

文章编号:1673-5005(2017)03-0114-08

doi:10.3969/j. issn. 1673-5005. 2017. 03. 014

油藏渗流过程中孔隙弹性模型的分析与修正

郑黎明^{1,2}, 刘 静¹, 蒲春生¹, 张 磊¹, 徐加祥¹, 李悦静¹

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

摘要: 将油藏宏观渗流场与弹性波场耦合, 改进孔隙弹性模型控制方程, 揭示低频波动采油技术的动力学作用原理。基于低频波动采油试验机制、Biot 理论模型, 通过区分低渗开发储层波动采油应用时的流体渗流状态、弹性波传播方向与经典孔隙介质弹性波传播理论模型的差异, 并考虑持续变化的压力对耦合物性参数的影响, 建立饱和单相渗流流体孔隙介质弹性波传播理论模型, 对孔隙介质弹性波传播理论模型的流体耦合运动方程、状态方程(包括骨架孔隙度和流体黏度变化)、边界初始条件进行修正, 给出修正模型的计算流程, 并利用算例分析验证修正模型的适用性。结果表明, 低渗储层低频波作用关于孔渗的敏感性变化规律与常规试验认识一致, 低频波动采油效果在低孔、低渗储层中具有较好的适用性, 增渗、增压效果明显, 说明修正模型揭示低频波动采油机制具有有效性。

关键词: 油藏; 渗流; 孔隙介质; 低频波动采油技术; 波动方程

中图分类号: TU 45 **文献标志码:** A

引用格式: 郑黎明, 刘静, 蒲春生, 等. 油藏渗流过程中孔隙弹性模型的分析与修正[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(3): 114-121.

ZHENG Liming, LIU Jing, PU Chunsheng, et al. Analysis and modification of Biot poro-elastic theory for application in flow modeling of oil reservoirs[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2017, 41(3): 114-121.

Analysis and modification of Biot poro-elastic theory for application in flow modeling of oil reservoirs

ZHENG Liming^{1,2}, LIU Jing¹, PU Chunsheng¹, ZHANG Lei¹, XU Jiaxiang¹, LI Yuejing¹

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. College of Vehicles and Energy of Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: A poro-elastic model can be derived for flow modeling in porous media of oil reservoirs, in which the Darcy flow in porous media and the elastic wave theory are considered in the process of oil production assisted by a low frequency vibration technique. A general poro-elastic model for fluid flow and wave propagation in porous media saturated with single-phase fluid was established in combining different mechanisms and considering various factors, including the oil extraction mechanism via low frequency vibration technology and the Biot poro-elastic model. In the new model the coupling flow equation, the state equation of porosity and oil viscosity under low-frequency vibration, and specific conditions were improved. The solution of the new poro-elastic model was described and the use of the model was verified in a case study. The simulation results show that an increase of pressure in the middle of the rock and the flow rate at the inlet induced by vibration can be identified, which is in line with the observation in laboratory experiments. The low frequency vibration oil extraction technology can improve oil recovery in low porosity and permeability reservoirs. The modified model can lay foundation for the establishment of a general poro-elastic model for multi-phase flows.

Keywords: oil reservoir; flow in porous media; porous media; low frequency vibration oil extraction technology; improved wave equation

收稿日期:2016-08-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51274229);中央高校基本科研业务费专项(16CX02020A)

作者简介:郑黎明(1989-),男,博士研究生,研究方向为复杂油气藏物理-化学强化开采理论。E-mail:zheng_liming_happy@126.com。

通讯作者:刘静(1982-),女,讲师,博士,研究方向为复杂油气藏物理-化学强化采油技术。E-mail:liujing4522009@163.com。

弹性波传播在勘探、土木、采矿、石油开发等工程中广泛存在^[1-4], 通过孔隙介质弹性波传播理论, 研究人员开展了波速耗散、位移-压力动力响应和相界面处波能量分布分析。由于应用于静态油藏或开发前期, 常规孔隙介质弹性波传播模型多假设岩土初始时刻饱和静止流体、波诱导渗流满足达西流动。然而, 油气田开发中低频波动采油^[5-6]同时涉及弹性波传播与油藏宏观达西(或非达西)渗流, 宏观渗流对弹性波传播、波诱导渗流效果均会产生影响^[7-9]; 目前开展的试验或半定量研究^[10-13], 由于对流固耦合作用考虑不充分, 难以有效揭示低频波动采油具体动力学作用原理。将孔隙介质弹性波传播理论拓展至储层开发过程进行动力学分析时, 有必要考虑低频波动采油技术采油工艺背景以及宏观渗流场对物性的耦合影响, 须对数学模型进行修正。笔者通过对油藏开发中波动耦合渗流场与地质工程弹性波传播问题的差异, 对流体耦合运动方程、初始边界条件、骨架物性方程、流体物性方程等分别进行修正, 得到饱和单相渗流流体孔隙介质弹性波传播理论模型, 然后通过实例计算, 分析修正后孔隙介质弹性波传播理论模型的物性变化, 说明模型研究和求解方法的有效性。

