第 20 卷 第 2 期
1998 年 3 月

岩 土 工 程 学 报
Chinese Journal of Geotechnical Engineering

Vol. 20 No. 2
Mar., 1998

油藏渗流与应力耦合分析

Coupling analysis of multiphase flow and stress for oil reservoir

冉启全 顾小芸
(中国科学院力学研究所,北京,100080)

文 摘 基于岩石力学与渗流力学理论,考虑到油藏中多相渗流的特点以及渗流与应力的耦合效应,建立了油藏多相渗流与应力耦合分析模型,研究了渗流与应力的耦合规律,给出了实现耦合分析的方法与步骤,最后通过算例检验了耦合分析的有效性和实用价值。

关键词 油藏,耦合分析,多相流体,渗流,应力,耦合关系。

中图法分类号 TU 452

作者简介 冉启全,男,1965 年生,1987 年毕业于西南石油学院,1996 年在同校获博士学位;现在中国科学院力学研究所博士后流动站工作,主要从事岩土力学与渗流力学的耦合理论及其工程应用研究。

Ran Qiquan Gu Xiaoyun

(Institute of mechanics, Chinese academy of sciences, Beijing, 100080)

Abstract The mathematical models of coupling analysis on reservoir multiphase flow and stress are established based on the theories of rock mechanics and mechanics of multiphase flow through porous media. The models characterize of multiphase fluid flow in reservior and coupling effect of seepage and strees. The coupling laws between seepage and stress are studied. The method and steps for implementing the coupling analysis are given. The effectiveness and utilities for coupling analysis are verified by an example.

Key words ressrvoir, coupling analysis, multiphase fluid, seepage, stress, coupling law.

1 引 言

近年来,渗流与应力耦合分析的研究已成为国内外研究的热点。在国内,陈平、张有天(1994)[1]和周创兵、熊文林(1996)[2]对裂隙岩体渗流与应力耦合问题进行了研究;赵阳升(1994)[3]和梁冰、章梦涛(1996)[4]研究了煤层瓦斯渗流与应力的耦合问题,他们均取得了很好的成果。随着石油工业的发展以及解决复杂石油工程问题的需要,石油工程中油藏渗流与应力耦合分析的研究也显得越来越重要,并已受到人们的高度重视[5]。我国大多数油田均采用高压注水开采,在这种注采交变载荷作用下,油藏渗流与应力间存在很强的力学耦合作用,即油藏多相流体的渗流与开采要引起渗透体积力的变化,导致油藏应力场的改变及其重新分布;而油藏应力场的变化要引起岩石多孔介质的变形,导致油藏岩石物性参数的变化,反过来影响油藏多相流体的渗流与开采。在油藏开采过程中,油藏渗流与应力变化是相互影响、相互制约的,这种相互力学作用的机理研究及其数值模拟称之为耦合分析。油藏渗流与应力耦合分析是石油工程中必须进行研究的重大课题。这可为油气井定向钻井及井壁的稳定性分析、油气井水力压裂及岩石破裂机制研究、合理布置油气井网、预测油气开采动态和计算开采指标等提供理论基础和科学依据。本文将岩石力学和渗流力学相结合,开展了油藏渗流与应力耦合问题的研究。

2 耦合分析模型

油藏渗流与应力耦合分析,是用岩石力学与渗流力学的基本理论,对渗流与应力的力学耦合作用规律进行研究。它包括两层涵义:一方面研究在油藏应力场作用下,油藏中油气水多相渗流的运动规律;另一方面研究在渗流场作用下,油藏岩石的应力应变和强度问题。油藏渗流与应力耦合分析模型主要包括:应力场作用下的多相渗流微分方程;渗流场作用下的平衡微分方程;渗流与应力耦合的本构关系。

2.1 应力场作用下的多相渗流微分方程

在油、气、水多相渗流情况下,考虑重力作用的达西定律为

$$V_{\alpha x} = -\frac{K_x K_{r\alpha}}{\mu_\alpha}\left[\frac{\partial P_\alpha}{\partial x} - \gamma_\alpha \frac{\partial D}{\partial x}\right. \quad (1)$$

$$V_{\alpha y} = -\frac{K_y K_{r\alpha}}{\mu_\alpha}\left[\frac{\partial P_\alpha}{\partial y} - \gamma_\alpha \frac{\partial D}{\partial y}\right. \quad (2)$$

$$V_{\alpha z} = -\frac{K_z K_{r\alpha}}{\mu_\alpha}\left[\frac{\partial P_\alpha}{\partial z} - \gamma_\alpha \frac{\partial D}{\partial z}\right. \quad (3)$$

