

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.0753

加卸载应力作用下煤岩渗透率演化模型研究

蒋长宝¹, 余 塘¹, 魏文辉², 段敏克^{1,3}, 杨 阳¹, 魏 财¹

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400030; 2. 鄂尔多斯市营盘壕煤炭有限公司, 内蒙古 乌审旗 017300;
3. 安徽理工大学 深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 为研究开采过程中煤岩力学行为及渗透率演化规律, 运用含瓦斯煤热-流-固耦合渗流伺服试验系统, 进行了不同加卸载条件下原煤力学及渗流试验, 分析了加卸载应力作用对煤岩变形及渗流规律的影响, 得到了剪胀角随塑性剪切应变的变化关系, 发现了塑性剪切应变在1.6%左右会出现剪胀角急剧变化的现象。根据试验现象和结果, 考虑煤岩结构对渗透率的影响, 对煤岩在弹性阶段和屈服损伤后的结构进行简化, 基于火柴棍模型及渗流理论分析, 从应变的角度出发, 探讨了加卸载应力对煤岩渗透率的影响, 建立了两个不同阶段的渗透率模型 (即弹性阶段和损伤阶段), 基于不同阶段的渗透率模型和剪胀角规律, 构建了煤岩全过程渗透率模型。所构建的渗透率模型与试验结果对比吻合效果较好, 验证了该模型的适用性, 可以为实现煤与瓦斯共采提供一定的理论依据。

关 键 词: 原煤; 剪胀角; 加卸载; 渗透率模型

中图分类号: TD323

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 增刊 1-0013-10

Permeability evolution model of coal under loading and unloading stresses

JIANG Chang-bao¹, YU Tang¹, WEI Wen-hui², DUAN Min-ke^{1,3}, YANG Yang¹, WEI Cai¹

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. Ordos Yingpanhao Coal Co., Ltd., Uxin Banner, Inner Mongolia 017300, China; 3. State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: In order to study the mechanical behavior and permeability evolution law of coal in mining process, the mechanical and seepage experiments on raw coal under different loading and unloading conditions were carried out by using self-made thermal-hydro-mechanical (THM) coupling seepage servo testing system for gassy coal. The influence of loading and unloading stresses on coal deformation and seepage was analyzed and discussed. The relationship between dilatancy angle and plastic shear strain was obtained, and it was found that the dilatation angle changes sharply when the plastic shear strain is about 1.6%. According to the experimental phenomena and results, the structures of coal in elastic stage and yield damage stage were simplified by considering the influence of coal structure on permeability. Based on match stick model and seepage theory analysis, the influence of loading and unloading stresses on coal permeability was discussed from the perspective of strain, and two permeability models (i.e. in the elastic stage and damage stage) were established. Based on the permeability models in different stages and dilatancy angle law, the whole process of permeability model of coal was constructed. The permeability model constructed in this paper is in good agreement with the experimental results, which verifies the applicability of the expression and provides insights for the realization of coal and gas simultaneous extraction.

Keywords: coal; dilatancy angle; loading-unloading; permeability model

1 引 言

由于煤矿开挖等工程扰动使得煤岩应力场重

分布, 应力场的变化引起了煤岩孔裂隙场的变化, 从而引起了渗流场的变化, 如不提前做好瓦斯抽采和及时进行支护极易引发煤与瓦斯突出。此外, 瓦

收稿日期: 2020-06-03

修回日期: 2021-03-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.52074044, No.51674048); 重庆市留创计划创新类资助项目 (No.cx2020112)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(52074044, 51674048) and the Entrepreneurship & Innovation Support Program for Chongqing Overseas Returnees(cx2020112).

第一作者简介: 蒋长宝, 男, 1982 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事采矿工程方面的研究工作。E-mail: jcb@cqu.edu.cn

通讯作者: 段敏克, 男, 1990 年生, 博士, 讲师, 主要从事采矿工程方面的研究工作。E-mail: duanminke@aust.edu.cn

斯气体是一种温室气体,其温室效应是二氧化碳的 20 倍,同时其也是一种高效的清洁能源^[1]。因此,对掌握煤层瓦斯气体在采动应力作用下的渗流演化规律,尤其是煤岩损伤破裂后的演化规律^[2],对防治瓦斯灾害、加强瓦斯抽采利用、减少温室气体排放具有重要的现实意义。

现有的大多煤岩渗透率模型的建立都是以煤层气储层抽采为背景^[3-5],在弹性范围内建立渗透率与应力或应变的关系,不涉及煤岩损伤破裂所引起的渗透率的变化。在实际开采条件下,由于开采扰动引起工作面附近地应力重新分布,进而导致煤岩的变形与破坏,并引起开采影响范围内煤岩裂隙网络的萌生、扩展和贯穿,渗透率迅速增大至原始渗透率的数十倍,甚至上百倍^[6-7],基于弹性应变建立的煤岩渗透率模型不适用于描述破断后煤岩的渗透率变化。针对这一情况,部分学者开展了对破裂煤岩渗透率变化规律的研究。Hu 等^[8]基于力学和细观损伤力学,建立了细观裂纹的扩展和损伤演化控制方程,揭示了细观裂纹扩展损伤与宏观力学特性的关系,建立了破裂煤岩本构关系的宏观细观数值模型和计算方法。Simpson 等^[9]研究了压剪作用下裂纹扩展的长度和平均裂纹张开量,提出了预测岩石应力诱发微破裂渗透率增强的解析表达式,但没有考虑裂纹之间的相互作用。Zhang 等^[10]采用断裂力学的方法,基于裂纹扩展,以煤岩的泊松比及弹性模量等力学参数为变量,建立了采动影响下煤岩的渗透率模型,但该模型不能反映煤岩破断后的渗透率变化规律。此外,薛熠^[11]、徐涛^[12]等针对适用于弹性应变的渗透率模型,通过直接增加影响系数或损伤变量来反映煤岩损伤阶段渗透率的变化,尽管此类模型在渗透率数值表现上与实际渗透率具有相似性,但不能反映煤岩峰后渗透率变化与损伤变量之间的内在联系,并且也不能描述煤岩峰前屈服阶段渗透率的变化规律。荣腾龙等^[13]以三维应力作用下煤的渗透率模型为基础,从煤岩损伤破裂引起煤基质弹性模量劣化这一角度出发,建立了煤岩损伤破裂情况下的渗透率模型。Chen^[14]、Zhang^[15]等通过拟合的方法得到了渗透率与应力的关系。Zhang 等^[16]和魏明尧等^[17]以体积应变为变量,建立了相应的煤岩损伤渗透率表达式。Zheng 等^[18]以最大拉应变和最大压应变来判定煤岩损伤,从而建立了煤岩的渗透率损伤模型。王路军等^[19]假设所有可能渗透网络中真实渗透网络是最优演化形式,以渗透率、体积应变为变量建立泛函关系,得到了体积应变表

