

doi:10.3799/dqkx.2014.142

# 平顶山矿区原生结构煤和构造煤孔渗实验对比

郭德勇<sup>1</sup>, 李春娇<sup>1</sup>, 张友谊<sup>1,2</sup>

1. 中国矿业大学资源与安全工程学院, 北京 100083

2. 中国平煤神马集团, 河南平顶山 467000

**摘要:** 为了研究构造煤孔渗变化特性, 利用平顶山矿区原生结构煤和构造煤, 进行了不同围压、温度、湿度和煤体结构类型等条件下孔隙度及渗透率的实验测定, 对煤层孔渗特性在不同条件下的变化趋势进行了分析。结果表明: 围压、温度、湿度和煤体结构类型4种因素对煤的孔隙度和渗透率均有较大影响, 当温度和围压同时作用时, 围压的作用效果大于温度的作用效果。并用Origin软件对部分实验数据进行了数据拟合, 得出原生结构煤和构造煤的渗透率—孔隙度函数关系。

**关键词:** 孔隙度; 渗透率; 围压; 温度; 湿度; 构造煤。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2014)11-1500-07

收稿日期: 2014-05-20

## Contrast Study on Porosity and Permeability of Tectonically Deformed Coal and Indigenous Coal in Pingdingshan Mining Area, China

Guo Deyong<sup>1</sup>, Li Chunjiao<sup>1</sup>, Zhang Youyi<sup>1,2</sup>

1. Faculty of Resources &amp; Safety Engineering, China University of Mining &amp; Technology, Beijing 100083, China

2. China Pingmei Shenna Group, Pingdingshan 467000, China

**Abstract:** Taking the simulation of indigenous coal and tectonically deformed coal in Pingdingshan coal district as the research object, porosity and permeability of different coal samples under different factors are determined in this paper. The variation trend of porosity and permeability under different factors is analyzed. The experimental results show that four factors analyzed have significant impact on both porosity and permeability of coal. The effect of confining pressure is greater than temperature when confining pressure and temperature work together. And part of experiment data are fitted by the Origin software, concluding with the function relationship of porosity and permeability of coal.

**Key words:** porosity; permeability; confining pressure; temperature; moisture; tectonically deformed coal.

构造煤是煤层在构造应力作用下发生形变的产物(袁崇孚, 1985), 构造煤所具有的低渗透率和低强度等特点, 为煤与瓦斯突出提供了瓦斯和软煤的物质条件。国内外大量研究表明, 构造煤是煤与瓦斯突出的必要条件(Guo *et al.*, 2002; Díaz Aguado and González Nicieza, 2007)。煤层瓦斯赋存和运移规律是研究瓦斯突出的基础, 而煤层孔隙度和渗透率对瓦斯的赋存和运移起到了重要作用, 因此系统研究煤层孔隙度和渗透率规律对煤与瓦斯突出预测有重要意义。

煤孔隙度和渗透率受多种因素影响。关于孔隙度的影响因素, 国内外学者主要研究了煤质、温度、

应力等因素(许浚远等, 1995; 郭德勇等, 1998; 彭苏萍等, 2003; Arenas and Chejne, 2004)的作用规律; 关于渗透率的影响因素, 国内外学者重点研究了应力(黄远智和王恩志, 2007; Baghbanan and Jing, 2008; Ghabezloo *et al.*, 2009; Konecny and Kozusnikova, 2011; Jasinge *et al.*, 2011)、温度(贺玉龙和杨立中, 2005; 冯子军等, 2010; 胡耀青等, 2010; 许江等, 2011; 胡雄等, 2012)、煤体结构(Dana and Skoczylas, 1999; 傅雪海等, 2002)等因素的作用规律。孔隙度和渗透率的关系多以岩石为对象进行研究(Sulem and Ouffroukh, 2006; 王瑞飞和陈明强,

2008;刘向君等,2011),对煤的孔隙度与渗透率关系的研究需要加强。

本文以原生结构煤和构造煤为对象,进行不同条件下孔隙度和渗透率的测定实验,对影响煤孔隙度和渗透率的围压、温度、湿度、煤体结构类型 4 个因素进行系统研究,并对孔隙度与渗透率的关系进行探讨,以研究瓦斯在不同条件下的赋存和运移规律,为煤与瓦斯突出预测与防治及煤层气开采提供理论依据。

