

文章编号: 1673-3363-(2014)05-0803-06

温度场对注气驱替煤层气运移影响的数值分析

陈新忠¹, 张丽萍²

(1. 中国矿业大学科学技术研究院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学理学院, 江苏 徐州 221116)

摘要 根据热弹性力学、对流弥散理论和多孔介质热力学原理, 建立了包含煤的变形方程、气体运移方程、热传导的注气驱替热-流-固多物理场全耦合数学模型, 求解耦合模型, 研究温度场对注气驱替开采煤层气运移过程的影响。结果表明: 煤层温度升高可以促进煤层气解吸, 加速煤层气产出。研究成果可为注气驱替开采煤层气工程实践提供相应的理论基础, 对深部开采高瓦斯矿井时施行先抽后采技术具有借鉴意义。

关键词 煤层气; 注气驱替; 热-流-固耦合; 对流弥散

中图分类号 TP 391.4

文献标志码 A

Numerical analysis of gas migration in enhancement of coal bed methane recovery influenced by thermal field

CHEN Xinzhong¹, ZHANG Liping²

(1. Academy of Science & Technology, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;
2. College of Sciences, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract According to the thermoelasticity, convention and dispersion theory and porous medium thermodynamics, the thermal-hydrological-mechanical coupling equations of enhancing coal bed methane have been established in terms of coal deformation, gas migration and heat transport. The numerical solution has been presented in order to investigate the effect of the temperature field on the gas migration in enhancement of coal bed methane. It demonstrates that rising temperature can promote desorption of coal bed methane and quicken coal bed methane production. The results can provide a corresponding theoretical basis for engineering practices of exploiting coal methane, more over it can be referred by the technology of draining gas before extracting coal gassy mining in deep coal seam.

Key words coal bed methane; enhancement of coal bed methane; thermal-hydrological-mechanical coupling; convention and dispersion

注气驱替开采煤层气是一种新兴的煤层气开采技术, 是指将 CO₂ 注入深部不可采煤层用以驱替开采煤层气来提高煤层气产量, 同时将温室气体 CO₂ 封存起来。注气驱替技术有着巨大的应用前景和实际意义, 受到各国广泛关注, 成为国际国内研究的焦点^[1-2]。美国是世界上最早利用在煤层中注入

CO₂ 来提高煤层气采出率的国家, 也是研究投入最多的国家。美国的 Coal-Seq 项目是世界上第一个也是迄今为止规模最大的一个注气驱替煤层气技术现场试验项目^[3]。其中 Allison Unit 试验现场由 4 口 CO₂ 注气井和 16 口煤层气生产井组成。生产井自 1989 年开始生产, 在进行了 6 年的单纯开采后, 煤层气产量大幅度

收稿日期: 2013-08-23

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2011QNB04, 2012QNA53); 江苏省产学研联合基金项目(BY2013019-07)

作者简介: 陈新忠(1973—), 男, 江苏省泰兴市人, 副教授, 博士, 从事煤矿绿色开采方面的研究。

E-mail: xzch@cumt.edu.cn

Tel: 13852086181

减少, 1995 年开始注入 CO_2 , CO_2 注入作业一直延续到 2001 年。结果发现, 煤层气产气量增加了 150%, 采出率达 95%^[4]。中国和加拿大两国政府在 2002 至 2006 年开展注气驱替煤层气技术方面的合作, 在中国山西沁水盆地联合进行了 CO_2 煤层封存和提高煤层气采收率技术方面的试验研究。试验选择位于沁水盆地南部的 TL-003 井作为试验井, 目标煤层为 3 号煤层, 煤层气产出速率增加到原来的 5 倍^[5]。煤层中封存 CO_2 的成功实践为世界许多国家提供了宝贵的经验, 同时也暴露了 CO_2 煤层封存研究尚存在许多理论空白。注气驱替过程中煤层气与注入气体的竞争吸附、扩散以及渗流均受到地应力、煤层渗透率、温度等因素的影响, 存在多相流体多物理场的耦合。对其机理的研究有助于指导生产实践, 提高煤层气开采效率。已有研究仅考虑 CO_2 和 CH_4 的竞争吸附和扩散渗流, 研究 CO_2 注入对 CH_4 的影响^[6-8]; 但既然注气驱替煤层气过程涉及煤对 CH_4 和 CO_2 的竞争吸附, 为使研究更接近实际情况, 必须考虑温度场对于气体流动和应力场的分布影响, 建立热-流-固全耦合数值模型。本文根据注气驱替中二元气体特点建立热-流-固全耦合控制方程, 结合相关实验建立物理模型, 利用有限元计算软件 COMSOL Multiphysics 对方程进行数值求解, 分析温度对气体压力、渗透率、煤层气产出速率和产量的影响。研究表明: 通过提高温度, 可以加速气体压力的变化, 降低渗透率, 提高煤层气产出速率和产量。通过此研究一方面可确定注热与注气 2 种强化抽采煤层气模式对煤层气运移规律的影响, 另一方面可利用结果估计不同地温条件下煤层气赋存量。