示的渗透率表达式。霍丙杰等^[20]通过相似模拟试验得到渗透率与体积应变的关系。

总体而言,现有的煤岩在应力作用下的渗透率模型,一方面在弹性变形阶段大多将煤岩看成各向同性,将裂隙的变形归结为有效应力的作用,而未考虑煤岩自身结构,未能体现裂隙对不同主应力方向的敏感性;另一方面对于煤岩损伤破裂方面的渗透率模型研究相对较少,并且已有的模型也未能揭示应力和损伤对渗透率影响。基于此,笔者拟通过加卸载试验分析煤样变形及渗流变化规律,基于试验数据和理论分析,考虑侧向应力对裂隙的影响,探讨在弹性范围内采动应力作用下煤岩渗透率的变化规律。最后研究煤样剪胀角随塑性剪应变及围压变化而变化的关系,建立剪胀角与裂隙开度之间的联系,探讨煤岩屈服损伤后渗透率与应力的关系表达式。

2 试验设备及方案

2.1 试验样品及装置

本试验所用原煤煤样取自川煤集团芙蓉公司某煤矿,首先采用钻头钻取原煤,然后在切割机和磨床上打磨制备成尺寸为 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的标准试样,并保证其平整度在 0.02 mm 以内,最后将其放入干燥箱烘干,冷却后用保鲜膜包好备用。在试验前对煤样进行筛选,对煤样的外观尺寸、密度进行测量。选取 12 个外观尺寸、密度相近的原煤试样,将其分为 4 组,分别标号为 A 组、B 组、C 组和 D 组,如图 1 所示。为了克服原煤本身的离散性对试验结果的影响,每组样品选取测试结果处于中间的样品进行分析,以期能得出普适性的规律(如选取 A 组 a 煤样分析)。

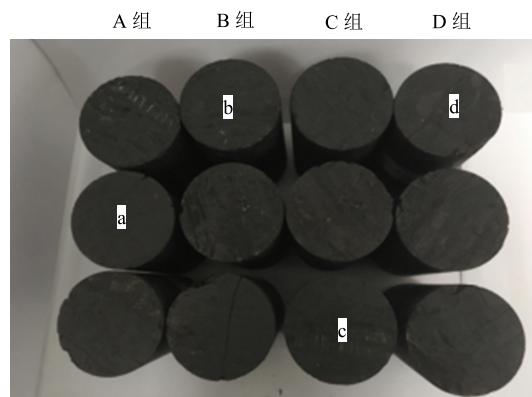


图 1 煤样试件图

Fig.1 Prepared coal samples

本试验采用重庆大学自主研制的含瓦斯煤热

流固耦合三轴伺服渗透试验装置^[21-22]进行试验。如图 2 所示, 该试验装置主要由伺服加卸载系统、三轴压力室、气体压力控制系统、水域恒温系统、试验控制及数据采集系统和附属装置等部分组成。轴向压力可采用位移、应力两种控制方式, 而围压只能使用应力控制。该试验装置的最大轴向压力可加载到 200 kN, 最大围压可加载到 10 MPa, 水浴温度最大可加热到 100 °C, 试验过程中数据采集系统可同步采集轴压、围压、进气口压力、出气口压力、轴向变形、径向变形、试验温度及气体瞬时流量值等数据。该试验装置可以开展煤岩在不同地应力场 (不同轴向应力、不同围压)、不同气体压力和不同温度场作用下的力学及渗流试验。

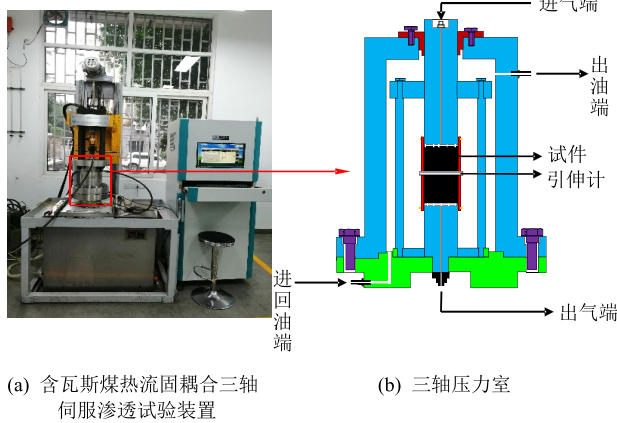


图 2 试验装置
Fig.2 Experimental equipment

2.2 试验方案

本试验为模拟煤矿井下开挖, 采用增加轴向压力、减小侧向应力的方式反映应力的变化, 通过施加瓦斯并测量其流量的变化来反映其渗流演化规律。具体试验步骤如下: ①以 0.05 MPa/s 的速率同时施加轴压和围压至静水压力 $\sigma_1 = \sigma_3$; ②保持静水压力不变, 抽真空后关闭出气阀, 打开进气阀通入瓦斯气体, 调节瓦斯进气口压力至方案预定数值, 保持压力不变进行吸附; ③当进气端与出气端瓦斯保持相等且不变时瓦斯吸附达到平衡, 然后打开出气阀, 待气体流量稳定, 之后以 0.05 MPa/s 的速度加载轴向压力至目标值 (图 3 中 AB 段, 具体可见表 1), 达到加载目标值后继续以 0.05 MPa/s 的速度加载轴向压力 (图 3 中 BC 段), 同时以 0.01 MPa/s 的速度卸载围压至 2 MPa (为保证试验的安全性, 围压值不小于瓦斯压力), 煤样失稳以后, 切换为位移控制以 0.1 mm/min 的速率继续加载。试验过程中实时记录瓦斯流量的变化情况。

