

doi:10.3799/dqkx.2017.107

不同温度下孔隙压力对煤岩渗流特性的影响机制

李波波^{1,2,3}, 杨康¹, 袁梅^{1,2,3}, 许江⁴, 杜育芹¹

1. 贵州大学矿业学院, 贵州贵阳 550025

2. 贵州大学喀斯特山区优势矿产资源高效利用国家地方联合工程实验室, 贵州贵阳 550025

3. 贵州省非金属矿产资源综合利用重点实验室, 贵州贵阳 550025

4. 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044

摘要: 在深部煤层瓦斯抽采过程中, 地温较高且孔隙压力逐渐降低, 而目前综合考虑温度和孔隙压力对煤岩渗透特性耦合作用的研究较少。利用自主研发的出口端压力可调的三轴渗流装置, 以贵州矿区原煤试件为研究对象, 进行不同温度下改变孔隙压力的渗流试验, 并建立了考虑温度的渗透率匹配模型。研究表明, 煤岩渗透率随孔隙压力增大按指数函数减小; 煤岩渗透率随压差的增大而减小, 随温度的升高而降低, 在不同的温度状态下, 渗透率的下降速率和变化幅度有所不同。在模拟瓦斯开发的物理试验中, 压差应尽量小, 减少其误差, 为建立不同边界条件的渗透率模型提供帮助; 随温度的升高, 温度突变系数呈增大的趋势; 随孔隙压力的增大, 温度突变系数呈减小的趋势。温度突变系数在整个阶段不为常数, 且割理压缩系数可变, 这两个特征更能真实地匹配模型, 反映瓦斯的开发过程。

关键词: 煤岩; 渗透率; 孔隙压力; 有效应力; 温度; 压差。

中图分类号: P554

文章编号: 1000-2383(2017)08-1403-10

收稿日期: 2017-03-22

Effect of Pore Pressure on Seepage Characteristics of Coal and Rock at Different Temperatures

Li Bobo^{1,2,3}, Yang Kang¹, Yuan Mei^{1,2,3}, Xu Jiang⁴, Du Yuqin¹

1. College of Mining, Guizhou University, Guiyang 550025, China

2. National & Local Joint Laboratory of Engineering for Effective Utilization of Regional Mineral Resources from Karst Areas, Guizhou University, Guiyang 550025, China

3. Guizhou Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Non-Metallic Mineral Resources, Guiyang 550025, China

4. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China

Abstract: The ground temperature is higher and the pore pressure gradually decreases in the process of gas extraction in deep coal seams, however there are few studies on the coupling effect of temperature and pore pressure on the permeability of coal. Seepage experiments on the raw coal from Guizhou mining area are carried out by the self-developed triaxial seepage equipment with an adjustable outlet pressure to study the influence of pore pressure and temperature on the permeability. A permeability matching model with temperature effect is also developed in this study. An exponential relationship between the permeability and pore pressure is found and presented. The results show that the permeability decreases with increasing pore pressure, and it decreases as the differential pressure increases. Also, the permeability of coal seam decreases with increased temperature, and the decreasing rate and magnitude of permeability are different under different temperatures. Therefore, the differential pressure should be as small as possible to reduce the error and help develop the permeability model with different boundary conditions in the physical simulation experiments of coalbed methane (CBM) extraction. As the temperature increases, the muta-

基金项目: 国家科技重大专项(No.2016ZX05044); 贵州省科学技术基金项目(黔科合J字[2015]2049号); 贵州省科技厅、贵州大学联合资金计划项目(黔科合LH字[2014]7654); 贵州大学引进人才科研基金资助项目(贵大人基合字(2014)57号, 贵大人基合字(2015)30号)。

作者简介: 李波波(1985-), 男, 讲师, 主要从事岩石力学与工程、煤层气渗流等方面的研究。ORCID: 0000-0002-0014-7235。

E-mail: sbobo.0822@163.com

引用格式: 李波波, 杨康, 袁梅, 等, 2017. 不同温度下孔隙压力对煤岩渗流特性的影响机制. 地球科学, 42(8): 1403-1412.

tion coefficient of temperature increases. While, the mutation coefficient of temperature decreases as pore pressure increases. It has been found these two characteristics that the mutation coefficient of temperature is not a constant in the whole stage and the realistic model matching with a variable cleat compressibility coefficient can reflect the development process of CBM.

Key words: coal and rock; permeability; pore pressure; effective stress; temperature; differential pressure.

一直以来,瓦斯灾害都是制约我国煤矿安全生产的重要因素.煤层渗透率是反映煤层瓦斯渗流难易程度的物性指标,同时也是防治瓦斯灾害和瓦斯开发利用的重要参数.采动煤岩渗流系统复杂性源于煤岩变形与流体各种耦合作用(陈占清和郁邦永, 2015),煤层渗透率的变化与煤骨架应力、孔隙压力以及煤本身的吸附变形有关,而国内外众多学者的研究成果也表明,瓦斯流动由孔隙压力、有效应力及煤吸附解吸三者共同决定.煤矿领域近年愈来愈关注对地温的相关研究(彭涛等, 2015),由此可见,系统地研究考虑温度作用下孔隙压力对煤岩渗透特性的影响具有重要意义.

在孔隙压力对煤层渗透特性的影响方面,林柏泉和周世宁(1987)进行了恒定围压下煤样渗透率和孔隙压力之间关系研究,发现两者服从指数分布;赵阳升和胡耀青(1995)得出含瓦斯煤的渗透系数随孔隙压力呈抛物线型变化,并定义了临界孔隙压力,指出位于该值两侧的孔隙压力与煤层渗透系数间的变化规律不同;唐巨鹏等(2006)利用阜新孙家湾矿原煤试件进行了解吸和渗流间相互作用的试验研究,发现加载过程中,渗透率和渗透系数与孔隙压力均呈负指数递减关系,但并未考虑温度对煤吸附解吸的影响;Jasinge *et al.*(2012)分别对原煤和型煤进行了不同气体压力和围压的渗流试验,得出了有效应力和孔隙压力对煤渗透率的影响,同时对其吸附膨胀量进行了分析;Vishal *et al.*(2013)对印度烟煤进行了渗流试验,分析了气体压力对渗透率和吸附膨胀的影响;许江等(2013)进行了不同围压下通入 CH_4 与 CO_2 气体后原煤的孔隙压力与渗透率关系的试验研究,探讨了渗透率与孔隙压力的敏感性关系,但未考虑温度与孔隙压力耦合作用下对煤渗透率的影响;傅雪海等(2002)开展了恒定有效应力下煤岩氦气与甲烷渗透率的平行试验,指出流体压力越小滑脱效应越明显,滑脱效应引起的渗透率越大;隆清明等(2008)进行了恒定温度、不同孔隙压力条件下的渗透试验,发现煤样渗透率随孔隙气压的增加而减小,该变化主要因滑脱效应和煤内部孔隙结构所致;在孔隙压力影响的渗透率模型方面,Palmer and Mansoori(1996)基于岩石力学的基本理论,