1 注气驱替煤层气的热-流-固耦合数学模型

1.1 二元气体的竞争吸附方程

煤对不同气体的吸附能力是不同的, 主要是由于气体分子与煤之间作用力不同所引起的。当二氧化碳注入煤层中, 由于甲烷的吸附能力小于二氧化碳, 吸附力较弱, 这就使得甲烷更易于从煤中解吸出来, 因此研究注入 CO_2 气体驱出甲烷进行定量分析, 需要研究煤对多组分的吸附规律。Ruthven^[9]和 Yang^[10]研究表明, 煤对多组分气体的吸附可用广义 Langmuir 方程描述。在 CO_2 驱替煤层甲烷系统中, 煤层中的气体为二氧化碳和甲烷 2 种气体。在任意气体压力下, 煤层中吸附 CO_2 和 CH_4 的总量为

$$V = \frac{V_{L1}C_1b_1RT + V_{L2}C_2b_2RT}{1 + C_1b_1RT + C_2b_2RT} \quad (1)$$

式中: CH_4 , CO_2 分别为组分 1, 2; C_1 为 CH_4 气体体积分数; b_1 为 CH_4 的 Langmuir 吸附常量; V_{L1} 为 CH_4 的 Langmuir 体积常量; C_2 为 CO_2 气体体积分数; b_2 为 CO_2 的 Langmuir 吸附常量; V_{L2} 为 CO_2 的 Langmuir 体积常量; R 为普适气体常数; T 为温度。

实验结果表明^[11-13], 方程(1)能够较好地描述混合气体中各组分的吸附解吸使煤产生的体积应变。相应的, 由 CH_4 , CO_2 组成的二元气体吸附解吸所引起的总体积应变为

$$\varepsilon_s = \sum_{i=1}^2 \varepsilon_{si} = \frac{\varepsilon_{L1}C_1b_1RT + \varepsilon_{L2}C_2b_2RT}{1 + C_1b_1RT + C_2b_2RT} \quad (2)$$

式中: ε_{L1} 为 CH_4 的 Langmuir 体积应变; ε_{L2} 为 CO_2 的 Langmuir 体积应变。

1.2 注气驱替开采煤层气的煤层变形控制方程

二元气体作用下, 气体的压力变为二元气体的总压力, 并且需要考虑各个气体分压对煤变形的影响。含吸附作用的煤的本构方程^[14]为

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2G} \sigma_{ij} - \left(\frac{1}{6G} - \frac{1}{9K} \right) \sigma_{kk} \delta_{ij} - \frac{\alpha \cdot RT}{3K} (C_1 + C_2) \delta_{ij} + \frac{\varepsilon_s}{3} \delta_{ij} + \frac{\alpha_s}{3} \Delta T \delta_{ij} \quad (3)$$

式中: ε_{ij} 为应变张量分量; σ_{ij} 为应力张量分量; G 为剪切模量; δ_{ij} 为 Kronecker 符号($i, j=x, y, z$); α 为 Biot 系数, $\alpha=1-K/K_s$, K_s 为煤体骨架的体积模量; K 为煤的体积模量; $\sigma_{kk}=\sigma_{11}+\sigma_{22}+\sigma_{33}$ 是正应力分量; α_s 为热膨胀系数。