## 1 实验方法

### 1.1 煤样的采集与制备

实验所用煤样取自平煤股份八矿戊组煤层。平顶山矿区位于华北平原西南部边缘,矿区以内以宽缓的李口向斜为主体构造。八矿处于李口向斜东部南翼,戊组煤层属二叠系下石盒子组,煤变质程度为肥煤,瓦斯含量为 16.7~30.0 m<sup>3</sup>/t。煤层中上部有软煤分层下部煤较硬,煤岩类型为半暗半亮型。原生结构煤和构造煤煤岩显微组分测定结果如表 1 所示。

实验所用煤样为  $\varphi 25 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  标准煤样。原生结构煤通过直接钻取并烘干得到,分为普通和干燥 2 组。构造煤煤样是筛选出一定粒径构造煤煤粒,放入成型模具中用压力机以 200 kN 压力恒定 20 min 压制而成,分为细粒和粗粒 2 组,其中细粒组由粒径小于 1 的煤粒组成,粗粒组由 1/3 体积粒径 1~2 的煤粒和 2/3 体积粒径小于 1 的煤粒组成。

### 1.2 实验条件

(1)孔隙度测定实验。本实验采用 KXD-II 型孔隙度测定仪测定煤样孔隙度。根据玻意耳定律单室法,测得不同条件下煤样的孔隙体积,根据定义计算出孔隙度值,其计算公式为:

$$\varphi = \frac{V_p}{V_s + V_p} \times 100,$$

式中, $\varphi$  为煤样的孔隙度(%), $V_p$  为煤样的孔隙体积( $\text{cm}^3$ ), $V_s$  为煤样固体颗粒的体积( $\text{cm}^3$ )。利用围压泵和烘箱等设备设定实验的温度和围压条件,具体的实验条件如表 2 所示。

(2)渗透率测定实验。本实验采用低渗敏感性评价测定仪测定煤样渗透率。其原理是测定气体通过一定长度一定横截面积煤体的渗流速度,利用达西渗流定理计算得到气体渗透率,其计算公式为:

$$K = \frac{200 \mu q_a P_a L}{A(P_1^2 - P_2^2)},$$

表 1 原生结构煤和构造煤煤岩显微组分测定结果

Table 1 Determination of coal maceral

式样名称	镜质组 (%)	惰质组 (%)	壳质组 (%)	矿物 (%)	煤级
原生结构煤	61.7	23.5	13.5	1.3	肥煤
	61.5	25.5	11.8	1.2	肥煤
构造煤	56.8	24.2	13.4	5.6	肥煤
	55.9	23.3	14.9	4.3	肥煤

表 2 煤孔隙度测试实验条件

Table 2 Experimental scheme of coal porosity

原生结构煤		构造煤		温度(°C)	围压(MPa)
普通	干燥	细粒	粗粒		
K1	K2	K3	K4	25	2~10
K5	K6	K7	K8	45	2~10
K9		K10		60	2~10

注:K1~K10 为样品号。

表 3 煤渗透率测试实验条件

Table 3 Experimental scheme of coal permeability

原生结构煤		构造煤		温度(°C)	围压(MPa)
普通	干燥	细粒	粗粒		
S1	S2	S3	S4	25~55	2
S5	S6	S7	S8	25~55	6
S9		S10		25~55	10
S11	S12	S13	S14	25	2~10
S15	S16	S17	S18	40	2~10
S19		S20		55	2~10

注:S1~S20 为样品号。

式中, $q_a$  为地面标准条件下气体渗流速度( $\text{mL/s}$ ), $\mu$  为气体黏度系数( $\text{MPa} \cdot \text{s}$ ), $L$  为煤样长度( $\text{cm}$ ), $A$  为煤样横截面积( $\text{cm}^2$ ), $P_a$  为大气压( $\text{MPa}$ ), $P_1$ 、 $P_2$  分别为试件进口端和出口端气体压力( $\text{MPa}$ )。利用围压泵和恒温箱等设备设定温度和围压条件,具体实验条件如表 3 所示。

