

多井条件下煤层气不定常渗流问题的数值研究

刘曰武, 张大为, 陈慧新, 官欣

(中国科学院力学研究所工程科学部, 北京 100080)

摘要: 建立了在多井条件下考虑井筒储存和表皮效应的煤层气不定常渗流模型。对于不同外边界如圆形、矩形以及任意四边形煤层中存在不同源汇情况下的不稳定渗流问题进行了求解, 得到了该问题在不同时间下的压力场分布, 并对压力扩展过程进行了分析讨论, 认为压力传播过程在早期是不受边界形状和边界性质影响的, 在压力传播到边界之前源汇性质对压力传播过程有明显影响, 在汇与汇之间不存在等压线, 相当于封闭边界的情况; 在源与源之间存在等压线, 相当于定压边界的情况。

关键词: 采矿工程; 煤层气; 不定常流动; 渗流; 数值模拟; 多井条件

中图分类号: TE 319.56; TD 713 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6915(2005)10-1679-08

NUMERICAL STUDY ON COALBED METHANE TRANSIENT SEEPAGE FLOW WITH MULTI-WELLS

LIU Yue-wu, ZHANG Da-wei, CHEN Hui-xin, GONG Xin

(Division of Engineering Science, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: A new coalbed methane transient seepage flow model with multi-wells is developed by considering the wellbore storage and skin effect. The problem is solved for the different outer boundaries, such as the circular, the rectangular and the arbitrary quadrilateral boundaries, coalbed boundaries with varied sinks and sources in the calculation region. The pressure distributions are obtained at different times in the model regions. From the pressure propagation process, it shows that the shape and properties of boundaries do not affect the pressure propagation in the early stage; and the sinks and sources strongly affect the pressure propagation before the pressure wave meets any kind of boundaries. The results also show that there is no pressure contour line between two sinks, which means that there is a streamline as a closed boundary does. For two sources, there must be a pressure contour line between them, which means that there is a streamline as a constant pressure boundary does. All these results supply fundamental theories to the reasonable development of coalbed reservoir.

Key words: mining engineering; coalbed methane; transient flow; seepage flow; numerical simulation; multi-well condition

1 引言

考虑多源汇问题的不定常渗流一直是油气藏工程师所关心的问题, 这一问题是与油气田的开采有着密切关系的。在特殊气藏煤层气藏的开采过程

中, 为了了解煤层气的开发动态, 人们往往要进行地层测试, 通过地层测试资料的分析得到地层参数的变化, 以便制定合理开发煤层气的决策。这一问题都归结于通过求解地下渗流场反推地质体的特征参数问题。在过去很长的一段时间内, 人们只是利用单一源汇不稳定渗流理论或多源汇定常渗流理论

收稿日期: 2004-02-03; 修回日期: 2004-03-24

作者简介: 刘曰武(1965-), 男, 博士, 1988年毕业于大庆石油学院油藏工程系, 现任中国科学院力学研究所副研究员, 主要从事渗流力学、水文地质及油气藏工程等方面的研究工作。E-mail: lywu@imech.ac.cn.

对这一问题进行求解^[1~3]。

煤层气是一种洁净高效的环保型天然气能源。在国外^[4~5]，美国的煤层气开采始于 1932 年，其在弗吉尼亚州的 Big Run 气田的石炭纪煤层中开发甲烷。20 世纪 70 年代，为了克服能源危机，美国开展了一系列煤层气基础研究项目，直接研究煤层气相关的各种问题，并打了几口试验井。到了 20 世纪 80 年代已钻煤层气井 1 000 余口，形成一定的生产规模，从此就有了煤层气工业。20 世纪 90 年代美国已有 10 000 余口煤层气井，其中高产井 6 700 余口，年产煤层气 $30 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。我国的煤层气开采是从 1952 年开始的^[6~7]。首先是建立了煤矿的瓦斯抽放系统，将抽放出的煤层气用作民用燃料、发电以及生产甲醛、碳黑等化工产品的原料。我国的煤层气研究是在“六五”期间开始起步的，但进展一直非常缓慢，直到 1996 年 10 月以后才有所改观。1998 年国家基金第一次赞助了煤层气的研究项目。尽管我国从 20 世纪 80 年代以后大量进行了煤层气田的勘探工作，如文[8]建立了描述裂缝中气水两相渗流及微孔中非平衡吸附气体解吸扩散过程的数学模型，考虑了气体从微孔到裂缝中的扩散与裂缝中气相渗流的耦合作用，并用有限差分方法进行了解。文[9]研究了煤层气井排水降压解吸产气机理，通过煤层气藏数学模拟给出了矩形煤层中单井排水压降漏斗和解吸气锥的形态。文[10~12]的研究主要集中在解吸和吸附条件下煤层气渗流规律的试验研究方面。文[13]建立了煤层气非饱和水流阶段非定常渗流问题的流固耦合数学模型，采用摄动法和积分变换法对强非线性一维数学模型进行解析求解，分析了单井在无限大煤层中地层压力随饱和度 S 及时间 t 变化的规律和气相及耦合作用的影响。文[14]的研究主要集中在微观吸附和解吸机理方面。但目前国内煤层气的研究与国外还有相当大的差距。尤其是在多井存在条件下，煤层气藏中渗流场的变化规律研究方面的工作很少。