式(3)与弹性力学平衡方程、几何方程相结合, 可得二元气体竞争吸附作用下煤层的变形的控制方程:

$$Gu_{i,kk} + \frac{G}{1-2\nu} u_{k,ki} - (\alpha \cdot RT + K \cdot AA) C_{1,i} - (\alpha \cdot RT + K \cdot BB) C_{2,i} - \alpha_s T_{,i} + f_{,i} = 0 \quad (4)$$

其中:

$$AA = \frac{\varepsilon_{L1}b_1RT(1+b_2RTC_2)}{(1+C_1b_1RT+C_2b_2RT)^2} - \frac{\varepsilon_{L2}b_1b_2R^2T^2C_2}{(1+C_1b_1RT+C_2b_2RT)^2}$$

$$BB = \frac{\varepsilon_{L2}b_2RT(1+b_1RTC_1)}{(1+C_1b_1RT+C_2b_2RT)^2} - \frac{\varepsilon_{L1}b_1b_2R^2T^2C_1}{(1+C_1b_1RT+C_2b_2RT)^2}$$

ν 为泊松比。

方程(4)前 2 项表示在压力、温度以及体力的影响下煤层的弹性变形, 第 3, 4 项分别表示孔隙 CO_2 和 CH_4 各自的分压和吸附作用引起的煤体力的变化, 第 5 项为热应变所导致的体力变化。

1.3 二元气体流动控制方程

根据质量守恒原理, 应用多孔介质内流体的动力弥散定律以及流体的连续性方程可推导出多孔介质中对流弥散方程^[15]:

$$\frac{\partial m_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} \cdot \rho_{gk}) + \nabla \cdot (-D_k \nabla C_k \phi) = Q_{sk} \quad (5)$$

式中: m_k 为单位体积的煤中气体 k 的质量, 包含了游离态和吸附态的气体质量; C_k 为气体 k 的体积分数; Q_{sk} 为气体的源或汇; \vec{v} 为对流速度, 写作^[16]:

$$\vec{v} = -\frac{kRT}{\mu} \nabla C_2 \quad (6)$$

式中: μ 为气体黏滞系数; k 为渗透率。

气体组分 k 在单位体积的煤中的质量可定义为

$$m_k = \phi \cdot C_k M_k + \frac{V_{Lk} b_k RT C_k M_k \rho_c}{1 + C_1 b_1 RT + C_2 b_2 RT} \quad (7)$$

式中: ρ_c 为煤的密度; M_k 为气体 k 的摩尔质量。

二元气体弹性孔隙介质孔隙率动态变化规律^[17]

$$\phi = \frac{1}{1+M} [(1+M_0)\phi_0 + \alpha(M-M_0)] \quad (8)$$

$$\text{此处 } M = \varepsilon_V + \frac{\sum_{j=1}^2 C_{j0} RT}{K_s} - \sum_{k=1}^2 \varepsilon_{Lk} \frac{C_k b_k RT}{1 + \sum_{i=1}^2 C_i b_i RT} - \alpha_s T,$$

$$M_0 = \varepsilon_{V0} + \frac{\sum_{j=1}^2 C_{j0} RT_0}{K_s} - \sum_{k=1}^2 \varepsilon_{Lk} \frac{C_{k0} b_k RT_0}{1 + \sum_{j=1}^2 C_{j0} b_j RT_0} - \alpha_s T_0$$

式中: ε_V 为体应变; ε_{V0} 为初始状态体应变。

渗透率与孔隙率之间的关系可表示为

$$\frac{k}{k_0} = \left(\frac{\phi}{\phi_0} \right)^3 \quad (9)$$

则渗透率为

$$\frac{k}{k_0} = \left(\frac{1}{1+M} [(1+M_0) + \alpha(M-M_0)/\phi_0] \right)^3 \quad (10)$$