## 2 不同因素对孔隙度的影响

### 2.1 温度、围压对孔隙度的影响

分别在 25 °C、45 °C 和 60 °C 获得孔隙度随围压变化曲线和拟合函数关系(表 4 和图 1)。由图 1 可知,煤的孔隙度具有较好的压力和温度敏感性。相同温度下,煤孔隙度随围压增加呈幂函数减小趋势,温度的升高使得煤的孔隙度呈现先减小后增大的趋势。围压和温度的作用机理不同,围压的作用通过让煤中裂隙闭合而达到,而温度的作用可以使煤体骨架膨胀,较低的温度使煤体骨架向内膨胀,温度升高则骨架向外膨胀。

表 4 不同温度下煤孔隙度与围压函数关系

Table 4 Functions between porosity and confining pressure

温度 (°C)	原生结构煤		构造煤	
	拟合关系 $\varphi(\%)$	相关系数 $R^2$	拟合关系 $\varphi(\%)$	相关系数 $R^2$
25	$5.2597P^{-0.1421}$	0.9949	$12.611P^{-0.2335}$	0.9923
45	$4.4449P^{-0.2729}$	0.9989	$25.178P^{-0.2711}$	0.9365
60	$4.8410P^{-0.1908}$	0.9359	$32.484P^{-0.1748}$	0.9831

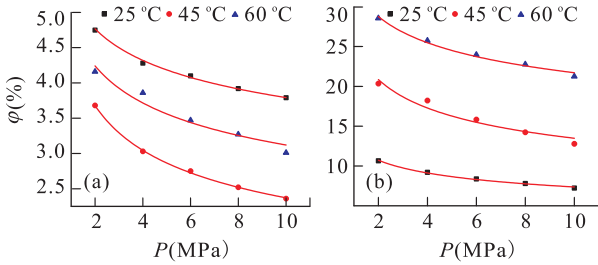


图 1 煤孔隙度随围压变化曲线

Fig. 1 Variation curves of porosity under different temperatures and confining pressure

a. 原生结构煤; b. 构造煤

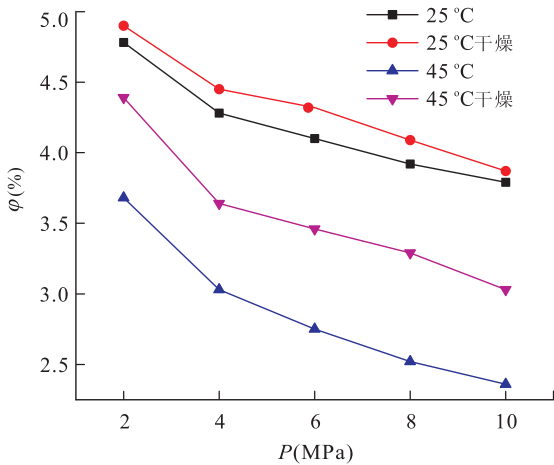


图 2 不同湿度原生结构煤孔隙度随围压变化曲线

Fig. 2 Variation curves of porosity of dried sample and common sample

比较原生结构煤和构造煤,我们可以看出构造煤孔隙度远大于原生结构煤孔隙度,且原生结构煤孔隙度随围压变化幅度大于构造煤,这是由于原生结构煤和构造煤的煤样制作方法不同而引起的。

2.2 湿度对孔隙度的影响

在 25 °C 和 45 °C 我们获得两组原生结构煤孔隙度随围压变化的曲线(图 2)。由图 2 可知,湿度对原生结构煤孔隙度影响较大;常温时两组原生结构煤孔隙度差别不大,45 °C 时两组原生结构煤孔隙度差别明显。

