文章编号:1673-5005(2013)03-0103-07 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2013.03.018

多孔介质中预交联凝胶颗粒渗流规律模拟

王 敬[1], 刘慧卿[1], 王增林[1,2], 徐 杰[1,2]

(1. 中国石油大学 石油工程教育部重点实验室,北京 102249; 2. 中国石化胜利油田分公司,山东 东营 257001)

摘要:为了研究预交联凝胶颗粒(PPG)在多孔介质中的渗流规律,基于物质守恒定律建立反映预交联凝胶颗粒孔喉堵塞、堵塞颗粒变形重启动特性的 PPG 驱数学模型,并采用 IMPES 方法和四阶 Runge-Kutta 方法求解。结果表明:PPG 可以在不伤害中、低渗部位前提下实现油藏深部调剖;PPG 的注入速度和注入体积分数是影响调剖效果的重要因素;PPG 粒径与孔喉直径的匹配性和临界压力是影响调剖效果的关键因素,粒径与孔喉直径之比和重启动临界压力较低时无孔喉堵塞,粒径与孔喉直径之比和重启动临界压力过高会造成储层伤害。

关键词:油藏; 预交联凝胶颗粒; 数学模型; 渗流规律; 孔喉堵塞; 多孔介质

中图分类号:TE 319 **文献标志码**:A

Modeling on flowing rules of performed-particle-gel in porous media

WANG Jing[1], LIU Hui-qing[1], WANG Zeng-lin[1,2], XU Jie[1,2]

(1. *MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering in China University of Petroleum*, *Beijing* 102249, *China*;
2. *Shengli Oilfield Branch Company*, *SINOPEC*, *Dongying* 257001, *China*)

Abstract: In order to study the flowing rules of performed-particle-gel (PPG) in porous media, a performed-particle-gel flooding mathematical model characterizing the throat blocking and particles restarting was established based on the mass conservation law. The IMPES method and Runge-Kutta method were used to solve this mathematical model. The results show that PPG can realize deep profile control without damaging the medium and low permeable parts. PPG injection rate and injection volume fraction are the important factors influencing the profile control effect. The critical pressure and the compatibility between PPG diameter and throat diameter are the key factors determining the profile control effect. When the diameter ratio of PPG to throat and the critical pressure of restarting are lower, throat blocking can not occur. However, larger diameter ratio of PPG to throat and higher critical pressure may damage the reservoir.

Key words: reservoir; performed-particle-gel; mathematical model; flowing rules; throat blocking; porous media

预交联凝胶颗粒(PPG)型堵剂可以实现较好的调剖效果,且对地层伤害较小[1]。PPG 通过地面成胶、干燥、粉碎等一系列工序制备而成,具有较好的吸水溶胀特性,吸水溶胀的 PPG 具有很好的黏弹性,流经较小喉道时发生堵塞,在较大的压差作用下颗粒变形通过喉道进入油层深部,实现深部调剖[2-3]。然而,现有的研究主要集中在颗粒制备和物理试验研究方面[4-8]。笔者结合对 PPG 渗流规律试验研究认识,建立反映 PPG 孔喉堵塞、堵塞颗粒重启动以及颗粒堵塞降低多孔介质渗透率的数学模型并计算求解,研究 PPG 在多孔介质中的渗流规律和注入参数的影响。

1 预交联凝胶颗粒驱数学模型

1.1 假设条件

假设:①等温驱替,不考虑能量交换;②水相为分散相溶液,不考虑驱油体系黏度变化;③由于 PPG 在水中悬浮性较好,忽略其表面沉积效应;④由于 PPG 粒径较大,不考虑弥散扩散作用;⑤颗粒通过孔喉仅为压力作用下变形所致,不考虑颗粒破碎、缩水等;⑥仅考虑油水两相,不考虑溶解气。

1.2 物质守恒方程

油组分物质守恒方程为

收稿日期:2012-06-01

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05032-002-003);中国博士后科学基金项目(20080430525)

作者简介:王敬(1985-),男,博士研究生,主要从事渗流机制、提高采收率研究。E-mail:wangjing8510@163.com。

$$\nabla \cdot \left[\frac{k(\sigma_{gb})K_{ro}}{\mu_o B_o}(\nabla p_o - \rho_o g \nabla D)\right] + q_o = \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\varphi S_o}{B_o}\right); \tag{1}$$

水组分物质守恒方程为

$$\nabla \cdot \left[\frac{k(\sigma_{gb})K_{rw}}{\mu_w B_w}(\nabla p_w - \rho_w g \nabla D)\right] + q_w = \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\varphi S_w}{B_w}\right); \tag{2}$$

PPG 组分物质守恒方程为

$$\nabla \cdot \left[\frac{k(\sigma_{gb})K_{rw}c_{gs}}{\mu_w B_w}(\nabla p_w - \rho_w g \nabla D)\right] + q_w c_{gs} = \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\varphi S_w c_{gs}}{B_w}\right) + \frac{\partial \sigma_{gb}}{\partial t}. \tag{3}$$