将式(8)对 t 求导, 代入式(5), (7)可得注气驱替中 CH_4 的气体流动控制方程:

$$\begin{aligned} & C_1 \frac{(\alpha-\phi)}{(1+M)} \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial t} - \alpha_s C_1 \frac{(\alpha-\phi)}{(1+M)} \frac{\partial T}{\partial t} + \\ & \left(\phi + C_1 \frac{(\alpha-\phi)}{(1+M)} \left(\frac{RT}{K_s} - AA \right) + \rho_c \frac{p_{at}}{RT} CC \right) \frac{\partial C_1}{\partial t} + \\ & \left[C_1 \frac{(\alpha-\phi)}{(1+M)} \left(\frac{RT}{K_s} - BB \right) + \rho_c \frac{p_{at}}{RT} DD \right] \frac{\partial C_2}{\partial t} + \\ & \nabla \cdot \left[-\frac{kRT}{\mu} C_1 \cdot \nabla C_2 \right] + \nabla \cdot [-D_1 \phi \cdot \nabla C_1] = \frac{Q_{s1}}{M_1} \end{aligned} \quad (11)$$

同理对于 CO_2 的气体流动控制方程为

$$\begin{aligned} & C_2 \frac{(\alpha-\phi)}{(1+M)} \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial t} - \alpha_s C_2 \frac{(\alpha-\phi)}{(1+M)} \frac{\partial T}{\partial t} + \left(\phi + C_2 \frac{(\alpha-\phi)}{(1+M)} \left(\frac{RT}{K_s} - BB \right) + \rho_c \frac{p_{at}}{RT} \cdot C' C' \right) \frac{\partial C_2}{\partial t} + \\ & \left(C_2 \frac{(\alpha-\phi)}{(1+M)} \left(\frac{RT}{K_s} - AA \right) - \rho_c \frac{p_{at}}{RT} \cdot D' D' \right) \frac{\partial C_1}{\partial t} + \nabla \cdot \left[-\frac{kRT}{\mu} C_2 \cdot \nabla C_2 \right] + \nabla \cdot [-D_2 \phi \cdot \nabla C_2] = \frac{Q_{s2}}{M_2} \end{aligned} \quad (12)$$

式(11)中, 左边第1项(与 $\partial \varepsilon_V / \partial t$ 相关)是单位体积煤中由于骨架变形而释放(或存储) CH_4 的摩尔数。左边第2项(与 $\partial T / \partial t$ 相关)是单位体积煤中由于温度变化产生热膨胀(收缩)而释放(或存储) CH_4 的摩尔数。左边第3项(与 $\partial C_1 / \partial t$ 相关)是单位体积煤中 CH_4 的存储项, 表示体积分数变化导致单位体积的煤中 CH_4 气体释放(或存储)的气体摩尔数, 其中包括3部分: ① 孔隙处于游离状态的 CH_4 气体的摩尔数; ② 孔隙气体压力改变所引起有效应力的变化和吸附(解吸)引起的膨胀(收缩)作用后而产生额外空间所释放(或存储)的 CH_4 摩尔数; ③ 处于吸附状态的 CH_4 气体的摩尔数。左边第4项(与

$\partial C_2 / \partial t$ 相关)是单位体积的煤中 CO_2 气体驱替 CH_4 的摩尔数, 其中包括2项: ① 由 CO_2 - CH_4 逆向动力弥散引起的膨胀(收缩)和孔隙压力产生驱替孔隙中 CH_4 的摩尔数; ② CO_2 , CH_4 竞争吸附所释放(或存储) CH_4 的摩尔数。左边第5项是由于 CH_4 气体渗流导致煤中 CH_4 摩尔数变化。左边第6项是由于 CH_4 气体分子动力弥散作用引起 CH_4 摩尔数变化。式(12)中各项的意义与式(11)类似, 区别在于所针对的气体不同。

1.4 温度场控制方程

利用能量守恒和热传导方程可得温度场控制方程为

$$(\rho_s c_s + \phi(\rho_{g1} c_{g1} + \rho_{g2} c_{g2})) \frac{\partial T}{\partial t} + \Delta T (\rho_{g1} c_{g1} + \rho_{g2} c_{g2}) \frac{\partial \phi}{\partial t} + T \alpha_s K \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial t} + \Delta T (\rho_{g1} c_{p1} + \rho_{g2} c_{p2}) \nabla \vec{q}_g + \nabla (k_t \nabla T) = Q_T \quad (13)$$

