

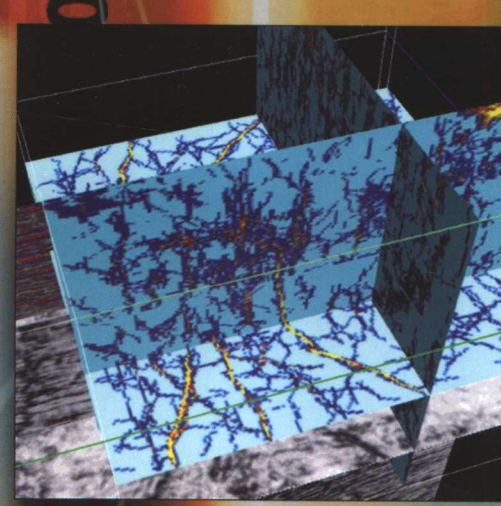
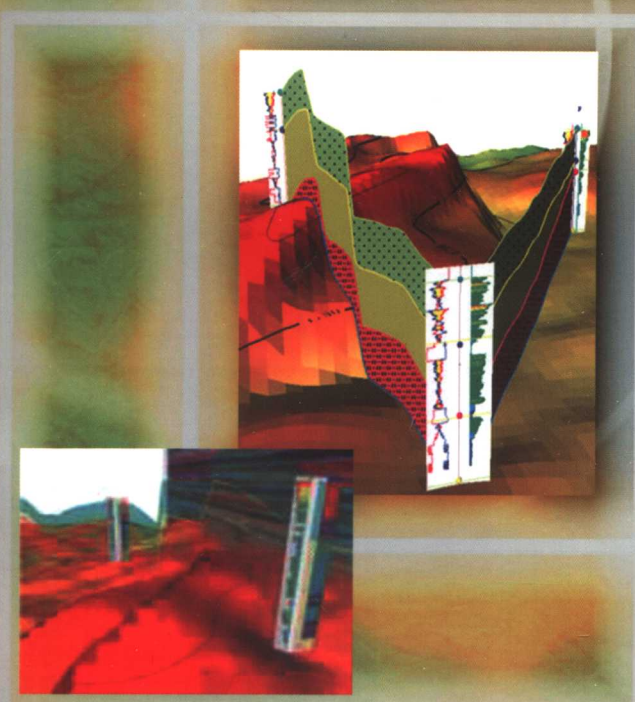
胡永乐 冉启全 孙建平 编译

# 流固耦合油藏数值模拟



1010010010101010 101010001001011001010  
10010110010100101

010100



石油工业出版社  
PETROLEUM INDUSTRY PRESS

010111

# 流固耦合油藏数值模拟

胡永乐 冉启全 孙建平 编译

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书收集了近年来国内外岩土力学—多相渗流耦合油藏数值模拟方面的技术文献和典型实例共 40 篇, 主要内容包括岩土变形力学实验, 储层物性随有效应力变化机理, 以及流固耦合油藏数值模拟模型、求解方法、应用实例等。

本书可供从事油田开发的管理人员、工程技术人员, 以及大专院校石油工程专业的师生学习、借鉴和参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

流固耦合油藏数值模拟/胡永乐, 冉启全, 孙建平编译.

北京: 石油工业出版社, 2007. 1

ISBN 978 - 7 - 5021 - 5656 - 5

I. 流…

II. ①胡… ②冉… ③孙…

III. 油气藏 - 数值模拟

IV. P618.130.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 089660 号

### 流固耦合油藏数值模拟

胡永乐 冉启全 孙建平编译

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: [www.petropub.cn](http://www.petropub.cn)

发行部: (010)64210392

经 销: 全国新华书店

排 版: 北京乘设伟业科技排版中心

印 刷: 北京晨旭印刷厂

2007 年 1 月第 1 版 2007 年 1 月第 1 次印刷

787 × 1092 毫米 开本: 1/16 印张: 31

字数: 794 千字 印数: 1—800 册

定价: 90.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

# 前 言

岩土力学—热力学—多相流体渗流的耦合研究,近年来引起国内外石油工程界的极大兴趣,成为油藏工程及相关领域研究的热点问题之一。

在油气田开采过程中,随着油气的不断采出,储层孔隙流体压力不断下降,岩土有效应力重新分布,导致储层岩土骨架变形,使油气藏的物性参数,特别是孔隙度、渗流率和孔隙压缩系数发生变化;而这些变化反过来又影响储层流体在孔隙空间的流动。因此,在油气藏开采过程中存在极强的流固耦合作用,其渗流为流固耦合渗流。特别是在稠油油藏、异常高压油气藏、裂缝性油气藏、低渗透油气藏的开采,以及油田高压注水开采过程中,极强的流固耦合效应对油气的渗流和开采有很大影响。目前,将岩土力学、热力学、多相流体渗流集于一体的流固耦合油藏数值模拟研究在油藏工程中占有越来越重要的地位。

