

文章编号: 1673-3363-(2015)01-0168-07

# 温度和轴向变形耦合作用下 受载含瓦斯煤渗流规律研究

魏建平<sup>1</sup>, 吴松刚<sup>1</sup>, 王登科<sup>1</sup>, 李富仁<sup>2</sup>

(1. 河南理工大学河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室-省部共建国家重点实验室培训基地, 安全科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 内蒙古太西煤集团股份有限公司兴泰煤矿, 内蒙古 阿拉善盟 750300)

**摘要** 利用自主研发的三轴渗流实验装置, 恒定围压和瓦斯压力条件, 进行不同温度条件下的含瓦斯原煤渗流实验, 模拟煤体变形中瓦斯渗流过程, 建立了受载含瓦斯煤渗透性与温度和轴向应变的定性定量关系。结果表明: 1) 轴向应变对受载含瓦斯煤渗透率的影响很大, 受载含瓦斯煤屈服之前, 渗透率随轴向应变的增加而降低, 且降幅逐渐减小; 失稳破坏后, 渗透率剧增, 最高增幅为 769%。2) 温度变化对渗透率的影响与受载含瓦斯煤所处的变形阶段密不可分, 从实验角度说明了开采过程对含瓦斯煤渗流特性的影响分 3 个主导阶段, 即基质外膨胀主导阶段、基质内膨胀主导阶段和滑脱效应主导阶段。3) 建立了适合受载含瓦斯煤应变与温度共同影响下的渗透率计算公式  $k=(aT+b)e^{cT+d}$ , 该公式能很好地描述受载含瓦斯煤渗透率与应变和温度的关系。研究结果可以为瓦斯渗流规律的揭示和矿井瓦斯防治提供理论依据。

**关键词** 轴向应变; 温度; 受载含瓦斯煤; 渗透率

**中图分类号** TD 712 **文献标志码** A **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2015.01.027

## Seepage rules of loaded coal containing gas under the coupling effect of temperature and axial deformation

WEI Jianping<sup>1</sup>, WU Songgang<sup>1</sup>, WANG Dengke<sup>1</sup>, LI Furen<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control, School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China;  
2. Xingtai Coal Mine, Taixi Coal Group Co Ltd, Alxa League, Inner Mongolia 750300, China)

**Abstract** Using the self-made triaxial seepage experimental device, an experiment was carried out under the condition of constant confining pressure, gas pressure and different temperatures, to simulate the gas seepage process of raw coal containing gas during the coal body deformation, and build the qualitative and quantitative relations between the permeability of loaded coal containing gas and temperature or axial strain. The results show that: 1) Axial strain has a great impact on loaded coal containing gas. Before the yield step of loaded coal containing gas, the permeability has decreased with the increment of axial strain, and the decreasing extent decreased gradually. After the unstable failure, loaded

收稿日期: 2013-02-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2012CB723103); 教育部“创新团队发展计划”项目(IRT1235); 国家自然科学基金项目(51104059); 中国博士后科学基金项目(2013M531674); 河南省瓦斯地质与瓦斯治理省部共建国家重点实验室培育基地开放课题项目(WS2012B07)

作者简介: 魏建平(1971—), 男, 河南省驻马店市人, 教授, 博士, 从事煤矿灾害防治方面的研究。

E-mail: weijianping@hpu.edu.cn

Tel: 0391-3987885

coal containing gas was broken suddenly, resulting in the permeability increasing severely to 769%. 2) Effect of temperature variation on permeability is closely associated with the stress-strain stage of coal containing gas. The experiment demonstrates that the influence of mining process on permeability of coal containing-gas can be divided into three main phases, that is, matrix expanding outward, matrix expanding inward, and slippage effect. 3) Calculation formula about the permeability of loaded coal containing gas was built suitable for the common effect of deformation and temperature, that is,  $k=(aT+b)e^{cT+d}$ . This formula can well describe the relationship between the permeability of loaded coal containing gas and the deformation and temperature. The results can provide theoretical basis for the reveal of gas seepage law and mine gas prevention and control.