将式(8)对 t 求导后代入式(13)得

$$\begin{aligned}
& \left[\rho_s c_s + \phi \cdot (\rho_{g1} c_{g1} + \rho_{g2} c_{g2}) - \frac{(\alpha - \phi)(\rho_{g1} c_{g1} + \rho_{g2} c_{g2}) \Delta T \alpha_s}{1 + M} \right] \frac{\partial T}{\partial t} + \left[\Delta T (\rho_{g1} c_{g1} + \rho_{g2} c_{g2}) \frac{\alpha - \phi}{K_s (1 + M)} - \right. \\
& \left. \Delta T (\rho_{g1} c_{g1} + \rho_{g2} c_{g2}) \frac{(\alpha - \phi) \varepsilon_L p_L}{(p + p_L)^2 (1 + M)} \right] \frac{\partial p}{\partial t} + \left[T \alpha_s K + \Delta T (\rho_{g1} c_{g1} + \rho_{g2} c_{g2}) \frac{\alpha - \phi}{1 + M} \right] \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \\
& (\rho_{g1} c_{p1} + \rho_{g2} c_{p2}) \Delta T \nabla \cdot \left(-\frac{k}{\mu} \nabla p \right) + \nabla \cdot (k_i \nabla T) = Q_T
\end{aligned} \quad (14)$$

式(14)为温度场控制方程,式中左边第1项(与 $\partial T/\partial t$ 相关)为含瓦斯煤内能变化项,其中包括3部分:①煤体骨架体积热容;②孔隙中游离气体(包括 CO_2 , CH_4)的体积热容;③由于热膨胀导致孔隙变化使游离气体(包括 CO_2 , CH_4)体积变化而附加的体积热容。左边第2项(与 $\partial p/\partial t$ 相关)为压力引起有效应力变化使孔隙变化而产生的含瓦斯煤内能变化,包括2部分:①压力引起有效应力变化使孔隙变化而产生的含瓦斯煤内能变化;②煤由吸附(解吸)引起的膨胀(收缩)对孔隙的气体内能的影响。左边第3项(与 $\partial \varepsilon_v/\partial t$ 相关)为煤体变形引起煤内能的变化,包括2部分:①煤体骨架变形能;②煤变形使孔隙变形而导致煤孔隙中气体内能的增量。第4项为热对流项,第5项为热传导项。

2 注气驱替煤层气热流固耦合数值模型求解

2.1 模拟结果与实验结果的对比分析

根据 Mazumder^[18]实验,利用 Silezia 煤矿煤芯样品实验数据建立二维模型。模型长度为 200.5 mm,宽为 69.5 mm。初始 CH_4 压力为 8.17 MPa,围压为 10.57 MPa。左边界和下边界分别为水平位移和垂直位移约束。上边界施加载荷以模拟围压,模型右边界为自由边界, CO_2 从模型左侧以 1 mL/h 速率注入,其他边界无 CO_2 气体流出,对于 CH_4 模型右侧固定压力为标准大气压,其他边界无气体流出。通过实验资料^[18]确定模拟参数,如表1。

表1 数值模拟的参数
Table 1 Parameters for simulation

参数	取值	参数	取值
煤的弹性模量, E/GPa	2.50	CH_4 的 Langmuir 体积常数, $V_{L1}/(\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	0.021
煤骨架弹性模量, E_s/GPa	8.13	CO_2 的 Langmuir 体积常数, $V_{L2}/(\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	0.036 7
煤的泊松比, ν	0.39	CH_4 的 Langmuir 体积应变常数, ε_{L1}	0.024 4
煤的密度, $\rho_c/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.25×10^3	CO_2 的 Langmuir 体积应变常数, ε_{L2}	0.042 7
气体的黏滞系数, $\mu/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	1.84×10^{-5}	CH_4 的 Langmuir 压力常数, p_{L1}/MPa	4.80
初始孔隙率, ϕ_0	0.008 4	CO_2 的 Langmuir 压力常数, p_{L2}/MPa	2.35
初始渗透率, k_0/m^2	9×10^{-18}	CH_4 的动力弥散系数, $D_1/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	3.6×10^{-12}
		CO_2 的动力弥散系数, $D_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	5.8×10^{-12}

