

地应力场中含瓦斯煤岩变形破坏过程中瓦斯渗透特性的试验研究

尹光志^{1,2}, 黄启翔^{1,2}, 张东明^{1,2}, 王登科³

(1. 重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400044; 2. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044;
3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 利用典型煤与瓦斯突出矿井松藻煤电集团打通一矿突出煤层原煤制备型煤试件, 应用自行研制的含瓦斯煤样三轴瓦斯渗流试验装置, 进行含瓦斯型煤试件的全应力-应变过程瓦斯渗透特性变化规律的试验研究。研究表明: 恒定瓦斯压力时, 在某一围压下, 峰前渗流速度随轴向应力先减小后缓慢增大, 到达峰值应力后, 随轴向应力的减小而增大。全应力-应变过程曲线与渗流速度-轴向应变曲线具有较好的对应关系。煤样的峰值渗流速度随围压的增加而减小, 呈现较明显的线性关系。对比试验表明, 在一定的围压和瓦斯压力范围内, 保持瓦斯压力不变增加围压可减小煤样渗透率, 保持围压不变增加瓦斯压力可增大煤样渗透率。研究结果对于利用地应力场抽采瓦斯、通过瓦斯涌出量预测煤岩的变形破坏具有现实指导意义。

关键词: 采矿工程; 地应力场; 含瓦斯煤样; 全应力-应变过程; 渗流速度; 固气耦合

中图分类号: TD 712

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2010)02-0336-08

TEST STUDY OF GAS SEEPAGE CHARACTERISTICS OF GAS-BEARING COAL SPECIMEN DURING PROCESS OF DEFORMATION AND FAILURE IN GEOSTRESS FIELD

YIN Guangzhi^{1,2}, HUANG Qixiang^{1,2}, ZHANG Dongming^{1,2}, WANG Dengke^{1,2}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Key Laboratory for the Exploitation of Southwest Resources and the Environmental Disaster Control Engineering of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Based on the briquets of the outburst coal seam of typical coal and gas outburst mine of Datong in Songzao Coal and Electricity Company, by means of self-developed triaxial gas-seepage experimental device, the experimental research of permeability of gas-bearing briquets in the complete stress-strain process is performed. The research results show as follows: if the gas pressure is fixed, the seepage velocity of briquets drops at first and rises later with increasing axial stress, and increases after peak stress. There is significant corresponding relationship between the complete stress-strain process curve and the seepage velocity-strain curve. The seepage velocity in peak stress decreases with the increase of confining pressure, and indicates obvious linear relationship. The comparative experiments in certain confining pressure and gas pressure show that rising confining pressure can decrease permeability of briquets and rising gas pressure can increase permeability of briquette specimens. The results have a referential value for using geostress field draining gas in coal bed and predicting deformations and failure of coal through gas emission.

收稿日期: 2009-07-27; **修回日期:** 2009-10-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50874124); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2005CB221502); 国家科技重大专项项目(2008ZX05034-002); 重庆市自然科学基金计划重点项目(CSTC, 2008BA6028)

作者简介: 尹光志(1962-), 男, 博士, 1982年毕业于重庆大学采矿工程系矿山工程物理专业, 现任教授、博士生导师、院长, 主要从事岩石力学与采矿工程等方面的教学与研究工作。Email: gzyin@cqu.edu.cn

Key words: mining engineering; geostress field; briquet containing gas; complete stress-strain process; seepage velocity; solid and gas coupling

1 引言

在煤矿的地下开采过程中, 煤岩体受采动作用的影响, 要发生变形和破坏, 伴随着煤岩的变形和破坏, 其瓦斯渗透特性也将发生变化, 这是影响工作面瓦斯涌出和引起煤与瓦斯突出等煤矿瓦斯动力现象的重要原因^[1, 2]。

煤岩的瓦斯渗透特性是煤岩的一种重要物理性质。该性质受煤岩所处的地应力状态和煤岩的变形破坏状态的影响很大。许多学者对地应力场中煤岩的瓦斯渗透特性进行过研究, 林柏泉和周世宁^[3]研究了在施加围压状态下, 煤样渗透率与孔隙压力及煤样变形间的关系; 谭学术和鲜学福^[4]研究了型煤的渗透特性和应力状态的关系; 梁冰等^[5]研究了煤层瓦斯流动与煤体变形的数值耦合; 赵阳升等^[6]研究了煤岩的变形和吸附作用对其渗透特性的影响; 唐巨鹏等^[7]研究了有效应力和解吸作用对煤层气渗流的影响; J. Gawuga^[8]研究了气体在应力作用下的含碳地层中的渗流规律; J. R. E. Enever 和 A. Henning^[9]研究了煤层中有效应力与渗透率的关系; C. R. Mckee 等^[10]研究认为煤体渗透率随煤层埋藏深度和地应力的增加而呈指数降低; 何伟钢等^[11]发现煤体渗透率与地应力呈幂指数关系; 杨永杰等^[12]通过原煤煤样的水渗透试验, 研究了煤岩在变形破坏过程中的渗透率变化规律。前人的研究丰富了煤岩体瓦斯流动理论, 但对含瓦斯型煤试件的全应力-应变过程中模拟的地应力状态和变形破坏对其瓦斯渗透特性的影响方面的研究还鲜见报道。

