

低频波动采油对径向储层初始渗流的影响

郑黎明^{1,2},蒲春生²,刘静²

(1.燕山大学 车辆与能源学院,河北 秦皇岛 066004; 2.中国石油大学(华东)石油工程学院,山东 青岛 266580)

摘要:分析低频波动作用下饱和单相渗流流体径向孔隙介质的物性变化,可揭示低频波动采油对井筒附近具有变化压力梯度的实际储层渗流的影响。通过构建低频波动对径向储层初始渗流影响的弹性波传播控制方程,考虑弹性波与井筒周围初始时刻流动方向的一致性,采用映射网格与边界层加密进行物理模型网格划分,以削弱弹性波边界虚假反射;通过COMSOL系统有限元模拟,对比波动耦合渗流和Biot流动、初始径向渗流的物性特征,以与半解析解的差异,说明数值模拟揭示低频波动影响下储层物性参数周期性变化的有效性。研究结果表明:波动耦合渗流不等于初始径向渗流与Biot流动的简单叠加;震源位于注入井时,低频波动对径向渗流场具有明显的降压、增速和增孔作用,越靠近注入井,效果越明显;研究区基础参数条件下,局部最大压降达40%,距离井筒中心10 m范围内相对流速明显增加;低渗透率、高孔隙度时低频波动对渗流的促进作用更为明显。

关键词:低频波动 数值模拟 压力梯度 初始渗流 径向储层

中图分类号:TE312

文献标识码:A

Influence of low-frequency vibration oil recovery on the initial flow of radial reservoir

ZHENG Liming^{1,2}, PU Chunsheng², LIU Jing²

(1.College of Vehicles and Energy, Yanshan University, Qinhuangdao City, Hebei Province, 066004, China; 2.School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao City, Shandong Province, 266580, China)

Abstract: After physical property change of radial pore medium saturated by single phase fluid was analyzed under low-frequency vibration, influence of low-frequency vibration oil recovery on the actual reservoir flow with various pressure gradients near the wellbore may be known. The control equations for elastic wave propagating were established, which shows the influence of the low-frequency vibration on the initial flow of the radial reservoir. Considering the consistency of directions of elastic wave and initial Darcy flow around the wellbore, physical model meshing was made according to the mapped meshing and boundary mesh refinement to weaken the boundary spurious reflection. By comparing coupled vibration flow with Biot flow and initial radial flow based on finite element simulation of COMSOL system, it is demonstrated that the numerical simulation can reveal the effectiveness of periodic changes of reservoir physical property under the influence of the low-frequency vibration according to the difference in semi-analytical solution. The research results present that the coupled vibration flow is not simply equal to the sum of Biot flow and initial radial flow. The low-frequency vibration has obvious function of increasing the seepage velocity and permeability and decreasing the injection pressure in the radial flow field when the vibration source is in the injection well; the effect is more obvious near the injection well. The local maximum pressure decrease ratio reaches 40%, and the action range with significant velocity increase is 10 m to the center of wellbore. The effect is more obvious at lower permeability and higher porosity.

Key words: low-frequency vibration; numerical simulation; pressure gradient; initial flow; radial reservoir

收稿日期:2017-09-20。

作者简介:郑黎明(1989—),男,山东德州人,博士,从事复杂油气藏物理-化学强化开采技术与理论方面的研究。联系电话:13475845480, E-mail:zheng_liming_happy@126.com。

基金项目:国家自然科学基金项目“低渗油藏低频振动辅助表面活性剂复合驱油机理研究”(51274229),山东省自然科学基金项目“多级强脉冲压裂条件下岩石破坏损伤与裂隙扩展耦合响应机制研究”(ZR2016EEQ04),中央高校基本科研业务费专项资金项目“低频谐振波对低渗油藏渗流影响的数值模拟研究”(16CX02020A)。

矿场中利用井下人工震源振击深部储层,可以加剧岩石骨架与孔隙流体(开发条件下初始时刻处于流动状态)的交错运动,达到改善井筒周围物性的作用,提高流体的渗流能力^[1-2]。目前,研究人员通过大量实验揭示该技术的物性改善作用^[3-4],并建立数学模型分析波动作用下的渗流速度变化。所用方法是将波诱导压力变化直接叠加到一般达西方程中,该方法较为简单,忽略流固交错运动的耦合作用机制,并假设波动耦合渗流压力等于 Biot 流动压力幅值与初始径向渗流压力的和^[5-6]。然而,这些实验和模型研究多基于恒定压力梯度下的一维模型进行分析,对井筒附近具有变化压力梯度的岩土考虑较少。

借鉴岩土工程中的 Biot 理论,开展波动条件下饱和初始渗流流体的孔隙介质渗流变化分析,是揭示低渗透储层开发中低频波动采油具体动力学作用机制的一种有效途径。相关边界条件、流体初始状态、波传播和渗流方向与常规 Biot 理论应用有所区别^[7-8]。通过建立饱和单相渗流流体孔隙介质弹性波传播模型,得出 Laplace 变换域下一维或径向模型定压、定流量开采下的流、固相物性变化的半解析解,分析了压力、流速受振动参数影响的敏感性。虽然该半解析解可在一定程度上反映储层物性随时间的波动变化,最佳振动参数与实验模拟结果相近,但储层物性随空间的变化(尤其是径向模型)具有较大误差。造成半解析解误差的主要原因为,求取通解过程中假设关于各物性参数的偏微分方程系数为常数,特解仅给定两点的初始值。开展相关数值模拟研究,对于准确揭示实际低渗透储层低频波动采油增孔、增渗作用机制具有重要意义。

Biot 理论数值模拟过程中,模拟结果受网格划分、弹性波场与渗流场方向、边界虚假反射等因素影响。因此,需通过建立低频波动加载下径向渗流的合理模型,对低频波动作用下低渗透储层的物性变化进行分析。笔者利用 COMSOL 构建系数型偏微分方程模块^[9],有限元模拟反映波动采油技术在井筒附近的降压、增速和增孔效果;通过与半解析解作对比,说明数值求解结果的准确性,为低频波动采油对实际储层渗流的促进应用提供理论指导。