近些年来,国外在流固耦合油藏数值模拟研究方面开展了大量的研究工作,主要包括岩土变形力学实验、储层物性随有效应力变化机理、流固耦合油藏数值模拟模型,以及求解方法等,提出了一套比较完整的实验方法、理论模型及求解新技术,并用于矿场开发实践,取得了明显的进展;同时中国不少学者在最近几年也开展了初步的流固耦合油藏数值模拟研究工作。然而,目前国内尚没有系统介绍有关流固耦合油藏数值模拟的实验、理论、方法、技术新进展的书籍。为了弥补这一缺憾,编者在分析、总结中国各种不同类型油气藏存在的流固耦合效应的基础上,结合自己开展流固耦合油藏数值模拟研究的部分成果,收集了大量国外在流固耦合油藏数值模拟研究方面的实验方法、新理论、新模型、新技术及新进展等技术文献和典型实例,在此基础上编译了本书。

愿本书能为从事油藏工程、数值模拟的工程技术人员,对流固耦合油藏数值模拟感兴趣的人员,以及相关领域的技术人员提供有益的帮助。

编 者

2006年10月于北京

# 目 录

## 第一部分 室内实验及模型

流固耦合油藏数值模拟中物性参数动态模型研究 .....	(3)
流固耦合多相多组分渗流数学模型的建立 .....	(13)
用地质力学实验评价油藏性质 .....	(19)
油砂油藏注蒸汽过程中的体积和渗透率变化 .....	(38)
碳酸盐岩中取决于应力路径及孔隙度的塑性和渗透率 .....	(51)
地质和地质力学参数对油藏应力路径的影响及其在研究渗透率各向异性中的重要性 .....	(63)
油藏应力路径对砂岩压缩率和渗透率的影响 .....	(72)
上覆压力对相对渗透率的影响 .....	(79)
地质力学与流体流动耦合模拟——塑性和渗透率变化的影响 .....	(86)
应力导致的两相渗透率变化 .....	(99)
页岩中长期裂缝渗透率的实验测试 .....	(109)
衰竭开采过程中砂岩渗透率演化的本构定律 .....	(122)
反映临界状态和微观力学之间关系的变形和渗透率本构模拟 .....	(132)
剪切破裂对蒸汽吞吐的影响和油藏模拟的新型拟函数 .....	(144)
油砂屈服实验中的力学变形和流体流动耦合 .....	(161)
低有效应力下油砂强度参数对出砂的影响 .....	(173)
油砂有效应力—应变特征的本构模型 .....	(182)

## 第二部分 理论、方法及应用

弹塑性变形油藏中多相渗流的数值模拟 .....	(203)
油藏渗流与应力耦合分析 .....	(211)
变形稠油油藏的地质力学—热力学耦合数值模拟 .....	(219)
用于无内聚力油砂开采分析的地质力学—多相流耦合模型 .....	(229)
集成地质力学的油藏模拟 .....	(247)
变形油藏中多相非等温流体流动的理论框架 .....	(259)
地质力学和多相流耦合的三维计算机模拟 .....	(269)
地质力学和油藏模拟模型的耦合 .....	(277)
受热油砂的流体流动和应力耦合分析 .....	(286)

