裂缝性低渗透油藏流-固耦合数值模拟

刘建军¹²⁾ 冯夏 E^{2})

(1)武汉工业学院多孔介质力学研究所 湖北 武汉 430023;

2) 中国科学院武汉岩土力学研究所 湖北 武汉 A30023)

摘 要 根据低渗裂缝性砂岩油藏的储层特征,建立适合裂缝性砂岩油藏渗流的等效连续介质模型,通过实验得出有效压力 改变对储层孔隙度、渗透率影响的规律,考虑低渗透油藏渗流时启动压力梯度和低渗储层的流。固耦合特性,将渗流力学与弹 塑性力学相结合,建立起适合低渗透油藏的流。固耦合渗流数学模型,并给出其数值解。在黑油模型和弹塑性有限元程序的基 础上编制了计算低渗透油藏流。固耦合渗流的计算软件。通过数值模拟和不考虑流。固耦合时的计算结果相比,可以看出低 渗油藏中流。固耦合效应十分明显。

关键词 裂缝性油藏 流-固耦合 渗流 数值模拟

Fluid-Solid Coupling Simulation of the Fractured Low-Permeability Oil Reservoir

LIU Jianjun^{1 2}) FENG Xiating²)

(1) Institute of Porous Media Mechanics, Wuhan Polytechnic University, Wuhan, Hubei A30023;
2) Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei A30071)

Abstract Based on features of the low permeable fracture sand stone reservoir ,the authors established the equivalent continuous model of fluid flow in the porous media. Through experimentation ,the relationship between porosity ,permeability and effective pressure was revealed. Using the porous flow theory and the elasto-plastic theory , the authors established the mathematical model for fluid-solid coupling flow in low permeability media. The model took into account the effect of TPG(Threshold Pressure Gradient). Then numerical solution of the model was given. The solution was based on the finite element method and the finite different method. Simulation software was remodeled on the black oil model and the elasto-plastic FEM program. Using the software , the authors simulated a low permeable reservoir. Comparing the result with that calculated by oil black model , it is found that the fluid-solid coupled effect is obvious.

Key words low permeability fluid-solid interaction threshold pressure gradient numerical simulation

1 引言

油气藏的开发过程是一个多相流体渗流与油藏 岩土变形动态耦合的过程。在油气开发的过程中, 一方面,由于油气藏的开采,储层孔隙流体压力的变 化,引起岩土骨架有效应力的变化,并导致岩土骨架 变形;另一方面,岩土骨架的变形,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、渗透 率、岩土的孔隙压缩等参数的改变,而这些改变反过 来又影响孔隙流体的渗流与开采。因此,在油气藏 的开发过程中,流体渗流与岩土变形是相互影响、相 互制约的,二者之间存在耦合效应。油藏流-固耦合 问题的研究是一个十分重要的课题,对油田开发具 有重要的指导意义。

Geertsma(1957)提出了储层多孔弹性理论,并 将孔隙压缩系数引入到油藏工程中,以此表示储层 流-固耦合效应所引起的孔隙体积的变化。Vaziri (1988)建立了一个基于非等温单相渗流和非线性弹 性变形的流-固耦合模型,并用有限元方法进行求 解。Settari(1989)建立了一维等温渗流和岩土变形 的流-固耦合模型。岩土变形模型为非线性弹性模 型,并利用 Mohr-Coulomb 准则来作为孔隙压力变

本文由国家自然科学基金项目(No. 10072073)资助。

第一作者 河建茂如据,1972 年生 副教授 ,主要从事渗流力学研究 ;E-mail :liujj0906@sina.com。

化引起剪应力变化是否导致岩土破裂的判据。1992 年,Settari 又将该模型改造为热采模型。Fung (1994)建立了一个二维等温渗流与岩土变形的流-固耦合模型,其岩土变形遵从双线性应力-应变规律 和剪胀模型,并利用控制体积有限元法进行求解。 1994年(Fung)将该模型扩展为热采模型,耦合模型 的解耦方法为显式交替求解方法。Tortike(1993) 建立了三维弹塑性变形、渗流、传热相耦合的模型, 并将其应用到热采中。