**Key words** axial permeability; temperature; loaded coal containing gas; permeability

煤储层渗透率是反映煤层内瓦斯渗流难易程度的物性参数，是煤层气开采的重要参数之一。煤层是由裂隙系统、孔隙系统，甚至包括孔洞组成的多重介质体，开采过程破坏了煤体内部原有的应力平衡状态，易产生变形，一些孔隙联通和裂隙扩展，甚至可能与孔洞导通，煤层中瓦斯渗透性发生显著变化；同时随着开采深度的增加，地温也随之增加，加之瓦斯流动区域的解吸过程和热交换过程，温度对渗透率的影响也不容忽视。

关于煤样应力-应变和温度作用影响下的煤体渗流规律已有不少学者做了大量研究。许江、蒋长宝等<sup>[1-2]</sup>通过研究原煤在受载条件下的渗流特性，得出煤岩渗透率随变形增大均呈二次多项式函数递增；徐涛、李树刚等<sup>[3-4]</sup>对无围压条件下岩石渗透率与温度和应变的关系进行了理论研究，但未明确提出应力影响下的渗透率与温度的关系；王登科等<sup>[5]</sup>研究了瓦斯压力、围压和全应力-应变过程对煤岩渗透性的影响，探讨了煤岩在不同载荷工况条件下的渗透特征，但总体上没有考虑温度的影响；尹光志等<sup>[6]</sup>通过含瓦斯煤样热流固耦合试验，表明在恒定瓦斯压力和围压的条件下，在全应力-应变过程中，随着温度的升高，煤体渗透率呈整体下降的趋势；而程瑞端、易俊等<sup>[7-8]</sup>却得出煤样渗透率随温度的增加而升高的结论；李志强等<sup>[9]</sup>则深入研究渗透率与温度和应力的关系，结果显示不同有效应力条件下，煤样渗透率与温度并非呈单调递增或递减关系，而是存在一个转折区；张丹丹等<sup>[10]</sup>通过不同温度和有效应力的煤样渗透性实验研究得出有效应力越大，煤样对温度的敏感性越差；祝婕等<sup>[11]</sup>通过实验研究和数值分析，把煤样全应力应变过程渗透性变化分为 3 个阶段，建立了煤的“应力-应变-渗透率”相关性的数学模型。

以上研究成果均不同程度地考虑了有效应力和温度对渗流特性的影响，且不同研究人员关于温度对含瓦斯煤渗透率的影响研究结果还未达成一致。因此，本文以焦作煤业集团赵固二矿无烟煤原煤煤样为研究对象，利用自主研发的含瓦斯煤热-流-固-力耦合实验装置进行实验，探讨轴向变形和温度对含瓦斯煤渗流特性的影响，建立定性定量关系，为瓦斯渗流规律的揭示和矿井瓦斯防治提供理论依据。

## 1 实验方法

### 1.1 实验装置

实验设备为自主研发的含瓦斯煤热-流-固-力耦合三轴实验装置，该装置可模拟不同地应力、不同孔隙压力、不同温度条件下的煤样瓦斯渗透性实验。如图 1 所示，该装置主要由三轴加载系统、气体控制系统、温度控制系统、真空脱气系统、数据采集系统等组成。

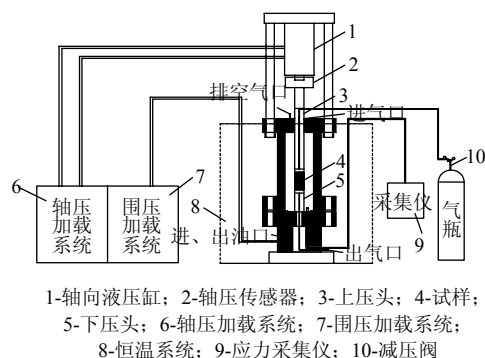


图 1 实验系统结构示意图

Fig.1 Structural diagram of experimental system

加载系统由轴压泵和围压泵组成，可施加最大轴向压力 150 MPa，最大围压 40 MPa；气体控制系统由纯度为 99.99% 的瓦斯罐、减压阀组成，由减压

阀调节气体出口压力, 压力输出范围为 0~6 MPa; 温度控制系统可控温范围为 0~100 ℃, 误差为  $\pm 0.05\%$ ; 真空脱气系统主要由真空泵和复合真空计组成, 复合真空计测量范围 1.0  $\mu\text{Pa}$ ~1.00 kPa, 控制精度  $\leq \pm 1\%$ ; 数据采集系统由气体质量流量计、位移采集器和应变采集仪组成。实验均在操作台上进行, 由计算机及控制程序控制, 确保实验数据准确可靠。