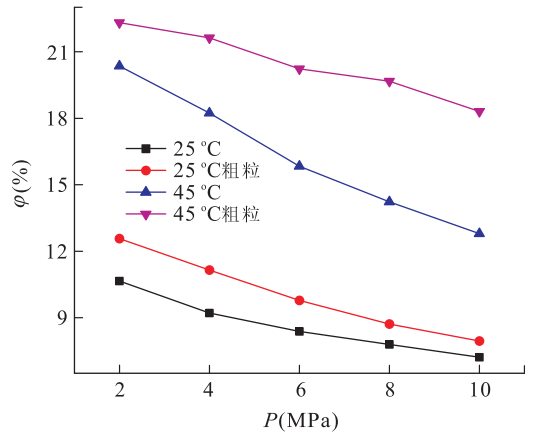


图 3 粗细粒构造煤孔隙度随围压变化曲线

Fig. 3 Variation curves of porosity of coarse samples and fine samples

2.3 煤体结构类型对孔隙度的影响

在 25 °C 和 45 °C 我们获得细粒和粗粒两组构造煤孔隙度随围压变化曲线(图 3)。由图 3 可知,煤体结构对煤的孔隙度影响较大;常温时两组构造煤孔隙度差别不大,45 °C 时两组构造煤孔隙度差别明显。粗粒和细粒两组构造煤分别用来模拟粒径较大的碎粒煤和粒径较小的糜棱煤,图 3 表明碎粒煤具有较高的孔隙度,能够储存更多的瓦斯,温度升高会使得碎粒煤孔隙度显著增大。

3 不同因素对渗透率的影响

3.1 温度、围压对渗透率的影响

笔者分别在恒定围压 2 MPa、6 MPa 和 10 MPa 条件下获得渗透率随温度变化曲线和拟合函数关系(图 4a、4b 和表 5)。由图 4 可知,相同围压下,煤的渗透率随温度升高呈指数函数下降。不同围压下,围压越大渗透率越小,并且围压越大渗透率随温度变化曲线越趋于平缓。曲线表明围压的作用使得由于热效应而引起的煤体膨胀减弱,围压越大这种减弱效应越明显。对比原生结构煤和构造煤渗透率曲线可知,围压的升高使得原生结构煤渗透率直接降到最低,而构造煤的渗透率则缓慢减小。

笔者分别在 25 °C、40 °C 和 55 °C 获得渗透率随围压变化曲线和拟合函数关系(图 4c、4d 和表 6)。由图 4 可知,相同温度下,煤的渗透率随围压的升高呈指数函数下降。不同温度下,煤的渗透率随围压变化规律不同,温度的升高使得煤的渗透率呈现先减小再增大的趋势。

