

超声热效应促进煤层瓦斯解吸扩散数值模拟

易俊^{1,2}, 姜永东², 鲜学福², 张渝²

(1. 重庆科技学院安全工程学院, 重庆 400042; 2. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400041)

摘要:以声场声能转化为热能,提高煤层系统的温度,改善系统的解吸—扩散为基础,将煤样假设为含有大孔隙和微孔隙基质的双重孔隙结构,引入温度对微孔隙扩散系数的影响,提出了利用温度梯度扩散模型建立超声热效应促进煤层瓦斯解吸—扩散的热平衡方程和物质平衡方程,应用 Matlab 工具实现了声场促进煤层瓦斯解吸扩散的数值模拟。对有无超声作用下,煤层瓦斯解吸—扩散的数值模拟分析得出:超声热效应可以明显地提高煤样的温度,增大微孔隙扩散系数,提高大孔隙游离气的动态百分数,降低微孔隙中吸附气的动态百分数。为超声波促进煤层瓦斯解吸—扩散,提高煤层瓦斯抽采率提供了分析的理论基础。

关键词:超声波;热效应;煤层瓦斯;解吸;扩散;数值模拟

中图分类号:TD712⁺.5 文献标志码:A 文章编号:1006-7329(2008)04-0099-06

A Numerical Simulation of Coalbed Methane Desorption and Diffusion Enhanced by Ultrasound Heating

YI Jun^{1, 2}, JIANG Yong-dong², XIAN Xue-fu², ZHANG Yu²

(1. Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 400042, P. R. China; 2. Key Laboratory of the Exploitation of Southwest Resources and Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: We discuss the development of coal bed micro-structure and the mechanism of enhancing the desorption/diffusion of coalbed methane by ultrasound. We present a mathematical model to describe the desorption/diffusion process of coalbed methane due to the ultrasound heating effect. Two cases of gas release with or without ultrasound fields in coal samples were simulated. We found that the temperature and the micropore diffusion coefficient of the system were improved by ultrasound transferred heat energy, while the dynamic fraction of free gas in pores was enhanced and the dynamic fraction of adsorbed gas was weakened.

Keywords: ultrasound; heating effect; coalbed methane; desorption; diffusion; numerical simulation

煤层气是含煤岩系中有机质在成煤过程中生成的以 CH₄ 为主混有一些有害毒物的多组分气体。煤层气主要以吸附态赋存煤体中,其产出过程是一个复杂的解吸—扩散—渗流的过程,对这一过程的储层物理性质和地质环境给予的人为干扰和积极导向,可以有效地改善煤层气在煤层中的流动。国内外许多学者围绕外加物理场对煤层气吸附、解吸,渗流特性等方面开

展了大量的室内研究工作,原苏联学者格·德李^[1],何学秋^[2]等研究了地电场和交变电场对甲烷吸附特性的影响;杜云贵^[3]、刘保县^[4-6]和易俊^[7]等研究了交变电场、声场作用下甲烷吸附、解吸、渗流特性。声场促进甲烷气解吸机理主要是声波的机械振动和热效应,声波作用使煤表面势能的提高,甲烷分子被吸附的几率降低。本文以声场声能转化为热能,提高煤层系

* 收稿日期:2007-11-21

基金项目:重庆市院士基金专项(CSTS,2005AB6007);中国博士后科学基金(20070410205)

作者简介:易俊(1965-),男,教授,博士,主要从事油气开发工程、煤层气开发等方面的研究。(Tel)023-65022322;(E-mail)yijun2366@yahoo.com.cn

鲜学福(联系人),男,中国工程院院士,教授,博士生导师。(E-mail)cqdx@cqu.edu.cn

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

统的温度,改善系统的解吸-扩散为基础,建立煤层系统的热平衡方程以及系统解吸-扩散引起的物质平衡方程,然后利用相应的数值求解方法分析声场促进甲烷气解吸-扩散的微观机理。