1 模型及研究要素的区别

Biot 提出了经典的低频弹性波作用下均质、各向同性孔隙介质弹性波传播理论^[14], 当忽略耦合质量对流体的作用时, Zienkiewicz^[15]对流固控制方程进行了改进,

$$\mu \nabla^2 u + \text{grad}[(\mu + \lambda + \alpha M) \nabla \cdot u + \alpha M \nabla \cdot w] + pb_s = \rho \ddot{u} + \rho_f \ddot{w}, \quad (1)$$

$$-\text{grad} p_f + \rho_f b_f = \text{grad}(\alpha M \nabla \cdot u + M \nabla \cdot w) + \rho_f b_f = \rho_f \left(\ddot{u} + \frac{\ddot{w}}{\varphi} \right) + \frac{\eta}{k} \ddot{w}, \quad (2)$$

$$w_{i,i} + \varepsilon_{i,i} + \varphi p_f / K_f + (1 - \varphi) p_f / K_s - \sigma_{ij_0} / 3K_s = 0. \quad (3)$$

流、固相连续性方程如式(4)所示, 当 $K_s \rightarrow \infty$ (该忽略对土体是合理假设) 时, 整体连续性方程简化为式(5),

$$d\rho_f / \rho_f = dp_f / K_f, \quad (1 - \varphi) d\rho_s = \rho_s \left[(\alpha - 1) de + \frac{1}{Q_c} dp_f \right], \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \dot{u} + \nabla \cdot \dot{w} + \frac{\varphi}{K_f} \frac{\partial p_f}{\partial t} = 0. \quad (5)$$

式中, u 和 w 分别为固体位移和流体相对位移; e 为岩石的体积应变; ε 为流体的胀缩率; p_f 为流体压

力; b 为耗散系数, $b = \eta \varphi^2 / k$; σ_{ij_0} 为有效应力; b_s 和 b_f 分别为作用在单位体积介质和流体上的体力加速度; ρ_f 、 ρ_s 和 ρ 分别为流体、岩石骨架和多孔介质的密度, $\rho = \varphi \rho_f + (1 - \varphi) \rho_s$; η 为流体的黏性系数; φ 为多孔介质的孔隙度; k 为多孔介质的渗透率; $1/Q_c$ 为 Biot 引入的流固间耦合关系参数, $1/Q_c = (\alpha - \varphi) / K_s$; λ 和 μ 为拉梅系数, $\lambda = K_b - \frac{2}{3}\mu$, $\mu = G$; α 和 M 为 Biot 系数; K_s 、 K_f 、 K_b 和 G 分别为(加套压缩性试验中)岩石、流体、(加套压缩性试验中)骨架的体积模量和骨架的剪切模量。

初始边界条件: 压力边界 $p_f(r, t) |_{\Gamma} = f_1$, 位移边界 $u(r, t) |_{\Gamma} = f_2$, 应力边界 $\sigma_{ij}(r, t) |_{\Gamma} = f_3$, 初始时刻 $u(r, t) |_{t=0} = f_4$ 。

基于低频波动采油技术作用机制, 对比与常规孔隙介质弹性波传播理论的区别, 围绕控制方程、边界初始条件、物性参数等要素对渗流介质弹性波传播理论模型进行改进。

1.1 初始边界条件

对于震源位于深部层位的常规岩土动力学分析或地震勘探情形, 横向边界可为渗透性边界, 上部和下部边界不可渗透, 震源位于井筒内部, 弹性波倾斜入射后于上部和下部边界反射、透射, 直至到达检波器, 多孔介质发生小变形; 对于震源位于地面或浅部层位的岩土动力学分析情形, 浅上部地表、流固耦合接触面、横向边界均可为渗透性边界, 下部边界多为不可渗透边界, 震源位于上部地表, 弹性波传播方向垂向于地表或倾斜入射后于下部边界反射、透射、吸收, 多孔介质发生小变形或大变形。低频波动采油技术实施过程中, 模拟边界分别为油藏顶部、底部、注入井边界和采出井边界, 震源位于井筒内部, 弹性波垂直入射后主要传播方向与渗流方向一致, 于顶、底部边界吸收, 多孔介质发生小变形。

(1) 根据震源类型的不同^[16-18], 适用于开发储层的饱和渗流流体孔隙介质弹性波传播方程的初始、边界条件适用不同情形。

孔压边界条件: 适用于由液柱压力波作为弹性波传导的油藏条件, 如水力脉冲技术应用时, 水脉冲呈周期性释放至井筒, 引起井底压力波动, 注入井边界作为弹性波边值条件。

位移边界条件: 适用于低频谐振波技术将波动通过转换器直接接触并加载至套管、岩石的情形, 引起岩石发生周期性的位移、形变; 弹性波可涵盖几个井组, 该范围内注入井或采油井边界均可作为弹性

波边值条件。

(2) 本文中震源使用位移边界。平面一维条件下,油藏长度为 L_0 ,横截面积 A ,油藏流量为 Q_0 ,油藏初始压力为 p_0 ,忽略油藏高度对弹性波的影响。

