室,北京 102249)

摘要: 聚合物驱是化学驱提高采收率的主要方法之一。热降解是影响聚合物驱效果的重要因素,利用油藏数值模拟进行聚合物驱方案设计时,应考虑聚合物的热降解作用,但目前考虑热降解的聚合物驱数值模拟尚未完善。为此,基于准确反映热降解的粘度衰减模型,利用分时步更新流线及网格—流线场互相映射的方法求解降解时间,实现了聚合物驱热降解数值模拟。该方法物理意义明确,适用性强,计算结果准确,可以准确反映聚合物在流动状态下的热降解过程。利用该数值模拟方法进行了3组模型的研究,结果表明,聚合物驱过程中聚合物的降解时间小于在地层中的传播时间,聚合物驱达到稳定后,降解时间等于传播时间。热降解对地层中聚合物质量浓度分布基本无影响,但会造成聚合物粘度降低,延长聚合物驱见效时间,同时使含水率下降,漏斗变小,驱油效果变差,在聚合物驱方案设计时应充分考虑聚合物的热降解作用。

关键词: 聚合物驱 热降解 油藏数值模拟 粘度衰减模型 流线 降解时间

中图分类号:TE357.431

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2016)06-0076-06

Numerical simulation study of thermal degradation in polymer flooding based on streamlines

Zhao Lin, Jiang Hanqiao, Li Junjian, Lu Xiang'an, Zhang Zhentao, Li Jinhong, Pei Yanli

(MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China)

Abstract: Polymer flooding is an important chemical EOR technology for many Chinese reservoirs. Polymer thermal degradation is an important factor affecting the polymer flooding. It is necessary to consider the polymer thermal degradation when polymer flooding project is designed using reservoir numerical simulation. Currently, numerical simulation of polymer flooding considering polymer thermal degradation is not yet perfect. Based on viscosity attenuation model that can accurately reflect the polymer thermal degradation, method of streamlines updating at each step and mapping between grid and streamline was applied to solve the degradation time, and the numerical simulation of polymer flooding considering polymer thermal degradation can be realized. The method has clear physical meaning, strong applicability and accurate calculation results, reflecting the thermal degradation process of flowing polymer underground accurately. Three models were studied using the new method. The results show that the time of polymer degradation is less than that of propagation in the stratum during polymer flooding process, and equal when the process is stable. Thermal degradation has no effect on polymer concentration, but decreases the viscosity significantly. As a result, the effective time of polymer flooding is prolonged, water cut drop funnel is minified and the effect becomes poor. It is necessary to consider the polymer thermal degradation when designing polymer flooding project.

Key words: polymer flooding; polymer thermal degradation; reservoir numerical simulation; viscosity attenuation model; streamlines; degradation time

聚合物驱是继水驱之后被广泛应用的提高采收率技术^[1-6]。聚合物注入地层后,受温度影响,其

分子链易发生断裂,大分子降解为小分子,最终导致体系相对分子量及粘度降低,这种现象称为热

收稿日期:2016-08-16。

作者简介:赵林(1990—),男,山东聊城人,在读博士研究生,从事油藏数值模拟及油藏工程方面的研究。联系电话:15210941280, E-mail:550894223@qq.com。

基金项目:国家“973”计划“陆相致密油高效开发基础研究”(2015CB250900)。

降解^[7-8]。对于高温油藏热降解作用尤为显著。利用油藏数值模拟进行聚合物驱方案设计时,应考虑聚合物的热降解作用。目前,考虑热降解的聚合物驱数值模拟尚未完善,因此亟需提出一种准确的聚合物驱热降解数值模拟方法。

现今表征聚合物热降解的数学模型有2种:一种是浓度衰减模型,该模型认为热降解本质为浓度的衰减,如Choi等提出的浓度指数递减模型^[9];另一种为粘度衰减模型,该模型认为热降解本质为粘度的衰减,不涉及浓度的变化,如陆祥安等提出的粘度指数递减模型^[10-12]。从物理化学角度看,热降解为体系相对分子质量降低而非质量降低的过程^[7],因此粘度衰减模型更能体现热降解的本质。