近些年来，在煤层气的渗流机理的主要研究进展包括以下几个方面：

(1) 文[15]首先总结和概括出了煤层解吸和吸附机理。(2) 1986 年，文[16]首先将解吸机理应用到煤层气井的试井分析当中。其利用 Langmiur 等温吸附机理将微观解吸和宏观流动结合起来，给出了不考虑井储表皮效应的无限大煤层中煤层气井的试

井分析模型，计算了不稳定试井的早期压力曲线，讨论了等温吸附影响。(3) 文[17]将均质地层模型发展为双重介质模型，考虑气体在煤层骨架微孔隙中的扩散遵从 Fick 的扩散原理，吸附气采用 Henry 等温吸附来描述。这样就克服了 Langmiur 描述中非线性处理的困难，使得方程的求解简单化了。同样也计算出了无限大煤层中总产量下的不稳定试井的早期理论曲线。(4) 文[18]最先讨论了考虑气水两相流的流动的煤层气试井理论，采用均质径向流模型，在假定气体解吸瞬间完成的前提条件下，将气水两相的作用同时考虑在拟压力函数相中，对试井理论模型进行求解。(5) 文[19]用 Green 元方法解决了常规油气藏外边界影响问题。(6) 文[20]利用数值方法解决了圆形地层中任意井位的不稳定渗流的数值试井理论问题。

本文在此基础上，建立井筒储存和表皮效应的影响的煤层气井多井不稳定渗流理论模型，考虑了不同外边界形状和性质的影响，给出了不同边界条件下(圆形、矩形以及任意四边形煤层)的压力场分布和压力发展过程，得到了计算问题不同时间下的压力场分布，并对压力扩展过程进行了分析讨论。

2 物理模型和数学模型的描述

(1) 物理模型描述

由于煤层气在地层中的流动状态较为复杂，因此，在建立煤层气不定常渗流模型时，需要进行以下假设：

煤层介质空间理想化：根据煤层煤块的特征，将煤层简化为理想化模型，如图 1 所示。其中正方体表示基质，正方体之间的空隙表示割理系统(面割理和端割理)。

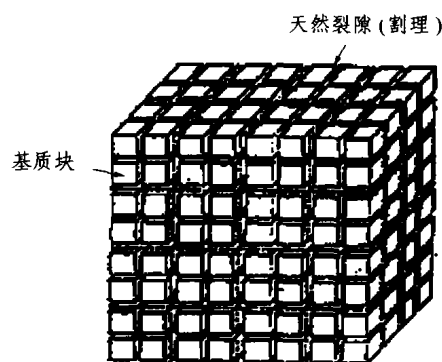


图 1 煤层的理想化模型

Fig.1 Ideal model of the coalbed

煤层性质描述: 煤层微可压缩, 基质均质各向同性, 割理系统也均质各向同性。

煤层环境的假设: 由于测试过程较整个煤层气的开发过程来讲, 是一个短暂的过程, 因此, 将煤层中的流动看作是等温流动, 在此期间的温度场为等温温度场, 不考虑温度变化对流动的影响。

煤层气在煤层中的描述: 在原始状态下, 煤层的割理系统含游离气, 其余气体都以吸附气的形式储集在煤基质的内表面。自由气作为真实气体。

由于煤基质中的直径小, 水不能进入, 仅含气。

煤层中水介质的描述: 水是微可压缩的流体, 忽略水中溶解的气量。

流体的运动规律: 水和气体在割理系统中的流动服从达西定律, 忽略重力作用。在煤基质中气体的扩散过程为非平衡拟稳态过程, 服从 Fick 第一定律。流体的流动的区域和基本问题的描述示意图如图 2 所示。

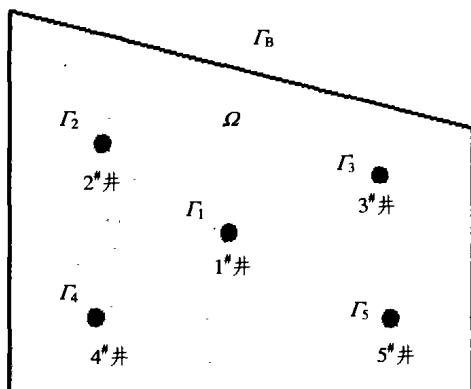


图 2 研究问题的示意图
Fig.2 Sketch of the research problem

(2) 数学模型描述

在给出数学模型前先定义一系列无量纲。其中有量纲量符号为: 煤层渗透率 $k(\mu\text{m}^2)$; 煤层孔隙度 ϕ ; 综合压缩系数 $C_1(\text{m}^3/\text{MPa})$; 距离 $x, y(\text{m})$; 有效井径 $r_{we} = r_w e^{-s}$ (m); 标准温度 $T_{sc}(\text{K})$; 标准流量 $q_{sc}(10^4 \text{m}^3/\text{d})$; 体积浓度 $V(\text{m}^3/\text{m}^3)$; 流量 $q(10^4 \text{m}^3/\text{d})$; 煤层厚度 $h(\text{m})$; 初始体积浓度 $V_{ic}(\text{m}^3/\text{m}^3)$; 井储系数 $c(\text{m}^3/\text{MPa})$; 气体偏差因子 Z ; 压力 $p(\text{MPa})$; 源汇中心位置 $(x_i, y_i)(\text{m})$; 井筒半径 $r_w(\text{m})$; 表皮系数 S ; 基质块半径 $r_a(\text{m})$; 黏度 $\mu(\text{MPa} \cdot \text{s})$; 标准压力 $p_{sc}(\text{MPa})$; 平衡体积浓度 $V_E(\text{m}^3/\text{m}^3)$ 。基质块半径 r_a 是煤层气数学模型概化时, 所用的煤块的正方体模型的体积的一个换算