式中,k 为渗透率,μm^2;K_{rl} 为 l 相相对渗透率;μ_l 为 l 相黏度,mPa · s;B_l 为 l 相体积系数;p_l 为 l 相压力,Pa;D 为油藏深度,m;q_l 为源汇处 l 相注采强度,$m^3 \cdot d^{-1} \cdot m^{-3}$;$\varphi$ 为孔隙度;S_l 为 l 相饱和度;c_{gs} 为 PPG 组分体积分数;σ_{gb} 为孔喉堵塞的 PPG 的体积分数;l = w、o,分别表示水相和油相。

1.3 辅助方程

饱和度约束条件为

$$S_o + S_w = 1. \tag{4}$$

毛管力关系约束为

$$p_{cow} = p_o - p_w. \tag{5}$$

式中,p_{cow} 为油水毛管压力,MPa。

1.4 物化参数方程

悬浮于水中的预交联凝胶颗粒具有非常好的黏弹性,它随着注入水进入高渗部位,并在高渗部位发生孔喉堵塞,使后续水发生绕流波及低渗部位,同时 PPG 可以在较大压差作用下发生变形通过孔喉,进入下一个孔隙,具有较好的“变形虫”特性,从而实现动态调剖的目的[6-7]。

1.4.1 预交联凝胶颗粒堵塞模型

PPG 粒径大于孔喉直径时会在喉道处发生堵塞,而在压力作用下 PPG 又会发生变形通过孔喉,因此孔隙喉道对 PPG 喉道的捕集速率方程为

$$\frac{\partial \sigma_{gb}}{\partial t} = \frac{\partial \bar{\sigma}_{gb}}{\partial t} - \frac{\partial \hat{\sigma}_{gb}}{\partial t}. \tag{6}$$

式中,$\bar{\sigma}_{gb}$ 为单位体积多孔介质中PPG堵塞量;$\hat{\sigma}_{gd}$ 为单位体积多孔介质中 PPG 重启动量;t 为时间步长,s。

PPG通过多孔介质时发生堵塞的概率与PPG粒径分布和孔隙喉道直径分布有关。油藏中多孔介质孔喉半径呈对数正态分布规律[9-11],即直径为 d_{tj} 的喉道出现的概率为

$$\varphi(d_{tj}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1 y_1}\exp\left\{-\frac{[\ln(y_1/\bar{d}_t)]^2}{2\sigma_1^2}\right\}; \tag{7}$$

喉道粒径小于等于 d_{tj} 的喉道出现的概率为

$$\Phi_j(d_{tj}) = \int_0^{d_{tj}} \phi_j(d_{tj})\,dy_1 = \int_0^{d_{tj}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1 y_1}\exp\left\{-\frac{[\ln(y_1/\bar{d}_p)]^2}{2\sigma_1^2}\right\} dy_1. \tag{8}$$

经过干燥、粉碎、吸水溶胀后的颗粒粒径呈正态分布,即直径为 d_{gj} 的颗粒出现的概率为

$$\omega_j(d_{tj}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2}\exp\left[-\frac{(d_{tj} - \bar{d}_t)^2}{2\sigma_2^2}\right]. \tag{9}$$

临界压力梯度与颗粒孔喉直径比呈指数关系,

$$p_g = a\exp\left(b\frac{d_g}{d_t}\right),\ R^2 = 0.9853. \tag{10}$$

式中,α 为影响系数,反映目前堵塞状况对后续颗粒发生堵塞的影响,本文取 0.2;p_g 为重启动临界压力梯度,MPa · m^{-1};σ_1、σ_2 为标准方差,本文分别取 0.25、25;$\bar{d}_t$、$\bar{d}_g$ 分别为喉道和颗粒平均半径,μm;a、b 为实验参数,与 PPG 类型有关,取 a = 0.03 MPa · m^{-1},b = 0.49。

根据式(10) 可以求得某一压力梯度时直径为 d_{gj} 颗粒对应临界喉道直径 d_{tj} 及流经单元体时发生堵塞的概率 $\Phi(d_{tj})$,因此将全部粒径范围内的颗粒均分成 n 份,将这些颗粒注入多孔介质初始阶段发生堵塞的概率为

$$P = \sum_j^n \omega_j \Phi_j,\ \sum_j^n \omega_j = 1,\ \Phi_j \leqslant 1. \tag{11}$$

