

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1664

采掘扰动与温度耦合影响下工作面 前方煤体渗透率模型研究

荣腾龙¹, 周宏伟^{2,3}, 王路军¹, 任伟光¹, 王子辉¹, 苏 腾¹

(1. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083;
3. 中国矿业大学(北京) 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 为了探究采掘扰动和温度变化对工作面前方煤体渗透率的影响, 将引起煤体裂隙变形的因素划分为有效应力、吸附解吸和热膨胀 3 部分。基于损伤力学、吸附理论和热应力理论推导出了采掘扰动与温度耦合作用下煤体裂隙应变表达式, 进而构建了采掘扰动与温度耦合影响下工作面前方煤体渗透率模型。结合改变温度、同时改变扰动应力和温度的两种渗透率试验结果对所建立的模型适用性进行了拟合分析, 并对模型中的参数敏感性进行了讨论。结果表明: 所构建的煤体渗透率模型可以较好地描述采掘扰动与温度耦合影响下煤体渗透率的演化过程; 在同一温度下, 煤体渗透率随着内膨胀应变系数的增大而增大, 随着热内膨胀应变系数的增大而减小。研究结果可为煤炭开采及瓦斯抽采的工作提供指导。

关 键 词: 煤体渗透率模型; 采掘扰动; 温度; 耦合损伤; 裂隙应变

中图分类号: TD 712

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2019) 11-4289-10

Study on coal permeability model in front of working face under the influence of mining disturbance and temperature coupling

RONG Teng-long¹, ZHOU Hong-wei^{2,3}, WANG Lu-jun¹, REN Wei-guang¹, WANG Zi-hui¹, SU Teng¹

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, China;

2. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China;

3. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: To study the influence of mining disturbance and temperature on coal permeability in front of the working face, the fracture deformation factors caused by mining stress and temperature were divided into three parts: effective stress, adsorption and thermal expansion. The fracture strain expression was derived from damage mechanics, adsorption theory and thermal stress theory. The expression included the coupling damage effect of disturbance stress and temperature. Furthermore, the permeability model of coal under the influence of mining disturbance and temperature was established. The permeability model was verified and analyzed according to two permeability tests. One was changing temperature and the other was changing the disturbance stress and temperature simultaneously. In addition, the parameter sensitivity was also analyzed. The results show that the model can well represent the evolution process of coal permeability with the mining disturbance and temperature effect. Under the same temperature, permeability increases with the increase of internal swelling ratio. Permeability decreases with the increase of thermal internal swelling ratio. The research results will provide useful reference for the development of coal mining and gas extraction technology.

Keywords: coal permeability model; mining disturbance; temperature; coupling damage; fracture strain

1 引 言

随着浅部煤炭资源的逐渐减少, 现今煤炭地下开采的深度日益增大。深部煤岩体的赋存环境具有

“三高”的特点, 即高地应力、高地温和高渗透压^[1]。一般情况下, 地温梯度为 30 °C/km, 温度每改变 1 °C 将引起 0.4~0.5 MPa 的地应力变化^[2]; 深部煤岩体开采过程还具有强扰动特征, 强烈的采掘扰动将会

收稿日期: 2018-09-09

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2016YFC0600704); 国家自然科学基金资助项目 (No. 51674266); 中国矿业大学(北京) 越崎杰出学者奖励计划。This work was supported by the National Key R&D Program of China(2016YFC0600704), the National Natural Science Foundation of China (51674266) and the Fund of Yueqi Outstanding scholars from China University of Mining and Technology (Beijing).

第一作者简介: 荣腾龙, 男, 1988 年生, 博士研究生, 主要从事深部煤体多场耦合及瓦斯渗流方面的研究工作。E-mail: rongtenglong@126.com

通讯作者: 周宏伟, 男, 1965 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事工程力学与岩石力学方面的教学与研究工作。E-mail: zhw@cumt.edu.cn

引起煤岩体导热系数、比热容等热物理参数的变化,进而改变煤体内温度场的分布^[3-4]。由此可见,采掘扰动和温度变化将对工作面前方煤体,尤其是深部煤体产生相互耦合的作用影响(见图1)。两者耦合作用下还可引起煤体内出现损伤破裂、吸附解吸、热膨胀等现象而导致煤体渗透率的改变。因此,探究采掘扰动与温度耦合影响下工作面前方煤体渗透率的变化规律,建立相应的渗透率理论模型是十分必要的。

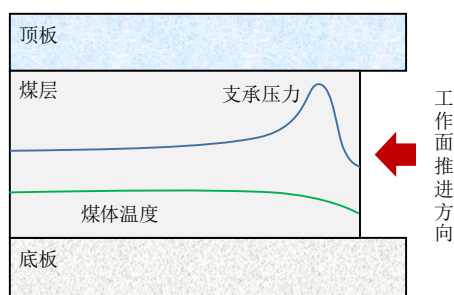


图1 工作面前方煤体应力和温度示意图

Fig.1 Stress state and temperature of coal under mining

目前,在应力和温度耦合条件下煤体渗透率模型的研究方面已有部分研究成果。Zhu等^[5]根据温度变化、吸附和有效应力对煤体体积应变的影响,以孔隙率与体积应变的联系为“桥梁”,建立了煤体渗透率与温度的关系式。杨新乐^[6]分别对变温和变有效应力下渗透率试验结果进行回归分析,得到了煤体渗透率与温度和有效应力之间的关系式。尹光志等^[7]以温度、有效应力和瓦斯压力为主要影响因素建立了一个可预测煤体渗透率的BP神经网络模型。此外,从变温条件下有效应力、吸附解吸和热应变耦合作用对煤体孔隙率的影响角度出发,秦玉金等^[8]基于渗透率与孔隙率之间三次方的关系式,陶云奇等^[9]基于Kozeny-Carman方程,分别推导出了温度、有效应力和瓦斯压力共同作用下的煤体渗透率模型。孙光中等^[10]考虑温度变化对气体压力造成的影响,对陶云奇等^[9]提出的渗透率模型作出了进一步的修正。可以看出,以上渗透率模型较多考虑了应力和温度因素对渗透率造成的影响,但是均未考虑应力和温度耦合下引起煤体损伤破裂对渗透率的影响。

在从损伤破裂角度建立的煤体渗透率模型中,张泽天^[11]考虑煤岩体中微裂纹断裂对应变产生的影响,构建了等温条件下煤体随有效应力和气体压力变化的渗透率模型;薛熠等^[12]通过构建损伤影响因子,结合煤体有效应力的变化,建立了等温条件