为此, 本文应用自行研制的含瓦斯煤样三轴渗流试验装置模拟地应力场, 观察含瓦斯型煤试件在模拟三向地应力状态下变形破坏的全应力-应变过程, 研究在全应力-应变过程中煤岩瓦斯渗透特性的变化规律, 重点模拟重力应力作用下煤岩变形破坏过程中瓦斯渗透特性的变化, 研究结果为利用地应力提高瓦斯抽采效率, 通过瓦斯涌出量预测煤岩的变形破坏以及煤与瓦斯突出的预测预报等方面提供了新的思路。

2 试验过程

2.1 试验原理和设计

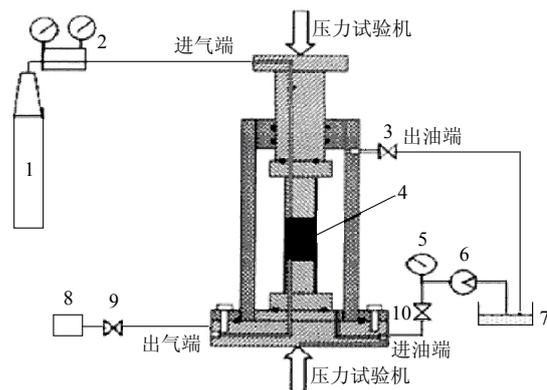
本试验应用自行研制的煤岩三轴瓦斯渗流装置模拟地应力场中含瓦斯煤岩的受力情况和瓦斯渗流情况。地应力场主要包括重力应力和构造应力^[13], 重力应力是普遍存在的一种地应力, 重力作用不仅产生垂直应力, 而且由于岩体的泊松效应和流变效应还会产生水平应力^[14], 且重力应力易于测算, 所以, 本试验以模拟重力应力作用下煤岩变形破坏过程中瓦斯渗透特性的变化为主。对模拟水平应力的作用本文作不同围压的对比试验。

2.2 试件的制作

本试验所用的煤样取自重庆松藻矿务局打通一矿, 将取回的原煤在粉碎机上进行粉碎后, 筛选其中 40~80 目的颗粒制成试验用的粉煤。在粉煤中加入适量的水, 搅拌均匀。之后, 在成型模具上用 200 kN 的成型压力加压, 压制成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱体型煤试件。将制成的试件在烘箱中烘干。试件准备完毕后, 测得试件单轴抗压强度为 0.43 MPa, 屈服应力为 0.31 MPa。

2.3 试验设备

本试验使用自行研制的煤岩三轴瓦斯渗流装置, 该渗流装置轴向载荷采用压力试验机外部加载, 围压由电动油泵加载, 瓦斯气体由高压瓦斯气瓶提供, 可模拟地应力场中含瓦斯煤岩的瓦斯渗流特性。煤岩三轴瓦斯渗流装置如图 1 所示。



1—高压瓦斯气瓶; 2—减压阀; 3, 9, 10—高压阀; 4—煤样; 5—压力表; 6—电动油泵; 7—油箱; 8—电子气体流量计

图 1 含瓦斯煤样三轴瓦斯渗流试验装置示意图

Fig.1 Sketch of triaxial gas-seepage experimental device of briquet containing gas

轴向载荷由岛津 250 伺服压力试验机提供, 该试验机可自动采集轴向载荷和压头行程的数据。瓦

斯流量由数字式电子气体流量计采集。

2.4 试验步骤

(1) 试件的装配

将准备好的型煤侧面涂上适当厚度的一层硅橡胶，凉干 5 h。将长度为 105 mm 左右的热收缩套套在试件的侧面。将试件连同热收缩套装在煤岩三轴瓦斯渗流装置的试件底座上，安装导向支架，加热热收缩套，使其收缩。连接试件瓦斯渗透进气端接口，吊装煤岩三轴瓦斯渗流装置顶盖，拧紧顶盖紧固螺栓。试件装配完毕。

(2) 试验方案

将渗流装置提升到压力试验机的加载平台，对准试验机与渗流装置的加载压头。先打开进油阀、出油阀，关闭回油阀，将压力油泵入渗流装置的三轴压力室内。关闭出油阀，对试件施加围压。同时，打开高压气瓶减压阀，给试件通入瓦斯。为了保证试件和热收缩管之间的密封，施加的围压应该大于瓦斯压力。在本试验中，由于主要模拟地应力对煤岩瓦斯渗透特性的影响，所以，相对于瓦斯压力，围压被作为对试件渗透率影响较大的主要因素来考虑。试验分 2 种方式进行：(1) 恒定瓦斯压力变化围压的试验。(2) 恒定围压变化瓦斯压力的对比试验。方式一所加瓦斯压力为 0.4 MPa，围压分别为 2, 4 和 6 MPa；方式二为围压为 2 MPa，分别施加瓦斯压力 0.4 和 0.6 MPa 的对比试验。