## 1.2 煤样的采集与制备

本实验所用煤样取自焦煤集团赵固二矿二<sub>1</sub>煤层, 该煤层以半亮-光亮型煤为主, 煤体坚固性系数较高, 内生裂隙不太发育。对所取煤样进行了工业分析、吸附常数和镜质组反射率的测定, 所得的基础参数如表 1 所示。

表 1 煤样工业分析、吸附常数和镜质组反射率测定结果  
Table 1 Determination results of industrial analysis, adsorption constant and vitrinite reflectance for coal

煤质工业分析			吸附常数		镜质组
$M_{\text{ad}}/\%$	$A_{\text{ad}}/\%$	$V_{\text{daf}}/\%$	$a$	$b$	反射率 $R_{\text{max}}/\%$
3.10	27.48	10.59	52.945	1.063	3.95

从新鲜煤壁选取尺寸大小合适的煤块, 对其进行封蜡。在实验室用  $\phi 50 \text{ mm} \times L 100 \text{ mm}$  的岩芯管垂直于煤样层理方向钻取, 以保证煤样的原生层位物性参数不变。在钻取煤芯过程中要保持均匀缓慢钻取, 以确保钻取煤样的完整性, 并在切割机将钻取的煤样上下端面打磨光滑、平行, 平滑度小于 0.02%, 以保证加载时煤样上下端面受力均匀。最后将制作好的煤样放在干燥箱里干燥, 以排除水分对实验的影响。煤样实物图如图 2 所示。



图 2 实验原煤试样

Fig.2 Raw coal for testing

## 1.3 实验原理

当前研究瓦斯在煤层中的运移有 2 种方式: 一是在裂隙和孔隙中的瓦斯渗流流动; 二是吸附瓦斯从微孔面的解吸, 并由微孔中向裂隙和孔隙中扩散。但从宏观角度看, 在开采过程中瓦斯在煤层中的运动可以视为渗流流动, 服从达西定律。文献[12]

通过拟压力法, 推导出更准确的渗透率计算公式, 见公式(1), 本实验渗透率  $k$  按下式计算:

$$k = \frac{2LP_r Q T_r (\mu \bar{Z})}{AT_0(P_0^2 - P_1^2)} \quad (1)$$

式中:  $k$  为渗透率, mD;  $Q$  为实验条件下的瓦斯渗流流量,  $\text{cm}^3/\text{s}$ ;  $L$  为试样长度, cm;  $A$  为煤样横截面面积,  $\text{cm}^2$ ;  $T_r$  为室内温度, K;  $T_0$  为实验温度, K;  $P_r$  为室内大气压力;  $P_1$  为瓦斯出口端压力, MPa;  $P_0$  为瓦斯进口端压力, MPa;  $Z$  为偏差因子;  $\mu$  为气体黏度,  $\times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。3 煤样进气口和出气口温度相同, 气体压力不同, 根据气体物理特性<sup>[13]</sup>, 在同一温度条件下(温度范围为 0~100 ℃)以及 0~10 MPa 的气体压力范围内, 偏差因子变化很小, 取平均值,  $Z = \bar{Z}$ 。

甲烷气体的黏度按下式<sup>[14]</sup>计算:

$$\mu = 1.36 \times 10^{-4} T^{0.77} \quad (2)$$

式中:  $\mu$  为气体黏度,  $\times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ;  $T$  为实验温度, K。

