

文章编号: 1006-6616 (2000) 02-0006-5

油井开采过程中油层变形的流固耦合分析

董平川¹, 郎兆新¹, 徐小荷²

(1. 石油大学, 北京 昌平 102200; 2. 东北大学, 辽宁 沈阳 110006.)

摘要: 在油气开采过程中, 随着油气的不断采出, 必然造成孔隙流体压力的逐渐降低, 由此导致储层岩石骨架的有效应力增大, 使得油层产生变形或压实。当油层产生变形或压实时, 对油气生产将造成不利影响。比如: 使得油藏的渗透率降低, 继而使油井的产能降低, 同时, 油层的变形直接影响着油井和套管的变形与破坏等等。油气开采过程中油层的变形可以描述为三维变形场与三维流体流动场的耦合问题, 利用可变形多孔介质中流体渗流的流固耦合有限元数值模型, 对该问题进行了数值模拟, 获得了几个很有价值的结论, 可以用来解释一些现场生产实际中出现的问题。

关键词: 流固耦合; 石油开采; 油层变形; 有限元方法; 数值模拟

中图分类号: TE319 **文献标识码:** A

0 引言

在油气开采过程中, 储集层上部的岩石重量一部分由岩石骨架承受, 另一部分由孔隙流体承担。随着油气的不断开采, 必然造成储层孔隙压力的降低, 使得岩石骨架的有效应力增大。同时, 上部岩层的荷重大部分转移到岩石骨架上, 这样将导致储层的压实和表面的沉降, 并在垂直和水平方向上产生位移。当油层产生变形或压实时, 对油气生产将造成不利的影响, 比如: 使得油藏的渗透率降低, 继而使油井的产能降低, 而油层的变形直接影响着油井和套管的变形与破坏等等^[1~2]。当地下油藏的变形很大时, 甚至会造成地表沉陷, 造成严重的经济损失和环境灾害问题^[3]。

油气开采过程中油层的变形问题, 涉及到油藏岩石的变形与孔隙流体渗流之间的相互作用, 即流固耦合作用。最早研究流体—固体变形耦合现象的是 Terzaghi^[4], 提出了有效应力的概念。尔后, Biot^[5]系统地描述了三维弹性可变形多孔介质中流体流动和固体变形之间的耦合作用, 建立了三维固结理论, 它被广泛地应用于土固结、坝基应力分析等领域。本文在文献^[6~7]的基础上, 利用流固耦合有限元数值方法模拟油井开采过程油层的变形问题, 模拟结果表明: 因采油所引起的油层变形不容忽视。

收稿日期: 1999-07-20

基金项目: 中国博士后科学基金和油气藏地质与开发工程国家重点实验室开放研究基金项目 (PLN9702)

作者简介: 董平川 (1967—), 男, 1986年毕业于昆明理工大学, 1998年在东北大学获博士学位。现为石油大学(北京)油气开发工程在站博士后, 主要从事储集层流固耦合理论、地应力与裂缝系统的研究。

1 流固耦合的数学模型及其有限元解

利用文献 [6~7] 的方法, 假设固相区域 Ω 内的总应力为 σ , 体力为 b , 区域 Ω 的边界 Γ 上的边界力为 \hat{t} 。利用虚功原理, 并结合有效应力原理和岩石骨架的本构关系得到增量形式的岩石平衡方程

$$\int_{\Omega} \delta \varepsilon^T \mathbf{D}_r \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} d\Omega - \int_{\Omega} \delta \varepsilon^T m \frac{\partial p}{\partial t} d\Omega + \int_{\Omega} \delta \varepsilon^T \mathbf{D}_r m \frac{\partial p}{\partial t} \frac{1}{3K_s} d\Omega - \int_{\Omega} \delta \varepsilon^T \mathbf{D}_r \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial t} d\Omega - \frac{\partial \hat{f}}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

式中

$$\frac{\partial \hat{f}}{\partial t} = \int_{\Omega} \delta u^T \frac{\partial b}{\partial t} d\Omega + \int_{\Gamma} \delta u^T \frac{\partial \hat{t}}{\partial t} d\Gamma$$