1 超声热效应促进煤层气解吸-扩散数学模型的建立

1.1 物质平衡方程

假设:1)煤基质的孔隙由含有大孔隙和微孔隙的双重孔隙结构组成;2)在给定的时间、位置情况下,气体以吸附状态分布在煤的微孔基质中,这些微孔基质包含类似于分子直径的通道,游离气体以游离态存在大孔隙内,忽略大孔隙对气体的吸附能力^[8-9];3)煤层气的吸附、流入、流出完全由煤基质孔隙和表面扩散质量流量控制^[10-11];4)忽略煤层瓦斯解吸和扩散引起煤基质收缩或膨胀。将煤颗粒考虑为球形,包括瞬时流动相和扩散流动相的气体质量平衡方程可以写为:

$$\varphi \frac{\partial C}{\partial t} + (1 - \varphi) \frac{\partial C_{\mu}}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 (\varphi D_p) \frac{\partial C}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 ((1 - \varphi) D_s(T)) \frac{\partial C_{\mu}}{\partial r} \right) \quad (1)$$

式中 C, C_{μ} 分别为大孔隙和微孔隙中游离气浓度和吸附气浓度, mol/m^3 ; D_p 为大孔隙和的扩散系数, m^2/s ; $D_s(T)$ 为微孔隙气体的扩散系数, m^2/s ; φ 为煤层孔隙度, 无因次; t 为煤气系统发生吸附或脱附的作用时间, s ; r 为考虑为球形颗粒的半径, m 。

式(1)左边第一项表示气体在孔隙度为 φ 的大孔隙中聚集和扩散的质量流量,第二项为系统 $(1 - \varphi)$ 的微孔隙部分气体的聚集和扩散质量流量;右边第一项表示煤层气在大孔隙中的扩散过程,则反应煤层气在煤样大孔隙中的扩散能力;第二项表示煤层气在煤样微孔隙中的扩散过程, $D_s(T)$ 则反映受温度影响的煤层气在煤样微孔隙中的扩散能力。

1.1.1 温度对微孔扩散系数的影响

Schueller 和 Yang^[12] 通过实验和数值模拟对比分析,温度对大孔隙扩散系数 D_p 几乎没有明显的影响,式(1)可以将 D_p 简化为与温度无关的常数。而 Yang^[13] 认为微孔隙表面扩散系数随温度的变化而变化,可以写为:

$$D_s(T) = D_{s0} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (2)$$

式中: D_{s0} 为初始温度 T_0 条件下的微孔隙扩散系数;任一温度 T 条件下的微孔隙扩散系数 $D_s(T)$ 为:

$$\frac{D_s(T)}{D_{s0}} = \exp\left(\frac{E}{RT_0} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)\right) \quad (3)$$

1.1.2 Langmuir 温度形式

1998年 Do 和 Wang^[14] 等给出了考虑温度影响的 Langmuir 方程:

$$C_{\mu} = C_{\mu s}(T) \frac{b(T)C}{1 + b(T)C} \quad (4)$$

式中:

$$b(T) = b_0 \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \quad (5)$$

类似地,用初始温度 T_0 条件下的 Langmuir 参数 b_{s0} 可以将(5)表示为:

$$\frac{b(T)}{b_{s0}} = \exp\left(\frac{E}{RT_0} \left(\frac{T_0}{T} - 1\right)\right) \quad (6)$$

系统最大吸附能力的 Langmuir 参数 $C_{\mu s}$ 为:

$$C_{\mu s} = C_{\mu s0} \exp[\psi(T - T_0)] \quad (7)$$

一般情况下, ψ 小于 10^{-4}K^{-1} ^[14]。因此,忽略温度对气体最大吸附能力的影响。包含温度影响的 Langmuir 公式为:

$$C_{\mu} = C_{\mu s} \frac{b(T)C}{1 + b(T)C} \quad (8)$$

1.1.3 物质平衡方程的简化

由于煤层气浓度是时间和空间位置的函数,将式(8)的微分形式代入式(1),并简化得到:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 D(T) \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad (9)$$

