

# 煤层中双重孔隙介质渗流理论的应用

蔡强<sup>1</sup>, 牛丛丛<sup>1</sup>, 刘曰武<sup>2</sup>, 李海生<sup>1</sup>

1. 北京工商大学计算机与信息工程学院, 北京 100048
2. 中国科学院力学研究所环境力学重点实验室, 北京 100190

**摘要** 考虑煤层气稳定解吸和不稳定解吸特征, 提出了两类窜流方式不同的双重孔隙介质煤层不定常渗流模型——双重孔隙介质煤层拟稳态和不稳态窜流不定常渗流模型。用有限体积法对其求解, 并分析了两类模型在不同地质参数情况下的特征曲线。结果表明, 稳定解吸和不稳定解吸现象的存在都延缓了煤层中压力波的传播; 解吸系数的增大使煤层压降变缓, 且在压力和压力导数曲线上表现为边界距离的增大。对于不同的煤层, 当窜流系数过大或过小, 或煤层储能系数过大时, 计算得到的理论曲线不能表现出双重孔隙介质特征。这与现场测试资料曲线较难出现双重孔隙介质特征一致, 从而找到了现场煤层测试难以出现双重介质特征问题的根源。

**关键词** 煤层气; 双重孔隙介质; 渗流; 解吸; 有限体积法

**中图分类号** TQ050.4\*25

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.24.001

## Theory of Dual-porosity Media in Coal Bed Methane and Its Application

CAI Qiang<sup>1</sup>, NIU Congcong<sup>1</sup>, LIU Yuewu<sup>2</sup>, LI Haisheng<sup>1</sup>

1. School of Computer and Information Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China
2. Key Laboratory of Environment Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

**Abstract** Considering the effects of both steady and unsteady desorption of Coal Bed Methane (CBM), two kinds of dual-porosity unsteady seepage models are developed, including pseudo-steady cross-flow model and dual-porosity unsteady cross-flow model. The two models are solved by finite volume method and their characteristic curves are analyzed by considering different geological parameters. The calculation results show that both steady desorption and unsteady desorption of CBM delay the propagation of pressure wave; the increase of CBM desorption coefficients makes the pressure draw down slowly in the coalbed, it manifests the increase of boundary distance in pressure and pressure derivative curve. For different coalbeds, when either the cross-flow flow coefficient or the fracture storage coefficient is oversize, the dual-porosity media characters in theoretical curves will be covered up. The fact is consistent with the field test data which are difficult to appear the dual-porosity media characters. Therefore the root of the problem is discovered based on the research, while the field test data is hard to show the dual-porosity media characters.

**Keywords** CBM; dual-porosity; seepage; desorption; finite volume method

### 0 引言

具有裂缝和孔隙两种类型孔隙的多孔介质称为双重孔隙介质。该类介质中裂缝主要作为流体的流动通道, 孔隙主要作为流体的储集空间, 裂缝和基质的渗透率差异较大。根

据双重孔隙介质的概念, 煤层具有大量微孔以及连接微孔的节理和裂隙, 且孔隙的渗透率一般远小于裂隙的渗透率, 因此, 多数煤层可以看作双重孔隙介质。

煤层气藏与常规的油藏和天然气藏不同, 煤层气大部分

收稿日期: 2012-03-28; 修回日期: 2012-07-23

基金项目: 国家十二五科技重大专项(2011ZX05038-003)

作者简介: 蔡强, 教授, 研究方向为科学计算可视化, 电子邮箱: caiq@th.btbu.edu.cn; 刘曰武(通信作者), 研究员, 研究方向为渗流力学、油气藏工程及地质灾害等, 电子邮箱: lywu@imech.ac.cn

吸附在煤层基质孔隙内表面上,只有少量以游离状态存在于裂缝中。在煤层气的排采过程中,只有当煤层压力降低到一定程度时,煤层孔隙中的吸附气体才从煤层上解吸出来并扩散到裂缝,由裂缝流入井筒。因此,在进行煤层气测试资料分析时必须考虑解吸作用的影响。

