

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0787

# 开采扰动下考虑损伤破裂的 深部煤体渗透率模型研究

荣腾龙<sup>1</sup>, 周宏伟<sup>1,2</sup>, 王路军<sup>1</sup>, 任伟光<sup>1</sup>, 郭依宝<sup>1</sup>

(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) 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083)

**摘 要:** 为了研究深部煤体在开采扰动影响下的渗透率演化规律, 以三向应力条件下的煤体渗透率模型为基础, 从吸附解吸作用引起裂隙变形和损伤破裂造成煤基质弹性模量劣化的角度进行理论推导, 引入内膨胀应变系数的概念, 同时基于 Drucker-Prager 破坏准则的损伤本构关系建立了两种考虑煤体损伤破裂的渗透率演化模型——指数型和立方型, 并且对常规三轴加载、开采扰动加卸载和改变气体压力下的瓦斯渗透试验结果进行了拟合分析。结果表明: 所构建的两种模型可以较好地反映常规三轴加载和开采扰动加卸载下煤体渗透率的分区段变化特征, 也可以描述有效围压恒定条件下煤体渗透率随气体压力升高而降低的规律。在开采扰动加卸载和改变气体压力的试验中, 指数型的拟合效果略优于立方型。研究结果可为深部煤炭开采及瓦斯抽采的工作提供指导。

**关 键 词:** 深部煤体; 渗透率; 开采扰动; 三向应力; 吸附解吸; 损伤破裂

中图分类号: TD 712

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2018)11-3983-10

## A damage-based permeability models of deep coal under mining disturbance

RONG Teng-long<sup>1</sup>, ZHOU Hong-wei<sup>1,2</sup>, WANG Lu-jun<sup>1</sup>, REN Wei-guang<sup>1</sup>, GUO Yi-bao<sup>1</sup>

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

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

**Abstract:** To investigate the permeability evolution of deep coal under the influence of mining disturbance, two forms of permeability model including the damage and fracture effect were established. These two forms were exponential form and cubic form, respectively. These two permeability models were based on the previous coal permeability model in three-dimensional (3D) stress state. The derivation process included two aspects, i.e., the fracture deformation caused by adsorption and the deterioration of elastic modulus from matrix caused by damage. Meanwhile, the internal swelling ratio and the damage constitutive based on Drucker-Prager failure criterion were introduced into the models. According to permeability tests under conventional triaxial compression, loading-unloading under mining disturbance and changing the gas pressure, the permeability of coal in the tests were analyzed in detail. The results show that these two models can reflect the permeability evolution in the conventional triaxial compression and loading-unloading tests. Moreover, these two models can represent the decrease of coal permeability with the increase of gas pressure under the constant effective confining pressure condition. In the loading-unloading and changing the gas pressure tests, the fitted results in exponential form are slightly better than those in cubic form. This study provides a useful reference for developing the technology of deep coal mining and gas extraction.

**Keywords:** deep coal; permeability; mining disturbance; three-dimensional stress; adsorption and desorption; damage and fracture

## 1 引 言

现今, 我国煤炭资源的开采深度不断增加, 深部开采将成为常态<sup>[1]</sup>。深部开采具有明显的强扰动

特征<sup>[2]</sup>, 强烈的开采扰动会改变煤岩体的各项物理力学参数, 包括渗透率、弹性模量等; 开采扰动还将打破煤体内部原有的气压平衡状态造成瓦斯压力下降, 瓦斯解吸引起煤体基质收缩及渗透率的改变。

收稿日期: 2018-05-08

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, 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

我国煤层普遍具有瓦斯压力高、含量大以及渗透率低的特点,掌握深部煤体在开采扰动下的渗透率演化规律是实现深部煤炭资源安全、高效、绿色开采的重要前提<sup>[3]</sup>。

以往关于煤体渗透率模型的研究主要集中在煤储层方面<sup>[4-8]</sup>,大多基于单轴应变条件和上覆载荷不变的假设建立渗透率模型,这些模型不能很好的适用于开采扰动下由三向应力引起的煤炭渗透率变化。Connell等<sup>[9]</sup>基于多孔弹性理论建立了三向应力及气体吸附效应下的煤体渗透率模型。Perera等<sup>[10]</sup>根据弹性理论推导出了以注气压力、围压、轴压和气体吸附量为控制变量的三向应力煤体渗透率模型。Lu等<sup>[11]</sup>从基质应变和裂隙应变的角度计算孔隙度变化,进而建立了有效应力与吸附变形共同作用下不同力学边界的渗透率模型。然而,上述三向应力渗透率模型均不考虑损伤破裂对渗透率的影响,近些年也有部分学者开始关注并建立了一些考虑煤体损伤的渗透率模型。Xie等<sup>[12]</sup>依据瓦斯抽采后有效影响半径内煤体基质解吸收缩造成的损伤效应,假设裂隙孔径变化和损伤积累对渗透率的影响是线性独立的,建立了考虑气压变化和损伤效应的煤体渗透率模型。Zhang等<sup>[13]</sup>通过煤体体积应变和初始孔隙率构建了损伤变量,建立了考虑煤体损伤的渗透率表达式。Ju等<sup>[14]</sup>给出了围压、气压和温度影响下的煤体体积应变表达式,从微观热破裂的角度对孔径变形进行了修正,建立了以体积应变和微裂隙密度为变量的多场耦合煤体渗透率模型。薛熠等<sup>[15-17]</sup>等通过构建损伤影响因子,对峰前和峰后渗透率进行分段表达,结合煤体有效应力或应变的变化,先后建立了3种考虑煤体损伤破裂的渗透率模型。

本文以三向应力条件下的煤体渗透率演化模型为基础,通过内膨胀应变系数添加了吸附解吸作用项,同时建立了开采扰动影响下考虑煤体损伤破裂影响的渗透率模型,并结合常规三轴加载、开采扰动加卸载和改变气体压力下的渗透试验结果,对本文构建的深部煤体渗透率模型进行了验证分析。

## 2 考虑吸附解吸的三向应力渗透率模型

### 2.1 三向应力条件下煤体渗透率模型

煤层开采过程中,受采掘工作面推进的扰动影响,工作面前方煤体在水平和竖直方向所受应力同时发生变化,竖直方向的支承压力升高而水平方向出现持续的卸压过程(见图1)。图中, $\alpha$ 为应力集中系数; $\gamma$ 为煤层上覆岩层重度; $H$ 为煤层埋深; $\sigma_v$ 、

$\sigma_h$ 分别为煤层在竖直和水平方向的应力; $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ 分别为煤样在3个方向的主应力。