式中, $D(T)$ 可以认为与单一扩散模型^[11] 对应的视扩散系数,写成视扩散系数与大孔隙扩散系数的比的形式为:

$$\frac{D(T)}{D_p} = \frac{1 + \left(\frac{1-\varphi}{\varphi}\right) \frac{C_{\mu s} b(T)}{(1 + b(T)C)^2} \left(\frac{D_s(T)}{D_{s0}}\right) \left(\frac{D_{s0}}{D_p}\right)}{1 + \left(\frac{1-\varphi}{\varphi}\right) \frac{C_{\mu s} b(T)}{(1 + b(T)C)^2}} \quad (10)$$

定义下列无因次变量

$$c = \frac{C}{C_0}, c_{\mu} = \frac{C_{\mu}}{C_{\mu 0}}, x = \frac{r}{R}, \tau = \frac{\delta_1 D_p t}{R^2} \quad (11)$$

$$\delta_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{1-\varphi}{\varphi}\right)} \quad (12)$$

$$\delta_2 = 1 - \delta_1 \quad (13)$$

$$\varepsilon = \left(\frac{1-\varphi}{\varphi}\right) \left(\frac{C_{\mu 0}}{C_0}\right) \left(\frac{D_{s0}}{D_p}\right) \quad (14)$$

$$\sigma = \frac{D_s(T)}{D_{s0}} = \exp\left(\frac{E}{RT_0} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)\right) \quad (15)$$

式(1)可以简化为:

$$(\delta_1 + \delta_2 g_1) \frac{\partial c}{\partial \tau} = \frac{1}{x^2} \frac{\partial}{\partial x} \left(x^2 (1 + \varepsilon \delta g_1) \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (16)$$

式中:

$$g_1 = \frac{\lambda_{\mu s} \delta}{(\delta + \lambda c)^2} \quad (17)$$

$$\lambda = b_{s0} C_0 \quad (18)$$

$$\lambda_{ps} = b_{s0} C_{ps} \frac{C_0}{C_{p0}} \quad (19)$$

视扩散系数的无因次形式为:

$$\frac{D(T)}{D_p} = \frac{\delta_1 + \varepsilon \sigma g_1}{\delta_1 + \delta_2 g_1} \quad (20)$$

当 $\sigma=1$,即不考虑温度变化时,系统的视扩散系数为:

$$\frac{D(T)}{D_p} = \frac{\delta_1 + \varepsilon g_1}{\delta_1 + \delta_2 g_1} \quad (21)$$

1.2 热平衡方程

由于煤质的高热容,煤颗粒内部的温度梯度和

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} [(\varphi \rho_g c_{pg} + (1-\varphi)\rho_\mu c_{p\mu} + (1-\varphi)\rho_s c_{ps})(T - T_b)]}_{A} = \underbrace{(1-\varphi)\Delta H \frac{\partial C_\mu}{\partial t}}_{B} + \underbrace{\lambda_s \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right)}_{C} - \underbrace{\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \left(M_g \varphi c_{pg} D_p \frac{\partial C}{\partial r} + M_g (1-\varphi) c_{p\mu} D_s(T) \frac{\partial C_\mu}{\partial r} \right) (T - T_b) \right]}_{D} + \underbrace{\omega}_{E} \quad (22)$$

式中: ρ_g 为煤样大孔隙游离气密度,kg/m³; ρ_μ 为煤样微孔隙以液态形式存在的吸附气密度,kg/m³; ρ_s 为煤基质固体密度,kg/m³; c_{pg} 为煤样大孔隙游离气比热,J/kg·K; $c_{p\mu}$ 为煤样微孔隙以液态或固态形式存在的吸附气比热,J/(kg·K); c_{ps} 为煤基质的比热,J/(kg·K); φ 为大孔隙空间的孔隙度; T 为煤—气系统的温度,K; T_b 为煤—气系统的环境温度,K; ΔH 为煤气系统吸附或脱附热,J/kg; λ_s 为系统煤介质的有效热传递系数,J/m·s; M_g 为气体的分子量, ω 为超声作用功率,W。