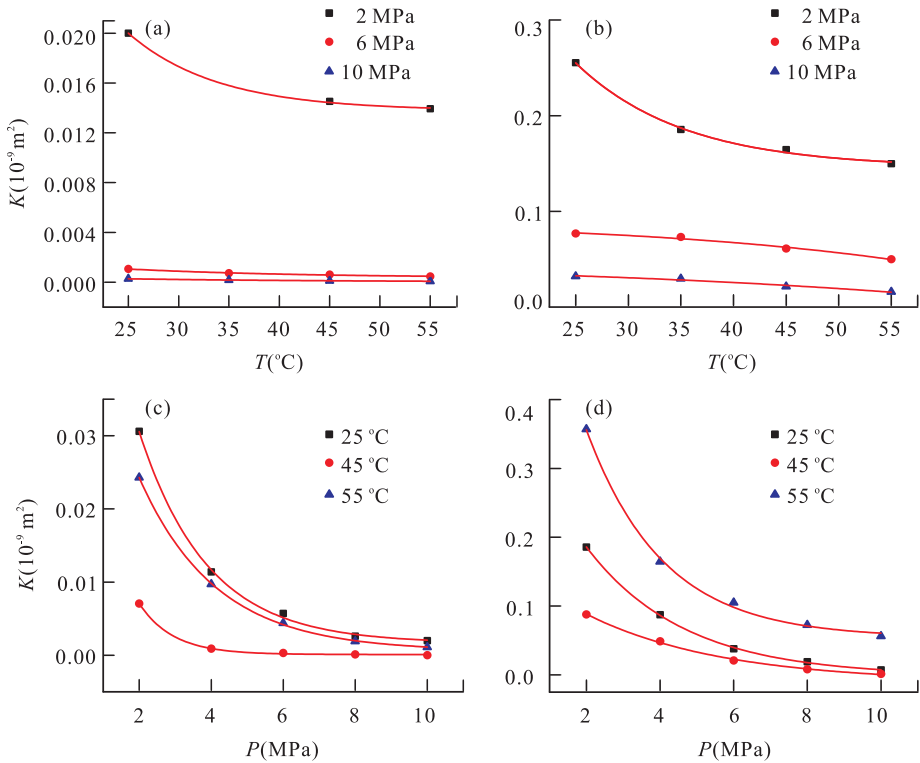


图 4 不同条件下原生结构煤和构造煤渗透率变化曲线

Fig. 4 Variation curves of permeability under different conditions

a. 恒围压条件下原生结构煤渗透率变化曲线; b. 恒围压条件下构造煤渗透率变化曲线; c. 恒温度条件下原生结构煤渗透率变化曲线; d. 恒温度条件下构造煤渗透率变化曲线

表 5 恒围压条件下煤渗透率与温度函数关系

Table 5 Functions between permeability and temperature

围压 (MPa)	原生结构煤		构造煤	
	拟合关系 $K$ ( $10^{-9} \text{ m}^2$ )	相关系数 $R^2$	拟合关系 $K$ ( $10^{-9} \text{ m}^2$ )	相关系数 $R^2$
2	$K=0.014+0.104e^{-0.113T}$	0.998 4	$K=0.146+1.24e^{-0.097T}$	0.992 7
6	$K=0.003e^{-0.057T}$	0.965 2	$K=0.091-0.006e^{0.042T}$	0.960 6
10	$K=8 \times 10^{-4}e^{-0.046T}$	0.992 1	$K=0.048-0.009e^{0.025T}$	0.935 5

表 6 恒温度条件下煤渗透率与围压函数关系

Table 6 Functions between permeability and confining pressure

温度 (°C)	原生结构煤		构造煤	
	拟合关系 $K$ ( $10^{-9} \text{ m}^2$ )	相关系数 $R^2$	拟合关系 $K$ ( $10^{-9} \text{ m}^2$ )	相关系数 $R^2$
25	$K=0.001+0.08e^{-0.528P}$	0.998 3	$K=-0.002+0.4e^{-0.378P}$	0.999 4
40	$K=0.059e^{-1.068P}$	0.998 7	$K=-0.011+0.17e^{-0.27P}$	0.996 7
55	$K=0.061e^{-0.471P}$	0.999 6	$K=0.054+0.79e^{-0.481P}$	0.996 9

渗透率随围压的变化幅度却很大,由此可知,围压和温度这 2 个因素对渗透率的影响是相互制约的,其中围压是更主要的影响因素。

### 3.2 湿度对渗透率的影响

根据实验数据绘制普通和干燥两组原生结构煤的渗透率在恒定围压和恒定温度条件下的变化曲线(图 5a、5b)。由图 5 可知,湿度对渗透率的影响较大;2 MPa 时两组原生结构煤渗透率差别较大,6 MPa 时两组原生结构煤渗透率差别不大;常温时两组原生结构煤渗透率差别较大,40 °C 时两组原生结构煤渗透率差别不大。这说明围压和温度的升高减小了湿度对渗透率的影响。

### 3.3 煤体结构类型对渗透率的影响

根据实验数据绘制细粒和粗粒两组构造煤的渗透率在恒定围压和恒定温度条件下的变化曲线(图 6a、6b)。由图 6 可知,煤体结构类型对渗透率的影响较大,表明碎粒煤具有较高的渗透率,其中的瓦斯更容易排出,2 MPa 条件下,粗粒构造煤比细粒构造煤渗透率大,而 6 MPa 条件下,粗粒构造煤却比细粒构造煤渗透率小,说明围压的升高对粗粒构造煤影响更大。

