

有限体积法在煤层气数值试井中应用的探索

牛丛丛¹ 刘曰武² 蔡 强¹ 李海生¹

(1. 北京工商大学 北京 100048; 2. 中国科学院力学研究所 北京 100190)

摘要 通过对现代数值试井技术主要使用的数值计算方法优缺点的对比分析,说明了有限体积法求解煤层气扩散方程的优势,确定采用有限体积法对煤层气井的数值试井模型进行求解。建立了圆形区域煤层的一维径向流动和二维平面流动的煤层气井稳定解吸数值试井模型,推导出了相应的有限体积法离散格式。通过对求解结果的分析,详细讨论了解吸系数、边界距离、边界性质、组合系数等因素对试井理论曲线的影响。该研究成果的理论曲线特征明显地反映了不同条件下煤层气井的压力变化规律,说明了有限体积法适合于煤层气井的数值试井研究。该研究成果拓展了煤层气数值试井模型求解的计算方法,对煤层气数值试井的发展有积极的指导意义。

关键词 煤层气 有限体积法 数值试井 稳定解吸

0 引 言

数值试井的特点在于能够更全面地解析解或半解析解试井方法所难以求解的复杂油气藏的试井问题,并且在综合考虑油气藏的地质因素和开发因素的条件能够下能够使试井解释模型更加符合实际情况^[1],研究范围广,分析成果更加丰富,应用面更广。

从20世纪50年代开始,人们就通过常规试井方法来认识油藏。随着计算机技术和新的试井分析方法的发展,进入80年代后,试井解释模型更加丰富,有效地提高了分析结果的准确性。90年代以后^[2],数值试井技术开始发展,但国内的数值试井工作起步较晚,而且还处于萌芽阶段,各种技术还不够成熟。

自从数值试井发展以来,主要的研究工作有 Puchyr^[3] 和 Levkan 等人(1991)用有限差分法来研究试井问题。Z. E. Heinemann(1991)^[4]、Larry S. K 等人(1994)^[5]、Santosh Verma 等人(1997)^[6] 都利用有限体积法进行了油藏数值模拟研究。2000年, Rosalind A^[7] 利用边界元法进行数值试井分析,对比有限差分法,边界元法处理井筒附近的高压力梯度变化更精确。2001年,刘曰武、周蓉等人^[8] 利用有限元技术成功地解决了圆形油藏中偏心井测试资料的数值试井

分析问题。同年,石油大学的刘立明、陈钦雷等人做了单相流数值试井模型,选取非结构网格进行数值试井研究,推导出了能反映开、关井后地层渗流量变化的用于求解单相流试井问题的差分模型^[9],并作了油气两相渗流压降数值试井模型的研究^[10]。2004年,刘青山、段永刚等人用边界元法分析油藏不稳定渗流问题^[11] 和处理复杂油藏边界及分析油藏不稳定渗流问题^[12]。2007年,吴明录等人^[13] 提出了多层油藏流线数值试井解释模型,考虑多层合采(合注)、生产历史、非均质性、油水两相流、多井干扰、分层表皮系数等因素影响,比现有试井解释模型更接近油藏真实渗流环境。2009年,王新海等人^[14] 采用非结构网格,使用基于积分的有限差分方法进行离散,建立了含有大尺度裂缝、溶洞的缝洞型油藏的数值试井模型,分析了裂缝长度、宽度、溶洞大小、溶洞与裂缝接触面积等因素对试井响应的影响,使从试井资料中获得近井区大尺度裂缝、溶洞的分布情况成为可能。

近些年来,数值试井技术不断发展,当前数值试井的计算方法主要有四大类:有限差分法、有限元法、边界元法及有限体积法。

有限差分方法是计算机数值模拟最早采用的方法,它的优点是形式简单,对任意复杂的偏微分方程

[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。

[作者简介] 牛丛丛,北京工商大学研究生,主要从事计算机软件及煤层气试井研究。

[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工作。地址:北京市北四环西路15号力学所,邮政编码:100190。

都可以写出其对应的差分方程,易于编程实现,而且比较成熟。它的缺点是要求计算区域比较规则。

有限元法的基础是变分原理和加权余量法,它的优点是解题能力强,对于复杂的曲线或曲面可以比较精确地进行模拟,网格的离散比较随意。但是由于有限元离散方程只是对偏微分方程的近似,有些时候无法给出合理的物理解释,对计算中出现的一些误差也难以进行改进。

