



扫码阅读下载

孙朋. 基于孔-裂隙的煤层瓦斯抽采热-流-固耦合模型研究[J]. 矿业安全与环保, 2024, 51(4): 64-73.

SUN Peng. Thermal-hydrological-solid coupling model of coal seam gas extraction based on pore-fracture[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2024, 51(4): 64-73.

DOI: 10.19835/j.issn.1008-4495.20231098

基于孔-裂隙的煤层瓦斯抽采热-流-固耦合模型研究

孙 朋^{1,2}

(1. 煤矿灾害防控全国重点实验室, 重庆 400037; 2. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400037)

摘要:为研究温度因素对负压钻孔抽采瓦斯的影响,建立了基于孔-裂隙双重多孔介质的热-流-固耦合模型,运用数值模拟手段,对比了不考虑温度因素下基于气-固耦合模型的瓦斯抽采特点和抽采效果。模拟结果表明:考虑温度因素影响所得渗透率结果更小,抽采卸压效果相对较弱;初始煤层瓦斯压力越高,煤层温度降低越明显;考虑温度变化影响,针对不同有效抽采半径 R ,进行了孔间距为 $2\sqrt{3}R/3, 2R, 4R, 6R$ 的多钻孔布孔研究,得出有效抽采区域随抽采时间增加呈现由多个小圆柱状发展为一个大的圆角三棱柱,最后趋向于一个规则的大圆柱状的变化规律。研究成果可为预抽煤层瓦斯前布孔设计工作及实际瓦斯灾害防控提供一定的参考。

关键词: 瓦斯抽采; 热-流-固耦合; 有效抽采区域; 钻孔间距; 数值模拟

中图分类号: TD712.6

文献标志码: A

文章编号: 1008-4495(2024)04-0064-10

Thermal-hydrological-solid coupling model of coal seam gas extraction based on pore-fracture

SUN Peng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, Chongqing 400037, China;

2. CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400037, China)

Abstract: In order to study the influence of temperature factors on gas extraction by negative pressure drilling, a thermal-fluid-solid coupling model based on pore-fracture dual porous media was established. By means of numerical simulation, the gas extraction characteristics and extraction effect based on gas-solid coupling model without considering temperature factors were compared. The simulation results show that the permeability results obtained by considering the influence of temperature factors are smaller, and the effect of pressure relief is relatively weak. The higher the initial coal seam gas pressure is, the more obvious the coal seam temperature decreases. Considering the influence of temperature change, for different effective extraction radius R , the multi-hole spacing of $2\sqrt{3}R/3, 2R, 4R, 6R$ is carried out, and the change rule of effective extraction area is obtained. It is concluded that the effective extraction area develops from multiple small cylinders to a large rounded triangular prism with the increase of extraction time, and finally tends to a regular large cylinder. It is expected to provide some reference value for the design of pre-drainage coal seam gas and the prevention and control of actual gas disasters.

Keywords: gas extraction; thermal-hydrological-solid coupling; effective drainage area; drill-hole spacing; numerical simulation

收稿日期: 2023-12-13; 2024-03-27 修订

基金项目: 重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2022NSCQ-MSX1080); 中国煤炭科工集团有限公司重点研发项目(2022-2-TD-ZD010)

作者简介: 孙 朋(1988—), 男, 山东聊城人, 硕士, 助理研究员, 主要从事煤岩瓦斯灾害防治方面的研究工作。
E-mail: cqmkywssp@163.com.

煤炭是我国的主要能源。随着浅部煤炭资源日趋枯竭,我国大量矿井进入深部开采,瓦斯灾害威胁极其严重^[1]。矿井瓦斯抽采是防治煤与瓦斯突出的重要措施,煤层瓦斯抽采受煤岩体变形、流体运动及温度变化等多因素影响,是多物理场耦合作用影响下的动态变化过程。

近年来,众多学者对煤层瓦斯抽采的流-固耦

合、热-流-固耦合进行了研究和探索。程远平^[2]、刘军^[3]、王登科^[4]等建立了考虑基质瓦斯拟稳态扩散、裂隙瓦斯渗流、渗透率演化及煤体变形的瓦斯运移气-固耦合模型,并采用 COMSOL 模拟软件对模型进行数值解算,分析了扩散及渗流过程对瓦斯运移的影响,研究了负压在瓦斯抽采过程中的作用机制;陈月霞^[5]、徐刚^[6]、YAN^[7]等对负压抽采瓦斯的钻孔有效抽采半径及多钻孔抽采瓦斯钻孔布置情况进行了较为详尽的研究;张波^[8]、范超军^[9]等建立了热-流-固耦合模型,运用 COMSOL 模拟软件,研究了温度和地应力对深部煤体瓦斯运移规律的影响;陶云奇^[10]、张丽萍^[11]、郝建峰^[12]等建立了热-流-固耦合模型,并运用数值模拟软件对含瓦斯煤体的瓦斯运移机理、渗流特性等多个方面进行了研究;LI 等^[13]建立了考虑气-液两相流的热-流-固耦合模型,对不同的煤层气抽采耦合模型进行了对比分析;林柏泉^[14]、张民波^[15]等基于煤体的各向异性,对负压抽采瓦斯区域的影响及抽采特点进行了研究。

综上所述,在瓦斯抽采领域,对气-固耦合模型的研究已经较多,同时,双孔介质模型在气-固耦合模型中已有较为广泛的应用。尽管针对热-流-固耦合模型也有一些研究,但是针对孔隙-裂隙双重多孔介质的热-流-固耦合模型的研究还不够深入,同时,将构建的热-流-固耦合模型与气-固耦合模型应用结果进行对比也具有重要的现实意义。因此,笔者建立基于孔-裂隙双重介质多孔模型的热-流-固耦合模型,运用 COMSOL 软件,研究温度因素对瓦斯抽采特点和抽采区域变化规律的影响,以期对矿井瓦斯抽采治理工作提供一定的指导。

1 煤层热-流-固耦合模型的建立

1.1 煤体变形方程

煤体变形主要是由于作用在煤体骨架上的有效应力使煤体骨架发生变形。笔者引用双重介质多孔模型^[16],并考虑温度、裂隙内瓦斯渗流和孔隙内瓦斯吸附解吸的应力作用。

考虑煤体孔隙和裂隙中存在游离态、吸附态瓦斯,并与煤本身构成统一的整体。有效应力表达式如下:

$$\sigma_{ij}^{\text{eff}} = \sigma_{ij} - (\alpha_m p_m + \alpha_f p_f) \quad (1)$$

式中: σ_{ij}^{eff} 为有效应力, MPa; σ_{ij} 为总应力, MPa; α_m 、 α_f 分别为煤体基质孔隙和煤体裂隙的修正系数,可根据任选一截面上的受力平衡原理得出; p_m 、 p_f 分别为煤体基质和裂隙内的瓦斯压力, MPa。

煤体含瓦斯的体变形方程由平衡方程、几何方

程和本构方程组成。

分析单元体各面受力平衡情况,根据动量守恒定律,得到修正后的平衡方程如下:

$$\sigma_{ij,j} + [(\alpha_m p_m + \alpha_f p_f) \delta_{ij}]_{,j} + F_i = 0 \quad (2)$$

式中: $\sigma_{ij,j}$ 为有效应力分量, MPa; F_i 为体积力, N/m³; δ_{ij} 为 Kronecker delta 张量。

煤体骨架发生微小形变,几何方程如下:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(\mu_{i,j} + \mu_{j,i}) \quad (3)$$