笔者将粘度衰减模型应用于聚合物驱数值模拟,针对聚合物流动状态下降解时间难以求解的问题,提出了一种基于分时步更新流线及网格一流线场互相映射的求解方法。该方法主要表现为利用流线量化聚合物流动,沿流线建立传播时间与降解时间的关系,利用映射求得整个网格域上的降解时间,从而实现考虑热降解的聚合物驱数值模拟,为热降解评估提供技术支持。

1 热降解数学表征

聚合物在多孔介质中的粘度与质量浓度的关系满足Flory-Huggins方程^[13],其表达式为

$$\mu_p = \mu_w (1 + A_1 c + A_2 c^2 + A_3 c^3) \quad (1)$$

该方程可以描述静态条件下聚合物粘度随浓度的变化规律,但无法描述热降解对粘度的影响。

1.1 浓度衰减模型

Choi等认为热降解过程聚合物浓度发生衰减,进而引起粘度衰减,并提出了表征聚合物热降解的浓度衰减模型,其表达式为^[9]

$$R(c) = \left(\frac{dc}{dt} \right)_{\text{deg}} = -\gamma_1 c \quad (2)$$

或

$$c = c_0 e^{-\gamma_1 t} \quad (3)$$

1.2 粘度衰减模型

陆祥安等认为热降解过程聚合物粘度发生衰减,浓度不发生变化,并基于一系列热降解实验数据,提出了表征聚合物热降解的粘度衰减模型^[10-12],其表达式为

$$R(\mu) = \left(\frac{d\mu}{dt} \right)_{\text{deg}} = -\gamma_2 \mu \quad (4)$$

或

$$\mu = (A_1 c + A_2 c^2 + A_3 c^3) e^{-\gamma_2 t} \quad (5)$$

2 热降解数值模拟

从物理化学角度看,热降解为聚合物高分子断链的过程,不涉及质量的变化,体系相对分子质量降低而质量不变。由2种热降解表征模型可以看出,粘度衰减模型可以更加准确地反映热降解过程中聚合物浓度及粘度的变化,因此使用该模型进行聚合物驱热降解数值模拟。粘度衰减模型描述了静态条件下聚合物粘度随时间的变化规律,但无法直接应用至数值模拟中,应用的难点在于流动状态下模型各网格聚合物降解时间的求解。为此,诸多学者提出了一系列处理方法,林春阳使用时间通量守恒的方法求解等效降解时间^[14],但该方法无实际物理意义,计算准确性无法保证;陆祥安等则考虑了聚合物在每个网格的混合一降解过程,进而计算得到各网格的聚合物粘度^[10],但该方法无法得出降解时间的分布,局部网格的计算不准确。此时,降解时间的实质为拉格朗日坐标系下的概念,它表征的是聚合物从配制形成开始所经过的时间。为示区别,笔者使用 τ 来表示流动状态下的降解时间。降解时间求解的关键在于定量描述聚合物在油藏中的流动。对于一个复杂三维网格系统,流线追踪为表征流体质点运移轨迹的最佳方法。流线的轨迹与速度矢量相切,在一定程度上可以看做流体质点的运移轨迹^[15]。为此,提出了一种基于流线的降解时间求解方法。

2.1 定常流场

对于定常流场,聚合物流速仅为位置的函数,流线分布不随时间改变,流线上各点降解时间保持恒定,等于聚物质点由流线起点流动到各点的时间,即传播时间^[16]表达式为

$$\tau_{st} = t_f = \int_0^s \frac{ds}{v_p(s)} \quad (6)$$

传播时间可以通过Pollock方法^[17](正交网格)或CK方法^[18](角点网格)求得。

2.2 非定常流场

水驱过程的驱替流度比小于1,为不利驱替过程,其流场可看做定常流场;而聚合物驱驱替流度比大于1,为有利驱替过程,其流场为非定常流场,流线分布会随时间发生较大变化^[19],采用固定的流线形态不能准确表征聚合物运移规律。在此,利用分时步更新流线及网格一流线场互相映射的方法对降解时间进行求解。假设 t 为数值模拟过程已知