应力、流体和热力相耦合的多相油藏模拟研究 .....	(302)
地质力学和油藏的模拟耦合进展及其在油藏压实中的应用 .....	(308)
商业油藏模拟器中的全耦合地质力学 .....	(324)
流体流动和地质力学耦合油藏模拟 .....	(334)
应力敏感油藏的地质力学和流体流动全耦合试井分析 .....	(349)
有助于改善水驱波及系数的地质力学、热和流体流动耦合模拟 .....	(376)
应力敏感油藏试井全耦合分析 .....	(383)
考虑流变特性的流固耦合地面沉降计算模型 .....	(399)
油藏压实和沉降的全耦合分析 .....	(405)
注蒸汽引起应力变化造成的油砂破裂预测 .....	(415)
耦合流体流动和岩土力学特征模拟未胶结油砂中的注水过程 .....	(432)
未固结多孔介质的物理学、热流模拟和岩土力学 .....	(451)
动态预测油藏有效应力的三维弹塑性有限元模型 .....	(470)
油藏渗流与应力耦合分析中的有限元等效结点力的计算方法 .....	(478)
附录 单位换算表 .....	(485)

# 第一部分 室内实验及模型





# 流固耦合油藏数值模拟中物性参数动态模型研究

**摘要** 根据流固耦合的基本思想,将渗流力学与岩土力学相结合,阐述了流固耦合油藏数值模拟的基本原理及其实现过程;将油藏开采过程中的物性参数视为应力与温度的函数,并根据体积应变的概念,导出了流固耦合油藏数值模拟求解所需的孔隙度、孔隙压缩系数及渗透率等物性参数动态变化的理论计算模型,为实现流固耦合油藏数值模拟提供了有效的途径。最后,利用导出的模型进行了实例计算,结果证明在油藏开采过程中流固耦合效应强烈,对物性参数有很大影响,并最终影响油藏的开采动态,从而检验了流固耦合油藏数值模拟的实用价值。

## 一、引言

随着石油工业的发展以及解决复杂石油工程问题的需要,流固耦合渗流的研究越来越受到高度重视。在油藏开采过程中,油藏流体渗流与岩土变形是相互影响、相互制约的,即油、气、水的渗流与开采要引起油藏应力的重新分布,并导致多孔介质的变形;而多孔介质的变形则导致油藏孔隙体积的改变,引起油藏物性参数(特别是孔隙度、孔隙压缩系数和渗透率)的变化,反过来影响油藏流体的渗流与开采。由此可见,油藏是一个流体渗流与多孔介质变形的动态耦合统一体。因此,本质意义上的油藏数值模拟应该是对油藏流体渗流与岩土变形的动态耦合作用过程进行仿真模拟,既要对流体的渗流过程进行模拟,又要对岩土变形过程进行模拟,并要体现出它们之间的动态耦合作用关系。

常规油藏数值模拟基于纯渗流力学理论,在模拟流体渗流时,不能同时对岩土变形过程进行模拟,无法考虑流固耦合作用下油藏物性参数的变化对油气渗流的影响。用它作为预测手段,预测流固耦合作用下的油藏开采动态是困难的,并且经常造成较大的误差。为此,本文将渗流力学与岩土力学相结合,阐述了流固耦合油藏数值模拟的基本原理及其实现过程。要实现流固耦合油藏数值模拟需解决的关键问题是如何获得开采过程中的物性参数。本文在流固耦合油藏数值模拟理论的指导下建立了物性参数动态模型,为流固耦合油藏数值模拟的实现提供了有效途径。

## 二、基本原理

流固耦合油藏数值模拟的数学模型由两部分组成,即流固耦合作用下的渗流数学模型和流固耦合作用下的岩土变形数学模型。

### 1. 流固耦合作用下的渗流数学模型

在饱含油、气、水三相的变形多孔介质中,流固耦合渗流的运动方程<sup>[1]</sup>为:

$$\bar{\omega}_a = \bar{\omega}_{ra} + \bar{v}_s = \frac{1}{\phi S_a} \bar{v}_a + \bar{v}_s \quad (1)$$

其中

$$\vec{v}_a = -\frac{KK_{ra}}{\mu_a}(\nabla p_a - \rho_a g \nabla D) \quad (2)$$

$$\vec{v}_s = \frac{\partial \bar{U}}{\partial t} \quad (3)$$

引入  $a$  相中  $i$  组分的质量分量 ( $x_{ia}$ ), 根据流固耦合渗流的运动方程和质量守恒原理, 并考虑源汇项  $q_i$ , 可得变形多孔介质中流固耦合多相多组分渗流的数学模型:

$$\begin{aligned} & \nabla \cdot \left[ \sum_{a=1}^3 \frac{x_{ia} \rho_a K K_{ra}}{\mu_a} (\nabla p_a - \rho_a g \nabla D) \right] - \nabla \cdot (\phi \sum_{a=1}^3 x_{ia} \rho_a S_a \vec{v}_s) + q_i \\ & = \frac{\partial}{\partial t} (\phi \sum_{a=1}^3 x_{ia} \rho_a S_a) \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $a=1$ (油),  $2$ (气),  $3$ (水)。