式(22)由5部分组成:A为煤样孔隙游离气、内表面吸附液体和煤颗粒聚集的热率;B为甲烷在煤颗粒中吸附/脱附产生的热量;C通过煤颗粒骨架向外扩散传递的热量;D煤孔隙空间游离气和煤颗粒吸附气(类似于液体)之间传递的热量;E通过超声作用向系统输入的热量。

计算发现,当甲烷的压力在0~3.5 MPa,温度在10~90 °C范围内时,甲烷的压缩因子大约为0.98,可以认为游离气符合理想气体定律,则:

$$\rho_g = M_g \frac{p}{RT} = M_g C \quad \rho_\mu = M_g C_\mu \quad (23)$$

式中, p 为系统游离气压力,MPa; R 为气体常数。

游离气相比热等于吸附在煤基质内的液相比热^[16]:

$$c_{pg} = c_{p\mu} \quad (24)$$

式(20)和(21)代入式(19),并简化得到:

$$(\varphi \rho_g c_{pg} + (1-\varphi)\rho_\mu c_{p\mu} + (1-\varphi)\rho_s c_{ps}) \frac{\partial T}{\partial t} =$$

$$(1-\varphi)\Delta H \frac{\partial C_\mu}{\partial t} + \lambda_s \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right)$$

以吸附形式存在,类似于液体的吸附气体在煤基质表面引起的温度梯度忽略不计^[15],同时,不考虑煤层煤样气体吸附/解吸过程中,引起的孔隙结构变化。因此,超声热效应引起的煤层瓦斯在煤体固—气系统中发生的解吸—扩散,可以用系统的热平衡方程表示,该方程包含输入、输出系统的焓和系统内吸附—解吸转化引起的热。用温度梯度扩散模型来描述该过程表示为:

$$+ \left(M_g \varphi c_{pg} D_p \frac{\partial C}{\partial r} + M_g (1-\varphi) c_{p\mu} D_s(T) \frac{\partial C_\mu}{\partial r} \right) \frac{\partial T}{\partial r} + \omega \quad (25)$$

引入温度的无因次变量:

$$\vartheta = \frac{T}{T_0} \quad (26)$$

式(25)的可以转化无因次形式:

$$u(c, c_\mu) \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = a_1 \frac{1}{x^2} \frac{\partial}{\partial x} \left(x^2 \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + a_2 \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + a_3 \frac{\partial c_\mu}{\partial \tau} + a_4 \quad (26)$$

式中:

$$u(c, c_\mu) = \delta_1 T_0 \left[M_g c_{pg} C_0 c + \frac{(1-\varphi)}{\varphi} M_g c_{pg} C_{p0} c_\mu + \frac{(1-\varphi)}{\varphi} \rho_s c_{ps} \right] \quad (27)$$

$$a_1 = \varphi \lambda_s D_p T_0 \quad (28)$$

$$a_2 = T_0 M_g c_{pg} \left(C_0 \frac{\partial c}{\partial x} + C_{p0} \frac{D_s(T)}{D_p} \frac{\partial c_\mu}{\partial x} \right) \quad (29)$$

$$a_3 = \delta_1 \frac{(1-\varphi)}{\varphi} \Delta H C_{p0} \frac{\partial c_\mu}{\partial \tau} \quad (30)$$

$$a_4 = \varphi \frac{D_p}{R^2} \omega \quad (31)$$

式(26)为超声作用下,分析煤样内能量平衡的热平衡方程式。

2 超声热效应促进煤层瓦斯解吸—扩散的解

2.1 初始及边界条件

超声热效应促进煤层瓦斯解吸—扩散的过程,是煤层瓦斯在煤体中排出或衰竭排出的过程,其初始条件为:

$$\tau = 0, c = 1, \vartheta = 1 \quad (32)$$

边界条件为:

$$\begin{cases} x = 0, \frac{\partial c}{\partial x} = 0, \frac{\partial \vartheta}{\partial x} = 0 \\ x = 1; c = 0 \\ x = 1; \frac{\partial \vartheta}{\partial x} = -R \frac{h_e}{\lambda_s} (\vartheta - 1) \end{cases} \quad (33)$$