时间点, $t + \Delta t$ 为待求时间点, 分时步更新流线即在每个时间点生成流线, 聚合物沿该流线运移 Δt 时间; 网格一流线场互相映射即 t 时刻降解时间网格场映射至流线场, 沿流线求得 $t + \Delta t$ 时刻降解时间分布后, 将降解时间流线场映射至网格场。

求解步骤包括: ①将 t 时刻降解时间网格场映射至流线场; ②生成该时刻流线, 并沿流线求解 $t + \Delta t$ 时刻降解时间流线场; ③将 $t + \Delta t$ 时刻降解时间流线场映射至网格场, 求得 $t + \Delta t$ 时刻的降解时间分布。

降解时间网格场映射至流线场利用流线归属网格计算, 表达式为

$$\tau_{sl} = \tau_c \quad (7)$$

降解时间流线场映射至网格场利用传播时间加权平均计算, 表达式为

$$\tau_c = \sum_{sl=1}^{slc} \left(\frac{\Delta t_{t,sl}}{\sum_{sl=1}^{slc} \Delta t_{t,sl}} \right) \tau_{sl} \quad (8)$$

2.2.1 流线上降解时间与传播时间的关系

降解时间求解的关键为降解时间流线场, 即降解时间沿流线上传播时间分布的求解。在此假设 t 时刻流线上降解时间沿 s 的分布为 $\tau_{sl}(s)$, 降解时间沿 t_r 的分布为 $\tau_{sl}(t_r)$ 。根据流动规律, t 时刻位于 s 处的聚物质点经 Δt 时间流动至 s' 处, 且降解时间增加了 Δt , 因此 $t + \Delta t$ 时刻的降解时间分布可表示为

$$\tau_{sl}(s') \Big|_{t+\Delta t} = \tau_{sl}(s) \Big|_t + \Delta t \quad (9)$$

s' 与 s 的关系可由式(6)得到

$$\int_t^{t+\Delta t} dt = t_r(s') - t_r(s) \quad (10)$$

结合式(9)和式(10), 建立 $t + \Delta t$ 时刻降解时间与传播时间的关系式为

$$\tau_{sl}(t_r) \Big|_{t+\Delta t} = \tau_{sl}(t_r - \Delta t) \Big|_t + \Delta t \quad (11)$$

显然, 若流动过程的流场为定常流场, 流线位置与时间无关, 那么 Δt 可取为任意值。取 $\Delta t = t_r(s')$, 此时 $s = 0$, 可得定常流场情形下的降解时间表达式为

$$\tau_{sl}(s') \Big|_{t+\Delta t} = \tau_{sl}(0) \Big|_t + \Delta t = \Delta t = t_r(s') - t_r(0) = t_r(s') \quad (12)$$

2.2.2 离散模型

使用流线追踪算法获得的传播时间分布是不连续的, 需对传播时间划分网格。假设降解时间待求网格为 c_k , 在传播时间网格上的端点为 $k-1, k$,

由于传播时间网格的不规则性以及 Δt 的取值问题, 网格 c_k 的聚合物往往由若干个网格混合而来。假设网格 c_k 的聚合物由网格 $c_i, c_{i+1}, \dots, c_{i+m}$ 流动而来, 则网格在 $t + \Delta t$ 时刻的降解时间可由加权平均表示为

$$\tau_{sl, c_k} \Big|_{t+\Delta t} = \frac{\sum_{j=i}^{i+m} \lambda_j \tau_{sl, c_j} \Big|_t}{\sum_{j=i}^{i+m} \lambda_j} + \Delta t \quad (13)$$

2.3 程序实现

聚合物驱的数值模拟是基于 MRST 来建立的。MRST 是由 Krogstad 等开发, 基于 Matlab 的油藏数值模拟工具箱, 该工具箱拥有强大的网格处理能力以及快速建模能力, 求解过程采用全隐式求解^[20]。流线采用 n 时刻的速度场显式生成, 求解速度快且精度较高。此外, 对于流线未经过的网格, 从网格中心反向追踪流线, 直至收敛至注水井; 对于注水井所在网格, 降解时间取为 0; 对于生产井所在网格, 降解时间取相邻网格的加权平均; 聚合物浓度为 0 的网格, 降解时间取为 0。