定压: $p_f(0,t)=p_{in}$; $p_f(L_0,t)=p_{out}$; 边界骨架位移假设为三角函数形式, $u(0,t)=u_0 \exp(i\omega t)$;

$$\text{定流量: } p_f(x,0)=p_0; \dot{w}(x,t)=\frac{Q_f(x,t)}{A}=\frac{Q_0}{A};$$

$$u(0,t)=u_0 \exp(i\omega t);$$

油藏顶底部的骨架、流体垂向位移为

$$u_z(0,t)=u_z(H,t)=0, U_z(0,t)=U_z(H,t)=0;$$

考虑给定注入端压力波动时孔隙压力为

$$p_f(0,t)=p_{in}+p_s \exp(i\omega t).$$

式中, u_0 为初始时刻最大振幅; p_{in} 为注入压力; p_{out} 为采出井压力; p_s 为孔隙边界条件中的附加压力波动; ω 为振动频率。

1.2 宏观初始渗流的存在

当储层开发过程中的初始渗流假设符合达西流动时,因此固相、流相耦合运动方程仍满足式(1)、(2),其中流体位移包括了初始宏观渗流 w_f 和波诱导渗流 w_s 两部分, $w=w_f+w_s$ 。但低频波动采油技术适用的低渗地层一般认为其存在非达西渗流以及启动压力梯度,忽略流固相所受体力时,式(2)左侧修正为式(6)~(8),其中式(7)为满足 Hansbo 非达西渗流^[19],式(8)为满足线性非达西渗流,

$$\nabla(\alpha M \nabla \cdot u + M \nabla \cdot w) + \lambda_0 = \rho_f \left(\ddot{u} + \frac{\ddot{w}}{\varphi} \right) + \frac{\eta}{k} \dot{w}, \quad (6)$$

$$\nabla p_f > i_l, \quad (6)$$

$$-(\nabla p_f)^m = \left[\rho_f \left(\ddot{u} + \frac{\ddot{w}}{\varphi} \right) + \frac{\eta}{k} \dot{w} \right] m i_l^{m-1}, \quad \nabla p_f < i_l, \quad (7)$$

$$\rho_f \left(\ddot{u} + \frac{\ddot{w}}{\varphi} \right) + \frac{\eta}{k} \dot{w} = 0, \quad \nabla p_f < i_l, \quad (8)$$

式中, λ_0 为启动压力梯度,可表示为岩石渗透性的拟合函数^[21]; i_l 为门限压力梯度; m 为基本控制参数;Hansbo 非达西渗流模型中 $\text{grad} p_f < i_l$ 时,假定流量与压力梯度为幂级数关系。

连续性方程式(5)忽略了孔隙度变化、骨架形变和一定流速下的压力变化,而在实际渗流介质中低频波对孔隙度的影响不可忽略,因此须进行修正。将流体的物性方程、Biot 孔隙—形变关系、固体压缩物性方程分别代入流固耦合的整体连续性方程^[20],得到

$$\alpha \text{div } \dot{u} + \text{div } \dot{w} + \left(\frac{\varphi}{K_f} + \frac{1}{Q} + \frac{1}{Q} \text{div } u \right) \frac{\partial p_f}{\partial t} +$$

$$u \left(\alpha \text{div } \frac{\partial e}{\partial t} + \frac{1}{Q} \text{div } \frac{\partial p_f}{\partial t} \right) + \frac{1}{K_f} \left(\dot{w} + u - \frac{1}{Q} \frac{\partial p_f}{\partial t} \right) \text{div } p_f = 0. \quad (9)$$

对式(9)取梯度,代入取散度的流体达西方程(6)右侧,进行时间积分和微分方程求解,可得到忽略孔隙度变化 $d\varphi$ 、但不忽略宏观渗流项 $\dot{w} \nabla^2 p_f$ (开发储层中低频波动采油技术作用下 $\dot{w} \nabla^2 p_f \approx \delta_f \dot{w}_f \nabla^2 p_f$)的修正连续性方程,

$$\alpha M \nabla^2 u + M \nabla^2 w - M \frac{\eta}{k K_f} w \text{div } \dot{w} + \lambda_0 = \rho_f \left(\ddot{u} + \frac{\ddot{w}}{\varphi} \right) + \frac{\eta}{k} \dot{w}. \quad (10)$$

当孔隙度变化 $d\varphi$ 和宏观渗流项 $\dot{w} \nabla^2 p_f$ 均不忽略时,得到修正的连续性方程为

$$\left(\frac{1}{M} + \frac{1}{K_f} \text{grad } w \right)^{-1} \cdot \left(\alpha \nabla^2 u + \nabla^2 w - \frac{\eta}{k K_f} w \text{div } \dot{w} \right) + \lambda_0 = \rho_f \left(\ddot{u} + \frac{\ddot{w}}{\varphi} \right) + \frac{\eta}{k} \dot{w}. \quad (11)$$

其中

$$\lambda_0(k) = A_\lambda k^{B_\lambda}, i_l = \lambda_0 m / (m-1), \lambda = K_b - \frac{2}{3} \mu, \mu = G, \alpha = 1 - K_b / K_s.$$