考虑了有效应力和基质收缩两方面影响因素,从应变角度出发建立了渗透率预测模型;Shi and Durucan(2004)以有效应力为切入点,即把有效应力的变化和收缩的变化都转换成有效应力的变化,在整体储层为单轴应变的基本假设条件下建立了渗透率分析模型;Connell *et al.*(2016)等在 S&D 模型基础上进行了模型修改和参数的讨论.

关于温度对煤渗透特性的影响,张广洋等(1995)以南桐煤田型煤煤样为研究对象,得出煤体中瓦斯渗透率随温度的升高而降低,渗透率的对数与温度成线性关系;李志强等(2009)采用甲烷与氦气分别进行了不同温度、应力下渗流试验,得出在不同有效应力下渗透率与温度关系存在一个转折区;许江等(2011)以原煤为对象开展了不同温度、有效应力下的渗流试验研究,并得到在有效应力与瓦斯压力恒定时,随着温度升高渗透率逐渐下降且温度敏感性系数降低的规律,但未考虑孔隙压力、温度和压差 3 方面对煤岩渗透率的影响,同时该研究主要是通过试验结果探讨温度对渗透率的影响,但未进行理论建模研究;于永江等(2013)通过试验研究了不同应力与温度条件对型煤渗透率的影响,得出温度对煤中气体的流动有显著影响,但试验选取的煤样为型煤,而型煤与原煤的渗透率与力学性质差异性较大(曹树刚等, 2010;魏建平等, 2013);孙光中等(2016)进行了不同应力条件下构造煤的温度与渗透率变化关系的试验研究,得到温度与渗透率呈负指数变化规律且渗透率变化存在加速与平稳两个阶段,但该试验中气体出口端均设置为负压,这与煤矿开采现场情况不相符合.

综上所述,尽管国内外学者们就孔隙压力对煤层渗透特性的影响进行了大量的试验及理论研究,但还存在着以下几方面的不足,一是不同孔隙压力试验研究中的出口压力均设置为大气压,这与煤矿现场实际情况不太吻合;二是改变孔隙压力是通过改变进口压力来实现,而通过同时调节进、出口压力来改变孔隙压力的相关研究鲜见报道;三是温度和孔隙压力综合作用下对煤岩渗透特性的研究目前尚未见报道.因此本文拟以孔隙压力为切入点,以贵州矿区原煤为研究对象,利用自主研发出口压力可调

的三轴渗流装置,采用调节进出口压力来改变孔隙压力,建立孔隙压力作用下考虑温度的渗透率匹配模型,进行孔隙压力在不同边界条件下的模型匹配分析,探究不同温度与孔隙压力对煤岩渗透特性的影响,为排采后期瓦斯抽采利用和 CO₂ 封存提供理论基础。

1 试验方法

1.1 试样的采集与制备

试验煤样取自贵州林华矿业有限公司有突出危险的 9 号煤层,以原煤试件为研究对象.经地质构造切割的原始煤层比较容易破碎,增加了原煤试件的制作难度,经专用的岩石取心装置取出后,需用磨床将其打磨成 $\Phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的圆柱型煤试件.制作好的煤样置于 80 °C 烘箱干燥 24 h 后置于干燥皿内备用.试验所用的原煤试件见图 1.采用 5E-MA-CIII 红外快速煤质分析仪对煤样收到基进行工业分析测定,结果显示水分为 1.75%,灰分为 22.89%,挥发分为 7.48%,硫分为 1.94%.煤层在围压为 3.0 MPa 下的三轴抗压强度、弹性模量和泊松比等力学参数见表 1.

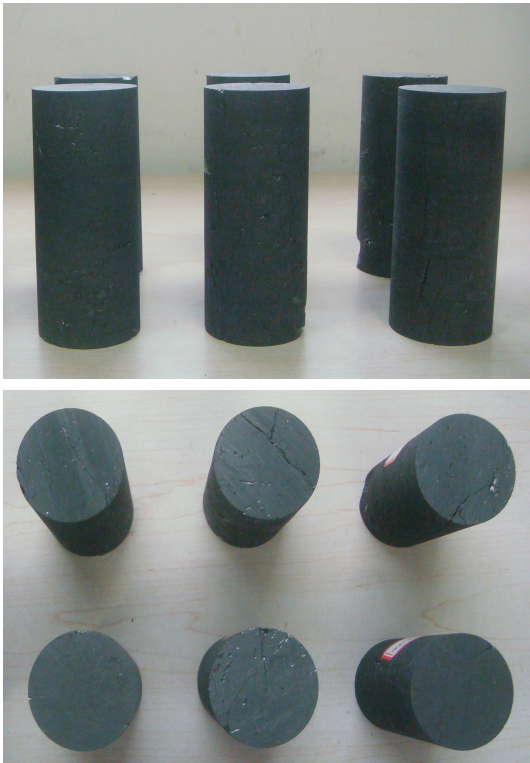


图 1 原煤试件

Fig.1 Raw coal samples

表 1 林华 9 号煤层原煤基本力学参数

Table 1 Basic mechanical parameters of raw coal in No.9 coal seam of Lin Hua

围压(MPa)	与层理面关系	σ_c (MPa)	E (MPa)	ν
3.0	⊥	38.28	1 905.04	0.125 9
	//	39.55	2 114.45	0.114 5

