

两井条件下圆形封闭煤层中压力场分布研究

刘曰武¹ 欧阳伟平¹ 赵培华² 苏中良¹

(1. 中国科学院力学研究所 北京 100190; 2. 中石油煤层气有限责任公司 北京 100028)

摘要 煤层气开采方式的本质是排水降压采气,了解煤层的降压效果对排采制度的确定有着积极的意义。通过建立圆形封闭煤层中考虑煤层气解吸作用的两井不定常渗流模型,利用有限元方法求得了其数值解,分析解吸作用对理论特征曲线的影响。计算结果表明,煤层气解吸具有减缓压力传播的作用;分析不同性质邻井对理论曲线特征的影响,给出存在邻井影响时的压力场发展规律。提出压力场的4种描述方法,分析邻井性质、邻井流量变化,以及外边界性质对煤层压力场分布的影响,得到不同条件下煤层气压力场的变化规律。

关键词 煤层气 压力场 试井 解吸

0 引言

煤层气是一种清洁优质的新型能源,我国煤层气资源非常丰富,地质储量可达 $36.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[1]。我国目前还处于煤层气开采的起步阶段,主要采用排水降压方式进行开采,注 CO₂ 开采方式已经进入试验阶段。煤层气的排采是煤层气开发的“临门一脚”,无论是排水降压排采,还是注 CO₂ 开采,都需要了解煤层的压力变化趋势,才能制定出合理的生产制度。

因此,研究煤层的压力场就成为煤层气合理开发必需的一项工作。研究煤层压力场变化最基本的研究工作是研究邻井作用条件下的压力场变化,从而为研究多井及可能的煤层气井网的压力场奠定基础。

目前,国内外对煤层气开采的压力场变化的研究较少。2002年,刘曰武等人^[2]利用有限元法研究了存在邻井影响条件下的油井数值试井问题,并给出了存在不同性质邻井(生产或注入)情况下的试井理论曲线,同时分析了煤层中的压力分布变化规律,给出了不同时刻两井之间的压力分布,但其研究结果只适合常规油井的条件。刘曰武等^[3]研究了多井开采下煤层气不定常渗流问题,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,所使用的解吸规律只是常规的朗氏等温吸附规律,对渗流场的压力规律未进行深入研究。吴世跃等^[4-6]对注气开采煤层气增产机制做了研究,研究了注气开采对煤层压力变化的影响,并未对煤层气井间压力影响进行深入讨论。

2007年,孙可明等^[7]对流固耦合作用下深部煤层气井群开采进行了数值模拟的研究,主要研究了流固耦合时不同渗透率和不同井群间距条件下开采煤层气的储层压力、气和水产能大小、压降漏斗、水饱和度和甲烷浓度和井群干扰的变化规律,对解吸作用和井间影响较少。2007年,肖晓春等^[8]对多井条件下煤层气渗流数值模拟进行了研究,并未对煤层气的解吸作用影响和井间压力影响进行深入讨论。

本文建立了考虑煤层气解吸作用的圆形煤层中两井不定常渗流模型,并利用有限元方法求得了其数值解,分析了解吸作用对理论特征曲线的影响。计算结果表明,煤层气解吸具有减缓压力传播的作用。分析了不同性质邻井对理论曲线特征的影响,给出了存在邻井影响时的压力场发展规律。提出了压力场的4种描述方法,分析了邻井性质、邻井流量变化、邻井位置以及外边界性质对煤层压力场分布的影响,得到了不同条件下煤层气压力场的变化规律。

[基金项目] 本研究得到国家重大专项“大型气田及煤层气开发”专项支持,课题编号 2009ZX05038001。

[联系作者] 刘曰武,男,研究员,主要从事渗流力学及油气藏工程方面的研究。

1 物理模型与数学模型

1.1 物理模型

煤层为均匀各向同性介质, 煤层中的流体为弱可压缩、定常粘度的牛顿流体, 流体在煤层中的流动为层流状态, 遵从达西定律。由于测试时间相对较短, 故在整个测试过程中可以认为煤层气稳定解吸, 煤层内含水饱和度很低, 或者煤层内含水饱和度稳定分布, 接近束缚水状态, 忽略重力和温度变化对流动的影响, 且不考虑其它物理化学的影响。

1.2 数学模型

针对煤层气解吸特性, 在常规的压力扩散方程中添加一恒定的源项 α_D 。流动的控制方程为

$$\frac{\partial^2 p_D}{\partial x_D^2} + \frac{\partial^2 p_D}{\partial y_D^2} + \alpha_D = \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{\partial p_D}{\partial T_D} \quad (1)$$

初始条件:

$$p_D = 0 \quad (2)$$

边界条件:

内边界条件:

$$\begin{cases} \text{若 } \Gamma_i \text{ 为开采井边界} \\ \left. \left(\frac{\partial p_D}{\partial x_D} \cos \theta + \frac{\partial p_D}{\partial y_D} \sin \theta \right) \right|_{\Gamma_i} = 1 + \frac{dp_{Dc}}{dT_D} \\ \text{若 } \Gamma_i \text{ 为注入井边界} \\ \left. \left(\frac{\partial p_D}{\partial x_D} \cos \theta + \frac{\partial p_D}{\partial y_D} \sin \theta \right) \right|_{\Gamma_i} = -1 + \frac{dp_{Dc}}{dT_D} \end{cases} \quad (3)$$

外边界条件:

圆形封闭边界:

$$\left. \frac{\partial p_D}{\partial n} \right|_{\Gamma_{out}} = 0 \quad (4)$$

其中无量纲量定义如下:

$$\begin{aligned} C_D &= \frac{C}{2 \mathcal{T}_w^2 h \phi C_i} \\ p_D &= \frac{Kh(p_i - p)}{1.842 \times 10^{-3} qB\mu} \\ t_D &= \frac{3.6Kt}{\phi \mu C_i r_w^2} \\ T_D &= \frac{t_D}{C_D} \\ r_{we} &= r_w e^{-S} \\ R_D &= \frac{r}{r_{we}} \end{aligned}$$

$$\alpha_D = - \frac{q \mu B}{1.842 \times 10^{-3} Kh} \alpha$$

式中: $p = p(r, t)$ —— 距离井 r 处 t 时刻压力, MPa;

p_i —— 原始煤层压力, MPa;

r —— 离井距离, m;

t —— 从开井时刻起算的时间, h;

T_D —— 无因次有效井径时间;

K —— 煤层渗透率, μm^2 ;

h —— 煤层厚度, m;

μ —— 流体粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$;

ϕ —— 煤层孔隙度, 无因次;

C_i —— 煤层中流体综合压缩系数, $1/\text{MPa}$;

C_D —— 无因次井筒储集系数;

r_w —— 井的半径, m;

r_{we} —— 有效井径, m;

q —— 井的地面产量, m^3/d ;

B —— 原油的体积系数;

C —— 井储系数, m^3/MPa ;

S —— 表皮系数;

α —— 煤层气稳定解吸系数;

下标 D —— 无量纲。

1.3 有限元方程

利用伽辽金加权余量法, 令其权函数为差值函数, 即 $N_i = a_i + b_i x + c_i y$

则有

$$\iint \left[N_i^e \left(\frac{\partial^2 P_D}{\partial x_D^2} + \frac{\partial^2 P_D}{\partial y_D^2} + \alpha_{1D} - \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{\partial p_D}{\partial T_D} \right) \right] dA = 0 \quad (7)$$

其弱表示形式为

$$\begin{aligned} & \iint \left[\frac{\partial N_i^e}{\partial x_D} \frac{\partial p_D}{\partial x_D} + \frac{\partial N_i^e}{\partial y_D} \frac{\partial p_D}{\partial y_D} - N_i^e \alpha_{1D} + \frac{N_i^e}{C_D e^{2S}} \frac{\partial p_D}{\partial T_D} \right] dA \\ &= \int_{\Gamma_i} N_i^e \frac{\partial p_{Dc}}{\partial n} dl \end{aligned} \quad (8)$$

离散后得到有限元方程:

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

$$+ \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{12 \Delta T_D} p_3^{e,n} + \frac{\alpha_{1D}}{3} + \left(\pm 1 - \frac{p_1^{e,n+1} - p_1^{e,n}}{\Delta T_D} \right) \frac{L}{2A} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & \left(b_1 b_2 + c_1 c_2 + \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{12 \Delta T_D} \right) p_1^{e,n+1} \\ & + \left(b_2^2 + c_2^2 + \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{6 \Delta T_D} \right) p_2^{e,n+1} \\ & + \left(b_2 b_3 + c_2 c_3 + \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{12 \Delta T_D} \right) p_3^{e,n+1} \\ = & \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{12 \Delta T_D} p_1^{e,n} + \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{6 \Delta T_D} p_2^{e,n} \\ & + \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{12 \Delta T_D} p_3^{e,n} + \frac{\alpha_{1D}}{3} + \left(\pm 1 - \frac{p_2^{e,n+1} - p_2^{e,n}}{\Delta T_D} \right) \frac{L}{2A} \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left(b_1 b_3 + c_1 c_3 + \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{12 \Delta T_D} \right) p_1^{e,n+1} \\ & + \left(b_3 b_2 + c_3 c_2 + \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{12 \Delta T_D} \right) p_2^{e,n+1} \\ & + \left(b_3^2 + c_3^2 + \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{6 \Delta T_D} \right) p_3^{e,n+1} \\ = & \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{12 \Delta T_D} p_1^{e,n} + \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{12 \Delta T_D} p_2^{e,n} \\ & + \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{1}{6 \Delta T_D} p_3^{e,n} + \frac{\alpha_{1D}}{3} + \left(\pm 1 - \frac{p_3^{e,n+1} - p_3^{e,n}}{\Delta T_D} \right) \frac{L}{2A} \quad (11) \end{aligned}$$