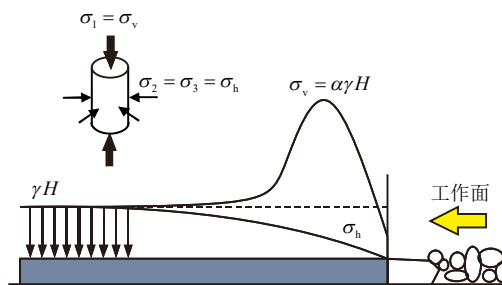


图1 开采扰动下煤体应力状态示意图

Fig.1 Stress state of coal under mining disturbance

突破以往大多数煤体渗透率模型中采用的单轴应变条件和上覆载荷恒定的假设<sup>[4-5]</sup>,笔者曾建立了两种三向应力条件下的煤体渗透率模型——指数型和立方型<sup>[18]</sup>,即

$$\frac{k_z}{k_{z0}} = \exp \left\{ -6 \left( \frac{1}{E_m} + \frac{1}{\phi_0} \cdot \frac{1}{E_f} \right) \cdot \left[ (1-\nu_b) \cdot \Delta\sigma_c - \nu_b \cdot \Delta\sigma_a + (2\nu_b-1)\alpha_b \cdot \Delta p \right] \right\} \quad (1)$$

$$\frac{k_z}{k_{z0}} = \left\{ 1 - 2 \left( \frac{1}{E_m} + \frac{1}{\phi_0} \cdot \frac{1}{E_f} \right) \cdot \left[ (1-\nu_b) \cdot \Delta\sigma_c - \nu_b \cdot \Delta\sigma_a + (2\nu_b-1)\alpha_b \cdot \Delta p \right] \right\}^3 \quad (2)$$

式中: $k_z$ 为竖直方向的煤体渗透率; $E_m$ 、 $E_f$ 为煤体基质、裂隙的弹性模量; $\phi_0$ 为煤体孔隙率; $\nu_b$ 为煤体泊松比; $\alpha_b$ 为Biot系数; $\Delta\sigma_c$ 、 $\Delta\sigma_a$ 和 $\Delta p$ 为煤体所受围压增量、轴压增量和气体压力增量。

上述两种形式的渗透率模型可以较好地反映开采扰动影响下,水平和竖直应力同时变化过程中煤体渗透率的演化过程。然而,这两种模型仅能表征三向有效应力改变引起的渗透率变化,不能反映开采扰动下煤体出现吸附解吸和损伤破裂对渗透率的影响,因此,本文对以上两种模型加以改进。

### 2.2 吸附解吸作用下裂隙应变的推导

以往的研究较多将煤体简化为捆绑的火柴棍模型进行(见图2,图中, $\Delta\sigma_x$ 、 $\Delta\sigma_y$ 、 $\Delta\sigma_z$ 为沿坐标轴 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的应力增量),本文同样基于此几何模型展开推导,在此模型中沿着 $x$ 轴方向,截取煤体平面作为研究对象,将煤体视为由大量煤体基质单元和裂隙单元组成的弹性系统(见图3)。根据工程应变的定义,可得裂隙变形量的表达式<sup>[18]</sup>

$$\sum_{i=1}^n \Delta e_i = \sum_{i=1}^n (e_i + h_i) \cdot \Delta \varepsilon_{bi} - \sum_{i=1}^n h_i \cdot \Delta \varepsilon_{mi} \quad (3)$$

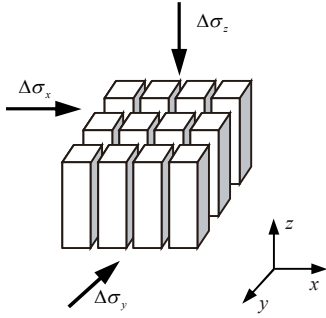


图 2 捆绑“火柴棍”模型  
Fig.2 Bundled matchstick model

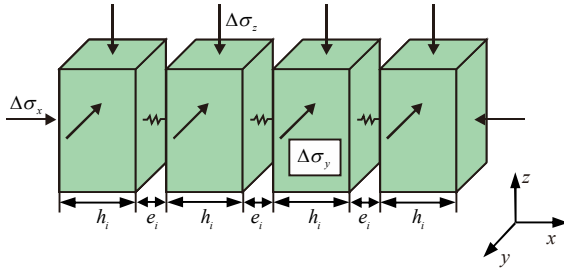


图 3 煤体弹性系统示意图  
Fig.3 Schematic of coal elastic system

式中： $h_i$ 、 $e_i$  分别为基质单元和裂隙单元的宽度； $\varepsilon_{bi}$ 、 $\varepsilon_{mi}$  分别为煤体单元和基质单元的应变。

开采扰动影响下，外部边界应力和内部气压同时发生改变，煤体和基质的应变可视为有效应力和吸附解吸两种作用的总和，煤体单元和基质单元的应变可表达为

$$\sum_{i=1}^n \Delta \varepsilon_{bi} = \sum_{i=1}^n \Delta \varepsilon_{bi}^e + \sum_{i=1}^n \Delta \varepsilon_{bi}^s \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n \Delta \varepsilon_{mi} = \sum_{i=1}^n \Delta \varepsilon_{mi}^e + \sum_{i=1}^n \Delta \varepsilon_{mi}^s \quad (5)$$

式中：上标 e、s 分别表示有效应力作用和吸附解吸作用。

将式 (4)、(5) 代入式 (3)，可得

$$\sum_{i=1}^n \Delta e_i = \left[ \sum_{i=1}^n (e_i + h_i) \cdot \Delta \varepsilon_{bi}^e - \sum_{i=1}^n h_i \cdot \Delta \varepsilon_{mi}^e \right] + \left[ \sum_{i=1}^n (e_i + h_i) \cdot \Delta \varepsilon_{bi}^s - \sum_{i=1}^n h_i \cdot \Delta \varepsilon_{mi}^s \right] \quad (6)$$

将式 (6) 两端同时除以  $\sum_{i=1}^n e_i$ ，可得  $x$  轴方向裂隙应变的表达式

$$\sum_{i=1}^n \frac{\Delta e_i}{e_i} = \left( \sum_{i=1}^n \frac{(e_i + h_i)}{e_i} \cdot \Delta \varepsilon_{bi}^e - \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{e_i} \cdot \Delta \varepsilon_{mi}^e \right) + \left( \sum_{i=1}^n \frac{(e_i + h_i)}{e_i} \cdot \Delta \varepsilon_{bi}^s - \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{e_i} \cdot \Delta \varepsilon_{mi}^s \right) \quad (7)$$

