



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):941-948. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.1570  
 WANG Lujun, ZHOU Hongwei, RONG Tenglong, et al. Hyperbolic function-based permeability model of coal under mining stress at deep mine [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 941-948. doi: 10.13225/j.cnki.jccs. 2018. 1570

移动阅读

## 深部煤体采动应力下双曲函数型渗透率模型

王路军<sup>1</sup>,周宏伟<sup>2,3</sup>,荣腾龙<sup>1</sup>,任伟光<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)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:**深部资源开采中,采动应力下煤体渗透率演化规律成为煤炭开采理论研究的热点之一。通过对煤体常规三轴渗流实验和采动应力路径下渗流实验对比分析,发现深部含瓦斯煤体在采动应力路径下其渗透率-体积应变异于常规三轴渗透实验。煤体常规三轴实验主要以三向应力加载为路径,而煤体在不断采出过程中其应力路径主要表现为特定方向加载其他方向卸荷的过程,可凝练为加轴压卸围压的应力路径,而应力-应变分析的起始点为静水压力状态,这必然引起煤体力学物理性质异于三向加载条件的行为。在采动应力条件下的渗透率-体应变空间内,以煤体体应变扩容点为界,当体应变达到扩容点后,随着体应变从压缩变形转换为膨胀变形,渗透率呈现出降低、稳态、增加的过程。为了定量地描述深部煤体渗透率在采动破坏或流变失稳过程中先减小后增大的行为,基于在体积应变空间内真实渗透网络是所有可能渗透网络中最优演化形式的假设,建立以渗透率、体积应变为变量的泛函关系,从而得出由体积应变表示的渗透率表达式。考虑深部煤体流变过程,将分数阶微积分理论推导的煤体体积蠕变方程代入渗透率函数中,得出以轴向应变为自变量的渗透率表达式。根据已有的实验数据对渗透率模型进行验证,结果表明:基于最优渗透网络得出的渗透率模型能很好地描述煤体渗透率在破坏过程中的演化规律,同时也可拟合流变过程中渗透率的变化趋势。

**关键词:**渗透率;双曲函数;深部煤体;采动应力;体积应变

**中图分类号:**TD821      **文献标志码:**A      **文章编号:**0253-9993(2019)03-0941-08

## Hyperbolic function-based permeability model of coal under mining stress at deep mine

WANG Lujun<sup>1</sup>, ZHOU Hongwei<sup>2,3</sup>, RONG Tenglong<sup>1</sup>, REN Weiguang<sup>1</sup>

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

**Abstract:** In the exploitation of deep resources, the permeability evolution of coal under mining stress has become one of the fundamental research topics in coal mining theory. It is found that through the comparative analysis of two kinds of seepage tests under different stress paths the permeability evolution with volumetric strain under mining stress path

收稿日期:2018-11-26 修回日期:2019-01-18 责任编辑:郭晓炜

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0600704);国家自然科学基金资助项目(51674266);中国矿业大学(北京)越崎杰出学者奖励计划资助项目

作者简介:王路军(1987—),男,山西长治人,博士研究生。E-mail:wljrock@163.com

通讯作者:周宏伟(1965—),男,重庆合川人,教授,博士生导师,博士。E-mail:zhw@cumtb.edu.cn

is different from that of conventional triaxial seepage test in deep gas-infiltrated coal. To the contrast of conventional triaxial compression test, the stress path of coal in the process of continuous mining is mainly the unloading process of a specific direction and loading at other directions. It can be simplified as the stress path of unloading confining pressure meanwhile loading axial stress, thus making hydrostatic pressure state as the starting point of stress-strain analysis and inevitably resulting in the behavior of the mechanical and physical properties of coal body different from the loading conditions. In the permeability-volume strain space under mining stress, when the volume strain reaches the dilation point, the permeability shows a process of decreasing, steady-state and increasing with the volume strain transforming from compression deformation to expansion deformation. In order to quantitatively describe the process that the permeability first decreases and then increases in the process of mining failure or rheological instability, based on the hypothesis that real permeable network is the best evolution form of all possible permeable networks in volume strain space, the permeability is expressed by volumetric strain through building the functional relationship with permeability and volumetric strain as variables. Considering the volume rheological process of deep coal, the volumetric creep equation of coal derived from fractional calculus theory is substituted into the developed permeability equation, and the permeability function with axial strain as independent variable is obtained. It is verified that through the existing experimental data the permeability model based on the hypothesis of the optimal permeable network can well describe the permeability evolution of deep coal in the process of failure or creep.

**Key words:** permeability; hyperbolic function style; coal at depth; mining stress; volumetric strain

随着煤炭资源开采深度的增加,深部煤岩体处于高地应力、高地温、高渗透压环境中,在开采扰动的条件下,岩爆、煤与瓦斯突出、巷道难以支护等现象发生概率随之增大。目前,深部矿产资源开采趋于常态化,深部强扰动和强时效下多场多相渗流理论研究成为深部岩体力学理论的关键问题之一<sup>[1-4]</sup>,而煤体作为典型的多孔介质,其渗透特性成为煤炭开采技术的研究重点之一。当前应用广泛的煤体渗透率模型主要以应力为自变量<sup>[5-7]</sup>,仅能描述渗透率随应力增加而降低的过程,难以完整地表征煤体在采动应力下渗透率先减小后增大的演化规律。