一般情况下,颗粒通过孔喉时大颗粒先被捕集,悬浮液体积分数降低,因此根据某一时刻单元体内体积分数值与初始体积分数值的比值确定过滤之后多孔介质单元体内 PPG 粒径分布情况重新进行分段并求得不同粒径发生堵塞的概率,最终得到 PPG 在单元体内发生堵塞的概率为

$$P' = \sum_j^m \omega_j \Phi_j,\ m \leqslant n. \tag{12}$$

根据经典渗滤模型可知,颗粒堵塞速率与渗流速度、悬浮液体积分数以及目前堵塞状况成正比[12-14],则单元体内 PPG 堵塞的速率为

$$\frac{\partial \bar{\sigma}_{gb}}{\partial t} = \lambda_e \sum_j^m (\omega_j \Phi_j)\left(1 - \frac{\alpha \sigma_{gb}}{\varphi_0}\right) v_p c_{gs}. \tag{13}$$

式中,λ_e 为封堵系数,表征满足封堵条件时堵塞的概率,本文取 0.95,m^{-1};φ_0 为初始孔隙度;v_p 为真实流速,m · s^{-1}。

1.4.2 预交联凝胶颗粒重启动模型

压力梯度高于临界值后堵塞的颗粒将发生变形

而重新启动,并且重启动速率与已堵塞颗粒体积分数、渗流速度、压力梯度成正比,因此引入海维赛德函数得到颗粒重启动速率方程为

$$\frac{\partial \hat{\sigma}_{gb}}{\partial t} = \chi \sigma_{gb} v_p \frac{\nabla p - p_g}{p_g} \Theta(\nabla p - p_g). \tag{14}$$

其中

$$p_G = a\exp\left(b\frac{\bar{d}_g}{\bar{d}_t}\right),$$

$$\Theta(\nabla p - p_g) = \begin{cases} 0, & \nabla p < p_g; \\ 1, & \nabla p \geqslant p_g. \end{cases}$$

式中,χ 为解堵系数,表征满足解堵条件时重启动的概率,本文取 0.95/m;$\Theta(x)$ 为海维赛德函数;∇p 为单元体压力梯度,MPa · m^{-1}。

1.4.3　孔喉堵塞降低多孔介质渗透率模型

PPG 在孔喉处发生堵塞导致多孔介质渗流截面积减小,渗透率降低,室内试验表明,多孔介质残余渗透率系数随堵塞颗粒体积分数增加呈指数降低,

$$R = \frac{k(\sigma_{gb})}{k_0} = \exp(m\sigma_{gb}). \tag{15}$$

式中,R 为残余渗透率系数;k_0 为初始渗透率,μm^2;m 为试验参数,本文取 $m = -18.8$。

1.4.4　多孔介质初始粒径分布

根据 Kozeny 公式可知多孔介质渗透率与毛细管半径的 4 次方成正比[15],因此不同位置的喉道平均半径分布可通过给定的渗透率求出,即

$$\bar{r}_t = \bar{r}_{ret}\sqrt[4]{k_t/k_{re}}. \tag{16}$$

式中,$\bar{r}_t$ 为某部位喉道平均半径,μm;k_t 为某部位渗透率,μm^2;k_{re} 为参考渗透率,μm^2;$\bar{r}_{ret}$ 为参考渗透率对应的喉道平均半径,μm。

1.4.5　相对渗透率

油、水相对渗透率为

$$K_{ro} = K_{ro0}\left(\frac{S_o - S_{or}}{1 - S_{wc} - S_{or}}\right)^{\beta_o}, \tag{17}$$

$$K_{rw} = K_{rw0}\left(\frac{S_w - S_{wc}}{1 - S_{wc} - S_{or}}\right)^{\beta_w}. \tag{18}$$

式中,K_{rl0} 为端点处 l 相相对渗透率;S_{wc} 为束缚水饱和度;S_{or} 为残余油饱和度;β_l 为 l 相对应指数。

1.4.6　毛管力模型

驱替过程中,各相间的毛管力主要随含水饱和度变化,

$$p_{cwo}(S_w) = C_{pc}\sqrt{\frac{\varphi R_k}{k}}\left(1 - \frac{S_w - S_{wc}}{1 - S_{wc} - S_{or}}\right)^{N_{pc}}. \tag{19}$$

式中,C_{pc} 为常数;N_{pc} 为毛管力指数。

2　数学模型的求解

对于油、水组分方程采用隐式求压力显式求饱和度的有限差分方法(IMPES 方法)求得油、水相压力和饱和度分布。求解 PPG 体积分数分布的过程中,为了减弱数值弥散现象,采用典型四阶 Runge-Kutta 方法[16-17] 进行差分离散。

(1) 隐式求解压力。联立式(1)、(2)可得

$$B_w\left[\nabla\cdot\left(\frac{\vec{k}K_{rw}}{\mu_w B_w}\nabla p_w\right) + q_w\right] +$$

$$B_o\left[\nabla\cdot\left(\frac{\vec{k}K_{ro}}{\mu_o B_o}\nabla p_o\right) + q_o\right] = B_w\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\varphi S_w}{B_w}\right) +$$

$$B_o\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\varphi S_o}{B_o}\right) = \varphi c_t\frac{\partial p_o}{\partial t}. \tag{20}$$