式(6)、(10)、(11)即为不同形式(忽略单位距离上宏观渗流的位移、压强、孔隙度变化,忽略单位距离上宏观渗流的位移及孔隙度变化,考虑单位距离上宏观渗流的位移与压强及孔隙度变化)的流体耦合运动方程,分别与式(1)联立即可得到不同的低渗油藏波动方程。3 种波动方程组合形式的适用范围分别为:第一种模型可用于波诱导孔隙度变化和流动压差同时较小的情形,用于稳定渗流的均匀、各向同性储层开发初始阶段与油藏内部;第二种模型可用于波诱导孔隙度变化较小、流速变化较小且可忽略的情形,用于稳定渗流的均匀、各向同性储层开发过程;第三种模型可用于波诱导孔隙度变化较大、流速变化较小但不可忽略的情形,可用于存在隔夹层、横向厚度不同、纵向存在死油区等的各向同性储层,渗流发生空间瞬态变化。

1.3 岩石骨架物性的差异

对于常规孔隙介质弹性波传播理论模型,不考虑颗粒压缩变形(Biot 理论模型)和考虑颗粒压缩变形(Kim^[22])的孔隙—形变关系分别为

$$d\varphi = \alpha d e + \frac{dp_f}{Q}, \quad (12)$$

$$d\varphi = \left(\frac{K_s}{K_g} - 1 + \varphi \right) \left(d e - \frac{1}{K_g} d p_f \right). \quad (13)$$

根据低频波动采油技术基础机制,波动条件下

由于流体流动时的黏附层(图 1, R_e 和 R'_e 分别为波动作用前后的流动半径; δ 和 δ' 分别为波动作用前后的黏附层厚度)、微细-超细孔喉较大的界面张力(图 2)、岩石和流体压缩导致的孔隙度变化、微粒迁移、造缝延伸等对有效孔隙度的数值均会造成影响^[12,23], 且数值变化较大时不可忽略, 通过添加修正系数 ξ 得到新的孔隙-形变关系方程为

$$d\varphi' = \xi d\varphi. \quad (14)$$

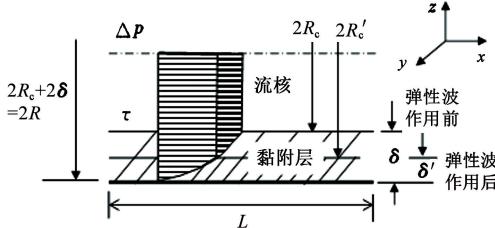


图 1 半个截面管流的黏附层示意图

Fig. 1 Half of section sketch of adhesive layer in tube flow

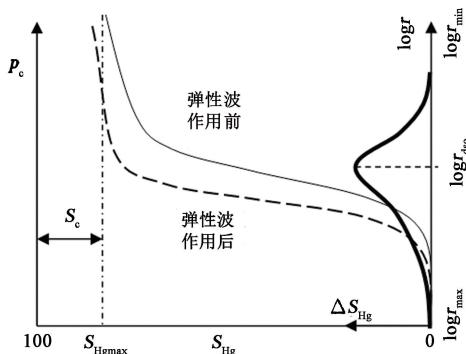


图 2 典型毛管力曲线

Fig. 2 Typical curve of capillary pressure

当振动力较小时, 微粒迁移、造缝延伸等对孔隙度、渗透率的影响会相对较小, 可忽略不计; 令 $\xi = \xi_a + \xi_e$, ξ_a 和 ξ_e 分别为波动对毛细管流动半径改变和波动对毛管力曲线改变导致的孔隙度变化系数, 数值大于 1。基于黏附层厚度公式, 将一定毛管力下的孔喉体积表示为润湿性流体所占孔喉尺寸的累积^[24-25], ξ 表示为

$$\xi_a = \frac{1 - \beta (v_f^{2-n} \rho_f / \mu_f)^{\frac{-n}{1+n}}}{1 - \beta (v_{f0}^{2-n} \rho_{f0} / K_{f0})^{\frac{-n}{1+n}}}, \quad \xi_e = \frac{\frac{\sqrt{\pi}}{2} - \Phi(p_f; \log r_{d50}, 1)}{\frac{\sqrt{\pi}}{2} - \Phi(p_{f0}; \log r_{d50}, 1)}. \quad (15)$$

其中

$$\beta = \frac{2AL}{R} (2R)^{-\frac{n^2}{1+n}},$$

$$\Phi(p_f; \log r_{d50}, 1) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{p_f - \log r_{d50}}{\sqrt{2}} \right) \right],$$

$$v_f = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{w}{\varphi} + u \right).$$

式中, A 为系数且对于不同流体类型和流态取不同数值; L 为毛细管长度; R 为毛细管半径; μ_f 为稠度系数; n 为拟塑形流体特性指数, 对于牛顿流体 $n=1$, $\mu_f=\eta$, 对于拟塑形流体 $n<1$; v_f 为毛细管内流体速度; $\Phi(x)$ 为误差函数, 代表正态分布的累积分布; r_{d50} 为假设孔隙半径符合正态分布时的中值孔隙半径; 下标 f 为波动条件, 下标 f0 为未施加波动作用。

数值离散化计算下一时刻孔隙度时, 将 $\varphi_{t+1} = \varphi_t + \Delta\varphi$ 修正为 $\varphi_{t+1} = \varphi_t + \xi \Delta\varphi$; 或按照等温孔隙度动态模型^[26] $\varphi_{t+1} = \frac{\varphi_t + e_t}{1 + e_t}$ 修正为 $\varphi_{t+1} = \varphi_t + \xi e_t \frac{1 - \varphi_t}{1 + e_t}$ 。