针对煤体开采中煤岩体变形与流体耦合的研究,为了能更好地反映多场的相互作用,以 Darcy 定律为基础增加了渗透率随应力变化的耦合项,从而得到加载应力路径下煤体应力-渗流的耦合规律。李世平<sup>[8]</sup>通过岩石全应力-应变渗流实验,采用拟合手段获得了 3 个不同阶段的渗透率与应变的关系。李晓泉和尹光志<sup>[9]</sup>在考虑三轴压缩状态下损伤的影响条件下,得出了含瓦斯煤样有效体积应力和渗透率存在指数关系的规律,在峰值前后指数系数会发生变化。祝捷等<sup>[10]</sup>进行了不同气体压力下煤样应力-应变的瓦斯渗流实验,建立了加载煤样变形与渗透率的相关性模型。

为了切实反映地下煤炭开采过程中,煤体具有的特殊应力路径,谢和平等<sup>[11]</sup>通过分析煤矿典型的 3 种开采条件下工作面超前支承压力分布规律,凝练出表征煤岩体采动力学的应力路径,为地下工程煤岩体

室内实验提供了理论基础。谢和平等<sup>[12]</sup>通过考虑开采扰动的影响,研究了不同开采方式下煤体应力场-裂隙场-渗流场耦合行为,推导出渗透率增大率与体应变的关系式。为了从机理阐述煤体渗透率的变化,ZHOU 等<sup>[13-15]</sup>采用  $\mu$ CT 实验手段、分形理论对煤体内裂隙演化进行了定量描述,并提出采场尺度下不同裂隙网络空间分布与渗透性关系。周宏伟等<sup>[16]</sup>基于捆绑的火柴棍模型,建立了三向应力条件下煤体渗透率动态演化模型,并进行了实验验证。随着岩体力学理论研究的深入,一些学者研究深部煤体多场耦合行为时,进行了考虑蠕变影响的渗流实验。尹光志等<sup>[17]</sup>通过含瓦斯煤卸围压蠕变-渗流实验,得出卸围压可使煤体加速破坏从而引起瓦斯流动速度显著增加的结论,并改进 Chaboche 黏塑性本构模型以描述煤体卸压短期蠕变破坏的规律。许江等<sup>[18]</sup>利用型煤试样研究了不同温度及不同有效应力条件下三轴蠕变对渗透率的影响规律,得出随着有效应力增大和温度升高,蠕变前后试样渗透率降低的规律。蒋长宝等<sup>[19]</sup>进行了不同初始围压和瓦斯压力条件下,煤体多级卸围压变形破坏及渗透率演化实验,得出随着围压的降低,煤体蠕变速度和渗透率均加速增大的规律。YANG 和 ZOBACK<sup>[20]</sup>为了研究气体吸附对次烟煤的力学及流动特征的影响,通过 4 种不同气体( $\text{He}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$ )的吸附和渗流实验,得出  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{He}$  对煤体黏塑性的影响依次减弱的规律。CHEN 等<sup>[21]</sup>将 Nishihara 流变模型引入孔隙弹性的应力-应变本构方程中,推导出包含黏弹性特征的煤体

渗透率模型,并通过数值模拟得出蠕变对煤体渗透率和瓦斯抽采具有重要的影响。

深部煤体采动应力条件下必然表现出异于常规三轴岩石实验的特征,同时其特有的渗透率变化规律需要给出理论公式,以便于数值分析和现场应用。笔者在总结常规三轴应力-渗流实验和采动应力下三轴实验规律的基础上,得出深部煤体在采动条件下渗透率随体积应变的变化规律,并对渗透网络在扩展演化中进行合理假设,推导出能反映采动应力条件下的渗透率表达式,同时采用已有的实验数据进行了拟合分析。

## 1 采动应力下渗透率随体积应变变化规律

深部煤体在开采过程中其应力变化路径是典型的轴压增加、围压卸载的过程。文献[11]通过对煤体超前支承压力变化过程分析得出可操作于室内实验的采动应力路径,以模拟煤体在原位开采中应力变化,其实验过程异于传统岩石力学的三轴实验,如图