2.2 超声热效应促进煤层瓦斯解吸—扩散的解

由煤—气系统的物质平衡方程、热平衡方程,以及初始和边界条件构成了超声作用促进煤—气系统解吸—扩散的解,用无因次形式表示其解为:

$$\begin{cases} u(c, c_\mu) \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = a_1 \frac{1}{x^2} \frac{\partial}{\partial x} \left(x^2 \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + a_2 \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + a_3 \frac{\partial c_\mu}{\partial \tau} + a_4 \\ (\delta_1 + \delta_2 g_1) \frac{\partial c}{\partial \tau} = \frac{1}{x^2} \frac{\partial}{\partial x} \left(x^2 (1 + \epsilon \delta g_1) \frac{\partial c}{\partial x} \right) \\ \tau = 0, c = 1, \vartheta = 1 \\ x = 0, \frac{\partial c}{\partial x} = 0, \frac{\partial \vartheta}{\partial x} = 0 \\ x = 1; c = 0, \frac{\partial \vartheta}{\partial x} = -R \frac{h_e}{\lambda_s} (\vartheta - 1) \end{cases} \quad (34)$$

式(34)分别为两个一般的 PDEs (Partial Differential Equations)形式,应用 Matlab 工具,可以编写含有时间变量 τ 和空间变量 x ,由初值和边值决定的空间离散化 ODE (Ordinary Differential Equations)方程,然后进行求解。利用参考文献^[16]和南桐煤矿煤样的实验的模拟参数值如表 1 所示。

表 1 输入的气体 and 煤层特征参数

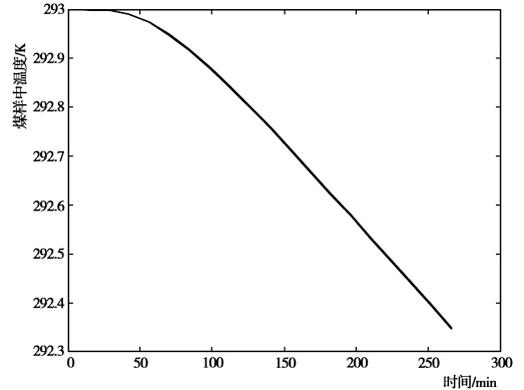
符号	单位	参数值
φ	f	1%~5%
ρ_s	kg/m ³	2 150
c_{pg}	J/(kg·K ⁻¹)	2 450
$c_{p\mu}$	J/(kg·K ⁻¹)	2 450
c_{ps}	J/(kg·K ⁻¹)	548
b	MPa	0.362 5
λ_s	J/(m·K·s)	154.4
h_e	J/(m ² ·K·s)	25
ΔH	J/mol	1.75×10^{-8}
M_g	kg/mol	15.04×10^{-3}
T_0	K	293
R	cal/(K·mol)	1.987
E	kJ/mol	3.7~7.3

3 数值模拟分析

3.1 无超声作用时,煤—气系统的解吸-扩散

图 1 为煤层瓦斯在不同压力(0.9 MPa, 2.0 MPa, 3.0 MPa)发生解吸—扩散时,估算的煤样中温度与脱附时间的关系曲线。煤样经过近 200 h 脱附,煤—气系统的温度变化仅仅 0.6 °C,即煤—气系统发生脱附引起的系统温度变化微乎其微,基本上可以忽略不计。可以说明,煤层气在进行自然衰竭开采时,煤层中温度变化很小,这个结论有利于指导现场工程师对煤层气井的设计和管理。