双重孔隙介质的不稳定渗流模型由 Barenblatt 等<sup>[1]</sup>首次提出,Warren 等<sup>[2]</sup>在此基础上有新的发展。模型中基岩与裂缝之间的流动为拟稳态窜流,该模型是目前应用最广泛的双重孔隙介质拟稳态窜流模型。Odeh<sup>[3]</sup>对无限大地层中立方体基质模型进行了详细推导。Kazemi 等<sup>[4]</sup>首次提出了天然裂缝储层的不稳态窜流模型,并求解了圆形储层中各向同性的层状双重孔隙介质模型。de Swaan<sup>[5]</sup>给出了天然裂缝储层的双重介质的基质块分别为层状和块状时的不稳态窜流模型,并分析了其压力曲线特征。随后 Serra 等<sup>[6]</sup>、Streltsova<sup>[7]</sup>、Lai 等<sup>[8]</sup>、Thomas 等<sup>[9]</sup>、Chen 等<sup>[10]</sup>、Pruess 等<sup>[11]</sup>、Coats<sup>[12]</sup>、Ueda 等<sup>[13]</sup>也分别对天然裂缝储层进行了研究,把储层看成双重介质,并分析了其流动规律及双重介质特征。Aguilera<sup>[14]</sup>提出,根据地层破裂程序和原生孔隙度值证明天然裂缝油藏的存储容量可能有很大差异。Aifantis<sup>[15]</sup>定义了多孔介质,认为介质中的孔隙中存在间断,这种间断拥有多孔介质的性质。

在中国,双重孔隙介质油气藏的数值模拟起步较晚<sup>[16]</sup>。20世纪70年代末,中国石油勘探开发研究院和胜利油田分别发表了各自的裂缝性油水两相单井锥进模型;80年代初华北油田的柏松章等完成了油水两相的底水锥进模型<sup>[17]</sup>。

本文针对国内双重孔隙介质煤层的特点,考虑煤层气稳定解吸和不稳定解吸特征,提出两类窜流方式不同的双重孔隙介质煤层不定常渗流模型(实际模型和理想模型分别如图1和图2所示)——双重孔隙介质煤层拟稳态窜流模型和双重孔隙介质煤层块状不稳态窜流模型。用有限体积法对其求解,并分析两类模型在不同地质参数情况下的特征曲线。

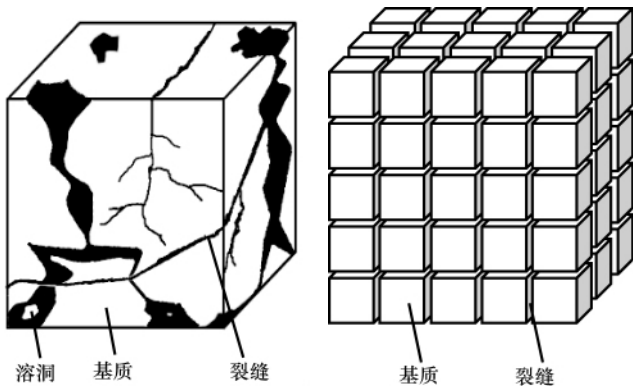


图1 实际模型

Fig. 1 Real model

图2 理想模型

Fig. 2 Ideal model

## 1 物理模型描述

(1) 煤层为均匀各向同性圆形有限地层,煤层气井定量

生产;

(2) 煤层中的流体为单相弱可压缩、定常黏度的牛顿流体;

(3) 孔隙和裂缝之间产生流动,孔隙之间不会发生流动;

(4) 基质块的形状假设为块状或球状;

(5) 裂缝与基质间的窜流以拟稳态窜流和不稳态窜流为主,并根据基质的形状和窜流方式的不同组合形成4种窜流模型;

(6) 流体在地层中的流动为层流状态,遵从达西定律;

(7) 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。

## 2 数学模型及求解方法

### 2.1 无量纲数学模型

根据物理模型得到的无量纲数学模型如下。

(1) 双重孔隙介质块状/球状基质拟稳态窜流模型。

控制方程为

$$\frac{\partial^2 p_{\text{mD}}}{\partial R_{\text{D}}^2} + \frac{1}{R_{\text{D}}} \frac{\partial p_{\text{mD}}}{\partial R_{\text{D}}} + \alpha_{1\text{D}} + \alpha_{2\text{D}}(p_{\text{mD}} - p_{\text{cD}}) = \frac{\omega}{C_{\text{D}} e^{2S}} \frac{\partial p_{\text{mD}}}{\partial T_{\text{D}}} - \lambda e^{-2S}(p_{\text{mD}} - p_{\text{m}}) \quad (1)$$

窜流方程为

$$\frac{1-\omega}{C_{\text{D}} e^{2S}} \frac{\partial p_{\text{mD}}}{\partial T_{\text{D}}} + \lambda e^{-2S}(p_{\text{mD}} - p_{\text{m}}) = 0 \quad (2)$$