其中

$$A = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \end{vmatrix}$$

$$b_1 = \frac{1}{2A}(y_2 - y_3)$$

$$b_2 = \frac{1}{2A}(y_3 - y_1)$$

$$b_3 = \frac{1}{2A}(y_1 - y_2)$$

$$c_1 = \frac{1}{2A}(x_3 - x_2)$$

$$c_2 = \frac{1}{2A}(x_1 - x_3)$$

$$c_3 = \frac{1}{2A}(x_2 - x_1)$$

式中: A —— 面积。

(9) 式~ (11) 式中的最后一项只有当三角形的两个结点落在边界上时才存在, 注入井流量取正值,

采出井取负值。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 $p(x, y)$ 。

1.4 有限元网格离散

为了进行有限元计算, 需对计算区域进行离散, 采用非结构三角形网格, 外边界为圆形边界(见图1)。在实际的计算过程中, 需要针对不同的外边界和不同的井数划分不同的网格。

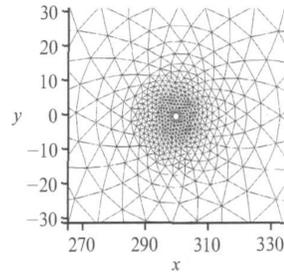
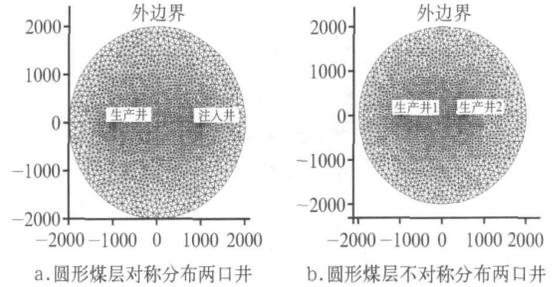


图1 煤层气煤层的非结构网格图

2 理论曲线特征分析

2.1 煤层气解吸作用对井底压力理论曲线的影响

首先考虑圆形封闭煤层中煤层气解吸作用对邻井为生产井的井底压力理论曲线的影响。图2是两井开采下不同解吸系数的双对数曲线图, 曲线1代表的是没有解吸作用的情况, 曲线2、3分别代表解吸系数 α_{1D} 为 -2×10^{-6} 和 -4×10^{-6} 的结果。

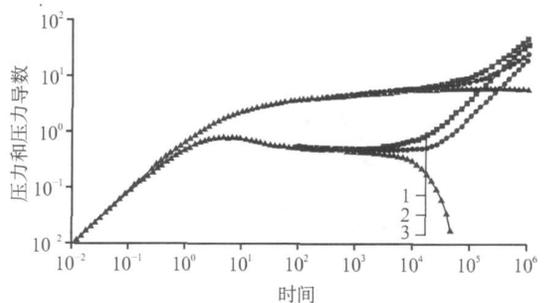


图2 两井考虑解吸作用的双对数曲线图

从图 2 可以看出, 煤层气解吸作用对双对数理论曲线的早期和中期几乎没有产生影响, 早期和中期的双对数理论曲线仍然表现为以下特点: ①早期径向流段, 压力和压力导数曲线都是斜率为 1 的直线段, 表明了井储效应的控制作用。②压力导数曲线上的“凸峰”表明了表皮系数的影响。③压力导数等于 0.5 的水平直线段, 表明系统存在径向流。

由于考虑的是全区的解吸作用, 因此解吸作用的影响主要表现在试井理论曲线的后期。从图 2 可以看出: ①当解吸强度较小时, 压力和压力导数曲线的上翘速度变缓, 表明解吸作用缓解了实际生产过程中煤层中的压力下降, 如图 2 中的曲线 2 所示。②当解吸强度达到一定值后, 压力曲线会变为水平直线段, 压力导数急剧下掉, 表明解吸量已经满足了煤层气的生产要求, 压力停止传播, 类似于遇到了定压边界, 如图 2 中的曲线 3 所示。

