

Experiment Study on Mechanics and Permeability of Coal Containing Gas under the Total Stress-Strain Tests

Qian Wang¹, Mingyue Lu¹, Weizhong Wang²

¹Chongqing Vocational Institute of Engineering, Chongqing

²State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing

Email: qian.wang.0921@qq.com

Received: Oct. 10th, 2015; accepted: Oct. 26th, 2015; published: Oct. 30th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

A self-developed device called the coal-containing heat solid coupling servo seepage device is used to do the total stress-strain tests of coal samples. The result shows: In the process of continuous load, the stress-strain relationship of coal containing gas can be divided into four stages: the initial compaction phase, the elastic phase, the yield and damage phase, the post-failure phase. The stress-strain relationship of these four phases makes a big difference; elastic modulus of coal containing gas first decreases and then keeps constant; it declines rapidly after destruction; the Poisson's ratio firstly dropped after a slow rise, and it raised rapidly after destruction. With the change of axial stress, the axial stress of the coal containing gas and its permeability is opposite. Permeability of the coal containing gas is closely related with its volumetric strain. But we have analyzed and found that, the permeability of the coal is not the lowest when its volume is the smallest.

Keywords

Coal Containing Gas, The Stress-Strain Relationship, Elastic Modul

含瓦斯煤全应力 - 应变过程中力学及渗流特性试验研究

王 倩¹, 卢明玥¹, 王维忠²

¹重庆工程职业技术学院, 重庆

²重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆

Email: gian.wang.0921@qq.com

收稿日期: 2015年10月10日; 录用日期: 2015年10月26日; 发布日期: 2015年10月30日

摘要

利用自行研制的含瓦斯煤热流固耦合伺服渗流试验装置, 以原煤试样为研究对象, 进行含瓦斯煤全应力-应变渗流试验。研究表明: 在连续加载过程中, 含瓦斯煤的应力-应变关系可以分为四个阶段: 初始压实阶段、弹性阶段、屈服破坏阶段、破坏后阶段, 这四个阶段煤样的应力-应变关系有较大差异; 含瓦斯煤的弹性模量先下降后稳定, 在破坏后快速下降; 泊松比先下降后缓慢上升, 在破坏后快速上升; 含瓦斯煤的轴向应力与渗透率随轴向应变的变化规律基本呈相反的趋势; 含瓦斯煤渗透率与体积应变密切相关, 但分析发现, 煤样体积最小时, 其渗透率不是最低。

关键词

含瓦斯煤, 应力-应变关系, 弹性模量

1. 引言

煤层气是煤生成过程中产生的一种伴生气体。研究表明煤层气具有很高的商业开采价值, 抽采煤层气既可以解决煤矿开采过程中因瓦斯引起的安全问题, 又可以缓解我国能源短缺的现状。煤层气的抽采效果与地应力、瓦斯压力以及煤层的物理力学性质有关。煤矿开采时, 煤层所受的应力会随采煤工作面的推进、地质构造和赋存条件的变化而发生变化的。

目前国内外有很多学者研究了煤岩的全应力-应变过程中的力学特性[1]-[4]及含瓦斯煤岩全应力-应变过程中的渗流特性[5]-[15]。关于煤全应力-应变的研究主要集中于型煤。在孔隙结构及物理力学性质上, 型煤与原始煤层存在较大的差异, 因此研究原煤全应力-应变过程的力学及渗流特性是非常有必要的。

本文以平顶山天安煤业股份有限公司十矿己15煤层的原煤试样为研究对象, 利用自行研制的含瓦斯煤热-流-固耦合三轴伺服渗流试验装置, 对原煤全应力-应变过程中的力学及渗流特性进行了研究, 这将为井下煤与瓦斯共采提供理论基础。

2. 试验条件

2.1. 原煤试样制备

本试验煤样取自平顶山天安煤业股份有限公司十矿己15煤层, 在采煤工作面选取块度较大、完整度较好的煤体, 在实验室按《GB/T 23561.7-2009 煤和岩石物理力学性质测定方法》规定。筛选出表面裂纹较少, 没有明显缺陷的试件作为试验时间。采用试件的尺寸均为 $\Phi 50 \times 100$ mm, 见图1。