式中: ε_{ij} 为应变分量; $\mu_{i,j}$ 、 $\mu_{j,i}$ 为位移分量。

假设煤体为线弹性体,含瓦斯煤体的总应变是由地应力应变、热膨胀应变和煤体孔隙内瓦斯吸附解吸引起的煤体基质颗粒应变共同影响的,根据总应变可以得出本构方程:

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_v \delta_{ij} + 2G \varepsilon_{ij} - \theta \alpha_T \Delta T \delta_{ij} - \varphi \gamma \Delta p_m \delta_{ij} - \frac{2a\gamma\rho_s RT \ln(1+bp_m) \delta_{ij}}{9V_m} \quad (4)$$

其中: $\lambda = \frac{2G\nu}{1-2\nu}$, $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$, $\theta = \frac{2G+3\lambda}{3}$, $\gamma = \frac{3(1-2\nu)}{E}$, $\varphi = \frac{3\lambda-2G}{3}$ 。

式中: E 为煤的弹性模量, MPa; α_T 为煤体热膨胀系数; ε_v 为煤体总体积应变; θ 为热应力系数; φ 为瓦斯压力应力系数; γ 为体积压缩系数; a 为单位体积煤最大吸附量, m³/t; b 为煤体吸附常数, MPa⁻¹; ν 为泊松比; ρ_s 为煤体视密度, kg/m³; V_m 为气体摩尔体积, m³/mol; G 为切变模量, MPa; λ 为拉梅系数, MPa。

将式(2)~(4)3个方程联立,可得到基于孔隙-裂隙双重多孔介质模型,考虑瓦斯压力变化、温度变化及瓦斯吸附解吸变化的含瓦斯煤的热-流-固耦合应力场方程如下:

$$G\mu_{i,jj} + \frac{G}{1-2\nu}\mu_{i,jj} + \alpha_m p_{m,i} + \alpha_f p_{f,i} - \theta \alpha_T (\Delta T)_{,i} - \varphi \gamma (\Delta p_m)_{,i} - \theta \frac{2a\gamma\rho_s RT [\ln(1+bp_m)]_{,i}}{9V_m} + F_i = 0 \quad (5)$$

1.2 煤体内瓦斯运移方程

1.2.1 孔隙-裂隙双重多孔介质渗透率模型

诸多研究结果表明,考虑有效应力、瓦斯压力、温度和煤基质吸附解吸瓦斯的影响,在孔隙-裂隙双重多孔介质模型中,裂隙率满足^[17]:

$$\varphi_f = \varphi_0 + \frac{\alpha_f}{M}(p_f - p_0) + \frac{\alpha_m}{M}(p_m - p_{m0}) + \left(\frac{K}{M} - 1\right) \cdot \alpha_T (T - T_0) \quad (6)$$

式中: M 为约束轴向模量, MPa; T 为煤层温度, K;

φ_{i0} 为初始裂隙率; p_{i0} 、 p_{m0} 分别为煤体初始裂隙瓦斯压力和煤体初始孔隙瓦斯压力, MPa。

煤体体积是指煤体骨架体积和煤体孔隙、裂隙体积之和, 其计算公式如下:

$$V = V_s + V_p + V_f \quad (7)$$

式中: V_s 为煤体骨架体积; V_p 为煤体孔隙体积; V_f 为煤体裂隙体积。

根据式(7)可以得到煤体孔隙率计算公式:

$$\varphi_m = \frac{V_p}{V} = \frac{V - V_s - V_f}{V} = 1 - \frac{V_{s0} + \Delta V_s}{V_0 + \Delta V} - \varphi_f = 1 - \frac{V_{s0} \left(1 + \frac{\Delta V_s}{V_{s0}}\right)}{V_0 \left(1 + \frac{\Delta V}{V_0}\right)} - \varphi_f = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_c} \frac{1 + \varepsilon_s}{1 + \varepsilon_v} - \varphi_f \quad (8)$$

式中: φ_m 为煤体基质孔隙率, %; φ_f 为煤体裂隙率, %; ε_s 为煤体骨架总应变; ρ_s 为煤体视密度, $\rho_s = m/V_0$, kg/m³; ρ_c 为煤体真密度, $\rho_c = m/V_{s0}$, kg/m³; m 为煤体质量, kg; V_0 为煤体初始体积, m³; V_{s0} 为煤体骨架初始体积, m³。

渗透率和裂隙率之间存在以下关系^[18]:

$$k = k_0 \left(\frac{\varphi_f}{\varphi_{i0}} \right)^3 \quad (9)$$

在含瓦斯双重多孔介质中考虑 Klinkenberg 效应影响, 得出渗透率计算公式:

$$k_e = k \left(1 + \frac{c}{p_f} \right) = k_0 \left(\frac{\varphi_f}{\varphi_{i0}} \right)^3 \left(1 + \frac{c}{p_f} \right) = k_0 \left[1 + \frac{\alpha_f}{M \varphi_{i0}} (p_f - p_{i0}) + \frac{\alpha_m}{M \varphi_{i0}} (p_m - p_{m0}) + \left(\frac{K}{M} - 1 \right) \frac{\alpha_T}{\varphi_{i0}} (T - T_0) \right]^3 \left(1 + \frac{c}{p_f} \right) \quad (10)$$

式中: k_0 为煤体的初始渗透率; c 为克氏系数。

1.2.2 煤体基质瓦斯扩散与煤体裂隙渗流方程

将煤体视为存在孔隙和裂隙的多孔介质。煤体中瓦斯的含量包括煤体基质孔隙中瓦斯的含量和煤体裂隙中瓦斯的含量。煤体裂隙中游离瓦斯质量计算公式如下:

$$m_f = \varphi_f p_f = \varphi_f p_f \frac{M_c}{RT} \quad (11)$$

单位体积煤体孔隙中瓦斯质量为煤基质中瓦斯吸附质量与煤基质孔隙中游离瓦斯质量之和:

$$m_m = \rho_{g0} \frac{ab p_m}{1 + b p_m} \frac{1 - A - B}{1 + 0.31B} + \varphi_f p_f \frac{M_c}{RT} \quad (12)$$

式中: ρ_{g0} 为标准状况下瓦斯的密度, kg/m³; M_c 为瓦斯气体的摩尔质量浓度, kg/mol; R 为摩尔气体常数, J/(mol·K); A 为煤体灰分; B 为煤体水分; m_f 为单位体积煤体裂隙游离瓦斯量, kg/m³; m_m 为单位体

积煤基质所含瓦斯量, kg/m³。

未经开采时煤体处于原岩应力状态, 煤体孔隙中瓦斯压力等于煤体裂隙中的瓦斯压力。负压抽采时, 钻孔与煤体孔隙之间产生压力差, 煤层内瓦斯发生明显运移。煤中复杂的多尺度孔隙结构是瓦斯赋存的空间和运移的通道, 瓦斯在煤体孔隙中的运移符合 Fick 定律, 在裂隙中的运移符合 Darcy 定律^[19]。

单位时间单元体煤体孔隙中瓦斯的变化遵循质量守恒定律, 瓦斯变化的量等于吸收单元体外部煤体解吸瓦斯的量减去单元体扩散瓦斯的量:

$$\frac{\partial m_m}{\partial t} = Q_s - q_s = D \nabla (m) - \frac{M_c}{\tau RT} (p_m - p_f) \quad (13)$$