求解上述流固耦合渗流微分方程的流体类辅助方程和状态方程与常规渗流微分方程一致。

流固耦合渗流方程中的流固耦合效应表现为:

(1) 与常规方程相比, 方程左端传导项中增加了与岩土变形和岩土质点速度 ( $\vec{v}_s$ ) 有关的流固耦合项, 即:

$$\nabla \cdot (\phi \sum_{a=1}^3 x_{ia} \rho_a S_a \vec{v}_s)$$

(2) 方程中的绝对渗透率、孔隙度和孔隙压缩系数在开采过程中由于岩土变形而动态变化, 它们是应力、温度及岩土本身力学特性的函数, 即:

$$\phi = f(I_1, T) \quad (5)$$

$$C_\phi = f(I_1, T) \quad (6)$$

$$K = f(I_1, T) \quad (7)$$

可见, 流固耦合渗流方程中的岩土质点速度及物性参数的动态变化均与岩土变形有关, 是流固耦合作用的结果。所以, 求解时还必须对岩土变形过程进行模拟, 才能求得岩土质点速度和物性参数动态变化的结果。

## 2. 流固耦合作用下的岩土变形数学模型

岩土质点速度及岩土变形量可由流固耦合油藏岩土变形数学模型求出。根据虚功等效原则, 可导出用于岩土变形模型求解的有限元模型<sup>[1]</sup>, 即:

$$[K] \bar{u} = \{F_v\} + \{F_s\} + \{F_p\} - \{F_{\infty}\} \quad (8)$$

上述模型没有涉及多孔介质作何种变形的假设, 因此不论多孔介质是发生线性或非线性变形, 还是发生弹性或弹塑性变形, 该模型均有效。

## 3. 流固耦合油藏数值模拟的实现过程

流固耦合油藏数值模拟采用显式交替求解方式来实现, 即岩土变形模型的求解滞后于渗

流模型一个时步。渗流模型采用有限差分法求解<sup>[2]</sup>,而变形模型采用有限元法求解,其实现过程为:

- (1) 求油藏的初始应力分布;
- (2) 运行渗流模拟器,模拟一个时步的渗流动态,求得孔隙压力与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) 运行变形模拟器,求载荷增量引起的位移增量、应力增量和体积应变;
- (5) 根据体积应变计算新的油藏物性参数,并根据位移计算岩土质点速度,返回(2),求解下一个时步的解,直到结束。

### 三、物性参数动态模型的建立

实现流固耦合油藏数值模拟的关键问题之一是如何建立流固耦合作用下的物性参数动态模型。

由于流固耦合作用,在开采过程中岩土多孔介质要发生动态变形,因而油藏的孔隙度、孔隙压缩系数和渗透率等物性参数都是动态变化的。本文根据岩土变形模型解出的体积应变,从基本定义出发,导出流固耦合油藏数值模拟求解所需的物性参数动态变化的理论计算模型。由于体积应变隐含了油藏应力、温度变化及岩土本身力学特性的综合效应,同时不论是何种变形均有效,因而由此建立的模型完全适用于流固耦合油藏数值模拟。

#### 1. 体积应变的概念

所谓体积应变,就是油藏岩土在变形过程中单位体积的体积改变。其数学表达式为:

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V_b}{V_b} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \quad (9)$$

#### 2. 孔隙度模型

计算孔隙度动态变化的传统模型,是将孔隙压缩系数视为不变的常数,并通过孔隙压力的变化来计算孔隙度的变化<sup>[3]</sup>,因而存在很大的局限性。本文利用体积应变的概念,从基本定义出发,导出适用于流固耦合油藏数值模拟的孔隙度模型。

