

煤层气井气水两相分布不稳定试井模型¹⁾

牛丛丛* 刘曰武^{*,2)} 蔡强[†] 李海生[†]

^{*}(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

[†](北京工商大学计算机与信息工程学院, 北京 100048)

摘要 煤层气是一种高效清洁的非常规天然气资源, 其开采过程是一个排水降压采气的过程. 由于煤层气主要是以吸附态的形式存在于煤层中, 当煤层压力降低到临界解吸压力以下时煤层气从煤层中解吸出来并与水一起采出, 因此煤层中流体是气水两相分布的. 本文根据煤层气藏排采过程中的解吸特征, 通过考虑气水两相分布的渗透率关系, 提出了一种与解吸区域大小相关的煤层气井不稳定试井模型. 该模型较好地描述了煤层气排采过程中煤层内气水的流动状态, 采用分区模式对气水两相进行描述. 通过有限体积法求解了所建立的试井模型, 计算得到了煤层气井气水两相分布不稳定试井理论曲线, 分析了煤层气解吸系数、解吸复合半径、气水饱和度分布等对试井理论曲线的影响.

关键词 煤层气, 两相流, 有限体积法, 试井

中图分类号: O357.3 文献标识码: A DOI: 10.6052/1000-0879-13-161

TRANSIENT WELL TEST MODEL FOR THE WELL WITH GAS AND WATER DISTRIBUTED IN COALBED¹⁾

NIU Congcong^{*,2)} LIU Yuewu^{*} CAI Qiang[†] LI Haisheng[†]

^{*}(Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

[†](School of Computer and Information Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract Coalbed methane (CBM) is a kind of efficient and clean unconventional gas resources, and its producing process is mainly drawing down the formation pressure by draining water. CBM is primarily adsorbed in the coal rather than the most conventional gases stored in the pore space. CBM is desorbed from the coal when the coal bed pressure is lower than the critical desorption pressure, and is produced out with water. So, the fluids in coalbed are gas and water in different distributions. This paper introduced a set of transient well test model on the basis of desorption characteristic of CBM, the permeability relationships depended on gas and water distributions and the size of desorption area. The flow state of gas and water was described very well by using the separated areas in the CBM producing process. The model was solved by using finite volume method(FVM), and its type curves were obtained. The effects of the desorption coefficient, the desorption composite radius, the saturation distribution of gas and water, etc on type curves are analyzed. The research results of this study are of great guiding significance to develop CBM economically.

Key words CBM (coalbed methane), two-phase flow, FVM (finite volume method), well test

2013-04-22 收到第 1 稿, 2013-09-24 收到修改稿.

1) 国家重大专项 (2011ZX05038) 及中石油股份公司科技专项煤层气项目资助.

2) 刘曰武, 男, 研究员, 主要从事渗流力学及其相关的油气藏工程及地质灾害研究. E-mail: 504600650@qq.com

引言

试井是获得煤层气储层动态特性的重要手段之一,它可以为产能和采收率预测提供煤层渗透率、表皮系数和原始煤层压力以及压裂增产措施所需要的原地应力和破裂压力等地层参数,还可以进行压裂效果评价,同时也能为井网布置提供基础资料。

目前常规油气田的试井工艺和解释方法已经发展到了比较成熟的阶段,但是,在煤层气藏试井方面还存在许多未解决的问题,如煤层气田开发过程中煤层气藏的变形问题、煤层气的解吸规律变化问题以及煤层气不同开发阶段储层中流体分布的变化问题等。对于处于开发时间很长的煤层气藏,由于井附近地层压力低于解吸压力,井周处于两相流动状态,必须研究其适合的测试工艺和资料分析方法。对于处于不同开发阶段的煤层气井产能分析和预测要运用不同的方法,特别是开发过程中研究长期流压监测分析方法,对于分析储层物性变化和压力变化以及产能预测都具有重要意义。

