

# Study on Characteristics and Anisotropy of Coal Seam Permeability in Zhaoxian Coal Mine, Shanxi

Weixing Wu

Shanxi Jinyuan Zhaoxian Minging Co., Ltd., Baoji Shaanxi  
Email: 19792661@qq.com

Received: Apr. 9<sup>th</sup>, 2018; accepted: Apr. 23<sup>rd</sup>, 2018; published: Apr. 30<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

In order to discuss the seepage characteristics of coal seam gas and the main influence factors of the permeability of coal reservoir in Shanxi Zhaoxian minging area, we collected the samples of 3# coal seam. In different conditions of axial compression and gas pressure gradient, the CH<sub>4</sub> seepage experiments of some samples were carried out in three-dimensional stress field, and the effect of effective stress and pore pressure factors on permeability were analyzed. It is considered that the permeability is negatively exponentially related to the effective stress and has a negative exponential correlation with the pore pressure. The permeability of coal reservoir is anisotropic, and the permeability of parallel and vertical is different, and the mechanism of permeability difference is discussed.

## Keywords

Coal Seam, Permeability, Effective Stress, Pore Pressure, Anisotropy

---

# 陕西招贤矿煤层渗透率特征及其各向异性研究

吴卫星

陕西金源招贤矿业有限公司, 陕西 宝鸡  
Email: 19792661@qq.com

收稿日期: 2018年4月9日; 录用日期: 2018年4月23日; 发布日期: 2018年4月30日

---

## 摘要

为了探讨陕西招贤矿区煤层瓦斯的渗流特征及煤储层渗透率的主要影响因素, 采集了研究区3#煤层的煤样, 在不同轴压和气体压力梯度下, 对陕西招贤矿内煤样进行三轴应力条件下的甲烷渗流实验, 分析有

效应力和孔隙压力因素对渗透率的影响。认为渗透率与有效应力呈负指数相关关系，与孔隙压力亦呈现出负指数相关关系。煤储层渗透性存在各向异性，平行层面与垂直层面的渗透率存在较大差异，并探讨了渗透率差异性的机理。

## 关键词

煤层，渗透率，有效应力，孔隙压力，各向异性

Copyright © 2018 by author 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

## 1. 前言

煤储层渗透率表征的是煤储层渗透性，即多孔介质允许流体通过的能力。煤储层渗透率是进行煤层气渗流分析的主要参数，也是在现有条件下评判煤与瓦斯突出难易程度以及决定煤层气资源开发成败的关键因素之一[1]。影响煤储层渗透率的因素十分复杂，地质构造、煤体结构、应力状态、煤岩煤质特征、煤层埋深、煤阶和天然裂隙系统等都不同程度地影响煤储层渗透率，有时是某一因素主导，有时是多因素综合[2]。一般来说，煤储层的孔裂隙结构等内在因素等起着主导作用，但在某些地质构造背景复杂区域，地应力等外在因素对于煤储层渗透率的影响显著。

近年来关于煤/岩储层渗透率的研究不断深入，如多重影响因素的耦合作用。恒定瓦斯压力和围压的情况下，随温度的升高，煤样的渗透率总体呈下降趋势；煤体渗透率与应力之间的关系不是单调地随应力的增大而减小，而是要看煤体处于何种应力—应变状态[3]。魏建平等得出了瓦斯压力与围压固定情况下，轴向应变与温度共同影响下的渗透率计算公式[4]。煤体的渗透率随温度的变化存在一个阈值温度，从室温到该阈值温度低温阶段，渗透率大幅度降低，阈值温度处的渗透率最低；高于阈值温度值后，渗透率迅速增大，而阈值温度的大小与煤阶有关[5]。