孔隙度的定义为:

$$\phi = \frac{V_b - V_c}{V_b} \quad (10)$$

在孔隙压力和温度发生一定变化后,孔隙度初始状态  $\phi_0(p_0, T_0)$  处于当前状态  $\phi(p, T)$ , 此时有一体积应变  $\varepsilon_v$ , 岩土总体积发生的变化为  $\Delta V_b$ , 则有:

$$\Delta V_b = V_b \varepsilon_v \quad (11)$$

岩土总体积的变化由孔隙体积的变化和岩土基质体积的变化组成,并认为岩土基质体积的变化完全归因于岩土颗粒的热膨胀,即:

$$\Delta V_r = V_r \gamma (T - T_0) \quad (12)$$

因此,可以导出计算新的孔隙度的表达式:

$$\phi = \frac{(V_b + \Delta V_b) - (V_r + \Delta V_r)}{V_b + \Delta V_b} \quad (13)$$

将(11)式代入(13)式得:

$$\phi = \frac{1}{1 + \varepsilon_v} \left[ \frac{(1 + \varepsilon_v)V_b - (V_r + \Delta V_r)}{V_b} \right] = \frac{1}{1 + \varepsilon_v} \left( \frac{V_b - V_r}{V_b} + \varepsilon_v - \frac{\Delta V_r}{V_b} \right) \quad (14)$$

将(10)式代入(14)式得:

$$\phi = \frac{1}{1 + \varepsilon_v} \left( \phi_0 + \varepsilon_v - \frac{\Delta V_r}{V_b} \right) \quad (15)$$

将(12)式代入(15)式得:

$$\phi = \frac{1}{1 + \varepsilon_v} \left[ \phi_0 + \varepsilon_v - \frac{V_r \gamma (T - T_0)}{V_b} \right] \quad (16)$$

由于

$$\frac{V_r}{V_b} = 1 - \frac{V_b - V_r}{V_b} = 1 - \phi_0 \quad (17)$$

将(17)式代入(16)式得:

$$\phi = \frac{1}{1 + \varepsilon_v} [\phi_0 + \varepsilon_v - (1 - \phi_0)\gamma(T - T_0)] \quad (18)$$

若只考虑等温渗流,  $T - T_0 = 0$ , 则(18)式简化为:

$$\phi = \frac{1}{1 + \varepsilon_v} (\phi_0 + \varepsilon_v) \quad (19)$$

此时岩土总体积的变化完全归因于孔隙体积的变化。(19)式就是等温情况下计算孔隙度的理论模型, 孔隙度被视为体积应变的函数(见图1)。

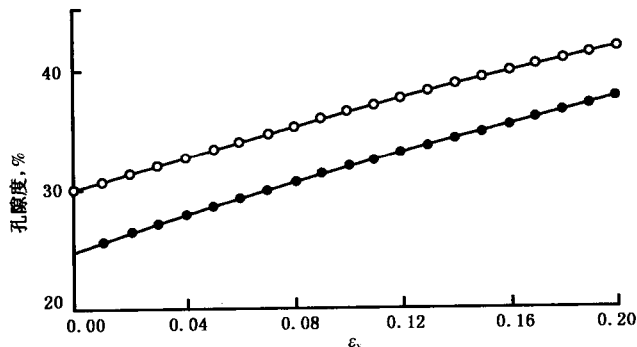


图1 孔隙度与体积应变的关系图

### 3. 孔隙压缩系数模型

常规油藏数值模拟将孔隙压缩系数视为不变的常数, 这是不妥的。因为在油藏开采过程中, 孔隙体积在不断变化, 因而孔隙压缩系数也在随时间不断变化。本文利用体积应变的概

念,从基本定义出发,导出适用于流固耦合油藏数值模拟的孔隙压缩系数动态变化的理论计算模型。

孔隙压缩系数的定义为:

$$C_{\phi} = \frac{1}{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial p} \quad (20)$$

假设孔隙压缩系数在一个求解时间步长内是常数,则对(20)式进行积分得:

$$\phi = \phi_0 \exp[C_{\phi}(p - p_0)] \quad (21)$$

对(21)式进行级数展开,并略去高阶小量,得一阶近似表达式:

$$\phi = \phi_0(1 + C_{\phi}\Delta p) \quad (22)$$

由(22)式得:

$$C_{\phi} = \frac{\phi - \phi_0}{\phi_0 \Delta p} \quad (23)$$

将(18)式代入(23)式,经整理得:

$$C_{\phi} = \frac{(1 - \phi_0)(\Delta \varepsilon_v - \gamma \Delta T)}{(1 + \Delta \varepsilon_v)\phi_0 \Delta p} \quad (24)$$