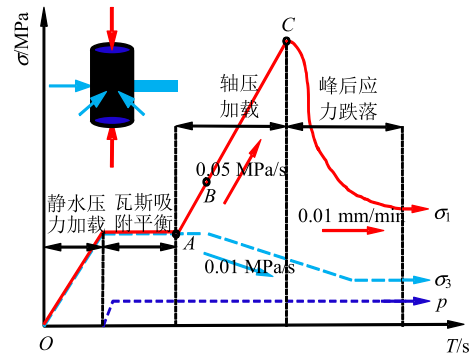


图 3 试验方案及加载路径图
Fig.3 Experimental scheme and loading path

表 1 煤样试验结果

Table 1 Experimental results of coal samples

编号	初始 围压 /MPa	气体 压力 /MPa	目标 轴压 /MPa	轴向峰 值应力 /MPa	破坏 围压 /MPa	峰值应变值		
						轴向应 变/%	径向应 变/%	体积应 变/%
a	6	1	15	21.43	3.16	1.025	-0.240	0.546
b	7	1	15	30.21	3.94	1.202	-0.385	0.563
c	7	1	20	33.35	4.46	1.288	-0.277	0.733
d	7	2	20	32.14	4.52	1.166	-0.264	0.637

3 试验结果及分析

3.1 应力-应变-渗透率曲线

假设煤岩体中瓦斯气体渗流符合达西定律, 则可得渗透率 k 的计算公式为^[22-23]

$$k = \frac{2Q\mu p_a L}{A(p_1^2 - p_2^2)} \quad (1)$$

式中: k 为甲烷有效渗透率 (m^2); Q 为甲烷的渗流流量 (m^3/s); p_a 为标准大气压力 (Pa); μ 为甲烷的动力黏度系数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$); L 为煤样试件高度 (m); p_1 为煤样试件进口瓦压力 (Pa); p_2 为煤样试件出口瓦斯压 (Pa); A 为煤样试件渗透有效面积 (m^2).

从图 4 中可以看出, 4 组试验的偏应力-应变-渗透率曲线表现出类似的规律, 渗透率的变化随轴向应变的变化均表现为“V”型: ①首先随着偏应力的不断增加, 渗透率快速下降, 随着原煤试样被不断压实, 到此阶段后期煤样渗透率基本保持不变, 但是其并未降为 0, 说明在煤样内部的裂隙在荷载作用下并未完全压密, 仍然保留着瓦斯渗流的通道; ②由于微裂隙扩展发育使得裂隙间的相互贯通, 煤样产生的应力-应变曲线表现为非线性变化, 同时煤样渗透率出现小幅度的上升; ③达到峰值强度后, 煤样内部裂隙进一步发育, 其承载能力降低, 同时存在煤样的渗透率突增滞后于煤样损伤破坏的现

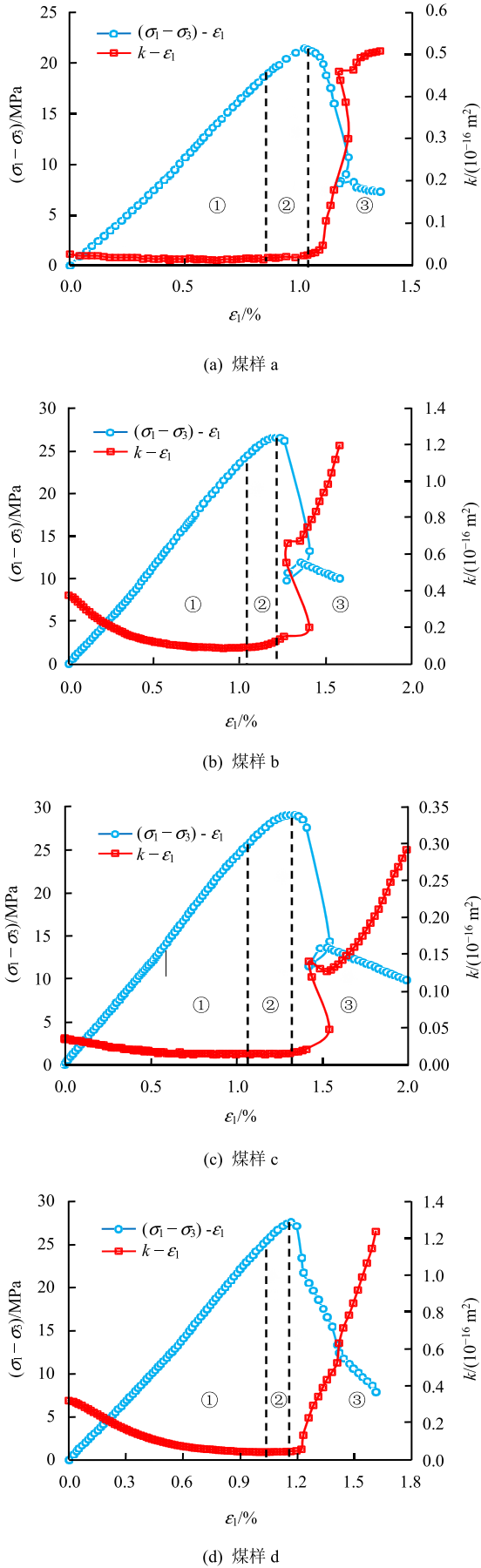


图4 煤样偏应力-应变、渗透率变化曲线

Fig.4 Stress-axial strain and permeability-axial strain curves of coal samples

象。这是由于煤样由局部破裂向整体贯通的过程中, 尽管此时损伤产生的裂隙数量在猛增, 但并未全部连通形成有效的渗流通道; 煤样在整体破断贯通之后, 形成较大的贯通裂隙, 大量瓦斯沿该贯通裂隙涌出, 出现渗透率急剧陡增的现象。由此可见, 煤样渗透率的变化与煤岩裂隙结构的变化有关。

3.2 加卸载条件下煤样的扩容特征

如图5所示, 从破坏形式上看, 煤样破坏以剪切破坏为主, 煤样破坏角度与水平应力方向呈 62° 左右, 主裂隙面周围存在由张拉应力引起的二次裂隙。由于剪切和压缩作用裂隙面内较为破碎, 其内部存在大量煤粉和较粗的煤颗粒, 煤样破坏时围压越小, 煤样越破碎。