1 数学模型

对于低频波动作用下饱和单相渗流流体的径向低渗透储层^[10-11],在 Biot 波动控制方程中引入启动压力梯度和相互耦合变化的储层物性参数^[8,12],

其控制方程为

$$\mu \nabla^2 u + \text{grad}[(\mu + \lambda + \alpha^2 M) \text{div} u + \alpha M \text{div} w] + \rho b^s = \rho \ddot{u} + \rho_i \ddot{w} \quad (1)$$

$$-\text{grad} p_f + \rho_f b^f = \rho_f \left(\ddot{u} + \frac{\ddot{w}}{\phi} \right) + \frac{\eta(\omega)}{K(\nabla p_f)} \dot{w} - \lambda_0(K) \quad (2)$$

$$-\nabla p_f = \nabla(\alpha M \text{div} u + M \text{div} w) \quad (3)$$

考虑孔隙度-形变关系、流固压缩性、启动压力梯度的状态方程为

$$d\phi = \alpha de + \frac{dp_f}{Q_c} \quad (4)$$

$$K = K_0 \left(\frac{\phi}{\phi_0} \right)^3 \left(\frac{1 - \phi_0}{1 - \phi} \right)^2 \quad (5)$$

$$\frac{dp_f}{\rho_f} = \frac{1}{K_f} dp_f \quad (6)$$

$$(1 - \phi) d\rho_s = \rho_s \left[(\alpha - 1) de + \frac{1}{Q_c} dp_f \right] \quad (7)$$

$$\nabla p_f > \lambda_0, v = \dot{w} \quad (8)$$

$$\nabla p_f \leq \lambda_0, v = 0 \quad (9)$$

假设低频波动条件下水相粘度不变,低粘原油粘度为振动频率的函数^[8],即

$$\eta(\omega) = C\rho_f u_0 \omega^2 + \eta_0 \quad (10)$$

定压开采条件下,径向模型初始边界条件^[13]为

$$p_f(r_w, t) = p_w \quad (11)$$

$$p_f(r_e, t) = p_e \quad (12)$$

$$u(r_w, t) = u_0 \exp(i\omega t) \quad (13)$$

利用伽辽金加权余量法,得到弱形式有限元控制方程为

$$\begin{pmatrix} M_1 & M_2 \\ M_3 & M_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{w} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & C_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{u} \\ \dot{w} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K_1 & K_2 \\ K_3 & K_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{w} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} \quad (14)$$

其中

$$M_1 = \rho \int_A N_i^u N_k^u dA \quad (15)$$

$$M_2 = \rho_f \int_A N_i^u N_k^w dA \quad (16)$$

$$M_3 = M_2^T = \rho_f \int_A N_i^w N_k^u dA \quad (17)$$

$$M_4 = \frac{\rho_f}{\phi} \int_A N_i^w N_k^w dA \quad (18)$$

$$K_1 = \mu \int_A N_{i,j}^u N_{k,j}^u dA + (\mu + \lambda + \alpha^2 M) \int_A N_{i,i}^u N_{k,j}^u dA \quad (19)$$

$$K_2 = \alpha M \int_A N_{i,i}^u N_{k,j}^w dA \quad (20)$$

$$K_3 = K_2^T = \alpha M \int_A N_{i,i}^w N_{k,j}^u dA \quad (21)$$

$$K_4 = M \int_A N_{i,i}^w N_{k,j}^w dA \quad (22)$$

$$C_4 = \frac{\eta}{K} \int_A N_l^w N_k^w dA \quad (23)$$

$$F_1 = \oint_S N_l^u [\mu u_{ij} + (\mu + \lambda + \alpha^2 M) u_{j,i} + \alpha M w_{j,i}] dS = \oint N_l^u (\sigma_n - \alpha p_n) dS \quad (24)$$

$$F_2 = \oint_S N_l^u (\alpha M u_{j,i} + M w_{j,i}) dS + \int_A N_l^w \lambda_0 dA = -\oint N_l^w p_n dS + \int_A N_l^w \lambda_0 dA \quad (25)$$

固体位移和液体相对位移的插值公式分别为

$$u_i = \sum_{k=1}^{n_n} N_k^u \tilde{u}_{ki} \quad (26)$$

$$w_i = \sum_{k=1}^{n_n} N_k^w \tilde{w}_{ki} \quad (27)$$

2 低频波动作用下径向储层初始渗流流速与物性变化

2.1 物理模型与网格划分

2.1.1 物理模型

低频波动作用下径向模型驱替时,采用1/4的同心圆模型模拟1口注入井注入流体至近似无穷大油藏(定油藏压力和注入压力),弹性波传播方向与无波动作用时的初始渗流场方向相同(图1)。井筒半径为0.1 m,油藏半径为100 m(由于低渗透储层波速较大,该距离仍在波长范围内),振动频率为10 Hz。模型物性在模型 x, y 轴处呈对称分布,以中部(BB' 线)物性参数变化代表低频波动采油影响下径向储层初始渗流变化。为实现弹性波在油藏内部充分衰减,油藏边界处添加1个匹配层(PML)^[14-15],其宽度为 D (设置为5 m,该范围内弹性波振幅足够

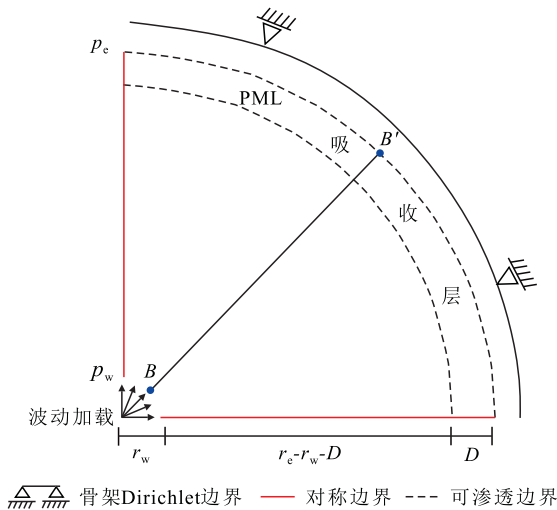


图1 径向模型模拟区域与边界条件
Fig.1 Computational region and boundary condition of radial model