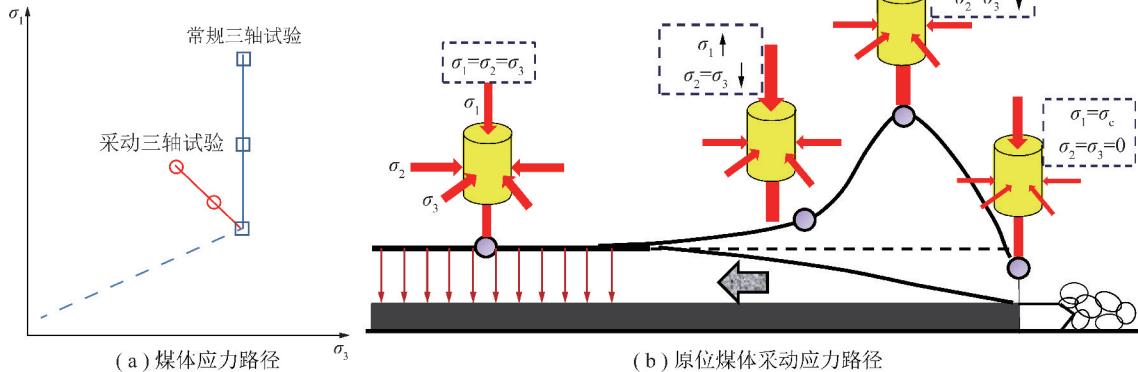


图1 深部煤体采动应力路径

Fig. 1 Mining-induced stress path of deep coal

在常规岩石三轴实验中,渗透率随体积应变的变化趋势大致可分为2个阶段,在岩石损伤起始点之前,渗透率随着体积应变的压缩而逐渐减小,当岩石进入损伤积累阶段时,渗透率随体积应变从压缩变为膨胀呈逐渐增加的趋势,如图3(a)所示。由于煤体内孔隙、裂隙分布错综复杂,为了清晰地阐述煤体裂隙扩展演化过程,将煤体内无规则分布的裂隙通过水平及垂直投影简化为水平裂隙和垂直裂隙。当煤体试样在三向应力下被压缩时,煤基质和孔隙、裂隙被逐渐压缩直至体积应变达到压缩最大值,此间渗透网络被压密导致渗透率下降;煤体试件轴向和环向继续加载,由于内部孔隙、裂隙尖端产生应力集中导致孔隙融合贯通,裂隙迅速扩展形成宏观裂纹,导致渗透率逐渐增加,甚至出现加速增长现象;在应力峰后阶

1所示。文献[22]进行了常规三轴压缩实验和采动应力实验下煤体渗透率研究。根据文献[22]得到两种实验条件下煤体应力-应变、渗透率-应变变化规律,如图2所示。常规三轴压缩实验中,煤体经历初始压缩阶段、线弹性阶段、损伤累积阶段、峰值破坏及峰后阶段,在体积应变-轴向应变曲线中表现为损伤起始点对应于体积应变压缩最大值(扩容点),峰值点对应于体积应变从压缩转变为膨胀。采动应力三轴实验中,煤体按照原位条件被加载至静水压力,然后再根据采动应力路径进行加轴压、卸围压过程,因此应力-应变曲线的起始点为静水压力状态。此时,应力-应变曲线表现为初始裂隙压缩阶段、线弹性阶段、损伤累计阶段、峰值及峰后阶段,其中初始裂隙压缩阶段很短或没有。在采动应力条件下,压缩体积应变很快达到最大值,一般发生在应力-应变曲线初期,而在差应力未达到峰值时,体积应变由压缩转变为膨胀,应力峰值对应于体积应变膨胀段,如图2(b)所示。

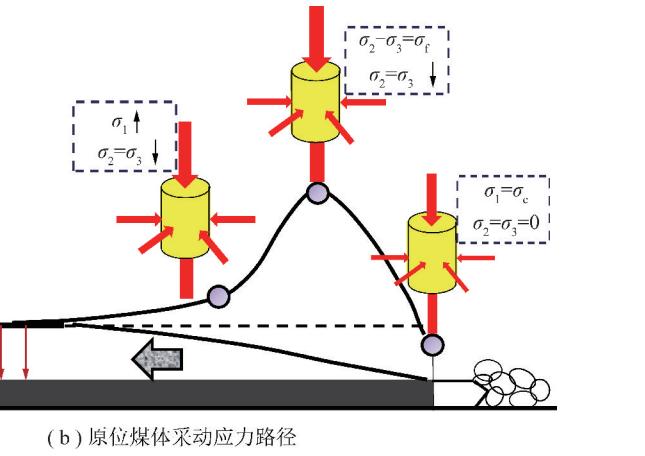


图2 常规三轴试验与采动三轴试验的应力-应变和渗透率-应变演化规律

Fig. 2 Evolution laws of stress-strain and permeability-strain for conventional triaxial test and mining-induced triaxial test

段,尽管轴向和环向应力卸载,但煤基质内弹性能释放导致渗透网络进一步扩展,造成渗透率持续增加,如图3(b)所示。

采动应力条件下,渗透率演化更复杂,以扩容点为界分为两种演化规律。渗透率-体应变曲线中,从起始点至扩容点,渗透率随体应变呈现向下凹的曲线,表现为先增加后降低;扩容点至煤体破坏阶段,渗透率随体应变曲线呈向上凹的形态,表现为先降低再增加的规律,如图4(a)所示。以图4(b)为例,采动应力条件下煤体渗透率演化是煤基质体积变化和孔隙裂隙体积变化共同作用的结果。针对煤体下凹型渗透率形态,原位煤体在未采动条件下处于压缩状态,煤基质和孔隙、裂隙均被压缩(图4(b)中A点),随着轴向应力增加环向卸载,基质体积被压缩,而孔