式中 $\alpha = o, g, w$ 分别代表油相、气相和水相;$V_{\alpha x}, V_{\alpha y}, V_{\alpha z}$ 分别为 α 相 x, y, z 方向的达西速度;K_x, K_y, K_z 分别为 x, y, z 方向的绝对渗透率;$K_{r\alpha}$ 为 α 相的相对渗透率;μ_α 为 α 相的粘度;P_α 为 α 相的压力;D

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

为标高,是基准面垂直方向的深度(海拔);$\gamma_\alpha = \rho_\alpha g$ 为 α 相的重度;ρ_α 为 α 相的密度;g 为重力加速度。

根据达西定律,按油组分、气组分、水组分质量守恒的原则,并考虑源、汇项,可导出渗流微分方程,即油组分方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{K_x K_{ro}\rho_o}{\mu_o}\left(\frac{\partial P_o}{\partial x} - \gamma_{og}\frac{\partial D}{\partial x}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{K_y K_{ro}\rho_o}{\mu_o}\left(\frac{\partial P_o}{\partial y} - \gamma_{og}\frac{\partial D}{\partial y}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{K_z K_{ro}\rho_o}{\mu_o}\left(\frac{\partial P_o}{\partial z} - \gamma_{og}\frac{\partial D}{\partial z}\right)\right] + q_o = \frac{\partial(\phi\rho_o S_o)}{\partial t} \tag{4}$$

气组分方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{K_x K_{rg}\rho_g}{\mu_g}\left(\frac{\partial P_g}{\partial x} - \gamma_g\frac{\partial D}{\partial x}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{K_y K_{rg}\rho_g}{\mu_g}\left(\frac{\partial P_g}{\partial y} - \gamma_g\frac{\partial D}{\partial y}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{K_z K_{rg}\rho_g}{\mu_g}\left(\frac{\partial P_g}{\partial z} - \gamma_g\frac{\partial D}{\partial z}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{K_x K_{rg}\rho_{gd}}{\mu_o}\left(\frac{\partial P_o}{\partial x} - \gamma_{og}\frac{\partial D}{\partial x}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{K_y K_{rg}\rho_{gd}}{\mu_o}\left(\frac{\partial P_o}{\partial y} - \gamma_{og}\frac{\partial D}{\partial y}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{K_z K_{rg}\rho_{gd}}{\mu_o}\left(\frac{\partial P_o}{\partial z} - \gamma_{og}\frac{\partial D}{\partial z}\right)\right] + q_g + R_{so}q_o = \frac{\partial(\phi\rho_g S_g)}{\partial t} + \frac{\partial(\phi\rho_{gd}S_0)}{\partial t} \tag{5}$$

水组分方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{K_x K_{rw}\rho_w}{\mu_w}\left(\frac{\partial P_w}{\partial x} - \gamma_w\frac{\partial D}{\partial x}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{K_y K_{rw}\rho_w}{\mu_w}\left(\frac{\partial P_w}{\partial y} - \gamma_w\frac{\partial D}{\partial y}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{K_z K_{rw}\rho_w}{\mu_w}\left(\frac{\partial P_w}{\partial z} - \gamma_w\frac{\partial D}{\partial z}\right)\right] + q_w = \frac{\partial(\phi\rho_w S_w)}{\partial t} \tag{6}$$

式中 ϕ 为孔隙度;S_o, S_g, S_w 分别为油、气、水的饱和度;$\gamma_{og} = \gamma_0 + \gamma_{gd}$;$\gamma_{gd} = \rho_{gd}g$ 为溶解气的重度;ρ_{gd} 为溶解气的密度;q_o, q_g, q_w 为以质量计的单位时间内单位地层体积内的产出(或注入)油、气、水量;R_{so} 为溶解气油比。