## 1.4 实验方案与步骤

本实验主要考察在轴向变形和温度对含瓦斯煤渗流特性的影响。煤矿采掘向深部延伸过程中伴随煤体变形和地温升高, 不同地点地温梯度值不同, 通常为 1~3 ℃/100 m。据有关资料统计<sup>[15]</sup>, 目前我国煤矿采掘煤层温度不超过 45 ℃, 因此实验温度范围设定在 20~40 ℃, 轴向应变每次加载 0.3%, 直至煤样破裂。

为保证实验基础条件的一致性和数据的可比性, 整个实验过程采用 3 组原煤煤样进行, 每组不少于 3 个煤样, 取平均值后得到每组煤样的实验结果。为保证实验基础条件的一致性和数据的可比性, 本实验过程为固定气体压力和加载条件, 改变温度, 待 3 个温度渗流实验完成之后, 调至下一个轴向应变阶段。具体实验方案如表 2 所示。

表 2 受载含瓦斯煤实验方案

Table 2 Experimental scheme of loaded coal containing gas

围压/MPa	温度/℃	应变/%	进气端气压/MPa
3	20, 30, 40	0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5, 1.8, 2.1, 2.4, 2.7	0.9

实验基本步骤如下:

① 实验前准备。将瓦斯报警器放置于实验室, 检查实验设备安全性和气密。

② 煤样安装。将干燥原煤试样装入三轴压力室内, 上下压头涂抹 704 硅胶, 同时煤样壁上一定要抹胶, 用热缩管包裹煤样。

③ 真空抽气。将制作好的试样装入渗流装置, 关闭进气阀, 打开出气阀, 抽真空 12 h, 以除去试件中的杂质气体。

④ 调试试验条件。将围压加载至 3 MPa, 轴压按轴向应变进行加载, 待加载完成后, 调试试验温度至 20 °C。

⑤ 瓦斯渗流试验。在管路中充入 0.9 MPa 压力的瓦斯气体, 待试验煤样吸附平衡后, 由于是块煤试样, 预计吸附平衡时间为 144~168 h(6~7 d)。当煤样达到吸附平衡后, 打开出气口阀门, 待气体流量稳定后, 记录每分钟瓦斯渗流量。

⑥ 将温度分别调至 30, 40 °C, 重复步骤⑤。

⑦ 然后改变轴向应变至预定值, 调试实验温度, 直至同一轴向应变下, 不同温度的渗透率测定

结束为止。

⑧ 再将恒温水浴调至另一预定温度, 重复步骤⑤~⑦, 直至实验结束。

## 2 实验结果分析及讨论

### 2.1 实验结果

图 3 为不同温度(20, 30 和 40 °C)下原煤试样渗透率-应变和应力-应变的关系曲线, 图 4a 为恒温条件下受载含瓦斯煤渗透率随轴向应变的变化曲线, 图 4b 为恒轴向应变条件下受载含瓦斯煤渗透率随温度的变化曲线。由图 4a 可知, 该曲线较清晰地反映了整个应力-应变过程中试样的压密阶段、弹性阶段、屈服阶段、失稳阶段和残余应力阶段, 与文献[6]研究成果一致。

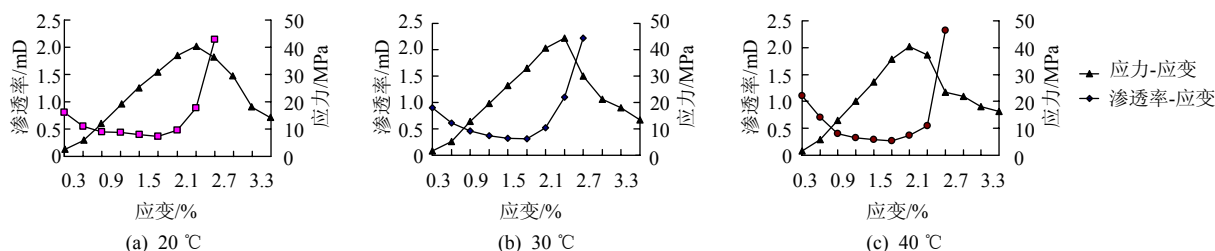


图 3 不同温度下受载含瓦斯煤渗透率-应力-应变关系曲线

Fig.3 Relation curves of permeability and stress with strain of loaded coal containing gas under different temperature