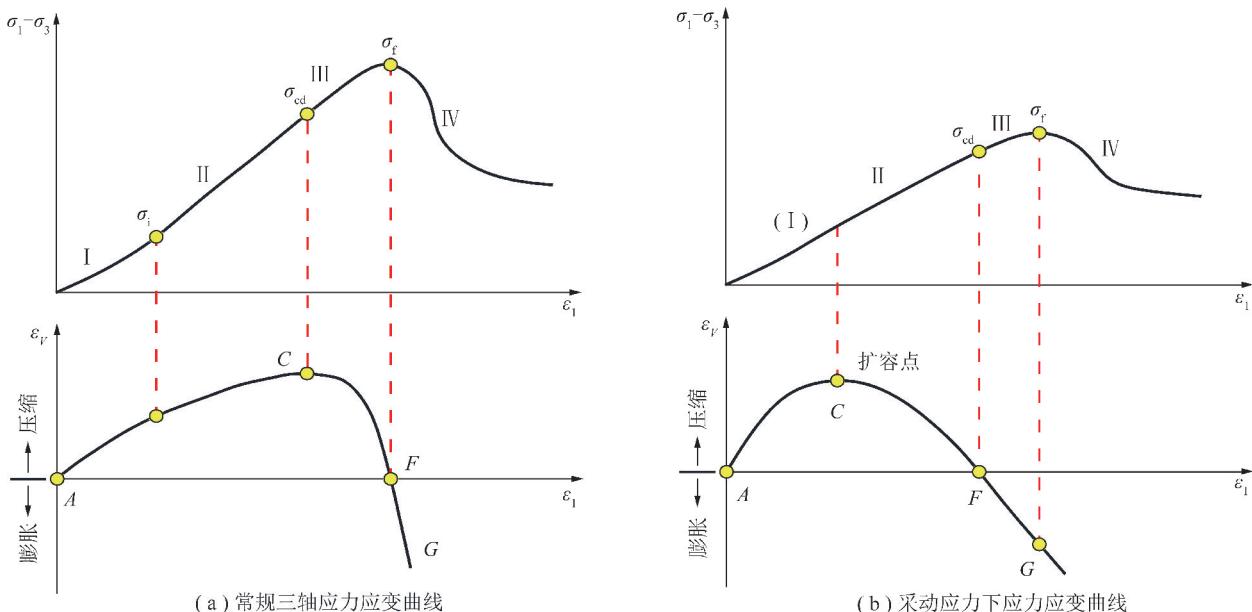


图2 媒体应力应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of deep coal

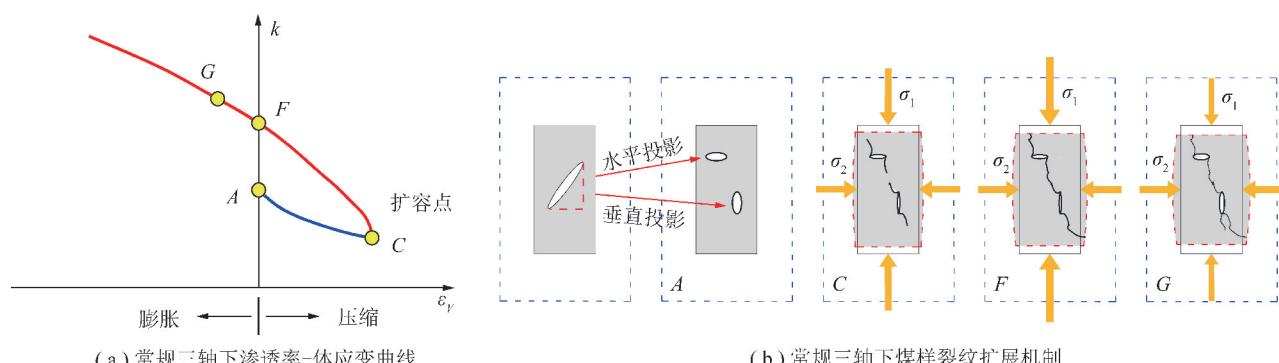


图3 常规三轴压缩实验下媒体渗透率演化及裂纹扩展机制

Fig. 3 Permeability evolution and crack propagation mechanism of coal under conventional triaxial compression test

隙、裂隙因环向卸载而膨胀导致渗透率增加,进一步加轴压卸围压,煤基质发生局部膨胀引起孔隙、裂隙空间被压缩,而孔隙、裂隙体积变化量整体处于减小状态致使渗透率发生下降。在采动应力下,起始状态至扩容点阶段占据渗透率演化的很小部分,因此本文不作为研究重点。针对扩容点至煤体破坏阶段,渗透率呈现出异于常规三轴压缩实验的演化形式,可以分为3个阶段:第1阶段,渗透率随压缩体积应变的减小而减小。该阶段内,煤基质膨胀,原有孔隙、裂隙因煤基质膨胀而被压缩,同时新裂纹扩展,在两种介质变化的博弈状态下,导致压缩体积应变减小,渗透率减小。第2阶段,渗透率处于临界稳定状态,煤基质变化和孔隙、裂隙出现平衡状态。煤基质逐渐从局部膨胀变为整体膨胀而新的裂隙逐渐继续扩展,局部区域仍被压缩,致使渗透率表现为平稳波动状态,但仍高于静水压力下的渗透水平。第3阶段,渗透率随体积应变的膨胀而增加。该阶段内,煤基质整体发生膨

胀,裂隙扩展贯通导致煤体渗透网络畅通,当煤体处于峰后状态时,轴向、环向应力均处于卸载状态,导致煤体渗透网络整体处于扩张状态,渗透率持续增高直至由渗流变为流动形态。

## 2 采动应力下双曲函数型渗透率模型

### 2.1 基于体积应变的渗透率表达式

为了更好地描述渗透率随体积应变的变化规律,取渗透率比率作为因变量,体积应变作为自变量。由图4可知,渗透率比率呈现上凹的曲线状。本文提出假设:在体积应变空间内,真实渗透网络所呈现的形式在所有可能的渗透网络中使流体渗透耗能最小。

$$V = a \int_{\varepsilon_{V_p}}^{\varepsilon_{V_0}} k_r \sqrt{1 + (k'_r)^2} d\varepsilon_V, k'_r = \frac{dk_r}{d\varepsilon_V} \quad (1)$$