衰减、孔隙压力接近油藏压力)。

2.1.2 网格划分

由于初始渗流场与弹性波场方向一致,网格划分形式对模拟结果的准确性和弹性波虚假反射程度有较大影响,反映有限元预先网格划分形式的重要性^[16-17]。自由三角形网格划分时,源自边界的弹性波虚假反射明显(图2);网格划分节点与初始流速、弹性波传播方向一致时(图3),径向模型中固体位移、孔隙压力沿不同角度基本呈均匀分布,源自边界的弹性波虚假反射明显削弱;就数值而言,固体位移和孔隙压力收敛性较好,孔隙介质内部参数介于初始值和边界值之间。径向模型采用较细化的映射网格划分最佳,其物性参数随弹性波传播呈周期性变化。

除采用映射网格,为更加清晰表示井筒附近的物性变化,在注入边界处进行边界层加密,边界层数为4。模型共划分四角形单元786个、边单元210

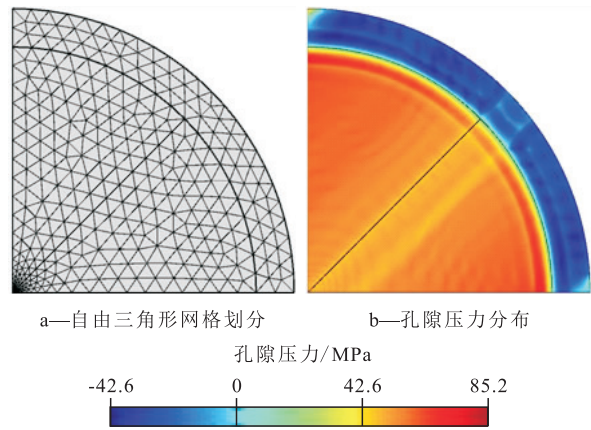


图2 自由三角形网格划分与低频波动作用振动时间为10 s时孔隙压力分布

Fig.2 Irregular triangular meshing and corresponding pore pressure under vibration for 10 s

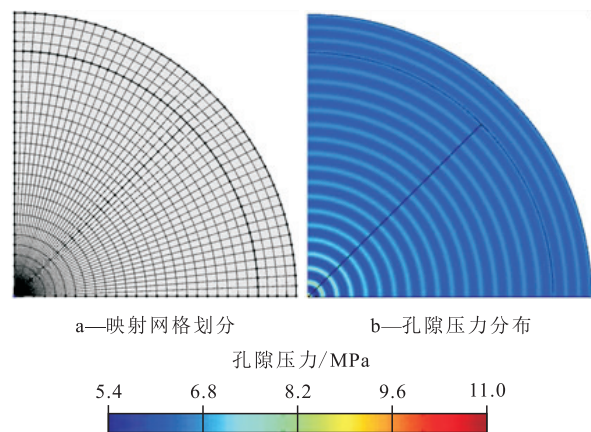


图3 映射网格划分与低频波动作用振动时间为10 s时孔隙压力分布

Fig.3 Mapped meshing and corresponding pore pressure under vibration for 10 s

个、顶点单元12个。

2.1.3 增进求解精度的其他处理方法

在固结问题中,压力和位移的插值离散形式、研究尺度、控制方程弱形式系数矩阵也会对求解结果的准确性造成影响;通过改变压力和位移的逼近阶次、采用混合网格和混合算法等来提高结果的收敛性^[18]。除添加PML、映射网格划分与边界层加密以外,对不同因变量的形函数采用不同阶次(固体位移、流体位移和孔隙压力分别采用Lagrange类型3阶、2阶、2阶的形函数);同时,在保证结果收敛的情况下,尽可能减小容差来提高结果的精度。

2.2 实例分析

以径向油藏定压开采为例,考虑初始时刻水相处于稳定达西渗流,忽略垂向厚度对渗流的影响,参考延长油田某油藏^[8,19-20],具体岩石和流体物性参数取值为:骨架密度为2 650 kg/m³,流体密度为997

kg/m³,初始孔隙度为0.156,初始渗透率为5.7 mD,流体初始粘度为1.0 mPa·s,饱和岩石体积模量为29.33 GPa,骨架体积模量为39.91 GPa,流体体积模量为2.25 GPa,注入压力为11.0 MPa,油藏压力为8.0 MPa。振动参数包括:初始振幅为100 μm,振动频率为10 Hz。

2.2.1 低频波动作用下饱和水相孔隙介质物性变化

低频波动作用下径向模型内部物性参数随时间增加发生明显改变(图4)。一个弹性波传播周期内固体位移振幅和相对流速均经历了正向最大振幅一反向最大振幅一正向最大振幅减小的变化,二者随距离增加而快速减小,导致全区真实流速同样呈上述变化;初始径向渗流的存在,使得相对流速正向最大值明显大于相对流速反向最大值;注入压力得到充分降低,体现矿场试验中波动采油技术的降压增注效果。