从式 (7) 中可以看出， $x$  轴方向的裂隙应变可分别由有效应力和吸附解吸作用下的煤体和基质应变变量之差表示。现定义有效应力项  $Q_1$  和吸附解吸作用项  $Q_2$  如下：

$$Q_1 = \sum_{i=1}^n \frac{(e_i + h_i)}{e_i} \cdot \Delta \varepsilon_{bi}^e - \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{e_i} \cdot \Delta \varepsilon_{mi}^e \quad (8)$$

$$Q_2 = \sum_{i=1}^n \frac{(e_i + h_i)}{e_i} \cdot \Delta \varepsilon_{bi}^s - \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{e_i} \cdot \Delta \varepsilon_{mi}^s \quad (9)$$

式 (7) 可变换为

$$\sum_{i=1}^n \frac{\Delta e_i}{e_i} = Q_1 + Q_2 \quad (10)$$

煤体基质单元的宽度  $h_i$  远大于裂隙单元的宽度  $e_i$  (见图 3)，即  $e_i = h_i$ 。因此，有

$$\sum_{i=1}^n \frac{e_i + h_i}{e_i} \approx \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{e_i} \quad (11)$$

将式 (11) 代入吸附解吸作用项  $Q_2$  中可得

$$Q_2 = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{e_i} \cdot (\Delta \varepsilon_{bi}^s - \Delta \varepsilon_{mi}^s) \quad (12)$$

由孔隙度的定义可知

$$\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{e_i} = \frac{1}{\phi_0} - 1 \quad (13)$$

将式 (13) 代入式 (12) 可得

$$Q_2 = \left( \frac{1}{\phi_0} - 1 \right) \cdot \sum_{i=1}^n (\Delta \varepsilon_{bi}^s - \Delta \varepsilon_{mi}^s) \quad (14)$$

Liu 等<sup>[19]</sup>考虑煤体在吸附膨胀过程中裂隙和煤体基质的相互作用，首次提出了内膨胀应力的概念。这个概念可以用来解释被部分裂隙分离却没有完全隔断的煤体基质在膨胀/收缩时的裂隙孔径变化。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量，同时也建立了煤体吸附膨胀与裂隙变形的关系。Zang 等<sup>[20]</sup>在 Liu 等<sup>[19]</sup>的基础之上，定义了新的内膨胀应变系数  $F_1$ 。

$$F_1 = \frac{\varepsilon^{sl}}{\varepsilon^s} \quad (15)$$

式中： $F_1$  为内膨胀应变系数， $F_1 \in (0,1)$ ； $\varepsilon^{sl}$  为煤体基质内膨胀应变变量； $\varepsilon^s$  为煤体基质膨胀应变变量。

此外，Wang 等<sup>[21]</sup>结合 Langmuir 吸附应变理论，给出了吸附作用引起煤体和基质在  $x$  轴方向应变的表达式：

$$\sum_{i=1}^n (\Delta \varepsilon_{bi}^s - \Delta \varepsilon_{mi}^s) = \varepsilon_{Lx} \left( \frac{F_1 p}{p_L + p} - \frac{F_{10} p}{p_{L0} + p} \right) \quad (16)$$

式中:  $\varepsilon_{Lx}$  为  $x$  方向的 Langmuir 应变常数;  $p_L$  为 Langmuir 压力常数; 下标 0 表示初始状态。

假设煤体各向同性, 吸附解吸过程中  $x$ 、 $y$  和  $z$  轴方向的变形量相等。因此, 煤体在  $x$  轴方向的线应变为体积应变的  $1/3$ 。将式 (16) 代入式 (14), 可得吸附解吸作用项  $Q_2$  的表达式:

$$Q_2 = \frac{\varepsilon_L}{3} \left( \frac{1}{\phi_0} - 1 \right) \left( \frac{F_1 p}{p_L + p} - \frac{F_{10} p}{p_{L0} + p} \right) \quad (17)$$

式中:  $\varepsilon_L$  为 Langmuir 体积应变常数。计算中可假设内膨胀应变系数是常数, 即  $F_1 = F_{10}$ 。

一般情况下煤体孔隙率远小于 1, 则

$$\frac{1}{\phi_0} - 1 \approx \frac{1}{\phi_0} \quad (18)$$

此前, 笔者已经推导出仅由有效应力作用而引起的  $x$  轴方向裂隙应变表达式<sup>[18]</sup>

$$Q_1 = - \left( \frac{1}{E_m} + \frac{1}{\phi_0} \frac{1}{E_f} \right) \left[ (1 - \nu_b) \Delta \sigma_c - \nu_b \cdot \Delta \sigma_a + (2\nu_b - 1) \alpha_b \cdot \Delta p \right] \quad (19)$$

将式 (17) ~ (19) 代入式 (10) 可得吸附解吸和有效应力共同作用引起的裂隙变形:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta e_{xi}}{e_{xi}} = & - \left( \frac{1}{E_m} + \frac{1}{\phi_0} \frac{1}{E_f} \right) \cdot \\ & \left[ (1 - \nu_b) \Delta \sigma_c - \nu_b \Delta \sigma_a + (2\nu_b - 1) \alpha_b \Delta p \right] - \\ & \frac{\varepsilon_L}{3\phi_0} \left( \frac{F_1 p}{p_L + p} - \frac{F_{10} p}{p_{L0} + p} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

煤体物理力学和吸附特性为各向同性, 同理可得沿着  $y$  方向截取煤体平面所得裂隙应变表达式:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta e_{yi}}{e_{yi}} = & - \left( \frac{1}{E_m} + \frac{1}{\phi_0} \frac{1}{E_f} \right) \cdot \\ & \left[ (1 - \nu_b) \Delta \sigma_c - \nu_b \Delta \sigma_a + (2\nu_b - 1) \alpha_b \Delta p \right] - \\ & \frac{\varepsilon_L}{3\phi_0} \left( \frac{F_1 p}{p_L + p} - \frac{F_{10} p}{p_{L0} + p} \right) \end{aligned} \quad (21)$$

## 2.3 考虑吸附解吸的三向应力渗透率模型表达式

### 2.3.1 指数型

在  $x$  轴和  $y$  轴两个方向裂隙变形影响下, 煤体在  $z$  轴方向上的渗透率表达式<sup>[18]</sup>如下:

$$k_z = k_{z0} \exp \left( 3 \sum_{i=1}^n \left( \frac{\Delta e_{xi}}{e_{xi}} + \frac{\Delta e_{yi}}{e_{yi}} \right) \right) \quad (22)$$