2.2. 实验装置

试验采用重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室自行研制的含瓦斯煤热流固耦合三轴渗流实验装置, 如图2所示。主要由孔隙压力加载、三轴渗透仪、温度控制系统、流量计组成, 数据都有计



Figure 1. Picture of selected coal

图 1. 选取的煤样图



Figure 2. Triaxial stress thermal-hydro-mechanical coal containing gas permeameter

图 2. 含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流实验装置

算机采集。该装置可以进行不同应力、不同瓦斯压力、不同温度条件下煤岩力学及渗透试验。

2.3. 试验方案

- (1) 试验前烘干煤样 24 h，将煤样放入三轴压力室并组装好三轴压力室；
- (2) 打开试验容器出气阀，用真空泵对试验容器内的煤样进行脱气 12 h；
- (3) 设定轴压 6 MPa、围压 6 MPa，在静水压力条件下通入瓦斯压力 3 MPa；
- (4) 原煤试样充分吸附 12 h；
- (5) 打开气体出口阀，连续加载轴压(0.1 mm/min)进行含瓦斯煤全应力 - 应变试验，同时检测出气口的瓦斯流量。

3. 试验结果分析

3.1. 含瓦斯煤的力学特性

图 3 是全应力 - 应变过程中, 煤样轴向应力与轴向应变、径向应变、体积应变之间的关系曲线图。从图中的 $\varepsilon_z \sim \sigma_z$ 曲线可以看出, 含瓦斯煤在全应力 - 应变过程中经历了初始压实阶段、弹性阶段、屈服破坏阶段、破坏后阶段。

(1) 在初始压实阶段, $\varepsilon_z \sim \sigma_z$ 曲线呈现出向下凹的形状, 这是由于煤体内的孔隙压实闭合造成的; (2) 在弹性阶段, $\varepsilon_z \sim \sigma_z$ 曲线基本为斜率不变的直线, 煤体的应力与应变呈线性关系; (3) 在屈服破坏阶段, $\varepsilon_z \sim \sigma_z$ 曲线呈现出向上凸的形状, 煤体内部产生大量新的裂隙, 出现扩容现象, 当煤体所受的应力超过其强度极限后, 随着轴向应变继续增加, 其应力快速下降, 煤样失稳破坏; (4) 在破坏后阶段, 煤样所受的应力先下降后上升, 并在煤样的残余强度处稳定。与前人的研究[7]对比可以发现, 煤样通入瓦斯并不影响其全应力 - 应变过程的变化趋势, 但瓦斯压力会较小有效围压, 使煤样的强度减小。而对比型煤与原煤的试验结果[6]可以发现: 在屈服破坏阶段, 原煤所受的应力达到峰值强度后, 短时间内会出现较大幅度的下降, 型煤达到峰值强度后, 其应力不会迅速下降, 而是稳定在峰值强度左右, 经历较长时间后出现小幅下降。

从图 3 的 $\varepsilon_v \sim \sigma_z$ 曲线可以看出, 在煤样全应力 - 应变过程中, 煤样的体积应变出现了先增加后减小的情况。这说明了在全应力 - 应变前期煤样整体被压缩, 体积减小, 在破坏后体积应变减小, 煤样出现扩容现象, 体积增大。

在煤样全应力 - 应力过程中, 由于煤样会产生新的裂隙, 导致泊松比和弹性模量发生变化, 为深入研究煤样在全应力 - 应力变化过程中的物理力学性质, 故采用如下公式计算了泊松比和弹性模量:

$$E = (\sigma_z - 2\mu\sigma_r) / \varepsilon_z \quad (1)$$

$$\mu = (B\sigma_z - \sigma_r) / [\varepsilon_r(2B - 1) - \sigma_z] \quad (2)$$

$$B = \varepsilon_z / \varepsilon_r \quad (3)$$

式中: E 为弹性模量(MPa); μ 为泊松比; B 为横纵向应变比; σ_z 为轴向应力 σ_r 为围压(MPa); ε_z 为轴向应变 ε_r 为径向应变。