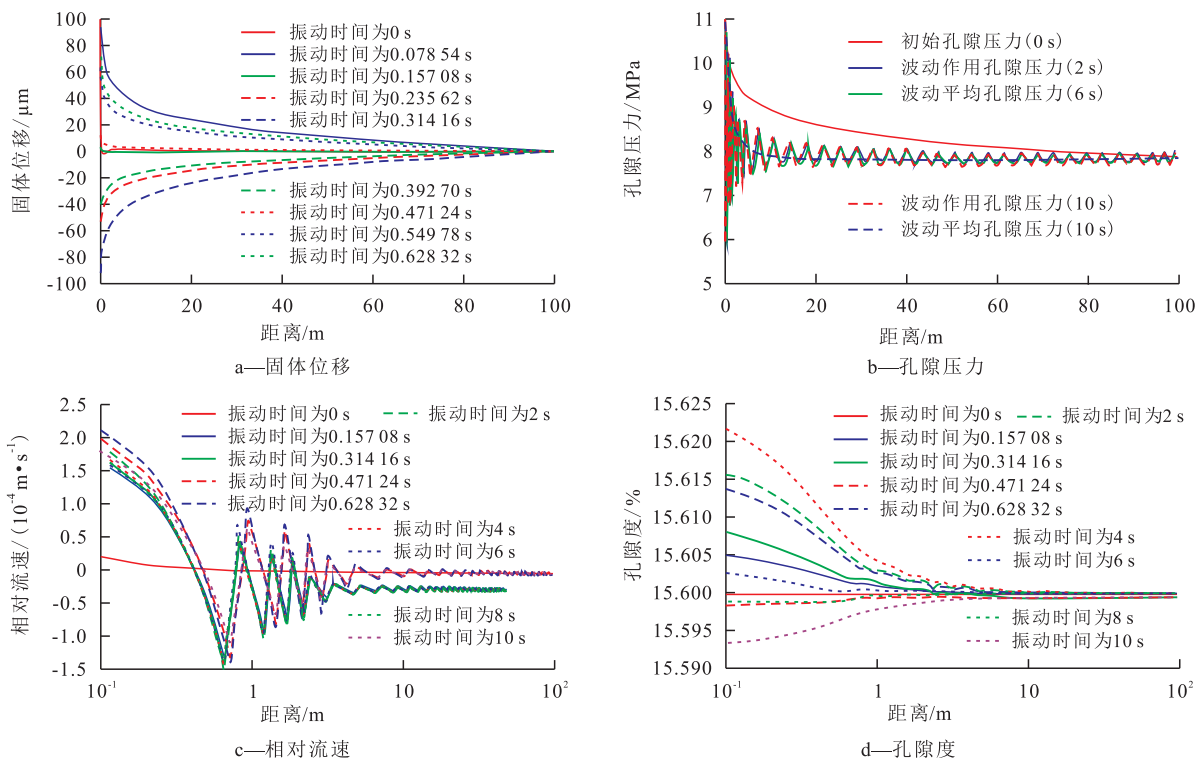


图4 低频波动作用振动时间为10 s时径向模型物性变化

Fig.4 Numerical variation of physical properties of radial model under low-frequency vibration for 10 s

随时间增加,某一位置处孔隙压力、降压幅度和相对流速曲线均呈周期性变化,随距离增加,孔隙压力、降压幅度和相对流速均快速降低。受流固耦合作用下固体应变和孔隙压力变化的影响,随时间增加,某一位置处孔隙度亦呈周期性变化,孔隙度最大增幅明显大于其最大降幅,随距离增加,孔隙度数值呈快速减小趋势。不同位置处孔隙度相

近的变化趋势以及较小的数值波动,反映低频波动采油导致的固体压缩性改变是增孔的主要因素,孔隙压力变化导致的流体压缩性改变是增孔的次要因素。全区低频波动采油的降压、增注作用明显,越靠近注入井(震源),效果越明显;在文中基础参数条件下,研究区局部最大压降达40%,距离井筒中心10 m范围内流速明显增加,孔隙度最大增幅为

0.141%,渗透率最大增幅为0.439%。

2.2.2 有限元数值模拟与半解析解的对比

通过有限元数值模拟结果与 Laplace 半解析解^[21](图5)对比,说明2种方法的相似性与适用性。

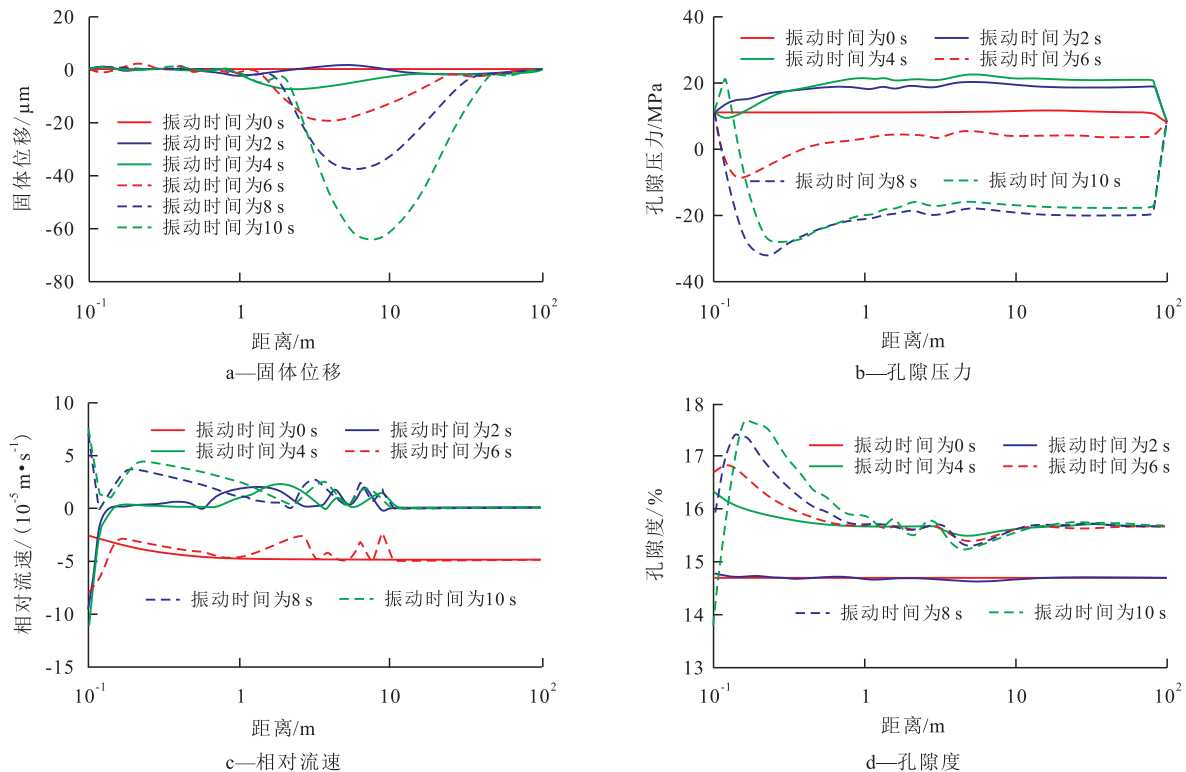


图5 径向模型的半解析解

Fig.5 Semi-analytical solution of radial model

的最大流速增幅大于半解析解,孔隙度增幅小于半解析解;有限元数值模拟得到的固体位移处于震源振幅范围内,孔隙压力基本介于油藏压力与注入压力之间,而半解析解中的孔隙压力和固体位移具有很大偏差,固体位移无正向振幅,孔隙压力甚至出现负值。就变化规律而言,半解析解中,随时间增加,某一位置处的相对流速、孔隙压力、孔隙度和固体位移均呈不规则波动性变化,物性参数的增加和降低并存,模拟范围内相对流速最大增幅、孔隙度最大增幅、固体位移振幅均有所增加;有限元数值模拟计算得到的物性参数随时间增加呈周期性波动变化,相对流速和孔隙压力随距离增加呈周期性衰减,孔隙度和固体位移随距离增加呈单调性递减。因此,半解析解虽然可以用于揭示低频波动采油作用效果、近似筛选最优工艺参数,但无法准确地反映 Biot 流动引起的物性周期性变化。