量, 一般取其平均块半径值为 $0.001 \sim 0.01 \text{ m}$ 。则可定义无量纲量: 无量纲时间 $t_D = 3.6kt/(\phi\mu C_1 r_w^2)$, 体积浓度 $V_D = V - V_{ic}$, 无量纲井储系数 $C_D = 0.159 2c/(\phi C_1 h r_w^2)$, 距离 $x_D = x/r_w, y_D = y/r_w$, 半径 $r_{Da} = r_a/r_w$, 有效井径时间 $T_D = t_D/C_D$, 压力 $p_D = (p_{ic}^2 - p^2)/(p_{ic}^2 q_D)$, 流量 $q_D = \beta T_{sc} \mu Z q_{sc} / (k h p_{ic}^2)$, 窜流系数 $\lambda = \alpha k \tau / (6 A r_w^2)$, 吸附时间 $\tau = R^2 / (\pi^2 D)$, 储能系数 $\omega = \phi \mu c_g / A, A = \phi \mu c_g + 2 p_{sc} T_{sc} \mu Z / (T_{sc} q_D p_{ic}^2)$ 。

基于以上定义, 给出流动控制方程:

$$\frac{\partial^2 p_{Da}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p_{Da}}{\partial y^2} = \frac{\omega}{C_D e^{2S}} \frac{\partial p_{Da}}{\partial T_D} - \frac{1}{C_D e^{2S}} \cdot \frac{1-\omega}{\lambda} (V_E - V_D - V_{ic}) \quad (x_D, y_D \in \Omega) \quad (1)$$

初始条件:

$$p_{Da}(x_D, y_D, 0) = 0 \quad (x_D, y_D \in \Omega) \quad (2)$$

各井点内边界条件:

$$\left(\frac{\partial p_{Da}}{\partial x_D} \cos \theta + \frac{\partial p_{Da}}{\partial y_D} \sin \theta \right) \Big|_{\Gamma_i} = -1 + \frac{dp_{wDa}}{dT_D} \quad (x_D, y_D \in \Gamma_i) \quad (3)$$

其中,

$$\Gamma_i \in (\sqrt{(x_D - x_{iD})^2 + (y_D - x_{iD})^2} = 1)$$

无限大外边界:

$$p_{Da}(x_D, y_D, T_D) = 0 \quad (x_D \rightarrow \infty, y_D \rightarrow \infty) \quad (4)$$

封闭边界:

$$\frac{\partial p_{Da}(x_D, y_D, T_D)}{\partial n} \Big|_{\Gamma_B} = 0 \quad (x_D, y_D \in \Gamma_B) \quad (5)$$

定压边界:

$$p_{Da}(x_D, y_D, T_D) \Big|_{\Gamma_P} = 0 \quad (x_D, y_D \in \Gamma_P) \quad (6)$$

3 煤层气井有效井径模型有限元方程

利用伽辽金有限元方法, 取权等于插值函数 φ_i , 并令在单元整个区域上加权余量的积分为 0, 则有

$$\iint_A \varphi_i^e \left[\frac{\partial^2 p_{Da}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p_{Da}}{\partial y^2} - \frac{1}{C_D e^{2S}} \omega \frac{\partial p_{Da}}{\partial T_D} + \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1-\omega}{\lambda} (V_E - V_D - V_{ic}) \right] dA = 0 \quad i = 1, 2, 3 \quad (7)$$

式中: φ_i^e 为单元插值函数, 取线性插值 $\varphi_i^e = a_i +$

$b_i x + c_i y$ ($i = 1, 2, 3$); $p_{ba}^e = p_1^e \varphi_1^e + p_2^e \varphi_2^e + p_3^e \varphi_3^e$ 为单元压力, p_1^e, p_2^e, p_3^e 为单元 3 个结点的压力值; A 为三角形单元的面积, 有

$$A = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \end{vmatrix} = \frac{1}{2} (x_2 y_3 + x_1 y_2 + x_3 y_1 - x_2 y_1 - x_3 y_2 - x_1 y_3)$$

于是三角形单元的 3 个结点的压力值 p_1^e, p_2^e, p_3^e 满足单元方程组:

$$\begin{aligned} & A \left(b_1^2 + c_1^2 + \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{\Delta t_D} \frac{\omega}{6} \right) p_1^{e, n+1} + \\ & A \left(b_1 b_2 + c_1 c_2 + \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{\Delta t_D} \frac{\omega}{12} \right) p_2^{e, n+1} + \\ & A \left(b_1 b_3 + c_1 c_3 + \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{\Delta t_D} \frac{\omega}{12} \right) p_3^{e, n+1} = \\ & \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{\Delta t_D} \frac{A \omega}{6} p_1^{e, n} + \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{\Delta t_D} \cdot \\ & \frac{A \omega}{12} p_2^{e, n} + \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{\Delta t_D} \frac{A \omega}{12} p_3^{e, n} - \\ & \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1-\omega}{\lambda} (V_E - V_D - V_{ic}) \frac{A^e}{3} - \frac{L}{2} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & A \left(b_2 b_2 + c_2 c_2 + \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{\Delta t_D} \frac{\omega}{12} \right) p_1^{e, n+1} + \\ & A \left(b_2^2 + c_2^2 + \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{\Delta t_D} \frac{\omega}{12} \right) p_2^{e, n+1} + \\ & A \left(b_2 b_3 + c_2 c_3 + \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{\Delta t_D} \frac{\omega}{12} \right) p_3^{e, n+1} = \\ & \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{\Delta t_D} \frac{A \omega}{12} p_1^{e, n} + \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{\Delta t_D} \frac{A \omega}{6} p_2^{e, n} + \\ & \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{\Delta t_D} \frac{A \omega}{12} p_3^{e, n} + \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1-\omega}{\lambda} (V_E - V_D - V_{ic}) \cdot \\ & \frac{A^e}{3} - \frac{L}{2} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & \left(b_1 b_3 + c_1 c_3 + \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{\Delta t_D} \frac{\omega}{12} \right) p_1^{e, n+1} + \\ & A \left(b_2 b_3 + c_2 c_3 + \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{\Delta t_D} \frac{\omega}{12} \right) p_3^{e, n+1} + \\ & A \left(b_3^2 + c_3^2 + \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{\Delta t_D} \frac{\omega}{6} \right) p_2^{e, n+1} = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{\Delta t_D} \frac{A \omega}{12} p_1^{e, n} + \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{\Delta t_D} \frac{A \omega}{12} p_2^{e, n} + \\ & \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{\Delta t_D} \frac{A \omega}{6} p_3^{e, n} - \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1-\omega}{\lambda} (V_E - V_D - V_{ic}) \cdot \\ & \frac{A^e}{3} - \frac{L}{2} \end{aligned} \quad (10)$$

式(8)~(10)中的最后一项只有当三角形的 2 个结点落在边界上时才存在。初始条件取 $p_D = 0$, 引入外边界条件控制就可以进行计算。最后由单元方程组组装系统方程组。求解系统方程组, 即可得到任意网格点(x, y)上 $n+1$ 时刻的压力值 $p(x, y)$ 。

4 有限元网格划分及计算结果

根据文[21, 22]所提供的方法, 类似于文[20]对所研究的煤气层绘制成如图 3 所示的网格。笔者还计算了矩形、任意四边形煤气层在不同外边界性质(定压/封闭/无限大)、不同井性质(源/汇)情况下的多井影响的不稳定渗流问题。为了明确描述煤层中的压力传播过程, 在压力传播发展过程的早期和晚期分别选取无量纲时间 $T_D = 316.23$ 和 $T_D = 10^9$ 时的压力传播图来说明压力传播的特点。选取 $T_D = 316.23$ 的原因是此时压力传播已经有一定的范围, 如果选取得无量纲时间值较小则压力过程发展范围太小, 较难得到清晰图像。选取 $T_D = 10^9$ 的原因在于当 $T_D > 10^9$ 后压力传播变化趋于拟稳定状态, 能够较全面地描述地层中的压力分布状态。

4.1 两井在圆形定压煤层中的压力发展过程

对于单井在圆形地层中任意位置不稳定渗流问题, 已经研究得较为清楚了。选择圆形定压煤层中的 2 口生产井(两汇)有 3 个目的: 一是考察早期不稳定流动是否受源汇相互作用的影响; 二是考察压力传播较长时间时压力波的传播是否具有趋圆效应; 三是考察两汇之间的相互作用, 即在某一条流线上是否形成类似于封闭边界的不流动线。计算结果如图 4 所示, 图中的中心井和邻井都为生产井。

4.2 三井在矩形封闭煤层中时的压力发展过程

选择矩形封闭煤层中的 2 口生产井(两汇)和一口注入井(源)有 2 个目的: 一是考察源汇之间和汇汇之间的相互作用以及多源汇(这里只有两汇一源)同时存在时压力波传播所受到的影响和压力场的分布状况; 二是考察封闭边界对压力场的影响, 主要是压力等值线与封闭边界之间的关系, 即考察