1.4 渗流流体物性

弹性波场与流场耦合作用下, 流体表观黏度发生变化, 继而导致弹性波耗散发生变化, 影响孔隙介质弹性波传播理论模型求解。Biot 给出了高频下的黏度修正公式,

$$\eta = \eta_0 F(\kappa). \quad (16)$$

式中, η_0 为流体的黏性系数; $F(\kappa)$ 为 Biot 引进的流体在高频下动力黏度修正系数。

黏度的变化不仅出现于高频条件下(流体出现剪切破坏、流场与波场耦合均会导致黏度变化)^[27], 低频条件下亦会引起黏度下降(机械剪切影响流变性及视黏度, 停止振动会反弹)^[28]。目前孔隙介质弹性波传播理论对低频条件下流体物性变化的忽略可导致饱和渗流流体孔隙介质的弹性波波速和 $u-p$ 动力响应求解产生误差。

通过低频波场和旋转流场耦合下流体受力和黏度测量分析, 推导得到波诱导流体振动存在衰减时的牛顿流体的降黏率公式,

$$\varepsilon = \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0} = \frac{30(R_1 + R_2)\rho_f u \omega^2}{\pi N \eta_0} \left(\ln \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_2 - R_1}{R_2} \right). \quad (17)$$

式中, R_1 和 R_2 分别为转子半径和容器半径; u 为振动台位移, 等效为多孔介质波诱导固相位移; N 为转子转速, r/min , $N = \frac{\pi}{30} \omega_1$; ω_1 和 ω 分别为转子角速度和振动台角速度, 振动台角速度等效为多孔介质弹性波角速度, rad/s 。

式(17)考虑测试杯内流体位移纵向一致, 流体内部旋转流动方向近似为层流, 流体振动对转子无影响, 忽略温度场变化。与文献[28]试验结果进行算例对比(图 3), 式(17)拟合程度较好。

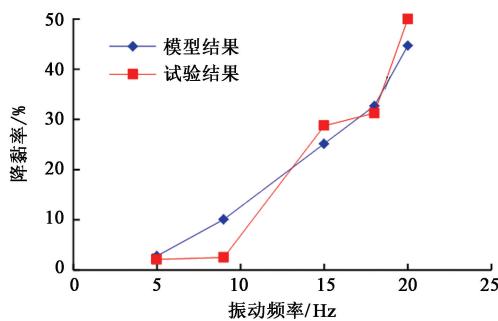


图 3 低频振动条件下降黏率对比

Fig. 3 Comparison of decreased viscosity rate under different low frequency vibration with experimental result

流体耦合运动方程耗散系数中流体黏度系数可修正如式(18)。由于渗流多孔介质中弹性波场与流场方向一致,而实验室中黏度测量时两场方向不一致,因此给定变量 C 为降黏率试验拟合系数, $C < 0$,

$$\eta(\omega) \approx \eta_0 F(\omega) = \begin{cases} C\rho_f u\omega^2 + \eta_0, & \omega \text{ 为低频;} \\ \frac{a}{4} (\eta_0 \rho_f \omega)^{0.5}, & \omega \text{ 为高频.} \end{cases} \quad (18)$$

式中, a 为稳态流时孔隙流体的水力半径。

1.5 模型数值求解流程

综上所述,可得到修正后的饱和单相渗流流体低渗孔隙介质低频弹性波传播模型,以波作用下维岩石孔隙度和压力变化较小情形的数学模型为例进行说明,其中渗透率与孔隙度存在幂函数变化关系,启动压力梯度与渗透率存在指数型变化关系,

$$\begin{aligned} & [\mu \nabla^2 u + \text{grad}[(\mu + \lambda + \alpha^2 M) \nabla \cdot u + \alpha M \nabla \cdot w] + \\ & \rho b_s = \rho \ddot{u} + \rho_f \ddot{w}, \\ & \nabla(\alpha M \nabla \cdot u + M \nabla \cdot w) + \lambda_0(k) = \rho_f \left(\ddot{u} + \frac{\ddot{w}}{\varphi(p_f)} \right) + \\ & \frac{\eta(\omega)}{k} \dot{w}, \quad \nabla p_f > i_l, \\ & \left\{ \rho_f \left(\ddot{u} + \frac{\ddot{w}}{\varphi} \right) + \frac{\eta}{k} \dot{w} = 0, \quad \nabla p_f < i_l, \right. \\ & d\varphi = (\xi_a + \xi_c) \left(\frac{K_s}{K_g} - 1 + \varphi \right) \left(de - \frac{1}{K_b} dp_f \right), \\ & k = k_0 \left(\frac{\varphi}{\varphi_0} \right)^3 \left(\frac{1 - \varphi_0}{1 - \varphi} \right)^2, \quad \lambda_0 = A_\lambda k^{B_\lambda}, \\ & \eta(\omega) = C\rho_f u\omega^2 + \eta_0. \end{aligned} \quad (19)$$