(2) 双重孔隙介质块状/球状基质不稳态窜流模型。

控制方程为

$$\frac{\partial^2 p_{\text{mD}}}{\partial R_{\text{D}}^2} + \frac{1}{R_{\text{D}}} \frac{\partial p_{\text{mD}}}{\partial R_{\text{D}}} + \alpha_{1\text{D}} + \alpha_{2\text{D}}(p_{\text{mD}} - p_{\text{cD}}) - \frac{\lambda e^{-2S}}{5R_{1\text{D}}} \frac{\partial p_{\text{mD}}}{\partial R_{1\text{D}}} = \frac{\omega}{C_{\text{D}} e^{2S}} \frac{\partial p_{\text{mD}}}{\partial T_{\text{D}}} - \lambda e^{-2S}(p_{\text{mD}} - p_{\text{m}}) \quad (3)$$

其中, $R_{\text{D}}$ 为裂缝空间的无量纲尺度; $R_{1\text{D}}$ 为基质空间的无量纲尺度。

窜流方程为

$$\frac{\partial^2 p_{\text{mD}}}{\partial R_{1\text{D}}^2} + \frac{2}{R_{1\text{D}}} \frac{\partial p_{\text{mD}}}{\partial R_{1\text{D}}} = \frac{15(1-\omega)}{C_{\text{D}} e^{2S}} \frac{\partial p_{\text{mD}}}{\partial T_{\text{D}}} \quad (4)$$

其中,  $\frac{\partial p_{\text{mD}}}{\partial R_{1\text{D}}} \Big|_{R_{1\text{D}}=1} = 0, p_{\text{mD}} \Big|_{R_{1\text{D}}=1} = p_{\text{mD}}$

初始条件为

$$p_{\text{mD}}(T_{\text{D}}=0) = p_{\text{mD}}(T_{\text{D}}=0) = 0 \quad (5)$$

内边界条件为

$$\frac{\partial p_{\text{mD}}}{\partial R_{\text{D}}} \Big|_{R_{\text{D}}=1} = -1 + \frac{\partial p_{\text{mD}}}{\partial T_{\text{D}}} \quad (6)$$

无限大煤层

$$p_{\text{mD}} \Big|_{R_{\text{D}} \rightarrow \infty} = p_{\text{mD}} \Big|_{R_{\text{D}} \rightarrow \infty} = 0 \quad (7)$$

定压边界煤层

$$p_{\text{mD}} \Big|_{R_{\text{D}}=R_{\text{D}_0}} = p_{\text{mD}} \Big|_{R_{\text{D}}=R_{\text{D}_0}} = 0 \quad (8)$$

封闭边界煤层

$$\frac{\partial p_{\text{mD}}}{\partial R_{\text{D}}} \Big|_{R_{\text{D}}=R_{\text{D}_0}} = \frac{\partial p_{\text{mD}}}{\partial R_{\text{D}}} \Big|_{R_{\text{D}}=R_{\text{D}_0}} = 0 \quad (9)$$

其中,  $T_D = \frac{t_D}{C_D}$ ;  $t_D$  为无量纲时间,  $t_D = \frac{3.6kt}{\phi\mu C_i r_w^2}$ ;  $C_D$  为无量纲井筒存储系数,  $C_D = \frac{1.592C}{\phi h C_i r_w}$ ;  $R_{eD}$  为无量纲外边界距离,  $R_{eD} = \frac{R_e}{r_{we}}$ ;  $r_{we}$  为有效井径,  $r_{we} = r_w e^{-S}$ ;  $p_D$  为无量纲压力,  $p_D = \frac{kh(p_i - p)}{1.1842 \times 10^{-3} q\mu B}$ ;  $p_{cD}$  表示无量纲临界解吸压力;  $p_{wD}$  表示无量纲的井底压力;  $\alpha_{1D}$  为稳定解吸系数,  $\alpha_{1D} = \frac{k_1 h q_1}{1.842 \times 10^{-3} q\mu B}$ ;  $\alpha_{2D}$  为不稳定解吸系数,  $\alpha_{2D} = \frac{k_2 h q_2}{1.842 \times 10^{-3} q\mu B}$ ;  $\lambda$  为窜流系数,  $\lambda = \frac{\alpha_m k_m}{k_f} r_w^2$ ,  $\alpha_m = \frac{15}{R^2}$ ;  $\omega$  为储能系数,  $\omega = \frac{\varphi_m C_m}{(\varphi_m C_m + \varphi_f C_f)}$ ;  $B$  为体积系数,  $m^3/m^3$ ;  $C$  为井筒存储系数,  $m^3/MPa$ ;  $C_i$  为总压缩系数,  $m^3/MPa$ ;  $h$  为地层有效厚度,  $m$ ;  $k$  为煤层渗透率,  $\mu m^2$ ;  $k_f$  为煤层裂缝渗透率,  $\mu m^2$ ;  $k_m$  为煤层基质渗透率,  $\mu m^2$ ;  $p$  为地层压力,  $MPa$ ;  $p_i$  为地层原始压力,  $MPa$ ;  $p_w$  为井底压力,  $MPa$ ;  $q$  为生产率,  $m^3/d$ ;  $r$  为距离,  $m$ ;  $r_w$  是油井半径,  $m$ ;  $R$  为球形基质的半径,  $m$ ;  $R_e$  为外边界距离,  $m$ ;  $S$  为表皮系数;  $t$  为时间,  $h$ ; 下标  $f$  表示裂缝,  $m$  表示基质;  $\varphi$  为煤层孔隙度;  $\mu$  为地层中流体的黏度,  $mPa \cdot s$ 。