不少学者也研究了单因素作用下的渗透率变化规律。尹光志等实验模拟研究了采动过程中有效应力变化对渗透率动态变化的影响[6]。煤样渗透率变化规律与压力梯度呈负指数关系，且在压力梯度为 0~0.1 MPa/cm 范围内，渗透率变化值最大[7]。变质程度越高，内外部孔隙越发育，其渗透率越高，透气性也越好[8] [9]。煤样瓦斯的渗透率与含水率的关系不是简单的反相关线性关系，而是随着含水率的增加，通过煤样瓦斯的渗透率逐渐减小，减小的趋势随着含水率的增加逐渐降低，呈负指数函数关系[10] [11]。煤层顺层结构对煤层瓦斯流动影响也很大，控制瓦斯渗透方向和瓦斯抽采效果，沿层理面方向瓦斯渗流比其他方向更容易[12]。除此之外，前人还针对体积应变[13]、温度[14] [15] [16]、以及吸附作用[17] [18] [19]等因素，研究其对煤/岩储层渗透率的影响。

从已有研究来看，在探讨渗透率动态变化规律时，多集中在有效应力、温度、变质程度等影响因素方面，对于煤储层渗透率各向异性的研究较少。本文在研究有效应力和孔隙压力对渗透率的作用后，比较不同取样方向煤样渗透率，进一步讨论了煤储层各向异性对于渗透率变化的影响。

## 2. 实验过程及实验结果

### 2.1. 地质背景

本文实验所采用的样品取自招贤矿。陕西金源招贤矿业有限公司位于陕西省宝鸡市麟游县西北部，

其范围：西起麟游两亭东，东至麟游杜水河上游的贾家河；南起招贤镇南，北至西弯梁。东西长约 13.7 km，南北宽约 7 km，面积约 82.59 km<sup>2</sup>。行政区划属陕西省宝鸡市麟游县招贤镇、两亭镇和九成宫镇以及凤翔县姚家沟乡管辖。

矿区位于鄂尔多斯盆地南部的渭北挠褶带北缘，渭北挠褶带属盆地 I 级构造单元，其中以高店-御驾宫大断裂为界，以南称铜川凸起，以北称庙彬凹陷，属盆地 II 级构造单元。矿区位于庙彬凹陷西部，麟游褶带主体部位。矿区内地表大面积被黄土层所覆盖，沟谷中出露的白垩系地层产状较为平缓，其深部侏罗系隐伏构造总体为一走向 NE50°~70°，倾向 NW-NNW-NWW 的单斜构造，其上发育一组宽缓而不连续的褶曲。背斜构造自南向北依次有良舍背斜(区外)、阁头寺背斜、两亭背斜、羊川寺-花花庙背斜。矿区内断层主要发育于西部边缘，以张性、张剪性为主，走向以 NW-NNW 向为主，燕山早期有逆冲断裂。中东部地区断裂稀少，且以正断层为主(图 1)。

## 2.2. 试样加工及实验过程

实验所采用的样品取自招贤矿 3#煤层，实验所采用的仪器为重庆大学自主研发煤体三轴渗流试验机，实验共有两份样品，规格为直径 50 mm，高 100 mm 的标准圆柱形试样，其中 1 号为垂直煤层层理所钻取的样品，2 号为平行于煤层层理所钻取的样品(图 2)。实验具体实验过程如下：

1) 实验首先将样品侧壁用硅胶封闭，置于压力舱中，然后密闭仪器。采用轴向控制，以 0.1 KN/s 的速度将轴向力升至 2 KN，0.05 MPa/s 的速度将围压升至 0.5 MPa。稳定约 1 min 后将轴向力、围压分别升高为 9.8 KN 和 5 MPa，后打开气罐阀门，设置瓦斯压力为 1 MPa，开始进行甲烷吸附；

2) 待完成吸附，分别将轴向力依次设置为 19.64、21.58、23.56、25.52、27.48 KN；将围压设置为 6 MPa；将瓦斯压力分别设置为 1、2、3、4 MPa，得到 20 组实验数据；