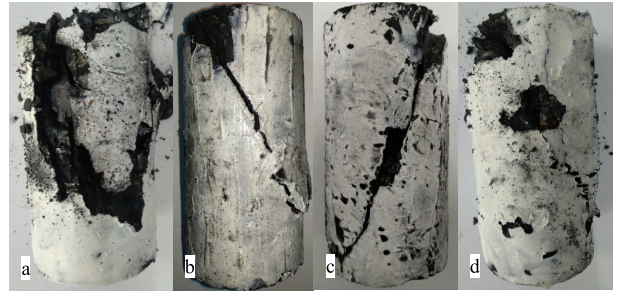


图5 煤样破坏形态

Fig.5 Failure form of coal samples

压缩破坏过程中的体积膨胀是岩石普遍的特性^[24]。在塑性理论中, 通常用剪胀角 ψ 来表征非弹性体积变化, Vermeer 等^[25]推导的剪胀角估算式为

$$\sin \psi = \frac{\dot{\epsilon}_1^p + 2\dot{\epsilon}_3^p}{-\dot{\epsilon}_1^p + 2\dot{\epsilon}_3^p} \quad (2)$$

式中: $\dot{\epsilon}_1^p$ 为轴向塑性应变率; $\dot{\epsilon}_3^p$ 为径向塑性应变率。

剪胀角的具体计算可根据文献[26]给出的方法, 以塑性剪切应变 $\gamma^p = \epsilon_1^p - \epsilon_2^p$ 作为塑性参数, ϵ_1^p 、 ϵ_2^p 分别为轴向、径向塑性应变。结合式(2)可以得到煤样产生屈服损伤后剪胀角的变化曲线。在常规加载条件下, 煤岩剪胀角的变化通常表现为经历较小的塑性剪切应变后达到峰值, 而后随着塑性剪切应变的增加逐渐减小至某一恒定值。而在加卸载条件下, 如图6所示, 剪胀角变化与常规加载下存在差异, 这是由于煤样破坏后继续卸载围压所导致的; 图6(a)~6(c)均在 γ^p 为 1.6% 左右出现剪胀角急剧变化的现象, 这是由于煤样突然破坏, 试验设备为提供设定的围压瞬间进行响应引起的剧烈震荡, 对煤样的变形产生影响, 使得该处计算得到的剪胀角陡降而出现奇异。但从整体上看, 4 个煤样的剪

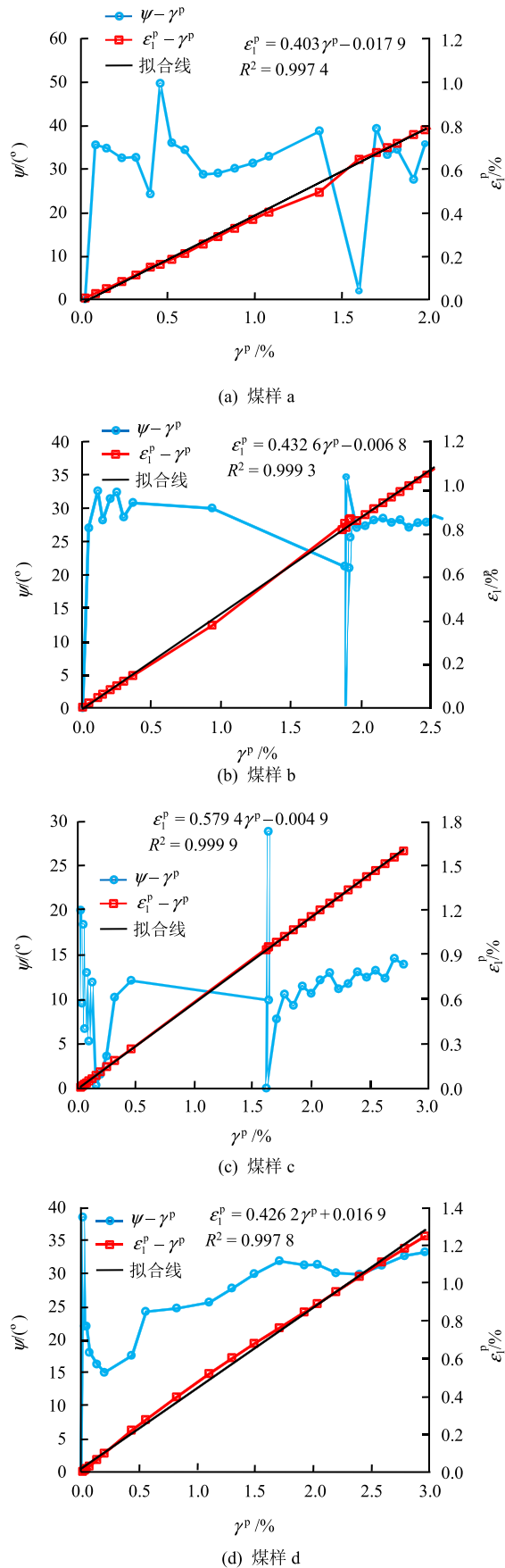


图 6 剪胀角及轴向塑性应变随塑性剪应变变化曲线
Fig.6 Curves of dilatancy angle and axial plastic strain versus plastic shear strain

胀角随塑性剪应变的变化在某一恒定值内上下波动，剪胀角基本保持稳定。因此，可将煤样从产生屈服损伤后一直至残余阶段过程中的剪胀角看成常数来进行计算。

但从整体上看，图 6(a)~6(d) 4 个煤样的剪胀角随塑性剪应变的变化在某一恒定值内上下波动，剪胀角基本保持稳定。因此，可将煤样从产生屈服损伤后一直至残余阶段过程中的剪胀角看成常数来进行计算。为进一步反映岩石的扩容特性，文献[27]提出扩容指标，但从实质上看，扩容指标最终反映的是塑性径向应变随轴向塑性应变的变化关系。如图 6 所示，轴向塑性应变与塑性剪切应变近似呈线性增加，这表明轴向塑性应变与径向塑性应变存在类似的关系，即

$$\varepsilon_3^p = -\lambda \varepsilon_1^p \quad (3)$$

式中： λ 为轴径向塑性应变比率。

将式 (3) 代入式 (2) 可得到剪胀角随 λ 的变化关系，即

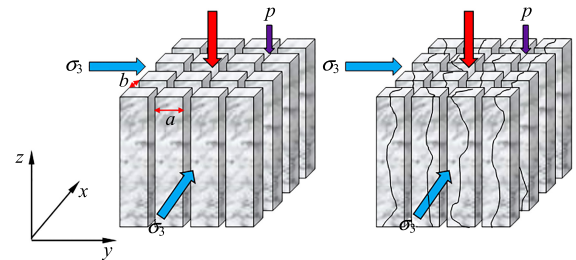
$$\psi = \arcsin \left(\frac{2\lambda - 1}{1 + 2\lambda} \right) \quad (4)$$