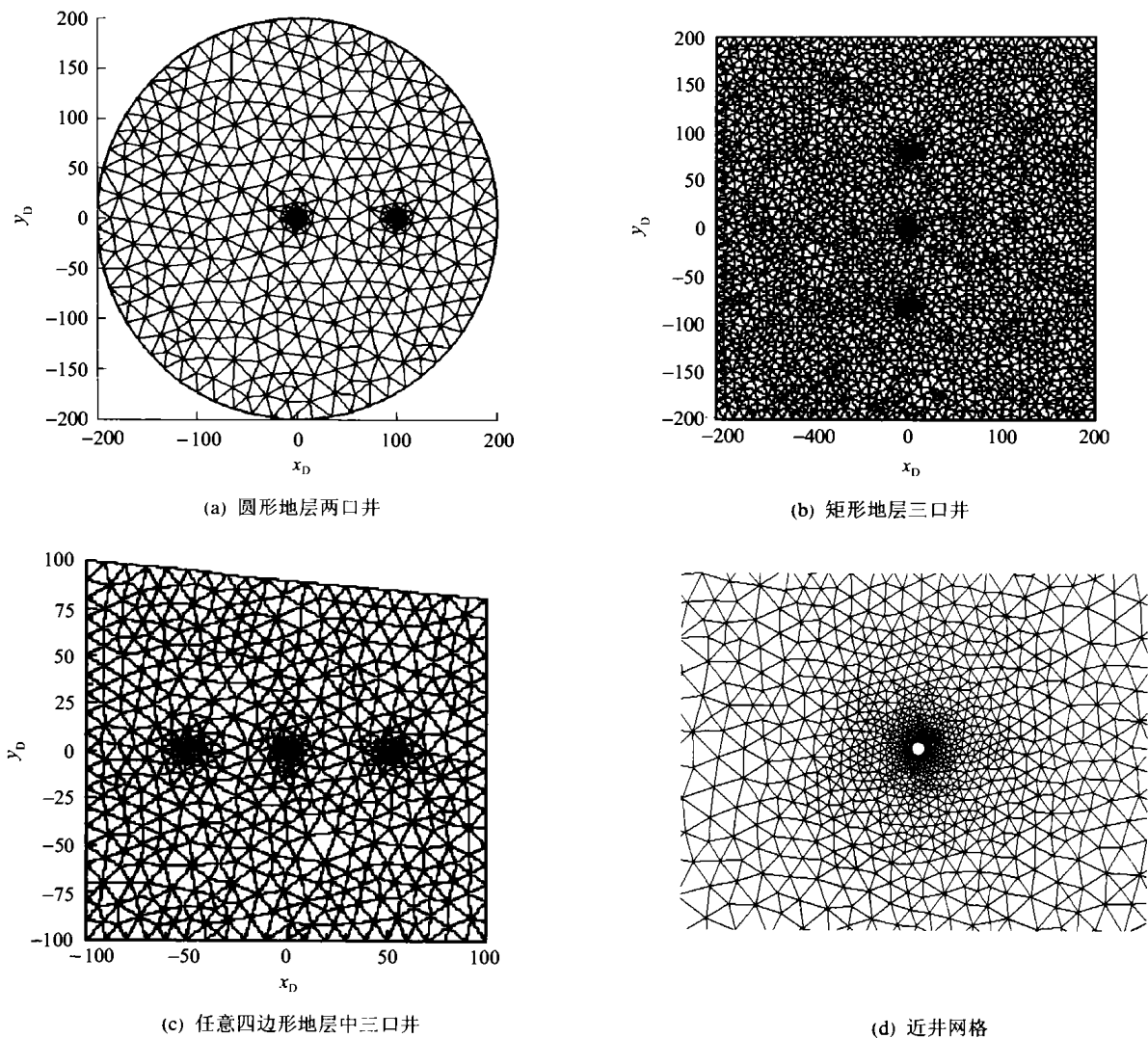


图 3 所研究的煤层气层绘制成的网格图

Fig.3 Meshes diagram of the research problem

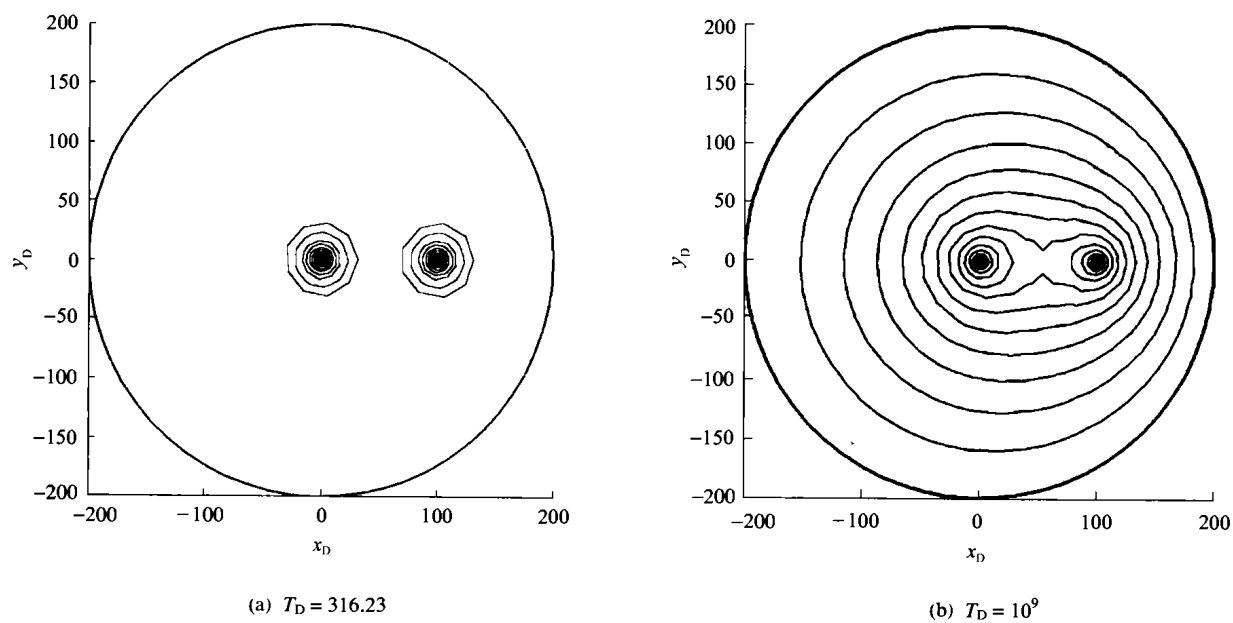


图 4 两井在圆形定压煤层中的压力传播发展过程图

Fig.4 Pressure propagation process in the circular coalbed of constant-pressure boundaries with 2 wells