分析认为2种方法结果存在差异的原因为:①在流体位移半解析通解求解过程中,采用多次简化,方程组系数假设为常系数,仅在通解 Laplace 逆

对比图4与图5可知,半解析解虽然可以部分体现低频波动采油在径向模型的降压、增注和增孔作用,但其数值以及变化规律与有限元数值模拟均存在较大差异。就数值而言,有限元数值模拟得到

变换时考虑系数与因变量间的迭代变化。②在流体位移半解析特解求解过程中,仅假设2个端点参数已知,模型内部未能模拟表示各点的初始径向流动。有限元数值模拟可通过参数离散化,顺利实现物性参数随时间和位置的波动变化模拟。因此,相对于径向储层半解析解,有限元数值模拟可弥补半解析解的不足,削弱求解误差,相对正确地解释低频波动采油作用效果。

求解方法对比说明,相对于运动方程直接叠加波诱导压力变化的简单模型求解方法以及半解析解,有限元数值模拟揭示径向模型低频波动采油机制可行,更能准确体现孔隙介质内部具体物性变化机理。

3 径向储层波动耦合渗流影响性分析

3.1 波动耦合渗流与 Biot 流动的对比

通过对比径向模型中 Biot 流动(图6)、初始径

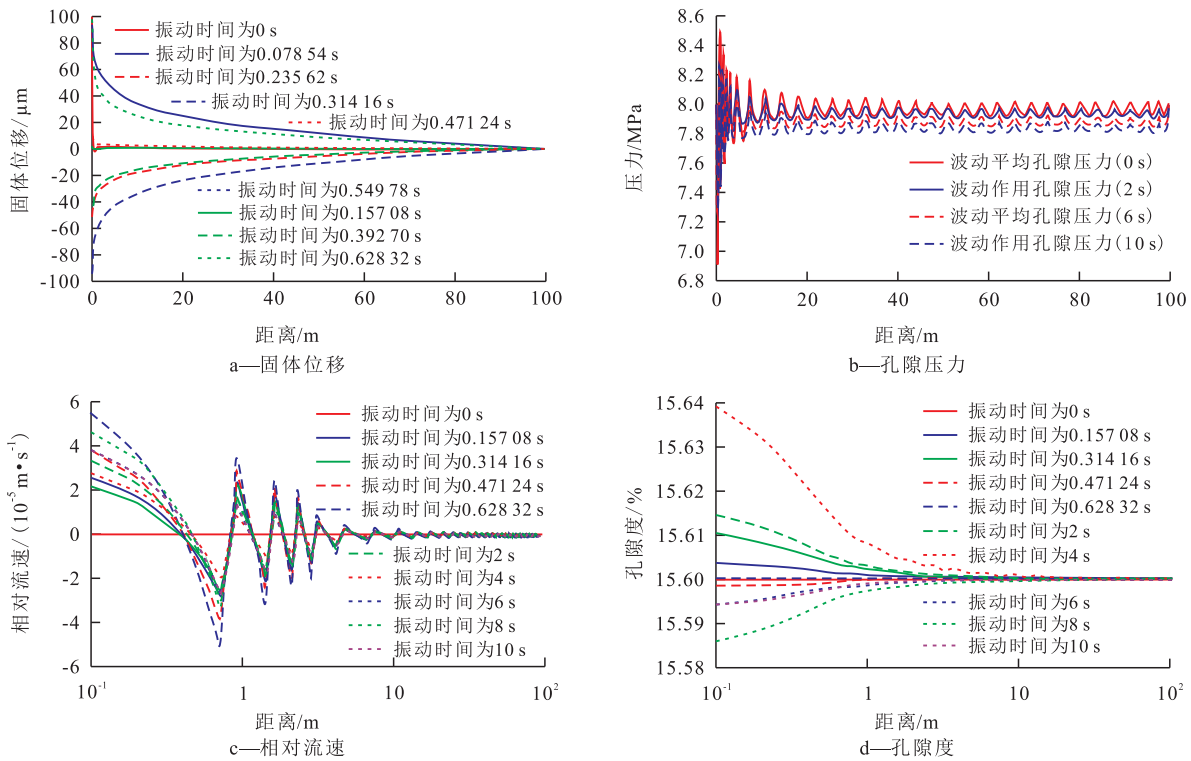


图6 低频波动作用振动时间为10 s时Biot流动下物性变化(初始压力为油藏压力)

Fig.6 Numerical variation of physical properties due to Biot flow under low-frequency vibration for 10 s (initial pore pressure equals to reservoir pressure)

向渗流和波动耦合渗流的相关物性参数差异,说明Biot流动与初始径向渗流对波动耦合渗流的影响。波动耦合渗流、Biot流动、波动耦合渗流与初始径向渗流的差值三者的物性变化趋势具有较强相似性,但数值结果存在一定差异。

Biot流动和波动耦合渗流中的固体位移变化基本相似,均随距离的增加逐渐衰减,初始径向渗流存在导致的弹性波衰减增强,使得Biot流动中固体位移振幅略大于波动耦合渗流;当Biot流动对应初始时刻孔隙压力较高时,流体压缩性较强,使得弹性波的衰减相对减弱,Biot流动中的固体位移振幅和固体应变相对增加。