3 计算结果分析

3.1 降解时间分布

首先研究单条流线上降解时间的分布, 为此建立了一维一注一采模型, 注水井与采油井分别位于模型两端。网格数为 $40 \times 1 \times 1$, 步长为 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 2 \text{ m}$; 纯水粘度为 $0.48 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 原油粘度为 $5 \text{ mPa} \cdot \text{s}$; 聚合物 Flory-Huggins 方程式为 $\mu_p = \mu_w (1 + 4.89c + 3.77c^2 + 0.94c^3)$, 残余阻力系数为 1.1, 不可及孔隙体积为 0.05, 降解系数为 0.01 d^{-1} 。注水井注入量及生产井产液量为 $5 \text{ m}^3/\text{d}$, 水驱和聚合物驱孔隙体积倍数皆为 1.0, 聚合物驱注入质量浓度为 $1 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。由计算可得不同阶段聚合物质量浓度与降解时间的分布(图 1)及降解时间与传播时间的关系(图 2)。

由图 1 和图 2 可以看出, 当聚合物质量浓度等于注入质量浓度时, 驱替近似为活塞驱, 聚合物以均匀的速度向前推进, 降解时间线性增加, 且与传播时间基本相等; 当聚合物质量浓度缓慢下降时, 驱替为非活塞驱, 该部分聚合物为前端弥散而来, 降解时间基本相同。当系统达到稳定状态后(聚合物驱孔隙体积倍数为 1.0), 流动近似为定常流动, 此时降解时间线性增加且等于传播时间。

3.2 模型对比

浓度衰减模型及粘度衰减模型在静态条件下的聚合物粘度可表示为

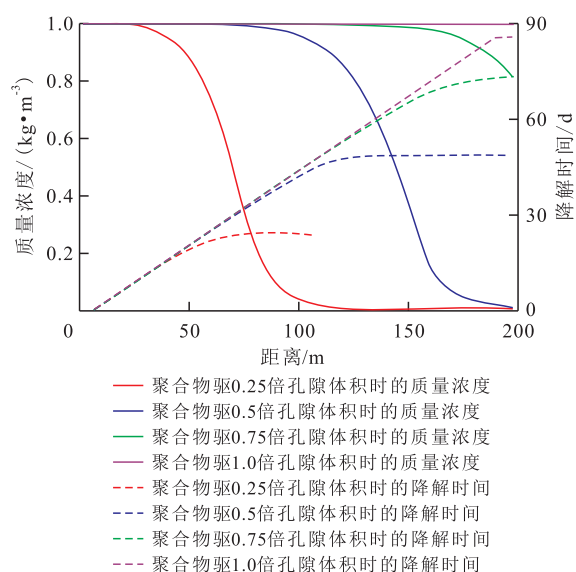


图1 不同阶段聚合物质量浓度与降解时间分布

Fig.1 Polymer concentration vs degradation time distribution at different stages

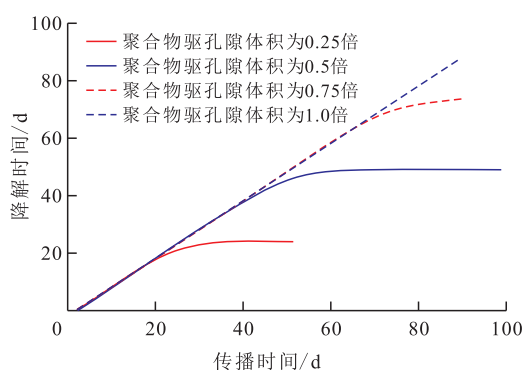
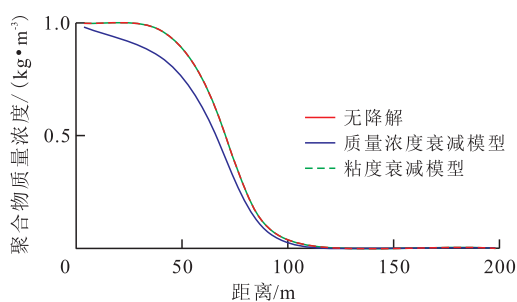
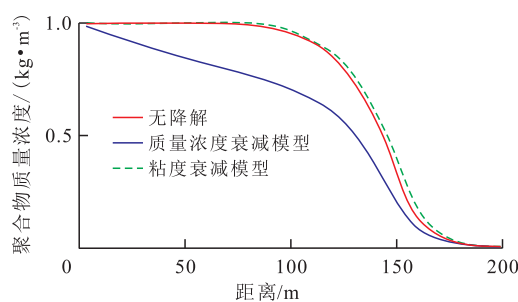