## 2.2 数学模型的 Laplace 变化形式

经过 Laplace 变换后的数学模型如下。

控制方程为

$$\frac{\partial^2 \bar{p}_D}{\partial R_D^2} + \frac{1}{R_D} \frac{\partial \bar{p}_D}{\partial R_D} + \frac{\alpha_{1D}}{Z} + \alpha_{2D} \left( \bar{p}_D - \frac{p_{cD}}{Z} \right) = \frac{Z}{C_D e^{2S}} f(Z) \bar{p}_D \quad (10)$$

其中,  $Z$  为 Laplace 变量。

(1) 拟稳态流动(球状/块状基质)模型。

$$f(Z) = \frac{\omega(1-\omega)Z/C_D e^{2S} + \lambda e^{-2S}}{(1-\omega)Z/C_D e^{2S} + \lambda e^{-2S}} \quad (11)$$

(2) 不稳定球板窜流形式(球状/立方体基质)。

$$f(Z) = \omega + \frac{1}{5} \frac{\lambda e^{-2S}}{Z/C_D e^{2S}} \cdot \left( \sqrt{\frac{15(1-\omega)Z/C_D e^{2S}}{\lambda e^{-2S}}} \cdot \coth \sqrt{\frac{15(1-\omega)Z/C_D e^{2S}}{\lambda e^{-2S}}} - 1 \right) \quad (12)$$

内边界条件为

$$\left. \frac{\partial \bar{p}_D}{\partial R_D} \right|_{R_D=1} = -\frac{1}{Z} + Z \bar{p}_{wD} \quad (13)$$

无限大外边界为

$$\bar{p}_D \Big|_{R_D \rightarrow \infty} = 0 \quad (14)$$

## 2.3 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。首先对双重孔隙煤层模型进行离散,如图 3 所示。图 4 为离散网格中的两个单元,对其进行分析。 $P, A$  分别为两个三角形的中心,向量  $e_\eta$  为  $ab$  方向的切向量,向量  $e_\xi$  为  $PA$  方向的切向量,  $n$  为向量  $e_\eta$  的法向量,  $\theta$  为向量  $n$  与向量  $e_\xi$  的夹角。  $\xi, \eta$  为计算单元的局域坐标。

根据上述分析,有限体积法的求解过程为

$$\int_{\Delta V} \left( \frac{\partial^2 \bar{p}_D}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{p}_D}{\partial y^2} + \frac{\alpha_{1D}}{Z} + \alpha_{2D} \left( \bar{p}_D - \frac{p_{cD}}{Z} \right) \right) dV = \int_{\Delta V} \frac{Z}{C_D e^{2S}} f(Z) \bar{p}_D dV \quad (15)$$

参考图 4 中的变量标记,  $\Delta A_i$  是以  $P$  点为中心的三角形面积,  $\bar{p}_A, \bar{p}_P, \bar{p}_a, \bar{p}_b$  分别为点  $A, P, a, b$  处的无量纲压力。有限体积计算公式为

$$\sum_{\text{all surface}} \left[ \frac{\Delta A_i}{ne_\xi \Delta \xi} (\bar{p}_A^{n+1} - \bar{p}_P^{n+1}) - \frac{e_\xi e_\eta \Delta A_i}{ne_\xi \Delta \eta} (\bar{p}_b^{n+1} - \bar{p}_a^{n+1}) \right] + \left[ \frac{\alpha_{1D}}{Z} + \alpha_{2D} \left( \bar{p}_P^{n+1} - \frac{p_{cD}}{Z} \right) \right] \Delta V_i = \left( \frac{Z}{C_D e^{2S}} f(Z) \bar{p}_P^{n+1} \right) \Delta V_i \quad (16)$$