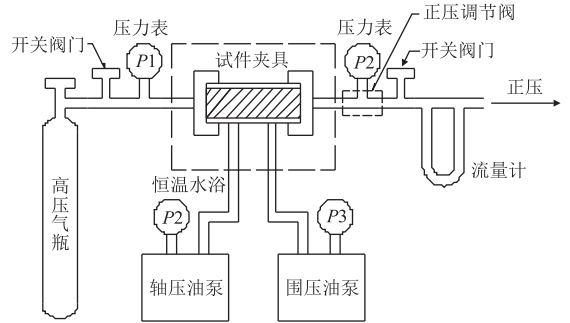


图 2 出口端正压的三轴渗流装置原理

Fig.2 The sketch of triaxial seepage device with positive pressure at outlet

1.2 试验装置

试验装置采用自主研发的、出口端正压的三轴渗流装置(许江等,2012).该装置主要由试件夹具、高压油泵、压力表、流量计、恒温水浴、出口压力调节器等部分组成.试件置于主体腔内,通过高压油泵进油施加轴向应力及围压,使试验煤样处于三轴应力状态,瓦斯气体由高压气瓶、经减压阀后口进入试件煤样,从煤体通过的瓦斯气体可利用流量计测定,三轴渗流装置原理见图 2.三轴渗流装置可进行出口压力的调节,其数值高于大气压,调节进出口压力差,模拟不同孔隙压力下的相关试验。

1.3 试验方案

为揭示不同温度条件下煤岩中瓦斯的运移规律,采用 CH₄ 作为试验气体,恒定轴压为 3.95 MPa,围压为 3.20 MPa,在 30、50、70 °C 三种温度下分别进行改变孔隙压力的渗流试验.具体试验步骤为:

(1)试件安装.将烘干冷却后的原煤试件侧表面均匀的涂抹上 704 硅橡胶,干透后装入三轴压力室中,用热缩管进行收缩紧贴其煤壁,同时金属箍紧箍其压头两端使其密封,再安装好各种辅助设备(进出气管、流量计等)及正压调节阀,对三轴压力室进行排气充油。

(2)真空脱气.试件安装好后,检查容器及管路气密性,关闭其试件进口阀门,采用真空泵对原煤进行 2 h 真空脱气。

(3)温度和应力设定.将三轴压力室置于恒温水

浴中,调节恒温水浴温度至设定值(30 °C).轴向压力与围压以力控制的方式对轴压、围压进行加载,按 0.5 MPa 的梯度依次交替加载至预定值(轴压为 3.95 MPa,围压为 3.20 MPa),始终保持轴压大于围压.

(4) 吸附平衡.打开进口阀门充入 CH₄,使进口瓦斯压力逐渐升至 1.2 MPa,调节出口压力调节器使出口瓦斯压力升至 1.1 MPa,保持该状态不变对试件进行瓦斯吸附,至吸附平衡.

(5) 渗流试验.通过调节进口气压阀门和出口压力调节器,按 1.15 MPa→1.35 MPa→1.55 MPa→1.75 MPa→1.95 MPa 逐次加载孔隙压力,在每个气体压力点达到吸附平衡后测量其变形及流量值.更换另一外试件,重复前 5 步,进行下一组 0.3 MPa 和 0.5 MPa 压差下的渗流试验.为完成第一个 30 °C 下的试验.

(6) 进行下一个试验项目,按照前面 5 步骤,进行另外 50、70 °C 下改变孔隙压力的渗流试验.

根据试验中所测的瓦斯流量数据,运用以下公式计算得到煤的渗透率.

$$k = \frac{2Qp_0\mu L}{A(p_1^2 - p_2^2)}, \quad (1)$$

其中, k 表示渗透率,mD; Q 表示瓦斯渗流流量,cm³/s; p_0 表示标准大气压力,取 0.101 325 MPa; μ 表示瓦斯动力黏度,Pa·s; L 表示试件长度,m; A 表示试件渗透有效面积,m²; p_1 表示试件进口瓦斯压力,MPa; p_2 表示试件出口瓦斯压力,MPa.

2 煤岩渗透率匹配模型

煤是煤基质和裂隙组成的孔隙-裂隙介质结构体,目前的渗透率模型通常将煤的结构假设成一种名为“火柴棒”的几何形状(图 3).

根据 Seidle *et al.* (1992) 假设的火柴棒几何模型,煤渗透率与孔隙率、割理间距的关系.

$$k = \frac{1}{48}a^2\varphi_f^3, \quad (2)$$

其中, k 表示渗透率,mD; a 表示割理间距,mm; φ_f 表示割理孔隙率.

根据式(2)进行渗透率的微分,得:

$$\frac{\partial k}{\partial \sigma} = \frac{2a\varphi_f^3}{48} \frac{\partial a}{\partial \sigma} + \frac{3a^2\varphi_f^2}{48} \frac{\partial \varphi_f}{\partial \sigma}, \quad (3)$$

其中, σ 表示有效应力,MPa.

对割理间距进行求导,可以将式(3)重写成:

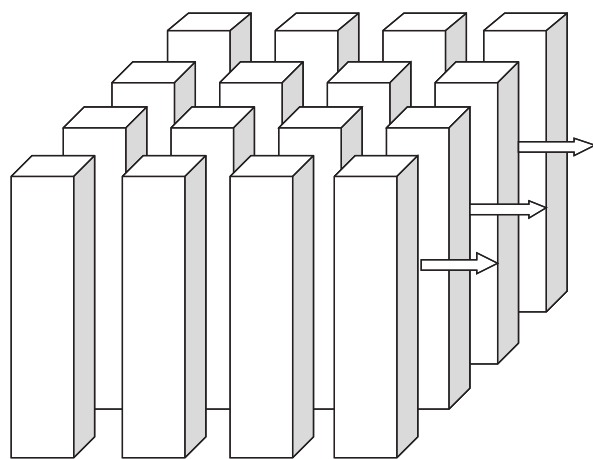


图 3 理想化煤岩双孔隙度模型

Fig.3 Dual porosity model of idealized coal
据 Wang *et al.* (2014)

$$\frac{\partial a}{\partial \sigma} = a \frac{\partial \epsilon}{\partial \sigma}, \quad (4)$$

其中, ϵ 表示应变,mm/mm.

根据力学条件(Seidle *et al.*, 1992),即:

$$\epsilon = \frac{1 - 2\nu}{E} \sigma, \quad (5)$$

其中, E 表示杨氏模量, ν 表示泊松比.