结合图 4 中 4 组曲线分析可以看出,围压恒定时,温度的变化对渗透率的影响不大;温度恒定时,

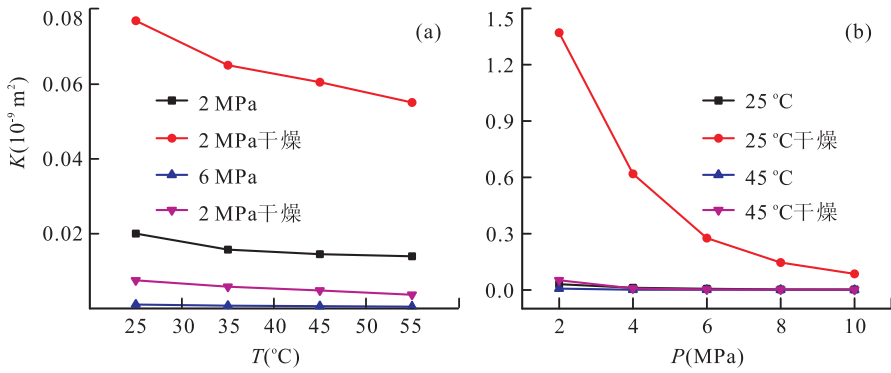


图 5 不同湿度原生结构煤渗透率变化曲线

Fig. 5 Variation curves of permeability of dried samples and common samples

a. 恒定围压条件下; b. 恒定温度条件下

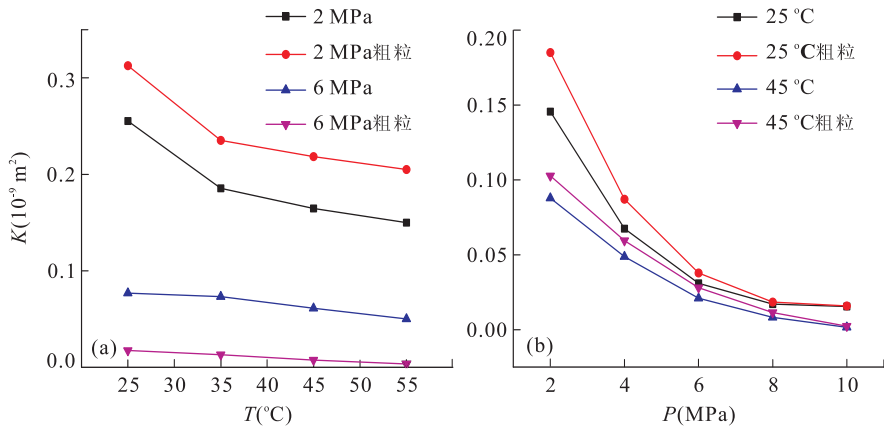


图 6 粗细粒构造煤渗透率变化曲线

Fig. 6 Variation curves of permeability of coarse samples and fine samples

a. 恒定围压条件下; b. 恒定温度条件下

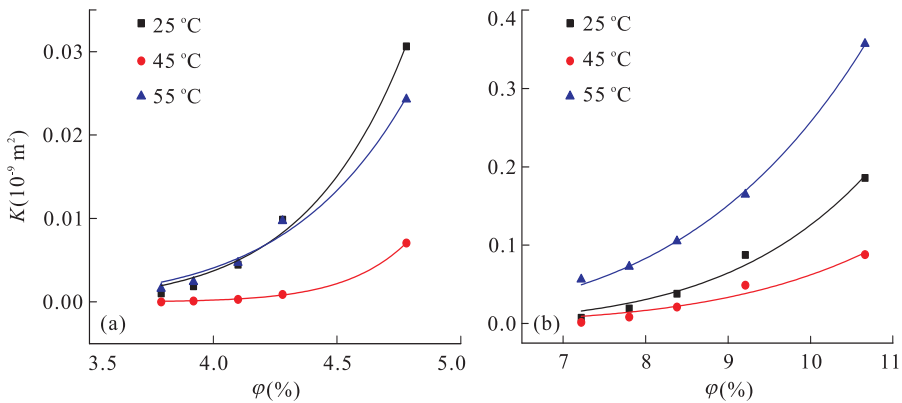


图 7 煤的孔隙度与渗透率关系曲线

Fig. 7 Variation curves of porosity and permeability

a. 原生结构煤; b. 构造煤

### 4 渗透率与孔隙度变化规律探讨

我们对渗透率和孔隙度数据进行拟合得到原生结构煤和构造煤渗透率与孔隙度拟合曲线和函数关

系(图 7a、7b 和表 7)。由图 7 和表 7 可知,煤渗透率随孔隙度的增加呈幂函数规律增加,煤层孔隙度和渗透率之间具有明显的相关性,并且孔隙度越大,渗透率变化越快,对其变化速率的影响因素主要是孔