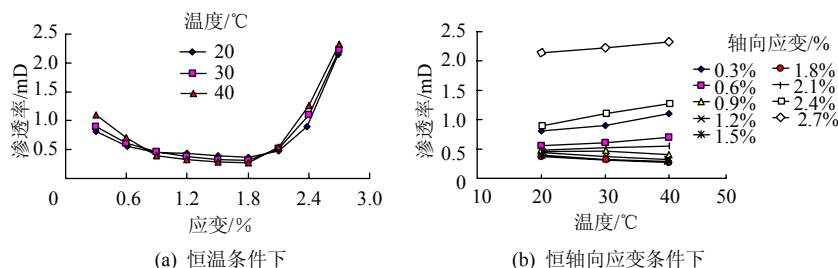


图 4 受载含瓦斯煤渗透率曲线

Fig.4 Relation curves of permeability and temperature of loaded coal containing gas at constant axial deformation

### 2.2 渗透率随轴向应变的变化规律分析

由图 4a 可看出, 以 30 °C 为例, 在轴向应变  $0.3\% \leq \varepsilon < 0.9\%$  内, 即压密阶段内, 煤体中含有大量的孔隙和裂隙, 在外部载荷的作用下, 煤中部分原生裂隙闭合, 裂隙宽度变窄。这就造成煤样的孔隙率减小, 瓦斯流动通道变窄, 渗透率从 0.9 mD 降到 0.464 mD, 下降约 48.4%。在轴向应变  $0.9\% \leq \varepsilon < 1.8\%$  内, 即弹性阶段, 维持时间较长, 煤样内部原有的裂隙和孔隙在较大的压应力作用下闭合, 并产生了部分新的裂隙, 其应变大部分属可逆应变, 煤样的体积随着轴向应变的增加而减小, 造成煤样的孔隙率继续减小, 瓦斯流动通道变得更

窄甚至闭合。该阶段在渗流过程中渗透率从 0.464 mD 降至 0.308 mD, 下降约 33.6%, 且降低的速度较压密阶段缓慢。在轴向应变  $1.8\% \leq \varepsilon < 2.1\%$  后, 试样逐渐进入屈服阶段, 煤样内部会有微裂纹的产生和扩展, 煤样渗透率增加约 41.3%。在轴向应变  $\varepsilon \geq 2.1\%$  后, 即失稳阶段, 煤体达到峰值强度之后, 煤样内部之前形成的微裂纹开始贯通, 形成宏观的破坏裂纹, 此时煤样已经开始失稳, 应力陡然下降, 渗透率陡增, 渗透率从 0.52 mD 升至 2.22 mD, 约增长 327%, 与文献[16]研究结果相符。对试样继续加载, 煤样承载能力并未完全消失, 而是保持在一个较小的应力水平, 即残余应力阶段, 此阶段渗透

率增加较失稳阶段快,难以用气体流量计测量。

由此可知,煤矿井下采动对工作面煤层瓦斯渗透率具有很大的影响。煤层的采动影响打破了煤体原有应力平衡状态,使得应力重新分布,工作面前方会形成应力集中区,支承压力会增大几倍,工作面前方煤体处于压密阶段,煤体裂隙被压实,渗透率降低,形成一道阻碍瓦斯流动的障碍区,不利于煤层瓦斯的抽采。一旦煤体达到峰值强度之后,即处于失稳阶段,渗透率会突然增大,有利于瓦斯的渗出,瓦斯涌出量会突然增加,有利于瓦斯抽采,但也容易引发瓦斯事故。因此,对瓦斯压力相对较高、渗透率相对较低的煤层,应严格控制开采速度,做好支护工作和瓦斯抽放。为提高瓦斯抽放率,可实施一定的卸压增透措施,在措施实施过程中应及时记录瓦斯涌出量和观测煤体应变,及时有效地控制煤层卸压增透程度。