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。

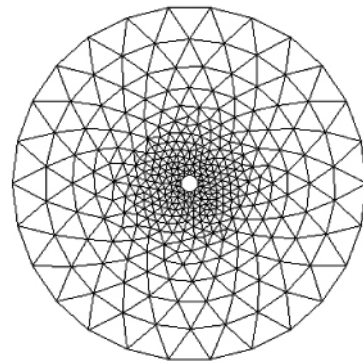


图 3 离散网格单元  
Fig. 3 Discrete grid

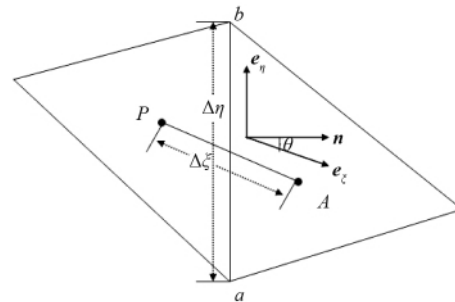


图 4 有限体积计算单元  
Fig. 4 Computational cell of FVM

## 3 结果分析

### 3.1 双重孔隙介质拟稳态窜流特征曲线分析

(1) 不同储能系数特征曲线分析。

为了分析储能系数  $\omega$  对试井理论曲线的影响,分别计算不同  $\omega$  时的理论曲线(压力和压力导数曲线),其中综合系数  $C_D e^{2S} = 1$ , 稳定解吸系数  $\alpha_{1D} = 0$ , 不稳定解吸系数  $\alpha_{2D} = 0$ , 窜流系数  $\lambda = 0.0001$ , 如图 5 所示。在圆形封闭外边界条件下,分别取储能系数  $\omega = 0.8, 0.1$  和  $0.01$ 。

从图 5 可以看出,储能系数越小,压力导数曲线下落的

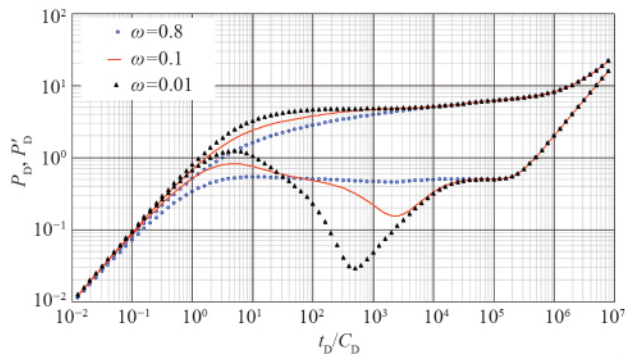


图 5 储能系数对双对数曲线的影响

Fig. 5 Effects of storage coefficient on double logarithmic curves

幅度越大。这说明储能系数越小,达到基质与裂缝之间的窜流稳定的时间越长。当煤层储能系数  $\omega > 0.8$  时,无法表现出双重孔隙介质的特征。

(2) 不同窜流系数特征曲线分析。

为了分析煤层气窜流系数  $\lambda$  对试井理论曲线的影响,分别计算不同  $\lambda$  时的理论曲线,其中综合系数  $C_D e^{2s} = 1$ ,稳定解吸系数  $\alpha_{1D} = 0$ ,不稳定解吸系数  $\alpha_{2D} = 0$ ,储能系数  $\omega = 0.05$ ,如图 6 所示。在圆形封闭外边界条件下,分别取窜流系数  $\lambda = 1, 10^{-5}, 10^{-6}$  和  $10^{-9}$ 。

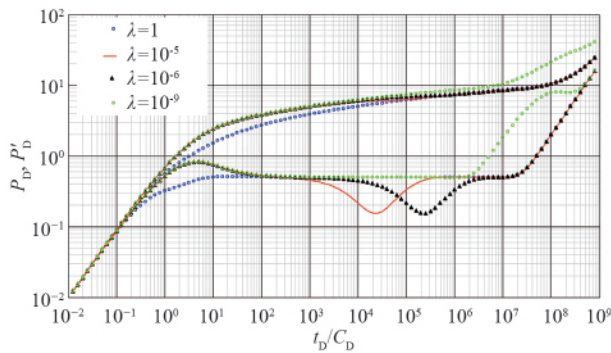


图 6 窜流系数对双对数曲线的影响

Fig. 6 Effects of interporosity flow coefficient on double logarithmic curves

从图 6 可以看出,窜流系数越大,压力导数曲线上“凹陷”出现的时间越早。这说明窜流系数越大,达到基质与裂缝之间窜流稳定所需要的时间越短。窜流系数  $\lambda > 1$  时很难观测到双重介质特征,因为窜流发生的太快,致使与井储的作用和表皮影响相混合; $\lambda$  趋于 0 时,由于受到边界的影响,也很难观测到双重介质特征。