计算所得到的压力等值线是否与矩形封闭边界的各个边垂直。计算结果如图 5 所示。图中的上邻井和中心井为生产井，下邻井为注水井。

4.3 三井在矩形定压煤层中的压力发展过程

选择矩形定压煤层中的 2 口生产井(两汇)和一口注入井(一源)的目的是为了考察定压边界对压力场的影响，主要是压力等值线与封闭边界之间的关系，即考察计算所得到的压力等值线是否与矩形定压边界的各个边平行。计算结果如图 6 所示。图中的上邻井和中心井为生产井，下邻井为注水井。

4.4 三井在任意四边形封闭煤层中的压力发展过程

选择任意四边形封闭煤层中的 2 口生产井(两汇)和一口注入井(一源)的目的是为了考察当边界为不规则的线性组合边界时，不规则的线性边界对压力场的影响，主要是考察计算所得到的压力等值线是否与矩形封闭边界的各个边垂直。计算结果如图 7 所示。图中右邻井和中心井为生产井，左邻井为注水井。

5 计算结果分析和讨论

(1) 从图 4 中可以看出：在煤层中的不稳定渗

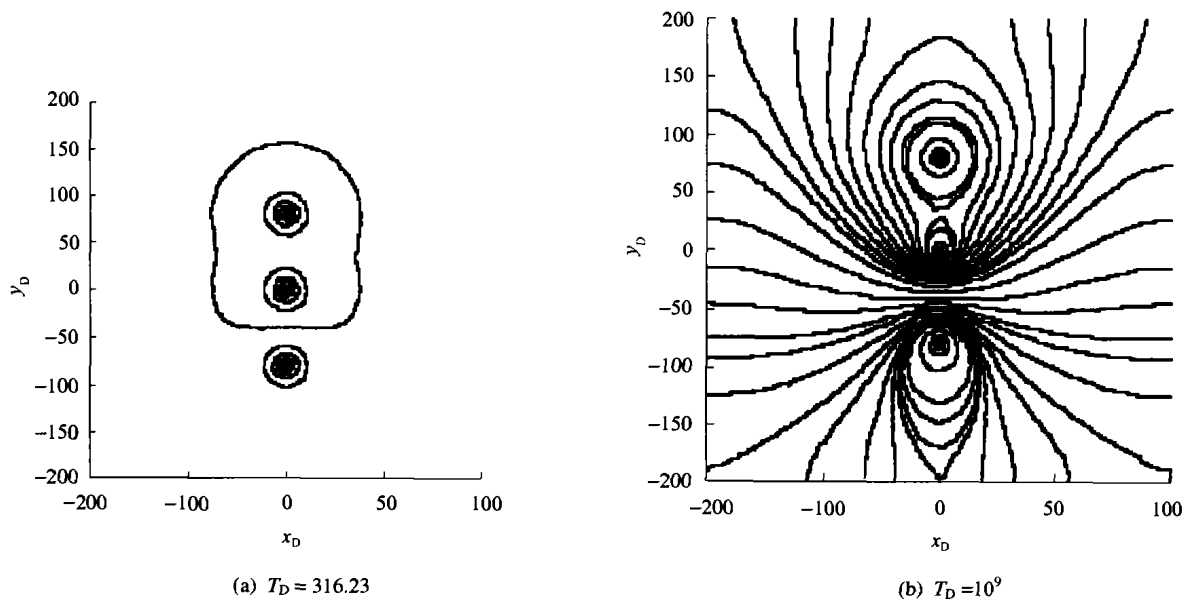


图 5 三井在矩形封闭煤层中的压力传播发展过程

Fig.5 Pressure propagation process in the rectangular coalbed of closed boundaries with 3 wells

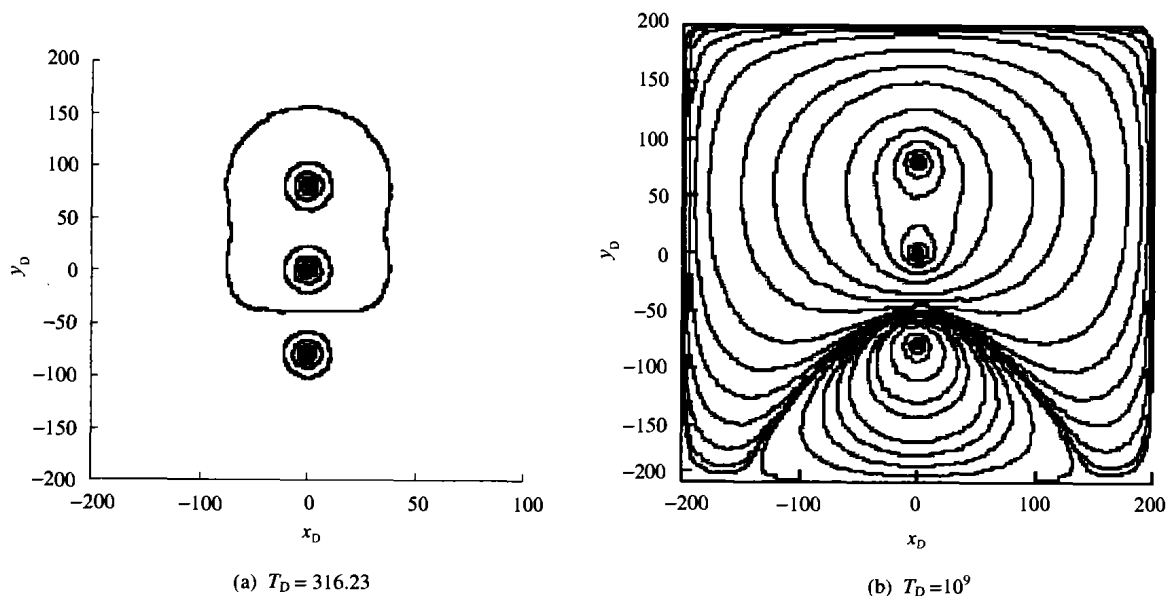


图 6 三井矩形定压煤层中的压力传播发展过程

Fig.6 Pressure propagation process in the rectangular coalbed of constant-pressure boundaries with 3 wells