下考虑煤体损伤破裂的渗透率模型;Teng等^[13]考虑温度变化下,煤体热开裂和水分挥发对孔隙度的影响,建立了双孔隙度的渗透率模型。上述煤体渗透率模型较多以等温条件为前提,变温下考虑损伤破裂的模型成果还较少。

本文基于笔者先前建立的开采扰动下煤体渗透率演化模型,考虑开采过程中温度变化对煤体弹性模量和裂隙变形产生的影响,建立了采掘扰动与温度耦合影响下工作面前方煤体的渗透率演化模型,并结合试验结果对所建立的模型进行了验证分析。

2 采掘扰动影响下考虑损伤破裂的煤体渗透率模型

煤层开采过程中,受采掘扰动的影响,煤体所处应力环境不断调整,采掘扰动下煤体的轴压和围压同时变化。由此出发,笔者以捆绑的“火柴棍”模型为基础,将煤体简化为基质和裂隙组成的弹性系统(见图2(a)),图中 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 分别为沿坐标轴 x 、 y 、 z 方向的应力, e_{xi} 、 h_{xi} 为 x 方向裂隙和基质宽度, e_{yi} 、 h_{yi} 为 y 方向裂隙和基质宽度。从裂隙变形的角度建立了3向应力条件下煤体渗透率模型^[14]。之后,又将开采扰动造成损伤破裂的煤体简化为破裂的“火柴棍”模型(见图2(b)),并从基质弹性模量劣化的角度进行推导,建立了两种形式可表征开采扰动下煤体损伤破裂的渗透率模型——指数型和立方型^[15]。

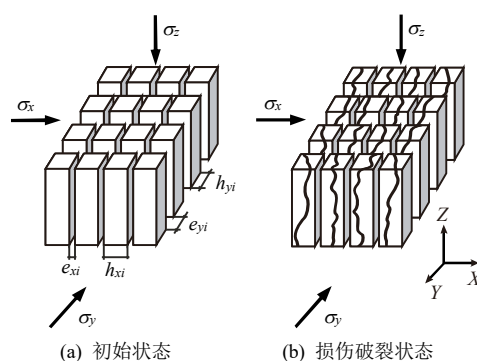


图2 不同状态的捆绑“火柴棍”模型

Fig.2 Bundled matchstick model in different states

两种模型可以较好地描述采掘扰动影响下有效应力和瓦斯压力对渗透率的影响,然而两种模型不包括温度的影响。其中,在对改变轴压和围压条件、开采扰动应力、气体压力改变下的渗透率结果进行拟合的过程中,指数型的拟合效果均优于立方型^[14-15],因此本文以指数型的渗透率模型(见

下式)为基础作进一步推导,考虑采掘扰动与温度耦合的作用影响。

$$\frac{k_z}{k_{z0}} = \exp \left\{ -6 \left[\frac{1}{(1-D_s)E_{b0}} - \left(1 - \frac{1}{\phi_0} \right) \frac{1}{E_{f0}} \right] \cdot \left[(1-\nu_b) \cdot \Delta\sigma_c - \nu_b \cdot \Delta\sigma_a + (2\nu_b - 1)\alpha_b \cdot \Delta p \right] - \frac{2\varepsilon_L}{\phi_0} \left(\frac{F_1 p}{p_L + p} - \frac{F_{10} p_0}{p_{L0} + p_0} \right) \right\} \quad (1)$$

式中: k_z 为煤体 z 轴方向的渗透率, 下标 0 表示初始状态; D_s 为采掘扰动引起的煤体损伤变量; E_{b0} 为初始状态下的煤体弹性模量; ϕ_0 为煤体孔隙率; E_{f0} 为煤体裂隙的弹性模量; ν_b 为煤体泊松比; $\Delta\sigma_c$ 为煤体所受围压增量; $\Delta\sigma_a$ 为煤体所受轴压增量; α_b 为 Biot 系数; Δp 为煤体内气体压力增量; ε_L 为 Langmuir 体积应变常数; p_L 为 Langmuir 压力常数; F_1 为内膨胀应变系数, $F_1 \in (0,1)$; p 为煤体内气体压力。

3 采掘扰动与温度耦合作用下裂隙变形

3.1 采掘扰动与温度耦合作用下裂隙变形构成

随着采掘工作面在煤层中的不断推进, 原岩应力区内煤体与工作面的距离减小, 煤体内温度逐渐下降。温度的变化对煤体造成的影响可归结为以下 3 个方面: ①煤体内伴随出现热应力的调整, 对煤体造成热损伤效应, 改变煤体力学参数状态, 影响

采掘扰动引起的煤体变形量; ②降温条件下, 气体分子的无规则运动减少、动能减小, 煤体对瓦斯吸附量增大, 煤体基质体积膨胀, 裂隙孔径变窄; ③受热膨胀作用控制, 降温后煤体内基质颗粒收缩、裂隙宽度增大。由此可见, 温度变化既改变煤体的物理力学参数, 也引起煤体基质和裂隙的变形, 而热膨胀和吸附作用又将导致裂隙出现相反的变化趋势。

根据上述分析, 采掘扰动和温度耦合影响下, 煤体裂隙变形可以划分为有效应力、吸附解吸和热膨胀 3 部分。籍此, 煤体沿着 x 轴方向分布的裂隙 (见图 2(a)) 产生的应变可表示为

$$\left(\sum_{i=1}^n \frac{\Delta e_{xi}}{e_{xi}} \right)_{\text{tot}} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{\Delta e_{xi}}{e_{xi}} \right)_{\text{eff}} + \left(\sum_{i=1}^n \frac{\Delta e_{xi}}{e_{xi}} \right)_{\text{ads}} + \left(\sum_{i=1}^n \frac{\Delta e_{xi}}{e_{xi}} \right)_{\text{the}} \quad (2)$$

式中: $\sum_{i=1}^n \frac{\Delta e_{xi}}{e_{xi}}$ 为裂隙应变; 括号外的下标表示引起

裂隙应变的原因; tot 为裂隙总应变、eff 为有效应力作用、ads 为吸附作用、the 为热膨胀作用。

3.2 采掘扰动与温度耦合损伤下引起裂隙变形

巷道掘进和工作面开采过程中, 煤层内应力场不断重新分布, 采掘扰动造成煤体损伤破裂 (见图 3(a)), 煤体内温度的变化同样能够产生损伤 (见图 3(b))。因此, 煤层开采过程中, 工作面前方煤体受到的采掘扰动和温度变化引起的耦合损伤作用影响 (见图 3(c))。