1982年,四川石油勘探开发研究院根据四川气田大多数含有地层水的实际情况,建立了符合四川气藏的气水两相数学模型,较全面地描述了可压缩气水两相流体(不互溶)在非均质弹性孔隙介质内的渗流过程,用数值模拟的方法反映了气田开发的全过程^[1]。1995年,大庆石油学院的刘振宇等^[2]利用H函数建立了油气两相条件下的试井理论模型,在油田开发的中后期由于地层压力的下降,油中的气不断分离出来,并逐渐形成流动的气相,将对压力变化特性产生较大影响。这时若仍用单相流的理论模型,就会导致试井分析结果的较大误差,并且该方法的准确程度受油田高压物性参数影响。2000年,邓英尔等^[3]建立了双重介质油藏中垂直裂缝井两相流体渗流数学模型,提出将水驱油运动的前沿作为活动边界处理的新思想,用有限差分和外推法求解带初边条件的积分-微分方程,但这种方法对气水两相流动适应性较差。2007年,杨勤涛等^[4]从渗流力学的基本原理出发,基于气水两相物质平衡方程和状态方程,结合运用两相拟压力的方法,建立了气水两相不稳定试井模型。考虑井筒储集效应和气体高速渗流的非达西效应的影响,得出无因次拟压力及其导数与无因次时间之间的关系,制作了气水两相流试井理论图版。

随着煤层气产业的兴起,两相流理论逐渐应用到煤层气工程当中。2000年,刘建军^[5]根据多相流

体力学及达西定律,给出了煤层气-水两相渗流方程。通过数值计算,比较了考虑耦合效应和把煤体处理为刚性模型时的差异,该项研究对于煤层气开采的数值模拟有指导意义,但无法适应于气水两相流条件下的煤层气井不稳定试井分析。同年,王锦山^[6]分析了储气煤层中水和煤层气的赋存状态及影响渗透率的因素,探讨了水-气两相流在煤层中的运移规律,建立了两相流相互作用的数学模型,对两相流在煤中的相对渗透率和煤层气在水中的溶解度进行了试验研究,找出了它们的规律,最后指出了地下水对煤层气赋存及运移规律的作用和影响。2006年,王锦山^[7]进行了煤层气储层两相流渗透率的试验,利用实验室测定方法,对煤岩的绝对渗透率、相对渗透率、相渗透率和水-气相对渗透率进行了研究,提出了气、水两相渗透率之和小于气或水的绝对渗透率,渗透率与试件的层理方向存在密切关系的结论。2008年,郭永存等^[8]考虑煤层气渗流场、温度场、变形场耦合关系,根据多相流体达西渗流定律、质量守恒定律、多孔介质弹塑性理论、有效应力原理、传热学理论建立了煤层气的气、水两相流阶段渗流方程、变形方程及温度场方程,给出了数值求解渗流方程的定解条件,得到了煤层气在气、水两相流阶段热流固渗流数学模型。2011年,胡小虎等^[9]参照油藏的压力平方法,建立了适合煤层气藏的气-水两相渗流试井解释方法。用该方法对煤层气数值模拟的试井数据进行了解释,得出了气、水相的渗透率和表皮系数等数值。

本文根据煤层气藏排采的解吸特征,通过考虑气水两相分布的渗透率关系,提出了一种与解吸区域大小相关的煤层气井不稳定试井模型,该模型较好地描述了煤层气排采过程中煤层内气水的流动状态。由于煤层气的解吸是从井底开始的,因此井底附近含气量较高,煤层解吸区内含水 and 气两相,未解吸区域中只有水相。随着煤层气井的生产时间增加,高含气区逐渐向外扩展,从而可以采用分区的模式对气水两相进行描述。

1 气水两相分布的主要特征

煤层气藏中的气水两相分布在不同排采阶段的变化,如图1所示。当煤层气藏压力因排水使静水压力降低时,气藏内气体产出要经过3个阶段:第1阶段为脱水降压阶段,主要产水,随着压力降到临界解吸压力以下,气饱和度增加,气相渗透率提高,并

口开始产气并逐渐上升. 气水产量主要取决于气、水相对渗透率的变化及甲烷解吸压力与煤层压力之间的关系的变化. 第 2 阶段为稳定生产阶段, 产气量相对稳定, 产水量逐渐下降, 一般为高峰产气阶段. 第 3 阶段为气产量下降阶段, 此阶段随着压力下降, 产气量下降, 并出少量水或微量水. 随着压力降低, 井底将会出现非饱和流及两相流状态, 而目前常规不稳定试井数据分析方法大都基于单相流体流动, 故研究对于初始开发的煤层气藏的测试工艺, 尽量使流体在井筒周围避免出现非饱和流状态及两相流状态, 这是因为非饱和流状态及两相流会导致煤层甲烷气井的测试分析增加困难或无效.