2.2 等流量条件下邻井性质对理论曲线特征的影响

为了分析邻井性质对煤层气井的井底压力理论曲线特征的影响, 假定在短时间的测试过程中煤层气解吸稳定, 分析两口井的情况。图 3 中曲线 1、2 分别代表两口采出井无限大边界和封闭圆形边界的双对数曲线; 曲线 3、4 分别代表一口井采出、另一个口井生产(注气生产情形)的无限大边界和圆形封闭边界的双对数曲线, 其中假定井的生产量和注入量相等。

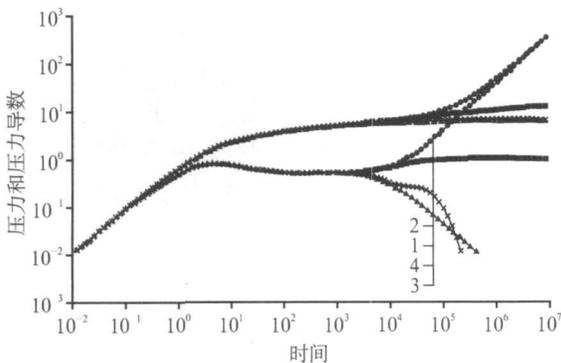


图3 两口井的双对数曲线

从图 3 可以看出, 两口井同时等产量开采, 在曲线上类似于两口井的垂直平分线为封闭边界, 从而曲线 1 类似于具有一条封闭边界的半无限空间, 压力导数曲线在晚期到达水平 1 线上; 而曲线 2 在外封闭边界的作用下上翘为斜率为 1 的直线。一注一

采类似于两口井的垂直平分线为定压边界, 故曲线 3 和 4 的压力导数线下掉, 但曲线 4 还反映了封闭外边界的影响。

3 压力场特征分析

3.1 压力场描述方法

从目前的技术手段看, 压力场的描述方法可以分为 4 类: ①等压线描述法; ②云图描述法; ③网格线描述法; ④渗流场描述法(见图 4)。

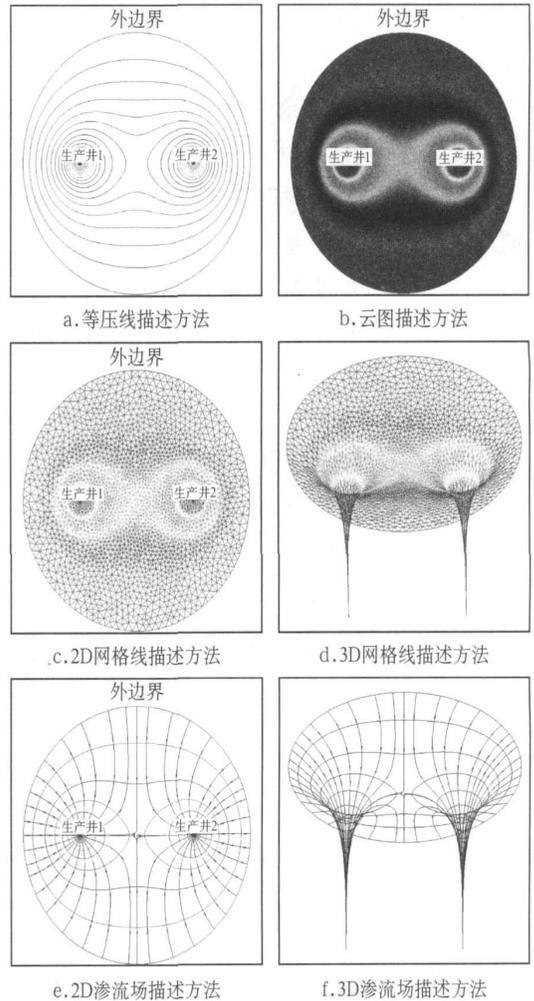


图4 压力场的描述方法

3.1.1 等压线描述方法

该方法是将压力场通过压力等值线的方式进行描述, 即可以取不同数目的压力线来表示压力场的状况, 等值线按一定顺序排列, 每条等值线上的压力相等。整个压力场可以是 2D 平面图, 也可以是 3D 立体图。图 4a 是圆形封闭煤层中两口等产量生产井的压力场图的等值线形式。

3.1.2 云图描述方法

该方法是将压力场通过彩色图形进行描述的一种方式,即按研究区域内各点压力值的大小定义不同的颜色,然后将不同颜色点画在研究区域内,每种颜色代表一种压力值的大小。整个压力场可以是2D平面图,也可以是3D立体图。图4b是圆形封闭煤层中两口等产量生产井的压力场图的云图形式。