图2 不同阶段降解时间与传播时间的关系

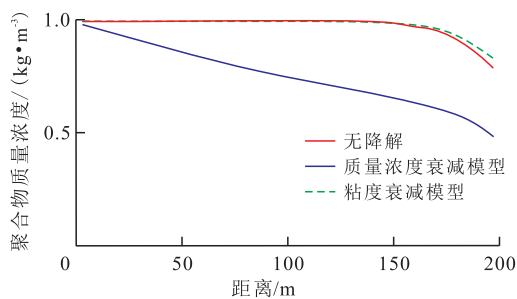
Fig.2 Polymer degradation time vs time of propagation at different stages



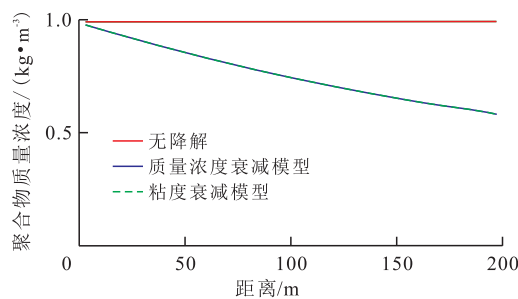
a—聚合物驱孔隙体积为0.25倍



b—聚合物驱孔隙体积为0.5倍



c—聚合物驱孔隙体积为0.75倍



d—聚合物驱孔隙体积为1.0倍

图3 不同阶段聚合物质量浓度分布

Fig.3 Polymer concentration distributions at different stages

$$\mu_p = \mu_w \left(1 + A_1 c e^{-\gamma_1 t} + A_2 c^2 e^{-2\gamma_2 t} + A_3 c^3 e^{-3\gamma_3 t} \right) \quad (14)$$

$$\mu_p = \mu_w \left(1 + A_1 c e^{-\gamma_2 t} + A_2 c^2 e^{-\gamma_2 t} + A_3 c^3 e^{-\gamma_2 t} \right) \quad (15)$$

在静态条件下,浓度衰减模型的聚合物粘度小于等于粘度衰减模型的。当 $A_2 = A_3 = 0$ 时,二者粘度相等。假设 Flory-Huggins 方程表达式为 $\mu_p = \mu_w(1 + 9.6027c)$,降解系数为 $\gamma_1 = \gamma_2 = 0.01 \text{ d}^{-1}$,用以研究动态条件下二者的差别。经计算得到不同阶段聚合物质量浓度的分布(图3)以及粘度的分布(图4)。

由图3可以看出,浓度衰减模型的聚合物质量浓度明显低于无降解的,而粘度衰减模型则与无降解的基本相等。这说明了2种模型的区别:前者的热降解表征为浓度损失,进而引起粘度损失;而后者只有粘度损失,没有浓度损失。

由图4可以看出,虽然静态条件下2个模型的粘度相等,但动态条件下却呈现粘度衰减模型小于浓度衰减模型的现象,这与二者的处理方式有关:浓度衰减模型的热降解项与距离无关,其等效降解时间处处相等,而粘度衰减模型热降解项则与距离有关,距离注聚井越远,降解时间越大,相应地聚合物粘度越低。二者在粘度上的差异造成了驱油效果的差别,聚合物驱前期二者含水率降低的效果差距不大,但后期浓度衰减模型的效果要好于粘度衰减模型。

