

$$\begin{aligned} &\operatorname{div}\left[\rho_{\mathrm{g}}\left(-\frac{KK_{\mathrm{g}}}{\mu_{\mathrm{g}}}\operatorname{grad} p\right)\right]+ \\ &\operatorname{div}\left[\rho_{\mathrm{gs}}\left(-\frac{KK_{\mathrm{o}}}{\mu_{\mathrm{o}}}\operatorname{grad} p\right)\right]+ \\ &\phi \frac{\partial}{\partial t}\left[\rho_{\mathrm{gs}} S_{\mathrm{o}}+\rho_{\mathrm{g}}\left(1-S_{\mathrm{o}}\right)\right]=0 \end{aligned} \quad (6)$$

式中： ρ_{ogs} 为地面标准条件下油气的混合密度， g/cm^3 ； ρ_{gs} 为地面标准条件下天然气的密度， g/cm^3 ； K_{o} 为油相渗透率， $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ； μ_{o} 为油的粘度， $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ； p 为地层压力， MPa ； ϕ 为孔隙度； S_{o} 为含油饱和度； K_{w} 为水相渗透率， $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ； μ_{w} 为水的粘度， $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ； S_{w} 为含水饱和度； ρ_{g} 为地层条件下天然气的密度， g/cm^3 ； K_{g} 为气相渗透率， $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ； μ_{g} 为气的粘度， $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

将式(1)代入油藏流体渗流方程，形成一套储层渗透率在开发过程中动态变化的流固耦合数学模型。求解过程中，采用IMPES方法求得油藏压力与流体饱和度，根据此刻油藏压力分布求得通过各网格的流体量，进而得到通过网格的累积线流量，带入储层参数演变模型可以得到此时网格的渗透率，将它作为新的油藏参数进行下一时间步的计算^[11-14]。

2 优势通道形成与演化的影响因素

设计了一个正韵律厚油层的概念模型(纵向分为15层，从上到下依次为第1到第15层)，取五点注采井组，生产井位于四角，注入井位于模型中心，油井以定产液量生产，注水井以定注入量注入，采用 $35 \times 35 \times 15$ 网格系统， x 和 y 方向网格尺寸均为15m。为了更精确描述油藏优势通道的形成过程， z 方向网格步长采用不等厚尺寸，总厚度为10m，模型渗透率级差为10，各层厚度及渗透率取值见表1。在该模型的基础上，分别在平面及纵向上不同位置设计不同展布面积、不同渗透性的夹层，研究了它们

表 1 各层厚度及渗透率取值

层段号	厚度/m	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	层段号	厚度/m	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
1	1	200	9	0.5	1 442
2	1	414	10	0.5	1 550
3	1	607	11	0.5	1 657
4	0.6	778	12	0.5	1 742
5	0.6	928	13	0.5	1 828
6	0.6	1 078	14	0.5	1 914
7	0.6	1 207	15	0.5	2 000
8	0.6	1 335			

对优势通道演化的影响。

2.1 夹层在平面上的位置

在模型的第12模拟层段不同位置设计了夹层，夹层分别位于：靠近油井；靠近水井；位于油水井之间。当含水率达到90%时，分别得到模型的渗透率分布情况，并与模型不存在夹层时进行了对比。通过4种情形的油层渗透率分布可以看出(图1)：①由于模型为正韵律油藏，油层底部初始渗透率较大，吸水能力强，则底部地层受到的流体冲刷较上部地层更加严重，优势通道在油层的底部尤其井底附近地带更容易发育。②夹层的存在对储层渗透率的分布有很大影响，夹层的不渗透性对流体有封闭遮挡作用，使得注入水在重力作用下纵向窜流至夹层时受到阻碍而转化为平面漫流，加剧了对夹层上部地层的冲刷，使得该部位渗透率上升幅度较大，容易演化为优势通道，而夹层下部地层的渗透率则因受到相对较小的冲刷，对比于无夹层情况渗透率相对变化较小。③在各种情况中，夹层位于注入井井底附近时，其对储层渗透率的影响相对其他情况更为明显，这是因为注入井井底附近到夹层所在部位注入水量多且流速较快，遇储层而转化为平面流动的流体量大大增加，增大了对夹层上部地层的冲刷，从而使得这些部位的渗透率增加更为明显，亦即更容易形成优势通道。

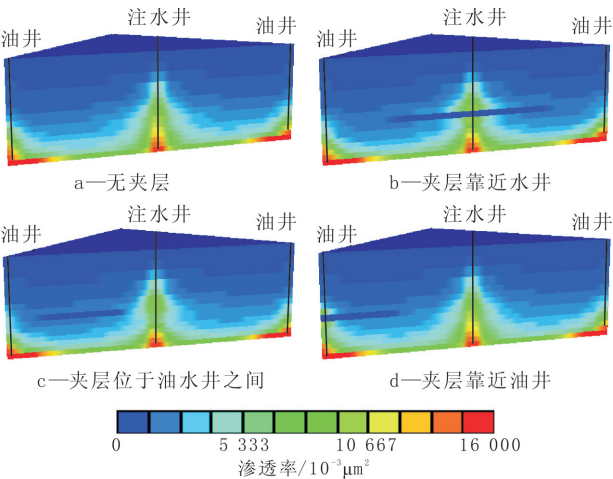


图 1 夹层位于平面不同位置时模型渗透率分布对比

2.2 夹层在纵向上的位置

对于夹层靠近水井的情况，设计了夹层在纵向上处于不同的部位：夹层位于油层上部；夹层位于油层中部；夹层位于油层下部。含水率达到90%时，得到3种情况下油层渗透率分布，并与油层无夹层情况进行了对比。从图2中可以看出：夹层位于油层较上部时，夹层上部及其下部地层的渗透率变化