3 试验结果分析

本试验主要模拟不同地应力下，三轴应力状态的煤岩在全应力 - 应变过程中的瓦斯渗透特性的变化规律。

3.1 参数的确定

根据已有的研究成果，型煤试件是一种多孔介质，瓦斯在多孔介质中的渗流特性取决于流动方向上的孔隙数量、孔隙大小、孔隙连通性和孔隙两端的压力。由流体通过窄缝的层流方程可推出：当所处应力场一定时试件的渗透率公式^[15]为

$$K = \frac{2Q'P_a\mu L}{(P_1^2 - P_2^2)A} \quad (1)$$

式中： K 为渗透率(m^2)； Q' 为瓦斯渗流速度(mL/s)； P_a 为大气压(MPa)； μ 为瓦斯黏滞系数，室温 20 °C 时 $\mu = 1.087 \times 10^{-6} Pa \cdot s$ ^[16]； L 为型煤试件长度(mm)； A 为型煤试件横截面积(m^2)； P_1 为试件进口瓦斯压

力(MPa)； P_2 为试件出口瓦斯压力(MPa)。

近期研究成果显示，当所处应力场一定时，峰后煤岩试件的渗透率与渗流速度的关系^[17]为

$$K = \frac{\mu Q' L}{A(P_1 - P_2)} \quad (2)$$

由此可见，型煤试件的瓦斯渗流速度与渗透率是正线性相关的，因此，可通过渗流速度与其他相关物理量的关系曲线来反映出试件的渗透特性。

3.2 含瓦斯煤样全应力 - 应变曲线

恒定瓦斯压力时煤样应力 - 应变曲线如图 2 所示。由图 2 可知，含瓦斯型煤试件的变形过程大致可分为 4 个阶段：密实阶段、弹性变形阶段、屈服阶段和破坏阶段。在密实阶段，随着轴向应力和应变的增加，煤样的弹性模量也增加，应力 - 应变曲线微向上弯曲，这是试件内部的孔隙和裂隙被压密实的结果；在弹性变形阶段，煤样的应力 - 应变基本呈线性关系，弹性模量为一定值，服从 Hooke 定律；在屈服阶段，当轴向应力达到屈服强度时，煤样的内部开始出现损伤而导致试件的承载能力降低，此时，煤样的弹性模量降低，应力 - 应变曲线开始偏离直线，向下弯曲，这是煤样内部损伤不断发展，不断产生新的裂纹的结果；在破坏阶段，煤样的轴向应力达到强度极限，应力随应变的增加而减小，这是煤样内部出现贯穿煤样的宏观裂纹的结果。在相同的瓦斯压力下，随着围压的增加，煤样的弹性模量增加，煤样的刚度变大，同时，试件的抗压强度也表现出增加的趋势，这与不含瓦斯煤样表现出的性质类似。

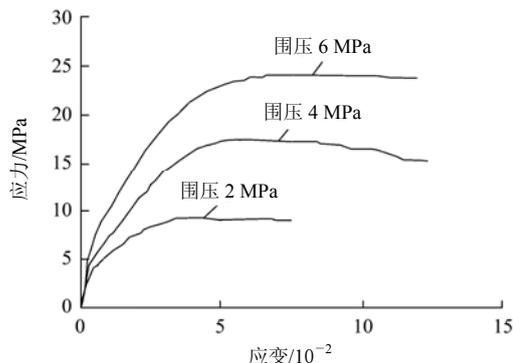


图 2 恒定瓦斯压力时煤样应力 - 应变曲线

Fig.2 Axial stress-strain curves of briquet in fixed gas pressure

3.3 煤样渗透特性与应力的关系

(1) 煤样破坏前渗透特性与轴向应力的关系

恒定瓦斯压力时煤样峰前渗流速度 - 轴向应力曲线如图 3 所示。由图 3 可知, 当瓦斯压力恒定时, 在某一围压下, 煤样的渗流速度随着轴向应力的增加而减小, 在密实阶段和弹性变形阶段, 随着轴向应力的增加, 煤样的渗流速度单调递减, 主要原因是在这 2 个阶段煤样要产生压密变形, 孔隙性要降低; 在屈服阶段, 煤样的渗流速度呈现出先递减后趋于平直的趋势, 主要原因是煤样的内部开始出现损伤, 产生微裂纹, 孔隙性有所增加。当瓦斯压力恒定, 在不同的围压下, 煤样峰前的渗透特性和轴向应力的关系表现出相同的变化趋势, 由于围压有阻碍轴向变形和环向压密的作用, 随着围压的升高, 煤样的渗透特性整体上趋于降低。