图 1 不同压力下,估算的煤样温度与脱附时间关系曲线



为了进一步分析煤层瓦斯在发生脱附时,任意时间大孔隙游离气和微孔隙吸附气量的变化,引入游离气动态百分数和吸附气动态百分数的概念,其定义式为:

$$f_p = \frac{C}{(C + C_\mu)} \quad f_s = \frac{C_\mu}{(C + C_\mu)} \quad (35)$$

任意时刻,游离气动态百分数与吸附气的动态百分数之和为 1,即:

$$f_p + f_s = 1 \quad (36)$$

图 2 中 A 和 B 给出了不同压力下,游离气动态百分数和吸附气动态百分数与时间的关系。初始时刻(时间为 0),压力为 3.0 MPa(①)的游离气动态百分数为 0.6,而吸附气的动态百分数为 0.4,当经过 100 h 的脱附后,游离气动态百分数降低为 0.45,而吸附气的动态百分数则增加为 0.55;而经过 200 h 后,游离气的动态百分数维持在 0.42 左右,吸附气的动态百分数维持在 0.58 左右,这说明,随着煤层气的采出,剩余在系统中全部气体,小部分以游离气的形式存在于大孔隙之中,大部分则以吸附气的形式存在于微孔隙之中,特别是经过长时间开采,游离气的比例越来越小,而绝大部分则以吸附的形式存在于微孔隙之中,一般情况下难以脱附或排出,这正是煤层气开采的一大难题。同时,图 2 中 A 和 B 也说明,煤层气压力越高,游离气的比例越大,更有利于气体的排出(①为压力为 3.0 MPa,②为 2.0 MPa,③为 0.9 MPa)。

图 2 中 C 为脱附气体的累计百分数与时间的关系,可以看出,同一时间,压力越高,煤层瓦斯排出量越

大;图 2 中 D 为不同压力条件下,估算得到的视扩散系数与时间的关系曲线,可以看出,压力越高,视扩散系数初值越大;压力越高,系统的视扩散系数在短时间内陡降值越大(压力为 3.0 MPa 时,视扩散系数从 0.07 降到 0.03 左右,压力为 2.0 MPa 时,视扩散系数从 0.05 降到 0.03 左右);同时,经过一段时间的脱附后,视扩散系数值基本稳定在同一水平上。这说明:煤层瓦斯在开采过程中,首先是储存在大孔隙中的游离气以很快的扩散速度扩散,然后吸附在微孔隙中的吸附气开始扩散,其扩散速度比大孔隙中游离气的扩散要小得多。

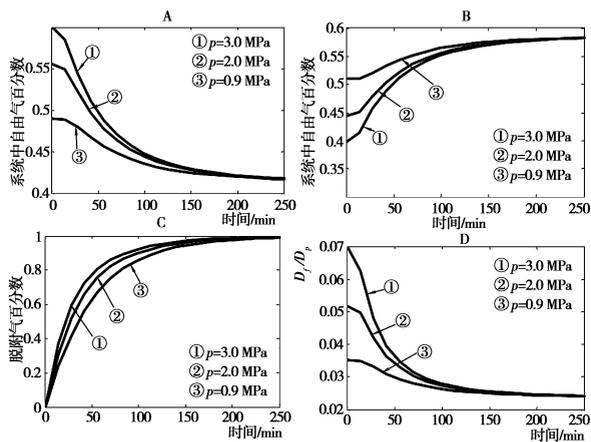


图 2 不同压力下,估算的气体参数与时间的关系曲线

3.2 超声作用促进煤层瓦斯的解吸—扩散

图 3 为不同声场作用下,煤层瓦斯解吸—扩散时,估算的煤样中温度与脱附时间的关系曲线。当 10 W 的超声波作用于煤层 100 个 h 后,系统的温度可以升高 2 °C(从 293 K 上升到 295 K),同时如果 20 W 的超声波作用 100 个 h,系统温度可以上升 3.8 °C(从 293 K 到 296.8 K)。文献[17]通过实验已经得到了苯酚与活性炭构成的吸附系统中,超声作用可以使系统温度升高的事实。