流早期,直至时间达到 $T_D = 316.23$ 时,两汇附近的流动仍然是独立的径向流动,没有受到相邻汇的影响,也没有受到边界形状和边界性质的影响。当时间继续增加压力波的传播受到相邻汇的影响,在两汇之间没有垂直两汇连线的等压线,说明两汇之间有一条流线是类似于封闭边界的不流动线。当压力波传播时间很长时,从压力等值线图可以看出压力波的传播具有趋圆效应,定压边界同时起到了积极的作用。

(2) 从图 5~7 中的 $T_D = 316.23$ 的情形可以看出:在煤层中的不稳定渗流早期,无论是源还是汇,它们附近的流动仍然是独立的径向流动,没有受到相邻汇的影响,也没有受到边界形状和边界性质的影响。还可以看出:在源和汇之间出现了一条垂直

于源汇中心连线的压力等值线,这就说明这条垂直连线是一条类似于定压边界的流体边界线。

(3) 从图 4, 6 中的 $T_D = 10^9$ 的情形可以看出:无论定压边界的形状如何,压力等值线都有完全平行于边界的趋势。

(4) 从图 5, 7 中的 $T_D = 10^9$ 的情形可以看出:无论封闭边界的形状如何,压力等值线都有完全垂直于边界的趋势。

(5) 从图 4~7 中的 $T_D = 10^9$ 的情形可以看出:在源和汇之间的垂直于源汇中心连线的压力等值线更加明显,这就进一步说明了这条垂直连线是一条类似于定压边界的流体边界线。

6 结 论

建立了在多井条件下考虑井筒储存和表皮效应的煤层气不定常渗流模型。对于不同外边界如圆形、矩形以及任意四边形煤层中存在不同源汇情况下的不稳定渗流问题进行了求解,得到了该问题在不同时间下的压力场分布,并对压力扩展过程进行了分析讨论,认为压力传播过程在早期是不受边界形状和边界性质影响的,在压力传播到边界之前源汇性质对压力传播过程有明显影响,在汇与汇之间不存在等压线,相当于封闭边界的情况:在源与源之间存在等压线,相当于定压边界的情况。这些问题都是目前的解析解和半解析解所难以解决的。文中所得到的结论将为合理开发煤层气藏提供了基础理论依据。

参考文献(References):

- [1] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999.(Kong Xiangyan. Advanced Mechanics of Fluids in Porous Media[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1999.(in Chinese))
- [2] Bayles G A, Reznik A A. Pressure transient analysis of methane production from coal beds: an analytical approach[R]. SPE 15226, 1986.
- [3] Saulsberry J L, A new low cost method of performing well tests in under pressured coal seams[R]. SPE 9366, 1993.
- [4] Rightmire C T, Coalbed methane resource[A]. In: Coalbed Methane Resource of the United States[C]. [s. l.]: American Association of Petroleum Geologists Explorer, Studies in Geology, 1984. 1 - 13.
- [5] Jurich D, Adams M A. Geologic overview coal and coalbed methane resources of Taton Mesa region, Colorado and New Mexico[A]. In:

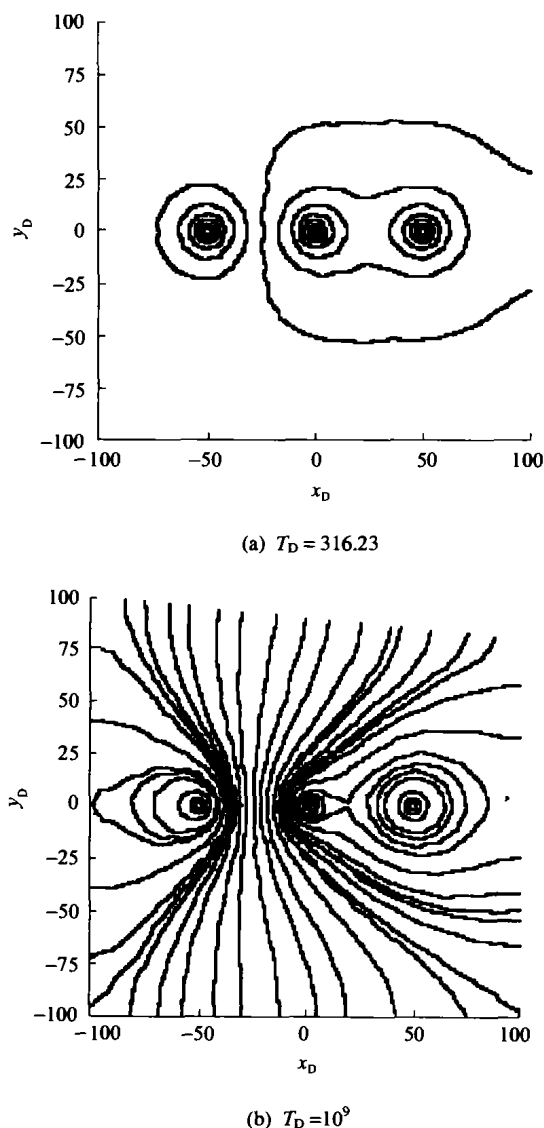


图7 三井在任意四边形封闭煤层中的压力传播发展过程

Fig.7 Pressure propagation process in the arbitrary quadrilateral coalbed of closed boundaries with 3 wells