### 2.3 渗透率随温度的变化规律分析

温度变化对煤样渗透率的影响主要从煤样受热变形、气体受热膨胀等几个方面考虑。

#### 1) 受载含瓦斯煤受热变形分析

对煤样在受热条件下的变形作如下分析,应用热力学定律<sup>[17]</sup>,有

$$\left(\theta \frac{\partial \eta}{\partial T} - \frac{\partial e}{\partial T}\right) dT + \left(\theta \frac{\partial \eta}{\partial \varepsilon_{ij}} + \sigma_{ij} - \frac{\partial e}{\partial \varepsilon_{ij}}\right) d\varepsilon_{ij} + \left(\theta \frac{\partial \eta}{\partial q_a} - \frac{\partial e}{\partial q_a}\right) dq_a \geq 0 \quad (3)$$

式中:  $\theta$  为介质绝对温度;  $\eta$  为熵;  $\varepsilon_{ij}$  为应变分量;  $\sigma_{ij}$  为应力分量;  $e$  为介质内能;  $q_a$  为内变量;  $T$  为温度。

太沙基(Terzaghi)提出的有效应力原理为

$$\sigma' = \sigma - p \quad (4)$$

式中:  $\sigma'$  为有效应力;  $\sigma$  为总应力;  $p$  为孔隙压力。

由式(3)可看出,煤体受热后,煤体发生形变。由式(4)可知:在保持孔隙压力  $p$  不变的条件下,在轴向方向,煤样所受的有效应力  $\sigma'$  随着施加在煤样上的总应力  $\sigma$  增加而增加。若温度升高导致煤体热膨胀应力大于有效应力,则煤基质向外膨胀,裂隙张开,渗透率增加;反之,煤基质向内膨胀,堵塞了孔隙喉道,此约束近似于刚性约束,煤体总体积无法向外膨胀,煤体升温引起煤基质颗粒的膨胀应变只能挤占内部孔隙空间,导致孔隙率减小,导致渗透率随温度升高而降低。

#### 2) 温度对气体渗流的影响分析

分析温度与压力对密度的影响,近似有

$$\rho = \rho_0 [1 + c_f(p - p_0) - \beta(T - T_0)] \quad (5)$$

$$c_f = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp}; \quad \beta = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_p$$

式中:  $c_f$  为气体压缩系数;  $\beta$  为气体膨胀系数;  $p_0$ ,  $T_0$  分别为参考压力和参考温度;  $\rho_0$  为参考压力与参考温度下的密度。

由式(5)可看出:气体压力不变,温度升高后,气体密度降低,体积膨胀,瓦斯分子的活性和内能增大,气体分子热运动加剧,分子自由程缩短,会出现滑脱现象,这样就与连续流相比多出一个附加的流量,促进 Klinkenberg 效应的产生,导致渗透率增加。

由图 4b 可得出,温度和渗透率的关系与受载含瓦斯煤所处应力-应变阶段密切相关。在较小的轴向应变  $0.3\% \leq \varepsilon < 0.9\%$  范围内,渗透率随温度的升高而增大,渗透率变化幅度最大为  $\varepsilon = 0.3\%$  时,从  $20 \sim 40^\circ\text{C}$  渗透率增加约 35%。在图 4b 中,随着轴向应变的增加,  $40^\circ\text{C}$  的渗透率曲线下降斜率比  $20, 30^\circ\text{C}$  要大,且在轴向应变约为  $0.9\%$  时出现交叉。由上述分析可知:在低有效应力阶段(即施加在煤样轴向方向的应力  $\sigma$  不大时),温度升高后,煤基质向外膨胀,使渗透率增加。随温度升高,煤样塑性增强,弹性模量降低,引起煤样孔隙张开和骨架膨胀,同样试验条件下,高温煤样具有更大的可压缩性,孔隙的闭合速度也较快,因此,  $40^\circ\text{C}$  的渗透率曲线下降速度高于  $20, 30^\circ\text{C}$ ,并使不同温度的渗透率曲线出现交叉。在轴向应变处于  $0.9\% \leq \varepsilon < 2.1\%$  范围内时,煤样渗透率随温度的升高而降低,且降低的幅度逐渐较小。在此阶段中,煤体基质内膨胀开始显现,随着轴向应变的增加,内膨胀逐渐占据主导地位,内部裂隙被压缩,孔隙率减小,导致渗透率降低,所以煤样渗透率宏观表现出了一种随温度增大而减小的现象。在失稳阶段,煤样内部宏观裂纹基本形成,煤体热膨胀影响渗透的效果逐渐降低,随着温度的升高,瓦斯分子滑脱效应越来越明显,渗透率随着温度的升高而增加。