在油、气、水三相渗流过程中,各相饱和度应满足饱和度约束方程,即

$$S_o + S_g + S_w = 1 \tag{7}$$

同时,在油、气、水三相渗流过程中,油气、油水及气水间还存在毛管压力作用,因此还应有以下毛管压力约束方程,即

$$P_w = P_o - P_{cow} \tag{8}$$

$$P_g = P_o + P_{cog} \tag{9}$$

式中 P_{cog}, P_{cow} 分别为油气、油水间的毛管压力。

渗流微分方程中的孔隙度 ϕ 和渗透率 K 在应力场变化过程中要发生改变,这充分体现了渗流与应力的耦合效应。因此,应力场作用下的渗流为流固耦合渗流,对流固耦合渗流方程求解的重点和难点在于正确确定孔隙度 ϕ 和渗透率 K 的动态变化。只有当孔隙度 ϕ 和渗透率 K 的动态变化由渗流与应力耦合的本构关系确定后,在给定的定解条件下,方可对渗流微分方程求解。

2.2 渗流场作用下的平衡微分方程

饱含油、气、水的油藏,在开采过程中处于各种力的动态平衡状态,这种状态可用平衡微分方程进行描述。在油藏渗流与应力耦合分析中,油气水渗流与开采引起孔隙压力的变化,导致有效应力变化,从而引起油藏岩石变形的流固耦合关系是靠有效应力原理来体现的。本文约定应力以拉为正,压为负,则有效应力原理的数学表达式为

$$\sigma = \sigma^T + \delta_{ij}P \tag{10}$$

式中 σ^T 为总应力,σ 为有效应力,P 为等效孔隙压力,$\delta_{ij} = [1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0]^T$。

根据有效应力原理和平衡条件,即可得到以有效应力为基础的平衡微分方程[6],即

$$\frac{\partial\sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial z} - \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \tag{11}$$

$$\frac{\partial\sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial z} - \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \tag{12}$$

$$\frac{\partial\sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} - \frac{\partial p}{\partial z} + f_z = 0 \tag{13}$$

式中 f_z 为饱含多相流体多孔介质的自身重力,其表达式为

$$f_z = [(1-\phi)\rho_s + \phi S_o\rho_o + \phi W_w\rho_w + \phi S_g\rho_g]g \tag{14}$$

式中 ρ_s 为岩石骨架的密度。

可见,作用于油藏岩石的体积力有两种,一是自身重力(即 f_z)和渗透体积力(即 $\partial p/\partial x, \partial P/\partial y, \partial P/\partial z$),它们在油藏开采过程中均是变化的,因此渗流场作用下的平衡微分方程充分体现了渗流与应力的动态耦合效应。在各相压力、饱和度以及孔隙度确定时,根据几何方程、应力应变本构方程,由具体的定解条件,即可对平衡微分方程进行求解,得到位移、应变及应力值。

2.3 渗流与应力耦合的本构关系

应力场作用下的渗流是流固耦合渗流,这表现在渗流微分方程中的孔隙度 ϕ 和渗透率 K 在应力场作

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

用下要发生变化,体现了渗流与应力的耦合效应。因此,在渗流与应力耦合分析中,建立渗流与应力耦合的本构关系是非常重要的。

由于油藏应力场变化导致多孔介质变形,不仅使岩石多孔介质的储集性发生变化,而且也引起岩石多孔介质的渗透性发生变化。本文全面地研究了渗流与应力耦合规律,即既研究了油藏储集性在应力场作用下的变化规律,又研究了渗透性在应力场作用下的变化规律。在具体建立渗流与应力耦合的本构关系时,本文直接以应变为耦合对象,因为应变隐含了有效应力及岩石本身力学特性的综合效应,而且不论其变形是线性或非线性,弹性或弹塑性均是有效的。根据体积应变,可以建立适用的渗流与应力耦合本构关系。

所谓体积应变,就是油藏岩石在变形过程中,单位体积的体积改变。其数学表达式为

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V_b}{V_b} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \tag{15}$$

式中　V_b 为岩石的总体积;ΔV_b 为岩石的体积变化;ε_x, ε_y 和 ε_z 分别为 x, y 和 z 方向的正应变;