图 4 中 A 和 B 给出了煤样在同一压力条件(2.0 MPa),不同声场作用(0 W,10 W,20 W)下,游离气动态百分数和吸附气动态百分数与时间的关系,当系统存在声场时,游离气的动态百分数经过一段时间的降低后,慢慢地开始回升,声场越强,游离气的动态百分数回升越高;而吸附气的动态百分数则开始出现上升的趋势,慢慢地出现下降。这说明,声场作用下,可以有效地提高煤层气吸附系统的游离气动态百分数,降低吸附气的动态百分数。

图 4 中 C 为不同声场作用下,脱附气体的累计百分数与时间的关系,同一时间,声场作用越强,煤层气排出量越大。D 为同一压力(2.0 MPa),不同声

场作用(0 W,10 W,20 W)下,估算得到的视扩散系数与时间的关系曲线,图中可以明显地发现系统的视扩散系数开始回升的趋势,即声场的作用,可以明显地改善煤层系统的瓦斯扩散,有利于促进煤层气的开采。

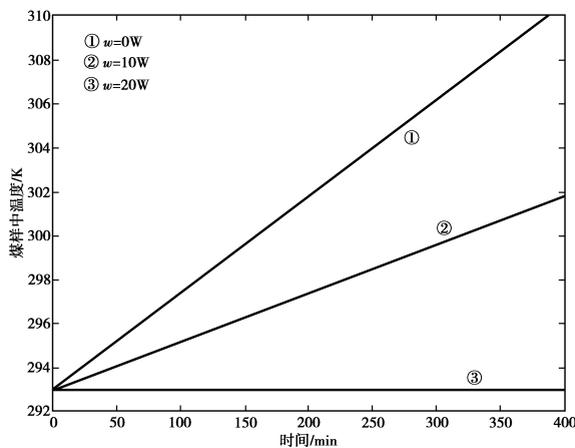


图 3 不同声场作用下,估算的煤样温度与时间关系曲线

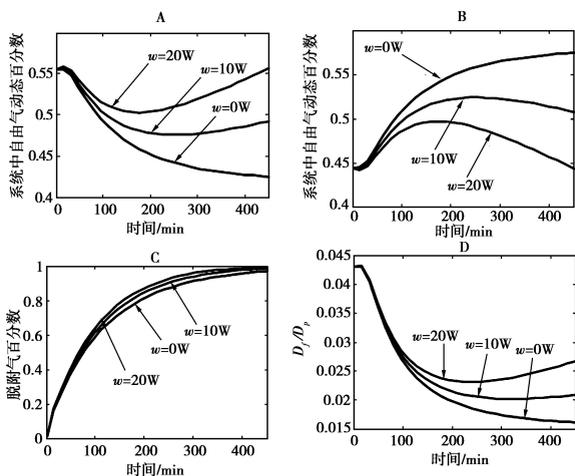


图 4 声场作用下,估算的气体特征参数与时间的关系曲线

5 结 语

1)提出了基于超声热效应促进煤层瓦斯解吸扩散的数值分析方法,该方法将煤样假设为含有大孔隙和微孔隙基质的双重孔隙结构,引入温度对微孔隙扩散系数的影响,利用温度梯度扩散模型建立了超声热效应促进煤层瓦斯解吸的热平衡方程和物质平衡方程;

2)模型计算结果表明,当无超声作用于煤体时,煤体中煤层瓦斯解吸/扩散所引起的煤体温度变化可以忽略不计;由于煤层瓦斯的吸附特性,引起煤层瓦斯大部分以吸附气的形式存在于微孔隙之中,一般情况下难以脱附或排出,这正是煤层气开采的一大难题。