初始时刻孔隙压力越大,Biot流动对应波诱导压力波动越大,相对初始压力最大变化幅度越小,Biot流动显著作用半径越大(图7)。一方面,径向模型中波动耦合渗流场与Biot流动的压力增幅差异,说明波动耦合渗流场压力不等于初始径向渗流压力与Biot流动压力波动的简单叠加,直接将波诱导压力变化加入运动方程的低频波动采油半定量分析方法不可取。当然,鉴于波动耦合渗流压力最大变化幅度约等于初始压力为大气压时的Biot流动压力最大变化幅度,这可为半定量分析中的压力波动

假设提供一定参考;另一方面,根据疏松砂岩有效

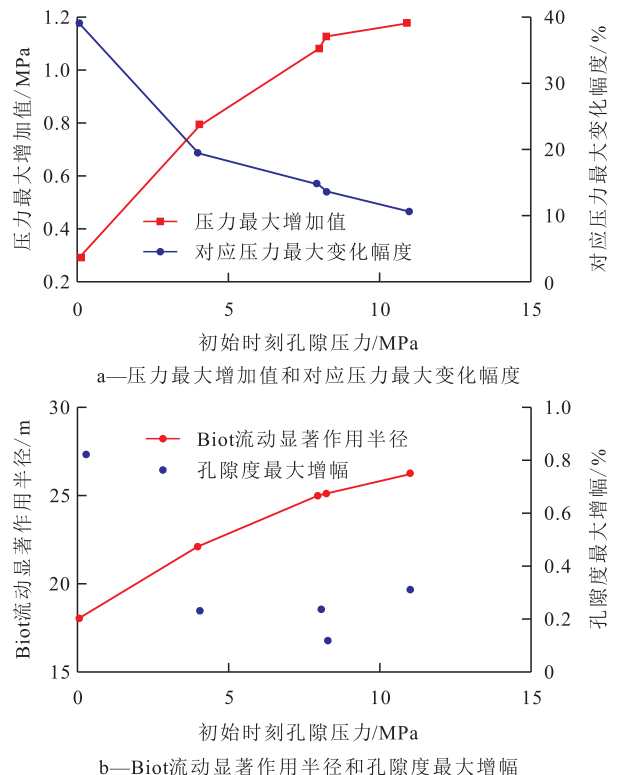


图7 不同初始时刻孔隙压力对应的径向模型Biot流动物性参数变化

Fig.7 Variation of physical properties due to Biot flow of radial model under different initial pore pressures

应力液化判别条件^[22], Biot 流动压力最大变化幅度与初始时刻孔隙压力的关系, 可反映浅层油藏发生液化的可能性较大, 该类油藏可考虑开发后期采取振动处理, 实现储层重构。

初始时刻孔隙压力不同, Biot 流动相对流速和真实流速的变化趋势也不同。初始时刻孔隙压力为大气压时, 同一位置处相对流速和真实流速均随时间的增加呈周期性变化, 即不同时刻正向流速和反向流速共存; 而初始时刻孔隙压力为油藏压力时, 同一位置处相对流速和真实流速随时间的增加呈统一性增加或降低趋势。波动耦合渗流与初始径向渗流的相对流速差值的变化规律, 与较高初始孔隙压力(油藏压力)下的 Biot 流动相对流速变化规律一致, 但其数值则与较低初始孔隙压力(大气压)下的 Biot 流动相对流速数值接近。由于径向模型外围边界的初始流速远小于井筒附近的, 流体位移设置为 0, 因此, 外围边界的 Biot 流动的相对流速为 0, 与低频波动作用下一维驱替数值模拟条件与结果(注入采出端的初始流速、流体位移均不为 0, 波诱导流动在两端均明显存在)有所不同。

由于波动耦合渗流场中的固相惯性作用被初始径向渗流削弱, 因此, 仅考虑 Biot 流动时的孔隙介质固相应变、孔隙度和渗透率变化均相对较大。计

算结果表明, 初始时刻孔隙压力为大气压时, Biot 流动对应的孔隙度和渗透率变化最大。随时间的增加, 孔隙度和渗透率呈周期性变化; 随距离的增加, 孔隙度和渗透率的增幅逐渐下降; 在文中基础参数条件下, 研究区低频波动导致孔隙参数明显变化的范围约 0 ~ 20 m。

3.2 不同初始孔隙度和渗透率对波动作用下流速、孔隙度促进作用的影响

通过单一变量法, 分析初始孔隙度、初始渗透率、振动频率和振幅对波动耦合渗流场物性增幅的影响。敏感性分析中采用一定参数下饱和水相孔隙介质流速和孔隙度的最大变化幅度, 间接反映低频波动采油作用效果, 定义参数为

$$\left(\frac{\Delta v}{v_0}\right)_{\max} = \max\left\{\frac{\Delta w}{v_{R\text{const}}}, t \leq 10\right\}_{\Omega_{B-R}} \quad (28)$$

$$\left(\frac{\Delta \phi}{\phi_0}\right) = \max\left\{\frac{\Delta \phi}{\phi_0}, t \leq 10\right\}_{\Omega_{B-R}} \quad (29)$$

低频波动作用下的饱和水相孔隙介质中, 随振幅增加, 径向模型的流速最大变化幅度呈现较小幅度的波动变化趋势(图 8), 孔隙度最大变化幅度整体呈现对数型增加趋势。相对低频波动作用下一维驱替模型结果, 径向模型敏感性曲线波动更为强烈, 适于筛选最佳振幅(100 ~ 150 μm)。