- Coalbed Methane Resource of the United States[C]. [s. 1.]: American Association of Petroleum Geologists Explorer. Studies in Geology, 1984. 163 - 184.
- [6] 张新民, 张遂安, 李静, 等. 中国的煤层甲烷[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1991.(Zhang Xinmin, Zhang Sui'an, Li Jing, et al. Coalbed Methane in China[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1991.(in Chinese))
- [7] 国家自然科学基金委员会地球科学部. 1999年度国家自然科学基金项目指南(地球科学部分)[J]. 地球科学进展, 1998, 13(6): 511 - 517.(Department of Earth Science of NSFC. Guide to program 1999 of National Natural Science Foundation of China(part of earth science)[J]. Advance in Earth Science, 1998, 13(6): 511 - 517.(in Chinese))
- [8] 李斌. 煤层气非平衡吸附的数学模型和数值模拟[J]. 石油学报, 1996, 17(4): 42 - 49.(Li Bin. Mathematical models and numerical simulation of non-equilibrium adsorption of coalbed methane[J]. Acta Petrolei Sinica, 1996, 17(4): 42 - 49.(in Chinese))
- [9] 冯文光, 梅世昕, 侯鸿斌, 等. 煤层气藏三维数值模拟[J]. 矿物岩石, 1999, 19(1): 43 - 48.(Feng Wenguang, Mei Shixin, Hou Hongbin, et al. Three dimension numerical simulation for coalbed gas reservoir[J]. J. Mineral Petrol., 1999, 19(1): 43 - 48.(in Chinese))
- [10] 杨仓虎, 冯文光. 裂缝性气藏三维二相全隐式数值模拟与底水锥进分析[J]. 天然气工业, 1995, 15(2): 28 - 33.(Yang Canghu, Feng Wenguang. 3-D full implication reservoir simulation and water cone analysis for the two phases fractured gas reservoir[J]. Nature Gas Industry, 1995, 15(2): 28 - 33.(in Chinese))
- [11] 赵阳升, 胡耀青. 气液二相流体裂缝渗流规律的模拟实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(3): 354 - 356.(Zhao Yangsheng, Hu Yaoqing. A simulation test study on seepage law of gas-liquid two-phase fluid in fissure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(3): 354 - 356.(in Chinese))
- [12] 赵阳升, 胡耀青. 三维应力下吸附作用对煤岩体气体渗流规律影响的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 651 - 653.(Zhao Yangsheng, Hu Yaoqing. The experimental study on the gas seepage law of rock related to adsorption under 3-D stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(6): 651 - 653.(in Chinese))
- [13] 孙可明, 梁冰. 煤层气在非饱和水流阶段的非正常渗流摄动解[J]. 应用力学学报, 2002, 19(4): 101 - 104.(Sun Kerning, Liang Bing. Perturbation solution for the transient coalbed methane seepage flow under the unsaturated conditions[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2002, 19(4): 101 - 104.(in Chinese))
- [14] 辜敏, 鲜学福. Langmuir吸附方程的应用[J]. 广东化工, 2002, (2): 42 - 44.(Gu Min, Xian Xuefu. The application of Langmuir Equation[J]. Guangdong Chemical Engineering, 2002, (2): 42 - 44.(in Chinese))
- [15] Patching T H. The retention and release of gas in coal—a review[J]. The Canadian Mining and Metallurgical Bulletin, 1970, 63(7): 1302 - 1308.
- [16] Bumb A C, McKee C.R., Gas-well testing in the presence of desorption for coalbed methane and devonian shale[R]. SPE 15227, 1986.
- [17] Ertekin T, Sung W. Pressure transient analysis of coal seams in the presence of multi-mechanistic flow and sorption phenomena[R]. SPE 19102, 1989.
- [18] Kamal M M, Six J L. Pressure transient testing of methane producing coalbeds[R]. SPE 19789, 1989.
- [19] Archer R A, Roland Horne N. The Green element method for numerical test analysis[R]. SPE 62916, 2001.
- [20] Zhou R, Liu Y W, Zhou F X. Numerical solutions for the transient flow in the homogeneous closed circle reservoirs[J]. Acta Mechanica Sinica, 2003, 19(1): 40 - 45.
- [21] Wilson E L. Automation of the finite element method—a personal historical view[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 1993, 13(2/3): 91 - 104.
- [22] 李水乡, 袁明武. 平面有限元网格生成的自适应技术[J]. 计算机工程与设计, 1999, 20(4): 51 - 55.(Li Shuixiang, Yuan Mingwu. Automatic mesh adaptation technology generation for FEM in plane[J]. Computer Engineering and Design, 1999, 20(4): 51 - 55.(in Chinese))