3.2 双重孔隙介质块状不稳态窜流结果分析

(1) 不同储能系数特征曲线分析。

为了分析储能系数  $\omega$  对试井理论曲线的影响,分别计算不同  $\omega$  时的理论曲线,其中综合系数  $C_D e^{2s} = 1$ ,稳定解吸系数  $\alpha_{1D} = 0$ ,不稳定解吸系数  $\alpha_{2D} = 0$ ,窜流系数  $\lambda = 0.00001$ ,如图 7 所

示。在圆形封闭外边界条件下,分别取储能系数  $\omega = 0.8, 0.1$  和  $0.01$ 。

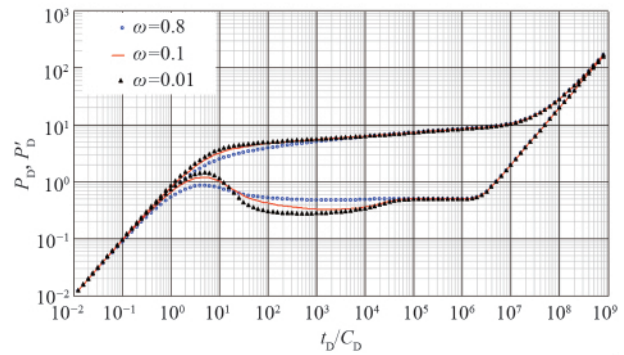


图 7 储能系数对双对数曲线的影响

Fig. 7 Effects of storage coefficient on double logarithmic curves

从图 7 可以看出,储能系数越小,压力导数曲线下落的幅度越大。说明储能系数越小,达到基质与裂缝之间的窜流稳定的时间越长。当煤层储能系数  $\omega > 0.8$  时,无法表现出双重孔隙介质的特征。

(2) 不同窜流系数特征曲线分析。

为了分析煤层气窜流系数  $\lambda$  对试井理论曲线的影响,分别计算不同  $\lambda$  时的理论曲线,其中综合系数  $C_D e^{2s} = 1$ ,稳定解吸系数  $\alpha_{1D} = 0$ ,不稳定解吸系数  $\alpha_{2D} = 0$ ,储能系数  $\omega = 0.05$ ,如图 8 所示。在圆形封闭外边界条件下,分别取窜流系数  $\lambda = 1, 10^{-5}, 10^{-6}$  和  $10^{-9}$ 。

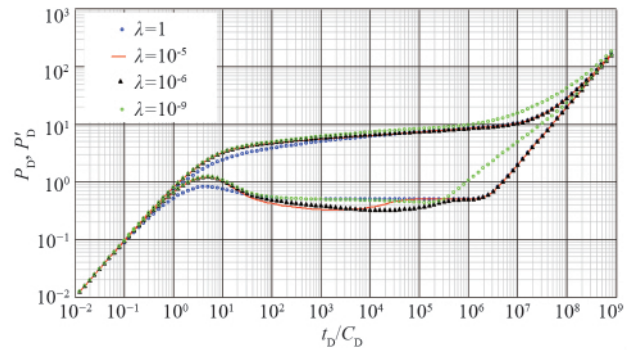


图 8 窜流系数对双对数曲线的影响

Fig. 8 Effects of interporosity flow coefficient on double logarithmic curves

从图 8 可以看出,窜流系数越大,压力导数曲线上的“凹陷”出现得越早。这说明窜流系数越大,达到基质与裂缝之间的窜流稳定所需要的时间越短。窜流系数  $\lambda > 1$  时很难观测到双重介质特征,因为窜流发生的太快,致使与井储的作用和表皮影响相混合; $\lambda$  趋于 0 时,由于受到边界的影响,也很难观测到双重介质特征。

3.3 双重孔隙介质两类模型比较

为了分析 2 种不同煤层窜流模型对试井理论曲线的影

响,分别计算在圆形封闭外边界条件下,系数为 $\omega=0.05, \alpha_{1D}=0, \alpha_{2D}=0, \lambda=10^{-6}$ 时 2 种模型的理论曲线,如图 9 所示。