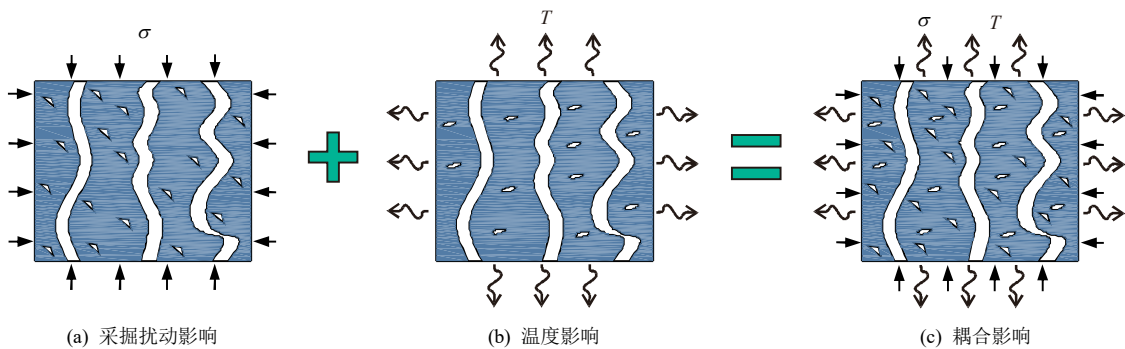


图 3 采掘扰动与温度耦合损伤示意图

Fig.3 Coupling damage of mining disturbance and temperature

采掘扰动与温度耦合损伤下的本构方程可表示为

$$\sigma = E_{b0} (1 - D_{st}) \varepsilon \quad (3)$$

式中: D_{st} 为采掘扰动与温度耦合损伤变量; σ 为采掘扰动应力; ε 为煤体的应变。

根据文献[16]可分别定义采掘扰动、温度变化

下的煤体损伤变量 D_s 、 D_t 为

$$D_s = 1 - \frac{E_{bs}}{E_{b0}} \quad (4)$$

$$D_t = 1 - \frac{E_{bt}}{E_{bt0}} \quad (5)$$

式中: E_{bs} 为采掘扰动后的煤体弹性模量; E_{bt} 为温度变化后的煤体弹性模量; E_{bt0} 为初始温度下煤体

的弹性模量。

张全胜等^[17]将 Lemaitre 提出的应变等价原理进行了推广, 得出如下结论: 材料在第 1 种损伤状态下的有效应力作用于第 2 种损伤状态引起的应变等价于材料在第 2 种损伤状态下的有效应力作用于第 1 种损伤状态引起的应变。因此, 将采掘扰动应力引起的煤体损伤作为第 1 种状态, 温度变化引起的热损伤作为第 2 种状态, 可得两种损伤状态下的本构关系如下:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_s &= E_{b0}(1-D_s)\varepsilon_s \\ \sigma &= E_{bs}(1-D_t)\varepsilon \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

联立式 (3) ~ (6) 可得

$$D_{st} = D_s + D_t - D_s D_t \quad (7)$$

在温变情况下, 岩石的弹性模量随着温度的升高而不断降低, 岩石的弹性模量与温度之间的关系为^[18-20]

$$E_{bt} = b_1 T + b_2 \quad (8)$$

式中: T 为煤体温度; b_1 、 b_2 均为材料参数。

将式 (8) 代入式 (5) 可得

$$D_t = 1 - \frac{b_1 T + b_2}{E_{bt0}} \quad (9)$$

采掘扰动下基于 Drucker-Prager 破坏准则的煤体损伤演化方程为^[21]

$$D_s = 1 - \exp \left[- \left(\frac{F}{F_0} \right)^w \right] \quad (10)$$

$$F = \alpha_0 I_1 + \sqrt{J_2} \quad (11)$$

$$\alpha_0 = \sin \varphi / \sqrt{9 + 3 \sin^2 \varphi} \quad (12)$$

$$I_1 = (\sigma_1 + 2\sigma_3) E_{b0} \varepsilon_1 / (\sigma_1 - 2\nu_b \sigma_3) \quad (13)$$

$$\sqrt{J_2} = (\sigma_1 - \sigma_3) E_{b0} \varepsilon_1 / [\sqrt{3}(\sigma_1 - 2\nu_b \sigma_3)] \quad (14)$$

式中: α_0 为与岩石材料性质有关的参数; w 、 F_0 为 Weibull 分布的参数; I_1 为应力张量的第一不变量; J_2 为应力偏量的第二不变量; φ 为岩石的内摩擦角; ε_1 为岩石微元的轴向应变。

至此, 将式 (9) 和式 (10) 代入式 (7) 中, 可得采掘扰动与温度耦合作用下的煤体损伤演化方程为

$$D_{st} = 1 - \exp \left[- \left(\frac{F}{F_0} \right)^w \right] \cdot \left(\frac{b_1 T + b_2}{E_{bt0}} \right) \quad (15)$$

假设采掘扰动下, 煤体基质的材料属性劣化、弹性模量不断降低, 而裂隙参数不变可推导出采掘扰动造成有效应力变化而引起煤体 x 轴方向的裂隙应变表达式^[15]:

$$\left(\sum_{i=1}^n \frac{\Delta e_{xi}}{e_{xi}} \right)_{\text{eff}} = \left(\frac{1}{(1-D_s)E_{b0}} - \left(1 - \frac{1}{\phi_0} \right) \frac{1}{E_{f0}} \right) \cdot [(1-\nu_b) \cdot \Delta \sigma_c - \nu_b \cdot \Delta \sigma_a + (2\nu_b - 1) \alpha_b \cdot \Delta p] \quad (16)$$

本文同样认为采掘扰动与温度耦合损伤造成煤体基质弹性模量劣化, 而裂隙的力学特性不变。将式 (16) 中由采掘扰动引起的损伤变量 D_s 替换为式 (15) 中由采掘扰动与温度耦合作用的损伤变量 D_{st} , 可得

$$\left(\sum_{i=1}^n \frac{\Delta e_{xi}}{e_{xi}} \right)_{\text{eff}} = \left[\frac{1}{(1-D_{st})E_{b0}} - \left(1 - \frac{1}{\phi_0} \right) \frac{1}{E_{f0}} \right] \cdot [(1-\nu_b) \cdot \Delta \sigma_c - \nu_b \cdot \Delta \sigma_a + (2\nu_b - 1) \alpha_b \cdot \Delta p] \quad (17)$$