对式(5)的有效应力进行微分,则式(4)可以写成:

$$\frac{\partial a}{\partial \sigma} = a \frac{1 - 2\nu}{E}. \quad (6)$$

试验中,有效应力由下式(许江等,2012)得出:

$$\sigma = \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3) - \frac{1}{2}(p_1 + p_2), \quad (7)$$

其中, σ_1 表示轴向应力; σ_3 表示围压; σ 表示平均有效应力; p_1 表示试件进口瓦斯压力; p_2 表示试件出口瓦斯压力.式中变量单位均为 MPa.而孔隙压力为:

$$p_m = \frac{1}{2}(p_1 + p_2). \quad (8)$$

试验中,体积应力 $\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3)$ 保持恒定,对式(8)进行 σ 的微分:

$$\left(\frac{\partial p_m}{\partial \sigma} \right)_{\frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3)} = -1. \quad (9)$$

割理孔隙率关于有效应力的导数可以写成:

$$\frac{\partial \varphi_f}{\partial \sigma} = \frac{\partial \varphi_f}{\partial p_m} \frac{\partial p_m}{\partial \sigma}, \quad (10)$$

由式(9)、式(10)得:

$$\frac{\partial \varphi_f}{\partial \sigma} = - \frac{\partial \varphi_f}{\partial p_m}, \quad (11)$$

把式(6)代入式(3)得到:

$$\frac{\partial k}{\partial \sigma} = \frac{2a\varphi_i^3}{48} \frac{a(1-2\nu)}{E} + \frac{3a^2\varphi_i^2}{48} \frac{\partial \varphi_i}{\partial \sigma}, \quad (12)$$

把式(2)、(6)、(11)代入式(12),得:

$$\frac{\partial k}{\partial \sigma} = k \left(\frac{2(1-2\nu)}{E} - \frac{3}{\varphi_i} \frac{\partial \varphi_i}{\partial p_m} \right). \quad (13)$$

根据割理体积压缩系数(Pan *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2016)可知:

$$c_f = \frac{1}{\varphi_i} \left(\frac{\partial \varphi_i}{\partial p_m} \right)_{\frac{1}{3}(\sigma_1+2\sigma_3)}, \quad (14)$$

对于煤试件,存在:

$$\frac{2(1-2\nu)}{E} \ll 3c_f, \quad (15)$$

则式(13)可得:

$$k = k_0 e^{(-3c_f(\sigma-\sigma_0))}, \quad (16)$$

根据式(7)和体积应力 $\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3)$ 恒定,式(16)可以写成:

$$k = k_0 e^{3c_f(p_m-p_{m0})}, \quad (17)$$

式(16)和式(17)中下标 0 表示初始条件;式(17)为恒定体积应力条件下的渗透率方程。

煤岩受到温度作用后,受煤岩孔隙中的水份蒸发、内部介质的软化等影响,宏观力学参量弹性模量会发生变化.从弹性模量的改变来表征煤岩受温度参数作用的损伤效应,设定在常温 20 °C 时,试样处在自然状态,煤的热损伤为 0(不考虑煤的初始损伤),以弹性模量作为损伤变量,定义煤的热损伤为(Lemaitre *et al.*, 2000; 刘泉声和许锡昌,2000):

$$D_T = 1 - \frac{E_T}{E_0}, \quad (18)$$

其中, E_T 和 E_0 分别为温度 T 和常温 20 °C 时的弹性模量,MPa. D_T 为温度 T 的损伤变量。

损伤变量 D 可以用来描述发展程度的煤岩骨架受应力和温度的影响,其与煤岩割理压缩系数 c_f 的关系为:

$$c_f = \gamma D_T, \quad (19)$$

其中, γ 为温度突变系数,是指温度升高和孔隙压力增大引起的孔裂隙扩展变化量,反映温度及孔隙压力产生的孔裂隙发育的敏感程度, γ 影响着煤岩割理压缩系数 c_f .把式(19)代入式(17)得:

$$k = k_0 e^{3\gamma D_T(p_m-p_{m0})}, \quad (20)$$

式(20)为考虑温度的渗透率模型,根据试验条件,渗流阶段处于试件的弹性阶段,温度升高引起的煤岩损伤与孔隙压力的变化等因素将导致孔裂隙变化,从而影响煤岩渗透率.由于吸附膨胀在总的体积变

形中占有一定的比例,因此煤岩会受到吸附膨胀的影响.但是在瓦斯抽采过程中,由温度和孔隙压力的变化所导致的煤岩裂隙发育,大于吸附膨胀所带来的影响,所以方程中忽略由煤岩吸附导致基质膨胀所引起的损伤(Tan *et al.*, 2017).

平均煤岩压缩系数大小在多孔介质试验中得以验证,相比煤岩压缩系数为常数更能匹配试验数据(McKee *et al.*, 1988),结合式(7)得:

$$\bar{c}_f = \frac{c_{f0}}{-\alpha(p_m - p_{m0})} (1 - e^{\alpha(p_m - p_{m0})}). \quad (21)$$

式中, c_{f0} 为初始割理压缩系数, MPa^{-1} ; α 为孔隙压力引起的割理压缩系数下降率, MPa^{-1} .

3 试验结果及分析

3.1 不同温度下孔隙压力对煤岩渗透特性分析

图 4 为不同温度状态下煤岩渗透率与孔隙压力

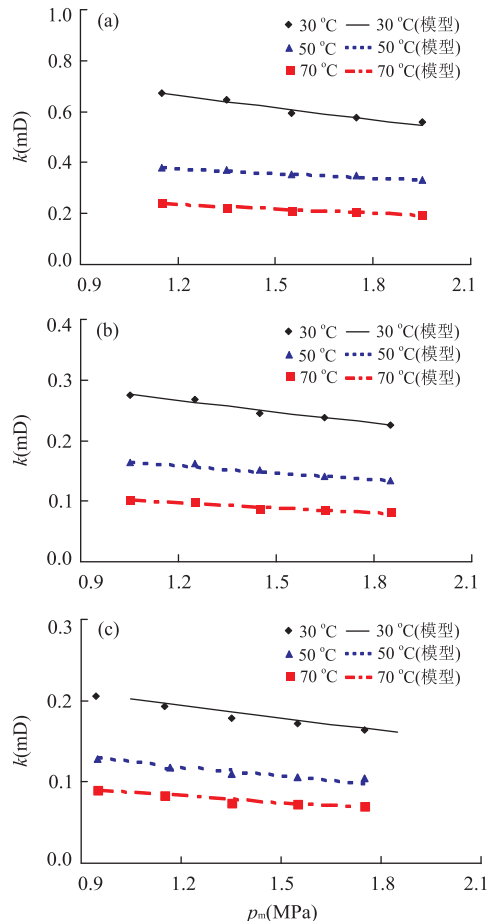


图 4 不同温度状态下煤岩渗透率与孔隙压力变化关系
Fig.4 Relationship between permeability and pore pressure of coal under different temperature
a.压差 $\Delta p = 0.1 \text{ MPa}$; b.压差 $\Delta p = 0.3 \text{ MPa}$; c.压差 $\Delta p = 0.5 \text{ MPa}$