实验保持等温过程,因此,模拟中先不考虑温度场的影响,将数值模型和实验^[18]进行对比,验证所建模型的正确性。

1) 线应变结果比较

图1是线应变的数值结果和实验数据的比较。煤样轴向变形均表现为随注入 CO_2 时间的增加,产生膨胀变形作用,即 CO_2 在煤样上的吸附作用引起煤样的膨胀量比 CH_4 的大,带来煤样整体的膨胀变形。从图中可以看到实验和模拟结果能很好地吻合,最大的误差出现在初始阶段,产生误差的原因在于模拟时未考虑吸附解吸时间。

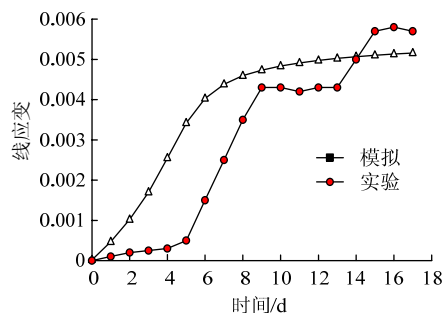


图1 线应变的数值结果和实验数据的比较
Fig.1 Comparison between modeling results and experimental data of linear strain

2) CO₂ 驱替结果比较

CO₂ 的置换摩尔分数以及 CH₄ 的驱替效率计算公式如式(15)和式(16)所示:

$$\text{CO}_2 \text{ 的置换摩尔分数} = \frac{\text{注入 CO}_2 \text{ 摩尔数}}{\text{初始 CH}_4 \text{ 摩尔数}} \quad (15)$$

$$\text{CH}_4 \text{ 的驱替效率} = \frac{\text{产出 CH}_4 \text{ 摩尔数}}{\text{初始 CH}_4 \text{ 摩尔数}} \quad (16)$$

图2是CH₄的驱替效率数值模拟与实验的对比曲线。从图中可以看到,模拟结果与实验中得到的数据吻合。随着CO₂的注入,大量的CH₄从煤层中被驱替出,同时将CO₂封存于煤层中。注气的初始阶段,CH₄的产出率高,随着注气不断进行,由于煤吸附膨胀变形导致煤层的渗透率变小,CO₂的可注性降低。从图中可以看出实验和模拟非常吻合,最大误差不超过10%,证明了所建注气驱替模型的合理性,因此可以运用建立多物理场耦合模型对注气驱替过程进行模拟研究。

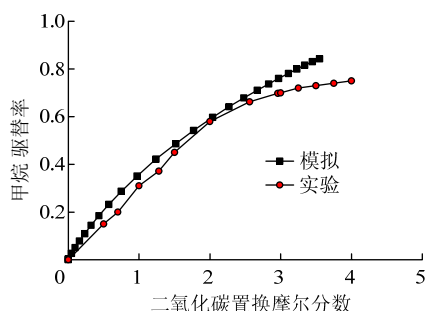


图2 驱替效率的数值结果与实验数据的比较

Fig.2 Comparison between modeling results and experimental data of sweep efficiency

2.2 CO₂ 驱替 CH₄ 温度敏感性分析

为了研究温度场对于CO₂驱替CH₄过程的影响,在模型左侧引入温度边界条件,研究注气驱替过程中温度场对于气体压力、渗透率、产量、产出速率的影响,研究不同温度场条件下CO₂驱替CH₄一般性规律。

图3为实验23d时孔隙压力分布规律。CO₂的注入可以提高孔隙压力,且温度越高,孔隙压力越大。生产23d时,CO₂已经运移至模型右端,温度升高降低CH₄吸附量同时,也会降低CO₂吸附量,CO₂吸附量的降低,必然导致游离态CO₂的增加,从而增加储层压力,增加CO₂的运移速度。