其中

$$c_t = c_r + c_w S_w + c_o S_o,\ c_w = -\frac{1}{B_w}\frac{\partial B_w}{\partial p_o},\ c_o = -\frac{1}{B_o}\frac{\partial B_o}{\partial p_o}.$$

对式(20)进行有限差分整理得

$$A_{1ij}p^{n+1}_{o(i-1)j} + A_{2ij}p^{n+1}_{oi(j-1)} + A_{3ij}p^{n+1}_{oij} + A_{4ij}p^{n+1}_{o(i+1)j} +$$

$$A_{5ij}p^{n+1}_{oi(j+1)} = B_{ij}, \tag{21}$$

然后通过超松弛迭代求解。

(2) 显式求解饱和度。水组分差分方程为

$$\Delta[T^n_w\Delta p^{n+1}_o - T^n_w\Delta p^n_{cow}] + Q^n_o =$$

$$\frac{1}{\Delta t}\left[\left(\frac{V_p S_w}{B_w}\right)^{n+1} - \left(\frac{V_p S_w}{B_w}\right)^n\right]. \tag{22}$$

由式(22)计算水相饱和度,然后由饱和度约束条件计算得到油相饱和度。

(3) 四阶 Runge-Kutta 方法求解体积分数。由式(3)建立 PPG 组分质量守恒方程的差分方程

$$-\nabla\cdot(c_{gs}v_w) + q_w c_{gs} = \frac{\varphi S_w}{B_w}\frac{\partial c_{gs}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\varphi S_w}{B_w}\right)c_{gs} + \frac{\partial \sigma_{gb}}{\partial t}. \tag{23}$$

式(23)的差分格式为

$$A\frac{c^{n+1}_{gs} - c^n_{gs}}{\Delta t} + Bc^n_{gs} = C. \tag{24}$$

其中

$$A = \frac{\varphi S_w}{B_w},\ B = \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\varphi S_w}{B_w}\right) - \frac{Q_w}{V_b},$$

$$C = -\nabla\cdot(c_{gs}v_w)^n + \frac{\sigma^{n+1}_{gb} - \sigma^n_{gb}}{\Delta t}.$$

将式(24)变形可得

$$\frac{c^{n+1}_{gs} - c^n_{gs}}{\Delta t} = \frac{C - Bc_{gs}}{A}. \tag{25}$$

令 $f(c_{gs}, t) = \dfrac{C - Bc_{gs}}{A}$,则典型四阶 Runge-Kutta

方法的差分格式为

$$c_{gs}^{n+1} = c_{gs}^{n} + \frac{\Delta t}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4). \quad (26)$$

其中

$$K_1 = f(t^n, c_{gs}^n),\ K_2 = f\left(t^n + \frac{\Delta t}{2}, c_{gs}^n + \frac{\Delta t}{2}K_1\right),$$

$$K_3 = f\left(t^n + \frac{\Delta t}{2}, c_{gs}^n + \frac{\Delta t}{2}K_2\right),$$

$$K_4 = f(t^n + \Delta t, c_{gs}^n + \Delta t K_3).$$

3 预交联凝胶颗粒渗流规律及敏感性

模拟计算选取平面五条带非均质模型(图 1),高渗部位(白色区域)渗透率为 2.0 μm²、中渗部位(灰色区域)渗透率为 1.0 μm²、低渗部位(黑色区域)渗透率为 0.5 μm²。初始孔隙度 0.3,初始含油饱和度 0.7,模型尺寸为 100 m×100 m×5 m,原油黏度 20 mPa·s,悬浮液体积分数为 0.1,含水率 90% 时转 PPG 驱,注入量 1.0V_p(V_p 为孔隙体积),PPG 颗粒平均直径 75 μm,1.0 μm² 对应孔隙喉道平均直径 25 μm,注入速度 30 m³/d。研究平面非均质条件下注入速度、悬浮液体积分数、颗粒粒径、重启动临界压力对 PPG 渗流的影响。