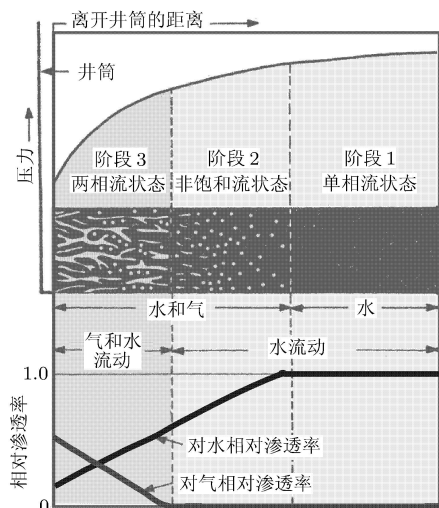


图 1 不同排采阶段的煤层中的气水两相分布变化

根据不同排采阶段的煤层中的气水两相分布变化特征, 首先要确定气水两相分布与渗透率的关系, 在此基础上才有可能建立煤层气气水两相流的不稳定试井模型.

1.1 煤层气饱和度分布特征 $S_g(r)$ 的描述

根据目前数值试井技术特点和不同排采阶段煤层中的气水两相分布变化特征, 首先使用的是两种基本的特征变化规律, 即煤层气饱和度两区阶跃分布及两区线性分布.

本文根据煤层气藏排采过程中的解吸特征, 通过考虑气水两相分布的渗透率关系, 提出了一种与解吸区域大小相关的煤层气井不稳定试井模型. 该模型较好地描述了煤层气排采过程中煤层内气水的流动状态. 由于煤层气的解吸是从井底开始的, 因此井底附近含气量较高, 煤层解吸区内含水 and 气两相, 未解吸区域中只有水相.

(1) 两区阶跃分布模型

煤层气开发初期, 解吸区域不大. 在解吸区域内可以认为气体饱和度是一个基本恒定的常数, 因此此时期的煤层中的渗流模型可以用阶跃函数进行描述. 含气饱和度函数描述为

$$S_g(r) = \begin{cases} S_{g1}, & r_w < r < r_a \\ 0, & r_a < r \end{cases}$$

式中: $S_g(r)$ 为含气饱和度函数, S_{g1} 是解吸区域中的含气饱和度, %; r_w 是井筒半径, m; r_a 是解吸区域半径, m; r 是距井筒距离, m. 图形方式描述, 如图 2 所示.

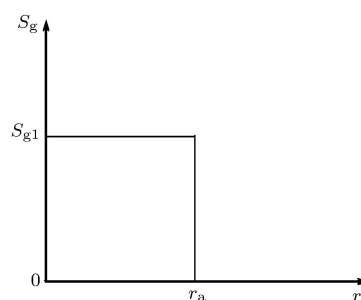


图 2 S_g 两区阶跃分布

(2) 两区线性分布模型

随着煤层气藏开发的深入, 解吸区域不断扩大, 近井区域煤层气含量逐渐增大, 而远离井筒区域的解吸前缘煤层气含量较低, 近似为由高到低的线性变化规律, 解吸前缘以外则为纯水区. 因此含气饱和度函数描述为

$$S_g(r) = \begin{cases} S_{g1} - \frac{S_{g1}}{r_a} \cdot r, & r_w < r < r_a \\ 0, & r_a < r \end{cases}$$

图形方式描述, 如图 3 所示.

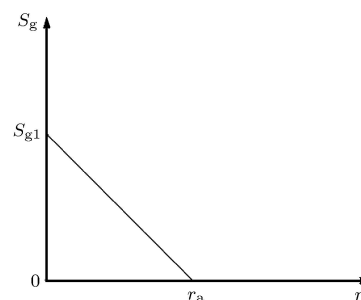


图 3 S_g 两区线性分布

1.2 物理模型

(1) 煤层为均匀各向同性无限地层, 煤层气井以定产量恒定生产.

(2) 煤层中的流体为弱可压缩、定常黏度的牛顿流体.

(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, 煤层气的解吸分为稳定解吸和不稳定解吸, 不考虑温度变化对流动的影响.

(5) 煤层内含水和气, 煤层气分布符合上述中的解吸区域内外分布特征.

(6) 忽略重力的影响, 不考虑其他物理化学的影响.