式中,V为渗透率泛函;a为煤体常量;k<sub>r</sub>=k/k<sub>0</sub>,k<sub>r</sub>为渗透率比率,k为渗透率,k<sub>0</sub>为初始渗透率;ε<sub>V</sub>为体积应变;ε<sub>V0</sub>为初始体积应变;ε<sub>Vp</sub>为终值体积应变。

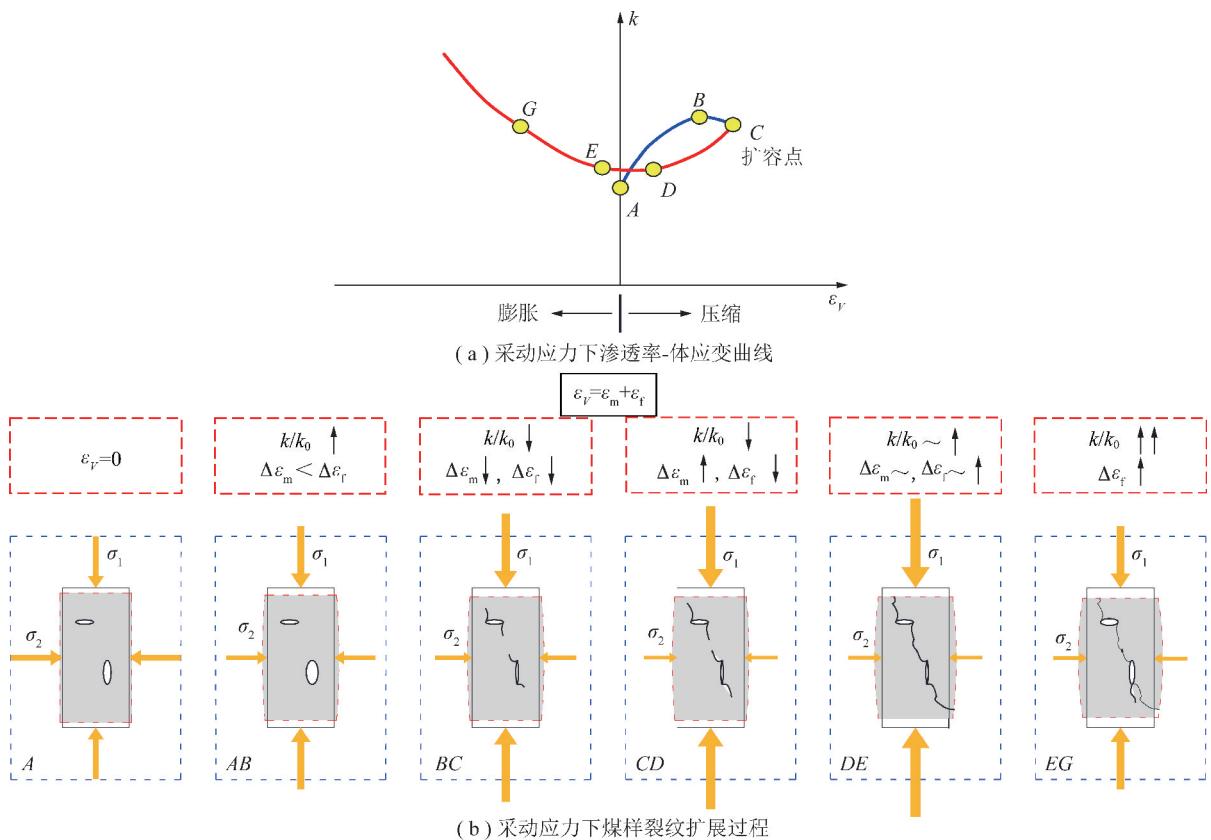


图4 采动应力下煤体渗透率演化及裂纹扩展机制

Fig. 4 Permeability evolution and crack propagation mechanism of coal under mining-induced stress test

这是泛函分析中的等周问题,引入拉格朗日乘子,可得拉格朗日量:

$$f = f(\varepsilon_V, k_r, k'_r) = ak_r\sqrt{1 + (k'_r)^2} + \lambda\sqrt{1 + (k'_r)^2} \quad (2)$$

式中,  $f$  为拉格朗日函数;  $\lambda$  为拉格朗日乘子。

欧拉-拉格朗日方程可表示为

$$\frac{d}{d\varepsilon_V} \left( \frac{\partial f}{\partial k'_r} \right) - \frac{\partial f}{\partial k_r} = 0 \Rightarrow \frac{d}{d\varepsilon_V} \left[ \frac{ak_r k'_r + \lambda k'_r}{\sqrt{1 + (k'_r)^2}} \right] - a\sqrt{1 + (k'_r)^2} = 0 \quad (3)$$

由于泛函  $f(k_r, k'_r)$  中不显含  $\varepsilon_V$ , 可以证明,

$$\frac{d}{d\varepsilon_V} \left( k'_r \frac{\partial f}{\partial k'_r} - f \right) = k'_r \left[ \frac{d}{d\varepsilon_V} \left( \frac{\partial f}{\partial k'_r} \right) - \frac{\partial f}{\partial k_r} \right] \quad (4)$$