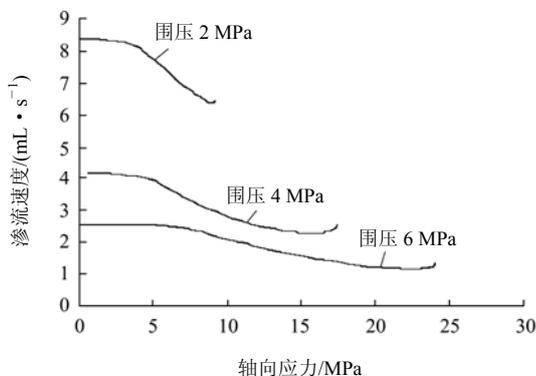


图 3 恒定瓦斯压力时煤样峰前渗流速度 - 轴向应力曲线
Fig.3 Seepage velocity-axial stress curves before peak of briquet in fixed gas pressure

当瓦斯压力一定时, 可将峰值应力前煤样的渗流速度和轴向应力关系进行分段拟合, 拟合关系如下:

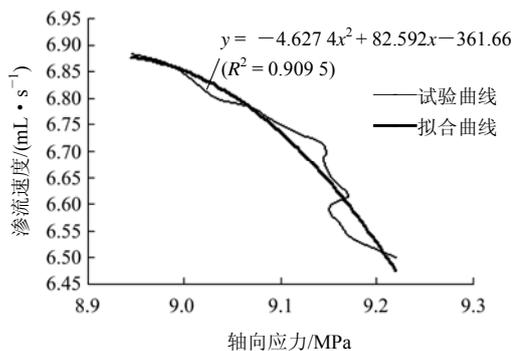
$$\left. \begin{aligned} Q &= d\sigma_1 + f \quad (\text{密实阶段}) \\ Q &= ae^{-b\sigma} \quad (\text{弹性及屈服阶段}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: Q 为渗流速度(mL/s); σ_1 为轴向应力(MPa); d, f, a, b 均为拟合系数。

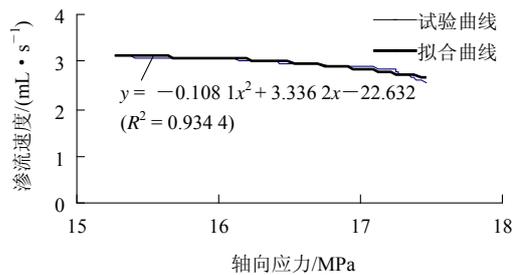
从式(3)可看出, 煤样在峰值前的密实阶段, 渗流速度与轴向应力呈线性关系, 在峰值前的弹性及屈服阶段, 渗流速度与轴向应力呈负指数关系。

(2) 煤样峰后渗透特性与轴向应力的关系

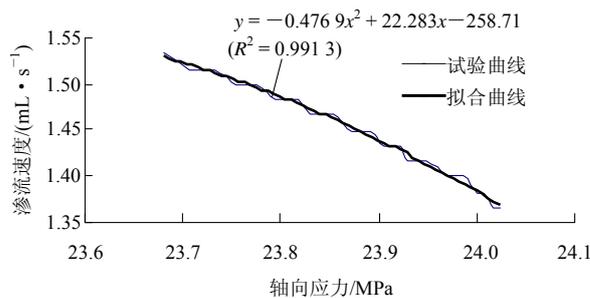
恒定瓦斯压力时煤样峰后渗流速度 - 轴向应力曲线如图 4 所示。由图 4 可知, 在峰后破坏阶段, 当瓦斯压力恒定时, 在某一围压下, 煤样的渗流速度随着位移控制加载方式的轴向控制应力的减小而



(a) 围压 2 MPa



(b) 围压 4 MPa



(c) 围压 6 MPa

图 4 恒定瓦斯压力时煤样峰后渗流速度 - 轴向应力曲线
Fig.4 Seepage velocity-axial stress curves after peak of briquet in fixed gas pressure

增大, 主要原因是煤样的轴向应力达到强度极限, 煤样内部出现贯穿煤样的宏观裂纹, 煤样的孔隙性和渗透性大大增加, 同时, 煤样的变形处于逐渐向延性发展的阶段, 还未进入表现出塑性流动特性的蠕变状态, 不会出现变形过程中部分裂隙变窄和碎屑阻塞的情况, 所以煤样渗流速度随应力的增加而下降的趋势较为明显。当瓦斯压力恒定, 随着围压的增加, 煤样的峰后渗透特性和轴向应力的关系表现出相同的变化趋势, 由于围压有阻碍轴向变形和环向压密的作用, 随着围压的升高, 煤样的渗透特性整体上趋于降低。