3.3 气压和温度变化下吸附解吸引起裂隙变形

在采掘扰动影响下, 煤层中的应力场重新分布, 煤体内气体压力减小造成瓦斯解吸。在温度变化过程中, 瓦斯分子的活性和内能同时改变, 煤体同样出现吸附解吸的现象。Liu 等^[22]认为煤体基质之间并未完全分离, 而是由“煤基质桥”连接起来 (见图 4)。在煤体基质膨胀的时候, 裂隙被压缩, 而由于“煤基质桥”的存在, 基质之间产生内膨胀应力 σ_1 。内膨胀应力的概念更加精确地描述了煤体吸附产生的内变形量, 同时也建立了煤体吸附膨胀与裂隙变形的关系。

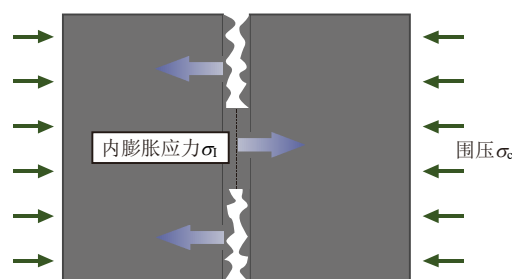


图 4 内膨胀应力示意图^[22]

Fig.4 A schematic description of internal swelling stress^[22]

Zang 等^[23]同样认为煤体在吸附解吸过程中存在内膨胀现象, 并给出了新的“内膨胀应变系数”的定义:

$$F_l = \frac{\varepsilon^{sl}}{\varepsilon^s} \quad (18)$$

式中: ε^{sl} 为吸附作用下煤体基质内膨胀应变变量; ε^s 为吸附作用下煤体基质膨胀应变变量。

结合式 (18) 的定义, 笔者推导出等温条件下吸附解吸作用引起 x 轴方向煤体裂隙应变的表达式^[15]:

$$\left(\sum_{i=1}^n \frac{\Delta e_{xi}}{e_{xi}} \right)_{\text{ads}} = \frac{\varepsilon_L}{3\phi_0} \left(\frac{F_l p}{p_L + p} - \frac{F_{l0} p_0}{p_{L0} + p_0} \right) \quad (19)$$

计算中可假设内膨胀应变系数是常数, 即 $F_l = F_{l0}$ 。

Teng 等^[13]给出 Langmuir 形式的指数方程来表示温度和气压同时变化导致煤体吸附解吸产生的应变变量:

$$\left(\sum_{i=1}^n \frac{\Delta(e_{xi} + h_{xi})}{e_{xi} + h_{xi}} \right)_{\text{ads}} = \frac{\varepsilon_L p}{p_L + p} \exp\left(-\frac{c_2 \Delta T}{1 + c_1 p}\right) - \frac{\varepsilon_L p_0}{p_L + p_0} \quad (20)$$

式中: h_{xi} 为 x 轴方向煤体基质单元的宽度;

$\left(\sum_{i=1}^n \frac{\Delta(e_{xi} + h_{xi})}{e_{xi} + h_{xi}} \right)_{\text{ads}}$ 为吸附作用引起的煤体应变增量; c_1 、 c_2 分别为吸附作用的压力和温度系数。

将式 (20) 代入式 (19) 可得

$$\left(\sum_{i=1}^n \frac{\Delta e_{xi}}{e_{xi}} \right)_{\text{ads}} = \frac{\varepsilon_L}{3\phi_0} \left(\frac{F_l p}{p_L + p} \exp\left(-\frac{c_2 \Delta T}{1 + c_1 p}\right) - \frac{F_{l0} p_0}{p_{L0} + p_0} \right) \quad (21)$$

3.4 温度变化下热膨胀应变引起裂隙变形

温度变化下煤体内部出现热应力, 煤体基质在升温条件下膨胀, 降温收缩。同时, 升温下煤体基质解吸收缩, 降温吸附膨胀。因此, 在变温过程中热应力和吸附解吸作用均造成煤体基质产生胀缩变形, 并且造成变形方向相反。以往建立煤体渗透率模型过程中多次将热应变等效成吸附变形来处理^[24-25]。因此, 本文同样将热应力和吸附解吸引起的变形进行等效类比, 同时类比 Liu 等^[22]的观点, 将煤体内基质看作是由“煤基质桥”连接, 考虑热应力引起煤体基质胀缩过程中基质与裂隙的相互作用。此时, 引入“热内膨胀应变系数”的概念, 假定煤体基质热膨胀过程中受到岩桥的抵抗作用, 热内膨胀应变系数为 F_{tl} , 可以得到和式 (18) 类似的下式:

$$F_{tl} = \frac{\varepsilon^{tl}}{\varepsilon^t} \quad (22)$$

式中: F_{tl} 为热内膨胀应变系数, $F_{tl} \in (0, 1)$; ε^{tl} 为热应力作用下煤体基质内膨胀应变变量; ε^t 为热应力

作用下煤体基质膨胀应变变量。

随温度升降而造成的煤体胀缩变形量可表示为

$$\left[\sum_{i=1}^n \frac{\Delta(e_{xi} + h_{xi})}{e_{xi} + h_{xi}} \right]_{\text{the}} = \frac{\alpha_t \Delta T}{3} \quad (23)$$

式中: $\left[\sum_{i=1}^n \frac{\Delta(e_{xi} + h_{xi})}{e_{xi} + h_{xi}} \right]_{\text{the}}$ 为热应力引起的基质应变增量; α_t 为煤体的热膨胀系数; ΔT 为温度增量。

类比式 (21) 的推导方式, 可得热应力作用下煤体裂隙的应变变量表达式:

$$\left(\sum_{i=1}^n \frac{\Delta e_{xi}}{e_{xi}} \right)_{\text{the}} = \frac{\alpha_t F_{tl}}{3\phi_0} \Delta T \quad (24)$$