边界元法是 20 世纪 70 年代后期发展起来的一种求解偏微分方程的数值方法,它针对的是有限差分法和有限元法占用计算机内存资源过多。边界元法的优点是降维,只在求解区域的边界进行离散就能求得整个流场的解。但是边界元法仅适应规则区域及边界条件,适于求解线性、均质问题,当控制方程比较复杂时,则对应的基本解较难找到。

有限体积法是将求解区域离散成不重叠的控制容积,并使每个结点周围有一定的控制容积,将待求解的偏微分方程对每一个控制容积积分,从而得出一组离散方程。与有限差分相似,有限体积法需要求解结点值;同时有限体积法在控制体积内积分时,必须假定值在网格点之间的分布,又与有限单元法相类似。有限体积法是基于物理守恒的特性,有限体积法可以求解不规则和复杂区域,兼有有限差分法的高效性和有限元法的可应用于任意复杂结构的网格的随意性。

通过比较几种方法的优缺点,可以看到有限体积法综合了有限差分方法的格式简单性,以及处理数值通量的简单灵活性和有限元方法对区域剖分的任意性,同时由于边界元方法存在难以确定基本解的局限性,所以本文采用有限体积法进行煤层气数值试井的计算。

本文是在单重介质等温稳定解吸的基础上,对煤层气井建立在一维径向问题上的有限体积格式。根据一维有限体积模型得出的结果曲线,分析在封闭和定压边界条件下不同边界距离的影响,封闭、定压及无限大边界时边界性质影响,不同组合参数 $C_D e^{2S}$ 的影响及不同解吸系数的影响。在一维有限体积的基础上进行二维数学模型的推导。

1 煤层气试井模型

1.1 物理模型

为了对煤层气井的试井问题进行深入研究,对

所研究的物理问题进行如下概化:

(1) 煤层为均匀各向同性圆形地层,研究区域如图 1 所示,其中心的煤层气井以定产量恒定生产。

(2) 煤层中的流体为弱可压缩、定常粘度的牛顿流体。

(3) 流体在地层中的流动为层流状态,遵从达西定律。

(4) 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,煤层气的解吸为稳定解吸,不考虑温度变化对流动的影响。

(5) 煤层内含水饱和度很低,或者煤层内含水饱和度和稳定分布,接近束缚水状态。

(6) 忽略重力的影响,不考虑其它物理化学的影响。

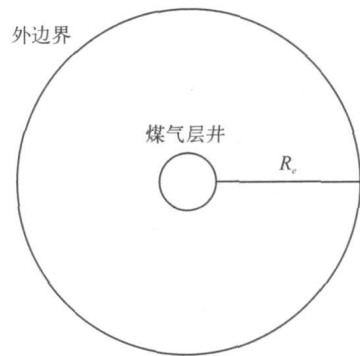


图1 研究问题的概化物理模型

1.2 数学模型

根据所描述的物理模型,煤层气试井模型可以用以下方程描述:

1.2.1 一维径向无量纲模型

控制方程:

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

初始条件:

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

内边界条件:

$$\left. \frac{\partial p_D}{\partial R_D} \right|_{R_D=1} = -1 + \frac{\partial p_{wD}}{\partial T_D} \quad (3)$$

无限大外边界条件:

$$p_D(R_D \rightarrow \infty) = 0 \quad (4)$$

圆形定压外边界条件:

$$p_D \Big|_{r_D=R_{eD}} = 0 \quad (5)$$

圆形封闭外边界条件:

$$\left. \frac{\partial p_D}{\partial R_D} \right|_{r_D = R_{eD}} = 0 \quad (6)$$

1.2.2 二维流动无量纲模型

控制方程:

$$\frac{\partial^2 p_D}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 p_D}{\partial Y^2} + \alpha_0 = \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{\partial p_D}{\partial T_D} \quad (7)$$

初始条件:

$$p_D(T_D = 0) = 0 \quad (8)$$

内边界条件:

$$\left. \frac{\partial p_D}{\partial n} \right|_{\sqrt{X^2 + Y^2} = 1} = -1 + \frac{\partial p_{wD}}{\partial T_D}$$

或

$$\left[\frac{\partial p_D}{\partial X_D} \cos \theta + \frac{\partial p_D}{\partial Y_D} \sin \theta \right] \Big|_{\sqrt{X^2 + Y^2} = 1} = -1 + \frac{\partial p_{wD}}{\partial T_D} \quad (9)$$