3) 实验过程中若煤样破坏则及时停止实验，保存实验数据；若煤样完好，则在测得上述数据后，保持围压和瓦斯压力不变，继续加载轴压，直至煤样破坏。

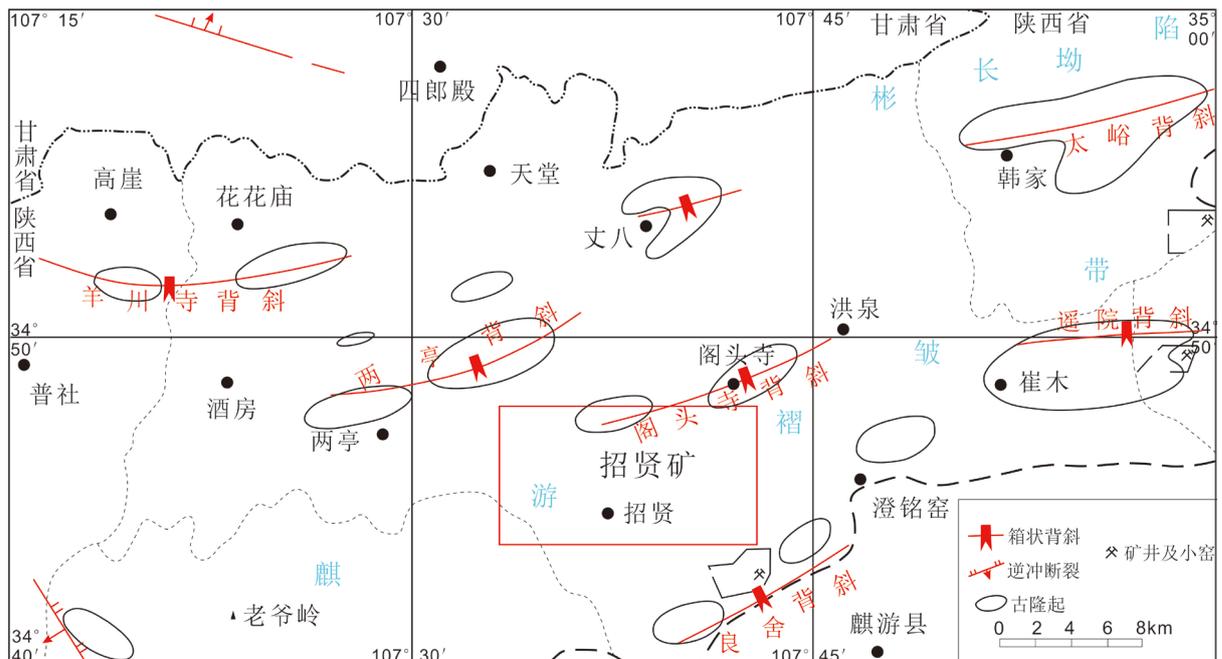


Figure 1. Regional tectonic map

图 1. 区域构造图



**Figure 2.** Three axis percolation test machine and experimental sample  
**图 2.** 三轴渗流试验机及实验试样

### 2.3. 实验结果

根据达西定律推导的公式来计算气体渗透率[20]

$$K_g = \frac{2p_0 Q_g \mu_g L}{A(p_1^2 - p_0^2)}$$

式中,  $K_g$  为气体渗透率, mD;  $p_0$  为大气压, MPa;  $p_1$  为试样入口端压力, MPa;  $Q_g$  为气体流量,  $\text{cm}^3/\text{s}$ ;  $\mu_g$  为在测定温度下  $\text{CH}_4$  的黏度,  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ;  $L$  为试样长度, cm;  $A$  为试样截面积,  $\text{cm}^2$ 。

通过实验, 得到 1 号、2 号试样在不同轴压以及瓦斯压力条件下的渗透率(表 1, 表 2)。

## 3. 实验讨论与分析

### 3.1. 渗透率与有效应力的关系

由图 3 可知, 渗透率随有效应力的增大而减小, 经拟合两者更为符合负指数相关关系(表 3), 其原理主要是随着有效应力的增加, 试样中裂隙逐渐闭合, 进而导致渗透率降低。不同试样孔裂隙发育不同, 有效应力的增加使得孔裂隙闭合程度不同, 导致渗透率降低幅度存在差异, 但渗透率随有效应力的变化总体呈现负指数的相关关系。