3.5 采掘扰动与温度耦合作用下裂隙变形

式 (2) 中指出, 采掘扰动与温度耦合作用下裂隙的变形可由有效应力、吸附解吸和热膨胀应变组成。将煤体视为各向同性, 则煤体在 x 、 y 方向上的 3 种作用变形量相等。规定以压缩方向为正, 将式 (17)、(21)、(24) 代入式 (2), 可得采掘扰动与温度耦合作用下裂隙应变表达式:

$$\begin{aligned} \left(\sum_{i=1}^n \frac{\Delta e_{xi}}{e_{xi}} \right)_{\text{tot}} &= \left(\sum_{i=1}^n \frac{\Delta e_{yi}}{e_{yi}} \right)_{\text{tot}} = - \left[\frac{1}{(1 - D_{st}) E_{b0}} - \left(1 - \frac{1}{\phi_0} \right) \cdot \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{E_{f0}} \right] \times \left[(1 - \nu_b) \cdot \Delta \sigma_c - \nu_b \cdot \Delta \sigma_a + (2\nu_b - 1) \alpha_b \cdot \Delta p \right] - \\ &\quad \frac{\varepsilon_L}{3\phi_0} \left[\frac{F_l p}{p_L + p} \exp\left(-\frac{c_2 \Delta T}{1 + c_1 p}\right) - \frac{F_{l0} p_0}{p_{L0} + p_0} \right] - \frac{\alpha_t F_{tl}}{3\phi_0} \Delta T \end{aligned} \quad (25)$$

4 采掘扰动与温度耦合影响下煤体渗透率模型

文献^[15]中给出了指数型煤体渗透率模型的表达式:

$$k_z = k_{z0} \exp \left(3 \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta e_{xi}}{e_{xi}} + \frac{\Delta e_{yi}}{e_{yi}} \right)_{\text{tot}} \right) \quad (26)$$

将式 (25) 代入式 (26) 可以得出采掘扰动与温度耦合影响下煤体渗透率模型表达式:

$$\frac{k_z}{k_{z0}} = \exp \left[-6 \left(\frac{1}{(1 - D_{st}) E_{b0}} - \left(1 - \frac{1}{\phi_0} \right) \frac{1}{E_{f0}} \right) \cdot \left[(1 - \nu_b) \cdot \Delta \sigma_c - \nu_b \cdot \Delta \sigma_a + (2\nu_b - 1) \alpha_b \cdot \Delta p \right] - \frac{2\varepsilon_L}{\phi_0} \cdot \left[\frac{F_l p}{p_L + p} \exp\left(-\frac{c_2 \Delta T}{1 + c_1 p}\right) - \frac{F_{l0} p_0}{p_{L0} + p_0} \right] - \frac{2\alpha_t F_{tl}}{\phi_0} \Delta T \right] \quad (27)$$

5 模型验证分析

考虑到采掘扰动与温度耦合渗透率模型的特点,结合以下 3 种试验条件的煤体渗透率实测结果,对模型进行分析:①保持温度恒定的条件下,对煤体施加扰动应力;②保持煤体外部应力和气压恒定,改变煤体温度;③同时改变煤体的扰动应力和温度。在第 1 种试验条件下,渗透率模型可以退化为等温情况,模型中将不包含温度 T 的作用项,即与式(1)相同。在文献[15]中,笔者已对等温条件下扰动应力对煤体渗透率的变化规律进行了分析,验证了本文模型的适用性,这里不再赘述。下文仅对条件②、③进行验证分析。

许江等^[26]在保持瓦斯气体压力恒定的前提下,改变围压和轴压的组合。同时考虑煤矿现场实际,将试验温度从 30℃ 逐渐升高至 70℃。以此测试了赵庄矿原煤煤样在不同温度下的渗透率,试验条件及结果见表 1。三轴加载渗透过程中煤体内的有效应

力计算公式如下:

$$\sigma_e = \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3) - \frac{1}{2}(P_1 + P_2) \quad (28)$$

式中: σ_e 为有效应力; σ_1 、 σ_3 分别为轴压和围压; P_1 、 P_2 分别为进口端、出口端瓦斯压力。

张丹丹^[27]结合目前煤矿开采深度内煤体所处的地层温度范围,对赵庄矿原煤煤样在不同温度下的力学特性进行了测试,得出煤体在不同温度(30、50、70℃)下的弹性模量。原煤煤样在不同温度下的弹性模量符合式(8)所述形式。

$$E_{bt} = -8.815 \times 10^6 T + 2.924 \times 10^9 \quad (29)$$

5.1 温度改变下煤体渗透率变化规律分析

以有效应力分别为 1.0、2.5、4.0 MPa 下不同温度的渗透率测试为例,利用式(27)对温度改变下煤体渗透率的试验结果进行拟合分析,每级有效应力下 30℃ 时的渗透率确定为 k_{z0} ,拟合所用参数见表 2。

表 1 扰动应力和温度组合条件下煤体渗透率^[26]

Table 1 Coal permeability under disturbance stress and temperature^[26]

轴压 / MPa	围压 / MPa	进口端瓦斯压力 / MPa	出口端瓦斯压力 / MPa	有效应力 / MPa	渗透率/ 10^{-15} m^2				
					30℃	40℃	50℃	60℃	70℃
1.8	1.5	1.1	0.1	1.0	18.887	11.037	8.856	7.177	5.834
5.3	2.0	1.1	0.1	2.5	6.814	3.310	2.602	2.002	1.603
7.8	3.0	1.1	0.1	4.0	2.406	1.122	0.991	0.758	0.622
10.3	4.0	1.1	0.1	5.5	1.007	0.417	0.473	0.364	0.326
12.8	5.0	1.1	0.1	7.0	0.462	0.115	0.266	0.197	0.187

表 2 煤体基本参数列表^[11, 27-30]

Table 2 Basic parameters of coal^[11, 27-30]

煤体弹性 模量 E_{b0} / GPa	裂隙弹性 模量 E_{f0} / GPa	煤体 泊松比 ν_b	内摩 擦角 ϕ_b / (°)	孔隙率 ϕ_0 / %	Biot 系数 α_b	Langmuir 应变常数 ε_L / %	Langmuir 压力常数 P_L / MPa	内膨胀 应变 系数 F_i	c_1 / MPa^{-1}	c_2 / $^{\circ}\text{C}^{-1}$	热膨胀 系数 α_t / $^{\circ}\text{C}^{-1}$	热内膨胀 应变系数 F_{it}	b_1 / $(\text{Pa}/^{\circ}\text{C})$	b_2 / Pa
2.6	0.9	0.16	42.6	0.397	1	0.413	2.188	0.4	0.07	0.02	9.2×10^{-5}	0.8	-8.815×10^6	2.924×10^9