将式 (20)、(21) 代入式 (22) 可得

$$\begin{aligned} \frac{k_z}{k_{z0}} = & \exp \left\{ -6 \left( \frac{1}{E_m} + \frac{1}{\phi_0} \cdot \frac{1}{E_f} \right) \cdot \right. \\ & \left[ (1 - \nu_b) \Delta \sigma_c - \nu_b \cdot \Delta \sigma_a + (2\nu_b - 1) \alpha_b \cdot \Delta p \right] - \\ & \left. \frac{2\varepsilon_L}{\phi_0} \left( \frac{F_1 p}{p_L + p} - \frac{F_{10} p}{p_{L0} + p} \right) \right\} \end{aligned} \quad (23)$$

### 2.3.2 立方型

根据文献[22-23]的研究成果, 煤体在  $x$  轴和  $y$  轴两个水平方向裂隙变形影响下,  $z$  轴方向上的渗透率可采用下式进行表示:

$$\frac{k_z}{k_{z0}} = \left[ 1 + \sum_{i=1}^n \left( \frac{\Delta e_{xi}}{e_{xi}} + \frac{\Delta e_{yi}}{e_{yi}} \right) \right]^3 \quad (24)$$

将式 (20)、(21) 代入式 (24) 可得

$$\begin{aligned} \frac{k_z}{k_{z0}} = & \left\{ 1 - 2 \left( \frac{1}{E_m} + \frac{1}{\phi_0} \cdot \frac{1}{E_f} \right) \cdot \right. \\ & \left[ (1 - \nu_b) \cdot \Delta \sigma_c - \nu_b \cdot \Delta \sigma_a + (2\nu_b - 1) \alpha_b \cdot \Delta p \right] - \\ & \left. \frac{2\varepsilon_L}{3\phi_0} \left( \frac{F_1 p}{p_L + p} - \frac{F_{10} p}{p_{L0} + p} \right) \right\}^3 \end{aligned} \quad (25)$$

由式 (22) 和式 (24) 可以看出, 两种形式渗透率模型均是基于裂隙应变进行表达, 两种模型的构建角度相同但具有不同的函数形式。

## 3 考虑损伤破裂影响的渗透率模型

上文将煤体看作是基质和裂隙组成的弹性系统 (见图 3), 认为煤体仅发生弹性的连续变形, 煤体、基质和裂隙单元的弹性模量存在以下关系: <sup>[18]</sup>

$$\frac{1}{E_b} = \frac{1}{E_m} + \frac{1}{E_f} \quad (26)$$

式中:  $E_b$  为煤体的弹性模量 (MPa)。

无论是在煤层开采扰动下还是室内试验过程中, 随着所处应力水平的升高, 煤体内部均会出现损伤破裂的现象。煤体内部的损伤积累在宏观上表现为微裂纹的萌生和扩展, 最终形成贯通裂隙。为了考虑损伤破裂作用的影响, 这里认为在开采扰动下煤体基质单元持续破裂, 煤体弹性模量不断劣化 (见图 4)。假设损伤破裂作用仅发生在基质单元上, 裂隙单元不发生变化, 则式 (26) 可变换为

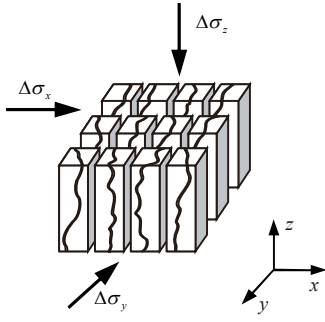


图 4 损伤破裂的火柴棍模型  
Fig.4 Damaged matchstick model

$$\frac{1}{E_b} = \frac{1}{E_m} + \frac{1}{E_{f0}} \quad (27)$$

煤体经受开采扰动而产生损伤破裂现象, 根据应变等效假说, 定义损伤变量  $D$  为

$$D = 1 - E_b / E_{b0} \quad (28)$$

将式 (28) 代入式 (27), 可得

$$E_m = \frac{(1-D)E_{b0}E_{f0}}{E_{f0} - (1-D)E_{b0}} \quad (29)$$

文献[24]假定微元强度服从 Weibull 分布, 基于 Drucker-Prager 准则, 建立了三维应力状态下反映岩石破裂过程的损伤本构模型。其中, 基于 Drucker-Prager 破坏准则的岩石微元强度  $F$ 、微元破坏的概率密度函数  $P(F)$  和损伤变量  $D$  表达式如下:

$$F = \alpha_0 I_1 + \sqrt{J_2} \quad (30)$$

$$P(F) = \frac{w}{F_0} \left( \frac{F}{F_0} \right)^{w-1} \exp \left[ - \left( \frac{F}{F_0} \right)^w \right] \quad (31)$$

$$D = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{F}{F_0} \right)^w \right] \quad (32)$$

式中:  $\alpha_0$  为与岩石材料性质有关的参数;  $I_1$  为应力张量的第 1 不变量;  $J_2$  为应力偏量的第 2 不变量;  $w$ 、 $F_0$  为 Weibull 分布的参数, 取值方法见文献[25]。参数计算式如下:

$$\alpha_0 = \sin \varphi / \sqrt{9 + 3 \sin^2 \varphi} \quad (33)$$

$$I_1 = (\sigma_1 + 2\sigma_3) E_{b0} \varepsilon_1 / (\sigma_1 - 2\nu_b \sigma_3) \quad (34)$$

$$\sqrt{J_2} = (\sigma_1 - \sigma_3) E_{b0} \varepsilon_1 / [\sqrt{3}(\sigma_1 - 2\nu_b \sigma_3)] \quad (35)$$

式中:  $\varepsilon_1$  为岩石微元的轴向应变;  $\varphi$  为岩石的内摩擦角。

将式 (29) 分别代入式 (23)、(25) 可得

$$\frac{k_z}{k_{z0}} = \exp \left\{ -6 \left( \frac{1}{(1-D)E_{b0}} - \left( 1 - \frac{1}{\phi_0} \right) \frac{1}{E_{f0}} \right) \cdot \left[ (1-\nu_b)\Delta\sigma_c - \nu_b\Delta\sigma_a + (2\nu_b-1)\alpha_b\Delta p \right] - \right. \quad (36)$$

$$\left. \frac{2\varepsilon_L}{\phi_0} \left( \frac{F_1 p}{p_L + p} - \frac{F_{10} p}{p_{L0} + p} \right) \right\}$$

$$\frac{k_z}{k_{z0}} = \left\{ 1 - 2 \left( \frac{1}{(1-D)E_{b0}} - \left( 1 - \frac{1}{\phi_0} \right) \frac{1}{E_{f0}} \right) \cdot \left[ (1-\nu_b)\Delta\sigma_c - \nu_b\Delta\sigma_a + (2\nu_b-1)\alpha_b\Delta p \right] - \right. \quad (37)$$

$$\left. \frac{2\varepsilon_L}{3\phi_0} \left( \frac{F_1 p}{p_L + p} - \frac{F_{10} p}{p_{L0} + p} \right) \right\}^3$$