当瓦斯压力一定时, 可将峰后煤样的渗流速度和轴向应力关系进行拟合, 拟合关系为

$$Q = l\sigma_1^2 + m\sigma_1 + n \quad (4)$$

式中： σ_1 为轴向应力(MPa)； l ， m ， n 均为拟合系数。

从式(4)可以看出，煤样在峰后阶段，渗流速度与轴向应力呈二次多项式关系。

(3) 煤样峰值流量与围压的关系

应力 - 应变全过程曲线的峰值点是煤样的破坏点，其瓦斯渗透特性是预测含瓦斯煤岩失稳的重要指标。

为了给含瓦斯煤的卸围压变形破坏全过程试验打下基础，在这里专门研究煤样峰值瓦斯流量与围压的关系。

煤样分别在不同的围压下达到峰值，图5为恒定瓦斯压力时煤样的峰值渗流速度与围压的关系。

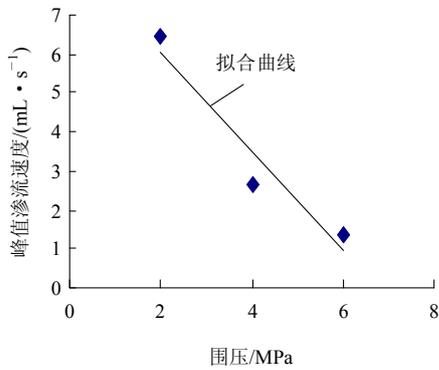
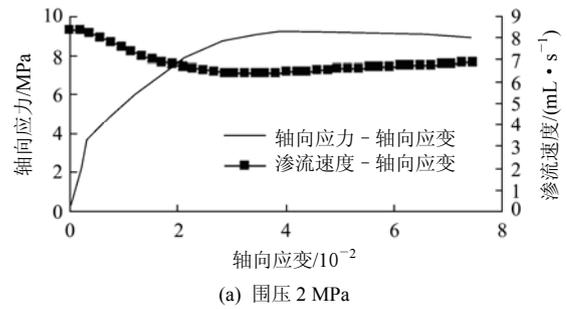


图5 恒定瓦斯压力时煤样峰值渗流速度 - 围压关系
Fig.5 Relationship between seepage velocity and confining pressure on peak of briquet in fixed gas pressure

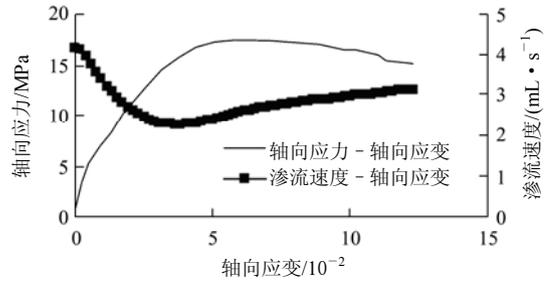
由图5可知，在瓦斯压力恒定时，煤样的峰值渗流速度与围压基本呈现线性关系。

3.4 煤样渗透特性与应变的关系

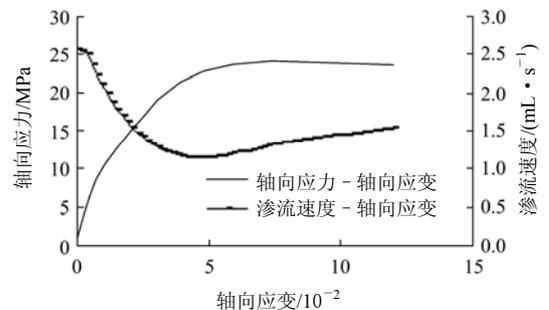
恒定瓦斯压力时煤样轴向应力 - 轴向应变、渗流速度 - 轴向应变曲线如图6所示，通过渗流速度 - 应变曲线和应力 - 应变曲线的对比，发现与应力 - 应变曲线的各个阶段相对应，渗流速度 - 应变曲线也表现出阶段性特征。在应力 - 应变曲线的密实阶段，渗流速度缓慢降低；在应力 - 应变曲线的弹性变形阶段，渗流速度也呈现降低的趋势，且降低的速度要大于密实阶段，主要原因是在密实阶段型煤试件的孔隙度较高，而在弹性变形阶段开始时，煤样的原始孔隙已被压密。在弹性变形阶段和屈服阶段的分界点附近，渗流速度降到最小值，此时，煤样的原生裂隙被最大程度压实，新的裂隙还未产生。



(a) 围压 2 MPa



(b) 围压 4 MPa



(c) 围压 6 MPa

图6 恒定瓦斯压力时煤样轴向应力 - 轴向应变、渗流速度 - 轴向应变曲线

Fig.6 Axial stress-axial strain and seepage velocity-axial strain curves of briquet in fixed gas pressure

在应力 - 应变曲线的屈服阶段，渗流速度开始增加，原因是煤样的内部开始出现损伤，产生微裂纹，孔隙性有所增加。在应力 - 应变曲线的峰后破坏阶段，随着煤样内部出现贯穿煤样的宏观裂纹，渗流速度继续增加，其增加的趋势还会持续下去，并随着型煤试件在峰后向塑性流动发展而持续增大，由于其塑性流动属于不稳定蠕变，所以在煤样完全破坏后渗流速度会趋于稳定。