1.3 数学模型

根据煤层气渗流的物理描述, 建立了煤层气气水两相流动的渗流模型, 其特点在于除了考虑煤层气的稳定和不稳定解吸特征外, 考虑了煤层气解吸后在煤层中的分布特征以及由此引起的流动特征的变化. 通过流体流度对流动阻力的描述, 形象地刻画了煤层气在煤层中的气水两相流特征. 具体数学模型如下:

控制方程

$$\frac{\partial^2 P_D}{\partial x_D^2} + \frac{\partial^2 P_D}{\partial y_D^2} + \alpha_{1D} + \alpha_{2D} (P_D - P_{cD}) = \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{F S_{gD}(R_D)}{\lambda_{tD}(R_D)} \frac{\partial P_D}{\partial T_D} \quad (1)$$

无量纲饱和度分布综合函数为

$$F S_{gD}(R_D) = 1 + S_g(R_D) \frac{C_g - C_w}{C_t} \quad (2)$$

无量纲水相相对渗透率函数为

$$K_{rw}(R_D) = (1 - S_g(R_D))^3 \left(\frac{1 - S_g(R_D) - S_{wc}}{1 - S_{wc}} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (3)$$

无量纲气相相对渗透率函数为

$$K_{rg}(R_D) = \left(1 - \frac{1 - S_g(R_D) - S_{wc}}{1 - S_{wc}} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{1 - S_g(R_D) - S_{wc}}{1 - S_{wc}} \right)^{\frac{1}{4}} S_w^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

无量纲气水两相流度函数为

$$\lambda_{tD}(R_D) = \frac{k_e(R_D)}{\mu_e(R_D)} = \frac{k_{rg}(R_D)}{\mu_g(R_D)} + \frac{k_{rw}(R_D)}{\mu_w(R_D)} \quad (5)$$

初始条件

$$P_D(T_D = 0) = 0 \quad (6)$$

内边界条件

$$\left. \frac{\partial P_D}{\partial R_D} \right|_{R_D=1} = -1 + \frac{dP_{wD}}{dT_D} \quad (7)$$

无限大外边界条件

$$P_D |_{R_D \rightarrow \infty} = 0 \quad (8)$$

其中, C 是井筒存储系数, m^3/MPa ; C_D 是无量纲井筒存储系数, $C_D = \frac{1.592C}{\phi h C_t r_w}$; C_g 是气体的压缩系数, m^3/MPa ; C_w 是水的压缩系数, m^3/MPa ; C_t 是总的压缩系数, m^3/MPa ; S_{wc} 是束缚水饱和度, %; S_w 是含水饱和度, %; P_D 是无量纲压力, $P_D = \frac{kh(P_i - P)}{1.842 \times 10^{-3} q \mu_e B}$; P_{cD} 是无量纲临界压力, $P_{cD} = \frac{kh(P_i - P_c)}{1.842 \times 10^{-3} q \mu_e B}$; P_{wD} 是无量纲井底压力, $P_{wD} = \frac{kh(P_i - P_w)}{1.842 \times 10^{-3} q \mu_e B}$; P 是地层压力, MPa ; P_i 是地层原始压力, MPa ; P_w 是井底压力, MPa ; P_c 是临界压力, MPa ; t_D, T_D 是无量纲时间, $t_D = \frac{3.6kt}{\phi \mu_e C_t r_w^2}$, $T_D = \frac{t_D}{C_D}$; r 是距离, m ; r_w 是井筒半径, m ; r_{we} 是有效井径, $r_{we} = r_w \cdot e^{-S}$; R_D 是无量纲距离, $R_D = \frac{r}{r_{we}}$; α_1 是临界压力条件下的稳定解吸量, m^3/d ; α_{1D} 是无量纲稳定解吸系数, $\alpha_{1D} = -\frac{\alpha_1 r_{we}^2 kh}{1.842 \times 10^{-3} q \mu_e B}$; α_2 是单位压力下的不稳定解吸量, $(m^3/d)/MPa$; α_{2D} 是无量纲不稳定解吸系数, $\alpha_{2D} = \alpha_2 r_{we}^2$; B 是体积系数, m^3/m^3 ; h 是地层有效厚度, m ; k 是油藏渗透率, μm^2 ; k_e 是有效渗透率, μm^2 ; k_{rg} 是气相相对渗透率, 无量纲; k_{rw} 是水相相对渗透率, 无量纲; q 是日产量, m^3/d ; S 是表皮系数, 无量纲; t 是时间, h ; ϕ 是油藏孔隙度, 无量纲 (小数); μ 是地层中流体的黏度, $mPa \cdot s$; μ_w 是水的黏度, $mPa \cdot s$; μ_g 是煤层气的黏度, $mPa \cdot s$; μ_e 是等效流体的黏度, $mPa \cdot s$.