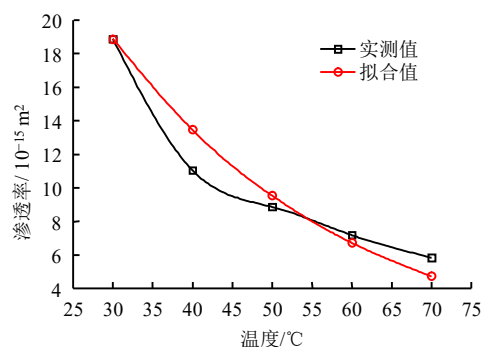
对比图 5(a)~5(c)中的拟合结果可以看出,在各级有效应力下,实测值在 30~40℃ 之间均出现陡然下降、40~70℃ 之间出现慢速下降的变化,而拟合结果在 30~70℃ 之间保持平滑渐进的降低过程,下降速率随着温度的升高而变缓。有效应力分别为 1.0、2.5、4.0 MPa 的条件下,在 30~70℃ 的升温过程中,渗透率实测值依次减小 $13.053 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 、 $5.211 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 、 $1.784 \times 10^{-15} \text{ m}^2$,拟合结果依次减小 $14.169 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 、 $5.112 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 、 $1.805 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 。整体来看,渗透率的拟合结果与实测值呈现较为一致的负指数形下降趋势且在

30~70℃ 的升温过程中渗透率的降幅十分接近。

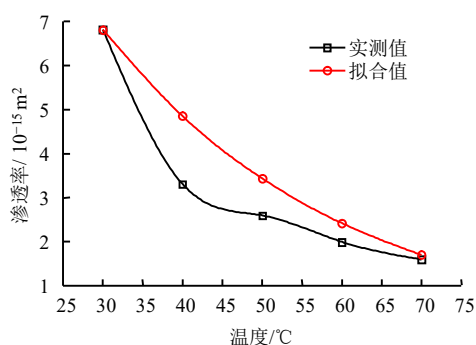
在有效应力恒定的前提下,随着温度的升高,煤体吸附量减小,出现解吸过程,煤基质体积收缩,孔裂隙扩张;而煤基质热膨胀量增大,挤压瓦斯流动通道。因此,在升温情况下,两种作用会引起相反的变化趋势。通过试验结果可以看出,在本文试验条件下,升温过程中热膨胀作用对渗透率造成减小量大于吸附解吸作用引起的增大量。

图 5(a)~5(c)中,拟合值和实测值总体变化规律一致,但仍存在些许偏差,主要出现在 30~50℃ 之间。笔者认为造成这种偏差的原因有以下两方面:

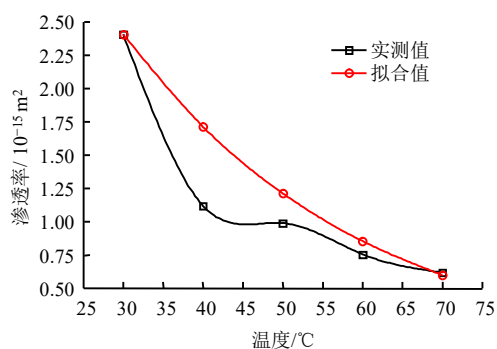
一方面, 在升温过程中, 煤体裂隙宽度因解吸和热膨胀的综合作用而变化, 煤体的孔隙率和渗透率随之改变, 但拟合过程中的孔隙率为恒定值; 另一方面, 内膨胀应变系数和热内膨胀应变系数会受到围压、孔隙压力、温度、煤体结构等因素^[23]的影响而变化, 而拟合过程中的两种系数均为恒定值。



(a) 有效应力为 1.0 MPa



(b) 有效应力为 2.5 MPa



(c) 有效应力为 4.0 MPa

图 5 温度改变下煤体渗透率拟合结果
Fig.5 Fitting results of coal permeability at different temperatures

5.2 扰动应力和温度耦合下煤体渗透率演化规律分析

工作面推进过程中, 前方煤体受采掘扰动影响, 其竖直方向的支承压力不断升高而水平方向的围压卸载。因此, 由轴压、围压同时变化组成的扰动应力与气体压力共同决定了有效应力的大小, 而

有效应力的变化是造成煤体损伤破裂的核心因素。尽管许江等^[26]在试验中进行的是围压加载而非卸载的过程, 但也是同时改变轴压和围压的组合且轴压的增加速率大于围压, 与工作面前方煤体轴压围压的非恒定比例变化类似。其试验结果可用来验证扰动应力和温度耦合下渗透率模型的适用性。结合表 1 的试验结果, 选取图 6 中组合条件下的煤体渗透率结果进行验证分析, 有效应力依次增加 1.5 MPa, 温度依次增加 10℃。

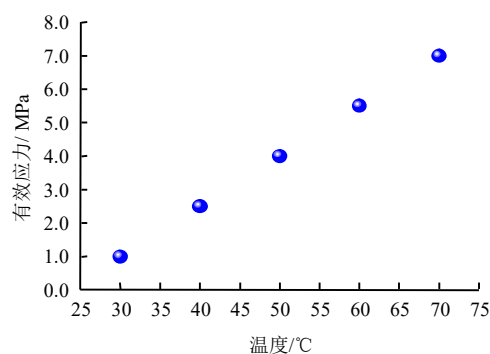


图 6 扰动应力和温度耦合影响的组合条件
Fig.6 Coupling conditions of disturbance stress and temperature

图 7 为扰动应力和温度耦合条件下, 煤体渗透率的试验和拟合结果。在有效应力和温度同时升高的条件下, 渗透率的拟合结果同实测结果一样均表现出随有效应力的增大而减小的变化规律。在有效应力由 1.0 MPa 升高至 7.0 MPa、温度由 30℃ 升高至 70℃ 的变化过程中, 实测值和拟合值的渗透率降幅分别为 99.01% 和 96.54%。

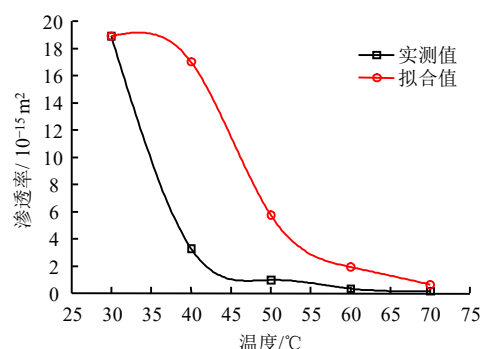


图 7 扰动应力和温度耦合影响下煤体渗透拟合结果
Fig.7 Fitting results of coal permeability under the effect of disturbance stress and temperature