至此, 可得开采扰动下考虑煤体损伤破裂影响的渗透率模型表达式, 式 (36) 为指数型、式 (37) 为立方型。

## 4 模型验证

### 4.1 常规三轴加载渗透试验

文献[26]采用含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流装置对平煤十矿己<sub>15</sub>煤层的深部煤体进行了常规三轴加载渗透试验。试验中, 将原煤试样加载至静水压力 7 MPa 后, 保持围压不变增加轴压至试件破坏, 瓦斯压力始终保持 3 MPa, 测试加载过程中煤体应力和渗透率的变化。结合试验过程, 利用式 (30)~(37) 对渗透率结果进行拟合分析, 拟合所用参数见表 1。

表 1 煤体基本参数列表<sup>[21, 26-27]</sup>  
Table 1 Basic parameters of coal<sup>[21, 26-27]</sup>

煤体弹性模量 $E_{b0}$	裂隙弹性模量 $E_{f0}$	煤体泊松比 $\nu_b$	内摩擦角 $(^\circ)$	孔隙率 $\phi_0 / \%$	Biot 系数 $\alpha_b$	$\varepsilon_L / \%$	$P_L / \text{MPa}$	$F_1$
/ GPa	/ GPa							
2.65	0.70	0.20	28	18.16	1	0.41	2.19	0.4

图 5 为常规三轴加载渗透的试验和拟合结果。通过试验结果曲线可以看出, 煤体的应力-应变试验曲线呈现典型的岩石三轴加载曲线形态。随着加载过程的进行, 煤体轴向应力不断升高, 在轴向应变为 2.41% 时, 偏应力达到最大值 41.13 MPa, 峰后煤体产生应变软化现象, 应力迅速跌落。

在常规三轴加载的全应力-应变过程中, 煤体渗透率出现先降低、后升高的变化规律。根据渗透率-应变试验曲线的变化特征可将渗透率演化过程划分为 3 个阶段 (见图 5): 应力峰值之前划分为前期阶段 (I) 和中期阶段 (II), 应力峰值之后作为后期阶段 (III)。在前期阶段 (I), 偏应力增大造成煤样体积减小, 煤体内部孔裂隙结构压缩闭合导致渗

透率有所降低。在中期阶段(II), 偏应力持续升高, 峰值应力前煤体内部微裂隙不断萌生和发育, 微裂隙的增长和连通引起煤体渗透性的提高。轴向应力达到峰值后, 渗透率变化进入后期阶段(III), 峰值处煤体内宏观裂隙贯通, 渗透率陡然升高。峰后随着轴向应变的增大, 渗透率以较高的增长速率增大。

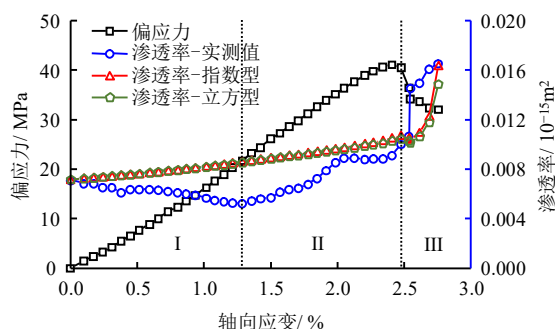


图5 常规三轴加载渗透结果

Fig.5 Permeability results of conventional triaxial compression

对比两种形式渗透率模型的拟合结果可知, 在全应力-应变过程中指数型、立方型的渗透率拟合结果和实测值保持较为一致的变化规律。在峰前阶段(I~II), 两种形式的拟合结果均随着轴向应变的增加而不断升高。尽管试验过程中前期阶段(I)的渗透率有所下降, 但降低幅度较小, 而在中期阶段(II)渗透率有大幅升高。因此, 煤体渗透率在峰前总体保持上升规律, 与拟合结果有相同的变化趋势。在后期阶段(III), 两种形式的渗透率拟合结果均随着应变增大而出现陡然增加的情况, 较为贴近试验结果。在全应力-应变过程中, 指数型的拟合结果在加载后期略高于立方型。在峰值应力处, 渗透率的实测值、指数型和立方型分别为  $0.0091 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 、 $0.0105 \times 10^{-15} \text{ m}^2$  和  $0.0103 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 。总体而言, 本文构建的两种考虑损伤效应的渗透率模型能够较好地反映常规三轴加载过程中煤体渗透率的变化规律。

#### 4.2 开采扰动加卸载下渗透试验

采煤工作面前方的煤体受开采扰动影响, 其各个方向的应力不断进行调整, 前方煤体由原岩应力经历一次轴向加载、环向卸载的过程。谢和平等<sup>[28]</sup>针对扰动后煤体应力状态的变化, 提出了3种典型开采方式下煤体的加卸载应力路径(见图6)。

文献[29]以1 000 m埋深矿井工作面为试验操作背景, 利用自主构建的采动卸压增透试验平台进行了深部煤体开采扰动加卸载下的渗透试验。试验

过程的应力路径基于上述3种典型开采方式(见图6)进行设定, 首先将试样加载至静水压力为25 MPa(O-A段), 之后完成两个卸载阶段, 其中保护层为A-B-C、放顶煤为A-B-D、无煤柱为A-B-E, 加卸载路径的详细描述见文献[28]。3种开采方式下瓦斯压力均设定为2 MPa。根据其试验过程, 采用本文建立的两种渗透率模型对试验结果进行拟合分析, 拟合所用参数见表2。

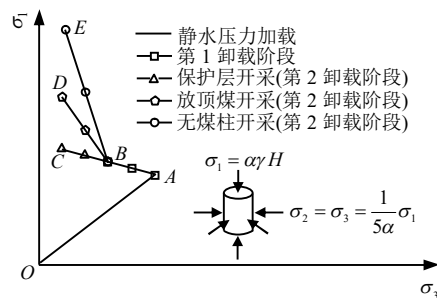


图6 开采扰动下不同开采方式应力路径<sup>[28]</sup>

Fig.6 Stress path of different mining layouts under mining disturbance<sup>[28]</sup>