结合式(3), (4), 欧拉-拉格朗日方程首次积分得到式(5), 即

$$k'_r \frac{\partial f}{\partial k'_r} - f = \alpha \quad (5)$$

式中,  $\alpha$  为常量。

将式(2)代入式(5), 求解  $(k'_r)^2$ 。

$$(k'_r)^2 = \frac{(ak_r + \lambda)^2}{\alpha^2} - 1 \quad (6)$$

令  $ak_r + \lambda = \alpha z$ , 微分方程(6)可化解为(7)。

$$\frac{dz}{\sqrt{z^2 - 1}} = \frac{a}{\alpha} dx \quad (7)$$

对式(7)积分可得

$$\ln(z + \sqrt{z^2 - 1}) = \frac{a}{\alpha} \varepsilon_V + b_1 \quad (8)$$

式中,  $b_1$  为积分常数。

对  $b_1$  进行合理替换,  $b_1 = -\frac{a}{\alpha}\beta$ ,  $\beta$  为常数, 求解方程(8)可得  $z$  的表达式为

$$z = \frac{ak_r + \lambda}{\alpha} = \cosh \left[ \frac{a(\varepsilon_V - \beta)}{\alpha} \right] \quad (9)$$

所以, 渗透率比率可表示为体积应变的函数, 即

$$k_r = k_r(\varepsilon_V) = -\frac{\lambda}{a} + \frac{\alpha}{a} \cosh \left[ \frac{a(\varepsilon_V - \beta)}{\alpha} \right] \quad (10)$$

通过选择合理的坐标系及适当的常数代换, 渗透率关于体积应变的函数可表示为

$$\frac{k}{k_0} = c_1 [\exp(c_2 \varepsilon_V) + \exp(-c_2 \varepsilon_V)] \quad (11)$$

$$\frac{k}{k_0} = c_1 \exp[c_2(\varepsilon_V - d)] + c_1 \exp[-c_2(\varepsilon_V - d)] \quad (12)$$

文献[23]认为煤岩渗透率与变形(体积应变、轴向应变和环向应变)的关系可采用同一形式的方程

式表达,因此,渗透率比率以轴向应变为自变量的方程可以表示为

$$\frac{k}{k_0} = c_1 \exp[c_2(\varepsilon_1 - d)] + c_1 \exp[-c_2(\varepsilon_1 - d)] \quad (13)$$

式中, $c_1, c_2, d$ 为待定常数; $\varepsilon_1$ 为轴向应变。

## 2.2 考虑体积蠕变的渗透率表达式

周宏伟等<sup>[24]</sup>基于分数阶导数理论推导出能反映蠕变加速阶段的流变模型,而文献[25]在此基础上得到以轴向应变为自变量的体积蠕变表达式,通过适当的参数代换可表示为式(14)。将式(14)代入式(12)则可得到体积蠕变条件下以轴向应变为自变量的渗透率表达式(15)。

$$\varepsilon_V = \varepsilon_1 - 2\nu\varepsilon_1 - 2h e^{m\varepsilon_1^n} \varepsilon_1^p \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{k}{k_0} &= c_1 \exp(c_2[\varepsilon_1 - 2\nu\varepsilon_1 - 2h \exp(m\varepsilon_1^n) \varepsilon_1^p - d]) + \\ &c_1 \exp(-c_2[\varepsilon_1 - 2\nu\varepsilon_1 - 2h \exp(m\varepsilon_1^n) \varepsilon_1^p - d]) \end{aligned} \quad (15)$$

式中, $\nu$ 为泊松比; $h, m, n, p$ 为待定常数。

## 3 深部煤体渗透率模型验证

### 3.1 采动应力下渗透率演化模型验证

深部含瓦斯煤体在开采过程中常出现两种扰动环境,其一为保护层开采引起被保护层煤体应力卸压,其二为本煤层开采引起工作面前方煤体卸压破坏。文献[26]利用物理相似试验模型研究了下保护层开采过程中被保护层体积应变变化规律。下保护层开采时,被保护层经历了加载、卸载过程,随之渗透率发生先减小后增大的现象。利用本文渗透率公式(11)进行拟合(图5),以获得双曲渗透率模型的相关参数,见表1。选取文献[22]中卸围压加轴压渗流实验数据,以体积应变扩容点为起始点,绘制渗透率比率-体积应变图,选择式(12)进行参数拟合,渗透率拟合曲线如图6所示,参数见表1。图5,6中,体积应变负值表示压缩应变,正值表示膨胀应变。

表1 双曲函数型渗透率模型参数拟合结果

Table 1 Parameter determination of developed permeability model

采动条件	$c_1$	$c_2$	$d$	$R^2$	修正 $R^2$	和方差	均方差
保护层卸压	2.020	41.32	—	0.829 6	0.820 6	0.198 6	1.676 00
本煤层卸压	0.512	149.80	$-1.47 \times 10^{-3}$	0.921 9	0.890 7	0.002 0	0.021 87

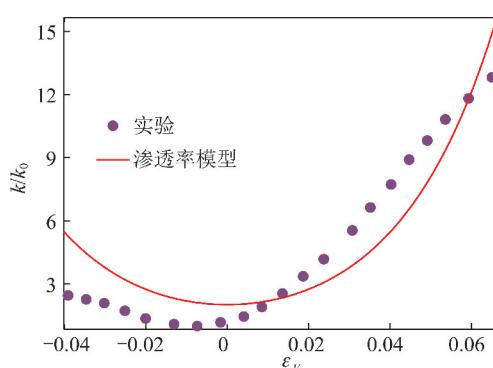


图5 保护层开采下煤体渗透率比率-体积应变曲线

Fig. 5 Permeability ratio with volumetric strain of coal under protective seam mining