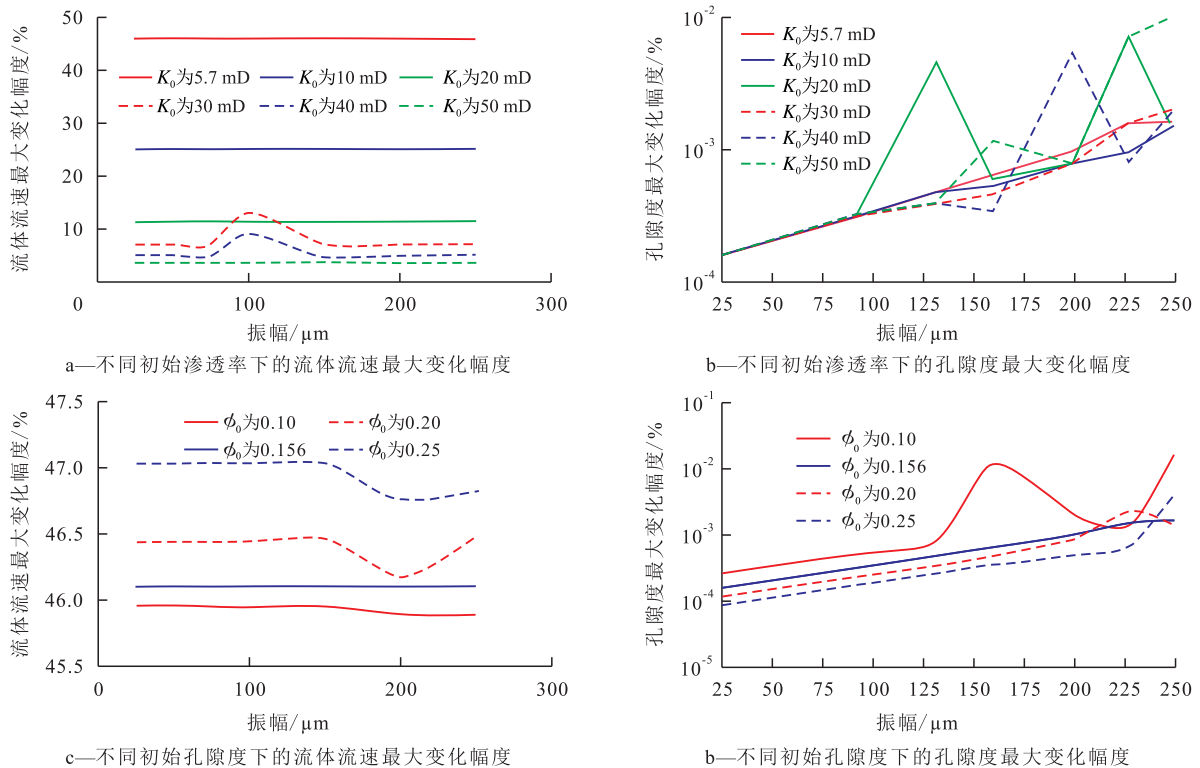


图 8 不同振幅与初始孔隙度或初始渗透率条件下孔隙度和流体流速最大幅度变化(低频波动作用振动时间为 10 s)

Fig.8 Maximum variation rate of porosity and flow velocity under various initial permeabilities, initial porosities and amplitudes(low-frequency vibration for 10 s)

随初始渗透率的增加,径向模型流速最大变化幅度逐渐减小,孔隙度最大变化幅度先增加后降低,对应最佳振动频率略微右移,对应最佳振幅略微左移;随初始孔隙度的增加,孔隙度最大变化幅度逐渐降低,流速最大变化幅度略微增大,对应最佳振幅和振动频率均略微右移。相对于初始孔隙度,初始渗透率对低频波动采油作用效果的影响更大。

就数值而言,井筒附近具有较大压力梯度的径向模型的流速最大增幅与具有稳定压力梯度的一维驱替模型相近,但径向模型的孔隙度最大变化幅度大于一维模型,两者的参数敏感性规律也存在一定的差异。分析认为:①较小的压力增幅反映波诱导流动与初始渗流惯性作用的影响较小,固相惯性作用相对增强,固体应变、孔隙度变化程度增加。②物理模型差异导致弹性波场与渗流场的耦合程度不同,径向模型的最大压力变化主要反映具有较大压力梯度和流速变化的井筒附近的低频波动采油影响,流速最大变化主要反映近似恒定压力梯度和流速的油藏边界的低频波动采油影响,而一维驱替理想模型始终反映恒定压力梯度和流速下的低频波动采油影响。因此,导致径向模型的压力最大幅度变化与一维模型有所差异,而流速最大幅度变化与一维模型类似。

4 结论

利用有限元数值模拟径向孔隙介质单相渗流场与弹性波场的耦合作用是可行的,并且可用于揭示低频波动对井筒附近具有变化压力梯度的实际岩土渗流场的影响。与有限元法结果相对比,径向模型半解析解中的最大流速增幅偏小,孔隙度增幅偏大,孔隙压力和固体位移具有很大偏差。

当震源位于注入井时,有限元数值模拟可反映低频波动采油的降压、增速和增孔效果;低频波动作用下径向模型的压力、流速和孔隙度增幅随时间呈周期性变化,随距离的增加而急剧递减;越靠近注入井,效果越明显;研究区基础参数条件下,局部最大压降达40%,距离井筒中心10 m范围内相对流速明显增加,饱和水相岩土高孔、低渗透时,波动对渗流的促进作用明显。

符号解释:

μ —— 剪切模量系数; u —— 固体位移, μm ; λ —— 拉梅系数; α , M —— 波动方程多孔介质模型系数, GPa ;

w —— 流体相对位移, μm ; ρ —— 多孔介质密度, kg/m^3 ; b^s —— 固体的体力加速度, m/s^2 ; ρ_f —— 流体密度, kg/m^3 ; p_f —— 流体压力, MPa ; b^f —— 流体的体力加速度, m/s^2 ; ϕ —— 孔隙度; η —— 流体粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; ω —— 振动频率, Hz ; K —— 多孔介质渗透率, mD ; λ_0 —— 启动压力梯度, MPa/m ; e —— 岩石体积应变; Q_c —— Biot 流固耦合系数, GPa ; K_0 —— 多孔介质的初始渗透率, mD ; ϕ_0 —— 多孔介质的初始孔隙度; K_f —— 流体体积模量, GPa ; ρ_s —— 岩石骨架密度, kg/m^3 ; v —— 流体流速, m/s ; C —— 降粘率拟合系数, $\text{m}\cdot\text{s}$, 取-0.162; u_0 —— 初始时刻振幅, μm ; η_0 —— 原油初始粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; r_w —— 井筒半径, m ; t —— 时间, s ; p_w —— 径向模型的井筒压力, MPa ; r_c —— 油藏半径, m ; p_c —— 径向模型的油藏压力, MPa ; i, j —— 节点坐标; F —— 体积力项, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-2}$; A —— 模拟求解时的面积分边界; N_i^u, N_i^w —— 变量 u 和 w 的加权函数; N_k^u, N_k^w —— 变量 u 和 w 的形函数; S —— 模拟求解时的线积分边界; σ_n , p_n —— 边界应力和孔隙压力, MPa ; n_u, n_w —— 节点数; v_0 —— 无低频波动采油作用时的流体流速, m/s 。