在相同的瓦斯压力下，改变不同的围压，每种围压条件下煤样的应力 - 应变曲线各阶段与渗流速度 - 应变曲线各阶段仍然保持较好的对应关系。瓦斯压力梯度和煤体强度是影响煤与瓦斯突出的2个重要因素^[18, 19]，从图6可以看出，煤样应力 - 应变曲线的密实阶段和弹性变形阶段对应的渗流速度 - 应变曲线上，其瓦斯渗流速度较大，可以反映出该

阶段的瓦斯压力梯度较大, 具备瓦斯突出的可能, 但该阶段的煤体强度较大, 所以引发煤与瓦斯突出的可能性不大; 在应力 - 应变曲线的屈服阶段对应的渗流速度 - 应变曲线上, 煤样的强度降低, 具备瓦斯突出的可能, 但该阶段瓦斯渗流速度较小, 瓦斯压力梯度较低, 所以引发煤与瓦斯突出的可能性也不大, 在应力 - 应变曲线的破坏阶段对应的渗流速度 - 应变曲线上, 其瓦斯渗流速度持续增大, 瓦斯压力梯度也持续增大, 而煤体的强度较低, 所以引发煤与瓦斯突出的可能性较大。以前曾在自行研制的油压加载瓦斯三轴渗透仪上研究过含瓦斯煤的渗透特性, 与这次的研究结果相对比, 发现在煤样应力 - 应变曲线屈服阶段和破坏阶段对应的瓦斯流量及其变化规律有所不同, 主要原因可能是此次采用的加载方式是用刚性材料伺服压力试验机以位移加载的方式缓慢加载, 加载过程中试件内部积蓄的能量得到逐渐释放, 而以前是用油压方式跃升式加载, 试件内部积蓄的能量来不及释放而对试件内部产生的破坏较大, 因而其瓦斯渗流速度增长较大。此外, 杨永杰等^[12]用原煤煤样进行了渗透试验, 由于原煤煤样比较坚硬, 强度较大, 大多数原煤煤样是脆性材料, 其变形破坏呈现出脆性, 其破坏速度大于型煤煤样。所以, 在破坏过程中, 其渗透率比型煤煤样大。

4 瓦斯压力对煤岩力学性质和渗透特性的影响的讨论

在本试验中, 主要模拟地应力对煤岩瓦斯渗透特性的影响, 所以, 相对于瓦斯压力, 围压被作为对试件渗透率影响较大的主要因素来考虑。在此, 专门做保持围压不变改变瓦斯压力的对比试验, 以讨论瓦斯压力对煤岩力学性质和渗透特性的影响。试验结果如图 7 所示。

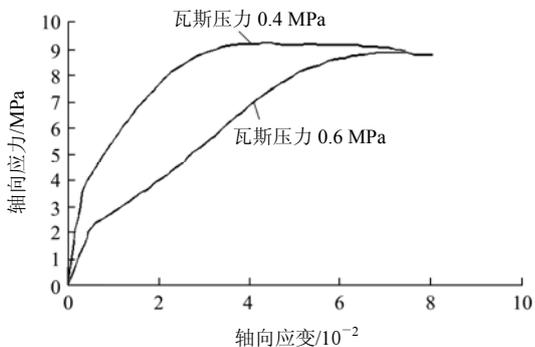
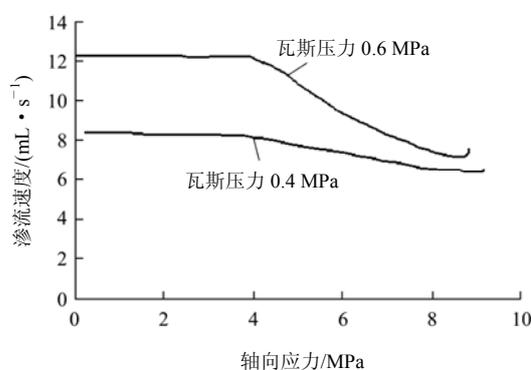


图 7 恒定围压时煤样轴向应力 - 轴向应变曲线

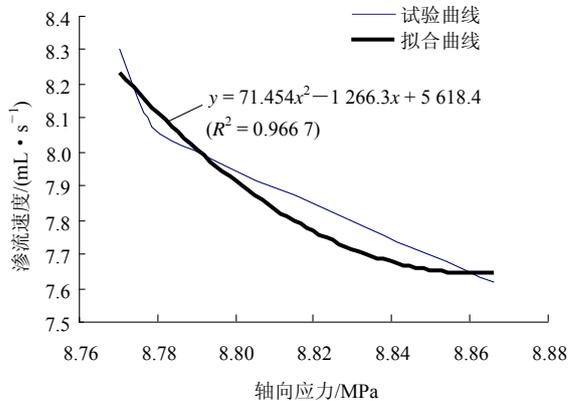
Fig.7 Axial stress-axial strain curves of coal specimens under fixed confining pressure