表2 煤体基本参数列表<sup>[21, 29-31]</sup>

Table 2 Basic parameters of coal<sup>[18, 29-31]</sup>

煤体弹性模量 $E_{b0}$	裂隙弹性模量 $E_{f0}$	煤体泊松比 $\nu_b$	内摩擦角 $\varphi$	孔隙率 $\phi_0$ / %	Biot系数 $\alpha_b$	$\varepsilon_L$ / %	$P_L$ / MPa	$F_1$
/ GPa	/ GPa		/ (°)					
9.75	3.0	0.244	36	2.70~9.50	1	1.172	4.294	0.4

图7中可以看出, 3种开采扰动路径下, 随着加卸载过程的进行, 煤样的轴向应力不断升高、应变增大, 峰值后出现应变软化现象。对比保护层、放顶煤和无煤柱3种开采扰动路径, 峰值应力依次升高, 分别为47.40、51.81、64.85 MPa。与常规三轴加载过程中渗透率先下降后上升的变化规律不同, 随着轴压加载、围压卸载过程的进行, 3种开采方式下的煤体渗透率一致出现先缓慢增大后陡然升高的变化规律。根据渗透率的演化规律, 可将3种开采扰动方式下的煤体渗透率变化过程划分为峰前(I)和峰后(II)两个阶段。煤体首先加载至静水压力25 MPa(A点)后再进行加卸载渗透测试, 因此, 在峰前阶段(I)中, 煤体应力-应变曲线中不存在压密阶段, 渗透率也不会出现下降的趋势。随着加卸载过程的进行, 煤体内原生裂隙扩展, 同时产生新的微裂隙, 渗透率持续缓慢升高。在峰后阶段(II), 裂隙进一步扩展交叉、相互贯通, 开始出现宏观裂隙, 损伤破裂程度骤然增大, 3种开采方式下的煤体渗透率均陡然增加。

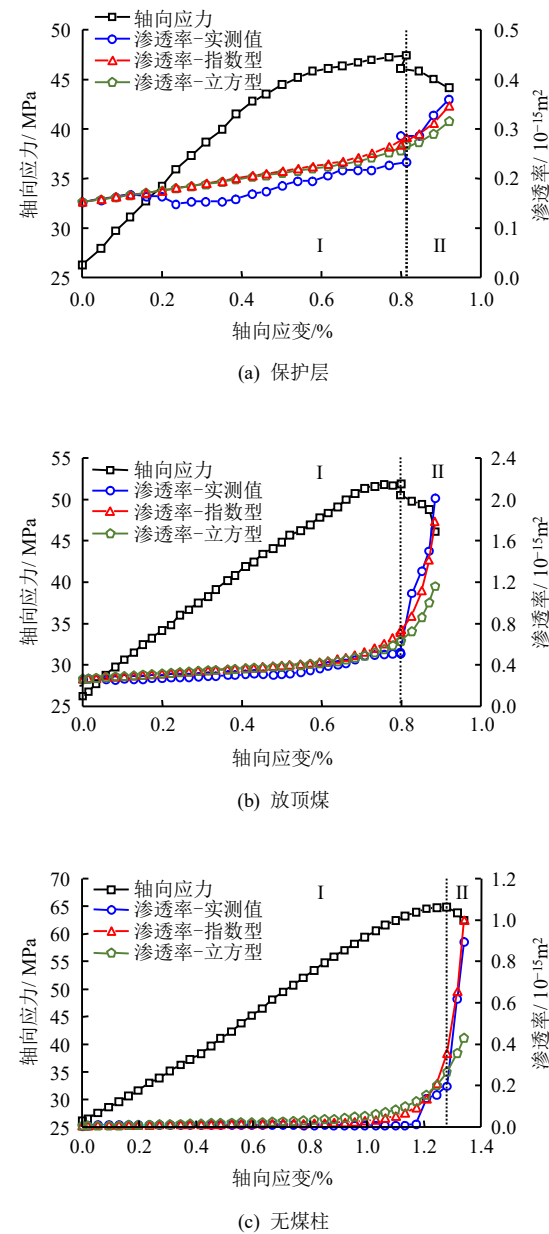


图 7 开采扰动下加卸载渗透试验结果  
Fig.7 Permeability results of loading schemes under mining disturbance

对比分析图 7 中的拟合结果和试验结果可以看出，两种形式的渗透率拟合结果随着轴向应变的增加而升高，与试验结果的升高速率较为一致。在峰前阶段（I），煤体的峰值渗透率相比初始渗透率有小幅提高，实测值、指数型和立方型的结果在保护层方式下增加  $0.079 \times 10^{-15} \text{m}^2$ 、 $0.129 \times 10^{-15} \text{m}^2$ 、 $0.114 \times 10^{-15} \text{m}^2$ ，放顶煤方式下增加  $0.242 \times 10^{-15} \text{m}^2$ 、 $0.326 \times 10^{-15} \text{m}^2$ 、 $0.270 \times 10^{-15} \text{m}^2$ ，无煤柱方式下增加  $0.194 \times 10^{-15} \text{m}^2$ 、 $0.350 \times 10^{-15} \text{m}^2$ 、 $0.260 \times 10^{-15} \text{m}^2$ 。在峰后阶段（II），两种形式的渗透率拟合结果均出现了陡然增加的情况。试验结束点的渗透率相比初始渗透率有大幅提高，实测值、指数型和立方型的

结果在保护层方式下增加  $0.206 \times 10^{-15} \text{m}^2$ 、 $0.193 \times 10^{-15} \text{m}^2$ 、 $0.162 \times 10^{-15} \text{m}^2$ ，放顶煤方式下增加  $1.746 \times 10^{-15} \text{m}^2$ 、 $1.525 \times 10^{-15} \text{m}^2$ 、 $0.896 \times 10^{-15} \text{m}^2$ ，无煤柱方式下增加  $0.891 \times 10^{-15} \text{m}^2$ 、 $0.996 \times 10^{-15} \text{m}^2$ 、 $0.424 \times 10^{-15} \text{m}^2$ 。综合来看，本文构建的两种考虑损伤效应的渗透率模型可以较好地反映开采扰动下煤体渗透率的变化规律。在加卸载后期，指数型的拟合结果略高于立方型的结果，更加接近实测结果。

4.3 气体压力改变下渗透试验

常规三轴加载和开采扰动加卸载下的渗透试验均保持气体压力不变，因而在试验过程中不能考虑吸附解吸作用对煤体渗透率的影响。为了验证本文渗透率模型中的吸附作用项，结合文献[32]的试验结果进行拟合分析，拟合所用参数见表 3。