3.1.3 网格线描述方法

该方法是利用计算网格进行压力场描述的一种方式,即对于每个计算网格的连线按所在单元的压力值的大小赋予不同的颜色,从而达到区分压力大小的目的。整个压力场可以是2D平面图,也可以是3D立体图。图4c是圆形封闭煤层中两口等产量生产井的压力场图的网格描述方法的2D形式;图4d是圆形封闭煤层中两口等产量生产井的压力场图的网格描述方法的3D形式。

3.1.4 渗流场描述方法

该方法是利用压力等值线和流线正交构成渗流场的方法来描述压力场。压力等值线上的压力相等,各流线间的流量相等。流线明确地表明了流体流动的方向。图4e是圆形封闭煤层中两口等产量生产井的压力场图的渗流场描述方法的2D形式;图4f是圆形封闭煤层中两口等产量生产井的压力场图的渗流场描述方法的3D形式。

从图4中可以看出,上述四种压力场的描述方法各有特色,可以根据不同的描述目的选择使用。等压线描述方法简单明了,可以通过数条压力等值线将压力场的轮廓描述的十分清晰;云图描述方法具有较强的连续性,可以清楚的看到压力场的渐变顺序;网格线描述方法清楚地描述了研究区域内各个点上的压力变化,可以清楚地看到不同计算点的压力状态;渗流场描述方法不仅给出了压力大小的变化趋势,而且明确地给出了流体的流动方向。因此,根据本研究问题的特点,一般描述过程变化选用网格线描述方法,而在描述压力场时多选用渗流场描述方法。

3.2 煤层中压力场的发展过程分析

为了更好了解降压开采中井间压力相互影响,计算了圆形封闭煤层中压力场的发展过程。所用两井间的无量纲距离为2000,圆形煤层的半径为2000,两井的无量纲产量为1。分别计算了无量纲时间为1、10、100、1000时的压力场状况,计算结果如图5所示。

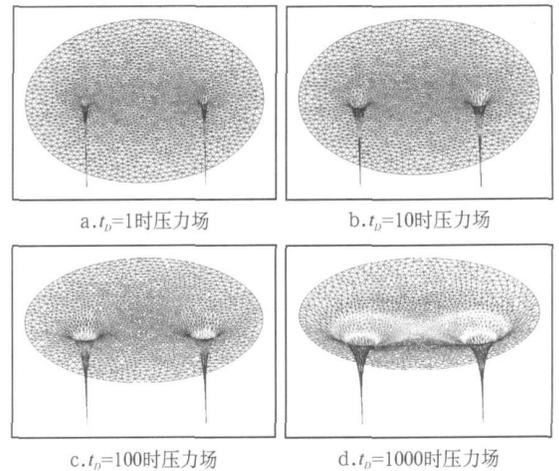


图5 存在两生产井时圆形煤层中压力场发展过程

从图5中可以看出,煤层气藏开发早期,煤层气生产的压力场是独立发展的,井间压力不存在相互影响(见图5a~5c),只有经过一定时间之后,煤层气井之间的压力才受到各生产井的影响,井间压力下降加快。

3.3 圆形封闭煤层中压力场分布特征分析

图6~图8是圆形封闭煤层两井的压力场分布图,分别对应于:①两口井为生产井的产量不同的情况(见图6);②两口井为注入井的注入量不同的情况(见图7);③两口井分别为注入井和生产井,但产注量不同的情况(见图8)。