3.3 降解系数影响分析

在粘度衰减模型中,降解系数直接影响了聚合

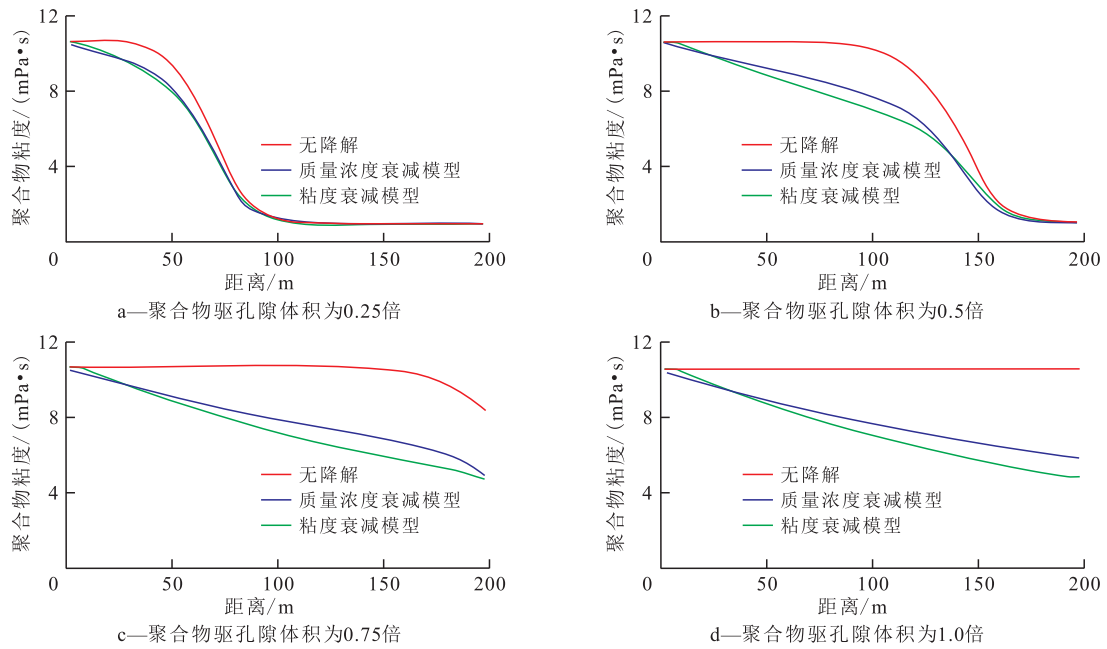


图4 不同阶段聚合物粘度分布

Fig.4 Polymer viscosity distributions at different stages

物的热降解程度,从而决定了驱油效果的好坏。在此建立了二维模型,并选取了0.005,0.01,0.02 d⁻¹这3个降解系数进行模拟计算,以研究降解系数对驱油效果的影响。模型网格数为30×30×1,其余参数与3.1中相同。注水井注入量及生产井产液量为50 m³/d,前期水驱孔隙体积倍数为1.0,聚合物驱和后续水驱孔隙体积倍数皆为0.5。经过计算得到了不同降解系数下含水率随注入孔隙体积倍数的变化(图5)及流线图(图6)。

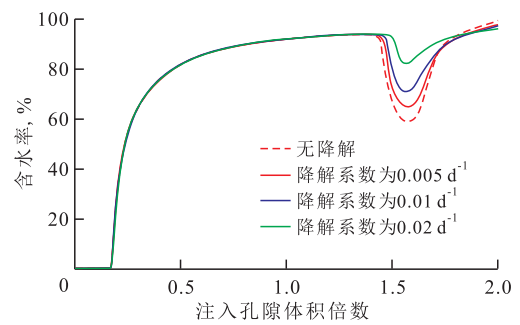


图5 不同降解系数下含水率随注入孔隙体积倍数的变化

Fig.5 Water cut vs multiples of pore volume injection under different degradation factors