其中 ε 为骨架的总应变; $d\varepsilon_0$ 为与应力变化无直接联系的其他应变 (如水化膨胀、温度和化学因素等引起的); p 为流体的孔隙压力; K_s 为岩石的体积弹性模量; \mathbf{D}_r 为岩石的本构矩阵, 它与岩石材料的特性和骨架的有效应力 σ' 和总应变有关。 $m = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 。

假设流体在可变形多孔介质中的流动服从 Darcy 定律, 根据质量守恒定律, 并考虑总应变的变化和孔隙压力的变化以及由此引起的固体骨架体积的变化、流体密度的变化和有效应力的变化以及由此引起的固体骨架颗粒大小的改变等因素对流体质量的影响, 可以得到流体在可变形饱和储层中流动的连续性方程

$$\bar{A} \equiv -\nabla^T \left\{ \frac{\mathbf{K}}{\mu} (p + \rho gh) \right\} + \left(m^T - \frac{m^T \mathbf{D}_r}{3K_s} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \left[\frac{(1-\varphi)}{K_s} + \frac{\varphi}{K_f} - \frac{1}{(3K_s)^2} m^T \mathbf{D}_r m \right] \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

式中略去了源、汇的影响。其中 K_s 为岩石的体积弹模, K_f 为流体的体积弹模, φ 为岩石的孔隙率, \mathbf{K} 为储层的绝对渗透率矩阵, μ 为流体的动态粘度。

平衡方程 (1) 和连续性方程 (2) 即为弹性储层中单相流体流动的流固耦合方程。

根据 Galerkin 方法, 以耦合方程中的位移和孔隙压力为未知量, 得到几何域上的耦合解, 并用全隐式差分方法得到时间域上的解如下

$$\begin{bmatrix} K & L \\ L^T S & \alpha H \Delta t_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{u} \\ \bar{p} \end{Bmatrix}_{t_k + \Delta t_k} = \begin{bmatrix} K & L \\ L^T S & - (1 - \alpha) H \Delta t_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{u} \\ \bar{p} \end{Bmatrix}_{t_k} + \left\{ \frac{df}{dt} + C \right\}_{\bar{f}} \Delta t_k \quad (3)$$

式中的有关量见文献 [6~7]。利用式 (3) 我们成功地开发了流固耦合有限元数值模拟软件 NSFSC^[2D], 并利用该软件对油井开采过程中油层的变形问题进行了模拟。

2 单井开采问题的描述

考虑一个半径为 r_w 的生产井, 以定产量生产, 其产量为 q_w , 它是一个完善井, 完全穿透含油层形成一个圆柱形空间。假设该油层以油井轴为对称轴, 其供油半径为 r_e , 油层厚度为 h (图 1、图 2)。由于对称性, 在有限元数值模拟中, 只须研究半个区域。采用 8 结点等参元将模拟油层进行离散, 在 z 方向采用相同大小的网格尺寸将其均匀剖分为 4 个区, 而在水平方向上采用非等分网格, 离井越近, 网格的尺寸取得越小, 远离油井沿径向方向的网格尺寸逐渐

加大, 得到的剖分区域为 17 个, 共 68 个单元。

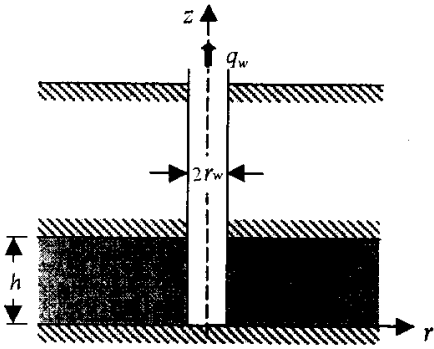


图 1 油层中的一个生产井

Fig. 1 A fully penetrating pumping well in a oil reservoir

h . 油层厚度, r_w . 油井半径, q_w . 油井产量

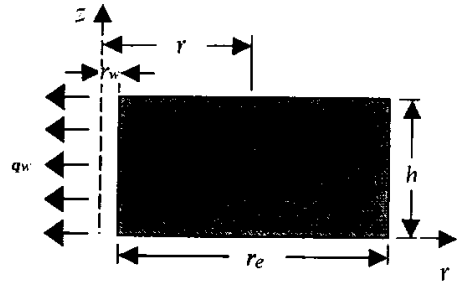


图 2 油层中生产井的几何描述

Fig. 2 Schematic description of a fully penetrating pumping well in a oil reservoir