试验过程中, 随着有效应力的升高, 煤体在被压缩的过程中出现损伤破裂现象, 而煤体内孔裂隙的宽度却持续减小, 瓦斯渗流通道压缩变窄或闭合

导致煤体渗透率降低。与此同时,随着温度的升高,煤体受上文所述的吸附和热膨胀综合作用影响而造成渗透率不断降低(见图5)。因此,在扰动应力和温度耦合加载下,煤体渗透率呈现不断降低的变化过程。此外,同温度改变下渗透率变化过程类似,笔者认为扰动应力和温度改变过程中煤体孔隙度、内膨胀应变系数和热内膨胀应变系数的变化是造成30~50℃之间拟合值和实测值存在偏差的主要原因。

6 煤体渗透率模型参数敏感性分析

为了探究内膨胀应变系数 F_I 和热内膨胀应变系数 F_{II} 对煤体渗透率变化的影响,现以有效应力为1.0 MPa下的渗透率测试过程为例,进行参数敏感性分析。 F_I 和 F_{II} 两个参数的值域范围均为(0,1),均各自以0.2为增量进行取值,模型中其余参数取值见表2。图8为不同内膨胀应变系数下的煤体渗透率拟合结果。温度升高过程中,煤体渗透率持续减小。在同一温度下,仅改变内膨胀应变系数时,煤体渗透率将随着 F_I 的增大而增大,即 F_I 的数值越大、渗透率在升温过程中的减小量越小。图9为不同热内膨胀应变系数下的煤体渗透率拟合结果。当

F_{II} 为0时,即不考虑热膨胀作用时,煤体渗透率随着温度的升高、解吸作用的增强而增大;除此之外,煤体渗透率随着温度的升高而减小,在同一温度下,仅改变热内膨胀应变系数,煤体渗透率将随着 F_{II} 的增大而减小,即 F_{II} 的数值越大、渗透率在升温过程中的减小量越大。

7 结 论

(1) 基于损伤力学、吸附理论和热应力理论,考虑采掘扰动与温度耦合损伤、吸附解吸和热膨胀作用的影响,推导出三者综合作用下煤体裂隙应变表达式,建立了采掘扰动与温度耦合条件下的工作面前方煤体渗透率模型。

(2) 构建的煤体渗透率模型可以较好地反映以下过程:在保持有效应力恒定仅改变温度的条件下,煤体渗透率随着温度的升高而呈现负指数形式的下降;在扰动应力和温度同时改变的条件下,煤体渗透率随着有效应力的增加和温度的升高而降低。

(3) 在同一温度下,煤体渗透率随着内膨胀应变系数的增大而增大,随着热内膨胀应变系数的增大而减小。内膨胀应变系数和热内膨胀应变系数的改变对煤体渗透率的变化起到相反的作用效果。

参 考 文 献

- [1] 谢和平,周宏伟,薛东杰,等. 煤炭深部开采与极限开采深度的研究与思考[J]. 煤炭学报, 2012, 37(4): 535—542.
XIE He-ping, ZHOU Hong-wei, XUE Dong-jie, et al. Research and consideration on deep coal mining and critical mining depth[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(4): 535—542.
- [2] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803—2813.
HE Man-chao, XIE He-ping, PENG Su-ping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(16): 2803—2813.
- [3] 谢和平. “深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(2): 1—16.
XIE He-ping. Research framework and anticipated results of deep rock mechanics and mining theory[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2017, 49(2): 1—16.
- [4] 薛东杰,周宏伟,彭瑞东,等. 基于应力降的非连续支承压力强扰动特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1080—1095.

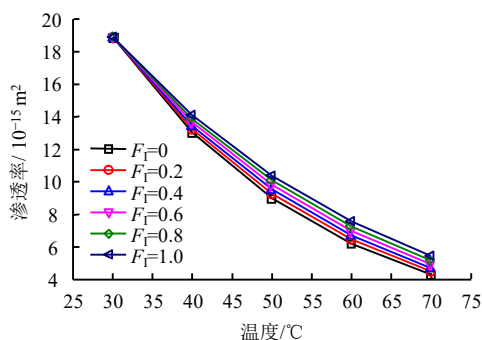


图8 不同内膨胀应变系数下的煤体渗透率
Fig.8 Permeability of coal on the condition of different internal swelling ratio

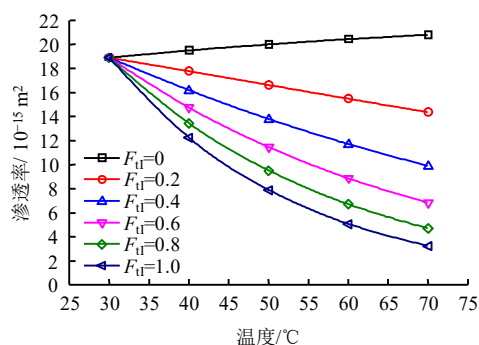


图9 不同热内膨胀应变系数下的煤体渗透率
Fig.9 Permeability of coal under different thermal internal swelling ratio