2 数学模型的求解方法

有限体积格式可分为单元中心型和节点中心型两类, 本文采用单元中心型格式求解. 首先对煤层气井气水两相流控制方程进行离散, 如图 4 为无限大外边界情况下所离散而成的三角网格. 图 5 为离散网格中的两个单元, 对其进行分析.

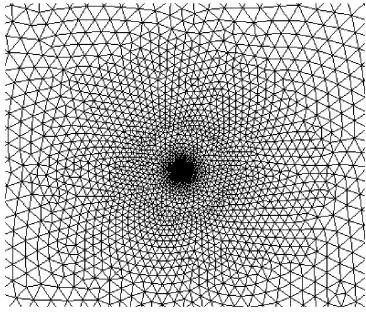


图 4 离散网格单元

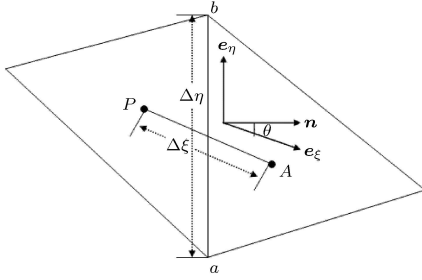


图 5 有限体积计算单元

根据上述分析, 有限体积法的求解过程为

$$\int_{\Delta T_D} \int_{V_D} \frac{\partial^2 P_D}{\partial x_D^2} + \frac{\partial^2 P_D}{\partial y_D^2} + \alpha_{1D} + \alpha_{2D}(P_D - P_{cD}) dV_D dT_D = \int_{\Delta T_D} \int_{\Delta V_D} \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{F S_{gD}(R_D)}{\lambda_{tD}(R_D)} \frac{\partial P_D}{\partial T_D} dV_D dT_D \quad (9)$$

参考图 5 中的变量标记, 有限体积计算公式为

$$\sum_{\text{all perface}} \left[\frac{\Delta A_{iD}}{\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{e}_{\xi_i} \cdot \Delta \xi_i} (P_{AD}^{m+1} - P_{PD}^{m+1}) - \frac{\mathbf{e}_{\xi_i} \cdot \mathbf{e}_{\eta_i} \cdot \Delta A_{iD}}{\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{e}_{\xi_i} \cdot \Delta \eta_i} (P_{bD}^{m+1} - P_{aD}^{m+1}) \right] + \left[\alpha_{1D} + \alpha_{2D}(P_{PD}^{m+1} - P_{cD}) \right] \Delta V_D = \frac{\Delta V_D}{C_D e^{2S}} \frac{F S_{gD}(R_D)}{\lambda_{tD}(R_D)} \frac{P_{PD}^{m+1} - P_{PD}^m}{\Delta T_D} \quad (10)$$

其中, P, A 分别为两个三角形的中心, ξ, η 为计算单元的局域坐标, 向量 \mathbf{e}_η 为 ab 方向的切向量, 向量 \mathbf{e}_{η_i} 为三角形单元第 i 边方向的切向量, 向量 \mathbf{e}_ξ 为 PA 方向的切向量, 向量 \mathbf{e}_{ξ_i} 为与第 i 边相邻两个三角形中心连线的切向量, 向量 \mathbf{n} 为向量 \mathbf{e}_η 的法向量, 向量 \mathbf{n}_i 为向量 \mathbf{e}_{η_i} 的法向量, $\Delta \xi_i$ 为与第 i 边相邻 2 个三角形中心连线的长度, $\Delta \eta_i$ 为第 i 边的长度, θ 为向量 \mathbf{n}_i 与向量 \mathbf{e}_{ξ_i} 的夹角, ΔT_D 是无量

纲时间步长, ΔV_D 是无量纲单元体积, ΔA_{iD} 是第 i 边的无量纲表面积, $P_{AD}, P_{PD}, P_{aD}, P_{bD}$ 分别为点 A, P, a, b 处的无量纲压力, m 为迭代次数。