### 3.2. 渗透率与孔隙压力的关系

由实验结果可知(图 4), 渗透率随着孔隙压力增加而存在指数非线性的变化(表 4), 这一现象的原理是吸附膨胀作用对渗透率的负效应。当孔隙压力减小时, 甲烷解吸, 导致煤基质收缩, 从而使得渗透率增大; 实验过程中, 增加甲烷气体压力正是这一过程的逆过程, 孔隙压力增加, 煤样进行吸附作用, 进而煤基质膨胀, 渗透率减小。

### 3.3. 渗透率的各向异性特征

煤层渗透性的一般规律主要体现在有效应力和吸附膨胀两个方面(本文暂不讨论 klinkenberg 效应, 即气体滑脱效应), 随着有效应力增加, 煤层裂隙趋于闭合, 总体上渗透率均为减小, 呈负指数相关; 随着

**Table 1.** Experimental result of permeability test of sample No. 1  
**表 1.1** 号试样渗透率实验结果

轴压 MPa	围压 MPa	有效应力 MPa	渗透率/ $10^{-3}$ mD			
			孔隙压力/MPa			
			0.5	1	1.5	2
10	6	4	7.015	5.444	4.808	4.376
11	6	5	5.840	4.799	4.176	3.904
12	6	6	5.740	4.593	3.985	3.661
13	6	7	5.564	4.462	3.884	3.521
14	6	8	5.350	4.357	3.754	3.406

**Table 2.** Experimental result of permeability test of sample No. 2  
**表 2.2** 号试样渗透率实验结果

轴压 MPa	围压 MPa	有效应力 MPa	渗透率/ $10^{-3}$ mD			
			孔隙压力/MPa			
			0.5	1	1.5	2
10	6	4	3.938	5.531	7.217	10.379
11	6	5	3.837	5.132	6.345	9.305
12	6	6	1.999	4.028	6.319	7.817
13	6	7	2.148	4.430	5.815	7.665
14	6	8	1.849	3.460	5.741	6.861

**Table 3.** Fitting of permeability-pore pressure curve of sample No. 1  
**表 3.1** 号试样渗透率随孔隙压力变化曲线拟合

孔隙压力/(MPa)	拟合关系	相关系数 $R^2$
0.5	$y = 8.3738e^{-0.059x}$	0.7970
1.0	$y = 6.4372e^{-0.052x}$	0.8685
1.5	$y = 5.7723e^{-0.057x}$	0.8660
2.0	$y = 5.4023e^{-0.06x}$	0.9313

**Table 4.** Fitting of permeability-effective stress curve of sample No. 1  
**表 4.1** 号试样渗透率随有效应力变化曲线拟合

有效应力/MPa	拟合关系	相关系数 $R^2$
4	$y = 7.8241e^{-1.54x}$	0.9454
5	$y = 6.4756e^{-1.348x}$	0.9562
6	$y = 6.4297e^{-1.491x}$	0.9587
7	$y = 6.2636e^{-1.512x}$	0.9674
8	$y = 6.0508e^{-1.504x}$	0.9748