无限大外边界条件:

$$p_D \left(\sqrt{X^2 + Y^2} \rightarrow \infty \right) = 0 \quad (10)$$

圆形定压外边界条件:

$$p_D \Big|_{\sqrt{X^2 + Y^2} = R_{eD}} = 0 \quad (11)$$

圆形封闭外边界条件:

$$\left. \frac{\partial p_D}{\partial n} \right|_{\sqrt{X^2 + Y^2} = R_{eD}} = 0 \quad (12)$$

其中无量纲量的定义如下:

$$C_D = \frac{C}{2\pi r_w^2 h \phi C_i}$$

$$p_D = \frac{Kh(p_i - p)}{1.842 \times 10^{-3} qB\mu}$$

$$t_D = \frac{3.6Kt}{\phi \mu C_i r_w^2}$$

$$T_D = \frac{LD}{C_D}$$

$$r_{we} = r_w e^{-S}$$

$$R_D = \frac{r}{r_{we}}$$

$$\alpha_0 = - \frac{Q\mu B}{1.842 \times 10^{-3} Kh} \alpha$$

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

p_i —— 原始地层压力, MPa;

r —— 离井距离, m;

t —— 从开井时刻起算的时间, h;

K —— 地层渗透率, μm^2 ;

h —— 地层厚度, m;

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

ϕ —— 地层孔隙度;

C_i —— 流体综合压缩系数, $(\text{MPa})^{-1}$;

r_w —— 井半径, m;

q —— 井的地面产量, m^3/d ;

B —— 原油体积系数;

C —— 井筒储集系数, m^3/MPa ;

S —— 表皮系数;

α —— 煤层气稳定解吸系数;

r_{we} —— 有效井径, m;

p_D, t_D —— 无量纲压力和无量纲时间;

T_D —— 无量纲有效井径时间;

R_D —— 无量纲半径。

2 有限体积法求解方法

2.1 一维径向流的有限体积求解方法

2.1.1 生成离散网格

有限体积法首先将求解区域划分成离散的控制容积。本文将求解区域划分为非结构的三角形网格,如图 2 所示。将计算区域剖分成网格后,如果将网格单元本身作为控制容积,这样得到的有限体积格式叫做单元中心型(cell centered);如果控制容积是由单元顶点周围的单元各取一部分组合而成,这样得到的有限体积格式叫做顶点中心型(cell vertex)。为了求解的方便和精度的准确,此一维离散选用顶点中心型格式。如图所示,把径向问题的半径以 ΔR 为距离分成 n 份,即

$$\Delta R = \Delta R_{AP} = \Delta R_{PB}$$

A、P、B 为结点, a 为 AP 的中点, b 为 PB 的中点, ab 的距离为 ΔR 。

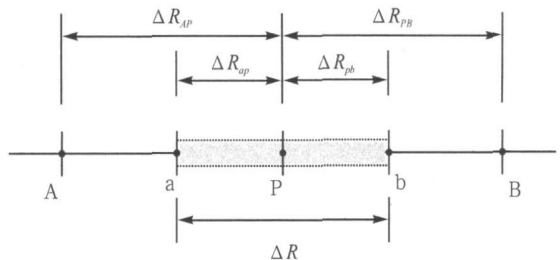


图2 离散的网格

2.1.2 方程的离散

对(1)式进行时间和空间的离散。有限体积法是利用对时间和控制容积的积分来实现方程的时间离散和空间离散的,把控制方程离散为

$$\iiint_{\Delta T \Delta V} \left[\frac{\partial^2 p_D}{\partial R_D^2} + \frac{1}{R_D} \frac{\partial p_D}{\partial R_D} + \alpha_0 \right] dV dT$$

$$= \int_{\Delta T} \int_{\Delta V} \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{\partial p_D}{\partial T_D} dV dT \quad (13)$$

式中: ΔT —— 时间间隔;

ΔV —— 控制容积的体积;

α_D —— 无量纲解吸系数。

因为是在一维的网格上求解, 所以选取横截面积为 1, 得到 $\Delta V = \Delta R$, $dV = dR$, 可将方程作如下转换, 即

$$\int_{\Delta T} \int_{\Delta R} \left(\frac{\partial^2 p_D}{\partial R_D^2} + \frac{1}{R_D} \frac{\partial p_D}{\partial R_D} + \alpha_D \right) dR dT$$

$$= \int_{\Delta T} \int_{\Delta R} \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{\partial p_D}{\partial T_D} dR dT \quad (14)$$