利用边界条件可计算得到不同时间地层中各点的压力变化。

3 模型的基本理论解及曲线特征分析

3.1 煤层气稳定解吸系数 α_{1D} 对试井理论曲线的影响

稳定解吸系数是指煤层中压力降低到临界压力时, 煤层中煤层气解吸量的描述, 定义为 $\alpha_{1D} = -\frac{\alpha_{1r_{we}}^2 kh}{1.842 \times 10^{-3} q \mu B}$ 。为了分析煤层气稳定解吸系数 α_{1D} 对试井理论曲线的影响, 分别计算了不同解吸系数 α_{1D} 时的理论曲线, 如图 6 所示 (图中横坐标为无量纲时间, 纵坐标为无量纲压力及无量纲压力导数), 有效黏度取 0.8, 无量纲复合半径 $R_C = 600$, $\alpha_{2D} = -1 \times 10^{-9}$ 。在无限大外边界条件下, 分别取 $\alpha_{1D} = 0, -5 \times 10^{-10}$ 和 -1×10^{-9} 。

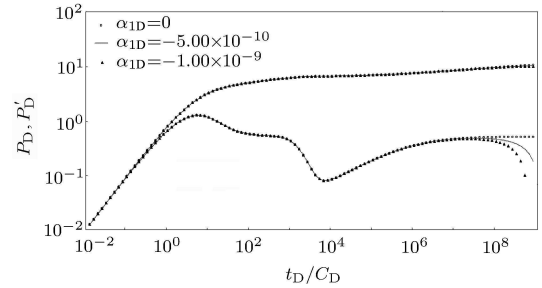


图 6 解吸系数影响下双对数曲线图

从图 6 中可以看出, 在煤层气解吸的早期, 由于井储的作用, 有一段斜率为 1 的直线; 随后压力导数曲线有一个凸峰, 是因为表皮系数的影响; 接下来有一段径向流, 当遇到复合半径, 压力导数线开始下掉, 说明煤层的流动性变强, 随着压力的传播, 压力导数开始上翘, 逐渐达到平衡状态; 后期表现为解吸系数的影响, 当解吸系数越小时, 压力曲线下落的幅度越大, 压力导数曲线下落的幅度越大, 说明解吸量越大, 缓解压力下降的幅度也就越大。

3.2 煤层气不稳定解吸系数 α_{2D} 对试井理论曲线的影响

不稳定解吸系数是指煤层中压力降低到临界压力以下时, 煤层中煤层气解吸量随压力变化的描述, 定义为 $\alpha_{2D} = \alpha_{2r_{we}}^2$ 。为了分析煤层气不稳定解吸系数 α_{2D} 对试井理论曲线的影响, 分别计算了

不同解吸系数 α_{2D} 时的理论曲线,如图 7 所示(图中横坐标为无量纲时间,纵坐标为无量纲压力及无量纲压力导数),有效黏度取 0.8,无量纲复合半径 $R_C = 600$, $\alpha_{1D} = 1 \times 10^{-10}$. 在无限大外边界条件下,分别取 $\alpha_{2D} = 0, -1 \times 10^{-9}$ 和 -1×10^{-8} .

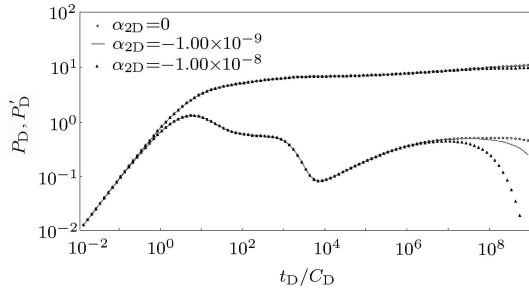


图 7 解吸系数影响下双对数曲线图

从图 7 中可以看出,在煤层气解吸的早期,由于井储的作用,有一段斜率为 1 的直线;随后压力导数曲线有一个凸峰,是因为表皮系数的影响;接下来有一段径向流,当遇到复合半径,压力导数线开始下掉,说明煤层的流动性变强,随着压力的传播,压力导数开始上翘,逐渐达到平衡状态;后期表现为解吸系数的影响,当解吸系数越小时,压力曲线下落的幅度越大,压力导数曲线下落的幅度越大,说明解吸量越大,缓解压力下降的幅度也就越大。

3.3 有效黏度 μ_e 对试井理论曲线的影响

为了分析煤层气有效黏度 μ_e 对试井理论曲线的影响,分别计算了不同有效黏度 μ_e 的理论曲线,如图 8 所示(图中横坐标为无量纲时间,纵坐标为无量纲压力及无量纲压力导数),解吸系数 $\alpha_{1D} = -1 \times 10^{-10}$, $\alpha_{2D} = -1 \times 10^{-10}$,无量纲复合半径 $R_C = 600$. 在无限大外边界条件下,分别取 $\mu_e = 0.8, 0.5$ 和 0.2 .