均不大,这些部位都不足以形成优势通道,因为夹层所在部位的吸水量较小,对地层的冲刷较弱;而夹层位于油藏中部及中部以下地层时,吸水量较大,加之其对流体的遮挡作用,夹层上部地层渗透率相对于无夹层情况有了较大幅度的增高,而夹层下部地层渗透率则变化不明显,亦即夹层上部地层更加容易发育优势通道,下部地层则相对不容易形成优势通道,原因在于,随着深度的增加,油层渗透率逐渐增加,注入流体流量亦随之增加,夹层上部地层受到的冲刷作用增强,其渗透率变化就会增大,底部地层受到的冲刷作用相对减弱,其渗透率的变化也就越小。

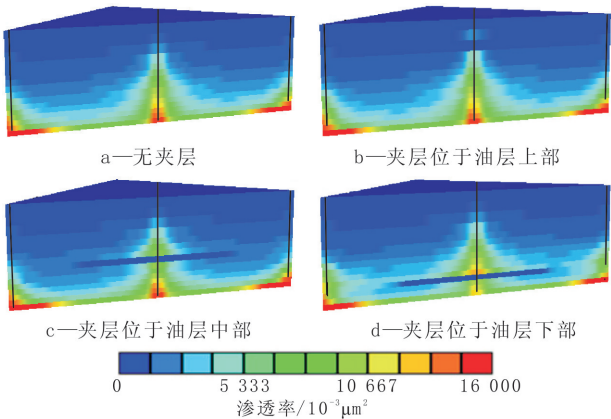


图 2 夹层位于纵向不同位置时模型渗透率分布对比

2.3 夹层展布面积

在模型中设置了不同展布面积的夹层,夹层的半平面展布长度分别为:1/4 注采井距、1/2 注采井距和 2/3 注采井距,含水率达到 90%时,得到了各模型的渗透率分布。从图 3 中可以看出:夹层展布面积为 1/4 注采井距时,夹层下部地层的渗透率与无夹层存在时地层渗透率相差不大,说明这些部位已经发育形成了优势通道,当夹层的半平面展布长

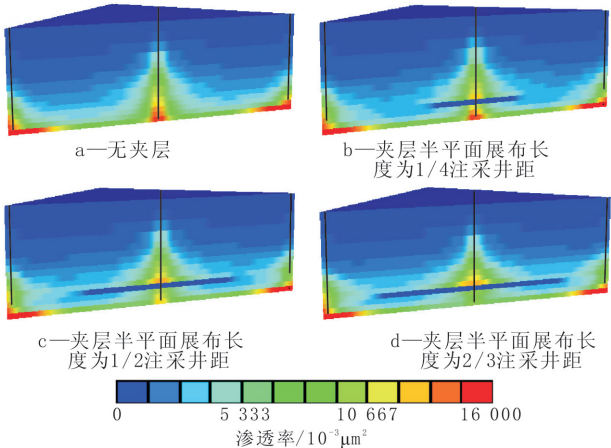


图 3 夹层展布面积不同时模型渗透率分布对比

度超过 1/2 注采井距时,夹层下部地层渗透率相对于无夹层存在时有了较大幅度的降低,尤其当夹层的半平面展布长度为 2/3 注采井距时,夹层下部地层渗透率为 $8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右,说明这些部位在夹层存在的情况下并不容易发育优势通道;另一方面,随着夹层展布面积的增加,转化为平面流动的流体流量更多,且因夹层上部地层冲刷面积的增大,导致夹层上部地层更加容易形成优势通道。

2.4 夹层渗透性

设计模型中夹层存在一定的渗透性(渗透率设为模型该层段渗透率的 1/50),与不渗透夹层情况进行了对比,含水率达到 90%时,得到了 2 种情况下模型的渗透率分布。从图 4 中可以看出:夹层渗透性是衡量夹层对流体封闭遮挡作用的重要标准,不渗透夹层可以完全阻挡流体的纵向窜流,从而使得夹层下部地层受到相对较小的流体冲刷,地层渗透率的增加较之夹层存在一定的渗透性时要小得多,即这种情况下,夹层下部地层相对不容易发育优势通道。

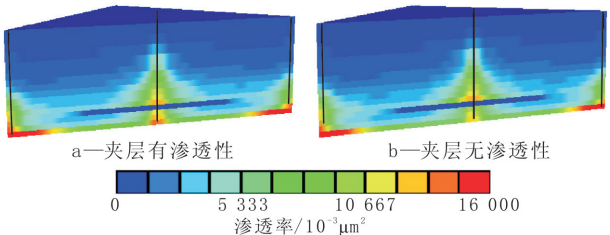


图 4 夹层渗透性对模型渗透率的影响

3 结论

通过建立正韵律厚油层储层参数演变模型,将其与流体渗流微分方程耦合在一起,形成了描述优势通道演化过程的流固耦合数学模型,并编制了模型数值计算软件。在此基础上,通过对概念模型的模拟,研究了夹层对优势通道演化的影响。正韵律厚油层的底部及井底附近地带容易发育优势通道;靠近注入井附近地带的夹层上部地层更容易形成优势通道;正韵律厚油层中夹层位置越靠下,其上部地层更加容易发育优势通道,而下部地层则相对不容易形成优势通道;夹层的展布面积越大,其对上部地层流体的阻挡范围越大,夹层下部地层的渗透率变化越小,底部地层越不容易形成优势通道;夹层渗透性越差,其封闭遮挡作用越好,夹层下部地层越不容易发育优势通道。