由式 (4) 可以看出 λ 的大小可在一定程度上反映煤样扩容行为， λ 值越大，煤样扩容越明显； λ 值趋于 0.5 时，扩容为 0，此时煤样体积不再随轴向应变的变化而变化。

4 理论分析

4.1 基本假设

在建立煤岩渗流与应力的关系表达式前，考虑在不同受力阶段煤岩结构会发生改变，从而造成其渗透率具有不同变化过程，对煤岩弹性阶段与破裂损伤后的结构进行简化如图 7 所示。图中， a 为煤基质单元体边长， b 为裂隙宽度， p 为孔隙压力。推导过程基于以下基本假设：



(a) 弹性阶段煤体结构简化模型 (b) 损伤后煤体结构简化模型

图 7 煤岩弹性阶段及破裂损伤后结构简化示意图
Fig.7 Simplified structure diagram of coal in elastic stage and after fracture damage

(1) 气体仅沿着 z 轴方向渗流。

(2) 煤岩由其骨架及割理、裂隙组成，煤岩内部割理、裂隙均匀分布，基质块之间由岩桥连接。煤岩基质内孔隙不存在气体流动，即气体的运移只发生在裂隙中。

(3) 试验过程中气体压力和温度均保持不变，仅考虑等温吸附饱和状态下煤岩的渗流过程。

4.2 加卸载条件下煤样渗透率演化分析

在对裂隙变形的分析之前，按照岩石力学的规定，定义裂隙压缩为正，拉伸为负。

如图 8 所示，加卸载条件下，在弹性阶段煤岩渗透率受轴压 σ_1 和围压 σ_3 作用共同影响，表现为轴压加载引起的煤岩骨架变形与围压卸载引起的煤岩裂隙变形之间的相互竞争关系。

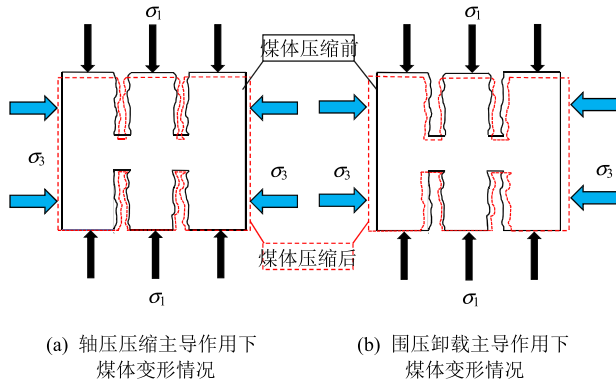


图 8 加卸载条件下煤岩变形
Fig.8 Deformation of coal under loading-unloading conditions

首先分析由一条裂隙与一个煤岩基质岩块所组成的单元在应力作用下的变形情况。在法向应力作用下，裂隙开度的变化量 Δb 满足^[28]：

$$\Delta b = b_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{\sigma_n}{E_b}\right) \right] \quad (5)$$

式中： b_0 为裂隙初始开度 (m)； σ_n 为裂隙所受法向应力 (MPa)； E_b 为裂隙的弹性模量 (MPa)。

根据式(5)可以得到裂隙开度 b 与法向应力 σ_n 的关系：

$$b = b_0 \exp\left(-\frac{\sigma_n}{E_b}\right) = b_0 \exp(-\varepsilon_n) \quad (6)$$

式中： ε_n 为法向应力作用下煤岩裂隙的法向变形。

在煤岩恒定围压三轴压缩试验中，其弹性阶段均表现为随轴向应力的加载，其径向变形增加而渗透率降低。这说明在轴向应力作用下煤岩骨架的膨胀变形一部分用于向外膨胀，表现为煤岩的变形，

另一部分向裂隙方向膨胀挤压裂隙从而引起裂隙开度减小。可以认为煤岩骨架变形对裂隙的影响类似于煤岩内瓦斯在吸附解吸过程中存在的内膨胀现象^[29]，即存在影响系数 $\alpha \in (0, 1)$ 使得部分煤岩骨架变形对裂隙变形产生影响。则有

$$\Delta b_s = a_0 \frac{-\alpha \nu_s (\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_3)}{E_s} \quad (7)$$

式中： $\Delta \sigma_1$ 和 $\Delta \sigma_3$ 为煤岩所受两个侧向应力 (MPa)； Δb_s 为煤岩骨架向内膨胀的宽度变化量 (m)； a_0 为煤岩骨架的初始宽度 (m)； ν_s 为煤岩骨架的泊松比； E_s 为煤岩骨架的弹性模量 (MPa)。

文献[30]的研究表明，煤样的透气性随轴压和围压的增加均呈负指数关系变化，这说明侧向应力对煤岩裂隙变形的影响与法向应力作用机制相同，则侧向应力作用下煤岩的开度为

$$b = b_0 \exp(-\varepsilon_s) \quad (8)$$

式中： ε_s 为侧向应力作用引起的煤岩裂隙法向变形，可以表示为

$$\Delta \varepsilon_s = \frac{\Delta b_s}{b_0} = \frac{-a_0 \alpha \nu_s (\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_3)}{b_0 E_s} \quad (9)$$

式中： $\Delta \varepsilon_s$ 为侧向应力作用引起的煤岩裂隙法向应变。

根据孔隙率的定义，可以得到裂隙单元孔隙率与裂隙开度的关系：

$$\phi'_0 = \frac{b_0}{a_0} \quad (10)$$

式中： ϕ'_0 为裂隙单元的初始孔隙率。

由于在应力作用下 a_0 的变化很小可看成恒定值，可得围压与轴压共同作用下裂隙单元的孔隙率 ϕ' 为

$$\phi' = \phi'_0 \exp(-\varepsilon_n - \varepsilon_s) \quad (11)$$

根据文献[31]的研究，煤岩某一方向的面孔隙率为两组裂隙的面孔隙率之和，且裂隙的面孔隙率只与裂隙开度和裂隙间距有关，而与其方向及单元数量无关。对于图 7 所示的裂隙系统孔隙率 ϕ 可表示为

$$\phi = \phi_x + \phi_y \quad (12)$$

式中： ϕ_x 、 ϕ_y 分别为 x 和 y 方向裂隙孔隙率。

渗透率与裂隙孔隙率之间的关系满足^[2]：

$$\frac{k}{k_0} = \left(\frac{\phi}{\phi_0} \right)^3 \quad (13)$$

式中： k_0 为煤样的初始渗透率 (m^2)。根据孔隙率的定义可得

$$\phi_0 = 2\phi'_0 = \frac{2b_0}{a_0} \quad (14)$$

在本试验中 $\sigma_n = \sigma_3$, $\phi_x = \phi_y = \phi'$, 可得在弹性阶段内煤岩渗透率与应力的关系为

$$k = k_0 \exp \left\{ -3 \left[\frac{\Delta\sigma_3}{E_b} + 2\alpha \frac{v_s}{\phi_0 E_s} (\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_3) \right] \right\} \quad (15)$$