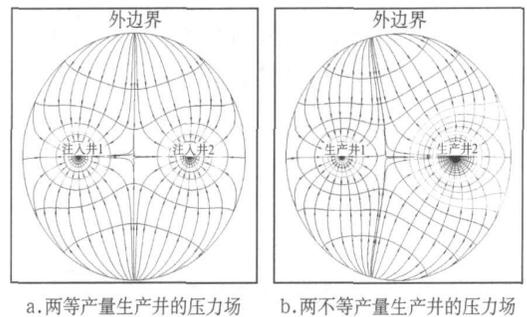


图6 两生产井条件下的煤层中压力场分布图

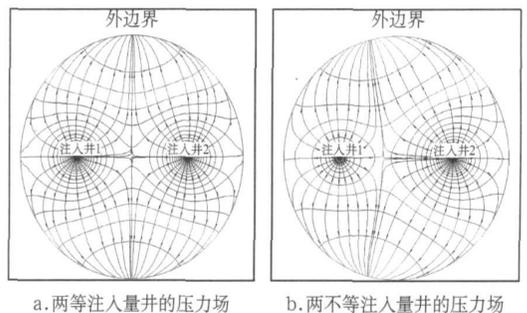


图7 两注入井条件下的煤层中压力场分布图

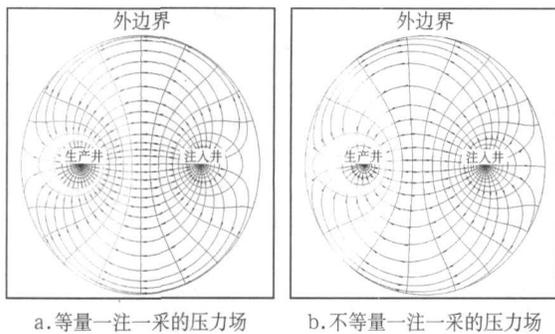


图8 一注一采井条件下的煤层中压力场分布图

3.3.1 对于两井同为生产井情况的压力场分析

从图 6a 两井产量相等的情况可以看出: ①各井近井区域的压力等值线是圆形闭合的, 表明该区域内流体流动为径向流动, 该生产井的生产状况不受邻井及外边界的影响; ②有一条流线垂直于两井的连线, 表明沿该流线流动流体较难流到各井中, 两井连线的中点部分流体几乎是不流动的, 这与常规油气藏中“死油区”的概念是一致的; ③压力等值线在外边界线上是与边界线正交的, 说明外边界是封闭的不能提供流体供源。

两井产量不相等的情况, 一口井的生产井产量是另一口井的 1 倍。从图 6b 可以看出: ①各井近井区域的压力等值线是圆形闭合的, 表明该区域内流体流动为径向流动, 该生产井的生产状况不受邻井及外边界的影响; ②在等产量条件下, 垂直于两井的连线流线变弯, 并向产量小的生产井弯曲, 表明“死油区”向产量小的生产井方向移动, 同时也表明有更多的流体流向产量较大的生产井; ③压力等值线仍然正交于外边界线上, 说明外边界是封闭的不能提供流体供源。

3.3.2 对于两井同为注入井情况的压力场分析

从图 7a 两井注入量相等的情况可以看出: ①各井近井区域的压力等值线是圆形闭合的, 表明该区域内流体流动为径向, 该注入井的注入状况流动不受邻井及外边界的影响; ②有一条流线垂直于两井的连线, 该流线就像“挡墙”一样使流体难以通过, 类似于煤层中存在一条“封闭”的线性边界, 表明沿该流线流动流体较难流到另一口井; ③压力等值线在外边界线上是与边界线正交的, 说明外边界是封闭的不能向外传输流体。

两井注入量不相等的情况, 一口井的注入量是另一口井的 1 倍。从图 7b 可以看出: ①各井的近井

区域的压力等值线是圆形封闭的, 表明该区域内流体流动为径向流动, 该注入井的注入状况不受邻井及外边界的影响; ②在等注入量条件下垂直于两井连线的流线变弯, 并向注入量小的注入井弯曲, 表明煤层中更多的流体来源于注入量较大的注入井; ③压力等值线仍然正交于外边界线上, 说明外边界是封闭的不能向外传输流体。

3.3.3 对于两井分别为注入井和生产井情况的压力场分析

注入井和生产井产量相等的情况, 从图 8a 可以看出: ①各井近井区域的压力等值线是圆形闭合的, 表明该区域内流体流动为径向, 注入井的注入状况和生产井的流入状况都不受邻井及外边界的影响; ②有一条垂直于两井间连线的压力等值线, 该压力等值线就像“定压供源”一样使注入的流体顺利输送到生产井, 类似于煤层中存在一条“定压”的线性边界, 表明垂直通过该等压线的流体易于流到生产井中; ③压力等值线在外边界线上是与边界线正交的, 说明外边界是封闭的不能向外传输流体。

注入井和生产井产量不相等的情况, 注入量是产量的 1 倍。从图 8b 可以看出: ①各井近井区域的压力等值线是圆形封闭的, 表明该区域内流体流动为径向流动, 注入井的注入状况和生产井的流入状况都不受邻井及外边界的影响; ②在等注入量条件下垂直于两井的连线压力等值线变弯, 并向生产井弯曲, 表明煤层中注入压力较大; ③压力等值线仍然正交于外边界线上, 说明外边界是封闭的不能向外传输流体。

4 结 论

(1) 建立圆形封闭煤层中考虑煤层气解吸作用的两井不定常渗流模型, 并利用有限元方法求得了其数值解, 分析了解吸作用对试井理论曲线的影响。计算结果表明, 煤层气解吸具有减缓了压力传播的作用。