试验中在原煤试样中通入  $\text{CH}_4$  气体，测试了不同气体压力下的煤体渗透率。气体压力依次设定为 0.30、0.55、1.05、1.55、2.05 MPa，气体压力改变过程中同时改变侧压，进而保持煤体内有效围压不变，即煤体内有效应力保持恒定。有效围压分别为 1.0、2.5、4.0 MPa。

表 3 煤体基本参数列表<sup>[29, 31–33]</sup>  
Table 3 Basic parameters of coal<sup>[29, 31–33]</sup>

煤体弹性 模量 $E_0$	裂隙弹性 模量 $E_{f0}$	煤体 泊松比 $\nu_b$	内摩 擦角 $\phi$ / (°)	孔隙率 $\phi_0$ / %	Biot 系数 $\alpha_b$	$\varepsilon_L$ / %	$P_L$ / MPa	$F_1$
/ GPa	/ GPa							
9.75	3.0	0.244	36	0.527	1	2.44	4.8	0.55

在保持有效围压不变的前提下，随着气体压力的增大煤体渗透率逐渐降低（见图 8），且渗透率降低的速率越来越慢。在气压由 0.30 MPa 升高到 2.05 MPa 的过程中，有效围压为 1.0、2.5、4.0 MPa 的煤体渗透率依次降低了  $0.643 \times 10^{-15} \text{m}^2$ 、 $0.323 \times 10^{-15} \text{m}^2$ 、 $0.182 \times 10^{-15} \text{m}^2$ 。有效围压保持恒定时，煤体内因有效应力作用引起的基质变形保持不变。

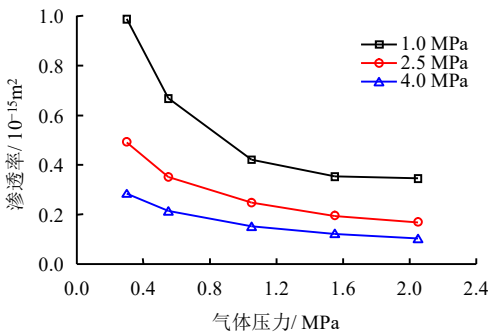


图 8 不同有效围压下渗透率试验结果  
Fig.8 Permeability results under different gas pressures

伴随气体压力的升高,煤体对  $\text{CH}_4$  的吸附量增大,受围压限制,煤体基质向内侧膨胀变形,阻塞裂隙流动通道,煤体渗透率降低。

对比分析气体压力改变下煤体渗透率的拟合结果(见图9)可以看出,有效围压恒定的前提下,两种渗透率模型的拟合结果均随着气体压力增大而减小。气体压力从 0.30 MPa 升高到 2.05 MPa,有效围压分别保持 1.0、2.5、4.0 MPa 的渗透率拟合结果均有所降低。指数型的拟合结果依次降低  $0.698 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 、 $0.347 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 、 $0.201 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ ,立方型的拟合结果依次降低  $0.783 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 、 $0.389 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 、 $0.225 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 。气体压力升高过程中,两个模型的拟合结果都与实测值非常接近,指数型的拟合值始终大于立方型,根据拟合优度可知,指数型结果更加接近实测结果(见表4)。

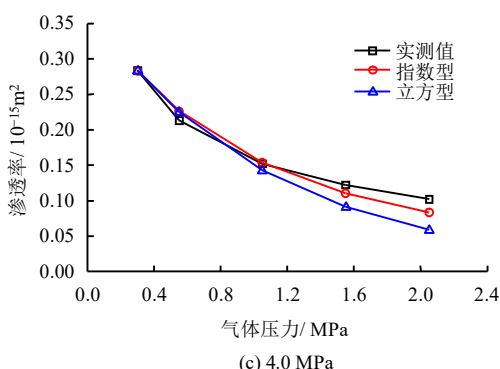
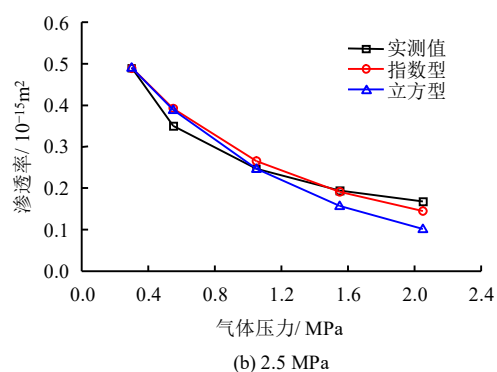
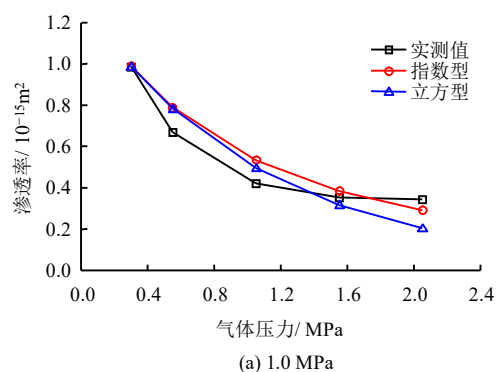


图9 不同气体压力下渗透率拟合结果

Fig.9 Fitted results of permeability

表4 改变气体压力的拟合优度

Table 4 Fitting forms under different gas pressures

类型	有效围压/MPa		
	1.0	2.5	4.0
指数型	0.896	0.961	0.969
立方型	0.869	0.897	0.863

## 5 结 论

(1) 基于三向应力条件下煤体渗透率模型,从裂隙变形和基质弹性模量劣化的角度出发,建立了两种开采扰动下考虑吸附解吸和损伤破裂的深部煤体渗透率演化模型-指数型和立方型。

(2) 常规三轴加载下,煤体渗透率呈现先降低后升高的变化规律,全应力-应变过程中渗透率可划分为前期(I)、中期(II)和后期(III)3个变化阶段,本文构建的两种渗透率模型可以较好地反映其演化过程。

(3) 3种开采扰动加卸载路径下的煤体渗透率变化可划分为峰前(I)和峰后(II)两个阶段,峰前缓慢增加、峰后陡然升高。两种渗透率模型的拟合结果在加卸载全程保持一致的变化规律,而在加、卸载后期,指数型的拟合结果略优于立方型。

(4) 有效围压恒定的条件下,煤体渗透率随着气体压力的升高而减小,两种渗透率模型的拟合结果均可以体现以上变化规律。指数型的拟合结果始终大于立方型,更加贴近实测值。

## 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] 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.  
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.
- [3] 谢和平,高峰,周宏伟,等. 煤与瓦斯共采中煤层增压率理论与模型研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(7): 1101—1108.