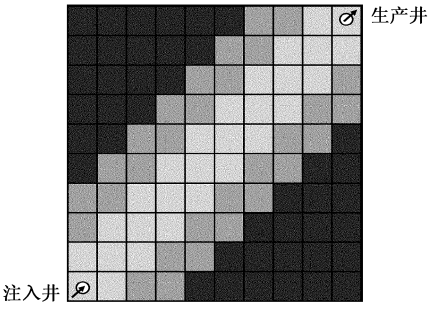

图 1 平面非均质模型

Fig. 1 Plane heterogeneous model

3.1 预交联凝胶颗粒渗流规律

在 200 ~ 700 d 期间注入 1V_p 预交联凝胶颗粒,不同阶段多孔介质中 PPG 体积分数分布如图 2 所示。

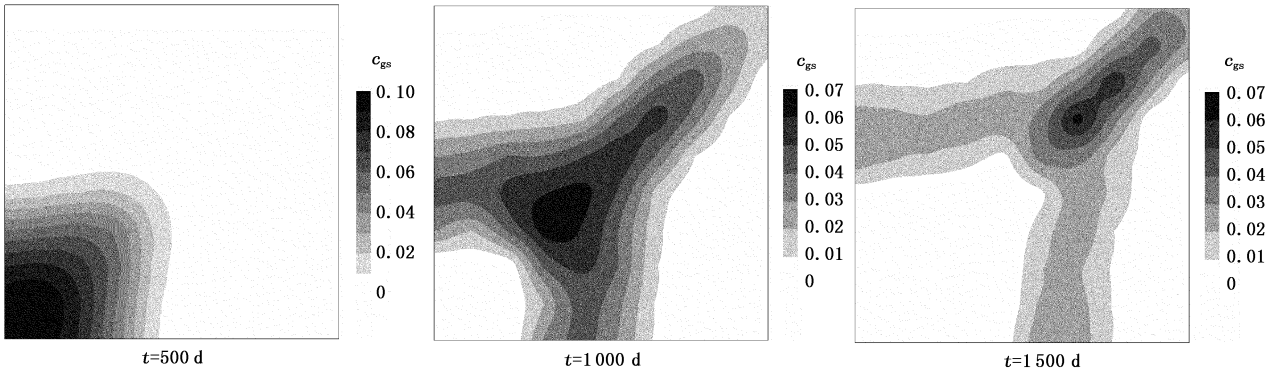

图 2 PPG 体积分数分布

Fig. 2 Distribution of PPG volume fraction

从图 2 中可以看出,注入的 PPG 主要沿高渗条带从注入井流向生产井,只有少量的 PPG 流至中渗部位,而低渗部位根本无颗粒进入,PPG 到达生产井后便随着采出液产出,可见注 PPG 过程中孔喉堵塞只会发生在高渗部位,而不会封堵中、低渗部位。

图 3 为不同阶段多孔介质残余渗透率系数分布。从图 3 中可以看出,注 PPG 初期,孔喉堵塞主要发生在注入井周围,随着悬浮液注入,压力升高,颗粒重新启动;注 PPG 结束后,后续水将 PPG 携带至地层深处,渗透率下降区域也向深处延伸,与此同时,注入井周围渗透率逐渐恢复;开采至 1 500 d 时,整个高渗条带渗透率均有一定幅度的降低,而中、低渗部位渗透率基本没有变化,可见 PPG 不仅封堵注入井周围地层,还可以实现油藏深部调剖且不伤害中、低渗部位,从而实现了深部液流转向的目的。

3.2 预交联凝胶颗粒渗流敏感性

3.2.1 注入速度

图 4 为不同注入速度下注 PPG 结束时油藏渗透率分布。从图 4 中可以看出,注入速度较低时,渗透率下降区域较小,且主要集中在注入井周围,渗透率比中、低渗部位低;随着注入速度增加,渗透率下降区域逐渐增大,注入井周围渗透率基本上与中渗部位渗透率接近。可见高速下注悬浮液有利于 PPG 深部调驱,同时使注入井周围均质范围增加,注入水波及角增大,波及效率升高。但是,驱替速度过大时,会导致注入颗粒无法发生孔喉堵塞直接流入生产井,加剧微观指进现象。

3.2.2 注入 PPG 体积分数

图 5 为不同注入体积分数下注 PPG 结束时渗

透率分布。从图 5 中可以看出,PPG 体积分数较低时,只有少量颗粒会发生孔喉堵塞,高渗带渗透率下降幅度很小,且仅发生在注入井周围,很难起到调剖效果。随着注入体积分数增加,发生孔喉堵塞的颗粒增多,高渗带得到有效封堵,且大量的 PPG 可以进入油藏深部,实现深部调剖。可见,要达到较好的调剖效果并实现深部液流转向,注入 PPG 体积分数不能太低。