(2) 提出了压力场的 4 种描述方法, 分析了邻井性质、邻井流量变化, 以及外边界性质对煤层压力场分布的影响, 得到了不同条件下煤层气压力场的变化规律。

(3) 分析了不同性质邻井对压力场的影响, 对于同性质的两井, 有一条流线垂直于两井的连线, 该流线就像“挡墙”一样使流体难以通过, 类似于煤层中

存在一条“封闭”的线性边界,表明沿该流线流动流体较难流到另一口井。对于不同性质的两井,有一条垂直于两井间连线的压力等值线,该压力等值线就像“定压供源”一样使注入的流体顺利输送到生产井,类似于煤层中存在一条“定压”的线性边界,表明垂直通过该等压线的流体易于流到生产井中。

(4) 分析了邻井流量(产/注量)对压力场的影响,对于两生产井,在等产量条件下垂直于两井的连线流线变弯,并向产量小的生产井弯曲,表明“死油区”向产量小的生产井方向移动,同时也表明有更多的流体流向产量较大的生产井。对于一口注入井和一口生产井的情况,如果注入井的注入量大于生产井的产量,在等注入量条件下垂直于两井的连线压力等值线变弯,并向生产井弯曲,表明煤层中注入压力较大。

(5) 分析了外边界性质邻井对压力场的影响,无论生产井还是注入井,煤层中的压力等值线都正交于外边界线上。对于生产井,说明外边界是封闭的不能提供流体供源;对于注入井,说明外边界是封闭的不能向外传输流体。

(上接 52 页)

3 结 论

本文建立了考虑解吸作用的煤层气数值试井模型,从计算结果的分析及对比可知,煤层气解吸作用影响试井理论曲线的中后期,能缓解地层中压力下降,减缓压力波的传播,且当解吸作用达到一定强度,煤层气解吸量达到生产量时,压力停止传播,这类似于定压边界。临界解吸压力对试井理论曲线的影响也比较明显,临界解吸压力和初始地层的压力相差越小,煤层气解吸出现的时间越早,影响也越大。

致 谢

本项目得到国家重大专项“大型油气田及煤层气开发”专项的支持,课题编号 2009ZX05038001,感谢中石油煤层气有限责任公司允许本论文的发表。

参 考 文 献

[1] 冯文光. 煤层气藏工程[M]. 北京: 科学技术出版社.

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

参 考 文 献

- [1] 全晓波. 中国煤层气发展任重道远——访国土资源部油气资源战略研究中心副主任车长波. 资源导刊, 2010, 11(5): 12-13.
- [2] 刘曰武, 陈慧新, 张大为, 等. 存在邻井影响条件下的油井数值试井分析[J]. 油气井测试, 2002, 11(5): 4-7.
- [3] 刘曰武, 张大为, 陈慧新, 等. 多井开采条件下煤层气渗流规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1679-1686.
- [4] 吴世跃, 郭勇义. 注气开采煤层气增产机制的研究[J]. 煤炭学报, 2001, 26(2): 199-203.
- [5] 马志宏, 郭勇义, 吴世跃. 注入二氧化碳及氮气驱替煤层气机理的实验研究[J]. 太原理工大学学报, 2001, 32(4): 335-338.
- [6] 程林峰. 煤层气注入增产法的探讨[J]. 中国煤层气, 2006, 3(3): 40-43.
- [7] 孙可明, 潘一山, 梁冰. 流固耦合作用下深部煤层气井群开采数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 994-1000.
- [8] 肖晓春, 潘一山. 多井开采条件下煤层气渗流数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 977-981.

本文收稿日期: 2010-11-08 编辑: 许兰婷

2009.

- [2] 陈彦丽, 刘启国, 等. 浅析煤层气井与常规油气井在试井方面的差别[J]. 中国煤层气, 2006, 3(4).
- [3] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010.
- [4] Anbarci K, Ertekin T A. Comprehensive Study of Pressure Transient Analysis With Sorption Phenomena for Single Phase Gas Flow in Coal Seams. SPE 20568.
- [5] Ertekin T, Sung W. Pressure Transient Analysis of Coal Seams in the Presence of Multi Mechanistic Flow and Sorption Phenomena. SPE 19102.
- [6] 刘曰武, 张大为, 陈慧新, 等. 多井开采条件下煤层气渗流规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1679-1686.
- [7] 卢德唐, 文延东. 定产量煤层气井底瞬时压力计算[J]. 天然气工业, 1998, 18(3).
- [8] 庄惠农, 韩永新. 煤层气层渗流与煤层气试井[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2000, 23(Z1): 18-21.