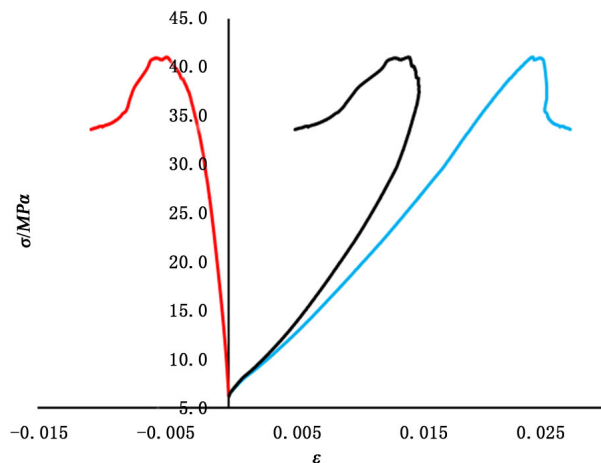


Figure 3. The axial stress changes with axial strain, radial strain, volume strain

图 3. 轴向应力随轴向、径向、体积应变变化图

图 4 是全应力 - 应变过程中, 煤样弹性模量和泊松比随轴向应变变化的曲线图。从图中可以看出弹性模量和泊松比在全应力 - 应变过程变化较为复杂, 为具体分析曲线的变化规律, 将曲线分为 4 个阶段: (1) 在初始压实阶段, 这个阶段内煤样的弹性模量迅速下降至 2000 MPa 左右, 泊松比快速下降; (2) 在弹性阶段, 弹性模量先下降后上升, 但其变化幅度不大, 弹性模量的值稳定在 2000 MPa~1800 MPa 之间, 泊松比持续下降, 在弹性阶段后期泊松比下降速度减缓, 其值稳定在 0.25~0.3 之间; (3) 在屈服破坏阶段, 弹性模量由稳定变为快速下降, 泊松比由缓慢下降变为快速上升; (4) 在破坏后阶段, 弹性模量稳定在 1200 MPa 左右, 泊松比持续缓慢上升。

3.2. 含瓦斯煤的渗透特性

煤矿井下抽采的效果与煤体所受的应力条件密切相关, 在工作面推进过程中, 煤体所受的应力将会改变。因此本文研究了全应力 - 应变过程中煤样渗透率的变化规律。

渗透率计算公式如下[1]:

$$k = \frac{2\mu QPL}{A(P_1^2 - P_2^2)} \quad (4)$$

式中: k 为试样渗透率, Q 为气体流量, μ 为测定温度下气体的动力黏度, L 试样的长度, A 为煤横截面积, P_1 为进气口压力, P_2 为出气口压力。

图 5 是煤样全应力 - 应变过程中, 煤样渗透率和轴向应力随轴向应变变化的曲线图。从图中可以看出全应力 - 应变过程中, 煤样渗透率呈现先下降后上升的趋势。在下降阶段, 其渗透率下降了 72.7%; 在上升阶段, 其渗透率上升了 1316.8%。为具体分析渗透率的变化规律, 将曲线分为 4 段分析: (1) 在初始压实阶段, 煤样内部的孔隙裂隙被迅速压实, 瓦斯流动通道减小, 导致其渗透率快速下降; (2) 在弹性阶段, 煤样内部原有的孔隙裂隙被继续压缩, 但煤样内部产生少量的新生裂隙, 因此渗透率的下降速度减缓; (3) 在屈服破坏阶段, 煤样内部产生大量新生裂隙, 并且各裂隙之间互相贯通, 使得瓦斯流动通道增加, 其渗透率大幅上升; (4) 在破坏后阶段, 煤样内部继续产生新生裂隙, 但产生速度减缓, 其渗透率缓慢上升。对比 ε_z-k 曲线与 $\varepsilon_z-\sigma_z$ 曲线可以发现, 轴向应力与渗透率随轴向应变的变化规律基本呈相反的趋势, 全应力 - 应变初期轴向应力增加, 渗透率减小, 在经历屈服点之后, 轴向应力减小, 渗透率上升。与前人关于型煤方面的研究[6]对比可以发现, 型煤的渗透率在失稳破坏后不会出现剧烈的上升, 而是缓慢上升。这是全应力 - 应变过程中, 型煤和原煤渗透率变化最明显的差异。