由此可知,随着煤炭开采深度的增加,地温会随之增加。当煤层处于压密阶段,提高煤层温度有利于瓦斯抽放。当煤层处于弹性阶段,随着温度的升高,煤层渗透率降低,瓦斯抽放效果不理想,致使工作面瓦斯与煤层深处之间的瓦斯压力梯度增大,增加了煤与瓦斯突出危险性。



## 2.4 受载含瓦斯煤渗透率与温度、应变的关系

根据以上分析结果, 对实验数据进行回归分析、整理, 得出在煤样失稳之前( $0.3\% \leq \varepsilon < 1.8\%$ ), 轴向应变与温度共同影响下的渗透率计算公式。

$$k = (aT + b)\varepsilon^{cT+d} \quad (6)$$

式中:  $a = -0.0024$ ,  $b = 0.5116$ ,  $c = -0.0192$ ,  $d = -0.0321$

图5分别显示了温度分别为20、30和40℃条件下原煤试样气体渗透率试验结果和对应的数值计算结果。结果表明, 拟合公式(6)计算轴向应变和温度共同影响下的渗透率合理、可靠。可将现场监测得轴向应变和温度代入式(6), 预测煤层瓦斯渗透率, 及时指导瓦斯灾害的前期防治工作。

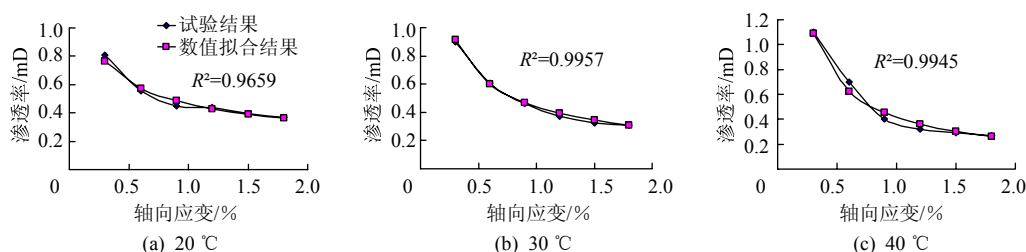


图5 不同温度下, 受载含瓦斯煤渗透率的数值计算和试验结果对比

Fig.5 The comparison between numerical calculation and experimental data of permeability of loaded coal containing gas under different temperature

## 3 结论

1) 在压密和弹性阶段, 当瓦斯压力和围压保持恒定时, 随着轴向应变的增加, 煤层部分原始裂隙闭合或者宽度变窄, 渗透率降低。在失稳阶段, 裂隙充分发育, 渗透率会骤增。煤矿井下采动对开采层的渗透率具有很大的影响, 应严格控制开采速度, 及时观测煤层瓦斯涌出量和应变, 做好支护措施和抽放工作。

2) 在恒定瓦斯压力和围压条件下, 温度变化对渗透率的影响与受载含瓦斯煤所处应力-应变阶段密切相关。本试验压密阶段, 渗透率随温度的升高而增加, 煤体的外膨胀占主导作用, 有利于瓦斯抽放。在弹性阶段, 渗透率随温度的升高而减小, 煤体基质内膨胀占主导作用, 该阶段瓦斯抽放效果不明显, 工作面瓦斯与煤层深处之间的瓦斯压力梯度增大, 煤与瓦斯突出危险性增加。在煤样处于失稳阶段之后, 滑脱效应占主导作用, 渗透率随温度的增加呈递增趋势。