表 2 煤岩数据匹配的模型参数

Table 2 Model parameters of coal about data matching

Δp (MPa)	T (°C)	c_{f0} (MPa ⁻¹)	a (MPa ⁻¹)
0.1	30	-0.006 4	4.002 0
	50	-0.004 2	3.994 2
	70	-0.006 4	4.004 3
0.3	30	-0.006 2	4.002 1
	50	-0.006 1	3.995 1
	70	-0.007 5	4.023 5
0.5	30	-0.006 8	4.018 8
	50	-0.008 4	3.995 1
	70	-0.006 3	4.399 7

变化关系.根据式(20)和式(21),进行模型匹配得到图 4 模型曲线和方程,煤岩渗透率与孔隙压力具有指数函数关系.表 2 为煤岩数据匹配的模型参数.由图 4 和表 2 可知:(1)当压差为 0.1 MPa 时,煤岩渗透率在各个温度条件下随孔隙压力增大,呈减小的趋势,且渗透率减小的速率不一致,在 30 °C 时变化较为显著.图 4a 中,温度为 30 °C 时,渗透率从 0.671 mD 逐渐降至 0.560 mD;温度为 50 °C 时,渗透率从 0.378 mD 逐渐降至 0.330 mD;温度为 70 °C 时,煤岩渗透率从 0.238 mD 逐渐降至 0.196 mD;50~70 °C 条件下,变化幅度基本在 0.04 mD 左右.其煤岩数据匹配的模型参数 c_{f0} 为 -0.006 4 ~ -0.004 2 MPa⁻¹, a 为 3.994 2~4.004 3 MPa⁻¹;当压差为 0.3 MPa 和 0.5 MPa 时,在各个温度条件下随孔隙压力增大,煤岩渗透率具有与压差为 0.1 MPa 时相同的变化趋势.煤的孔裂隙结构特征与其渗透特性密切相关(薛华庆等,2015),从力学和渗流角度分析,试件受吸附膨胀和有效应力两方面的作用,在围压保持不变的情况下,一方面孔隙压力增加,有效应力减小,使得煤孔隙结构变形得以部分恢复;另一方面孔隙压力增加,瓦斯吸附量增加导致煤基质吸附膨胀,基质膨胀使得孔隙结构逐渐闭合导致煤岩瓦斯渗流孔道缩小,有效应力对渗透率的作用小于煤基质膨胀作用,有效应力导致煤孔隙扩张的程度小于因孔隙压力增大使得瓦斯层增厚而阻碍瓦斯渗流的程度,孔隙压力引起的吸附作用成为影响渗透率的主控因素,这与前人研究成果一致(赵阳升等,1999; Jasinge *et al.*, 2012).因此出现了渗透率随气体压力增加而降低的现象,其割理压缩系数为负值;又由于温度对煤岩力学特性、吸附解吸特性的影响导致不同温度作用下,煤岩的渗透率随气体压力变化的程度有所不同.

(2)在各压差状态下,煤岩渗透率随温度的升高

呈降低的趋势,且渗透率的下降率变化幅度有所不同.图 4a 中,当压差为 0.1 MPa,孔隙压力为 1.15 MPa 时,30~50 °C 的下降率为 78%,50~70 °C 的下降率为 59%,孔隙压力为 1.95 MPa 时,30~50 °C 的下降率为 70%,50~70 °C 的下降率为 65%.随孔隙压力的增大,下降率有降低的趋势.当压差为 0.3 MPa 和 0.5 MPa 时,随孔隙压力增大,煤岩渗透率具有与压差为 0.1 MPa 时类似的规律.随孔隙压力的升高,煤岩渗透率对温度的响应程度有一定的降低.由于煤岩具有较小的导热系数和敏感的热胀冷缩特性(张亮等,2016),煤岩温度开始升高,煤岩内部逐步产生热应力,其颗粒和矿物成分产生热膨胀,且由于力的作用煤岩出现孔隙裂隙,同时煤岩的吸附作用将导致基质膨胀,煤体结构开始遭到破坏.当煤岩受到外界应力作用,促进了孔裂隙的扩展,但内部体积有限,其膨胀主要向试件内部发展挤压,小颗粒开始填充裂隙,使其渗流通道减小,导致渗透率下降;当温度继续升高,煤岩受热膨胀现象向外扩展,导致孔隙度减小,改变了煤基质的内部结构,影响煤岩吸附瓦斯的性能,同时瓦斯分子吸收热量后,分子内能增加,也会导致吸附量降低(杨新乐和张永利,2008),吸附膨胀作用逐渐减弱从而煤岩渗透率的下降率有所减少.

3.2 不同压差下孔隙压力对煤岩渗透特性分析

图 5 为不同压差状态下煤岩渗透率与孔隙压力变化关系.根据式(20)和式(21),进行模型匹配得到图 5 模型曲线和方程.

(1)在各温度状态下,煤岩渗透率随压差的增大呈减小的趋势,且渗透率的下降率不一致.图 5a 中,当温度为 30 °C 时,在第 1 个孔隙压力点时,压差在 0.1~0.3 MPa 的下降率为 143%,0.3~0.5 MPa 的下降率为 36%,在第 2 个孔隙压力点时,压差在 0.1~0.3 MPa 的下降率为 148%,0.3~0.5 MPa 的下降率为 38%.当温度为 50、70 °C 时,随孔隙压力增大,煤岩渗透率具有与 30 °C 时类似的规律.究其原因,压差越大时,煤岩中驱动瓦斯流动的动力越大,瓦斯的渗流速度增加,吸附作用增强,煤体中吸附的瓦斯量增加,吸附瓦斯层增厚,从而使得瓦斯渗流通道减小.