由于在我们建立的流固耦合理论和有限元数值模拟软件中, 均以孔隙流体压力和岩石骨架位移为未知变量, 得到它们的耦合解。因此, 该问题的初始条件和边界条件均针对这两个变量。

假设模拟区域的底层没有垂直位移, 在边界 $r=r_w$ 处可以沿垂直方向产生变形, 但沿径向方向不产生位移, 而在其它边界处是自由的, 没有位移约束。在 $r=r_e$ 处, 由于 r_e 的值取得足够大, 因此, 油井在开采过程中所产生的影响在此处可以忽略不计。由于此处是定压边界, 故对于任一时间 t 在 $r=r_e$ 边界上的流体孔隙压力为常数, 均等于初始地层压力 (即孔隙压力)。又由于油井产量是恒定的, 这样, 在油井处 ($r=r_w$) 具有常流动边界条件, 相应的压力梯度为常数, 而油层的初始孔隙压力为 p_0 。油井在投产前 ($t=0$), 因为没有流动发生, 所以地层各点的压力都等于原始地层压力, 同时, 岩石骨架也没有任何变形产生。

模拟过程中所采用的有关常数的值见表 1。

表 1 数值模拟中所采用的一些参数的具体值

Table 1 Values of the coefficients used in the simulation of pumping from an oil reservoir

参 数	符 号	数 值	单 位
油层的垂直厚度	h	10	m
油层的水平径向尺寸	r_e	1000	m
油井的半径	r_w	0.3	m
油的压缩系数	β	5.0×10^{-10}	Pa
油的动力粘度	μ	1000	Pa · s
油的密度	r_f	810	t/m ³
泊松比	ν	0.1	无量纲
渗透率	k	1.02×10^{-11}	m ²
孔隙率	φ	0.2	无量纲
杨氏模量	E	2.2×10^7	Pa
油的产量	q_w	1.89×10^{-3}	m ³ /s

3 模拟结果与分析

图 3 是因抽油所引起的油层顶层的垂直位移随水平距离的变化情况。从图中可知：油层产生的垂直位移在油井附近的变化最大，但随着水平径向距离的增加而趋于缓和，可以预见，当径向距离增大到一定程度时，抽油引起的油层在垂直方向上的变形或位移则很小，即此时抽油不会引起油层在垂直方向上的变形。从图中我们还可以看出：随着开采时间的延长，油层在垂直方向上的变形将越来越大，产生的位移也就不断增加。这主要是由于石油的不断采出，地层压力不断降低，使得岩石骨架的有效应力增加，从而产生较大的变形。

图 4 描述了不同时刻因油井抽油所引起的油层顶层在水平方向上所产生的位移与径向距离的关系。由于假设在 $r=r_w$ 处油层不产生水平位移（即 $u_r(r_w, z, t) = 0$ ），故井壁处的位移为零，而向远离油井方向的水平位移逐渐加大。从总的趋势来看，当径向距离增加到某一值时，油层产生的水平位移将得到最大值，随后随着径向距离的增加又逐渐减小。同时，随着开采时间的增大，油层产生的水平位移也不断增大。这对邻近油井或套管的稳定性将产生直接的影响，对于垂直油井，油层产生的水平位移可能会使油井或套管变形甚至被错断。因此，在开采石油过程中油层因采油而产生的水平位移是不能忽视的，应引起重视。