煤样在屈服损伤后, 次生裂隙之间相互连通、汇集, 产生新的渗流通道。损伤所产生裂隙开度与塑性体积应变有关, 结合文献[32]的研究可得两者的关系为

$$b_p = \varepsilon_v^p \frac{b_0}{\phi_0} \quad (16)$$

式中： b_p 为屈服损伤所产生的裂隙开度 (m); ε_v^p 为煤样塑性体积应变。

煤样塑性体积应变并非全部转化为实际有效的裂隙开度, 引入一个系数 β 来表征煤样损伤产生的塑性体积应变与实际的裂隙开度之间的关系:

$$b_p = \beta \varepsilon_v^p \frac{b_0}{\phi_0} \quad (17)$$

结合式 (13)、(15)、(17) 可得到屈服损伤后煤样渗透率的变化可表示为

$$k = k_0 \left\{ \exp \left\{ -2 \left[\frac{\Delta\sigma_3}{E_b} + \alpha \frac{v_s}{\phi_0 E_s} (\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_3) \right] \right\} + \beta \frac{\varepsilon_v^p}{\phi_0} \right\}^3 \quad (18)$$

剪胀作用下塑性体积应变率 $\dot{\varepsilon}_v^p$ 与塑性剪切应变率 $\dot{\gamma}^p$ 存在如下关系^[24]:

$$\dot{\varepsilon}_v^p = \dot{\gamma}^p \sin \psi \quad (19)$$

对式 (19) 进行积分可得

$$\varepsilon_v^p = \int_0^{\gamma^p} \sin \psi d\gamma^p \quad (20)$$

由上述的试验结果可知, 在加卸载条件下塑性剪应变与轴向塑性应变近似呈直线关系, 剪胀角也近似保持不变, 可以用一个恒定值表示, 则式 (20) 可写为

$$\varepsilon_v^p = \sin \psi \cdot (1 + \lambda) \varepsilon_1^p \quad (21)$$

文献[33-34]对于岩石弹塑性-损伤耦合的应力-

应变关系的解析解问题进行了研究, 给出了应力与塑性变形及损伤之间的关系, 在此对其关系进行修改, 可得

$$\sigma_1 - \sigma_3 + K = \sqrt{R(d)} \quad (22)$$

式中： K 为影响煤样变形的参数； d 为损伤变量, 在煤样峰值偏应力处的损伤变量 d_c 为 1; $R(d)$ 为当前煤样抵抗损伤演化的强度, 其中 d 与 $R(d)$ 的关系可以表示为

$$R(d) = \frac{2d}{1+d^2} \quad (23)$$

轴向塑性应变与 d 和 $R(d)$ 的关系为

$$\varepsilon_1^p = \eta d \sqrt{R(d)} \quad (24)$$

式中： η 为常数。

结合式 (22) ~ (24), 即可得到应力与轴向塑性变形之间的关系。

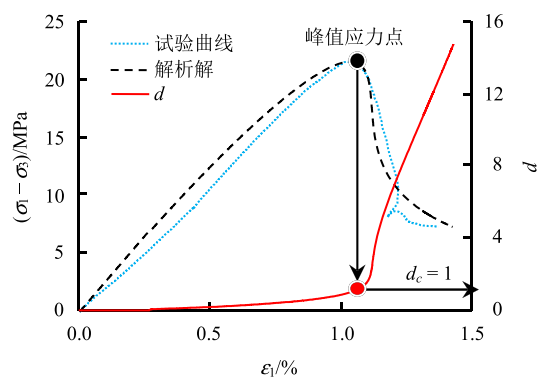
图 9 为解析解计算的应力-应变曲线与试验应力-应变曲线的对比。可以看出解析解得到的应力-应变曲线与试验所得到的应力-应变曲线较为吻合, 采用文献[33-34]解析解的方法来计算轴向塑性变形是可行的。

结合式 (18)、(21)、(24), 可得煤样在整个加卸载过程中基于应力表示的渗透率表达式:

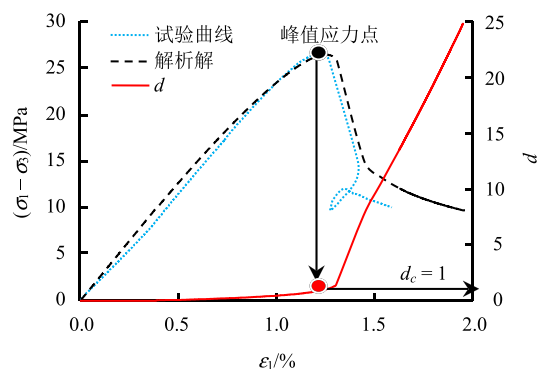
$$k = k_0 \left\{ \exp \left\{ -2 \left[\frac{\Delta\sigma_3}{E_b} + \alpha \frac{v_s}{\phi_0 E_s} (\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_3) \right] \right\} + \frac{\eta \beta}{\phi_0} \sin \psi (1 + \lambda) d \sqrt{R(d)} \right\}^3 \quad (25)$$

4.3 渗透率模型验证

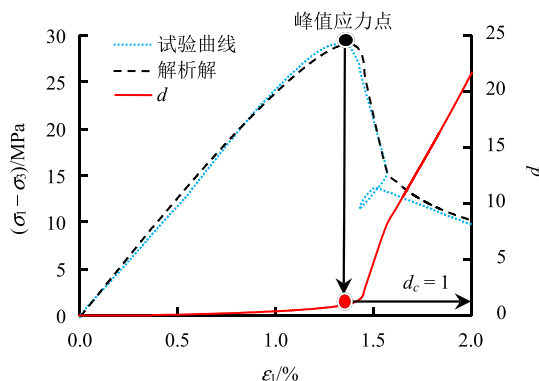
煤样的试验参数如表 2 所示, 其中 α 、 β 通过试验数据拟合得到, 采用式 (25) 对煤样渗透率进行计算。以偏应力为变量进行计算值与试验值的对比, 计算结果如图 10 所示。根据图 10, 由于在峰前解析解计算得到的轴向塑性应变大于实际的值, 从而煤样 a 和 d, 表现出计算的渗透率略大于试验值; 对煤样 b, 由于其在 20 MPa 时已达到渗透率最小值, 计算值仍然考虑了应力对渗透率的影响, 从而在峰前计算值略小于试验值。从整体上看, 本文建立的模型计算值与试验数据基本吻合, 能够较好地反映煤样渗透率随偏应力变化的过程, 说明本文建立的模型的合理性与正确性。