其中:

$$Q_s = D \nabla \left[\rho_{g0} \rho_s \frac{ab M_c (p_{m0} - p_m)}{(1 + b p_m) RT} \frac{1 - A - B}{1 + 0.31B} \right] \quad (14)$$

$$q_s = \frac{M_c}{\tau RT} (p_m - p_f) \quad (15)$$

式中: Q_s 为单元体外部汇入质量源, kg/(m³·s); q_s 为单元体汇出质量源, kg/(m³·s); D 为瓦斯扩散系数, m²/s; τ 为吸附瓦斯解吸时间, d; ∇ 为哈密顿算子。

单位时间单元体煤体裂隙中瓦斯的变化遵循质量守恒定律, 瓦斯变化的量等于裂隙渗流出瓦斯的量加上煤基质孔隙扩散源的量:

$$\frac{\partial m_f}{\partial t} = \frac{\partial (\rho_g \varphi_f)}{\partial t} = \nabla (\rho_g v) + q_s = \frac{M_c}{\tau RT} (p_m - p_f) - \nabla \left(\rho_g \frac{k_e}{\mu} \nabla p_f \right) \quad (16)$$

式中: v 为煤体裂隙中瓦斯渗流速度, $v = -\frac{k_e}{\mu} \nabla p_f$, m/s;

μ 为瓦斯动力黏度, Pa·s。

由式(13)~(15)可得煤体孔隙中瓦斯动态变化方程:

$$\left[\frac{M_c \varphi_m}{RT} + \frac{ab \rho_{g0} \rho_s}{(1 + b p_m)^2} \right] \frac{\partial p_m}{\partial t} + \left(\frac{M_c}{RT} \frac{\partial \varphi_m}{\partial t} + \frac{M_c}{\tau RT} - \frac{M_c \varphi_m}{RT^2} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \right) p_m = \frac{M_c p_f}{\tau RT} + D \nabla \left[\rho_{g0} \rho_s \frac{ab M_c (p_{m0} - p_m)}{(1 + b p_m) RT} \frac{1 - A - B}{1 + 0.31B} \right] \quad (17)$$

由式(16)可得煤体裂隙中瓦斯动态变化方程:

$$\frac{M_c \varphi_f}{RT} \frac{\partial p_f}{\partial t} + \left(\frac{M_c}{RT} \frac{\partial \varphi_f}{\partial t} - \frac{M_c \varphi_f}{RT^2} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{M_c}{\tau RT} \right) p_f + \nabla \left(\frac{k_e M_c}{\mu RT} p_f \nabla p_f \right) = \frac{M_c p_m}{\tau RT} \quad (18)$$

1.3 煤体温度场控制方程

煤体内温度主要受地应力变化及煤体内瓦斯运移变化的影响。煤体在外力作用下体积应变产生的变形功转化为热效应进而影响煤体温度^[20]。煤体中瓦斯的吸附和解吸过程、负压钻孔抽采瓦斯时瓦斯在煤体内的运移过程,以及煤体的变形都伴随着热效应的产生,影响煤体温度的变化。而煤体温度的变化也会影响煤体形变与煤体内瓦斯的运移。

煤体内瓦斯运移满足能量守恒定律:

$$dU+dK=\delta Q_d+\delta W \quad (19)$$

式中: U 为煤体内能增量; K 为煤体动能增量; Q_d 为煤体所得能量; W 为外力对煤体做功。

假设煤岩体为各向同性线弹性体,煤体发生形变微小,动能可以忽略不计,即: $dK=0$ 。外力对煤体做功 $\delta W=\sigma_{ij}d\varepsilon_{ij}$; $\delta Q_d=TdS$, S 为比熵。

经整理后,得:

$$dU=\sigma_{ij}d\varepsilon_{ij}+TdS \quad (20)$$

弹性体的热力学状态函数^[21]:

$$F=U-TS \quad (21)$$

式中: F 为 Helmholtz 自由能,是关于 ε_{ij} 和 T 的状态函数。

将式(21)进行微分后,把式(20)代入微分后的公式,经整理得:

$$dU=\frac{\partial U}{\partial T}dT+\frac{\partial U}{\partial \varepsilon_{ij}}d\varepsilon_{ij}=\frac{\partial U}{\partial T}dT+\sigma_{ij}d\varepsilon_{ij}+\theta\alpha_T Td\varepsilon_V+\theta\frac{2\alpha\gamma\rho_sRT_0\ln(1+bp_m)d\varepsilon_V}{3V_m} \quad (22)$$

当容积一定时,煤体温度发生变化,有 $d\varepsilon_{ij}=0$ 。

此时, $TdS=\frac{\partial U}{\partial T}dT$, 而 $\frac{\partial U}{\partial T}=\rho_s C_V$, 其中 C_V 为煤体比定容热容, $J/(kg \cdot K)$ 。

将式(22)整理后代入式(20),可得:

$$\delta Q_d=\rho_s C_V dT+\theta\alpha_T Td\varepsilon_V+\theta\frac{2\alpha\gamma\rho_sRT_0\ln(1+bp_m)d\varepsilon_V}{3V_m} \quad (23)$$

式中: δQ_d 包括单位时间内瓦斯热传导流进和流出单位体积煤的热量差 $\eta \nabla (\nabla T)$ 与煤解吸瓦斯热能 $\nabla (\rho_g V)Q$; η 为煤体导热系数, $J/(m \cdot s \cdot K)$; Q 为煤体瓦斯含量, t/m^3 。

$$Q=m_f+m_m \quad (24)$$

将式(24)代入式(23),可得到含瓦斯煤温度场控制方程:

$$\eta \nabla (\nabla T)+\nabla \left(\rho_{g0} \frac{k_e}{\mu} \nabla p_f \right) \left[\rho_{g0} \rho_s \frac{abp_m}{1+bp_m} \cdot \right]$$

$$\frac{1-A-B}{1+0.31B}+(\varphi_f p_f+\varphi_m p_m) \frac{M_c}{RT} \left] -\rho_s C_V dT-\theta\alpha_T Td\varepsilon_V-\theta\frac{2\alpha\gamma\rho_sRT_0\ln(1+bp_m)d\varepsilon_V}{3V_m}=0 \quad (25)$$

综合上述可以看出,式(5)为含瓦斯煤的热-流-固耦合应力场方程;式(10)为有效渗透率动态变化方程;式(17)、(18)为含瓦斯煤体孔隙、裂隙中瓦斯动态变化渗流场方程;式(25)为含瓦斯煤体温度场控制方程。含瓦斯煤体热-流-固多物理场耦合关系如图 1 所示。

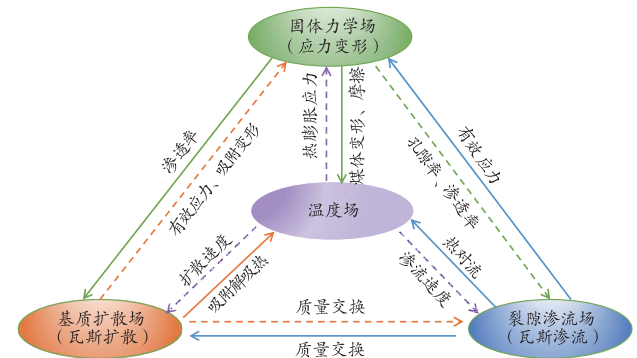


图 1 含瓦斯煤体热-流-固多物理场耦合关系
Fig. 1 Thermal-fluid-solid multi-physical field coupling relationship of gas-bearing coal

应力场、渗流场和温度场相互影响。煤体应力变化导致孔隙率、裂隙率及煤体温度发生变化,煤体孔隙、裂隙内产生瓦斯压力差促使瓦斯在煤体内运移。瓦斯运移过程中煤体孔隙、裂隙内瓦斯压力的变化会使煤体应力结构和温度发生变化。煤体温度发生变化会影响煤体孔隙和裂隙内的瓦斯压力和煤体的应力结构。