等式左边的离散为

$$\int_{\Delta T} \int_{\Delta R} \left(\frac{\partial^2 p_D}{\partial R_D^2} + \frac{1}{R_D} \frac{\partial p_D}{\partial R_D} + \alpha_D \right) dR dT$$

$$= \int_{\Delta T} \left(\frac{\partial p_D}{\partial R_D} \Big|_b - \frac{\partial p_D}{\partial R_D} \Big|_a + \frac{p_D}{R_D} \Big|_b - \frac{p_D}{R_D} \Big|_a - \int_{\Delta R} p_D d \frac{1}{R} + \alpha_D \cdot \Delta R \right) dT \quad (15)$$

采用中心差分格式, 离散项分别被估计为

$$\frac{\partial p_D}{\partial R_D} \Big|_b = \frac{p_B - p_P}{\Delta R_{PB}} \quad (16)$$

$$\frac{\partial p_D}{\partial R_D} \Big|_a = \frac{p_P - p_A}{\Delta R_{AP}}$$

$$\frac{p_D}{R_D} \Big|_b = \frac{(p_B - p_P)/2}{R_b} = \frac{(p_B - p_P)}{2R_b} \quad (17)$$

$$\frac{p_D}{R_D} \Big|_a = \frac{(p_P - p_A)/2}{R_a} = \frac{(p_P - p_A)}{2R_a}$$

$$\int_{\Delta R} p_D d \frac{1}{R} \approx \left(\frac{1}{R_b} - \frac{1}{R_a} \right) p_P \quad (18)$$

时间采用隐式格式, 即

$$\int_{\Delta T} \int_{\Delta R} \left(\frac{\partial^2 p_D}{\partial R_D^2} + \frac{1}{R_D} \frac{\partial p_D}{\partial R_D} + \alpha_D \right) dR dT$$

$$= \int_{\Delta T} \left(\frac{p_B - p_P}{\Delta R_{PB}} - \frac{p_P - p_A}{\Delta R_{AP}} + \frac{p_B - p_P}{2R_b} - \frac{p_P - p_A}{2R_a} - \left(\frac{1}{R_b} - \frac{1}{R_a} \right) p_P + \alpha_D \Delta R dT \right)$$

$$= \left(\frac{p_B^{n+1} - p_P^{n+1}}{\Delta R_{PB}} - \frac{p_P^{n+1} - p_A^{n+1}}{\Delta R_{AP}} + \frac{p_B^{n+1} - p_P^{n+1}}{2R_b} - \frac{p_P^{n+1} - p_A^{n+1}}{2R_a} - \left(\frac{1}{R_b} - \frac{1}{R_a} \right) p_P^{n+1} + \alpha_D \Delta R \right) \Delta T \quad (19)$$

同理, 等式右边离散为

$$\int_{\Delta T} \int_{\Delta R} \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{\partial p_D}{\partial T_D} dR dT = \frac{\Delta R}{C_D e^{2S}} (p_P^{n+1} - p_P^n) \quad (20)$$

综上所述, 把左右合起来为

$$\left(\frac{p_B^{n+1} - p_P^{n+1}}{\Delta R_{PB}} - \frac{p_P^{n+1} - p_A^{n+1}}{\Delta R_{AP}} + \frac{p_B^{n+1} - p_P^{n+1}}{2R_b} - \frac{p_P^{n+1} - p_A^{n+1}}{2R_a} - \left(\frac{1}{R_b} - \frac{1}{R_a} \right) p_P^{n+1} + \alpha_D \Delta R \right) \Delta T$$

$$= \frac{\Delta R}{C_D e^{2S}} (p_P^{n+1} - p_P^n) \quad (21)$$

整理并化简为线性方程组, 并把各结点标成统一形式为

$$\frac{1}{\Delta R_{i-1}} \left[\frac{1}{\Delta R_{i-1}} - \frac{1}{(R_{i-1} + R_i)} \right] p_{i-1}^{n+1}$$

$$+ \left[\frac{1}{\Delta R_{i-1}} \left(\frac{-1}{\Delta R_i} + \frac{-1}{\Delta R_{i-1}} - \frac{1}{(R_{i+1} + R_i)} \right) + \frac{1}{(R_{i-1} + R_i)} - \frac{1}{\Delta T_i C_D e^{2S}} \right] p_i^{n+1}$$

$$+ \frac{1}{\Delta R_{i-1}} \left[\frac{1}{\Delta R_i} + \frac{1}{(R_{i+1} + R_i)} \right] p_{i+1}^{n+1}$$