表 7 煤的渗透率与孔隙度的函数关系

Table 7 Functions between permeability and porosity

温度 (C)	原生结构煤		构造煤	
	拟合关系 K ( $10^{-2} \text{ m}^2$ )	相关系数 $R^2$	拟合关系 K ( $10^{-2} \text{ m}^2$ )	相关系数 $R^2$
25	$3 \times 10^{-10} \varphi^{11.86}$	0.992 3	$6 \times 10^{-8} \varphi^{6.33}$	0.985 6
40	$5 \times 10^{-16} \varphi^{19.36}$	0.999 6	$8 \times 10^{-8} \varphi^{5.89}$	0.957 0
55	$4 \times 10^{-9} \varphi^{10.07}$	0.987 2	$2 \times 10^{-6} \varphi^{5.07}$	0.998 7

隙结构以及分布情况.

温度的升高使得相同孔隙度的煤渗透率呈现先减小后增大的趋势,温度的升高引起了煤层骨架先向内膨胀后向外膨胀的变化(李志强等,2009;许江等,2011),造成了孔隙结构的变化,从而进一步影响了渗透率的变化.

对比原生结构煤和构造煤的渗透率—孔隙度函数关系,可以看出原生结构煤渗透率随孔隙度的增速大于构造煤,这是因为煤样制作方法不同,造成了孔隙结构和分布上的不同.

## 5 结论

(1)煤的孔隙度和渗透率随围压的升高分别呈幂函数和指数函数减小,随温度的升高呈现先减小再增大的趋势,围压和温度同时作用时,围压的作用效果大于温度的作用效果.

(2)不同湿度的原生结构煤其孔隙度和渗透率差别较大,不同煤体结构类型的构造煤其孔隙度和渗透率差别较大;围压和温度的作用放大了湿度和煤体结构对孔隙度的影响,减小了湿度对渗透率的影响.

(3)相同条件下,煤的渗透率随孔隙度变化呈幂函数增长关系,温度的升高使得相同孔隙度的煤渗透率呈现先减小后增大的趋势,原生结构煤和构造煤的渗透率—孔隙度函数关系不相同.

## References

Arenas, E., Chejne, F., 2004. The Effect of the Activating Agent and Temperature on the Porosity Development of Physically Activated Coal Chars. *Carbon*, 42(12-13): 2451-2455. doi:10.1016/j.carbon.2004.04.041

Baghbanan, A., Jing, L., 2008. Stress Effects on Permeability in a Fractured Rock Mass with Correlated Fracture Length and Aperture. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(8): 1320-1334. doi:10.1016/j.ijrmms.2008.01015

Dana, E., Skoczylas, F., 1999. Gas Relative Permeability and Pore Structure of Sandstones. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36(5): 613-625. doi:10.1016/S0148-9062(99)00037-6

Díaz Aguado, M. B., González Nicieza, C., 2007. Control and Prevention of Gas Outbursts in Coal Mines, Riosa-Olloniego Coalfield, Spain. *International Journal of Coal Geology*, 69(4): 253-266. doi:10.1016/j.coal.2006.05.004

Feng, Z. J., Wan, Z. J., Zhao, Y. S., et al., 2010. Experimental Study of Permeability of Anthracite and Gas Coal Masses under High Temperature and Triaxial Stress. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 29(4): 689-696 (in Chinese with English abstract).

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): 129-131, 137 (in Chinese with English abstract).

Ghabezloo, S., Sulem, J., Guédon, S., et al., 2009. Effective Stress Law for the Permeability of a Limestone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(2): 297-306. doi:10.1016/j.ijrmms.2008.05.006

Guo, D. Y., Han, D. X., Feng, Z. L., 1998. Experimental Study on the Porosity and Permeability of Disturbed Coal under Confined Pressure. *Coal Geology & Exploration*, 26(4): 31-34 (in Chinese with English abstract).