2 热-流-固耦合模型数值模拟

2.1 模型假设

- 1) 假设煤体为线弹性体且为各向同性的孔隙-裂隙多孔介质,煤体发生微小形变;
- 2) 假设煤体与周围外界不发生能量交换,煤层顶底板不透汽,所抽采瓦斯仅来源于本煤体;
- 3) 假设煤体内初始裂隙瓦斯压力与煤体基质孔隙中初始孔隙瓦斯压力相同;
- 4) 假设瓦斯为理想气体,符合理想气体状态方程;在抽采过程中,瓦斯扩散符合 Fick 定律,瓦斯吸附符合 Langmuir 定律,瓦斯渗流符合 Darcy 定律。

2.2 模型构建

以贵州比德煤矿 6 煤层作为研究对象。该煤层为简单型构造,煤层顶底板主要为泥岩、泥质粉砂岩和粉砂岩。煤层平均厚度 9.84 m;煤的视密度 1.20 ~

1.45 t/m^3 , 平均 1.32 t/m^3 ; 真密度 $1.36 \sim 1.52 \text{ t/m}^3$, 平均 1.45 t/m^3 ; 煤层内初始瓦斯压力为 $1.15 \sim 1.32 \text{ MPa}$ 。

根据煤层概况, 基于上文构建的热-流-固耦合模型, 使用 COMSOL 数值模拟软件进行模拟。建立尺寸为 $30 \text{ m} \times 40 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的三维几何模型, 如图 2 所示。

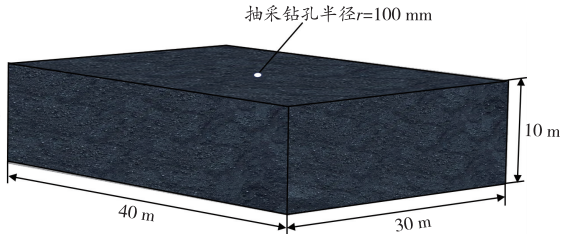


图 2 煤层三维几何模型
Fig. 2 Three dimensional geometric model of coal seam

模型中央抽采钻孔半径为 100 mm 。煤层所受上覆岩层载荷 15 MPa , 方向沿 z 轴竖直向下。假设煤体不与周围外界产生能量交换, 边界设置为零通量条件; 假设煤层四周在其法线方向不发生位移, 设置为辊支撑条件; 假设底面不发生位移, 设置为固定约束条件。在进行网格划分时, 设定为用户自控制划分网格。数值模拟所需参数见表 1。

表 1 模拟所需参数
Table 1 Parameters required for simulation

参数类别	参数值
煤基质弹性模量 E/MPa	8 140
煤体初始瓦斯压力 p_0/MPa	1.24
煤的泊松比 ν	0.35
初始渗透率 k_0/mD	0.1
初始孔隙率 φ_{m0}	0.06
初始裂隙率 φ_0	0.026
热膨胀系数 α_T/K^{-1}	0.02
煤体视密度 $\rho_s/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 250
煤体真密度 $\rho_c/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 490
煤体导热系数 $\eta/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	0.191
比定容热容 $C_V/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	1 003.2

3 模拟结果与分析

3.1 温度对抽采时煤层瓦斯压力的影响

温度变化影响孔隙率、裂隙率及渗透率, 进而影响瓦斯抽采效果。选取点 $(-3, 0, 0)$ 与点 $(3, 0, 0)$ 连接的线段为监测线, 监测分析温度作为耦合因素对煤体内瓦斯压力变化的影响。与钻孔不同距离处, 抽采时间为 30、60、90 d 时监测线上瓦斯压力分布情况比较如图 3 所示(图中弧长表征两点之间的距离)。

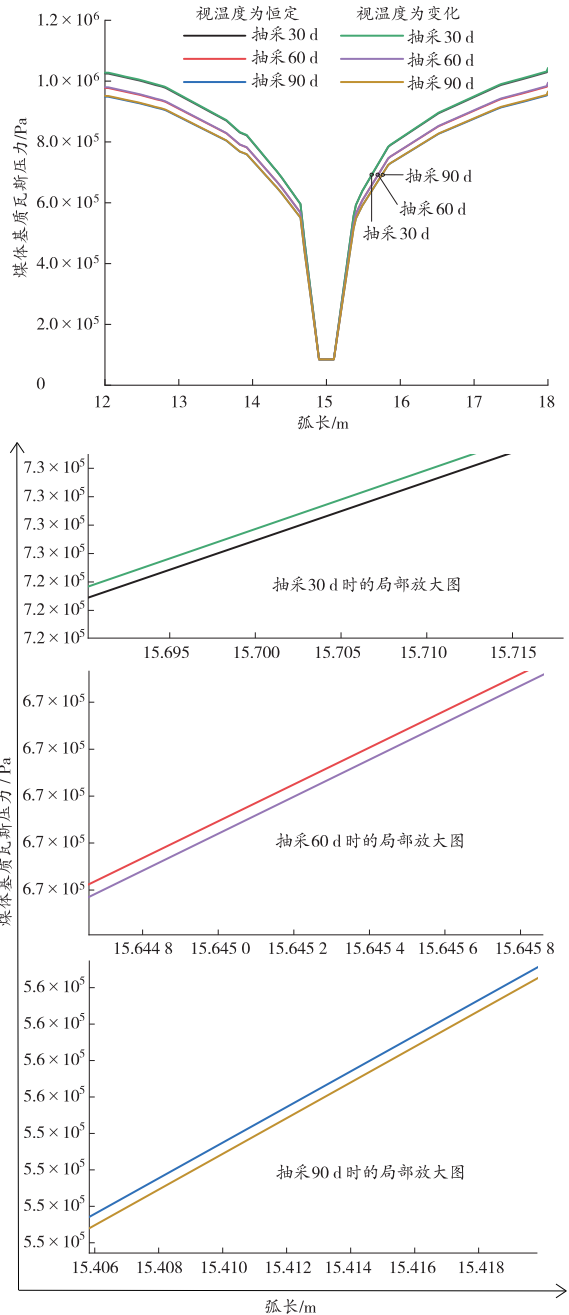


图 3 监测线上煤基质瓦斯压力分布
Fig. 3 The distribution of coal matrix gas pressure on the monitoring line

由图 3 可知, 考虑温度和不考虑温度这 2 种情况下监测线上瓦斯压力分布趋势一致。选取的 3 个时间节点情况下, 不考虑温度变化构建的气-固耦合模型与考虑温度变化构建的热-流-固耦合模型在进行数值模拟计算时, 2 种模型模拟所得瓦斯抽采效果表征值有较大差别, 是否将温度作为耦合因素对抽采时煤层瓦斯压力的影响差异较为明显。距离钻孔越近, 渗透率变化越明显, 瓦斯压力梯度变化越大, 煤层瓦斯压力下降越明显。视温度为恒定不变时, 渗透率计算结果相对较大, 在所选监测线上煤层瓦斯压力相对较小。将图 3 中圆圈标记部分曲线放

大,根据局部放大图可得,视温度为恒定不变时,由于渗透率计算结果相对较大,瓦斯抽采效果相对较好,在所选监测线上的煤层瓦斯压力相对于视温度变化情况时的较小。

3.2 温度对渗透率的影响

在所构建的三维模型中,选取(1,0,0)点为监测点,监测当煤体温度为 290、310 K 时,在煤体温度变化与温度恒定条件下的煤体渗透率变化情况如图 4 所示。图 4 中: T_0 为煤层初始温度;“恒定”是指视抽采过程中温度不变;“变化”是指抽采过程中将温度变化作为耦合因素。