孔隙度与体积应变的关系可由孔隙度和体积应变的定义导出。孔隙度的定义为

$$\phi = \frac{V_p}{V_b} \tag{16}$$

式中　V_p 为岩石孔隙体积。

孔隙度从初始状态经过体积应变 ε_v 而到达目前状态,则可导出孔隙度与体积应变的关系式为

$$\phi = \frac{1}{1+\varepsilon_v}(\phi_0 + \varepsilon_v) \tag{17}$$

渗透率与体积应变的关系可以通过 Kozeny-Carman 方程导出。Kozeny-Carman 方程的表达式为

$$k = \frac{\phi}{k_z S_p^2} \tag{18}$$

式中　$k_z \approx 5$ 是 Kozeny 常数; S_p 是比表面积,可以由下式获得:

$$S_p = \frac{A_s}{V_p} \tag{19}$$

式中　A_s 为岩石颗粒的总表面积。

渗透率从初始状态经过体积应变 ε_v 而到达目前状态,则导出的渗透率与体积应变的关系式为

$$\frac{K}{K_0} = \frac{\left[1 + \frac{\varepsilon_v}{\phi_0}\right]^3}{1+\varepsilon_v} \tag{20}$$

3　耦合分析的实现方法与步骤

油藏渗流与应力耦合分析是通过数值模拟技术来实现的,即通过对应力场作用下的油气水多相渗流过程与渗流场作用下的应力应变过程用数值方法同时进行仿真模拟来实现。

进行耦合分析需要对渗流模型和应力模型进行交替迭代求解。渗流模型采用有限差分法求解,用于模拟计算每个时步的各相压力、饱和度分布以及各开采动态指标;而应力模型采用有限元法求解,用于计算每个时步的位移、应变和有效应力分布。在耦合数值分析中,需要两套网格系统,一套用于渗流模拟的有限差分网格系统,另一套用于应力分析的有限元网格系统。在这两套网格系统中,有限差分网格系统采用块中心网格,而有限元网格系统采用 8 结点等参单元,这样有限差分网格系统的块中心与有限元网格系统的单元结点一一对应,就能保证两模拟器间信息的正常传递和交流,即渗流模型块中心的值就代表应力模型单元结点上的值;而应力模型单元结点上的值就代表渗流模型块中心的值,即代表整个网格块的值。

耦合数值分析的求解采用交替迭代求解方式,即应力模型的求解滞后于渗流模型一个时步。渗流模型一个时步求解结束,将孔隙流体压力增量与饱和度增量传给应力模型,重新计算载荷分布;而应力模型一个时步求解结束,则将体积应变传给渗流模型,计算新的孔隙度和渗透率。其耦合分析过程为:①求油藏的初始应力场分布;②求解渗流模型,模拟一个时步的渗流动态,获得渗流场(包括孔隙压力和饱和度分布及各开采动态指标);③根据孔隙压力与饱和度的增量,重新计算载荷分布;④求解应力模型,求载荷增量引起的位移、应变及应力增量,从而获得应力场;⑤根据应变计算新的孔隙度、渗透率;返回 ②,求解下一个时步的解,直到结束。

4　算　　例

某油藏开采单元,其单元中心有一口产油井,采用衰竭式开采。基本参数为:产油井的工作制度为定压生产,井底流压为 5MPa;开采单元的大小为:500m × 500m;油层顶深为 2537.52m,油层厚度为 15.25m。材料力学参数为:弹性模量为 1300MPa,泊松比为 0.15,摩擦角为 30°,内聚力为零,硬化参数为零,上覆层密度为 2500kg/m^3。初始状态的油藏参数:孔隙度为 25%,渗透率为 100 ×10^{-3}μm^2,含油饱和度 88%,含水饱和度 22%,油层压力 30.3MPa。渗流模型的边界条件为封闭边界,应力模型的边界条件:油藏底部边界的垂直位移为零,外边界的水平位移为零,油藏顶部边界为恒定的应力边界,其垂直应力为 62.0MPa,水平应力为 43.4MPa。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

对油藏开采单元进行非耦合(原始模型)与耦合分析。在进行耦合分析时,分别将油藏视为线弹性多孔介质(弹性模型)和弹塑性多孔介质(塑性模型),以说明本构模型对耦合分析结果的影响。