从图 9 可以看出,拟稳态窜流模型与不稳定窜流模型在中期存在明显差异,拟稳态模型的曲线接近对称的凹谷,不稳定模型呈现平缓的下凹形状。

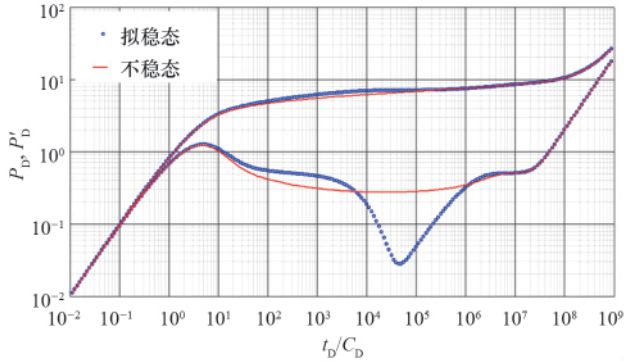


图 9 2 种不同双重孔隙介质的理论曲线

Fig. 9 Theoretical curves for two different kinds of dual porosity models

### 3.4 双重孔隙模型解吸系数特征分析

#### (1) 稳定解吸系数。

为了分析煤层气稳定解吸系数 $\alpha_{1D}$ 对试井理论曲线的影响,在封闭条件下,令综合系数 $C_{1D}e^{2S}=10$ ,解吸系数 $\alpha_{2D}=0$ ,临界解吸压力 $p_{cD}=0$ ,启动压力梯度 $\lambda_{1D}=0$ ,储能系数 $\omega=0.05$ ,窜流系数 $\lambda=10^{-4}$ ,考虑 $\alpha_{1D}$ 分别为 $0, -1 \times 10^{-6}, -1.5 \times 10^{-6}$ 时的压力及压力导数曲线,如图 10 所示。

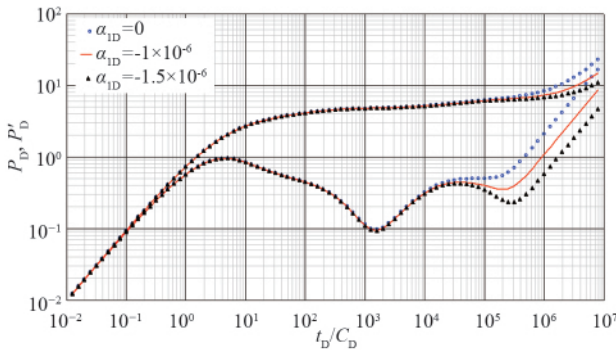


图 10 不同稳定解吸系数对试井理论曲线的影响

Fig. 10 Effects of steady desorption coefficient on double logarithmic curves

从图 10 可以看出,稳定解吸系数和外边界条件共同影响特征曲线的后期。当稳定解吸系数为 0 时,曲线的后期由封闭外边界影响;稳定解吸系数绝对值越大,稳定解吸系数和外边界条件共同影响特征曲线的后期,压力导数曲线下落幅度越大,解吸量越大,从而缓解压力下降的幅度也越大。

#### (2) 不稳定解吸系数。

为了分析煤层气不稳定解吸系数 $\alpha_{2D}$ 对试井理论曲线的

影响,在封闭条件下,令综合系数 $C_{1D}e^{2S}=10$ ,解吸系数 $\alpha_{1D}=0$ ,临界解吸压力 $p_{cD}=0$ ,启动压力梯度 $\lambda_{1D}=0$ ,储能系数 $\omega=0.05$ ,窜流系数 $\lambda=10^{-4}$ ,考虑 $\alpha_{2D}$ 分别为 $0, -1.5 \times 10^{-7}, -5 \times 10^{-7}$ 时的压力及压力导数曲线,如图 11 所示。

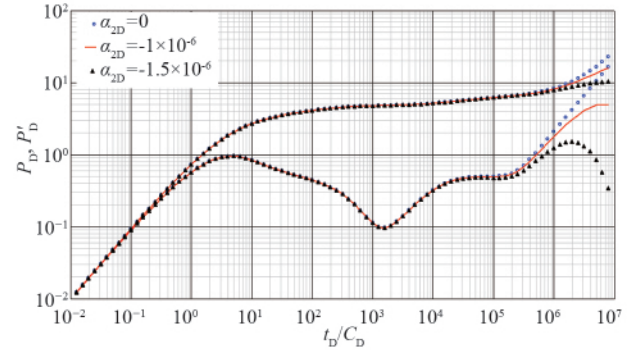


图 11 不同不稳定解吸系数对试井理论曲线的影响

Fig. 11 Effects of unsteady desorption coefficient on double logarithmic curves

从图 11 可以看出,不稳定解吸系数和外边界条件共同影响特征曲线的后期。不稳定解吸系数为 0 时,曲线的后期由封闭外边界影响;不稳定解吸系数绝对值越大时,不稳定解吸系数和外边界条件共同影响特征曲线的后期,压力导数曲线下落幅度越大,解吸量越大,从而缓解压力下降的幅度也越大。

## 4 结论

(1) 针对中国双重孔隙介质煤层的特点,考虑煤层气稳定解吸和不稳定解吸特征,提出了两类窜流方式不同的双重孔隙介质煤层不定常渗流模型——双重孔隙介质煤层拟稳态窜流模型和双重孔隙介质煤层块状不稳定窜流模型。