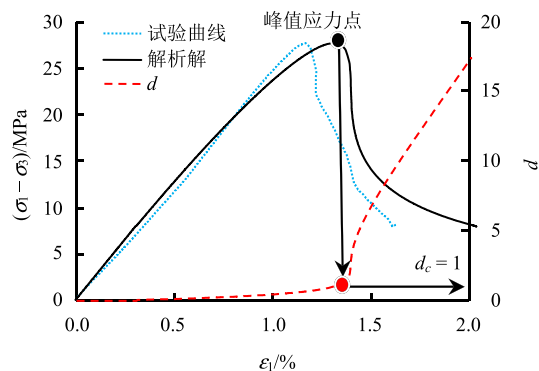
(a) 煤样 a



(b) 煤样 b



(c) 煤样 c



(d) 煤样 d

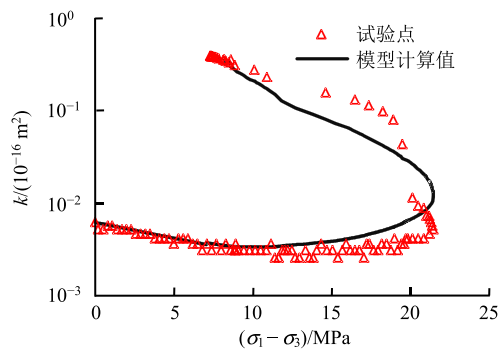
图 9 应力-应变曲线的解析解和试验值对比及对应的损伤变化曲线

Fig.9 Comparison between analytical solution of stress-strain curves and test values and corresponding damage change curves

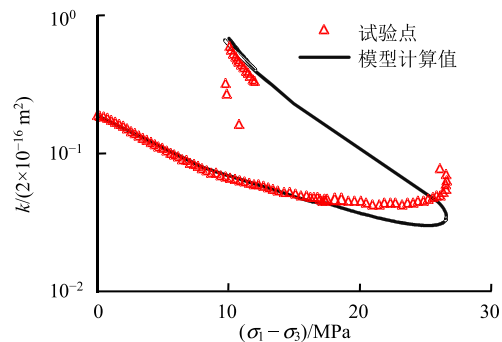
表 2 煤样主要试验参数

Table 2 Main test parameters of coal samples

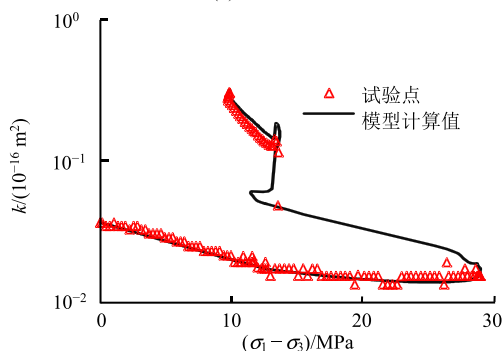
煤样 编号	裂隙弹 性模 E_b /GPa	煤岩骨架 性模量 E_s /GPa	煤岩骨 架泊松 比 ν_s	拟合参 数 α	剪胀角 $\psi/(^\circ)$	拟合参 数 λ	拟合参 数 β
a	0.14	2.4	0.20	0.18	32	1.44	0.148
b	0.14	2.4	0.20	0.29	28	1.31	0.043
c	0.14	2.4	0.20	0.17	12	0.72	0.185
d	0.14	2.4	0.20	0.32	26	1.34	0.041



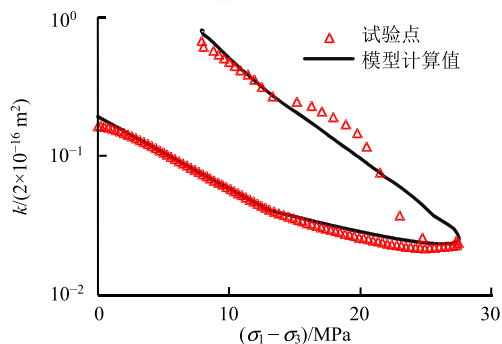
(a) 煤样 a



(b) 煤样 b



(c) 煤样 c



(d) 煤样 d

图 10 渗透率试验值与计算值对比
Fig.10 Measured and calculated results of permeability

5 结 论

(1) 轴向塑性变形 ε_1^p 与径向塑性变形 ε_2^p 近似呈线性关系, 煤样剪胀角从屈服损伤至残余过程阶段过程中可看成常数, 其大小可由 ε_1^p 和 ε_2^p 之间的比值确定, 发现了塑性剪切应变在 1.6% 左右会出现剪胀角急剧变化的现象。

(2) 考虑侧向应力对裂隙变形的影响, 建立了采动应力作用下煤岩在弹性范围内的渗透率演化表达式; 基于损伤产生裂隙开度与塑性体积应变的关系, 以剪胀角为桥梁建立了煤岩屈服损伤后渗透率与应力之间的表达式。

(3) 基于不同阶段的渗透率模型和剪胀角规律, 构建了煤岩全过程渗透率模型, 本文所建立的模型计算结果与试验结果比较吻合, 能够较好地反映煤样在弹性和屈服损伤两个阶段的渗流演化规律。