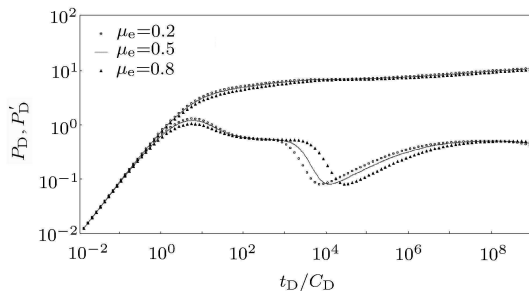


图 8 有效黏度影响下双对数曲线图

从图 8 中可以看出,在煤层气解吸的早期,由于井储的作用,有一段斜率为 1 的直线;随后压力导数

曲线有一个凸峰,是因为表皮系数的影响,同时有效黏度越小,凸峰越低.接下来有一段径向流,压力导数为水平直线段.当遇到复合半径,开始出现凹谷,并且有效黏度越小时,遇到复合半径的时间越晚,压力导数曲线出现凹谷下掉时间越晚,说明有效黏度越小煤层气流动的越慢.后期因为有效解吸系数的影响,压力导数曲线下落.

3.4 复合半径 R_C 对试井理论曲线的影响

复合半径为煤层气井到煤层复合区域边界的径向距离.煤层复合半径内与煤层复合半径外,由于解吸作用的影响使得内区为气水两相分布,而外区为单相水.为了分析煤层气复合半径 R_C 对试井理论曲线的影响,分别计算了不同复合半径 R_C 的理论曲线,如图 9 所示(图中横坐标为无量纲时间,纵坐标为无量纲压力及无量纲压力导数),解吸系数 $\alpha_{1D} = -1 \times 10^{-10}$, $\alpha_{2D} = -1 \times 10^{-10}$,有效黏度 $\mu_e = 0.8$. 在无限大外边界条件下,分别取 $R_C = 600, 800$ 和 1000 .

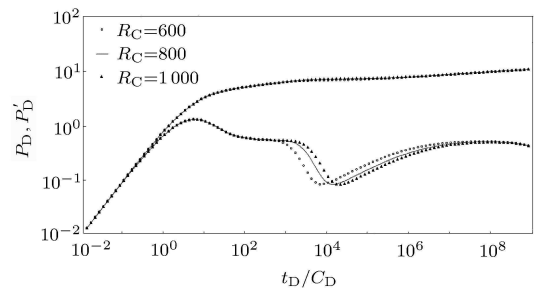


图 9 复合半径影响下双对数曲线图

从图 9 中可以看出,在煤层气解吸的早期,由于井储的作用,有一段斜率为 1 的直线;随后压力导数曲线有一个凸峰,是因为表皮系数的影响;接下来有一段径向流,当遇到复合半径,压力导数线开始下掉,说明煤层的流动性变强,随着压力的传播,压力导数开始上翘,逐渐达到平衡状态,同时,复合半径越大时,遇到复合半径的时间越晚;后期因为有效解吸系数的影响,压力导数曲线下落.

3.5 饱和度分布对试井理论曲线的影响

为了分析煤层气饱和度分布对试井理论曲线的影响,分别计算了两区阶跃分布和两区线性分布的理论曲线,如图 10 所示(图中横坐标为无量纲时间,纵坐标为无量纲压力及无量纲压力导数),解吸系数 $\alpha_{1D} = -1 \times 10^{-10}$, $\alpha_{2D} = -1 \times 10^{-10}$,有效黏度 $\mu_e = 0.8$,无量纲复合半径 $R_C = 600$.

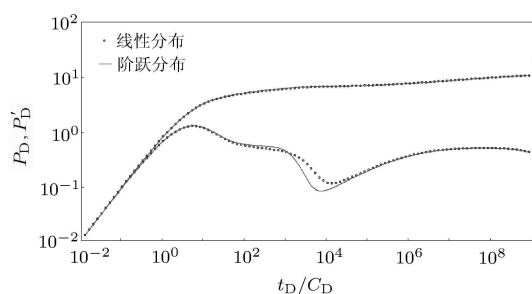


图 10 饱和度分布影响下双对数曲线图

从图 10 中可以看出, 在煤层气解吸的早期, 由于井储的作用, 有一段斜率为 1 的直线; 随后压力导数曲线有一个凸峰, 是因为表皮系数的影响; 接下来有一段径向流, 当遇到复合半径, 压力导数线开始下掉, 阶跃式分布第一径向流较线性分布更明显; 后期因为有解吸系数的影响, 压力导数曲线下落。