在全应力 - 应变过程中, 煤样的体积应变与孔隙率密切相关, 前人的研究表明孔隙率直接影响渗透

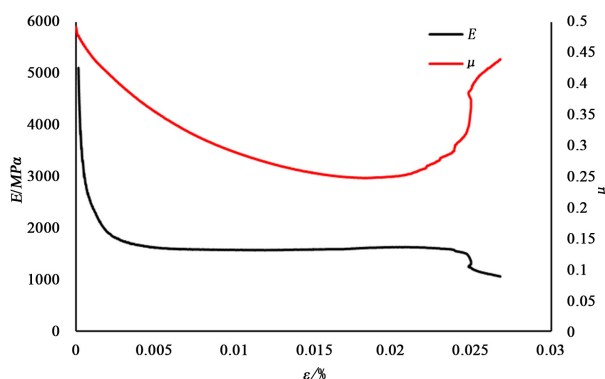


Figure 4. The elasticity modulus and Poisson's ratio change with axial strain

图 4. 弹性模量、泊松比随轴向应变变化图

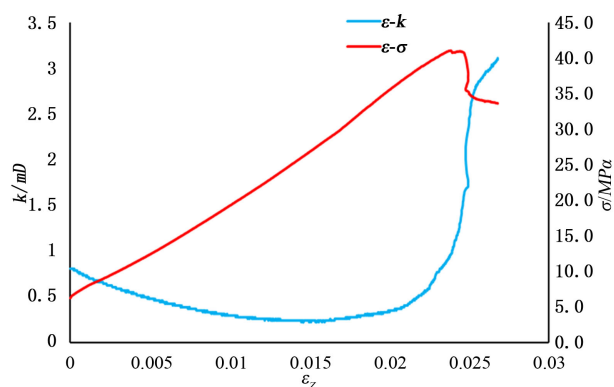


Figure 5. The axial stress, permeability change with axial strain

图 5. 轴向应力、渗透率随轴向应变变化图

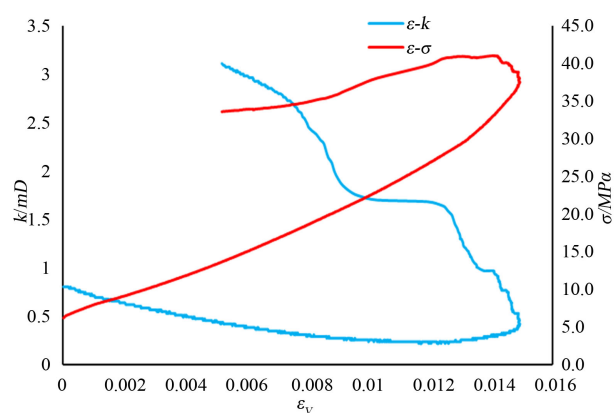


Figure 6. The axial stress, permeability change with volume strain

图 6. 轴向应力、渗透率随体积应变变化图

率的大小，渗透率与孔隙率的关系可用以下公式表示[16]:

$$k = \frac{\varphi}{K_z S_p^2} \quad (5)$$

式中， k 为渗透率，mD； K_z 为无量纲常数，取值约为 5； S_p 为煤体单位孔隙体积的孔隙表面积， cm^2 。

因此分析渗透率随体积应变变化的规律具有重要的意义。

图 6 是煤样全应力 - 应变过程中，渗透率和轴向应力随体积应变变化的曲线图。从 ε_v - k 曲线可以看出，全应力 - 应变初期煤样被压缩，体积减小，煤样渗透率下降。值得注意的是当煤样体积应变超过 0.0123 时，其渗透率开始缓慢上升，但是煤样体积继续减小。这说明煤样体积最小时，其渗透率并不是最低。这可能是因为煤样内部的新产生的裂隙与原有裂隙之间贯通形成新的瓦斯流动通道导致的，所以即使煤样体积继续减小，其内部总孔隙率减小，但是渗透率出现小幅上升。当体积应变增加至 0.0149 时， ε_v - k 曲线出现明显拐点，体积应变迅速减小，煤样产生扩容现象，与此同时，煤样渗透率开始迅速上升。随着体积应变的继续减小，煤样渗透率大幅超过其初始渗透率。