3)计算结果也显示,当超声作用于煤体时,超声

热效应可以明显地提高煤样的温度,增大微孔隙扩散系数,提高大孔隙游离气的动态百分数,降低微孔隙中吸附气的动态百分数。这为超声波促进煤层瓦斯解吸—扩散,提高煤层瓦斯抽采率提供了分析的理论基础。

参考文献:

- [1] 格·德李,李金.煤和瓦斯突出[M].于不凡,译.北京:煤炭工业出版社,1959.
- [2] 何学秋.交变电磁场对煤吸附瓦斯的影响[J].煤炭学报,1996,21(1):63-67.
HE Xue-qi. The effect of alternative electromagnetic field on adsorption of gas by coal[J]. Journal of China Coal Society, 1996,21(1):63-67.
- [3] 杜云贵.地球物理场中煤层气吸附、渗流特性研究[D].重庆:重庆大学,1993.
- [4] 刘保县.延迟突出煤的物理力学特征和煤延迟突出机理研究[D].重庆:重庆大学,2000.
- [5] 刘保县.地球物理场对煤吸附瓦斯特性的影响[J].重庆大学学报,2000,23(5):78-81.
LIU Bao-xian. Effects of physical geography field to absorption of coal gas on coal[J]. Journal of Chongqing University,2000,23(5):78-81.
- [6] 刘保县,鲜学福,王宏图,等.交变电场对煤瓦斯渗流特性的影响实验研究[J].重庆大学学报,2000,23(S0):41-43.
LIU Bao-xian, XIAN Xue-fu, WANG Hong-tu, et al. Study on penetrability characteristics of coal to methane in alternating Electric field [J]. Journal of Chongqing University, 2000,23(S0):41-43.
- [7] 易俊,姜永东,鲜学福.在交变电场声场作用下煤解吸吸附瓦斯特性分析[J].中国矿业,2005,14(5):70-73.
YI Jun, JIANG Yong-dong, XIAN Xue-fu. The research on the traits of the absorption and desorption of coal to gas alternating electric field (AEF) OR sound field (SF) [J]. China Mining Magazine, 2005,14(5):70-73.
- [8] KARACAN C O. Heterogeneous sorption and swelling in a confined and stressed coal during CO₂ injection [J]. Energy and Fuels,2003,17(3):1 595-1 608.
- [9] LARSEN J W. The effects of dissolved CO₂ on coal structure and properties[J]. International Journal of Coal Geology,2004,57(1):63-70.
- [10] SHI J Q, DURUCAM S. A bidisperse pore diffusion model for methane displacement desorption in. coal by CO₂ injection[J]. Fuel,2003,82(1):1 219-1 229.
- [11] YI J, AKKUTLU I. Y and DEUTSCH C V. Gas adsorption /diffusion in bidisperse coal particles; investigation for an effective diffusion coefficient in coalbeds [C]. The Petroleum Society's 7th Canadian International Petroleum Conference, Calgary, Alberta, Canada, June:13-15,2006.
- [12] SCHUELLER B S, YANG R T. Ultrasound enhanced adsorption and desorption of phenol on activated carbon and polymeric resin [J]. Industrial and Engineering Chemistry Reserch,2001,40(22):4 912-4 918.
- [13] YANG R T. Gas Separation by Adsorption Processes [M]. Butterworth: Boston, 1987;Chapter 4.
- [14] DO D D, Wang K. A new model for the description of adsorption of kinetics in heteogeneous activated carbon [J]. Carbon,1998,36(10):1 539-1 554.
- [15] NANDI S P, WALKER PL. The diffusion of nitrogen and carbon dioxide from coals of various ranks [J]. Fuel,1964,43:385-393.
- [16] BARBOSAMOTA J R, SAATDJIAN D and TONDEUR D. A simulation model of a high — capacity methane adsorptive storage system [J]. Adsorption, 1995 (1): 1-27.
- [17] BREITBACH M, BATHEN D. Effect of ultrasound on adsorption and desorption processes [J]. Ind. Eng. Chem. Res. 2003,42:5 635-5 646

(编辑 王秀玲)