3) 建立了适合受载含瓦斯煤渗透率与应变、温度的数学关系, 为矿井瓦斯治理和瓦斯抽放提供了理论依据。

## 参考文献:

- [1] 许江, 李波波, 周婷, 等. 加卸载条件下煤岩应变特性与渗透特性的试验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 37(9): 1494-1497.
- 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, 2013, 37(9): 1494-1497.
- [2] 蒋长宝, 尹光志, 李晓泉, 等. 突出煤型煤全应力-应变全程瓦斯渗流试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 2): 3482-3487.
- JIANG Changbao, YIN Guangzhi, LI Xiaoquan, et al. Experimental study of gas permeability of outburst coal briquettes in complete stress-strain process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup 2): 3482-3487.
- [3] 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 Chun'an, 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.
- [4] 李树刚, 钱鸣高, 石平五. 煤样全应力应变过程中的渗透系数-应变方程[J]. 煤田地质与勘探, 2001, 29(1): 22-24.
- LI Shugang, QIAN Minggao, SHI Pingwu. Permeability-strain equation relation to complete stress-strain in path of coal sample[J]. Coal Geology and Exploration, 2001, 29(1): 22-24.
- [5] 王登科, 刘建, 尹光志, 等. 突出危险煤渗透性变化的影响因素探讨[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3469-3474.

- WANG Dengke, LIU Jian, YIN Guangzhi, et al. Research on influencing factors of permeability change for outburst-prone coal[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3469-3474.
- [6] 尹光志, 蒋长宝, 许江, 等. 含瓦斯煤热流固耦合渗流实验研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(9): 1496-1499.  
YIN Guangzhi, JIANG Changbao, XU Jiang, et al. Experimental study of thermo-fluid-solid coupling seepage of coal containing gas[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(9): 1496-1499.
- [7] 程瑞端, 陈海焱, 鲜学福, 等. 温度对煤样渗透系数影响的实验研究[J]. 煤炭工程师, 1988(1): 13-16.  
CHEN Ruirui, CHEN Haiyan, XIAN Xuefu, et al. Experimental study on the impact of temperature on the coefficient of permeability of coal sample[J]. Coal Engineer, 1988(1): 13-16.
- [8] 易俊, 姜永东, 鲜学福. 应力场、温度场瓦斯渗流特性实验研究[J]. 中国矿业, 2007, 16(5): 113-116.  
YI Jun, JIANG Yongdong, XIAN Xuefu. Experimental research on the characteristics of methane seepage in stress field and temperature field[J]. China Mining Magazine, 2007, 16(5): 113-116.
- [9] 李志强, 鲜学福, 隆晴明, 等. 不同温度应力条件下煤体渗透率实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(4): 524-526.  
LI Zhiqiang, XIAN Xuefu, LONG Qingming, et al. Experiment study of coal permeability under different temperature and stress[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(4): 524-526.
- [10] 许江, 张丹丹, 彭守建, 等. 三轴应力条件下温度对原煤渗流特性影响的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(9): 1849-1853.  
XU Jiang, ZHANG Dandan, PENG Shoujian, et al. Experimental research on impact of temperature on seepage characteristics of coal containing methane under triaxial stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(9): 1849-1853.
- [11] 祝捷, 姜耀东, 孟磊, 等. 载荷作用下煤体应变与渗透性的相关性研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(6): 985-987.  
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): 985-987.
- [12] 陈卫忠, 杨建平, 伍国军, 等. 低渗透介质渗透性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 237-239.  
CHEN Weizhong, YANG Jianping, WU Guojun, et al. Experimental study on permeability in low permeability media[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 237-239.
- [13] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999: 56-58.
- [14] 李志强. 重庆沥鼻峡背斜煤层气富集成藏规律及有利区带预测研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [15] 郭平业. 我国深井地温场特征及热害控制模式研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2009.
- [16] 曹树刚, 李勇, 郭平, 等. 型煤与原煤全应力-应变过程渗流特性对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 900-905.  
CAO Shugang, LI Yong, GUO Ping, et al. Comparative research on permeability characteristics in complete stress strain process of briquettes and coal samples[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 900-905.
- [17] 梁冰. 煤和瓦斯突出固流耦合失稳理论[M]. 北京: 地质出版社, 2000: 26-37.