4. 结论

(1) 在连续加载的全应力 - 应变过程中，含瓦斯煤的应力 - 应变关系可以分为四个阶段，初始压实阶

段、弹性阶段、屈服破坏阶段、破坏后阶段，这四个阶段煤样的应力 - 应变关系有较大差异。

(2) 在连续加载的全应力 - 应变过程中，含瓦斯煤的弹性模量和泊松比会发生较大变化。其中弹性模量先下降后稳定，在煤样破坏后快速下降；泊松比先下降后缓慢上升，在煤样破坏后快速上升。

(3) 在连续加载的全应力 - 应变过程中，含瓦斯煤渗透率随轴向应变的变化也可以分为四个阶段。通过对比分析发现，轴向应力与渗透率随轴向应变的变化规律基本呈相反的趋势。

(4) 在连续加载的全应力 - 应变过程中，含瓦斯煤渗透率与体积应变密切相关。但分析发现，煤样体积最小时，其渗透率并不是最低。

通过含瓦斯煤全应力 - 应变渗流试验可以发现，当煤样破坏后其渗透率会大幅上升，这为井下煤与瓦斯共采提供了理论基础。

参考文献 (References)

- [1] 王颖轶, 张宏君, 黄醒春, 邱一平 (2002) 高温作用下大理岩应力 - 应变全过程的试验研究. *岩石力学与工程学报*, **S2**, 2345-2349.
- [2] 王恩元, 陈鹏, 李忠辉, 沈荣喜, 徐剑坤, 朱亚飞 (2014) 受载煤体全应力 - 应变过程电阻率响应规律. *煤炭学报*, **11**, 2220-2225.
- [3] 覃仁辉, 孔思丽 (1996) 岩石全应力应变微观破裂模型. *贵州工学院学报*, **05**, 95-100.
- [4] 李长洪, 蔡美峰, 乔兰, 王双红 (1999) 岩石全应力 - 应变曲线及其与岩爆关系. *北京科技大学学报*, **06**, 513-515.
- [5] 王广荣, 薛东杰, 郜海莲, 周宏伟 (2012) 煤岩全应力 - 应变过程中渗透特性的研究. *煤炭学报*, **01**, 107-112.
- [6] 杨永杰, 宋扬, 陈绍杰 (2007) 煤岩全应力应变过程渗透性特征试验研究. *岩土力学*, **02**, 381-385.
- [7] 姜振泉, 季梁军 (2001) 岩石全应力 - 应变过程渗透性试验研究. *岩土工程学报*, **02**, 153-156.
- [8] 朱珍德, 张爱军, 徐卫亚 (2002) 脆性岩石全应力 - 应变过程渗流特性试验研究. *岩土力学*, **05**, 555-558+563.
- [9] 尹光志, 蒋长宝, 李晓泉, 王维忠, 蔡波 (2011) 突出煤和非突出煤全应力 - 应变瓦斯渗流试验研究. *岩土力学*, **06**, 1613-1619.
- [10] 孙明贵, 黄先伍, 李天珍, 雷光宇, 茅献彪 (2006) 石灰岩应力 - 应变全过程的非 Darcy 流渗透特性. *岩石力学与工程学报*, **03**, 484-491.
- [11] 赵连涛, 于旭磊, 刘启蒙, 胡戈 (2006) 煤层底板岩石全应力 - 应变渗透性试验. *煤田地质与勘探*, **06**, 37-40.
- [12] 尹光志, 蒋长宝, 许江, 彭守建, 李文璞 (2011) 含瓦斯煤热流固耦合渗流实验研究. *煤炭学报*, **09**, 1495-1500.
- [13] 王臣, 鲜学福, 周军平, 谷达圣 (2013) 含不同气体煤岩全应力 - 应变渗透特性试验研究. *地下空间与工程学报*, **03**, 492-496.
- [14] 江东辉, 孙强, 朱术云, 杨秀元 (2012) 岩石全应力 - 应变过程渗透变化规律分析. *金属矿山*, **02**, 22-24+44.
- [15] 王一栋, 姜振泉, 孙强, 张蕊 (2012) 煤系泥岩全应力 - 应变渗透试验研究. *矿业安全与环保*, **04**, 18-20+23+92.
- [16] 陶云奇 (2009) 含瓦斯煤 THM 耦合模型及煤与瓦斯突出模拟研究. 重庆大学, 重庆.