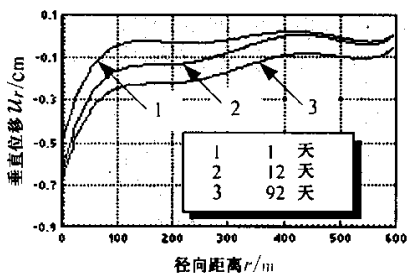


图 3 不同时刻垂直位移与径向距离的关系

Fig. 3 Vertical displacements versus radial distance at the top of the oil reservoir

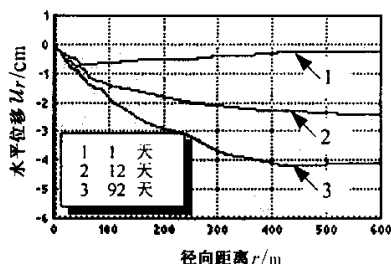


图 4 不同时刻水平位移与径向距离的关系

Fig. 4 Horizontal displacements versus radial distance at the top of the oil reservoir

4 结论

作者依据已建立的流固耦合理论及由此开发出的数值模拟 NSFSC^{2D}软件，并首次用于油井开采过程的流固耦合模拟。模拟结果表明：由于油层抽油使得地层的孔隙压力下降，造成岩石骨架的有效应力增加，使得油层产生明显的垂直位移和水平位移。随着开采时间的增大，油层在垂直方向和水平方向上的变形将越来越大，产生的位移也就不断增加。当这两方面的位移足够大时，可能会产生严重的后果。比如：油井的产能会降低以及油井或套管的变形损坏等等。因此，在石油的开采过程中，油层因采油而产生的位移是不能忽视的，应引起重视。

参 考 文 献

- [1] Abou-Sayed A S. Elastic/plastic compaction model applicable to low cohesion oil sands reservoir [A]. Proc. Forum on subsidence due to fluid with drawals [C]. Checotah, OK. 1982. 15.
- [2] Smits R M M et al. Prediction of abrupt reservoir compaction and surface subsidence caused by pore collapse in carbonates [J]. SPE Formation Evaluation. June, 1988. 340.
- [3] Yudovich A. Morgan D R. Casing deformation in Ekofisk [J]. J. P. T. July, 1989. 724.
- [4] Terzaghi K. Theoretical Soil Mechanics [M]. Wiley, New York, 1943.
- [5] Biot M A. General theory of three-dimensional consolidation [J]. J. Appl. Phys. 1941, 8: 155~164.
- [6] Dong Pingchuan, Xu Xiaohe. A fully coupled model for fluid flow in deforming saturated porous media [A]. Proceeding of the Third International Conference on Fluid Mechanics [C]. Beijing, July 7-10, 1998. 766~771.
- [7] 董平川, 徐小荷. 储层流固耦合的数学模型及其有限元方程 [J]. 石油学报, 1998, 19 (1): 64~70.

THE FULLY COUPLED FLUID-SOLID ANALYSIS FOR THE RESERVOIR ROCK DEFORMATIONS DUE TO OIL WITHDRAWAL

DONG Ping-chuan¹, LANG Zhao-xin¹, XU Xiao-he²

(1. *Petroleum University, Changping Beijing 102200, China;*

2. *Northeastern University, Shenyang Liaoning 110006, China.*)

Abstract: The effective normal stress in a hydrocarbon reservoir will increase as a result of the decline in pore fluid pressure associated with the withdrawal of fluids, thus leading to a compaction or deformation of the reservoir rocks, with a consequent decrease in permeability and production, and a failure of the oil wells and the casings, and sometimes subsidence of the ground surface. The reservoir rock deformation due to fluid tapping can be described by a general 3-D deformation field coupled with a 3-D fluid flow field. A finite element numerical model for a fluid flow in a deforming porous medium is here presented to simulate the response of an oil reservoir subject to fluid withdrawal wherein axisymmetric flow and deformation occur simultaneously. A few useful conclusions are obtained and can be used to explain the practical problems encountered during oil production.

Key words: fluid-solid couple; oil production; reservoir deformations; finite element method; numerical simulation