本文收稿日期: 2010-11-08 编辑: 许兰婷

sure distribution field in coalbed are all showed in detail. The well test type curves showed that there are parallel straight section lines in pressure and pressure derivative curve with slope equal to 0.5, which confirmed the existence of linear flow in coalbed. From the pressure distribution field map, we found that the elliptic flow around fractures, but the radial flow far away from fractures. The effect of CBM desorption to theoretical curves showed pressure and pressure derivative curves drew down in middle and later periods of curves. And the reason was CBM desorption delayed the pressure decrease. By analyzing the fracture asymmetry about the wellbore, the results show that there is less impact of fracture asymmetry on the well test type curve for the different calculation cases, since the fractures are infinite conductivity vertical fracture. wellbore asymmetry had well test theory curves.

Key words: CBM, numerical well testing, desorption, infinite conductivity, fractures well, type curve

The Exploration of Finite Volume Method in CBM Numerical Well Testing. 2010, 19(6): 57~ 63

Niu Congcong, Cai Qiang, Li Haisheng (Beijing Technology and Business University), Liu Yuewu (Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

By comparing the advantages and disadvantages among the normally used numerical methods in modern numerical well testing technology, it shows that the finite volume method is the best one for solving the governing equation of CBM. So we choose finite volume method to solve CBM numerical well testing model. 1-D radial flow and 2-D flow model are developed for the well in circular CBM region with steady desorption. The corresponding discrete equation forms of the finite volume method are derived for both 1-D and 2-D cases. The influence of desorption coefficient, the boundary distance, boundary properties, the combination coefficient etc on test well test type curves are discussed in detail in this work. The results show that the type curves clearly reflected the pressure changes of CBM wells in the different conditions, and finite volume method is very suitable for solving CBM well test problem. Finite volume method provides a new numerical calculation method for solving CBM well test model. It leads a productive progress on developing CBM numerical well test.

Key words: CBM, finite volume method, numerical well test, steady desorption

Research on Pressure Field in Circle Bounded Coalbed With Two Wells. 2010, 19(6): 64~ 70

Liu Yuewu, Ouyang Weiping, Su Zhongliang (Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences), Zhao Peihua (Coalbed Methane Ltd. Comp., PetroChina)

The nature of CBM production is draining water to drop pressure and produce methane. So it is important to know the pressure dropping effect for producing methane. By considering CBM desorption effect, mathematical model for unsteady seepage flow is developed in circle bounded coalbed with two wells. The numerical solutions are obtained by using the finite element method. The desorption effects on the well test type curve are analyzed in detail. The results show that CBM desorption decrease the pressure wave transmitting velocity in the coal bed. The effect of the neighbor well property on type curve is also analyzed for describing the development of pressure field. Four kind of description methods are introduced and evaluated in this paper. The effects of well property, flow rate of the neighbor well and property of the outer boundary on the pressure field are analyzed for the pressure field changing under different conditions.

Key words: coalbed methane, pressure field, well test, desorption

Numerical Study on Seepage Field in Coalbed With Cavity Well. 2010, 19(6): 71~ 75

Liu Yuewu, Ouyang Weiping, Su Zhongliang (Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences), Zhao Peihua (Coalbed Methane Ltd. Company, Petrochina), Fang Huijun (Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences)

Physical model of fluid flow in coalbed with CBM cavity well is described in this paper at the first time. Near the wellbore there exists a high permeability region whose permeability is far greater than that of the coalbed far from the CBM well. The fluid flow in this region also obeys Darcy's flow. Based on the description of physical model, mathematic model for fluid flow in coalbed with CBM cavity well is developed in this paper. Seepage field in coalbed with CBM cavity well is obtained under circular and arbitrary quadrilateral outer boundary by using finite element method. In order to compare seepage field in coalbed with CBM cavity wells with that of open hole completion well, seepage is simulated about one cave completion, one open hole completion and one cave completion, two open hole completions. So the difference of seepage between cave completion and open hole completion is visible. The results of this research is significant important to comprehend fluid flow mechanics and pressure distribution in coalbed with CBM cavity wells.

Key words: CBM, model, seepage, seepage field, finite element

Software Design and Development of CBM Well Test. 2010, 19(6): 76~ 81

Li Qi, Cai Qiang, Li Haisheng (Beijing Technology and Business University), Liu Yuewu (Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

The significance of design and development of CBM well test analysis software is introduced and the characteristics of oil and gas well test analysis software normally used at home or abroad are summarized in this paper. With the development of CBM well test technique and the requirements of CBM well test analysis, software technical requirement and development are introduced, framework and all function modules of the software are designed, all based on the special nature of CBM such as desorption, deformation, low permeability, etc. CBM well test analysis software is designed and developed based on software engineering thought. The software includes data preparation module, well test analysis module, well test design module and report generation and output module. The software has friendly UI, rich models, powerful function and friendly framework.

Key words: software, CBM, well test, design and development