(2)压差越大,煤岩试件两端气体压力达到平衡的时间越长.在分析模拟排采后期瓦斯开发的物理试验中,压差应尽量小;一方面能使煤岩渗透率尽量大,另一方面是更能体现煤岩孔裂隙中孔隙压力的影响,减少其误差,为建立不同边界条件的渗透率模

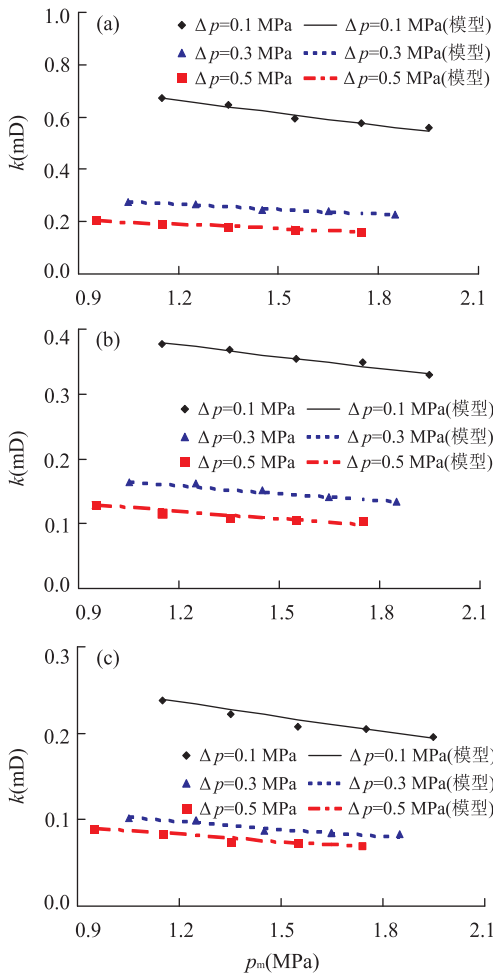


图 5 不同压差状态下煤岩渗透率与孔隙压力变化关系

Fig.5 Variation relationship between pore pressure and permeability of coal under different pressure difference
a. $T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$; b. $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; c. $T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$

型提供帮助,真实体现排采后期瓦斯开发现场瓦斯运移演化规律.

3.3 煤岩的温度突变系数分析

在煤岩渗透率模型建立中,假设割理变形的改变不同于骨架之间两平行板块裂隙孔隙的改变 (Palmer and Mansoori, 1996; Shi and Durucan, 2004).

Li et al. (2014) 得出 c_f 的变化不仅与煤样有关,还与温度、气体压力有关.为了进一步说明孔隙压力和渗透率呈现的指数关系 (Pan et al., 2010), 可开展温度影响的突变系数分析.应力和温度的共同影响会引起煤岩损伤,孔裂隙发育,反映其对孔裂隙发育的敏感程度.温度突变系数 γ 能够反映煤岩渗透率随孔隙压力的变化趋势,温度突变系数 γ 值越大,表示煤岩渗透率随孔隙压力的变化越显著,孔裂隙越不发育.根据式 (18) 得到表 3 不同温度条件下的弹性模量,通过式 (20) 和式 (21) 计算,图 6 为不

表 3 不同温度条件下的弹性模量

Table 3 Values of elastic modulus under different temperature conditions

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	25	30	50	70
弹性模量 (MPa)	181.46	178.88	168.72	160.00

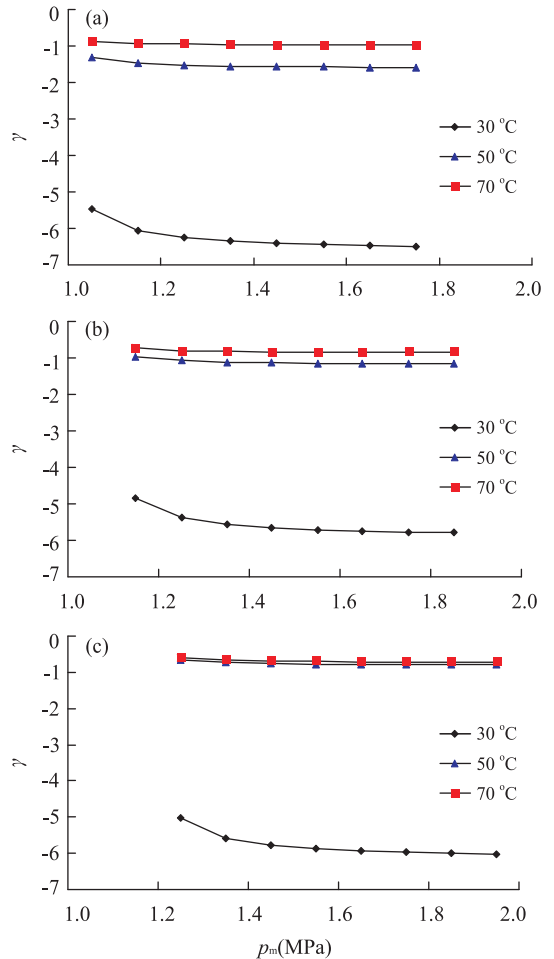


图 6 不同温度状态下温度突变系数与孔隙压力变化关系
Fig.6 The relationship between temperature mutation coefficient and pore pressure at different temperatures

a. $\Delta p = 0.1\text{ MPa}$; b. $\Delta p = 0.3\text{ MPa}$; c. $\Delta p = 0.5\text{ MPa}$

同温度状态下温度突变系数与孔隙压力变化关系.

由图 6 可知,随温度的升高, γ 呈增大的趋势;随孔隙压力的增大, γ 呈减小的趋势.在不同温度和不同压差下,在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, γ 范围为 $-4.8448 \sim -6.5000$,在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, γ 范围为 $-0.6622 \sim -1.5880$,在 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, γ 范围为 $-0.6028 \sim -0.9749$.温度在一定程度上影响着渗透率的变化,在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时影响最大.上述结果表明孔隙压力的增大对煤岩渗透率减小具有明显的敏感性,主要由于温度升高或压差增大,吸附膨胀导致割理孔裂隙孔径闭合,孔隙度降低,煤岩产生变形,温度突变系数 γ

增大.煤岩渗透率随孔隙压力的增大而减小的整个阶段,温度突变系数 γ 不是一个常数,这与最近 Liu *et al.* (2012) 提出割理压缩系数为可变的的结果是相符的.孔隙压力的增大和温度的升高,使得煤岩渗透率减小,在低气压的区域内,温度突变系数 γ 变化较大,煤膨胀对渗透率的影响更明显.

4 结论

针对贵州矿区的原煤试件,本文研究了不同温度、不同孔隙压力下的煤岩渗流演化规律,建立了考虑温度的渗透率匹配模型,并分析了煤岩的温度突变系数,为后续瓦斯抽采试验研究和渗透率模型建立提供一定的理论价值,从而得到如下结论.