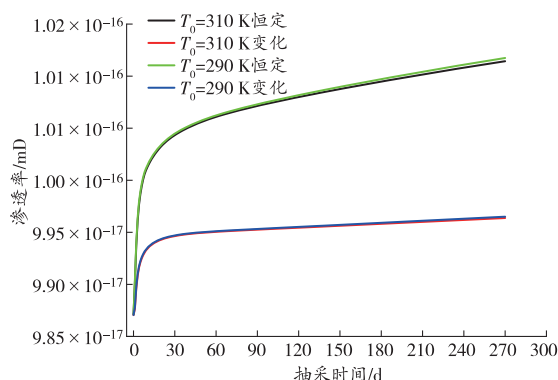


图 4 煤体渗透率受温度影响的变化情况

Fig. 4 The change of permeability affected by temperature

温度变化影响煤体形变,煤体形变影响孔隙结构变化,导致渗透率改变。温度变化也影响煤体内瓦斯的吸附解吸及煤体内瓦斯压力变化,进而导致煤体膨胀或收缩,煤体孔隙率发生变化^[22]。由图 4 可以看出,当煤体初始温度一定时,考虑温度变化与否所得的渗透率变化曲线有明显差异,考虑温度变化构建的热-流-固耦合模型模拟所得渗透率要比将温度视为恒定时构建的气-固耦合模型模拟所得的渗透率大。但将温度视为恒定或者变化 2 种情况下,初始温度大小对渗透率变化几乎没有影响。在一定温度范围内,煤体渗透率随煤层温度升高而降低。在抽采前 15 d 左右,渗透率增幅明显;随着抽采时间增长,渗透率增幅变缓。抽采过程中不考虑温度耦合时煤体内渗透率值和渗透率增幅更明显。随抽采时间持续增长,是否考虑温度变化为耦合因素对渗透率计算的结果也存在明显差别。综上可知,在一定温度范围内,负压抽采瓦斯时是否考虑煤体内的温度变化虽然对煤体渗透率变化趋势没有影响,但是对煤体内渗透率大小变化有较大影响。

3.3 温度对有效抽采区域体积的影响

根据《防治煤与瓦斯突出细则》中的规定,以煤层瓦斯压力为 0.74 MPa 的临界值来预测是否为突出危险区域。在三维模型中模拟瓦斯抽采过程,将

煤体内瓦斯压力小于 0.74 MPa 的区域视为有效抽采区域^[23]。单一钻孔负压抽采瓦斯时有效抽采区域体积受温度影响的变化情况如图 5 所示。

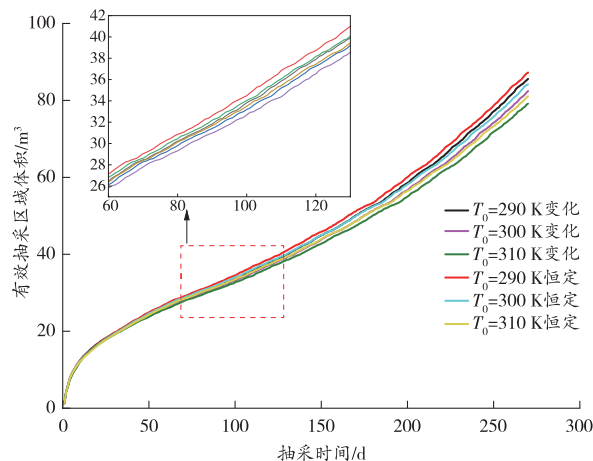


图 5 有效抽采区域体积受温度影响的变化情况

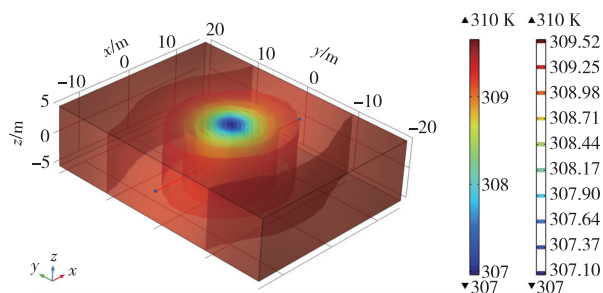
Fig. 5 The volume of effective extraction area is affected by temperature

由图 5 可知:不论是否考虑温度因素影响,煤体有效抽采区域体积在抽采前期,第 0~20 d 急剧增长,在第 20~75 d 增长较为缓慢,随着抽采时间的增长,有效抽采区域体积增长迅速。在抽采时间较短时,温度是否恒定对有效抽采区域体积影响较小,长时期抽采后,视温度恒定与考虑温度变化 2 种情况所得有效抽采区域体积差别明显,但整体趋势相同。在相同抽采时间下,煤层初始温度越高,有效抽采区域体积越小。考虑温度因素影响与视温度恒定相比,在抽采第 0~75 d,有效抽采区域体积几乎没有变化;随着抽采时间增长,视温度恒定条件要比实际情况下(考虑温度变化)的有效抽采区域体积大。以 $T_0=290$ K 抽采过程(温度变化)与 $T_0=300$ K 抽采过程(温度视为恒定)为例, $V_{T_0=290 \text{ K 变化}}$ 表示煤层初始温度为 290 K 且随抽采发生改变时的抽采区域体积, $V_{T_0=300 \text{ K 恒定}}$ 表示煤层初始温度为 300 K 且不随抽采变化时的抽采区域体积。在整个抽采过程中,呈现 $V_{T_0=290 \text{ K 变化}} > V_{T_0=300 \text{ K 恒定}}$ 、 $V_{T_0=290 \text{ K 变化}} < V_{T_0=300 \text{ K 恒定}}$ 、 $V_{T_0=290 \text{ K 变化}} > V_{T_0=300 \text{ K 恒定}}$ 交替的状态;然而以 $T_0=290$ K 抽采过程(温度变化)与 $T_0=300$ K 抽采过程(温度变化)为例,整个抽采过程中恒有 $V_{T_0=290 \text{ K 变化}} > V_{T_0=300 \text{ K 变化}}$ 。因此,若进行较长时间的瓦斯抽采,温度变化对抽采区域体积的影响和干扰不容忽视。

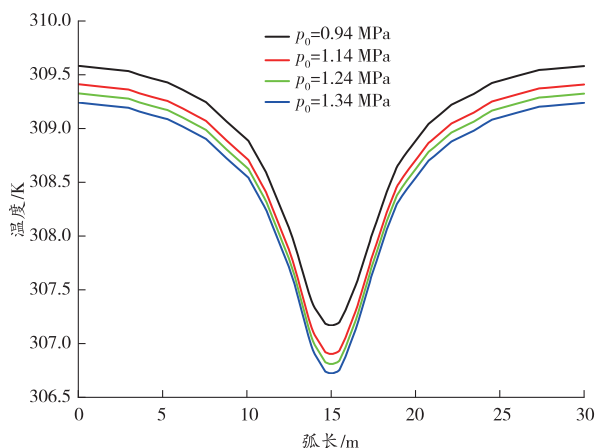
3.4 初始瓦斯压力对煤层温度的影响

为研究负压抽采钻孔时不同初始煤层瓦斯压力对抽采过程中煤层温度变化的影响,设置了 0.94、1.14、1.24、1.34 MPa 4 种初始煤层瓦斯压力,选取点(-15,0,0)和点(15,0,0)所连直线为监测线,2 点