式中, k_0 为初始渗透率; φ_0 为初始孔隙度; A_λ 和 B_λ 为启动压力梯度关于渗透率的拟合系数。

通过饱和单相渗流流体孔隙介质弹性波传播理论模型求解,可得到弹性波场与初始时刻流体渗流场耦合影响下的物性变化,其具体求解流程如图 4 所示。结合边界、初始条件,将 t 时刻固体、流体物性参数代入流固耦合运动方程,通过数值方法得到 $t+1$ 时刻 $u-p$ 解,将其代入式(4)、(11)、(14),得到流固体密度、流体黏度以及修正的实际孔隙度,重新对耦合运动方程进行求解,即得到渗流介质实际孔隙度下的压力或流速,通过与无弹性波作用的常规达西渗流、饱和初始静态流体的孔隙介质 $u-p$ 解进行对比,得到弹性波对原始储层渗流的影响程度。利用等效流体理论,假设多孔介质饱和多相流体时可用于解释低频波动采油改变储层渗流和原油采出程度的具体机制。

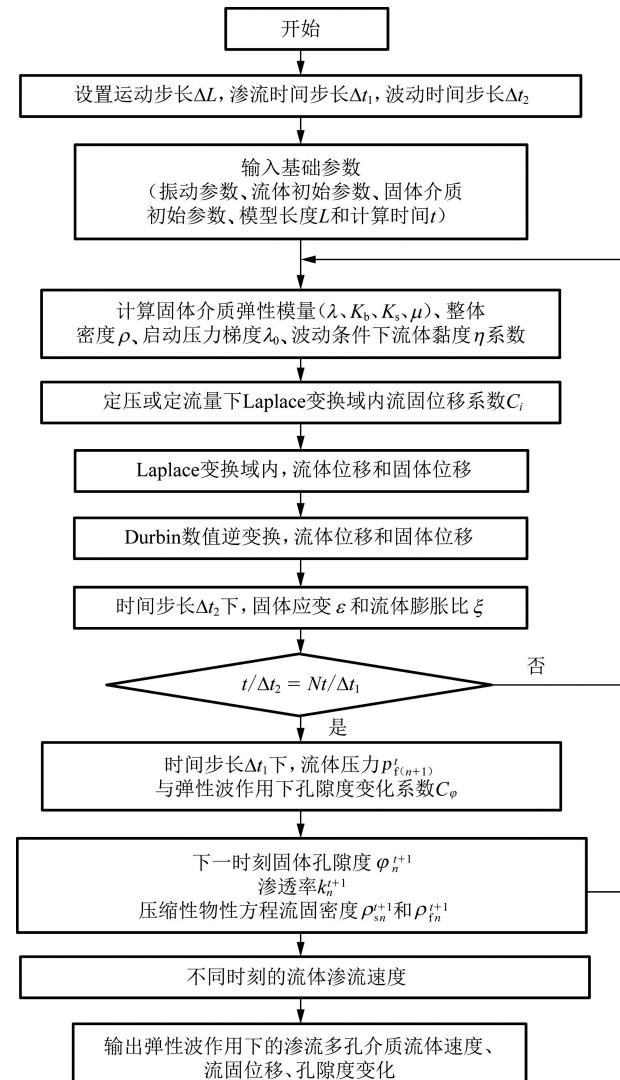
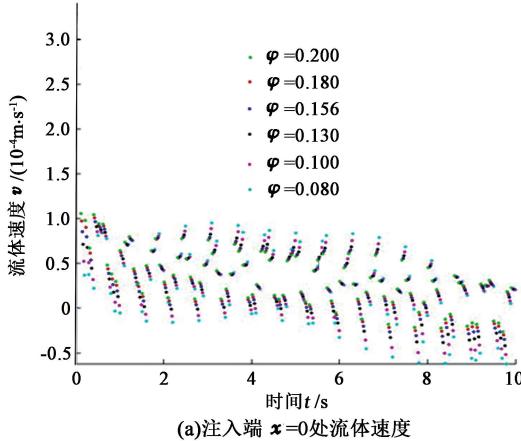


图 4 数值求解过程

Fig. 4 Process of numerical calculation for improved model

2 算例分析

基于修正模型和数值求解流程, 利用鄂尔多斯盆地砂岩参数^[11,15]计算饱和单相流体的一维低渗孔隙介质在不同初始孔隙条件下波动采油对储层流速和孔压的影响。振动频率 $f=10\text{ Hz}$, 结果如图 5、6 所示。

(a) 注入端 $x=0$ 处流体速度

不同初始孔隙度、渗透率下单一弹性波作用对渗流的影响相似, 但随着孔隙介质初始孔隙度、渗透率的增加, 最大渗流速度数值逐渐增大、增幅逐渐降低, 最大孔隙压力数值和增幅均逐渐降低, 孔隙压力的波动程度减弱, 低渗介质渗流变化受孔隙度的影响大于渗透率, 反映了低频振动采油技术在低孔、低渗开发储层具有更好的适用性。