其中,  $\Delta p = p - p_0$ ,  $\Delta T = T - T_0$ 。

Beattie(1991)指出,在变形相对比较大的情况下,由(22)式导出的孔隙压缩系数作为压力的函数的近似表达式是不精确的。因此,根据(21)式可以导出孔隙压缩系数的精确表达式。

由(21)式得:

$$C_{\phi} = \frac{1}{p - p_0} \ln \frac{\phi}{\phi_0} \quad (25)$$

将(18)式代入(25)式得:

$$C_{\phi} = \frac{1}{\Delta p} \ln \left[ \frac{\phi_0 + \Delta \varepsilon_v - (1 - \phi_0)\gamma \Delta T}{\phi_0(1 + \Delta \varepsilon_v)} \right] \quad (26)$$

若只考虑等温渗流,  $\Delta T = 0$ , 则(26)式简化为:

$$C_{\phi} = \frac{1}{\Delta p} \ln \left[ \frac{\phi_0 + \Delta \varepsilon_v}{\phi_0(1 + \Delta \varepsilon_v)} \right] \quad (27)$$

(26)式、(27)式就是流固耦合油藏数值模拟小孔隙压缩系数动态变化的理论计算模型。

#### 4. 渗透率模型

渗透率是影响油藏渗流最主要的参数。在常规的油藏数值模拟中将渗透率视为常数处理,没有考虑油藏开采过程中岩土变形及孔隙体积变化对渗透率的影响,使数值模拟结果与实际情况有较大的误差。因此,本文以体积应变为基本变量,建立流固耦合作用下渗透率与岩土变形的关系式。

渗透率与体积应变的关系可以通过 Kozeny - Carman 方程导出。Kozeny - Carman (Kozeny,

1927; Carman, 1937, 1938, 1956) 基于毛细管束模型, 首次建立了渗透率与孔隙度、比表面、形状因子和迂曲度间的相互关系, 提出了渗透率方程:

$$k = \frac{\phi}{k_z S_p^2} \quad (28)$$

其中

$$S_p = \frac{A_s}{V_p} \quad k_z \approx 5 \quad (29)$$

Kozeny - Carman 方程虽然不是表达渗透率的最好形式, 但它为建立渗透率变化与岩土变形之间的关系提供了一种手段。

设初始状态( $p_0, T_0$ )的渗透率为:

$$k_0 = \frac{\phi_0}{k_z S_{p0}^2} \quad (30)$$

其中

$$S_{p0} = \frac{A_{s0}}{S_{p0}} \quad (31)$$

当由初始状态变化到状态( $p, T$ )时, 岩土总体积和单个颗粒的累计体积发生的变化分别为  $\Delta V_b$  和  $\Delta V_r$ , 颗粒表面积发生的变化为  $\Delta A_s$ 。假设岩土颗粒的体积和表面积的变化仅由热胀冷缩而引起, 并认为颗粒是球形的, 则可以计算出颗粒半径的变化, 进而求出表面积的变化, 即:

$$\Delta A_s = n \frac{8}{3} \pi r^2 \gamma \Delta T \quad (32)$$

(32) 式中假定: 颗粒具有均匀而恒定的初始半径, 且每单位孔隙体积中有  $n$  个颗粒。

表面积的增量  $\Delta A_s$ , 可用一个系数  $\beta$  来表示, 即:

$$A_s = A_{s0} (1 + \beta) \quad (33)$$

岩土颗粒体积的变化可以表示为:

$$\Delta V_s = V_s \gamma \Delta T \quad (34)$$

则岩土总体积的变化减去热膨胀项(即岩土颗粒体积的变化), 就是孔隙体积的变化:

$$\Delta V_p = \Delta V_b - \Delta V_r \quad (35)$$

因此, 新的孔隙度为:

$$\phi = \frac{V_p + (\Delta V_b - \Delta V_r)}{V_b + \Delta V_b} \quad (36)$$

新的比表面( $S_p$ )为:

$$S_p = \frac{A_{s0} (1 + \beta)}{V_p + (\Delta V_b - \Delta V_r)} \quad (37)$$

新的渗透率与原始渗透率的比值为:

$$\frac{k}{k_0} = \frac{\frac{\phi}{k_z S_p^2}}{\frac{\phi_0}{k_z S_{p0}^2}} = \frac{\phi S_{p0}^2}{\phi_0 S_p^2} \quad (38)$$