之间距离即为弧长(弧长为 30 m),监测结果如图 6 所示。



(a) 1.24 MPa 下抽采 120 d 时煤层温度变化



(b) 不同初始瓦斯压力抽采 120 d 时沿监测线温度变化

图 6 初始煤层瓦斯压力对煤层温度的影响

Fig. 6 The influence of initial coal seam gas pressure on coal seam temperature

由图 6 可知:距离抽采钻孔越近位置,等温线越密集,煤体温度下降越迅速,煤层温度降低越明显;距离抽采钻孔越远处,煤层温度变化受抽采影响越小,随着与钻孔距离的增加煤层温度降低幅度越小。距离抽采钻孔越近处,煤体内瓦斯压力梯度越大,瓦斯解吸速度越快,瓦斯解吸使煤体温度降低程度远大于煤体变形使煤体温度升高的程度,导致钻孔周围煤体温度总体降低明显。且煤层初始瓦斯压力越高,与抽采钻孔之间的压差越大,瓦斯运移越激烈,温度下降越明显。距离抽采钻孔较远处,煤体内瓦斯压力梯度小,解吸不明显,温度下降速度缓慢。

在实际工程中,选取不同的抽采负压会导致煤体温度下降梯度不同,当进行多钻孔抽采时,还应考虑钻孔之间的相互影响,结合实际工况对煤体温度的要求选取合理的抽采负压,以提升抽采效率。

3.5 考虑温度影响的多钻孔瓦斯抽采效果

以煤层初始温度 $T_0 = 300$ K,抽采时间为 120、150、180、210 d 的热-流-固耦合模型计算所得的有效抽采半径 $R_1 = 1.16$ 、 $R_2 = 1.27$ 、 $R_3 = 1.37$ 、 $R_4 = 1.49$ m 为参考依据,将 3 个抽采钻孔孔距设置为 $2R$,3 个钻

孔形成一个边长为 $2R$ 的等边三角形。钻孔抽采瓦斯影响区域示意图如图 7 所示。

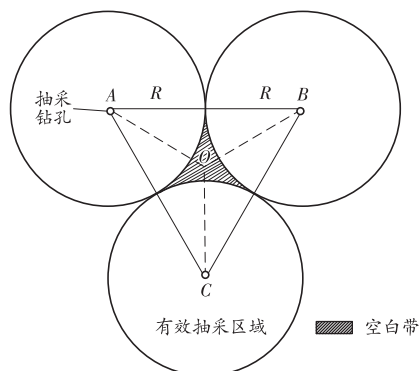
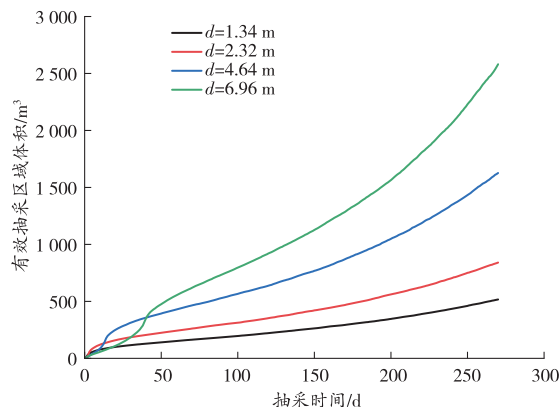


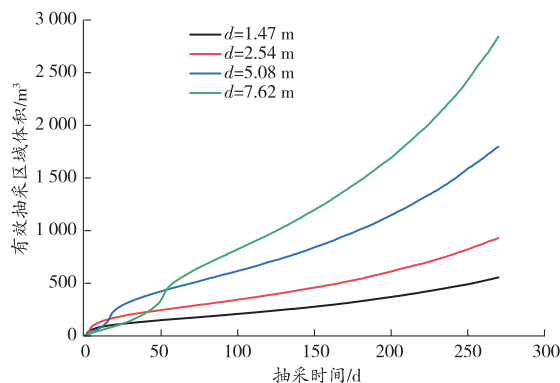
图 7 钻孔抽采瓦斯影响区域示意图

Fig. 7 Schematic diagram of borehole gas extraction influence area by temperature

理论上,若不考虑多钻孔抽采时钻孔之间的叠加效应,会出现阴影部分所示煤体基质瓦斯压力高于 0.74 MPa 的空白带。根据勾股定理可以求得 AO 长为 $2\sqrt{3}R/3$ 。布置钻孔间距分别为 $2\sqrt{3}R/3$ 、 $2R$ 、 $4R$ 、 $6R$,研究考虑温度为变化因素时,钻孔间叠加效应对钻孔抽采瓦斯的影响,结果如图 8 所示。图 8 中图例自上而下黑、红、蓝、绿色分别表示钻孔间距 d 为 $2\sqrt{3}R/3$ 、 $2R$ 、 $4R$ 、 $6R$ 的有效抽采区域体积变化情况。



(a) 有效抽采半径 $R_1 = 1.16$ m



(b) 有效抽采半径 $R_2 = 1.27$ m

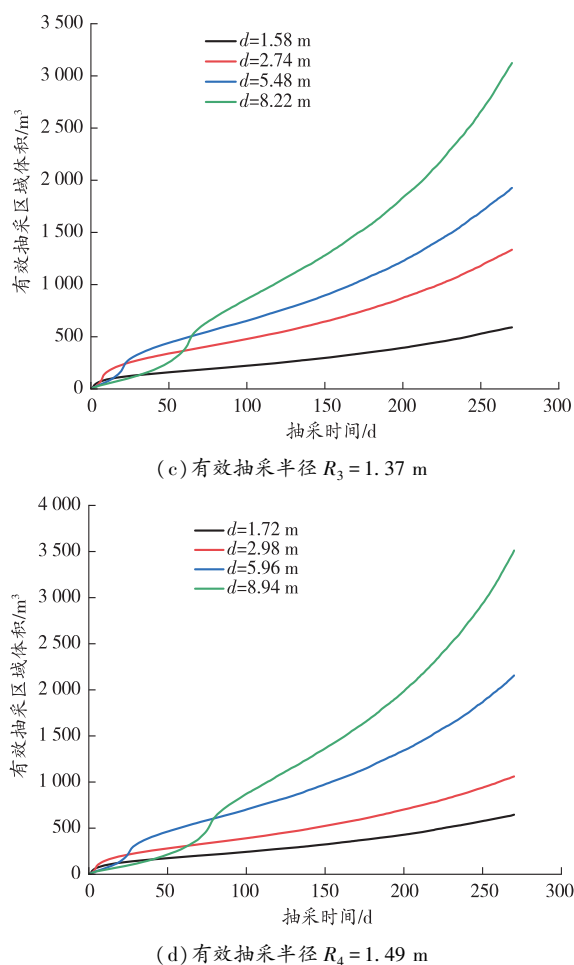


图 8 不同布孔间距下有效抽采区域体积
Fig. 8 The effective extraction area volume under different hole spacing

由图 8 可知:在抽采开始前期(第 0~5 d),黑色曲线位于所有曲线上方;但很快红色曲线高于黑色曲线,且随抽采进行一直位于黑色曲线上方;蓝色曲线随抽采进行先高于黑色曲线,而后高于红色曲线,在此之后随抽采进行一直位于 2 条曲线上方;绿色曲线随抽采进行相继高于黑色、红色和蓝色曲线,在高于蓝色曲线之后一直位于 3 条曲线上方。这说明当钻孔间距过小时,虽然抽采前期瓦斯有效抽采区域体积增大明显,但随抽采时间增长,受布孔间距过小和钻孔有效抽采半径的限制,有效抽采区域扩张受到限制。大布孔间距下的有效抽采区域体积会随抽采时间增长依次超过小布孔间距下的有效抽采区域的体积,且布孔间距越大,超过小布孔间距下的有效抽采区域体积所需抽采时间越长。这是因为钻孔间距越大,钻孔所围区域内受钻孔叠加效应影响越小,但对后期有效抽采区域扩张限制小。抽采不同时间时有效抽采区域的形状变化趋势三维效果如图 9 所示。