4.1 应力场作用下的渗流场分析

分析结果表明,渗流与应力耦合效应、本构模型对渗流场与开采动态有较大的影响。

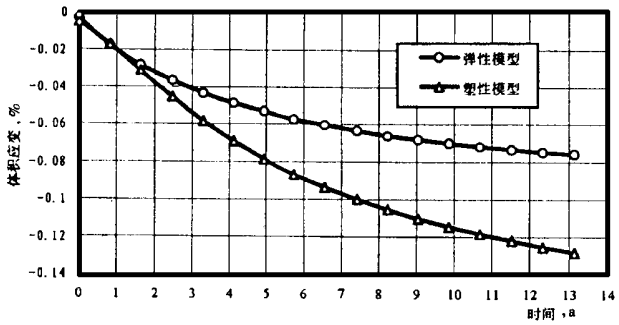

图 1 井点体积应变与生产时间关系曲线

Fig. 1 A curve of volumetric strain at well block versus production time

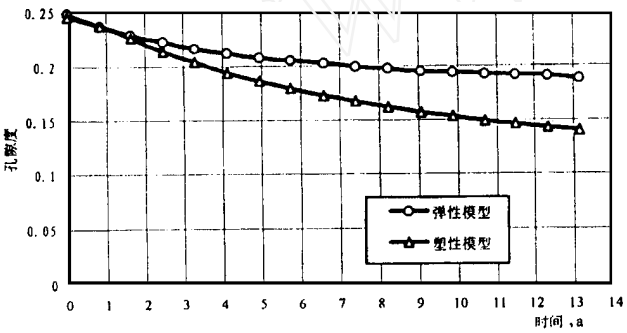

图 2 井点孔隙度与生产时间关系曲线

Fig. 2 A curve of porosity at well block versus production time

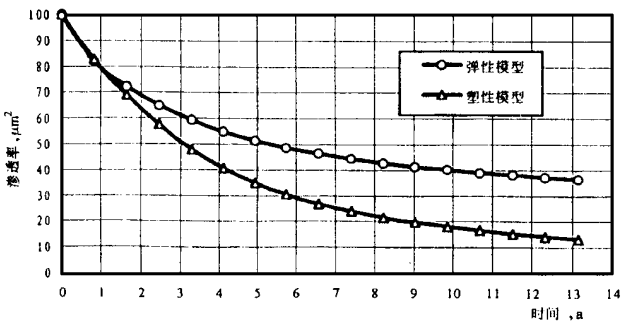

图 3 井点网格渗透率与生产时间关系曲线

Fig. 3 A curve of permeability at well block versus production time

在耦合作用下,应力场的变化引起油藏多孔介质变形,产生较大的体积应变(图 1),并导致孔隙度(图 2)和渗透率(图 3)的较大变化。由于耦合效应引起孔、渗变化,因而最终影响渗流场和油藏的开采动态(图 4,5);由于原始模型没有考虑耦合效应,将孔、渗参数视为常数,因而其孔隙压力下降最大,采出程度最高,耦合模型考虑了耦合效应对孔、渗参数的影响,孔、渗参数在开采过程中逐步减小,因而孔隙压力下降相对较慢,则采出程度相对较低。在耦合模型中,塑性模型的体积应变、孔隙度和渗透率变化比弹性模型大,因而塑性模型的压力下降较慢,采出程度较低。因此,在分析油藏的渗流场,计算开采动态时,既要考虑耦合效应的影响,又要选取正确的本构模型,才能制定出科学、合理的开采方案。