由试验结果可知, 当围压恒定改变瓦斯压力时, 全应力 - 应变过程曲线保持基本相同的形态。随着瓦斯压力的增大, 煤样的延性有所减少, 脆性有所增加。随瓦斯压力的增加, 煤样的弹性模量减小, 即煤样的刚度减小。同时, 煤样的抗压强度也随着瓦斯压力的增加而减小。

在煤样渗透特性与应力的关系方面, 如图 8 所示, 对于峰值前和峰值后的渗流速度 - 轴向应力关系曲线, 在某一瓦斯压力下, 曲线的趋势与恒定瓦斯压力改变围压时的曲线基本相同, 随着瓦斯压力的增大曲线基本保持相同形态, 渗流速度整体增大。



(a) 峰前



(b) 峰后

图 8 恒定围压时煤样渗流速度 - 轴向应力曲线

Fig.8 Seepage velocity-axial stress curves of coal specimen under fixed confining pressure

在煤样渗透特性与应变的关系方面, 如图 9 所示, 在某一瓦斯压力下, 煤样渗流速度随轴向应变的关系曲线与恒定瓦斯压力改变围压时的曲线保持基本相同的趋势, 随着瓦斯压力的增大, 曲线基本形态保持相同, 渗流速度整体增大。

引起上述现象的原因主要是施加瓦斯压力有大, 实际上是增加了煤样的孔隙率, 同时, 瓦斯压

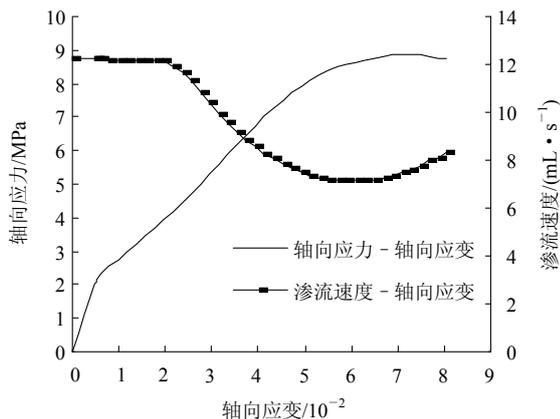


图9 恒定围压时煤样轴向应力 - 轴向应变、渗流速度 - 轴向应变曲线(瓦斯压力 0.6 MPa)

Fig.9 Axial stress-axial strain and seepage velocity-axial strain curves of briquette in fixed confining pressure (gas pressure 0.6 MPa)

力增加会引起煤样对瓦斯的吸附作用增加，从而导致煤样的孔隙率减小，在本试验中，由于所施加的围压要比瓦斯压力大得多，所以其由于瓦斯压力力学作用引起的孔隙率增大的效应要大于煤样吸附瓦斯引起的孔隙率减小的效应。所以，从图 4, 8 可以看出，煤样整体表现出渗透率随瓦斯压力的增大而增大。

5 结 论

采用自行研制的含瓦斯煤样三轴渗流试验装置模拟地应力场，研究了型煤试件在全应力 - 应变过程中的瓦斯渗透特性变化规律，得出以下结论：

(1) 在煤样的应力 - 应变全过程中，峰值应力前渗流速度随应力的增大先减小后缓慢增大，峰值应力后渗流速度随应力的减小而增大；在瓦斯压力恒定改变围压时，其峰前和峰后渗流速度 - 应力曲线都满足上述规律，由此可得出煤样应力应变全过程渗流速度 - 轴向压力方程。为利用地应力提高煤层瓦斯抽采率提供了理论依据。

(2) 在围压恒定时，峰值渗流速度随围压的升高而降低，峰值渗流速度与围压基本成线性关系。

(3) 煤样的全应力 - 应变过程曲线与渗流速度 - 应变曲线具有很好的对应关系，在瓦斯压力恒定改变围压的各种情况下，其应力 - 应变全过程曲

线的各阶段都对应相同的渗流速度随应变而变化的规律。为预测煤岩的变形破坏以及煤与瓦斯突出的预测预报提供了一种新的方法。

(4) 在所施加围压比瓦斯压力大得多的情况下，恒定围压改变瓦斯压力的对比试验表明，瓦斯压力有部分抵消围压作用的效应，其试验结果所反映的煤样渗透特性变化规律与恒定瓦斯压力改变围压时基本一致。

参考文献(References):