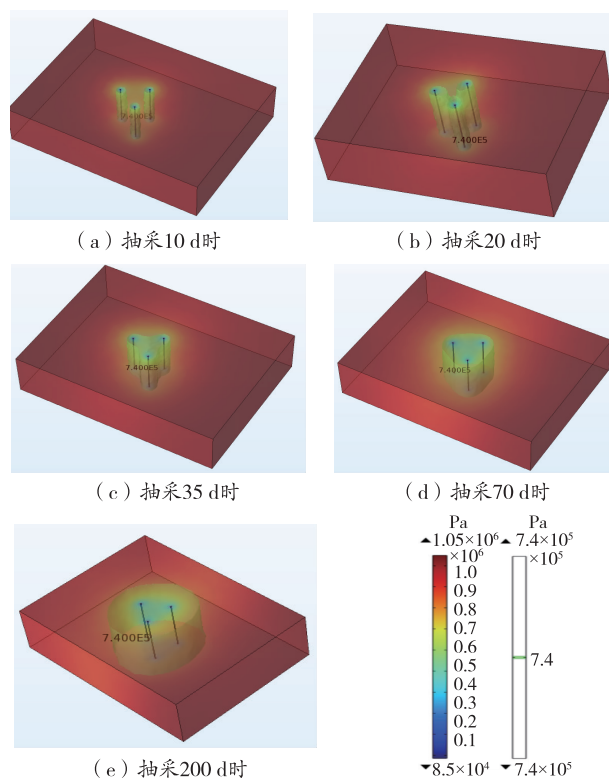


图 9 有效抽采区域形状变化趋势
Fig. 9 The shape change trend of effective extraction area

结合图 8 和图 9 分析可知,在抽采前期,多钻孔布置抽采瓦斯时,钻孔间距越小,有效抽采区域体积变化曲线斜率越大,区域体积增长越明显。若抽采时间不够长,钻孔所围区域内会出现瓦斯压力大于 0.74 MPa 的抽采空白带。这是因为钻孔所围区域内钻孔叠加效应明显,使钻孔所围区域内抽采效果明显优于单钻孔抽采的效果,但由于抽采时间短,各钻孔间影响微弱,会出现抽采空白带。在此阶段,有效抽采区域形状由散状三圆柱趋向于圆角三棱柱状发展。在瓦斯有效抽采区域体积急剧增大后,有效抽采区域的增长速率减缓,钻孔所围区域内瓦斯压力与抽采钻孔之间压差减小,抽采量逐渐减小,随抽采时间增长,有效抽采区域体积缓慢增长。在该阶段,有效抽采区域所呈现形状由圆角三棱柱状趋向于逐渐规则的圆柱状。随抽采时间继续增长,曲线斜率明显增大,说明有效抽采区域体积增大明显。在该阶段,有效抽采区域形状由不规则圆柱状趋向于规则的圆柱状发展。

4 讨论

在进行预抽煤层瓦斯前,可以采取安全的技术措施使煤层温度降低,从而提高钻孔抽采瓦斯效率。在一定初始温度下,温度变化对有效抽采区域体积影响不大,若抽采周期较短,可以将煤层视为温度恒

定的情况进行模拟瓦斯抽采;但若抽采周期较长,考虑温度的变化会更符合实际情况,当布设多钻孔抽采煤层瓦斯时,进行钻孔间距合理布置会节省一定资源。

在实际工况中,若进行中短期抽采,钻孔间距不应过大,钻孔有效抽采区域体积随钻孔间距的不同,变化情况较多。若进行长期抽采,虽然钻孔间距较大时抽采效果明显,但应考虑大布孔间距下瓦斯空白带消除的时间。应根据实际工况及安全性、施工成本等情况,结合不同布孔间距下有效抽采区域体积变化规律,综合考虑多钻孔布孔间距的大小。

5 结论

1) 考虑煤体基质孔隙瓦斯压力与煤体裂隙瓦斯压力,构建了基于双重多孔介质的热-流-固耦合模型,与不考虑温度为耦合因素的气-固耦合模型进行了比较和验证。

2) 是否考虑温度作为耦合因素对煤体内瓦斯压力变化和渗透率大小有较大影响。抽采相同时间下,视温度为恒定时要比考虑温度变化时的煤体瓦斯压力小;视温度为恒定时要比考虑温度变化时模拟所得的渗透率大。

3) 短时期抽采瓦斯时,温度变化因素对有效抽采区域影响较小,但是,较长时间抽采瓦斯时,温度因素对有效抽采区域体积的影响较大。在较长时间抽采瓦斯时,视温度为恒定时要比温度变化时模拟所得的有效抽采区域体积小。

4) 煤层初始瓦斯压力对抽采过程中煤体温度变化影响较小,负压抽采钻孔与煤体瓦斯压力梯度越高,温度下降越明显。

5) 根据不同有效抽采半径确定多钻孔布孔间距时,不同布孔间距下有效抽采区域体积大小随抽采时间变化规律一致,应根据实际工况,考虑空白带消除情况再选择布孔间距。

参考文献(References):

- [1] 袁亮. 我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 1-6.
YUAN Liang. Strategic thinking of simultaneous exploitation of coal and gas in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 1-6.
- [2] 程远平, 董骏, 李伟, 等. 负压对瓦斯抽采的作用机制及在瓦斯资源化利用中的应用[J]. 煤炭学报, 2017, 42(6): 1466-1474.
CHENG Yuanping, DONG Jun, LI Wei, et al. Effect of negative pressure on coalbed methane extraction and application in the utilization of methane resource[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(6): 1466-1474.