从图5,6可以看出,体积应变从压缩转变为膨胀,即体积应变零值,并未对应着渗透率的最低值,而是煤体还处于压缩阶段,在煤基质变形和裂纹扩展共同作用下导致渗透率增加,且这种增长趋势为不可逆行为。

### 3.2 蠕变条件下渗透率演化模型验证

深部煤体蠕变渗流实验中测得渗透率随轴向应

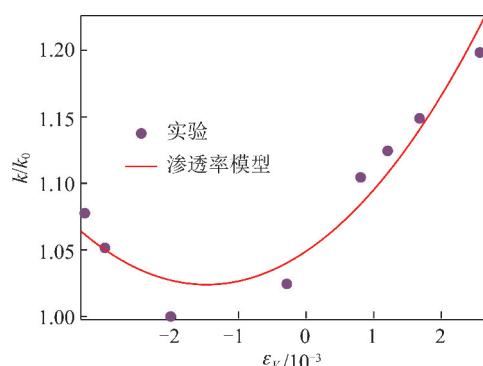


图6 卸围压煤体渗透率比率-体积应变曲线

Fig. 6 Permeability ratio with volumetric strain of coal under unloading confining pressure

变呈现降低、稳态、增加的规律。采用渗透率比率表达式(13)对文献[27]蠕变条件下渗透率随轴向应变的数据进行拟合,如图7中I型渗透率模型所示。利用体积蠕变表达式获得的由轴向应变表示的渗透率方程(15)同样可以对蠕变条件下渗透率数据进行拟合分析,如图7中II型渗透率模型曲线所示。两种渗透率模型均能很好地模拟渗透率先减小、稳定、后增加的趋势,相关参数见表2。

表2 蠕变渗透率模型参数拟合结果

Table 2 Parameter determination of developed permeability model for coal creep

渗透率模型	$c_1$	$c_2$	$d$	$h$	$m$	$n$	$p$	$R^2$	修正 $R^2$	和方差	均方差
I型	0.092	0.846	4.647	—	—	—	—	0.9821	0.9805	0.3049	0.1177
II型	0.157	0.348	1.059	0.983	0.825	-0.259	-0.106	0.9878	0.9828	0.2071	0.1104

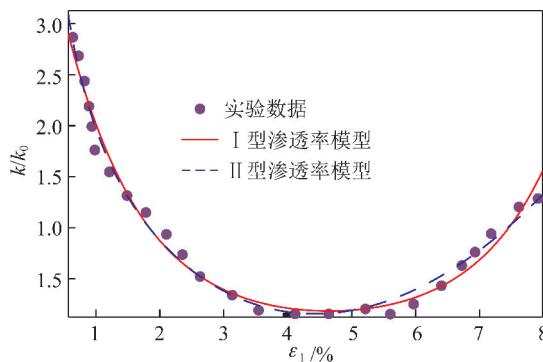


图7 蠕变条件下渗透率比率-轴向应变曲线

Fig. 7 Permeability ratio with axial strain in triaxial creep test

## 4 结 论

(1) 分析煤体常规三轴渗流实验和采动条件下渗流实验结果可知,在不同的应力路径下,煤体应力-应变曲线和体应变-轴向应变曲线形状类似,但是渗透率-体积应变曲线则表现出差异性。以体积应变扩容点为界,采动应力路径下,当煤体达到扩容点后,渗透率随体积应变从压缩变为膨胀呈现先降低后增加的过程。

(2) 基于煤体在采动应力路径下真实渗透网络使得流体耗能最低的假设,推导得出以体积应变为自变量的双曲函数型渗透率表达式。

(3) 根据卸围压渗流实验数据和蠕变渗流实验数据对双曲函数型渗透率表达式进行拟合,结果表明该模型可以很好地展现渗透率随体积应变(轴向应变)先减小后增大的规律,为深部煤体采动应力-渗流耦合模型提供了理论基础。