将(36)、(37)式代入(38)式并整理得:

$$\frac{k}{k_0} = \frac{V_p + \Delta V_p (V_p + \Delta V_p)^2 V_b S_{p0}^2}{V_b + \Delta V_b A_{s0}^2 (1 + \beta)^2 V_p V_p^2} \quad (39)$$

而总体积的变化可直接由体积应变得到,即

$$\Delta V_b = \varepsilon_v \Delta V_b \quad (40)$$

将(40)式代入(39)式得:

$$\frac{k}{k_0} = \frac{1}{1 + \Delta \varepsilon_v} \frac{1}{(1 + \beta)^2} \left( \frac{V_p + \Delta V_p}{V_p} \right)^2 \quad (41)$$

由(34)、(35)和(40)式得:

$$\Delta V_p = \varepsilon_v V_b - (V_b - V_p) \gamma \Delta T \quad (42)$$

因此,有

$$V_p + \Delta V_p = V_p (1 + \gamma \Delta T) + V_b (\varepsilon_v - \gamma \Delta T) \quad (43)$$

则

$$\frac{V_p + \Delta V_p}{V_p} = 1 + \frac{\varepsilon_v}{\phi_0} - \frac{\gamma \Delta T (1 - \phi_0)}{\phi_0} \quad (44)$$

将(44)式代入(41)式得:

$$\frac{k}{k_0} = \frac{1}{(1 + \Delta \varepsilon_v) (1 + \beta)^2} \left[ 1 + \frac{\varepsilon_v}{\phi_0} - \frac{\gamma \Delta T (1 - \phi_0)}{\phi_0} \right]^2 \quad (45)$$

考虑到表面积变化可以忽略,因而,  $\beta = 0$ , 那么(45)式简化为:

$$\frac{k}{k_0} = \frac{1}{1 + \Delta \varepsilon_v} \left[ 1 + \frac{\varepsilon_v}{\phi_0} - \frac{\gamma \Delta T (1 - \phi_0)}{\phi_0} \right]^2 \quad (46)$$

如果忽略整个过程的热效应,则可得到等温渗流过程的渗透率变化与体积应变的关系式:

$$\frac{k}{k_0} = \frac{1}{1 + \Delta \varepsilon_v} \left( 1 + \frac{\varepsilon_v}{\phi_0} \right)^2 \quad (47)$$

(47)式就是等温情况下计算渗透率动态变化的理论模型,为体积应变的函数,图2给出了(47)式表达的渗透率与体积应变的关系曲线。

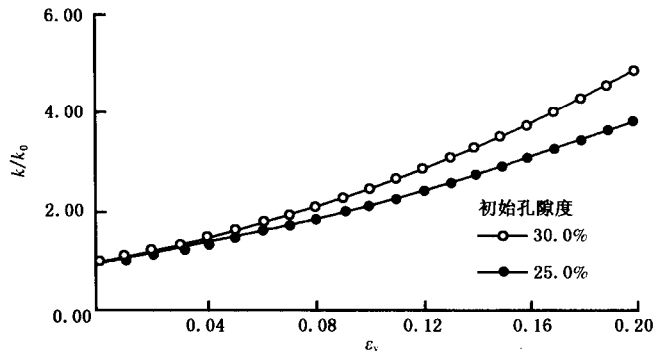


图2  $k/k_0$ 与体积应变的关系图

#### 四、计算实例比较

进行衰竭式开采模拟计算(结果见图3),计算实例分3种情况:

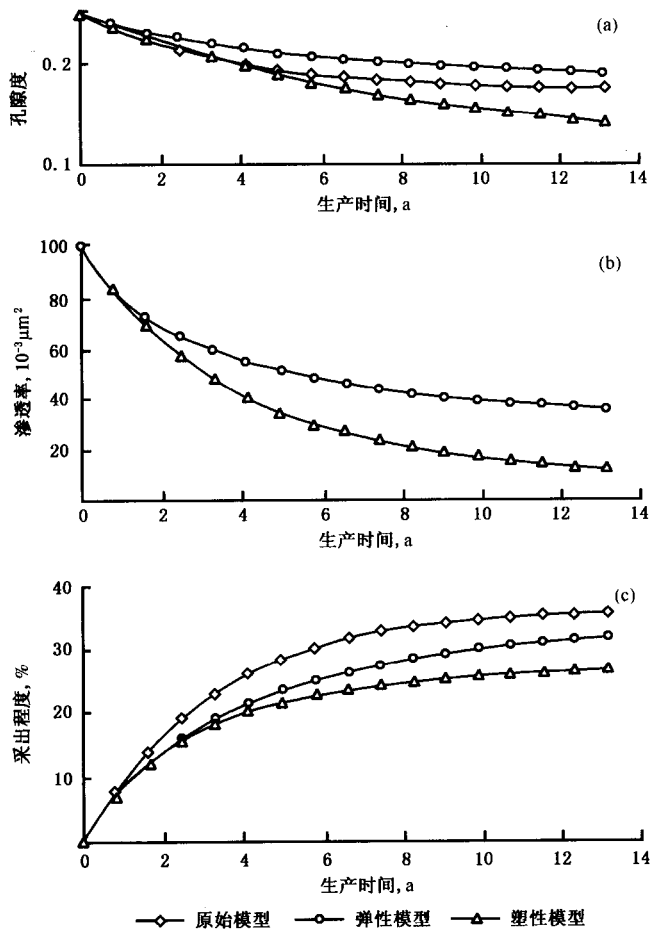


图3 参数与时间关系曲线

(a) 井点网格孔隙度与时间关系; (b) 井点网格渗透率与时间关系;  
(c) 井点网格采出程度与时间关系



(1) 按常规方法模拟,即孔隙度根据孔隙压缩系数随孔隙压力而变化,但将孔隙压缩系数和渗透率视为常数,因而基本上没有考虑流固耦合效应(原始模型);

(2) 考虑流固耦合效应,即孔隙度、孔隙压缩系数和渗透率均发生动态变化,但将多孔介质视为线弹性变形(弹性模型);

(3) 考虑流固耦合效应,即孔隙度、孔隙压缩系数和渗透率均发生动态变化,但将多孔介质视为弹塑性变形(塑性模型)。

从模拟结果可以看出,流固耦合效应对孔隙度和渗透率有较大的影响,其中弹塑性变形的耦合效应对孔隙度、渗透率的影响要比弹性变形的耦合效应对孔隙度、渗透率的影响大,因而流固耦合效应极大地影响了采出程度:原始模型的采出程度显然偏高,弹塑性变形比弹性变形的采出程度低。

## 五、结论

本文将渗流力学与岩土力学相结合,阐述了流固耦合油藏数值模拟的基本原理及其实现过程;根据体积应变的概念,导出了流固耦合油藏数值模拟求解所需的孔隙度、孔隙压缩系数及渗透率等物性参数动态模型,为流固耦合油藏数值模拟的实现提供了有效的途径。实例计算结果证明,在油藏开采过程中流固耦合效应强烈,对物性参数有很大的影响,并最终影响油藏的开采动态,因而在油藏数值模拟中流固耦合效应是不能忽视的。

## 符号说明

- $\phi$ ——孔隙度;
- $\sigma$ ——流体相(油、气、水);
- $S_a$ ——流体相  $a$  的饱和度;
- $\vec{\omega}_a, \vec{v}_s$ ——流体相  $a$  和岩土质点的绝对速度,  $m/s$ ;
- $\vec{\omega}_{ra}, \vec{v}_a$ ——流体相  $a$  的相对速度和达西速度,  $m/s$ ;
- $k$ ——油藏的绝对渗透率,  $mD$ ;
- $k_{ra}$ ——流体相  $a$  的相对渗透率;
- $\mu_a$ ——流体相  $a$  的黏度,  $mPa \cdot s$ ;
- $p_a$ ——流体相  $a$  的压力,  $Pa$ ;
- $\rho_a$ ——流体相  $a$  的密度,  $kg/m^3$ ;
- $g$ ——重力加速度,  $m/s^2$ ;
- $D$ ——标高,是基准面垂直方向深度(海拔),  $m$ ;
- $\vec{U}$ ——岩土质点的位移矢量,  $m$ ;
- $t$ ——时间,  $s$ ;
- $C_\phi$ ——孔隙压缩系数,  $1/Pa$ ;
- $I_1$ ——油藏应力第一不变量,  $Pa$ ;
- $T$ ——温度,  $K$ ;
- $[K]$ ——刚度矩阵;
- $\vec{u}$ ——结点位移,  $m$ ;