4 结 论

(1) 根据煤层气藏的排采的解吸特征, 通过建立考虑气水两相分布的渗透率关系, 提出了一套与解吸区域大小相关的煤层气井不稳定试井模型。该模型较好地描述了煤层气排采过程中煤层内气水的流动状态。

(2) 利用有限体积方法对建立的模型进行了求解, 计算得到了煤层气井气水两相分布不稳定试井理论曲线。试井理论曲线主要包括 5 个阶段: 井储段、表皮段、第一径向流段、气水两相分布影响段和解吸系数最终影响段。

(3) 分析了煤层气解吸系数、解吸复合半径、气水饱和度分布等对试井理论曲线的影响。这些参数的获取对煤层气生产有积极的指导意义。

参 考 文 献

- 1 张厚清, 涂贵全, 王恒其等. 气水两相渗流数学模型和气藏面积模拟方法. 天然气工业, 1982, (1): 52-60 (Zhang Houqing, Tu Guiquan, Wang Hengqi, et al. The seepage model of gas-water two-phase flow and the simulation method of the gas reservoir area. *Natural Gas Industry*, 1982, (1): 52-60 (in Chinese))

- 2 刘振宇, 刘洋, 翟云芳. 油气两相渗流的试井解释方法. 石油钻采工艺, 1995, 17(6): 52-60 (Liu Zhenyu, Liu Yang, Zhai Yunfang. Well test interpreter method for oil-gas two-phase flow. *Oil Drilling & Production Technology*, 1995, 17(6): 52-60 (in Chinese))
- 3 邓英尔, 刘慈群, 王允诚. 考虑吸渗的双重介质中垂直裂缝井两相渗流. 重庆大学学报 (自然科学版), 2000, 23(S1): 86-89 (Deng Ying'er, Liu Ciqun, Wang Yuncheng. Two phase flow through double-porosity media with vertically fractured well working. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2000, 23(S1): 86-89 (in Chinese))
- 4 杨勤涛, 成绥民, 成珍等. 气水两相流试井解释理论与图版研究. 油气井测试, 2007, 16(3): 5-7, 11 (Yang Qintao, Cheng Suimin, Cheng Zhen, et al. The research of well test theoretical model and plate in gas and water two-phase flow field. *Well Testing*, 2007, 16(3): 5-7, 11 (in Chinese))
- 5 刘建军. 煤层气-水两相流固耦合渗流的数值模拟. 第六次全国岩石力学与工程学术大会, 武汉, 中国, 2000 (Liu Jianjun. Simulation of coalbed methane and water fluid-solid coupling flow. The 6th China National Congress of Rock Mechanics and Engineering, Wuhan, China, 2000 (in Chinese))
- 6 王锦山. 煤层气矿藏中水-气两相流作用关系的基本理论及试验研究. [硕士论文]. 辽宁: 辽宁工程技术大学, 2000 (Wang Jinshan. Basic theory and test research about action relation of water-gas two-phase flow in coal-bed methan. [Master Thesis]. Liaoning: Liaoning Technical University, 2000 (in Chinese))
- 7 王锦山. 煤层气储层两相流渗透率试验研究. 西安科技大学学报, 2006, 36(1): 24-26, 103 (Wang Jinshan. Experimental research on permeability of double state flow in CBM reservoir. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2006, 36(1): 24-26, 103 (in Chinese))
- 8 郭永存, 王仲勋, 胡坤. 煤层气两相流阶段的热流固耦合渗流数学模型. 天然气工业, 2008, 28(7): 73-74 (Guo Yongcun, Wang Zhongxun, Hu Kun. A mathematical model of thermo-hydro-mechanical coupling in two-phase stage of coalbed methane. *Natural Gas Industry*, 2008, 28(7): 73-74 (in Chinese))
- 9 胡小虎, 郑世毅, 胡素明等. 用压力平方法解释煤层气藏气-水两相渗流试井. 石油天然气学报 (江汉石油学院学报), 2011, 33(2): 118-122 (Hu Xiaohu, Zheng Shiyi, Hu Suming, et al. Application of quadratic pressure method in well test interpretation of gas-water two-phase flow in coal seam. *Journal of Oil and Gas Technology (J JPI)*, 2011, 33(2): 118-122 (in Chinese))

(责任编辑: 胡漫)