$$= -\alpha_D - \frac{p_i^n}{\Delta T_i \cdot C_D e^{2S}} \quad (22)$$

2.2 二维流动的有限体积求解方法

2.2.1 生成离散网格

有限体积法首先将求解区域划分成离散的控制容积, 本文将求解区域划分为非结构的三角形网格 (见图 3)。为理解方便和减小存储量, 本文所选用的是单元中心型格式。

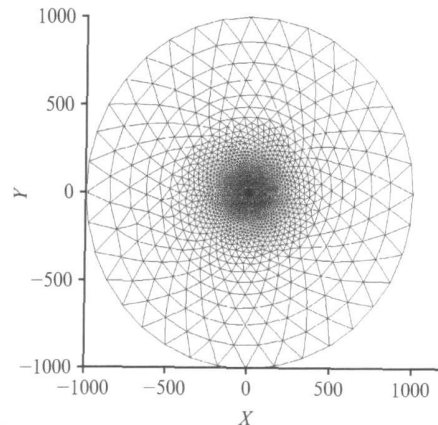


图3 离散网格

取其中的两个单元对其进行分析, 以 P 为形心的三角形单元进行分析 (见图 4), P、A 分别为三角形的形心, n 为边 ab 的外法向量, e_n 为边 ab 方向的向量, e_ξ 为 PA 方向的向量, n 与 e_ξ 的夹角为 θ 。

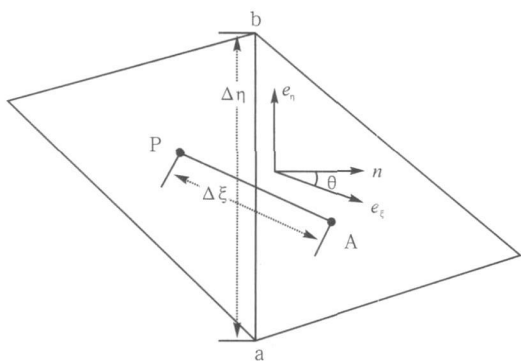


图4 离散网格单元

2.2.2 方程的离散

对(7)式进行时间和空间的离散,有限体积法是利用对时间和控制容积的积分来实现方程的时间离散和空间离散的,离散方程式为

$$\begin{aligned} & \iint_{\Delta V \Delta T} \left(\frac{\partial^2 p_D}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 p_D}{\partial Y^2} + \alpha_D \right) dT dV \\ &= \iint_{\Delta V \Delta T} \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{\partial p_D}{\partial T_D} dT dV \end{aligned} \quad (23)$$

式中: ΔV —— 控制容积的体积;

ΔT —— 时间间隔。

对上式的左边进行转换,并利用奥氏公式得

$$\begin{aligned} & \iint_{\Delta V \Delta T} \left(\frac{\partial^2 p_D}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 p_D}{\partial Y^2} + \alpha_D \right) dT dV \\ &= \iint_{\Delta T \Delta V} \text{div}(\text{grad} p_D) dV dT + \alpha_D \Delta T \cdot \Delta V \\ &= \sum_i \iint_{\Delta T \Delta A_i} n \cdot \text{grad} p_D dA_i dT + \alpha_D \Delta T \Delta V \end{aligned} \quad (24)$$

式中: n —— 外法向量;

ΔA_i —— 控制容积中任一面的面积,求各符号表示控制容积内的各面的和。

由于 PA 与 ab 不一定垂直,所以借助于夹角 θ ,把积分项拿出来单独分析,得

$$n \cdot \text{grad} p_D = \frac{\partial p_D}{\partial n} = \frac{\partial p_D}{\partial \xi} \cdot \cos \theta + \frac{\partial p_D}{\partial \eta} \tan \theta \quad (25)$$

$$\frac{1}{\cos \theta} = \frac{1}{n \cdot e_\xi} = \frac{n \cdot n}{n \cdot e_\xi} \quad (26)$$

$$\tan \theta = \frac{\sin \theta}{\cos \theta} = - \frac{e_\xi \cdot e_\eta}{e_\xi \cdot n}$$

$$n = \frac{\Delta Y_i}{\Delta A_i} i - \frac{\Delta X_j}{\Delta A_j} j = \frac{Y_b - Y_a}{\Delta \eta} i - \frac{X_b - X_a}{\Delta \eta} j \quad (27)$$

$$e_\xi = \frac{X_A - X_P}{\Delta \xi} i + \frac{Y_A - Y_P}{\Delta \xi} j \quad (28)$$

$$e_\eta = \frac{X_b - X_a}{\Delta \eta} i + \frac{Y_b - Y_a}{\Delta \eta} j \quad (29)$$

$$\frac{\partial p_D}{\partial \xi} = \frac{p_A - p_P}{\Delta \xi} \quad (30)$$

$$\frac{\partial p_D}{\partial \eta} = \frac{p_b - p_a}{\Delta \eta} \quad (31)$$

$$p_b = \frac{p_A + p_P + \dots}{N_1} \quad (32)$$

$$p_a = \frac{p_A + p_P + \dots}{N_2}$$

式中: N_1 —— 点 b 周围三角形的个数;