冉启全(1998)在其博士论文中对油藏流-固耦 合问题做了比较全面的研究,并通过数值模拟对一 五点井网进行了流-固耦合油藏数值模拟。徐曾和 (2000)通过数学推导给出了二维情况下单相流体渗 流和岩土弹塑性变形的解析解答。董平川(1998)利 用 Galerkin 有限元法,得到了完全耦合的有限元离 散方程,并将其应用于井壁应力和稳定分析中。黎 水泉(1999)研究了双重介质中的流-固耦合问题。 薛世峰(2000)建立了非混溶饱和两相渗流与孔隙介 质耦合作用的数学模型,并给出了数值解法。范学 平(2000)进行了低渗透压裂气藏压裂后流-固耦合 数学模拟研究。

纵观文献,有关裂缝性低渗透油藏流-固耦合渗 流的研究很少 而进行该方面的研究对于油气藏的 开采却十分必要(刘建军 2002)。这主要是因为:① 裂缝性低渗透油藏在中国石油工业中占据着越来越 重要的地位 在中国已探明未动用储量中这类油藏 所占的比重越来越大 ②大量试验研究表明 油藏流 体在低渗透储层中的渗流呈明显的非线性特征 其 渗流曲线偏离渗流达西定律 ③低渗透储层孔隙度、 渗透率的压力敏感性实验表明 原本孔隙度和渗透 率很低的岩石介质 在有效压力改变时 孔隙度和渗 透率变化较中、高渗透油田明显得多 即低渗透油田 中流-固耦合效应十分明显 ;④在油田开发中由于裂 缝流体压力的变化,可能导致裂缝开启、闭合甚至扩 展 从而导致储层渗透性能的变化。这类油藏在高 压注水中 油井暴性水淹现象便与裂缝的开度变化 以及扩展有关。

根据裂缝性低渗透油藏储层特征和渗流规律, 考虑开发过程中裂缝开度的变化,将渗流力学和岩 石力学相结合,建立了裂缝性低渗透油藏流-固耦合 数学模型,并给出其数值解法,通过数值模拟对某实 际裂缝性低渗透油藏区块进行了流-固耦合数值模 拟。 万方数据

2 孔渗特性的压力敏感性

大量的室内试验表明,随着有效压力(围压与孔 隙压力之差)的增加,岩心的渗透率和孔隙度均有不 同程度的下降,当有效压力降低后,岩心的渗透率和 孔隙度有所恢复,但不能恢复到原始数据,有效压力 降低对储层造成的伤害是永久性的;由于裂缝法向 刚度通常较岩石弹性模量小得多,裂缝的孔隙度和 渗透率变化幅度较基质大。

孔隙度随有效压力之间的关系可以用指数形式 表示:

$$\varphi = \varphi_0 e^{-c_p \sigma_e} \tag{1}$$

式中, φ 为测定孔隙度,单位为%; σ_e 为有效压力, 单位为 MPa; φ_0 为有效压力为 0 时的孔隙度; c_p 为 孔隙压缩系数,即单位压降下后单位岩石孔隙体积 的变化率,单位为 MPa。

基质渗透率与孔隙度之间的关系可表示为:

$$\frac{k}{k_0} = \left(\frac{\varphi}{\varphi_0}\right)^3 \tag{2}$$

式中 "k₀为储层初始渗透率。

岩体变形是由构成岩体的岩石变形和裂缝变形 叠加产生的 ,为了求出裂缝变形的位移 ,引入岩体模 量折合参数的概念:

$$R_m = \frac{E_{eq}}{E} \tag{3}$$

式中 ,E 为岩石的固有弹性模量 ; E_{eq} 为岩体的等效杨氏模量 ; R_m 为岩体模量折合系数。

当 R_m 等于 0 时,说明岩体刚度很小,岩体的变形都集中在裂缝上;当 0 小于 R_m 小于 1 时,说明岩体变形由裂缝变形和岩石变形共同组成,随 R_m 值的不同,按不同比例分配。

根据裂缝渗流平方公式,经推导可以得到应变 与裂缝渗透率耦合的方程为:

 $k_f = \frac{1}{12l} \{ b_f + [l(1 - R_m) + b_f] \Delta \epsilon_{\perp} \}$ (4) 式中 , k_f 为平行裂缝方向的渗透率 ; b_f 为裂缝宽度 ; $\Delta \epsilon_{\perp}$ 为垂直裂缝方向的应变 ;l为裂缝间距。

3 流-固耦合数学模型

3.1 裂缝性储层等效渗透率的计算方法

现考虑裂缝性低渗透油藏中的任一模拟区块, 测得基质岩心的渗透率为 km ,垂直裂缝方向的总宽 度为 bm 裂缝宽度为 bf 裂缝的线密度为 Ca。假定 存在一个等效的渗透系数,使得在同样的压力梯度 的作用下 ,传导相同的流量 Q ,则平行于裂缝方向 的等效渗透率可定义为

$$k^{p} = k_{m} + (k_{f} - k_{m})C_{d}b_{f}$$
 (5)

类似地可以导出对于垂直裂缝方向的等效渗透率
 k^n 为

$$k^{n} = \frac{k_{f}k_{m}}{k_{f} - (k_{f} - k_{m})C_{d}b_{f}}$$
(6)

由于 $k^p \neq k^n$,因此具有裂缝介质相当于主渗透系数 为 k^p 和 k^n 的各向异性介质 ,其主轴方向为沿裂缝 方向和与裂缝垂直方向 ,储层渗透率可表示为二阶 张量的形式。

对于裂缝性油藏油水两相渗流问题,利用等效 介质模型求解时,可以假设裂缝基质和裂缝在短时 间内达到渗吸平衡,即裂缝和基质毛管压力相等的 原则,将裂缝性储层视为层状介质来求得等效毛管 压力曲线和相对渗透率曲线。

3.2 低渗裂缝性砂岩油藏流-固耦合渗流的数学模型的建立

根据流体质量守恒方程及低渗透储层渗流时的 非线性特征,并考虑到孔隙体积变化引起的流体质 量的影响,裂缝性油藏等效参数代入,便得到裂缝性 低渗透油藏油水两相渗流的数学模型,主要包括油 水组分渗流方程、饱和度约束方程和毛管压力方程 等。

(1)油组分方程:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \left[\frac{k_{ij}k_{ro}}{B_{o}\mu_{o}} (\nabla P_{0} - \rho_{0}g \nabla D - TPG) \right] + \\ \phi \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S_{o}}{B_{o}} \right) + \frac{S_{o}(1 - \varphi_{0})}{B_{o}(1 + \varepsilon_{v})^{2}} \frac{\partial \varepsilon_{v}}{\partial t} + \frac{q_{o}}{\rho_{os}} = 0 \\ \langle \nabla \cdot \left[\frac{k_{ij}k_{rw}}{B_{w}\mu_{w}} (\nabla P_{w} - \rho_{w}g \nabla D - TPG) \right] + (7) \\ \varphi \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S_{w}}{B_{w}} + \frac{S_{w}(1 - \varphi_{0})}{B_{w}(1 + \varepsilon_{v})^{2}} \frac{\partial \varepsilon_{v}}{\partial t} + \frac{q_{w}}{\rho_{ws}} = 0 \\ S_{o} + S_{w} = 1 \\ P_{cow} = P_{o} - P_{w} \end{cases} \end{cases}$$

式中 : k_{ij} 为各向异性绝对渗透率 ;B 为体积系数 ;P为流体压力 ; μ 为粘度 ; k_r 为相对渗透率 ;S 为饱和 度 ;D 为海拔深度 ; ρ 为密度 ;g 为重力加速度 ; ρ_{os} 为标况下油的密度 ; q_o 为标况下油的产量 ,o 代表 油 ; q_w 为标况下水的产量 ,w 代表水 ;TPG 为低渗 透介质渗流时的启动压力梯度 ; ϵ_V 为体积应变 , ϵ_V 为 $\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$ 。

3.3 流-固耦合渗流油藏岩土变形场方程

将油藏著知视为弹塑性介质,根据弹塑性力学

的有关理论,可以得到油藏岩土变形场数学方程。 变形场方程包括平衡方程、几何方程和本构方程:

$$\begin{cases} \sum_{ij \ j} + (\alpha P \delta_{ij})_{j} + f_{i} = 0 \\ \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i \ j} + u_{j \ i}) \\ \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i \ j} + u_{j \ i}) \end{cases}$$
(8)