图4为23d时渗透率分布规律。从图中可知,随着温度升高,渗透率下降。原因在于温度升高一方面会有热应力导致煤体膨胀变形,减小孔隙率,降低渗透率;另一方面会导致煤层CH₄解吸而减小

吸附膨胀,提高渗透率,这两者共同作用决定煤层渗透率变化规律。由图可知,对渗透率变化规律起主导作用的是热应力导致的渗透率随温度下降。从图中也可以看到距模型右端越近,渗透率越小。这是由于煤吸附CO₂产生的吸附变形大于煤对CH₄的吸附变形,CO₂的注入,与CH₄竞争吸附结果会导致煤吸附变形增大,致使煤孔隙率降低而使煤渗透率减小。

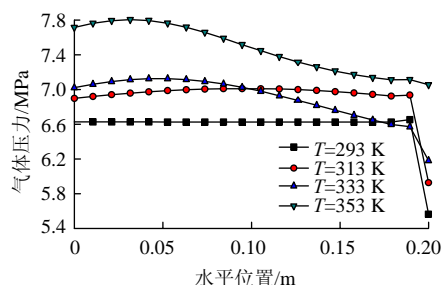


图3 煤层中孔隙压力分布规律($t=23$ d)

Fig.3 The distribution of total gas pressure in coal seam

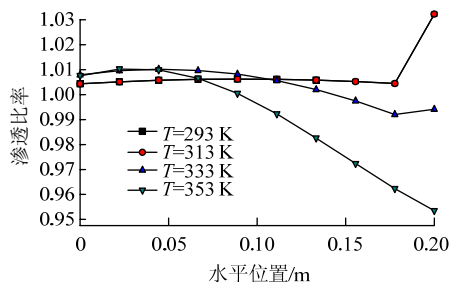


图4 煤层渗透率比率分布规律($t=23$ d)

Fig.4 The distribution of permeability ratio in coal-seam

图5是CH₄的产出速率演化曲线。从图中可明显看到温度提高有助于加快煤层甲烷的产出速率。前3d,提高温度对于产出速率影响不明显;3d后,温度提高大大提高了甲烷的产出速率,出现峰值且温度越高,到达峰值速率越快,产出速率峰值也越大。峰值过后,产出速率下降,温度越高,产出速率下降越多。这是由于CH₄的吸附解吸规律是非线性的,初始储层压力大,CH₄主要以吸附态存在;随着时间增加,储层压力下降,越来越多的吸附态CH₄从煤中解吸,解吸CH₄受体积分数梯度影响向孔隙中扩散,然后受压力影响向外渗流,从而提高了CH₄的产出速率最后,由于随着气体运移,储层CH₄压力梯度减小,渗流速度降低,产出速率下降。并且,温度提高促使CH₄解吸,提高游离了甲烷体积分,加速CH₄产出。图6是不同温度下生产23d时CH₄累计产量演化曲线。从图中可以看到随着

温度增加 CH_4 累计产量增加。生产 23 d, $T=293\text{ K}$ 时, CH_4 的累计产量为 0.058 kg, 而当 $T=353\text{ K}$ 时, CH_4 的累计产量为 0.068 kg, 增产 17%。