N_2 —— 点 a 周围三角形的个数。

所以,最后可得到如下离散方程,即

$$\begin{aligned} & \sum_i \left[\frac{n_i \cdot n_i \cdot \Delta A_i}{n_i \cdot e_\xi \cdot \Delta \xi} (p^{n+1} - p^{n-1}) \right. \\ & \left. - \frac{e_\xi \cdot e_\eta \cdot \Delta A_i}{n_i \cdot e_\xi \cdot \Delta \eta} (p^{b+1} - p^{a+1}) \right] + \alpha_D \Delta V \\ &= \frac{\Delta V_i}{C_D e^{2S} \cdot \Delta T} (p^{n+1} - p^n) \end{aligned} \quad (33)$$

3 煤层气试井理论曲线的特征分析

3.1 煤层气解吸系数对试井理论曲线的影响

为了分析煤层气解吸系数 α_D 对试井理论曲线的影响,分别计算了不同解吸系数 α_D 时的理论曲线(见图 5)。在封闭外边界条件下,分别取 $\alpha_D = -1 \times 10^{-6}$, $\alpha_D = -1.5 \times 10^{-6}$ 和 $\alpha_D = -2 \times 10^{-6}$ 。图中曲线 1 为 $\alpha_D = -1 \times 10^{-6}$ 时压力及压力导数双对数曲线;曲线 2 为 $\alpha_D = -1.5 \times 10^{-6}$ 时压力及压力导数双对数曲线;曲线 3 为 $\alpha_D = -2 \times 10^{-6}$ 时压力及压力导数双对数曲线。

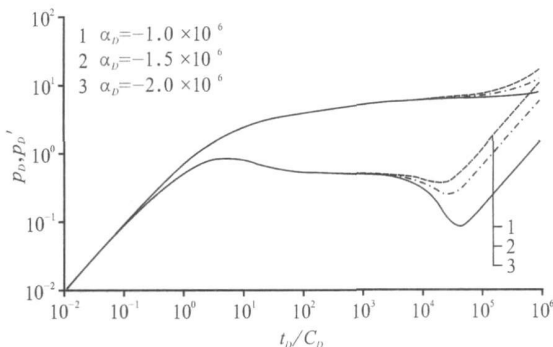


图5 解吸系数影响下双对数曲线图

从图 5 中可以看出,当解吸系数越大时,压力导数曲线下落的幅度越大,说明解吸系数越大,解吸的

量越大,从而缓解压力下降的幅度也就越大。

3.2 封闭条件下,不同边界距离对理论曲线的影响

假设在封闭外边界条件下,边界距离分别为 500 m、1000 m 和 3000 m 时压力变化情况如图 6 所示,曲线 1、2、3 分别代表边界距离为 500 m、1000 m 和 3000 m 的压力及压力导数分布曲线。

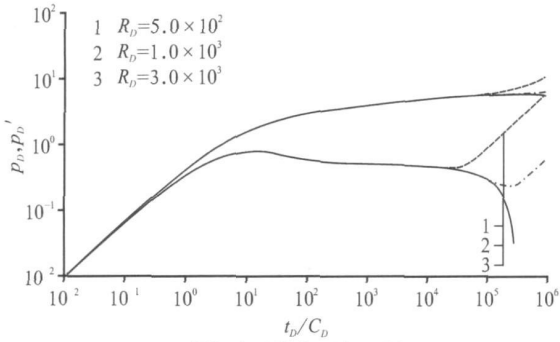


图6 封闭边界影响下的双对数曲线图

从图 6 可以看出,在开始阶段有一段曲线斜率为 1,是因为开始时井筒有一段井储效应阶段;接下来是表皮系数影响段,表现为压力导数曲线上存在一个“凸峰”;随着时间的增加,开始进入到径向流阶段,表现为压力导数都在 0.5 水平线上;然后表现出煤层气稳定解吸作用的影响,稳定解吸压力导数表现为下掉的特征;最后遇到边界;当遇到封闭边界时曲线向上翘,且斜率渐变为 1,说明达到了拟稳定状态。从图中看出,封闭边界的距离越小,压力导数曲线上翘越早,说明遇到边界的时间越早。