由图5可知,降解系数越大,含水率开始下降的

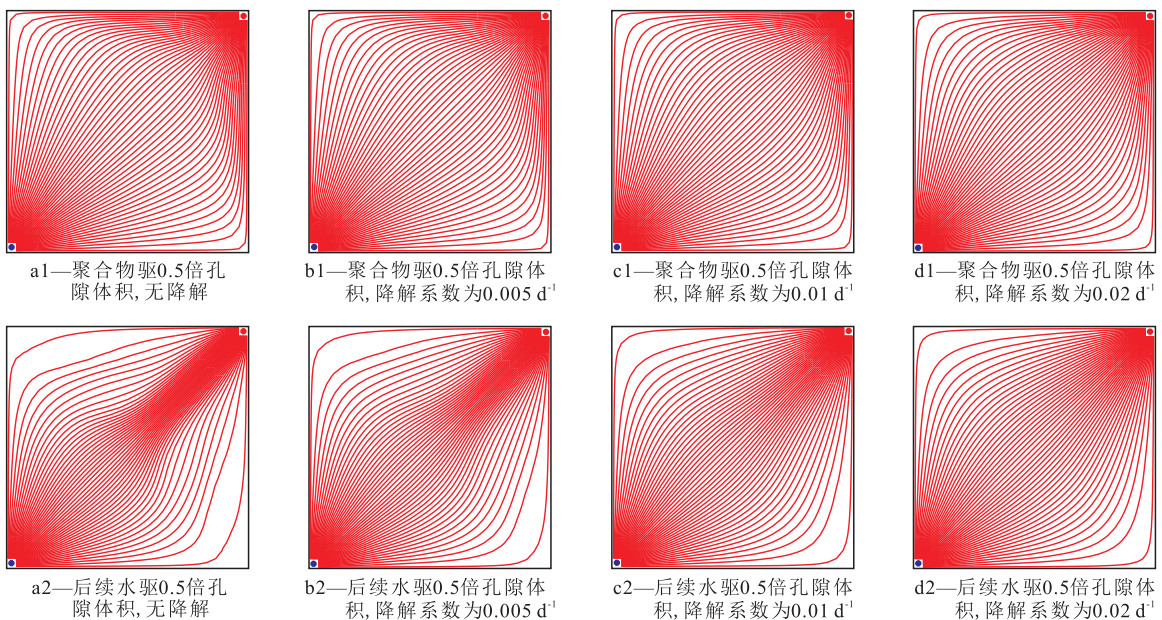


图6 不同降解系数下的流线

Fig.6 Streamline distributions under different degradation factors

时间越晚,含水率下降漏斗越窄,幅度越低,但后续水驱含水率上升越慢,总体来说增油效果变差。

由图6可以看出,当聚合物驱孔隙体积倍数为0.5时,聚合物驱结束,聚合物段塞均匀推进,降解系数对流线分布影响不大;当后续水驱孔隙体积倍数为0.5时,后续水驱结束,降解系数对流线分布产生了一定影响。这是由于后续注入水驱替聚合物段塞时发生了突进,导致生产井周围的流线较为集中,且降解系数越小,聚合物粘度越大,突进越强。当降解系数较大时,聚合物粘度较小,突进变弱,流线分布变得较为均匀。也就是在图5中出现的降解系数越大,后续水驱含水率上升越慢的现象。

4 结论

使用可以准确描述热降解过程的粘度衰减模型进行聚合物驱数值模拟,利用分时步更新流线及网格一流线场互相映射的方法求得降解时间分布,物理意义明确,求解结果准确性强。利用建立的热降解聚合物驱数值模拟方法,建立3组模型进行研究,结果表明:①降解时间在聚合物驱后端活塞驱替时等于传播时间,在前端非活塞驱替时小于传播时间。②浓度衰减模型及粘度衰减模型应用至数值模拟时,计算结果显著不同,浓度衰减模型聚合物浓度及粘度均低于无降解时,粘度衰减模型浓度基本等于无降解时,粘度低于无降解时及浓度衰减模型。③热降解会延长聚合物见效时间,使含水率下降漏斗变小变窄,但会使后续水驱突进变弱,延缓后续水驱阶段的含水率上升。总体来看,热降解会使增油效果变差,在聚合物驱方案设计时应充分考虑聚合物的热降解作用。

符号解释:

μ_p ——零剪切速率下聚合物粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; μ_w ——纯水粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; A_1, A_2, A_3 ——实验拟合参数; c ——聚合物质量浓度, kg/m^3 ; $R(c)$ ——质量浓度衰减速率, $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$; t ——时间, d ; γ_1 ——质量浓度衰减系数, d^{-1} ; c_0 ——初始质量浓度, kg/m^3 ; $R(\mu)$ ——粘度衰减速率, $\text{mPa}\cdot\text{s}/\text{d}$; μ ——聚合物无因次粘度; τ ——聚合物在流动状态下的降解时间, d ; γ_2 ——粘度衰减系数, d^{-1} ; τ_{sl} ——沿流线降解时间, d ; t_t ——传播时间, d ; s ——沿流线距离, m ; v_p ——聚合物流动速度, m/d ; τ_c ——流线所在网格的降解时间, d ; slc ——经过网格 c 的流线个数; sl ——经过网格 c 的流线编号; $\Delta t_{f,sl}$ ——流线 sl 经过网格 c 的传播时间差值, d ; τ^t —— t 时刻流线上的降解时间,由降解时间网格场映射而来; λ_j ——

权重,取为网格 c_j 上的传播时间差值。

参考文献:

- [1] 刘睿,姜汉桥,张贤松,等.海上中低黏度油藏早期注聚合物见效特征研究[J].石油学报,2010,31(2):280-283.
Liu Rui, Jiang Hanqiao, Zhang Xiansong, et al. Effective characteristics of early polymer flooding in mid-to-low viscosity offshore reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(2): 280-283.
- [2] Liu H, Wang Y, Li G, et al. An enhanced oil recovery technology continually after polymer-flooding[C]. SPE 144250-MS, 2011.
- [3] 刘广为,姜汉桥,王敏,等.聚合物驱增油量评价方法及应用[J].油气地质与采收率,2014,21(2):29-31.
Liu Guangwei, Jiang Hanqiao, Wang Min, et al. Study on calculation for polymer flooding incremental oil[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(2): 29-31.
- [4] 刘朝霞,王强,孙盈盈,等.聚合物驱矿场应用新技术界限研究与应用[J].油气地质与采收率,2014,21(2):22-24,31.
Liu Zhaoxia, Wang Qiang, Sun Yingying, et al. Study and application of new technological limit for polymer flooding in field application[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(2): 22-24, 31.
- [5] 王启民,冀宝发,隋军,等.大庆油田三次采油技术的实践与认识[J].大庆石油地质与开发,2001,20(2):1-8.
Wang Qimin, Ji Baofa, Sui Jun, et al. Practice and knowledge of tertiary recovery technique in Daqing oilfield[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2001, 20(2): 1-8.
- [6] 徐洪玲.油藏非均质性对聚合物驱开发效果的影响[J].油气地质与采收率,2015,22(5):99-102.
Xu Hongling. Impact of plane heterogeneity of oil reservoir on development effect of polymer flooding[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(5): 99-102.
- [7] Muller G. Thermal stability of polyacrylamide solutions: effect of residual impurities in the molecular-weight-degradation process upon heating[J]. Polymer Bulletin, 1981, 5(1): 39-45.
- [8] 曹绪龙,刘坤,韩玉贵,等.耐温抗盐缔合聚合物的合成及性能评价[J].油气地质与采收率,2014,21(2):10-14.
Cao Xulong, Liu Kun, Han Yugu, et al. Synthesis and properties of heat-tolerance and salt-resistance hydrophobically associating water-soluble polymer[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(2): 10-14.
- [9] Choi B I, Jeong M S, Lee K S. Temperature-dependent viscosity model of HPAM polymer through high-temperature reservoirs[J]. Polymer Degradation and Stability, 2014, 110: 225-231.
- [10] 陆祥安,姜汉桥,罗红霞,等.基于黏度修正模型的聚合物热降解数值模拟[J].大庆石油地质与开发,2015,34(6):95-99.
Lu Xiang'an, Jiang Hanqiao, Luo Hongxia, et al. Numerical simulation of the polymer thermal degradation based on the viscosity modified model[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2015, 34(6): 95-99.
- [11] Lu X, Jiang H, Li J, et al. Polymer thermal degradation in high-temperature reservoirs[J]. Petroleum Science and Technology, 2015, 33(17/18): 1571-1579.