(1) 煤岩渗透率与孔隙压力具有指数函数关系,煤岩渗透率匹配模型为 $k = k_0 e^{3\gamma D T (p_m - p_{m,0})}$. 在各温度状态下,煤岩渗透率随孔隙压力增大,呈减小的趋势,且渗透率的减小速率不一致,在温度 30 °C 下变化较为显著.在各气体压差状态下,煤岩渗透率随温度的升高呈降低的趋势,且渗透率的下降率变化幅度有所不同.

(2) 在各温度状态下,煤岩渗透率随压差的增大呈减小的趋势,且渗透率的下降率不一致.气体压差越大,煤岩试件两端气体压力达到平衡的时间越长.在模拟排采后期瓦斯开发的物理试验中,压差应尽量小,减少其误差,为不同边界条件下的渗透率模型的建立提供帮助,真实体现排采后期瓦斯开发现场瓦斯运移演化规律.

(3) 随温度的升高,温度突变系数 γ 呈增大的趋势,随孔隙压力的增大, γ 呈减小的趋势.温度在一定程度上影响着渗透率的变化,30 °C 影响最大.孔隙压力的增大,温度突变系数 γ 在整个阶段不为一个常数,同时可变的割理压缩系数更能真实地匹配模型.

References

Cao, S. G., Li, Y., Guo, P., et al., 2010. Comparative Research on Permeability Characteristics in Complete Stress-Strain Process of Briquettes and Coal Samples. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 29(5): 899–906 (in Chinese with English abstract).

Chen, Z. Q., Yu, B. Y., 2015. Research Progress of Seepage Mechanics in Rock Mass Affected by Mining. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Tech-*

nology Edition), 37(3): 69–76 (in Chinese with English abstract).

- Connell, L. D., Mazumder, S., Sander, R., et al., 2016. Laboratory Characterisation of Coal Matrix Shrinkage, Cleat Compressibility and the Geomechanical Properties Determining Reservoir Permeability. *Fuel*, 165: 499–512. doi: 10.1016/j.fuel.2015.10.055
- Fu, X. H., Li, D. H., Qin, Y., et al., 2002. Experimental Research of Influence of Coal Matrix Shrinkage on Permeability. *Journal of China University of Mining & Technology*, 31(2): 129–132 (in Chinese with English abstract).
- Jasinge, D., Ranjith, P. G., Choi, X., et al., 2012. Investigation of the Influence of Coal Swelling on Permeability Characteristics Using Natural Brown Coal and Reconstituted Brown Coal Specimens. *Energy*, 39(1): 303–309. doi: 10.1016/j.energy.2012.01.010
- Lemaitre, J., Desmorat, R., Sauzay, M., 2000. Anisotropic Damage Law of Evolution. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 19(2): 187–208. doi: 10.1016/S0997-7538(00)00161-3
- Li, J., Liu, D., Yao, Y., et al., 2014. Control of CO₂ Permeability Change in Different Rank Coals during Pressure Depletion: An Experimental Study. *Energy Fuels*, 28(2): 987–996. doi: 10.1021/ef402285n
- Li, Z. Q., Xian, X. F., Long, Q. M., et al., 2009. Experiment Study of Coal Permeability under Different Temperature and Stress. *Journal of China University of Mining & Technology*, 38(4): 523–527 (in Chinese with English abstract).
- Lin, B. Q., Zhou, S. N., 1987. Experimental Investigation on the Permeability of the Coal Samples Containing Methane. *Journal of China University of Mining & Technology*, 16(1): 21–28 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q. S., Xu, X. C., 2000. Damage Analysis of Brittle Rock at High Temperature. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 19(4): 408–411 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. M., Harpalani, S., Pillalamarry, M., 2012. Laboratory Measurement and Modeling of Coal Permeability with Continued Methane Production: Part 2—Modeling Results. *Fuel*, 94: 117–124. doi: 10.1016/j.fuel.2011.10.053
- Long, Q. M., Zhao, X. S., Mu, J. S., 2008. Experimental Study on Influence of Pore Gas Pressure upon Gas Permeability of Coal Seam. *Mining Safety & Environmental Protection*, 35(1): 10–12 (in Chinese with English abstract).
- McKee, C. R., Bumb, A. C., Koenig, R. A., 1988. Stress-Dependent Permeability and Porosity of Coal and Other