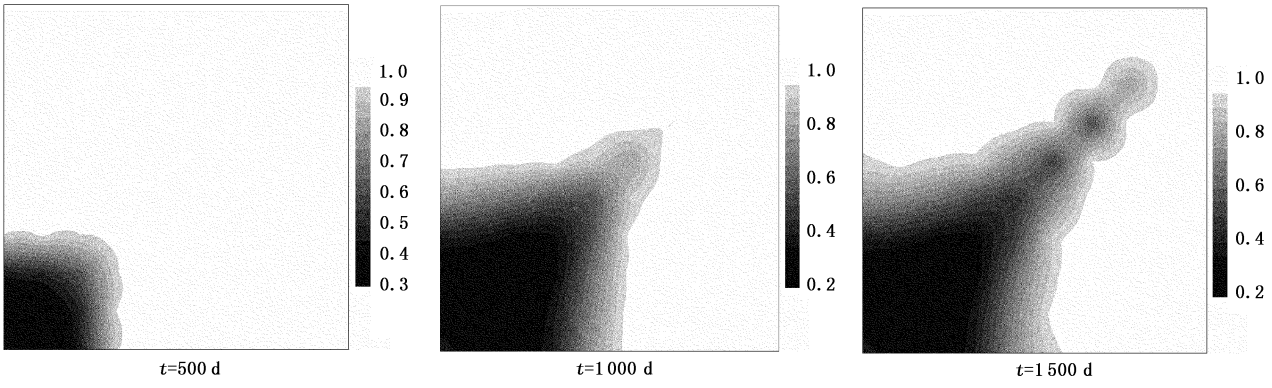

图 3　残余渗透率系数分布

Fig. 3　Distribution of residual permeability factor

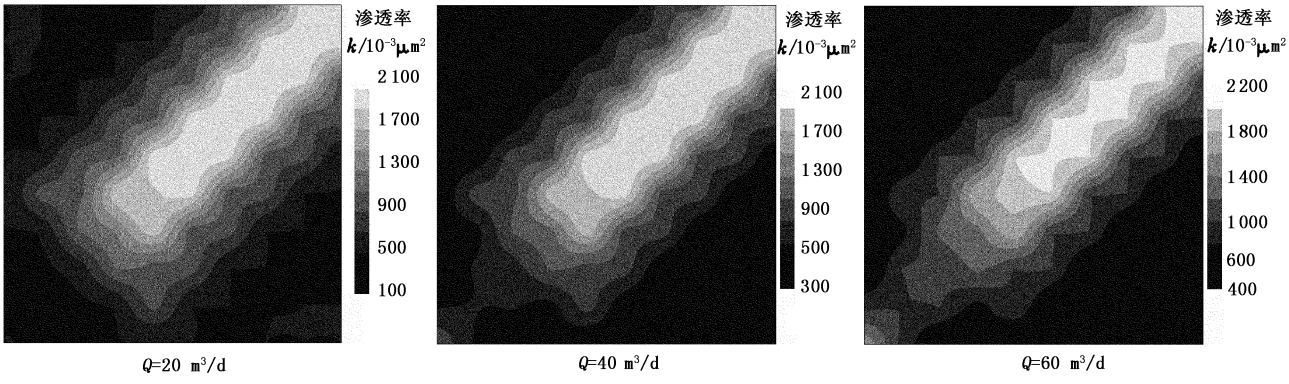

图 4　注 PPG 结束时不同注入速度下渗透率分布

Fig. 4　Permeability distribution for different injection rates at end of injecting PPG

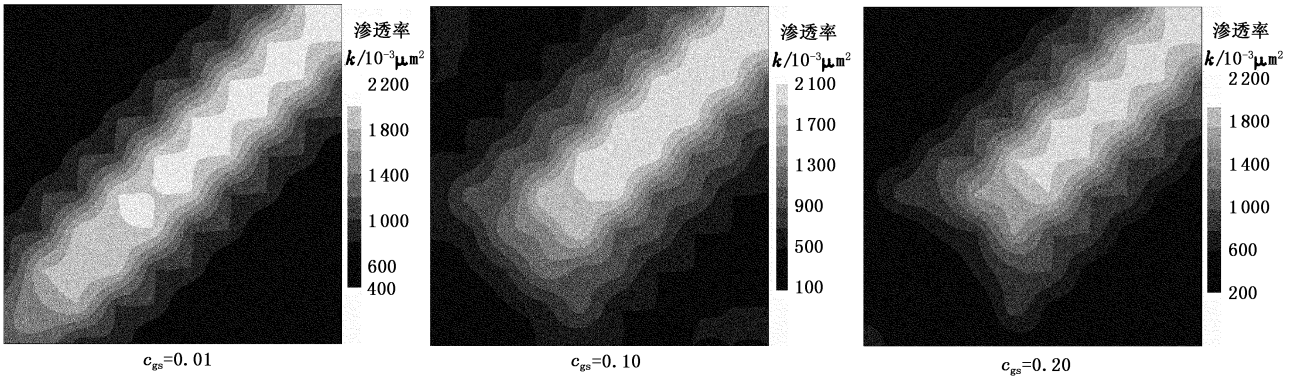

图 5　t=700 d 时不同注入体积分数下渗透率分布

Fig. 5　Permeability distribution for different injection volume fraction at t=700 d

3.2.3　颗粒粒径

注入 PPG 粒径与多孔介质喉道直径的匹配性是决定调剖成败的关键。颗粒粒径较大时,无法注入多孔介质,而颗粒粒径较小时,颗粒又很难发生孔喉堵塞。图 6 为注入不同粒径的 PPG 结束时渗透率分布。从图 6 中可以看出:颗粒粒径较小时,高渗带渗透率基本上没有变化;随着粒径增大,高渗带渗透率逐渐降低,但是当粒径超过 100 μm 时,渗透率下降区域逐渐减小,且集中在注入井周围,导致注入井周围渗透率下降严重,这是因为颗粒粒径与孔喉