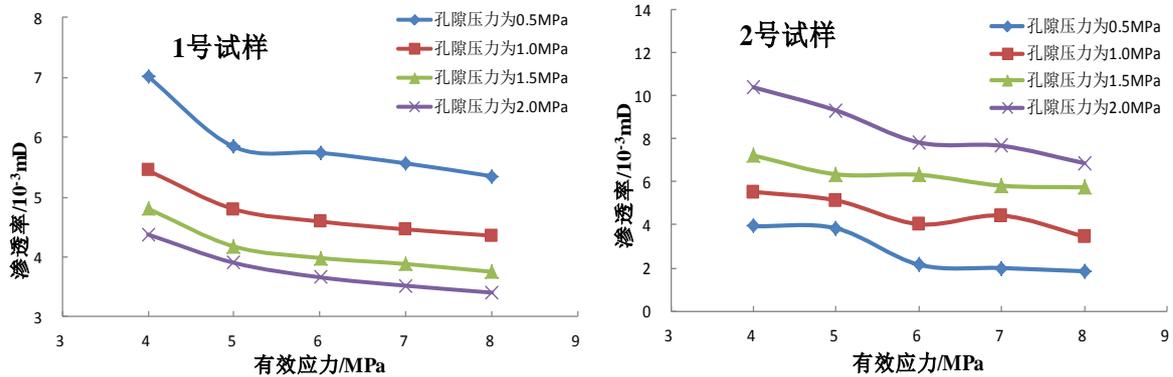


Figure 3. Change of permeability with effective stress  
图 3. 渗透率随有效应力变化图

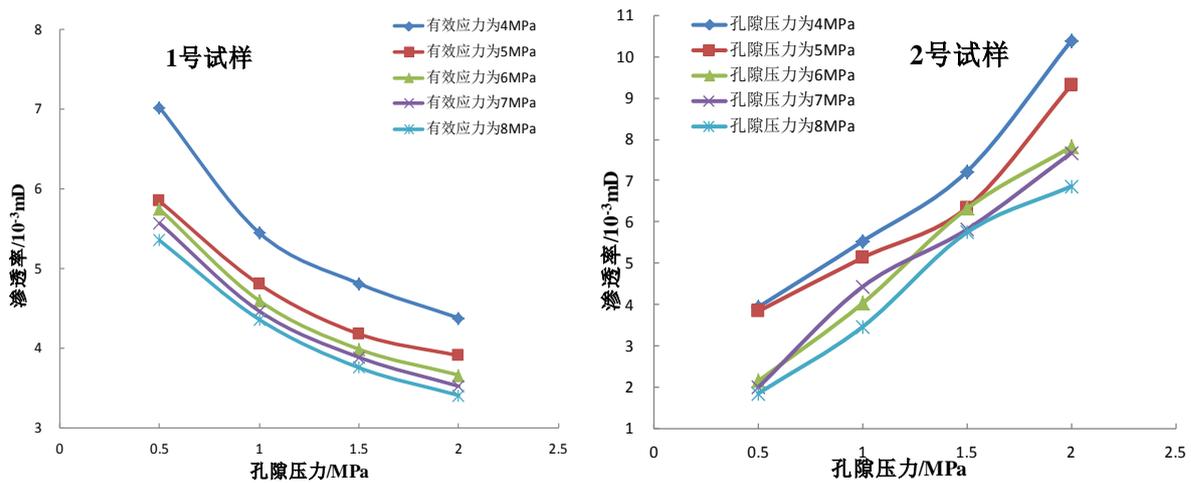


Figure 4. Change of permeability with pore pressure  
图 4. 渗透率随孔隙压力变化图

孔隙压力增加，吸附膨胀发挥作用，煤基质膨胀，裂隙被压缩导致渗透率降低。以上两种效应相互叠加综合发挥作用。

文中所提到的 1 号试样为垂直煤层走向钻取的样品，2 号试样为同一煤层平行于煤层走向所钻取的样品，此次实验中 2 号试样渗透率略大于 1 号试样，反映了煤层渗透性的各向异性特征。从图 2、图 3 的 1、2 号试样实验结果对比可以看出，对于 1 号试样，有效应力效应和吸附膨胀效应均符合一般性规律，但对于 2 号试样，其有效应力效应符合一般性规律，但吸附膨胀效应不符合一般性规律，表现为渗透率随着孔隙压力增加而增加，其机理在于吸附膨胀过程中，煤岩的纹层被孔隙压力撑开，故而渗透率增加，且成为影响煤层渗透性的主要因素，也反映了煤储层渗透性的各向异性特征。

#### 4. 结论

- 1) 煤储层渗透率与有效应力符合负指数相关关系，因为有效应力增加会导致裂隙存在不同程度闭合，进而引起渗透率降低。
- 2) 渗透率与孔隙压力呈现出负指数相关关系，由于吸附膨胀作用的负效应，孔隙压力增加，煤基质吸附膨胀，孔裂隙收缩，引起渗透率降低。