参 考 文 献

- [1] FLORES R M. Coalbed methane: from hazard to resource[J]. **International Journal of Coal Geology**, 1998, 35(1): 3-26.
- [2] XIE G X, YIN Z Q, WANG L, et al. Effects of gas pressure on the failure characteristics of coal[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2017, 50(7): 1711-1723.
- [3] 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.
- [4] CUI X J, BUSTIN R M. Volumetric strain associated with methane desorption and its impact on coalbed gas production from deep coal seams[J]. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, 2005, 89(9): 1181-1202.
- [5] LIU J S, CHEN Z W, ELSWORTH D, et al. Evaluation of stress-controlled coal swelling processes[J]. **International Journal of Coal Geology**, 2010, 83(4): 446-455.
- [6] ZHANG H, CHENG Y P, LIU Q Q, et al. A novel in-seam borehole hydraulic flushing gas extraction technology in the heading face: enhanced permeability mechanism, gas flow characteristics, and application[J]. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, 2017, 46(10): 498-514.
- [7] HUANG Q M, WU B, CHENG W M, et al. Investigation of permeability evolution in the lower slice during thick seam slicing mining and gas drainage: a case study from the Dahuangshan coalmine in China[J]. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, 2018, 52(4): 141-154.
- [8] HU S B, WANG E Y, KONG X Y. Damage and deformation control equation for gas-bearing coal and its numerical calculation method[J]. **Transport in Porous Media**, 2018, 121(3): 703-724.
- [9] SIMPSON G, GUE'GUEN Y, SCHNEIDER F. Analytical model for permeability evolution in microcracking rock[J]. **Pure and Applied Geophysics**, 2003, 160: 999-1008.
- [10] ZHANG Z T, ZHANG R, XIE H P, et al. An anisotropic coal permeability model that considers mining-induced stress evolution, microfracture propagation and gas sorption-desorption effects[J]. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, 2017, 46(10): 664-679.
- [11] 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.
- [12] 徐涛, 唐春安, 宋力, 等. 含瓦斯煤岩破裂过程流固耦合数值模拟[J]. **岩石力学与工程学报**, 2005, 24(10): 1667-1673.
- XU Tao, TANG Chu-nan, SONG Li, et al. Numerical simulation of coupled gas flow in failure process of gassy coal-rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(10): 1667-1673.
- [13] 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 models of deep coal under mining disturbance[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(11): 3983-3992.
- [14] CHEN D, PAN Z J, SHI J Q, et al. A novel approach for modeling coal permeability during transition from elastic to post-failure state using a modified logistic growth function[J]. **International Journal of Coal Geology**, 2016, 163(6): 132-139.
- [15] ZHANG X M, ZHANG D M, LEO C J, et al. Damage evolution and post-peak gas permeability of raw coal under loading and unloading conditions[J]. **Transport in Porous Media**, 2017, 117(3): 465-480.
- [16] 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.
- [17] 魏明尧, 王春光, 崔光磊, 等. 损伤和剪胀效应对裂隙煤体渗透率演化规律的影响研究[J]. **岩土力学**, 2016, 37(2): 574-582.
- WEI Ming-yao, WANG Chun-guang, CUI Guang-lei, et al. Influences of damage and shear dilation on permeability evolution of fractured coal[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(2): 574-582.
- [18] ZHENG C S, KIZIL M S, CHEN Z W, et al. Role of multi-seam interaction on gas drainage engineering design for mining safety and environmental benefits: linking coal damage to permeability variation[J]. **Process Safety and Environmental Protection**, 2018, 114(2): 310-322.
- [19] 王路军, 周宏伟, 荣腾龙, 等. 深部煤体采动应力下双曲函数型渗透率模型[J]. **煤炭学报**, 2019, 44(3): 942-949.
- WANG Lu-jun, ZHOU Hong-wei, RONG Teng-long, et al. Hyperbolic function-based permeability model of coal under mining stress at deep mine[J]. **Journal of China Coal Society**, 2019, 44(3): 942-949.
- [20] 霍丙杰, 范张磊, 路洋波, 等. 保护层开采被保护层体积应变与渗透特性相似模拟研究[J]. **煤炭科学技术**, 2018, 46(7): 19-25.
- HUO Bing-jie, FAN Zhang-lei, LU Yang-bo, et al. Similarity simulation study on permeability of protected coal seam volumetric strain during mining protective coal seam[J]. **Coal Science and Technology**, 2018, 46(7): 19-25.
- [21] DUAN M K, JIANG C B, GAN Q, et al. Study on permeability anisotropy of bedded coal under true triaxial stress and its application[J]. **Transport in Porous Media**, 2020, 131(3): 1007-1035.
- [22] DUAN M K, JIANG C B, GAN Q, et al. Experimental investigation on the permeability, acoustic emission and energy dissipation of coal under tiered cyclic unloading[J]. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, 2020, 73(1): 103054.
- [23] DUAN M K, JIANG C B, XING H L, et al. Study on damage of coal based on permeability and load-unload response ratio under tiered cyclic loading[J]. **Arabian Journal of Geosciences**, 2020, 13(6): 250.
- [24] COOK N G W. An experiment proving that dilatancy is a pervasive volumetric property of brittle rock loaded to failure[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 1970, 2(4): 181-188.
- [25] VERMEER P A. Non-associated plasticity for soils, concrete and rock[J]. **Physics of Dry Granular Media**, 1998, 350: 163-196.
- [26] 邱士利, 冯夏庭, 张传庆, 等. 不同卸围压速率下深埋大理岩卸荷力学特性试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2010, 29(9): 1807-1817.
- QIU Shi-li, FENG Xia-ting, ZHANG Chuan-qing, et al. Experimental research on mechanical properties of deep-buried marble under different unloading rates of confining pressures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(9): 1807-1817.
- [27] YUAN S C, HARRISON J P. An empirical dilatancy index for the dilatant deformation of rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(4): 679-686.
- [28] COOK N G W. Natural joints in rock: mechanical, hydraulic and seismic behaviour and properties under normal stress[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1992, 29(3): 198-223.
- [29] 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.
- [30] 靳钟铭, 赵阳升, 贺军, 等. 含瓦斯煤层力学特性的实验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 1991, 10(3): 271-279.
- JING Zhong-ming, ZHAO Yang-sheng, HE Jun, et al. An experimental study on mechanical properties of gas-bearing coal seam[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1991, 10(3): 271-279.
- [31] 臧杰. 煤渗透率改进模型及煤中气体流动三维数值模拟研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2015.
- ZANG Jie. Improvements of coal permeability model and three-dimensional numerical simulation of gas flow in coal[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2015.
- [32] 刘星光. 含瓦斯煤变形破坏特征及渗透行为研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
- LIU Xing-guang. Study on the deformation and failure characteristics and the permeation behavior of gas-saturated coal[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013.
- [33] HU K, ZHU Q Z, CHEN L, et al. A micromechanics-based elastoplastic damage model for rocks with a brittle-ductile transition in mechanical response[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2018, 51(6): 1729-1737.
- [34] ZHU Q Z, ZHAO L Y, SHAO J F. Analytical and numerical analysis of frictional damage in quasi brittle materials[J]. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, 2016, 92(7): 137-163.