直径比值较大时,颗粒发生重启动所需要的压差增大,在注入压力无法达到的情况下,大量颗粒在近井周围发生堆积,最终伤害储层。PPG 驱过程中一定要严格筛选与油藏孔喉直径相匹配的颗粒,否则不仅起不到调剖作用,还会造成储层伤害。

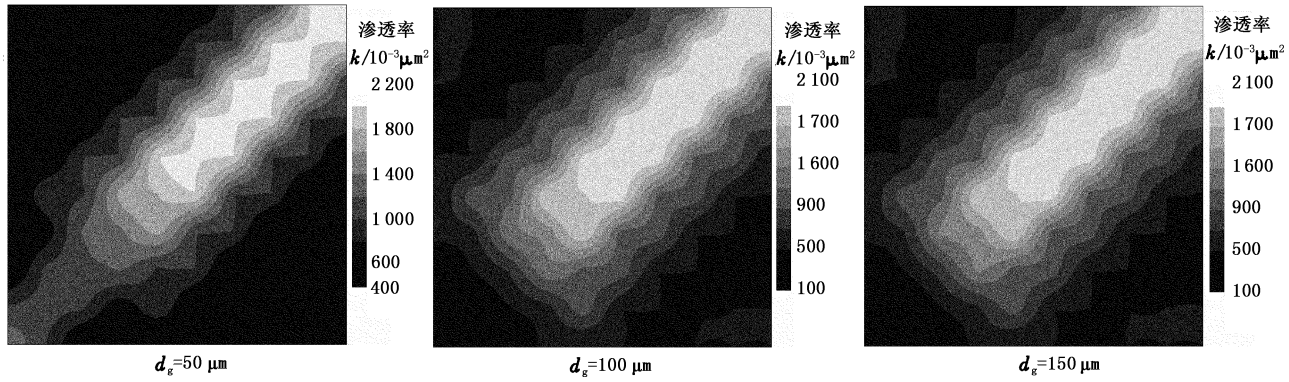

图 6 t=700 d 时不同 PPG 粒径下渗透率分布

Fig. 6 Permeability distribution for different PPG diameters at t=700 d

3.2.4 临界压力梯度

临界压力梯度(由临界压力梯度系数表示)是反映 PPG 重启动难易程度的主要参数。弹性强的颗粒较易发生重启动,封堵能力有限,刚性强的颗粒又很难发生重启动,容易导致储层伤害。图 7 为不同临界压力梯度系数下注 PPG 结束时渗透率分布。从图 7 可以看出:临界压力梯度系数较低时,大量颗粒在较低的注入压力下随携带液流向生产井,只有极少量的颗粒封堵高渗透部位,渗透率下降幅度较小;随临界压力梯度系数升高,发生孔喉堵塞的颗粒增多,高渗部位渗透率大幅降低,调剖效果较好;临界压力较高时,颗粒一旦发生孔喉堵塞就很难再重启动,后续注入的颗粒在近井地带发生堆积,渗透率非常低,而油藏深部没有颗粒进入,不会发生孔喉堵塞,渗透率未发生变化,不能达到预期的调剖效果。吸水膨胀后 PPG 的强度对调剖效果影响非常大,制备过程中应确保 PPG 产品具有适中的强度。

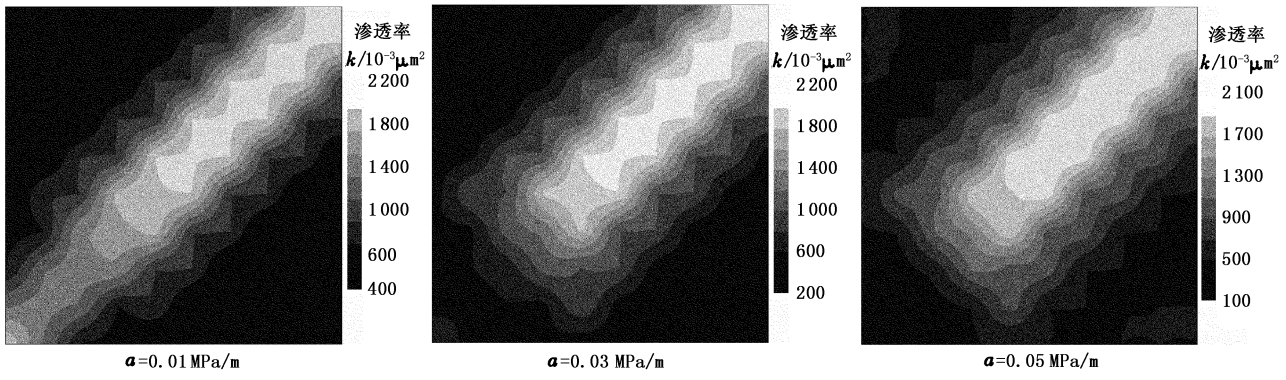

图 7 t=700 d 不同临界压力梯度系数下渗透率分布

Fig. 7 Permeability distribution for different critical pressure gradient factor at t=700 d