式中 : σ_{ij} 为有效应力张量 ; α 为 Biot 系数 ; δ_{ij} 为 Kronecker 函数 ; f_i 为体积力载荷 ; ϵ_{ij} 为应变张量 ;u 为 位移 ; $d\sigma_{ii}$ 为有效应力增量 ;P 为孔隙压力。

以上方程构成了低渗透储层流-固耦合渗流的 数学模型。对于特定问题,补充其相应的定解条件 后,便得到完整的流-固耦合渗流数学模型。

4 流-固耦合模拟实例

对于以上的数学模型,岩土变形场的求解采用 有限元方法计算,选用空间八节点等参数单元进行 离散,弹塑性处理采用初应力法,孔隙压力 P 作为 均布体积力处理。渗流模型的求解采用常规的 IM-PES 差分解法,即隐式求解压力方程,显式求解饱和 度。模型解耦的总体方案是显式迭代求解。根据上 面的数学模型及解法,编制了计算低渗透油藏流-固 耦合渗流的程序。

利用所编制的裂缝性低渗透油藏流-固耦合数 值模拟软件,对大庆油田卯二区块开发过程中的孔 隙度和渗透率变化以及开发指标进行了数值模拟, 并和不考虑变形时的刚性模型计算的结果进行了对 比。数值模拟结果表明,在开采过程中,由于孔隙压 力的变化导致孔隙度、渗透率不断发生变化。

考虑耦合时油藏平均压力下降慢,采出程度较 刚性黑油模型低。通过对孔隙度、渗透率的变化情 况的计算还可以看出,开发过程中孔隙度和渗透率 总是在变化的,在开发第10年由于储层流体压力的 降低,孔隙度和渗透率都有下降,渗透率下降的幅度 比较大。原因正是开发过程中储层流体压力降低导 致引起裂缝闭合和孔隙压密所造成的。因此,传统 上油藏模拟时将储层视为刚性不太合理。深入进行 低渗裂缝性油藏流-固耦合渗流研究不仅具有重要 的理论价值,而且具有十分重要的实际应用价值。

参考文献

董平川 徐小荷.1998.油水两相流-固耦合渗流的数学模型.石油勘 探与开发,25(5)93~96.

范学平 李秀生,张士诚.2000.低渗透气藏整体压裂流-固耦合数学

模拟.石油勘探与开发 27(1):76~79.

- 黎水泉,徐秉业.1999.双重介质裂缝型油气藏油水两相流动与固体 变形耦合数学模型.天然气工业,19(4)43~45.
- 刘建军 刘先贵,胡雅雅.2002.低渗透储层流-固耦合渗流规律研究. 岩石力学与工程学报,20(1):46~50.
- 冉启全,顾小芸.1998.油藏渗流与应力耦合分析.岩土工程学报,20 (2) 69~73.
- 徐曾和,徐小荷.2000. 二维应力场下承压地层中渗流的液-固耦合 问题.岩石力学与工程学报,18(6):645~650.
- 薛世峰, 全兴华. 2002. 地下流-固耦合理论的研究进展及应用. 石油 大学学报 24(2):109~114.
- Fung L. 1994. Coupled geo-mechanical thermal simulation for deforming heavy-oil reservoirs. JCPT (4) 22~28.

- Geertsma J. 1957. A remark on the analogy between themo-elasticity and the elasticity of saturated porous media. J. Mech. Phys. Solids. (6): 13~16.
- Lewis R W , Sukirman Y. 1993. Finite element modeling of three-phase flow in deforming saturated oil reservoirs. Int. J. Num. Anal. Methods Geomech (17) $577{\sim}598.$
- Settari A, Kry P R, Yee C T. 1989. Coupling of fluid flow and soil behaviour to model injection into uncemented oil sands. JCPT, 28 (1) 81~92.
- Tortike W S , Farouq Ali S M. 1993. Reservoir simulation integrated with geo-mechanics. JCPT (5) $28 \sim 37$.
- Vaziri H.H. 1988. Coupled fluid flow and stress analysis of oil sand subject to heating. JCPT , 27(5) 84~91.