3.3 定压条件下,不同边界距离对理论曲线的影响

假设在外边界定压的条件下,边界距离分别为 500 m、1000 m 和 3000 m 时压力变化情况如图 7 所示,曲线 1、2、3 分别代表边界距离为 500 m、1000 m 和 3000 m 的压力及压力导数分布曲线。

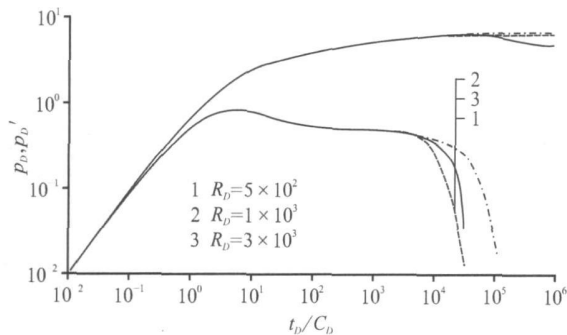


图7 定压边界影响下的双对数曲线图

从图 7 可以看出,与封闭时一样,在开始阶段有一段曲线斜率为 1,然后是表皮系数影响段,随着时

间的增加,开始进入到径向流阶段,压力导数都在 0.5 水平线上。然而对煤层气解吸作用的影响段表现并不明显,压力导数曲线一直下掉,只有从压力曲线上,才可以清楚看到煤层气解吸作用的影响,表现为压力曲线的下掉。

3.4 边界性质对理论曲线影响的分析

为了研究边界性质对理论曲线的影响,计算了封闭、定压、无限大边界 3 种情况下的煤层气井试井理论曲线如图 8、图 9 所示。图 8 为双对数理论曲线图,图 9 为半对数理论压力曲线。

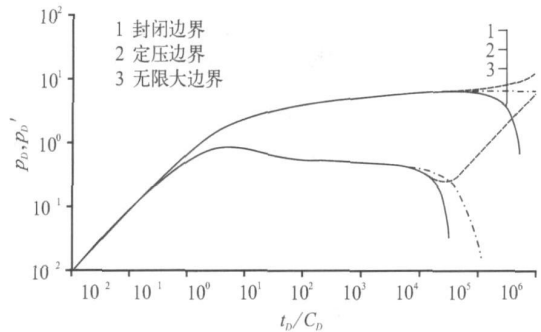


图8 边界性质影响下的双对数曲线

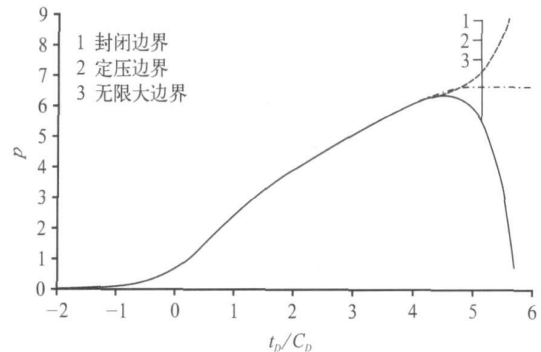


图9 边界性质影响下的半对数曲线

从图 8 的双对数理论曲线可以看出,在遇到边界前无论是封闭、定压边界还是无限大边界,其理论曲线都是一致的。当遇到封闭外边界时,无论煤层气的解吸作用如何影响,压力和压力导数理论曲线都是上翘的,并且最终趋向于达到斜率为 1 的拟径向流;同样,当遇到定压外边界时,无论煤层气的解吸作用如何影响,压力曲线总要区于稳定值,而压力导数曲线下掉;但是,当外边界为无限大时,由于解吸作用的存在,理论曲线会出现异常,即压力曲线会下掉,压力导数曲线下掉的速度更快,这是由于煤层气稳定解吸所造成的。

从图 9 的半对数理论曲线可以更明显的看出,边界性质对煤层气试井理论曲线的影响。图中黑色

的虚直线是常规分析方法所用的直线段。由此可以说明,在径向流之前,无论有无边界的影响计算所得到的理论曲线是一致的。在后期段不同边界性质条件下,解吸作用与边界性质对理论曲线的耦合影响表现的更为明显。

3.5 井筒存储系数与表皮系数对试井理论曲线的影响

为了研究井筒存储系数与表皮系数对试井理论曲线的影响,利用 Gringarten 提出的组合参数 $C_D e^{2S}$ 对封闭圆形外边界条件下试井理论曲线的特征进行研究,分别取 $C_D e^{2S} = 1$ 、 $C_D e^{2S} = 10$ 和 $C_D e^{2S} = 100$, 所得到的计算结果如图 10 所示。