3) 煤储层渗透率存在各向异性特征。平行于煤层层理的渗透率大于垂直层理方向的渗透率;且两个方向的渗透率动态变化表现出了相反的规律,其机理为煤岩的纹层在孔隙压力下被撑开,促使渗透率增加。

## 基金项目

国家自然科学基金(41472134)。

## 参考文献

- [1] 傅雪海, 秦勇, 李贵中. 沁水盆地中南部煤储层渗透率主控因素分析[J]. 煤田地质与勘探, 2001, 29(3): 16-19.
- [2] 傅雪海, 秦勇, 韦重韬. 2007. 煤层气地质学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社.
- [3] 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): 1495-1500.
- [4] 魏建平, 吴松刚, 王登科, 等. 温度和轴向变形耦合作用下受载含瓦斯煤渗流规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(1): 168-174.
- [5] 冯子军, 万志军, 赵阳升, 等. 高温三轴应力下无烟煤、气煤煤体渗透特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 689-696.
- [6] 尹光志, 李文璞, 李铭辉, 等. 加卸载条件下原煤渗透率与有效应力的规律[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1497-1503.
- [7] 汪吉林, 秦勇, 傅雪海. 多因素叠加作用下煤储层渗透率的动态变化规律[J]. 煤炭学报, 2012, 37(8): 1348-1353.
- [8] 许江, 袁梅, 李波波, 等. 煤的变质程度、孔隙特征与渗透率关系的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 681-687.
- [9] Li, G.H. (2009) A Study on the Relationship between Anthracite Fissure-Pore System and the Production of Coalbed Methane in Jincheng. *Advances on CBM Reservoir and Developing Engineering*, China University of Mining & Technology Press, Xuzhou, 94-99.
- [10] 魏建平, 位乐, 王登科. 含水率对含瓦斯煤的渗流特性影响试验研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 97-103.
- [11] Wang, S., Elsworth, D. and Liu, J. (2011) Permeability Evolution in Fractured Coal: The Roles of Fracture Geometry and Water-Content. *International Journal of Coal Geology*, **87**, 13-25. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.04.009>
- [12] Harpalani, S. and Chen, G. (1997) Influence of Gas Production Induced Volumetric Strain on Permeability of Coal. *Geotechnical and Geological Engineering*, **15**, 303-325. <https://doi.org/10.1007/BF00880711>
- [13] Pan, R., Cheng, Y., Yuan, L., et al. (2014) Effect of Bedding Structural Diversity of Coal on Permeability Evolution and Gas Disasters Control with Coal Mining. *Natural Hazards*, **73**, 531-546. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1086-7>
- [14] 于永江, 张华, 张春会, 等. 温度及应力对成型煤样渗透性的影响[J]. 煤炭学报, 2013, 38(6): 936-941.
- [15] 袁梅, 王珍, 李波波, 等. 型煤渗透率随温度和有效应力变化的实验研究[J]. 煤矿安全, 2012, 43(4): 8-11.
- [16] Yang, D., Zhao, Y. and Hu, Y. (2006) The Constitutive Law of Gas Seepage in Rock Fractures Undergoing Three-Dimensional Stress. *Transport in Porous Media*, **63**, 463-472. <https://doi.org/10.1007/s11242-005-5881-1>
- [17] Gu, F. and Chalaturnyk, R.J. (2006) Numerical Simulation of Stress and Strain Due to Gas Sorption/Desorption and Their Effects on *in Situ* Permeability of Coalbeds. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, **45**, 52-62. <https://doi.org/10.2118/06-10-05>
- [18] 隆清明, 赵旭生, 孙东玲, 等. 吸附作用对煤的渗透率影响规律实验研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(9): 1030-1034.
- [19] 李祥春, 郭勇义, 吴世跃. 煤吸附膨胀变形与孔隙率、渗透率关系的分析[J]. 太原理工大学学报, 2005, 36(3): 264-266.
- [20] 汪吉林, 刘桂建, 王维忠, 等. 川东南龙马溪组页岩孔裂隙及渗透性特征[J]. 煤炭学报, 2013, 38(5): 772-777.

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2329-7301，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[me@hanspub.org](mailto:me@hanspub.org)