参考文献:

- [1] ANTONOV O G, LIFANTYEV A V, GANIEV B G, et al. Wave technology to optimize flooding system for large development targets[J]. Oil Industry Journal, 2016, 2016(3): 86-88.
- [2] ZHENG Liming, PU Chunsheng, XU Jiayang, et al. Modified model of porosity variation in seepage fluid-saturated porous media under elastic wave[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2016, 6(4): 569-575.
- [3] HUH C. Improved oil recovery by seismic vibration: a preliminary assessment of possible mechanisms[R]. SPE 103870-MS, 2006.
- [4] 尚朝辉. 稠油热波耦合催化裂解降黏技术及先导试验[J]. 大庆石油地质与开发, 2014, 33(3): 135-140.
SHANG Zhaohui. Catalytic prolyzing and viscosity-reducing technique assisted with heat wave coupling and its pilot test for the heavy oil[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2014, 33(3): 135-140.
- [5] LUO Yutian, DAVIDSON Brett, DUSSEAUULT Mauice. Measurements in ultra-low permeability media with time-varying properties[R]. Eurock-1996-157, 1996.
- [6] 尹帅, 丁文龙, 王濡岳, 等. 陆相致密砂岩及泥页岩储层纵横波波速比与岩石物理参数的关系及表征方法[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(3): 22-28.
YIN Shuai, DING Wenlong, WANG Ruyue, et al. Characterization method of v_p/v_s and its relationship with rock physical parameters of continental tight sandstone and shale reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(3): 22-28.
- [7] 丁伯阳, 童晓刚, 陈军, 等. 排水状态下饱和土中基桩动力特性分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(1): 85-95.
DING Boyang, TONG Xiaogang, CHEN Jun, et al. Dynamic properties of a single pile in saturated soil under drainage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(1): 85-95.

- [8] 郑黎明,刘静,蒲春生,等.波动采油对饱和单相一维储层模型渗流的影响分析[J].岩石力学与工程学报,2016,35(10):2 098-2 105.
ZHENG Liming, LIU Jing, PU Chunsheng, et al. Seepage analysis under low-frequency vibration in one-dimensional porous media saturated with single-phase percolating fluid [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35 (10) : 2 098-2 105.
- [9] 张志红,师玉敏,朱敏.黏土垫层水力-力学-化学耦合模型研究[J].岩土工程学报,2016,38(7):1 283-1 290.
ZHANG Zhihong, SHI Yumin, ZHU Min. Coupled hydro-mechanical-chemical model for clay liner [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(7) : 1 283-1 290.
- [10] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1956, 28(2) : 168-178.
- [11] ZIENKIEWICZ O C, CHANG C T, BETTESS P. Drained, undrained, consolidating and dynamic behaviour assumptions in soils [J]. Geotechnique, 1980, 30(4) : 385-395.
- [12] XIONG W, LEI Q, GAO S S, et al. Pseudo threshold pressure gradient to flow for low permeability reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(2) : 232-236.
- [13] DAVIDSON Brett. Fluid-pulse technology boosts oil recovery [J]. Journal of Petroleum Technology, 2013, 65(12) : 34-35.
- [14] KIM M S, JEON S H, CHO J R, et al. Comparative evaluation of PML technique for hydrodynamic impact loading on spar-type floating platform [J]. Ocean Engineering, 2014, 85(4) : 80-92.
- [15] 王永刚,邢文军,谢万学,等.完全匹配层吸收边界条件的研究[J].中国石油大学学报:自然科学版,2007,31(1):19-24.
WANG Yonggang, XING Wenjun, XIE Wanxue, et al. Study of absorbing boundary condition by perfectly matched layer [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Sciences, 2007, 31(1) : 19-24.
- [16] CHEN Jie, WANG Hai, WANG Jie. Buckling and vibration analyses of composite laminates with weak interfaces by a coupled meshfree and finite element method [J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2016, 23(1) : 145-155.
- [17] ASADI Roza, ATAIE-ASHTIANI Behzad, SIMMONS C T. Finite volume coupling strategies for the solution of a Biot consolidation model [J]. Computers and Geotechnics, 2014, 55(1) : 494-505.
- [18] KIM J, TCHELEPI H A, JUANES R. Stability and convergence of sequential methods for coupled flow and geomechanics: drained and undrained splits [J]. Compute Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2011, 200(23) : 2 094-2 116.
- [19] 马中高,周枫,赵群.鄂尔多斯盆地下石盒子组致密砂岩的弹性特征[J].石油学报,2011,32(6):1 001-1 006.
MA Zhonggao, ZHOU Feng, ZHAO Qun. Elastic properties of tight sands in the Lower Shihezi Formation of Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(6) : 1 001-1 006.
- [20] 郑忠文,秦文龙,肖曾利,等.低渗油藏渗流规律及水驱油特征实验研究[J].西安石油大学学报:自然科学版,2007,22(s1):77-79.
ZHENG Zhongwen, QIN Wenlong, XIAO Zengli, et al. Experiment research on the seepage flow and water drive characteristics in low permeability reservoir [J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2007, 22(s1) : 77-79.
- [21] 郑黎明,蒲春生,李悦静,等.低频振动对低渗油藏径向渗流影响的变参量 Biot 固结分析[J].岩土工程学报,2017,39(4):752-758.
ZHENG Liming, PU Chunsheng, LI Yuejing, et al. Biot's consolidation with variables for influence of low-frequency vibration stimulation on radial flow in low-permeability developed reservoir [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(4) : 752-758.
- [22] 王艳丽,饶锡保,潘家军,等.细粒含量对饱和砂土动孔压演化特性的影响[J].土木建筑与环境工程,2011,33(3):52-56.
WANG Yanli, RAO Xibao, PAN Jiajun, et al. Effects of fines content on evolutionary characteristics of dynamic pore water pressure of saturated sands [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(3) : 52-56.

编辑 王星