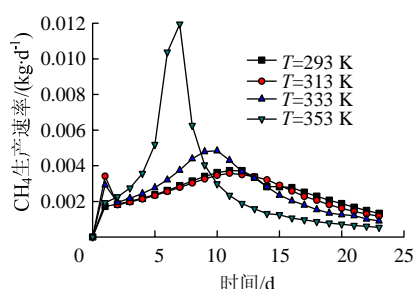


图 5 CH_4 生产速率演化曲线

Fig.5 Production rate of CH_4

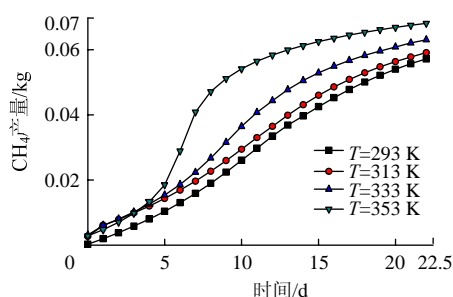


图 6 CH_4 累计产量演化曲线

Fig.6 The cumulative production of CH_4

3 结 论

本文综合考虑了二元气体分压、吸附变形和煤体热膨胀等因素对于渗透率变化的影响, 建立二元气体动态渗透率方程。根据注气驱替中二元气体特点以及温度效应提出针对注气驱替过程的煤层本构方程, 联立几何方程、平衡方程获得注气驱替过程煤层变形控制方程。根据流体的质量守恒方程、二元气体动力弥散方程建立了双重孔隙介质中二元气体运移控制方程。根据能量守恒方程建立二元气体的温度场控制方程, 对所建立的注气驱替耦合数学模型进行了数值求解。结果表明: 在一定范围内提高煤层的温度, 有助于提高注气驱替煤层气过程 CH_4 的产出速率和产量。

参考文献:

- [1] MAZZOTTI M, PINI R, STORTI G. Enhanced coalbed methane recovery[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2009, 47: 619-627.
- [2] WONG S, LAW D, DENG X, et al. Enhanced coalbed methane-micro-pilot test at South Qinshui, Shanxi, China[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2007, 1: 215-222.
- [3] REEVES S R. The Coal-Seq project: Key results from

field, laboratory and modeling studies[C]// Proceedings of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies. Canada: Elsevier Science & Technology Books, 2004: 1399-1406.

- [4] REEVES S R, GONZALEZ R, HARPALANI S, et al. Results, status and future activities of the coal-seq consortium[J]. Energy Procedia, 2009, 1: 1719-1726.
- [5] 中联煤层气有限责任公司, 艾伯塔研究理事会. 中国 CO_2 注入提高煤层气采收率试验性先导技术[M]. 北京: 地质出版社, 2008: 35-50.
- [6] CHARRIERE D, POKRYSZKA Z, BEHRA P. Effect of pressure and temperature on diffusion of CO_2 and CH_4 into coal from the Lorraine basin[J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 81: 373-380.
- [7] CROSDALE P J, MOORE T A, MARES T E. Influence of moisture content and temperature on methane adsorption isotherm analysis for coals from a low-rank, biogenically-sourced gas reservoir[J]. International Journal of Coal Geology, 2008, 76: 166-174.
- [8] SAUNDERS R T, YANG J T. Adsorption of gases on coals and heat treated coals at elevated temperature and pressure: 1. Adsorption from hydrogen and methane as single gases[J]. Fuel, 1985, 64(5): 616-620.
- [9] RUTHVEN D M. Principles of adsorption and adsorption processes[M]. New York: Wiley, 1984.
- [10] YANG R T. Gas separation by adsorption processes [M]. Boston: Butterworth, 1987.
- [11] HARPALANI S, SCHRAUFNAGEL R A. Shrinkage of coal matrix with release of gas and its impact on permeability of coal[J]. Fuel, 1990, 69(5): 551-556.
- [12] BUTLER J A, OCKRENT V C. Studies in electrocapillarity. Part III. The surface tensions of solutions containing two surface-active solutes[J]. Journal of Phys Chem, 1930, 34: 2841-2845.
- [13] DO D. Adsorption analysis: equilibrium and kinetics [M]. London: Imperial College Press, 1998.
- [14] 张丽萍. 低渗透煤层气开采的热-流-固耦合作用机理及应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.
- [15] GRUSZKIEWICZ M S, NANEY M T. Adsorption kinetics of CO_2 , CH_4 , and their equivocal mixture on coal from the Black Warrior Basin, West-Central Alabama [J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 77(7): 23-33.
- [16] CHEN Z W, LIU J S, ELSWORTH D, et al. Impact of CO_2 injection and differential deformation on CO_2 injectivity under in-situ stress conditions[J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 81: 97-108.
- [17] ZHANG H B, LIU J S, ELSWORTH D, et al. How sorption-induced matrix deformation affects gas flow in coal seams: A new FE model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2008, 45: 1226-1236.
- [18] MAZUMDER S, WOLF K H. Differential swelling and permeability change of coal in response to CO_2 injection for ECBM[J]. International Journal of Coal Geology, 2008, 74(2): 123-138.