## 参考文献(References):

- [1] 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 Heping. Research framework and anticipated results of deep rock mechanics and mining theory [J]. Advanced Engineering Sciences,2017,49(2):1-16.
- [2] 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 Heping,ZHOU Hongwei,XUE Dongjie, et al. Research and consideration on deep coal mining and critical mining depth [J]. Journal of China Coal Society,2012,37(4):535-542.
- [3] 谢和平,高峰,鞠杨,等. 深部开采的定量界定与分析[J]. 煤炭学报,2015,40(1):1-10.  
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Quantitative definition and investigation of deep mining [J]. Journal of China Coal Society, 2015,40(1):1-10.
- [4] 周宏伟,谢和平,左建平. 深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J]. 力学进展,2005,35(1):91-99.  
ZHOU Hongwei, XIE Heping, ZUO Jiangping. Developments in researches on mechanical behaviors of rocks under the condition of high ground pressure in the depths [J]. Advances in Mechanics, 2005,35(1):91-99.
- [5] PALMER I. Permeability changes in coal: Analytical modeling [J]. International Journal of Coal Geology,2009,77(1):119-126.
- [6] WANG G X, ZHANG X D, WEI X R, et al. A review on transport of coal seam gas and its impact on coalbed methane recovery [J]. Frontiers of Chemical Science and Engineering,2011,5(2):139-161.
- [7] 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.
- [8] 李世平,李玉寿,吴振亚. 岩石全应力应变过程对应的渗透率-应变方程[J]. 岩土工程学报,1995,17(2):13-19.  
Li Shiping, Li Yushou, Wu Zhenye. Permeability-strain equation for corresponding stress-strain process of rock [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1995,17(2):13-19.
- [9] 李晓泉,尹光志. 含瓦斯煤的有效体积应力与渗透率关系[J]. 重庆大学学报,2011,34(8):103-108.  
LI Xiaoquan, YIN Guangzhi. Relationship between effective volumetric stress and permeability of gas-filled coal [J]. Journal of Chongqing University,2011,34(8):103-108.
- [10] 祝捷,姜耀东,孟磊,等. 载荷作用下煤体变形与渗透性的相关性研究[J]. 煤炭学报,2012,37(6):984-988.  
ZHU Jie, JIANG Yaodong, MENG Lei, et al. Pertinence study on deformation and permeability of coal containing methane during loading process [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37 (6): 984-988.
- [11] 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 Heping, ZHOU Hongwei, LIU Jianfeng, et al. Mining-induced mechanical behavior in coal seams under different mining layouts [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36 (7): 1067-1074.
- [12] 谢和平,张泽天,高峰,等. 不同开采方式下煤岩应力场-裂隙场-渗流场行为研究[J]. 煤炭学报,2016,41(10):2405-2417.  
XIE Heping, ZHANG Zetian, GAO Feng, et al. Stress-fracture-seepage field behavior of coal under different mining lay-outs [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41 (10): 2405-2417.

- nal of China Coal Society, 2016, 41(10):2405–2417.
- [13] ZHOU H W, LIU J F, XUE D J, et al. Numerical simulation of gas flow process in mining-induced crack network [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22(6):793–799.
- [14] XUE D J, ZHOU H W, CHEN C F, et al. A combined method for evaluation and prediction on permeability in coal seams during enhanced methane recovery by pressure-relieved method [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(10):5963–5974.
- [15] ZHOU H W, ZHONG J C, REN W G, et al. Characterization of pore-fracture networks and their evolution at various measurement scales in coal samples using X-ray  $\mu$ CT and a fractal method [J]. International Journal of Coal Geology, 2018, 189:35–49.
- [16] 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 Tenglong, ZHOU Hongwei, WANG Lujun, et al. Coal permeability model for gas movement under the three-dimensional stress [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7):1930–1937.
- [17] 尹光志, 王浩, 张东明. 含瓦斯煤卸压蠕变试验及其理论模型研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12):1963–1967.  
YIN Guangzhi, WANG Hao, ZHANG Dongming. Creep experimental and theory model on coal containing gas under the condition of unloading confining pressure [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12):1963–1967.
- [18] 许江, 彭守建, 陶云奇, 等. 蠕变对含瓦斯煤渗透率影响的试验分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11):2273–2280.  
XU Jiang, PENG Shoujian, TAO Yunqi, et al. Experimental analysis of influence of creep on permeability of gas-bearing coal [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(11):2273–2280.
- [19] 蒋长宝, 黄滚, 黄启翔. 含瓦斯煤多级式卸压变形破坏及渗透率演化规律实验[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12):2039–2042.  
JIANG Changbao, HUANG Gun, HUANG Qixiang. Experiment on deformation failure and permeability evolution law of gas-containing coal under multi-stage unloading confining pressure [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12):2039–2042.
- [20] YANG Y, ZOBACK M D. The effects of gas adsorption on swelling, visco-plastic creep and permeability of sub-bituminous coal [A]. The 45th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium [C]. San Francisco, 2011:433–440.
- [21] DANESH N N, CHEN Z, AMINOSADATI S M, et al. Impact of creep on the evolution of coal permeability and gas drainage performance [J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2016, 33:469–482.
- [22] YIN G, LI M, WANG J G, et al. Mechanical behavior and permeability evolution of gas infiltrated coals during protective layer mining [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2015, 80:292–301.
- [23] 许江, 李波波, 周婷, 等. 加卸载条件下煤岩变形特性与渗透特征的试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(9):1493–1498.  
XU Jiang, LI Bobo, ZHOU Ting, et al. Experimental study of coal deformation and permeability characteristics under loading-unloading conditions [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(9):1493–1498.
- [24] ZHOU H W, WANG C P, HAN B B, et al. A creep constitutive model for salt rock based on fractional derivatives [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(1):116–121.
- [25] 何明, 李宁, 朱才辉, 等. 岩石分数阶体积变形模型及其试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(11):3137–3144.  
HE Mingming, LI Ning, ZHU Caihui, et al. The volume deformation behavior of rock based on fractional calculus and its experimental study [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(11):3137–3144.
- [26] 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 Bingjie, FAN Zhanglei, LU Yangbo, 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.
- [27] 李祥春, 张良, 赵艺良. 常规三轴压力下含瓦斯煤蠕变-渗流演化规律[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(4):55–62.  
LI Xiangchun, ZHANG Liang, ZHAO Yiliang. Evolution of gas-filled coal creep-seepage under conventional triaxial compression [J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(4):55–62.