(2) 采用有限体积法对模型进行求解,并分析了两类模型在不同地质参数情况下的特征曲线。

(3) 储能系数越小,压力导数曲线下落的幅度越大,说明储能系数越小,达到基质与裂缝之间窜流稳定的时间越长。

(4) 窜流系数越大,压力导数曲线上的“凹陷”出现的时间越早,说明窜流系数越大,达到基质与裂缝之间的窜流稳定所需要的时间越短。当窜流系数过大或过小,或煤层储能系数过大时,无法表现出双重孔隙介质的特征,从而解释了现场较难得到双重孔隙介质测试曲线的问题。

(5) 稳定、不稳定解吸系数绝对值越大,压力导数曲线下落幅度越大,说明解吸量越大,从而缓解压力下降的幅度也越大。

## 参考文献 (References)

[1] Barenblatt G I, Zheltov I P, Kochina I N. Basic concepts in the theory of homogeneous liquids in fissured rocks[J]. *Journal of Applied Mathematics*

- and *Mechanics*, 1960, 24(5): 1286-1303.
- [2] Warren J E, Root P J. The behaviour of naturally fractured reservoirs[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1963, 3(3): 245-255.
- [3] Odeh A S. Unsteady-state behavior of naturally fractured reservoirs[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1965, 5(1): 60-66.
- [4] Kazemi H, Seth M S, Thomas G W. The interpretation of interference tests in naturally fractured reservoirs with uniform fracture distribution[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1969, 9(4): 463-472.
- [5] de Swaan A O. Analytical solution for determining naturally fractured reservoir properties by well testing [J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1976, 16(3): 117-122.
- [6] Serra K, Reynolds A C, Raghavan R. New pressure transient analysis methods for naturally fractured reservoirs [J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1983, 35(12): 2271-2283.
- [7] Streltsova T D. Well pressure behavior of a naturally fractured reservoir [J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1983, 23(5): 769-780.
- [8] Lai C H, Bodvarsson G S, Tsang C F, et al. A new model for well test data analysis for naturally fractured reservoirs, SPE 11688 [C]//SPE California Regional Meeting. Washington DC: SPE, 1983: 23-25.
- [9] Tomas L K, Dixon T N, Pierson R G. Fractured reservoir simulation[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1983, 23(1): 42-55.
- [10] Chen C C, Serra K, Reynolds A C, et al. Pressure transient analysis methods for bounded naturally fractured reservoirs [J]. *Society of*

- Petroleum Engineers Journal*, 1985, 15(4): 451-464.
- [11] Pruess K, Narasimhan T N. A practical method for modeling fluid and heat flow in fractured porous media [J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1985, 25(1): 14-26.
- [12] Coats K H. Simulation of gas condensate reservoir performance, SPE. 10512 [C]//The Sixth SPE Symposium on Reservoir Simulation, New Orleans. Washington DC: SPE, 1982.
- [13] Ueda Y, Murata S, Watanabe Y. Investigation of the shape factor used in the dual-porosity reservoir simulator, SPE 19469 [R]. Washington DC: SPE, 1989.
- [14] Aguilera R. Naturally fractured reservoirs [M]. Tulsa, Okla: Petroleum Pub Co, 1980.
- [15] Aifantis E C. On the problem of diffusion in solids [J]. *Acta Mechanica*, 1980, 37(3/4): 265-296.
- [16] 赵良孝, 朴勇. 碳酸盐岩储层测井评价技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.  
Zhao Xiaoliang, Pu Yong. Carbonate reservoir welltest and evaluation technique[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994.
- [17] 张烈辉, 李允. 裂缝性油藏水平井数值模拟的进展和展望[J]. 西南石油学院学报, 1997, 19(4): 48-52.  
Zhang Lihui, Li Yun. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 1997, 19(4): 48-52.

(责任编辑 安莹, 吴晓丽)

·学术动态·

## “2012 年全国博士生学术论坛： 地球组构多尺度探测技术和应用”征文

“全国博士生学术论坛——地球组构多尺度探测和应用”由国务院学位委员会办公室和教育部学位管理与研究生教育司主办,中国地质大学(武汉)承办,将于2012年10月21—22日在武汉市举行。

征稿范围:1) 近地表探测技术与人类活动;2) 资源与能源探测技术前沿与应用;3) 岩石圈地球物理成像技术;4) 对地探测技术与地学应用;5) 全球变化与环境监测。

全文截稿日期:2012年9月10日

联系电话:027-67883581

电子信箱: forum2012cug@gmail.com

通信地址: 湖北省武汉市鲁磨路388号中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院办公室(430074)

会议网站: <http://dkxy.cug.edu.cn/2012bslt/>