- XUE Dong-jie, ZHOU Hong-wei, PENG Rui-dong, et al. Stress drop on strong disturbance of discontinuous abutment pressure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2018, 37(5): 1080—1095.
- [5] ZHU W C, WEI C H, LIU J S, et al. A model of coal-gas interaction under variable temperatures[J]. **International Journal of Coal Geology**, 2011, 86(2—3): 213—221.
- [6] 杨新乐. 低渗透煤层气注热增产机理的研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2009.
- YANG Xin-le. Study on mechanism of injection heat increasing production in coal-bed gas of low permeability coal seam[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2009.
- [7] 尹光志, 李铭辉, 李文璞, 等. 基于改进 BP 神经网络的煤体瓦斯渗透率预测模型[J]. **煤炭学报**, 2013, 38(7): 1179—1184.
- YIN Guang-zhi, LI Ming-hui, LI Wen-pu, et al. Model of coal gas permeability prediction based on improved BP neural network[J]. **Journal of China Coal Society**, 2013, 38(7): 1179—1184.
- [8] 秦玉金, 罗海珠, 姜文忠, 等. 非等温吸附变形条件下瓦斯运移多场耦合模型研究[J]. **煤炭学报**, 2011, 36(3): 412—416.
- QIN Yu-jin, LUO Hai-zhu, JIANG Wen-zhong, et al. The research of gas migration multiphysics coupling model under the non-isothermal adsorption distortion[J]. **Journal of the China Coal Society**, 2011, 36(3): 412—416.
- [9] 陶云奇, 许江, 程明俊, 等. 含瓦斯煤渗透率理论分析与试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2009, 28(增刊 2): 3363—3370.
- TAO Yun-qi, XU Jiang, CHENG Ming-jun, et al. Theoretical analysis and experimental study on permeability of gas-bearing coal[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(Suppl.2): 3363—3370.
- [10] 孙光中, 荆永滨, 田坤云, 等. 基于温度作用下含瓦斯煤渗透率动态演化模型的修正及试验研究[J]. **应用基础与工程科学学报**, 2017, 25(3): 489—499.
- SUN Guang-zhong, JING Yong-bin, TIAN Kun-yun, et al. Modify and experiment study on dynamic evolution model for permeability of gas-filled coal under temperature[J]. **Journal of Basic Science and Engineering**, 2017, 25(3): 489—499.
- [11] 张泽天. 不同开采方式煤岩应力场-裂隙场-渗流场行为研究[D]. 成都: 四川大学, 2016.
- ZHANG Ze-tian. Multiphysics fields behavior of coal under different mining layouts[D]. Chengdu: Sichuan University, 2016.
- [12] 薛熠, 高峰, 高亚楠, 等. 采动影响下损伤煤岩体峰后渗透率演化模型研究[J]. **中国矿业大学学报**, 2017, 46(3): 521—527.
- XUE Yi, GAO Feng, GAO Ya-nan, et al. Research on mining-induced permeability evolution model of damaged coal in post-peak stage[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2017, 46(3): 521—527.
- [13] TENG T, WANG J G, GAO F, et al. A thermally sensitive permeability model for coal-gas interactions including thermal fracturing and volatilization[J]. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, 2016, 32: 319—333.
- [14] 荣腾龙, 周宏伟, 王路军, 等. 三向应力条件下煤体渗透率演化模型研究[J]. **煤炭学报**, 2018, 43(7): 1930—1937.
- RONG Teng-long, ZHOU Hong-wei, WANG Lu-jun, et al. Coal permeability model for gas movement under the three-dimensional stress[J]. **Journal of China Coal Society**, 2018, 43(7): 1930—1937.
- [15] 荣腾龙, 周宏伟, 王路军, 等. 开采扰动下考虑损伤破裂的深部煤体渗透率模型研究[J]. **岩土力学**, 2018, 39(11): 3983—3992.
- RONG Teng-long, ZHOU Hong-wei, WANG Lu-jun, et al. A damage-based permeability model of deep coal under the mining disturbance[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(11): 3983—3992.
- [16] 刘泉声, 许锡昌. 温度作用下脆性岩石的损伤分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2000, 19(4): 408—411.
- LIU Quan-sheng, XU Xi-chang. Damage analysis of brittle rock at high temperature[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(4): 408—411.
- [17] 张全胜, 杨更社, 任建喜. 岩石损伤变量及本构方程的新探讨[J]. **岩石力学与工程学报**, 2003, 22(1): 30—34.
- ZHANG Quan-sheng, YANG Geng-she, REN Jian-xi. New study of damage variable and constitutive equation of rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(1): 30—34.
- [18] 许江, 张丹丹, 彭守建, 等. 温度对含瓦斯煤力学性质影响的试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2011, 30(增

- 刊 1): 2730—2735.
- XU Jiang, ZHANG Dan-dan, PENG Shou-jian, et al. Experimental research on influence of temperature on mechanical properties of coal containing methane[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(Suppl.1): 2730—2735.
- [19] 张连英, 茅献彪, 李天珍. 高温环境下大理岩热损伤特性的试验研究[J]. **采矿与安全工程学报**, 2010, 27(4): 505—511.
- ZHANG Lian-ying, MAO Xian-biao, LI Tian-zhen. Experimental research on thermal damage properties of marble at high temperature[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2010, 27(4): 505—511.
- [20] 方新宇, 许金余, 刘石, 等. 高温后花岗岩的劈裂试验及热损伤特性研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2016, 35(增刊 1): 2687—2694.
- FANG Xin-yu, XU Jin-yu, LIU Shi, et al. Research on splitting-tensile tests and thermal damage of granite under post-high temperature[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(Suppl.1): 2687—2694.
- [21] 曹文贵, 赵明华, 刘成学. 基于 Weibull 分布的岩石损伤软化模型及其修正方法研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2004, 23(19): 3226—3231.
- CAO Wen-gui, ZHAO Ming-hua, LIU Cheng-xue. Study on the model and its modifying method for rock softening and damage based on Weibull random distribution[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(19): 3226—3231.
- [22] LIU H H, RUTQVIST J. A new coal-permeability model: internal swelling stress and fracture-matrix interaction[J]. **Transport in Porous Media**, 2010, 82(1): 157—171.
- [23] ZANG J, WANG K, ZHAO Y X. Evaluation of gas sorption-induced internal swelling in coal[J]. **Fuel**, 2015, 143(3): 165—172.
- [24] PALMER I, MANSOORI J. How permeability depends on stress and pore pressure in coalbeds: a new model[J]. **SPE Reservoir Evaluation & Engineering**, 1998, 1(6): 539—544.
- [25] SHI J Q, DURUCAN S. Drawdown induced changes in permeability of coalbeds: a new interpretation of the reservoir response to primary recovery[J]. **Transport in Porous Media**, 2004, 56(1): 1—16.
- [26] 许江, 张丹丹, 彭守建, 等. 三轴应力条件下温度对原煤渗流特性影响的实验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2011, 30(9): 1848—1854.
- XU Jiang, ZHANG Dan-dan, PENG Shou-jian, et al. Experimental research on impact of temperature on seepage characteristics of coal containing methane under triaxial stress[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(9): 1848—1854.
- [27] 张丹丹. 力热耦合作用下含瓦斯煤力学特性与渗流特性的实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- ZHANG Dan-dan. Experimental study on mechanical characteristics and seepage characteristics of coal containing methane under the coupling effect between stress and thermal[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [28] 王刚, 王锐, 武猛猛, 等. 渗透压-应力耦合作用下煤体常规三轴试验的颗粒流模拟[J]. **岩土力学**, 2016, 37(增刊 1): 537—546.
- WANG Gang, WANG Rui, WU Meng-meng, et al. Simulation of conventional triaxial test on coal under hydro-mechanical coupling by particle flow code[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Suppl.1): 537—546.
- [29] 李文璞. 采动影响下煤岩力学特性及瓦斯运移规律研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- LI Wen-pu. Research on mechanical characteristics and gas migration law of coal influenced by mining[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [30] 滕腾. 煤层气开采中的热-湿-流-固耦合机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- TENG Teng. Mechanism of heat-moisture-fluid-solid interactions in coal seam gas recovery[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.