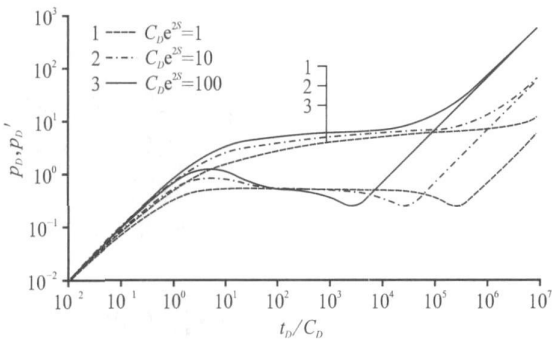


图 10 组合系数影响下的双对数曲线图

从图 10 可以看出,当 $C_D e^{2S}$ 变大时,理论曲线表现出以下特征: ①随着 $C_D e^{2S}$ 的增大,早期斜率为 1 的段持续的时间越长,说明井筒存储效应控制时间越长。②随着 $C_D e^{2S}$ 的增大,井筒存储结束后的压力导数上的“凸峰”逐渐增大,说明表皮系数的影响变得明显。③随着 $C_D e^{2S}$ 的增大,压力导数曲线上的 0.5 水平直线段逐渐缩短,由于稳定解吸引起的压力导数曲线上的“凹陷”逐渐前移,说明解吸作用的影响出现的越早。

4 结 论

(1) 通过对现在数值试井技术主要使用的数值计算方法优缺点的对比分析,说明了有限体积法求解煤层气扩散方程的优势。

(2) 建立了圆形区域煤层的一维径向流动和二维平面流动的煤层气井稳定解吸数值试井模型。

(3) 推导出了一维径向流动和二维平面流动煤层气井数值试井模型的有限体积法离散格式。

(4) 通过对求解结果的分析,详细讨论了解吸系数、边界距离、边界性质、组合系数等因素对试井理

论曲线的影响。

(5) 得到的理论曲线特征明显地反映了不同条件下煤层气井的压力变化规律,为煤层气试井资料的解释分析提供了理论依据,拓展了煤层气数值试井模型求解的计算方法,对煤层气数值试井的发展有积极的指导意义。

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] 吴洪彪,刘立明,陈钦雷,等. 四维试井理论研究[J]. 石油学报, 2003, 24(5): 57- 62.
- [2] 邵艳宏,陈仙江,张绍辉,赵海燕. 数值试井的研究现状及展望[J]. 内蒙古石油化工, 2009, (21): 26- 28.
- [3] Puchyr P J. A Numerical Well Test Model[c]. SPE21815, presented at the Rocky Mountain Regional Meeting and Low Permeability Reservoirs Symposium, Denver, Colorado, Apr 15, 16, 17, 1991.
- [4] Z E Heinemann *et al.* Modeling Reservoir Geometry With Irregular Grid[J]. SPE Reservoir Engineering, May, 1991.
- [5] Larry S K *et al.* Hybrid CVFEMethod for Flexible Grid Reservoir Simulation[J]. SPE Reservoir Engineering, Aug, 1994.
- [6] Santosh Vema *et al.* A Control Volume Scheme for Flexible Grid in Reservoir Simulation[J]. SPE 37999, 1997.
- [7] Rosalind A. The Green Element Method for Numerical Well Test Analysis. SPE 62916. SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Dallas, U. S. A. October, 2000.
- [8] 刘曰武,周蓉. 油气田开发中的数值试井分析[J]. 力学与实践, 2001, 24(增): 45- 50.
- [9] 刘立明,陈钦雷. 单相流数值试井模型. 油气井测试, 2001, 10(4): 11- 14.
- [10] 刘立明,陈钦雷,王光辉. 油气两相渗流压降数值试井模型的建立. 石油大学学报(自然科学版), 2001, 25(2): 42- 45.
- [11] 刘青山,段永刚,等. 用边界元法分析油藏不稳定渗流问题. 大庆石油地质与开发, 2004, 23(2): 36- 40.
- [12] 刘青山,段永刚,等. 用边界元法处理复杂油藏边界影响问题. 油气井测试, 2004, 13(5): 15- 19.
- [13] 吴明录,姚军. 多层油藏流线数值试井解释模型[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(5): 609- 615.
- [14] 王新海,张冬丽,李江龙. 含有大尺度裂缝、溶洞的缝洞型油藏的数值试井模型[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(6): 129- 135.

本文收稿日期: 2010- 10- 28 编辑: 刘振庆

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