- Geologic Formations. *SPE Formation Evaluation*, 3 (1): 81–91. doi: 10.2118/12858—pa
- Palmer, I., Mansoori, J., 1996. How Permeability Depends on Stress and Pore Pressure in Coalbeds; A New Model. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Denver.
- Pan, Z. J., Connell, L. D., Camilleri, M., 2010. Laboratory Characterisation of Coal Reservoir Permeability for Primary and Enhanced Coalbed Methane Recovery. *International Journal of Coal Geology*, 82 (3–4): 252–261. doi: 10.1016/j.coal.2009.10.019
- Peng, T., Wu, J. W., Ren, Z. Q., et al., 2015. Distribution Characteristics of Current Geothermal Field and Terrestrial Heat Flow in Huaibei Coalfield. *Earth Science*, 40 (6): 1083–1092 (in Chinese with English abstract).
- Seidle, J. P., Jeansonne, M. W., Erickson, D. J., 1992. Application of Matchstick Geometry to Stress Dependent Permeability in Coals. *SPE Rocky Mountain Regional Meeting*, Casper. doi: 10.2118/24361—ms
- Shi, J. Q., Durucan, S., 2004. Drawdown Induced Changes in Permeability of Coalbeds: A New Interpretation of the Reservoir Response to Primary Recovery. *Transport in Porous Media*, 56 (1): 1–16. doi: 10.1023/b: tipm.0000018398.19928.5a
- Sun, G. Z., Wang, G. Z., Zhang, R. L., 2016. An Experimental Study on Response Law of Permeability of Tectonic Coal Samples to Temperature Variation. *Rock and Soil Mechanics*, 37 (4): 1042–1048 (in Chinese with English abstract).
- Tan, Y. L., Pan, Z. J., Liu, J. S., et al., 2017. Experimental Study of Permeability and Its Anisotropy for Shale Fracture Supported with Proppant. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 44: 250–264. doi: 10.1016/j.jngse.2017.04.020
- Tang, J. P., Pan, Y. S., Li, C. Q., et al., 2006. Experimental Study of Desorption and Seepage of Coalbed Methane under Solid-Fluid Coupling. *Journal of China University of Mining & Technology*, 35 (2): 274–278 (in Chinese with English abstract).
- Vishal, V., Ranjith, P. G., Singh, T. N., 2013. CO₂ Permeability of Indian Bituminous Coals; Implications for Carbon Sequestration. *International Journal of Coal Geology*, 105: 36–47. doi: 10.1016/j.coal.2012.11.003
- Wang, G. D., Ren, T., Wang, K., et al., 2014. Improved Apparent Permeability Models of Gas Flow in Coal with Klinkenberg Effect. *Fuel*, 128: 53–61. doi: 10.1016/j.fuel.2014.02.066
- Wei, J. P., Wang, D. K., Wei, L., 2013. Comparison of Permeability between Two Kinds of Loaded Coal Containing Gas Samples. *Journal of China Coal Society*, 38 (Suppl. 1): 93–99 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J., Cao, J., Li, B. B., et al., 2013. Experimental Research on Response Law of Permeability of Coal to Pore Pressure. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 32 (2): 225–230 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J., Yuan, M., Li, B. B., et al., 2012. Experimental Study of Relationships between Metamorphic Grade, Pore Characteristics and Permeability of Coal. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 31 (4): 681–687 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J., Zhang, D. D., Peng, S. J., et al., 2011. Experimental Research on Impact of Temperature on Seepage Characteristics of Coal Containing Methane under Triaxial Stress. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 30 (9): 1848–1854 (in Chinese with English abstract).
- Xue, H. Q., Xu, R. N., Jiang, P. X., et al., 2015. Characterization of Rock Microstructure Using 3D X-Ray Computed Tomography. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 47 (6): 1073–1078 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X. L., Zhang, Y. L., 2008. Experimental Study on Desorption of Effect of Temperature on Coal Gas Permeability under Gas-Solid Coupling. *Journal of Geomechanics*, 14 (4): 374–379 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Y. J., Zhang, H., Zhang, C. H., et al., 2013. Effects of Temperature and Stress on Permeability of Standard Coal Briquette Specimen. *Journal of China Coal Society*, 38 (6): 936–941 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. Y., Hu, Y. H., Jiang, D. Y., 1995. Study on the Factors Affecting Gas Permeability of Coal. *Journal of Chongqing University*, 18 (3): 27–30 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L., Luo, J., Cui, G. D., et al., 2016. Mechanisms of Cold Shock during Coalbed Fracturing Assisted with Cryogenic Gases. *Earth Science*, 41 (4): 664–674 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L., Zhang, C., Tu, S. H., et al., 2016. A Study of Directional Permeability and Gas Injection to Flush Coal Seam Gas Testing Apparatus and Method. *Transport in Porous Media*, 111 (3): 573–589. doi: 10.1007/s11242—015—0612—8
- Zhao, Y. S., Hu, Y. Q., 1995. Experimental Study on the Law of Effective Stress by Methane Pressure. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 17 (3): 26–31 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y. S., Hu, Y. Q., Yang, D., et al., 1999. The Experimen-

tal Study on the Gas Seepage Law of Rock Related to Adsorption under 3D Stresses. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 18(6): 651–653 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹树刚,李勇,郭平,等,2010.型煤与原煤全应力—应变过程渗流特性对比研究. *岩石力学与工程学报*, 29(5): 899–906.
- 陈占清,郁邦永,2015.采动岩体渗流力学研究进展. *西南石油大学学报*, 37(3): 69–76.
- 傅雪海,李大华,秦勇,等,2002.煤基质收缩对渗透率影响的实验研究. *中国矿业大学学报*, 31(2): 129–132.
- 李志强,鲜学福,隆清明,等,2009.不同温度应力条件下煤体渗透率实验研究. *中国矿业大学学报*, 38(4): 523–527.
- 林柏泉,周世宁,1987.煤样瓦斯渗透率的实验研究. *中国矿业大学学报*, 16(1): 21–28.
- 刘泉声,许锡昌,2000.温度作用下脆性岩石的损伤分析. *岩石力学与工程学报*, 19(4): 408–411.
- 隆清明,赵旭生,牟景珊,2008.孔隙气压对煤层气体渗透性影响的实验研究. *矿业安全与环保*, 35(1): 10–12.
- 彭涛,吴基文,任自强,等,2015.淮北煤田现今地温场特征及大地热流分布. *地球科学*, 40(6): 1083–1092.
- 孙光中,王公忠,张瑞林,等,2016.构造煤渗透率对温度变化响应规律的试验研究. *岩土力学*, 37(4): 1042–1048.
- 唐巨鹏,潘一山,李成全,等,2006.固流耦合作用下煤层气解吸—渗流实验研究. *中国矿业大学学报*, 35(2):

274–278.

- 魏建平,王登科,位乐,2013.两种典型受载含瓦斯煤样渗透特性的对比. *煤炭学报*, 38(增刊1): 93–99.
- 许江,曹偲,李波波,等,2013.煤岩渗透率对孔隙压力变化响应规律的试验研究. *岩石力学与工程学报*, 32(2): 225–230.
- 许江,袁梅,李波波,等,2012.煤的变质程度、孔隙特征与渗透率关系的试验研究. *岩石力学与工程学报*, 31(4): 681–687.
- 许江,张丹丹,彭守建,等,2011.三轴应力条件下温度对原煤渗流特性影响的实验研究. *岩石力学与工程学报*, 30(9): 1848–1854.
- 薛华庆,胥蕊娜,姜培学,等,2015.岩石微观结构 CT 扫描表征技术研究. *力学学报*, 47(6): 1073–1078.
- 杨新乐,张永利,2008.气固耦合作用下温度对煤瓦斯渗透率影响规律的实验研究. *地质力学学报*, 14(4): 374–379.
- 于永江,张华,张春会,等,2013.温度及应力对成型煤样渗透性的影响. *煤炭学报*, 38(6): 936–941.
- 张广洋,胡耀华,姜德义,1995.煤的瓦斯渗透性影响因素的探讨. *重庆大学学报(自然科学版)*, 18(3): 27–30.
- 赵阳升,胡耀青,1995.孔隙瓦斯作用下煤体有效应力规律的实验研究. *岩土工程学报*, 17(3): 26–31.
- 赵阳升,胡耀青,杨栋,等,1999.三维应力下吸附作用对煤岩体气体渗流规律影响的实验研究. *岩石力学与工程学报*, 18(6): 651–653.
- 张亮,罗炯,崔国栋,等,2016.低温气体辅助煤层气压裂中的冷冲击机理. *地球科学*, 41(4): 664–674.