- [3] 刘军, 卢鹏, 刘志宽, 等. 顺层钻孔瓦斯抽采叠加效应影响研究[J/OL]. 煤炭科学技术, 2023; 1-11 (2023-11-20) [2023-12-06]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20231120.1014.001.html>.
- LIU Jun, LU Peng, LIU Zhikuan, et al. Study on the influence of superimposed effect of gas extraction in downhole drilling[J/OL]. Coal Science and Technology, 2023; 1-11 (2023-11-20) [2023-12-06]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20231120.1014.001.html>.
- [4] 王登科, 唐家豪, 魏建平, 等. 煤层瓦斯多机制流固耦合模型与瓦斯抽采数值模拟分析[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 763-775.
WANG Dengke, TANG Jiahao, WEI Jianping, et al. A fluid-solid coupling model of coal seam gas considering gas multi-mechanism flow and a numerical simulation analysis of gas drainage[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 763-775.
- [5] 陈月霞. 瓦斯抽采过程中参数演化及钻孔优化数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [6] 徐刚, 张凯文, 范亚飞. 叠加效应影响下钻孔有效抽采半径的数值模拟及布孔间距优化[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(1): 91-96.
XU Gang, ZHANG Kaiwen, FAN Yafei. Numerical simulation of effective drainage radius and optimization of hole spacing under the influence of stack effect[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2021, 48(1): 91-96.
- [7] YAN J, ZHANG M B, ZHANG W Z, et al. Simulation study on the characteristics of gas extraction from coal seams based on the superposition effect and hole placement method[J]. Sustainability, 2023, 15(10): 8409.
- [8] 张波, 谢雄刚, 刘洋成. 基于热流固耦合工作面前方瓦斯渗流数值模拟[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(3): 89-94.
ZHANG Bo, XIE Xionggang, LIU Yangcheng. Numerical simulation on gas seepage in front of working face based on fluid-solid-heat coupling[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(3): 89-94.
- [9] 范超军, 李胜, 罗明坤, 等. 基于流-固-热耦合的深部煤层气抽采数值模拟[J]. 煤炭学报, 2016, 41(12): 3076-3085.
FAN Chaojun, LI Sheng, LUO Mingkun, et al. Deep CBM extraction numerical simulation based on hydraulic-mechanical-thermal coupled model[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(12): 3076-3085.
- [10] 陶云奇. 含瓦斯煤 THM 耦合模型及煤与瓦斯突出模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [11] 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.
- [12] 郝建峰, 梁冰, 孙维吉, 等. 考虑吸附/解吸热效应的含瓦斯煤热-流-固耦合模型及数值模拟[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(6): 1282-1290.
HAO Jianfeng, LIANG Bing, SUN Weiji, et al. Gassy coal thermal-hydraulic-mechanical coupling model and numerical simulation considering adsorption/desorption thermal effect[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(6): 1282-1290.
- [13] LI S, FAN C J, HAN J, et al. A fully coupled thermal-hydraulic-mechanical model with two-phase flow for coalbed methane extraction[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 33: 324-336.
- [14] 林柏泉, 宋浩然, 杨威, 等. 基于煤体各向异性的煤层瓦斯有效抽采区域研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(6): 139-145.
LIN Baiquan, SONG Haoran, YANG Wei, et al. Study on effective gas drainage area based on anisotropic coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(6): 139-145.
- [15] 张民波, 闫瑾, 钟子逸, 等. 基于煤体各向异性的瓦斯热流固耦

- 合抽采特性研究[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(6): 134-140.
- ZHANG Minbo, YAN Jin, ZHONG Ziyi, et al. Study on the characteristics of gas thermal-fluid-solid coupled extraction based on anisotropy of coal body[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(6): 134-140.
- [16] 王登科, 彭明, 付启超, 等. 瓦斯抽采过程中的煤层透气性动态演化规律与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(4): 704-712.
- WANG Dengke, PENG Ming, FU Qichao, et al. Evolution and numerical simulation of coal permeability during gas drainage in coal seams[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(4): 704-712.
- [17] 刘清泉, 程远平, 李伟, 等. 深部低透气性首采层煤与瓦斯气固耦合模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊 1): 2749-2758.
- LIU Qingquan, CHENG Yuanping, LI Wei, et al. Gas-solid coupling model of coal and gas in deep low permeability first mining layer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 2749-2758.
- [18] WU Y, LIU J S, ELSWORTH D, et al. Dual poroelastic response of a coal seam to CO₂ injection[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2010, 4(4): 668-678.
- [19] 乔伟, 王凯, 程波. 顺层长钻孔瓦斯抽采工艺技术应用研究[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(6): 93-98.
- QIAO Wei, WANG Kai, CHENG Bo. Study on the application of gas drainage technology in bedding long drilling[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2021, 48(6): 93-98.
- [20] 梁冰, 刘建军, 范厚彬, 等. 非等温条件下煤层中瓦斯流动的数学模型及数值解法[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 1-5.
- LIANG Bing, LIU Jianjun, FAN Houbin, et al. The mathematical model and its numerical solution of gas flow under unequal temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(1): 1-5.
- [21] 李维特. 热应力理论分析及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [22] 舒才, 王宏图, 施峰, 等. 基于两能态吸附热理论的煤层瓦斯流动热-流-固多场耦合模型[J]. 岩土力学, 2017, 38(11): 3197-3204.
- SHU Cai, WANG Hongtu, SHI Feng, et al. A fully coupled thermal-hydrological-mechanical model for gas seepage based on binary-energy-state heat theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(11): 3197-3204.
- [23] 陈永冉. 《防治煤与瓦斯突出细则》修订关键技术研究[J]. 煤炭与化工, 2021, 44(9): 101-105.
- CHEN Yongran. Study on key technology of revision of detailed rules for prevention and control of coal and gas outburst[J]. Coal and Chemical Industry, 2021, 44(9): 101-105.
- (责任编辑: 陈玉涛)

(上接第 63 页)

- [10] 李树清, 何学秋, 李绍泉, 等. 煤层群双重卸压开采覆岩移动及裂隙动态演化的实验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(12): 2146-2152.
- LI Shuqing, HE Xueqiu, LI Shaoquan, et al. Experimental research on strata movement and fracture dynamic evolution of double pressure-relief mining in coal seams group[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(12): 2146-2152.
- [11] 林海飞, 李磊明, 李树刚, 等. 煤层群重复采动卸压瓦斯储运区演化规律实验研究[J]. 西安科技大学学报, 2021, 41(3): 385-393.
- LIN Haifei, LI Leiming, LI Shugang, et al. Experimental study on evolution law of pressure relief gas storage and transportation area of repeated mining in coal seams[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2021, 41(3): 385-393.
- [12] 罗建军. 双重保护层开采效果考察数值模拟研究[J]. 矿业安全与环保, 2015, 42(6): 10-13.
- LUO Jianjun. Investigation and numerical simulation study on mining effect of double protective seam[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2015, 42(6): 10-13.
- [13] 赵灿, 程志恒, 刘晓刚, 等. 近距离煤层群保护层开采双重卸压效果分析[J]. 煤炭技术, 2016, 35(2): 40-42.
- ZHAO Can, CHENG Zhiheng, LIU Xiaogang, et al. Study on comparative analysis for protecting layer mining in close distance coal seams[J]. Coal Technology, 2016, 35(2): 40-42.
- [14] 程志恒, 齐庆新, 李宏艳, 等. 近距离煤层群叠加开采采动应力-裂隙动态演化特征实验研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(2): 367-375.
- CHENG Zhiheng, QI Qingxin, LI Hongyan, et al. Evolution of the superimposed mining induced stress-fissure field under extracting of close distance coal seam group[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(2): 367-375.
- [15] 陈亮. 中远距离煤层群叠加开采双重卸压效应数值分析[J]. 煤炭工程, 2018, 50(7): 92-96.
- CHEN Liang. Numerical analysis on double relief effect under superposed mining of coal seam group with medium-distance[J]. Coal Engineering, 2018, 50(7): 92-96.
- [16] 钱鸣高, 刘听成. 矿山压力及其控制[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.
- [17] 钱鸣高, 许家林. 覆岩采动裂隙分布的“O”形圈特征研究[J]. 煤炭学报, 1998(5): 20-23.
- QIAN Minggao, XU Jialin. Study on the “O” shape circle distribution characteristics of mining induced fractures in the overlaying strata[J]. Journal of China Coal Society, 1998(5): 20-23.
- [18] 王伟, 程远平, 袁亮, 等. 深部近距离上保护层底板裂隙演化及卸压瓦斯抽采时效性[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 138-148.
- WANG Wei, CHENG Yuanping, YUAN Liang, et al. Floor fracture evolution and relief gas drainage timeliness in deeper underground short-distance upper protective coal seam extraction[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 138-148.
- [19] 王兆丰, 席杰, 陈金生, 等. 底板岩巷穿层钻孔一孔多用瓦斯抽采时效性研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 248-256.
- WANG Zhaofeng, XI Jie, CHEN Jinsheng, et al. Study on time effectiveness of gas drainage by crossing layer drilling in floor rock roadway with one hole and multi-purpose[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 248-256.
- (责任编辑: 陈玉涛)