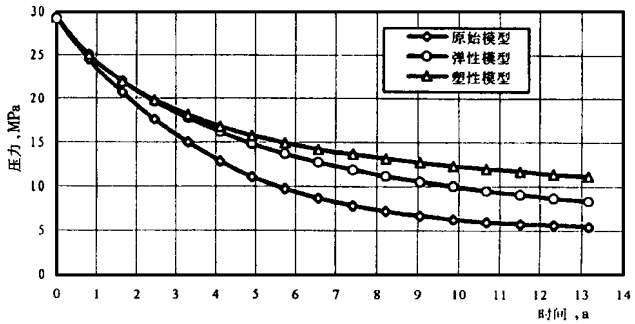

图 4 井点压力与生产时间关系曲线

Fig. 4 A curve of pressure at well block versus production time

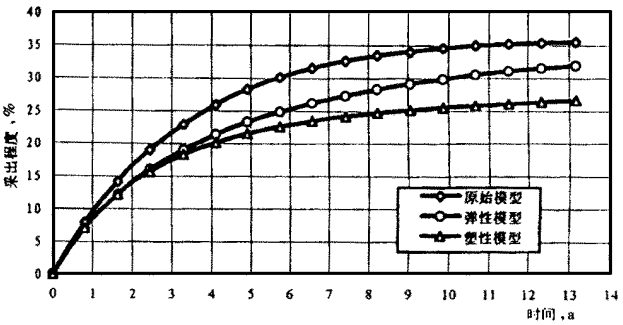

图 5 采出程度与生产时间关系曲线

Fig. 5 A curve of reservoir recovery versus production time

4.2 渗流场作用下的应力场分析

分析结果还表明,渗流与应力耦合效应、本构模型对应力场同样有较大影响。

图 6,7 是有效应力与时间的关系曲线。从图中可以看出,油藏采用衰竭式开采,随孔隙压力的逐渐减小,有效应力逐渐增大。但非耦合模型孔隙压力下降比耦合模型大,有效应力比耦合模型高。因此,耦合效应对油藏有效应力的预测有较大的影响,是不容忽视的因素。在耦合模型中,由于不同的本构模型反映了不同的应力应变规律,因而弹性模型和塑性模型的孔隙压力与有效应力分布有较大差别。因此,在分析油藏的应力场分布时,既要考虑耦合效应的影响,又要选取正确的本构模型,否则会导致预测的有效应力分布与实际情况出现很大的偏差,从而误导生产和施工,造成巨大的经济损失。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

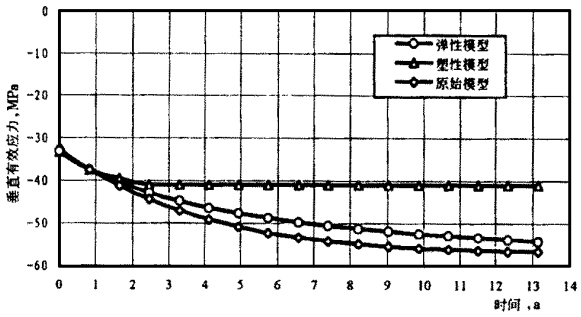

图 6　垂直有效应力与生产时间关系曲线

Fig. 6　A curve of vertical effective stress at well block versus production time

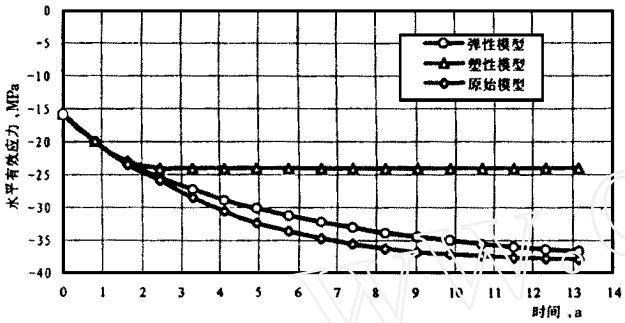

图 7　水平有效应力与生产时间关系曲线

Fig. 7　A curve of horizontal effective stress at well block versus production time

5　结　　论

本文算例表明,不论是对油藏渗流动态进行计算以制定开采方案,还是对油藏应力应变与强度特性进行研究以指导生产和施工,都应当采用渗流与应力耦合分析方法,不能忽略渗流与应力的耦合效应。同时还表明,本文提出的油藏渗流与应力耦合分析模型与方法是有效的,具有实际应用价值。

参 考 文 献

1　陈　平,张有天. 裂隙岩体渗流与应力耦合分析. 岩石力学与工程学报,1994,**13**(4):299～308.

2　周创兵,熊文林. 双场耦合条件下裂隙岩体的渗透率张量. 岩石力学与工程学报,1996,**15**(4):338～344.

3　赵阳升. 煤体-瓦斯耦合数学模型及数值解法. 岩石力学与工程学报,1994,**13**(3):229～239.

4　梁　冰,章梦涛. 煤层瓦斯参流与煤体变形的耦合数学模型及数值解法. 岩石力学与工程学报,1996,**15**(2):135～142.

5　Settari A. New developments in simulation. JCPT, 1993(1):21～24.

6　冉启全. 流固耦合油藏数值模拟理论与方法研究[博士学位论文]. 四川,南充:西南石油学院,1996.

本 刊 赠 阅 启 事

一、本刊向历届编委赠送《岩土工程学报》,凡缺期者,请函告本部,以便补寄。

二、本刊之长期赠阅单位及兄弟期刊编辑部,凡缺期者,请函告本部,以便补寄。

三、凡读者持有装订错误之本刊,请函告本部,以便补寄。

(本刊编辑部)

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net