- XIE He-ping, GAO Feng, ZHOU Hong-wei, et al. On theoretical and modeling approach to mining enhanced permeability for simultaneous exploitation of coal and gas[J]. **Journal of China Coal Society**, 2013, 38(7): 1101—1108.
- [4] PAN Z J, CONNELL L D. Modelling permeability for coal reservoirs: a review of analytical models and testing data[J]. **International Journal of Coal Geology**, 2012, 92: 1—44.
- [5] 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.
- [6] 元宪寅, 李家卓, 王威. 基于不同方向模量损失率的含瓦斯煤各向异性渗透模型[J]. **岩土力学**, 2018, 39(2): 635—643.
- QI Xian-Yin, LI Jia-zhuo, WANG Wei. An anisotropic permeability model of coal containing methane based on different directional modulus reduction ratios[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(2): 635—643.
- [7] 尹光志, 蒋长宝, 许江, 等. 煤层气储层含水率对煤层气渗流影响的试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2011, 30(增刊 2): 3401—3406.
- YIN Guang-zhi, JIANG Chang-bao, XU Jiang, et al. Experimental study of influences for water content in coalbed gas reservoirs on methane seepage[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(Supp.2): 3401—3406.
- [8] 陈金刚, 徐平, 赖永星, 等. 煤储层渗透率动态变化效应研究[J]. **岩土力学**, 2011, 32(8): 2512—2516.
- CHEN Jin-gang, XU Ping, LAI Yong-xing, et al. Research on dynamic variation effect of coal reservoirs permeability[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(8): 2512—2516.
- [9] CONNELL L D, LU M, PAN Z J. An analytical coal permeability model for triaxial strain and stress conditions[J]. **International Journal of Coal Geology**, 2010, 84(2): 103—114.
- [10] PERERA M S A, RANJITH P G, CHOI S K. Coal cleat permeability for gas movement under triaxial, non-zero lateral strain condition: a theoretical and experimental study[J]. **Fuel**, 2013, 109: 389—399.
- [11] LU S Q, CHENG Y P, LI W. Model development and analysis of the evolution of coal permeability under different boundary conditions[J]. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, 2016, 31: 129—138.
- [12] XIE J, GAO M Z, YU B, et al. Coal permeability model on the effect of gas extraction within effective influence zone[J]. **Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources**, 2015, 1(1—2): 15—27.
- [13] ZHANG N, LI X R, CHENG H M, et al. A coupled damage-hydro-mechanical model for gas drainage in low-permeability coalbeds[J]. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, 2016, 35: 1032—1043.
- [14] JU Y, WANG J G, WANG H J, et al. CO<sub>2</sub> permeability of fractured coal subject to confining pressures and elevated temperature: experiments and modeling[J]. **Science China Technological Sciences**, 2016, 59(12): 1931—1942.
- [15] 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.
- [16] XUE Y, GAO F, LIU X G, et al. Theoretical and numerical simulation of the mining-enhanced permeability model of damaged coal seam[J]. **Geotechnical & Geological Engineering**, 2016, 34(5): 1425—1433.
- [17] XUE Y, GAO F, LIU X G, et al. Permeability and pressure distribution characteristics of the roadway surrounding rock in the damaged zone of an excavation[J]. **International Journal of Mining Science and Technology**, 2017, 27(2): 211—219.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] ZANG J, WANG K, ZHAO Y X. Evaluation of gas sorption-induced internal swelling in coal[J]. **Fuel**, 2015, 143: 165—172.
- [21] WANG K, ZANG J, WANG G D, et al. Anisotropic permeability evolution of coal with effective stress variation and gas sorption: model development and analysis[J]. **International Journal of Coal Geology**, 2014, 130(4): 53—65.
- [22] LIU J S, ELSWORTH D. Three-dimensional effects of hydraulic conductivity enhancement and desaturation around mined panels[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1997, 34(8): 1139—1152.
- [23] ZHANG J C, ROEGIER J C, SPETZLER H A. Influence of stress on permeability around a borehole in fractured porous media[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(3): 496—501.
- [24] 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.
- [25] 杨明辉, 赵明华, 曹文贵. 岩石损伤软化统计本构模型参数的确定方法[J]. **水利学报**, 2005, 36(3): 345—349.
- YANG Ming-hui, ZHAO Ming-hua, CAO Wen-gui. Method for determining the parameters of statistical damage softening constitutive model for rock[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2005, 36(3): 345—349.
- [26] 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.
- [27] 袁镭. 中高煤级煤孔隙结构特征及其主控因素[D]. 焦作: 河南理工大学, 2014.
- YUAN Lei. Research on the pore structure of the middle and high rank coal and its controlling factors[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2014.
- [28] 谢和平, 周宏伟, 刘建锋, 等. 不同开采条件下采动力学行为研究[J]. **煤炭学报**, 2011, 36(7): 1067—1074.
- XIE He-ping, ZHOU Hong-wei, LIU Jian-feng, et al. Mining-induced mechanical behavior in coal seams under different mining layouts[J]. **Journal of China Coal Society**, 2011, 36(7): 1067—1074.
- [29] 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.
- [30] 朱红青, 刘星魁. 采空区非间隔性注氮防火效果及施工参数[J]. **辽宁工程技术大学学报(自然科学版)**, 2011, 30(5): 706—712.
- ZHU Hong-qing, LIU Xing-kui. Fire prevention effects and construction parameters of continuous nitrogen injection in gob area[J]. **Journal of Liaoning Technical University(Natural Science)**, 2011, 30(5): 706—712.
- [31] 薛东杰, 周宏伟, 王子辉, 等. 不同加载速率下煤岩采动力学响应及破坏机制[J]. **煤炭学报**, 2016, 41(3): 595—602.
- XUE Dong-jie, ZHOU Hong-wei, WANG Zi-hui, et al. Failure mechanism and mining-induced mechanical properties of coal under different loading rates[J]. **Journal of China Coal Society**, 2016, 41(3): 595—602.
- [32] 许江, 曹偲, 李波波, 等. 煤岩渗透率对孔隙压力变化响应规律的试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2013, 32(2): 225—230.
- XU Jiang, CAO Jie, LI Bo-bo, et al. Experimental research on response law of permeability of coal to pore pressure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(2): 225—230.
- [33] MAZUMDER S, SIEMONS N, WOLF K H. Differential swelling and permeability change of coal in response to CO<sub>2</sub> injection for enhanced coalbed methane[J]. **International Journal of Coal Geology**, 2008, 74(2): 123—138.