4 结 论

(1)在保证能够发生孔喉堵塞的情况下,注入速度越高,越有利于 PPG 进入油藏深部;注入体积分数越高,颗粒对高渗带封堵的范围越大。粒径与孔喉直径比较小时,油藏条件下无孔喉堵塞,粒径与孔喉直径比较大时,颗粒又很难进入多孔介质,仅在注入井周围发生堵塞,伤害地层;重启动临界压力较小时,较小的驱替压力就能使颗粒发生再运移而被携带至生产井,重启动临界压力较大时,颗粒在近井地带发生孔喉堵塞且无法重启动,调剖失败。

(2)PPG 可以实现油藏深部调剖,而不伤害中、低渗部位,注入速度和注入体积分数是影响调剖效果的两个重要因素,PPG 粒径与孔喉直径的匹配性和临界压力是决定调剖成败的两个关键因素;PPG 驱过程中,首先要根据油藏条件选择具有适中强度和粒径匹配性较好的 PPG 样品,然后设计合理的注入速度和注入体积分数。

参考文献:

[1] COSTE J P, LIU Y, BAI B, et al. In-depth fluid diversion by pre-gelled particles: laboratory study and pilot testing [R]. SPE 59362, 2000.

[2] BAI B J, LI L X, LIU Y Z, et al. Performed particle gel for conformance control: factors affecting its properties and applications [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2007,10(4):415-422.

[3] BAI B J, LIU Y Z, COSTE J P, et al. Performed particle gel for conformance control: transport mechanism through porous media [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2007,10(2):176-183.

[4] CUI X H, LI Z Q, CAO X L, et al. A novel PPG enhanced surfactant-polymer system for EOR [R]. SPE 143506, 2011.

[5] ZHANG Hao, BAI Bao-jun. Performed-particle-gel transport through open fractures and its effect on water flow [J]. SPE Journal, 2011,16(2): 388-400.

[6] 石志成, 卢祥国. 预交联体膨聚合物调剖驱油机理及效果评价[J]. 大庆石油学院学报, 2007,31(3):28-30.
SHI Zhi-cheng, LU Xiang-guo. Profile modification mechanism and enhanced oil recovery of precrosslinked polymer flooding[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2007,31(3):28-30.

[7] 朱怀江, 朱颖, 孙尚如, 等. 预交联聚合物微凝胶调驱剂的应用性能[J]. 石油勘探与开发, 2004,31(2):115-118.
ZHU Huai-jiang, ZHU Ying, SUN Shang-ru, et al. Application performance of a pre-crosslinking micro-gel dispersion for profile control and oil displacement[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004,31(2):115-118.

[8] 雷光伦, 郑家朋. 孔喉尺度聚合物微球的合成及全程调剖驱油新技术研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2007,31(1):97-90.
LEI Guang-lun, ZHENG Jia-peng. Composing of pore-scale polymer microsphere and its application in improving oil recovery by profile control[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2007,31(1):97-90.

[9] DULLIEN F A L, BATRA V K. Determination of the structure of porous media[J]. Ind Eng Chem, 1970,62(10):25.

[10] JOHNSTON P R. Fluid filter media: measuring the average pore size and poresize distribution, and correlation with results of filtration tests[J]. Journal of Testing and Evaluation, 1985,13(4):308-315.

[11] JOHNSTON P R. Liquid filtration[J]. Chemical Engineering Progress, 1988,84(11):18-26.

[12] IVES K J. Simulation of filtration on electronic digital computer[J]. J Amer Water Works Assn, 1960,52:933-939.

[13] 刘松. 渗滤的系统及其分析及其数学模型[J]. 数学物理学报, 1994,14(4):361-365.
LIU Song. Analysis of filtration systems and mathematical model[J]. Acta Mathematiea Scientia, 1994,14(4):361-365.

[14] MAROUDAS A, EISENKLAM P. Clarification of suspensions: a study of particle deposition in granular media[J]. Chem Eng Sci, 1965,20:867-873.

[15] 秦积舜, 李爱芬. 油层物理学[M]. 东营:石油大学出版社, 2003.

[16] 李维国, 黄炳家, 同登科. 数值计算方法[M]. 东营:石油大学出版社, 2004.

[17] 伊泽尔莱斯. 微分方程数值分析基础教程[M]. 刘晓艳,刘学深,译. 北京: 清华大学出版社, 2005.

(编辑　李志芬)