- [1] 周世宁, 林柏泉. 煤矿瓦斯动力灾害防治理论及控制技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.(ZHOU Shining, LIN Baiquan. Prediction theory and control technology of coal mine gas dynamic disaster[M]. Beijing: Science Press, 2007.(in Chinese))
- [2] 周世宁, 林柏泉. 煤层瓦斯赋存与流动理论[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1990.(ZHOU Shining, LIN Baiquan. The theory of gas flow and storage in coal seam[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1990.(in Chinese))
- [3] 林柏泉, 周世宁. 煤样瓦斯渗透率的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 1987, 16(1): 21 - 28.(LIN Baiquan, ZHOU Shining. Experimental study of gas permeability of coal example[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1987, 16(1): 21 - 28. (in Chinese))
- [4] 谭学术, 鲜学福. 煤的渗透特性研究[J]. 西安矿业学院学报, 1994, 14(1): 22 - 25.(TAN Xueshu, XIAN Xuefu. Study of coal permeability[J]. Journal of Xi'an Mining Institute, 1994, 14(1): 22 - 25.(in Chinese))
- [5] 梁冰, 章梦涛, 王泳嘉. 煤层瓦斯与煤体变形的耦合数学模型及数值解法[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(2): 135 - 142. (LIANG Bing, ZHANG Mengtao, WANG Yongjia. Mathematical model and numerical method for coupled gas flow in coal seam and coal deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(2): 135 - 142.(in Chinese))
- [6] 赵阳升, 胡耀青, 杨栋, 等. 三维应力下吸附作用对煤岩体气体渗流规律影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 651 - 653.(ZHAO Yangsheng, HU Yaoqing, YANG Dong, et al. The experimental study of the gas seepage law of rock related to adsorption under 3D stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(6): 651 - 653.(in Chinese))
- [7] 唐巨鹏, 潘一山, 李成全, 等. 有效应力对煤层气解吸渗流影响

- 的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1 563 - 1 568.
- (TANG Jupeng, PAN Yishan, LI Chengquan, et al. Experimental study of effect of effective stress on desorption and seepage of coalbed methane[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1 563 - 1 568.(in Chinese))
- [8] GAWUGA J. Flow of gas through stressed carboniferous strata[Ph. D. Thesis][D]. Nottingham: University of Nottingham, 1979.
- [9] ENEVER J R E, HENNING A. The relationship between permeability and effective stress for Australian coal and its implications with respect to coalbed methane exploration and reservoir modeling[C]// Proceedings of the 1997 International Coalbed Methane Symposium. [S. l.]: [s. n.], 1997: 13 - 22.
- [10] MCKEE C R, BUMB A C, KOENIG R A. Stress dependent permeability and porosity of coal[M]. [S. l.]: Rock Mountain Association of Geologist, 1998.
- [11] 何伟钢, 唐书恒, 解晓东. 地应力对煤层渗透特性的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2000, 19(4): 353 - 355.(HE Weigang, TANG Shuheng, XIE Xiaodong. Effect of in-situ stress on coalbed permeability[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2000, 19(4): 353 - 355.(in Chinese))
- [12] 杨永杰, 宋 扬, 陈绍杰. 煤岩全应力 - 应变过程渗透特征试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 381 - 385.(YANG Yongjie, SONG Yang, CHEN Shaojie. Test study of permeability properties of coal specimen in complete stress-strain process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(2): 381 - 385.(in Chinese))
- [13] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.(CAI Meifeng, HE Manchao, LIU Dongyan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002.(in Chinese))
- [14] 李通林, 谭学术, 刘传伟. 矿山岩石力学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1991.(LI Tonglin, TAN Xueshu, LIU Chuanwei. Rock mechanics in mine[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1991.(in Chinese))
- [15] 赵阳升. 矿山岩石流体力学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1994.(ZHAO Yangsheng. Rock fluid mechanics in mine[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1994.(in Chinese))
- [16] 孙培德. Sun 模型及其应用: 煤层气越流固气耦合模型及可视化模拟[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002.(SUN Peide. Sun model and its applications—the model of coupled solid deformation and gas leak flow and visual simulations by Sun peide[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2002.(in Chinese))
- [17] 缪协兴, 刘卫群, 陈占清. 采动岩体渗流理论[M]. 北京: 科学出版社, 2004.(MIAO Xiexing, LIU Weiqun, CHEN Zhanqing. Seepage theory of rock mass under mining[M]. Beijing: Science Press, 2004.(in Chinese))
- [18] 于不凡. 煤和瓦斯突出机制[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1985.(YU Bufan. Mechanism of coal and methane outburst[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1985.(in Chinese))
- [19] 俞启香. 矿井瓦斯防治[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1993.(YU Qixiang. Methane prevention in coal mine[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1993.(in Chinese))

祝贺郑颖人院士和何满潮教授等的论文又荣获2008年 中国百篇最具有影响国内学术论文

据中国科学技术信息研究所2009年11月27日发布的消息,《岩石力学与工程学报》以下作者的论文又获得“2008年中国百篇最具有影响国内学术论文”,《岩石力学与工程学报》编辑部表示热烈祝贺:

- (1) 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3 381 - 3 388.
 - (2) 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 姜耀东. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2 803 - 2 813.
- 这次获奖,是郑颖人院士和何满潮教授等的光荣,也是本刊的光荣,在此向郑颖人院士和何满潮教授等表示衷心的祝贺。

(本刊编辑部)