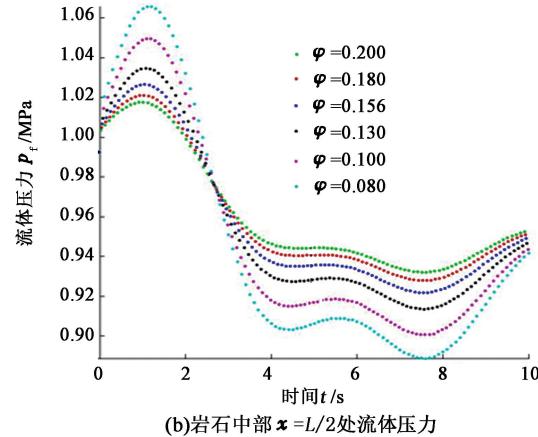
(b) 岩石中部 $x=L/2$ 处流体压力

图 5 不同孔隙度条件下波动采油对孔压和流速的影响

Fig. 5 Influence of low frequency vibration on pore pressure and flow rate under different porosity

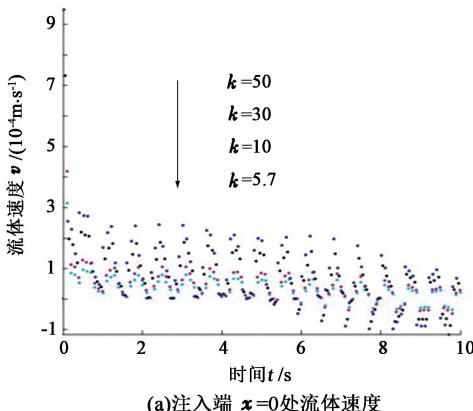
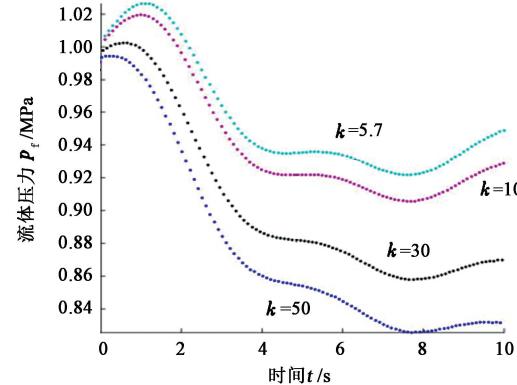
(a) 注入端 $x=0$ 处流体速度(b) 岩石中部 $x=L/2$ 处流体压力

图 6 不同渗透率条件下波动采油对孔压和流速的影响

Fig. 6 Influence of low frequency vibration on pore pressure and flow rate under different permeability

修正模型得到的波动采油技术低渗储层增压、增渗作用规律, 与实验室采用不同渗透率岩心进行的模拟试验规律相似^[29]; 同时, 说明了修正模型可从动力学规律方面解释低渗储层低频波动采油技术的作用机制, 相对简单叠加波诱导压力项至达西方程的半定量模型, 具有较好的模拟效果。

3 结 论

(1) 给出了适用于开发油藏波动采油的初始及边界条件、流体耦合运动方程、骨架有效孔隙度变化方程和黏度变化方程, 得到了饱和单相渗流流体孔

隙介质弹性波传播模型。

(2) 低频波动采油在靠近震源端的增渗效果和岩石中部的增压效果随初始孔隙度和渗透率的降低而增加, 该变化规律与常规试验认识一致, 孔隙介质弹性波传播模型在解释低频波动采油机制方面具有可行性, 该技术在低孔、低渗开发储层具有更好的适用性。

(3) 饱和单相渗流流体孔隙介质弹性波传播模型可为饱和多相渗流流体孔隙介质弹性波传播模型建立以及低频波动采油微观作用机制和油藏提高采收率效果深入分析奠定理论基础。

参考文献:

- [1] LO W C, SPOSITO G, LEE J W, et al. One-dimensional consolidation in unsaturated soils under cyclic loading [J]. *Advances in Water Resources*, 2016, 91:122-137.
- [2] HSU W Y, YANG R Y, HSU T J, et al. Boundary layer structure under wave-mud interactions [J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2014, 24(4): 247-252.
- [3] PEDRO N, SUSANA L Q. Generalized unconfined seepage flow model using displacement based formulation [J]. *Engineering Geology*, 2013, 166(8):140-151.
- [4] 印兴耀,李超,张世鑫. 基于双相介质的地震流体识别 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2013,37(5): 38-43.
YIN Xingyao, LI Chao, ZHANG Shixin. Seismic fluid discrimination based on two-phase media theory [J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2013, 37(5):38-43.
- [5] NIKOLAEVSKIY V N, LOPUKHOV G P, LIAO Y Z, et al. Residual oil reservoir recovery with seismic vibrations [J]. *SPE Production & Facilities*, 1996, 11(2):89-94.
- [6] DUSSEAUT M, DAVIDSON B, SPANOS T. Pressure pulsing: the ups and downs of starting a new technology [J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2000, 39(4):13-17.
- [7] 郑黎明,蒲春生,黄小梅,等. 宏观渗流对孔隙介质中弹性波传播的影响分析:2015 油气田勘探与开发国际会议论文集[C/OL]. (2015-09-20) [2016-05-20]. http://kns.cnki.net/kns/brief/default_result.aspx.
- [8] 郑黎明,蒲春生,刘静,等. 弹性波作用下渗流多孔介质微粒运移分析[J]. 重庆大学学报,2016,39(3):101-108.
ZHENG Liming, PU Chunsheng, LIU Jing, et al. Transport of fine particles in saturated porous media under elastic waves [J]. *Journal of Chongqing University*, 2016, 39(3):101-108.
- [9] BERRYMAN J G. Role of fluid injection in the evolution of fractured reservoirs [J]. *International Journal of Engineering Science*, 2016, 103:45-58.
- [10] ARIADJI T. Effect of vibration on rock and fluid properties: on seeking the vibroseismic technology mechanisms [R]. SPE 93112, 2005.
- [11] CIDONCHA G, IGNACIO J. Application of acoustic waves for reservoir stimulation [R]. SPE 108643, 2007.
- [12] LUO Y T, DAVIDSON B, DUSSEAUT M. Measurements in ultra-low permeability media with time-varying properties [R]. EUROCK 1996-157, 1996.
- [13] 刘静,蒲春生,刘涛,等. 脉冲波作用下地层流体渗流规律研究 [J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2011, 26(4):46-49.
LIU Jing, PU Chunsheng, LIU Tao, et al. Study on the seepage law of formation fluid under the effect of pulse wave [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2011, 26(4):46-49.
- [14] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid in low-frequency range [J]. *J Acous Soc Ame*, 1956, 28(2):168-178.
- [15] ZIENKIEWICZ O C, CHANG C T, BETTESS P. Drained, undrained, consolidating and dynamic behavior assumptions in soils [J]. *Geotechnique*, 1980, 30(4):385-395.
- [16] 白海燕. 大庆外围低渗透油田波动采油现场试验 [D]. 成都:西南石油大学,2006.
BAI Haiyan. Field trial of fluctuating oil extraction technology in low permeability oil field Chang-Heng periphery in Daqing [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2006.
- [17] 班志强,姚建豪,补福. 井下低频电脉冲技术在河南油田的应用 [J]. 测井技术,2002,26(3):238-241.
BAN Zhiqiang, YAO Jianhao, BU Fu. Applications of downhole low frequency electric pulse vibro technique in Henan Oilfield [J]. *Well Logging Technology*, 2002, 26(3):238-241
- [18] 王天波,李保国,刘中敏. 低频脉冲振荡解堵仪的研制与应用 [J]. 石油仪器,2000,14(2):11-14.
WANG Tianbo, LI Baoguo, LIU Zhongmin. Development and application of low frequency oscillation deplugging tool [J]. *Petroleum Instruments*, 2000, 14(2):11-14.
- [19] 邓岳保,谢康和,李传勋. 考虑非达西渗流的比奥固结有限元分析 [J]. 岩土工程学报,2012,34(11): 2058-2065.
DENG Yuebao, XIE Kanghe, LI Chuanxun. Finite element analysis of Biot's consolidation with non-Darcian flow [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(11):2058-2065.
- [20] 孔祥言. 高等渗流力学 [M]. 合肥:中国科技大学出版社,2010.
- [21] 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):2098-2105.
ZHENG Liming, LIU Jing, PU Chunsheng, et al. Seepage analysis under low-frequency vibration in one-dimensional porous media model saturated with single-phase percolating fluid [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(10):2098-2105.

- [22] KIM S H, KIM K J, BLOUIN S E. Analysis of wave propagation in saturated porous media I: theoretical solution [J]. Comput Methods Appl Mech Eng, 2002, 191(37): 4061-4073.
- [23] 王超, 张强勇, 刘中春, 等. 缝洞型油藏裂缝宽度变化预测模型及其应用 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(1): 86-91.
WANG Chao, ZHANG Qiangyong, LIU Zhongchun, et al. Prediction model for fracture width changes in vug-fracture oil reservoirs and its application [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(1): 86-91.
- [24] TIAB D, DONALDSON E C. Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties [M]. Waltham: Gulf Professional Publ, 2003.
- [25] HAMIDA T, BABADAGLI T. Investigations on capillary and viscous displacement under ultrasonic waves [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2006, 45(2): 16-19.
- [26] 冉启全, 李士伦. 流固耦合油藏数值模拟中物性参数动态模型研究 [J]. 石油勘探与开发, 1997, 24(3): 61-65.
RAN Qiquan, LI Shilun. Study on dynamic models of reservoir parameters in the coupled simulation of multi phase flow and reservoir deformation [J]. Petroleum Exploration and Development, 1997, 24(3): 61-65.
- [27] 董惠娟, 张甲, 朱波, 等. 原油超声波降黏实验研究 [J]. 石油学报, 2010, 31(3): 486-489.
DONG Huijuan, ZHANG Jia, ZHU Bo, et al. Experimental study on ultrasonic viscosity reduction method of crude oil [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(3): 486-489.
- [28] 刘静, 蒲春生, 郑黎明, 等. 低频振动对原油黏度影响的实验研究 [J]. 科学技术与工程, 2012, 12(27): 7061-7063, 7067.
LIU Jing, PU Chunsheng, ZHENG Liming, et al. Experiment research on effects of low frequency vibration wave for crude oil viscosity [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(27): 7061-7063, 7067.
- [29] 宋元新. 大功率低频谐振波采油波场分布与近井渗流特征研究 [D]. 青岛: 中国石油大学, 2010.
SONG Yuanxin. Study on wave field distribution and near-wellbore filtration features under low-frequency high-power resonance wave recovery [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2010.

(编辑 李志芬)