Guo, D. Y., Song, G. T., Ku, M. X., 2002. Research on Coal Structure Indices to Coal and Gas Outbursts in Pingdingshan Mine Area, China. *Journal of Coal Science & Engineering (China)*, 8(1): 1-6.

He, Y. L., Yang, L. Z., 2005. Mechanism of Effects of Temperature and Effective Stress on Permeability of Sandstone. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(14): 2420-2427 (in Chinese with English abstract).

Hu, X., Liang, W., Hou, S. J., et al., 2012. Experimental Study of Effect of Temperature and Stress on Permeability Characteristics of Raw Coal and Shaped Coal. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 31(6): 1222-1229 (in Chinese with English abstract).

Hu, Y. Q., Zhao, Y. S., Yang, D., et al., 2010. Experimental Study of Effect of Temperature on Permeability Characteristics of Lignite. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 29(8): 1585-1590 (in Chinese with English abstract).

- Huang, Y. Z., Wang, E. Z., 2007. Experimental Study on Coefficient of Sensitiveness between Percolation Rate and Effective Pressure for Low Permeability Rock. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26(2): 410—414 (in Chinese with English abstract).
- Jasinge, D., Ranjith, P. G., Choi, S. K., 2011. Effects of Effective Stress Changes on Permeability of Latrobe Valley Brown Coal. *Fuel*, 90(3): 1292—1300. doi: 10.1016/j.fuel.2010.10.053
- Konecny, P., Kozusnikova, A., 2011. Influence of Stress on the Permeability of Coal and Sedimentary Rocks of the Upper Silesian Basin. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(2): 347—352. doi: 10.1016/j.ijrmms.2010.11.017.
- Li, Z. Q., Xian, X. F., Long, Q. M., 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).
- Liu, X. J., Gao, H., Liang, L. X., 2011. Study of Temperature and Confining Pressure Effects on Porosity and Permeability in Low Permeability Sandstone. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 30(Suppl. 2): 3771—3778 (in Chinese with English abstract).
- Peng, S. P., Meng, Z. P., Wang, H., et al., 2003. Testing Study on Pore Ratio and Permeability of Sandstone under Different Confining Pressures. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 22(5): 742—746 (in Chinese with English abstract).
- Sulem, J., Ouffroukh, H., 2006. Shear Banding in Drained and Undrained Triaxial Tests on a Saturated Sandstone: Porosity and Permeability Evolution. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(2): 292—310. doi: 10.1016/j.ijrmms.2005.07.001
- Wang, R. F., Chen, M. Q., 2008. Characteristics and Influencing Factors of Movable Fluid in Ultra-Low Permeability Sandstone Reservoir. *Acta Petrolei Sinica*, 29(4): 558—561, 566 (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).
- Xu, J. Y., Peng, D. J., Luo, Z. T., 1995. Significant Effect of Confining Pressure on Structural Fracture Porosities. *Acta Petrolei Sinica*, 16(3): 44—47 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, C. F., 1985. Tectonically Deformed Coal and Coal Gas Outburst. *Coal Science and Technology*, 1(1): 53—60 (in Chinese).

### 附中中文参考文献

- 冯子军, 万志军, 赵阳升, 等, 2010. 高温三轴应力下无烟煤、气煤煤体渗透特性的试验研究. *岩石力学与工程学报*, 29(4): 689—696.
- 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—131, 137.
- 郭德勇, 韩德馨, 冯志亮, 1998. 围压下构造煤的孔隙度和渗透率特征实验研究. *煤田地质与勘探*, 26(4): 31—34.
- 贺玉龙, 杨立中, 2005. 温度和有效应力对砂岩渗透率的影响机理研究. *岩石力学与工程学报*, 24(14): 2420—2427.
- 胡雄, 梁为, 侯△靖, 等, 2012. 温度与应力对原煤、型煤渗透特性影响的试验研究. *岩石力学与工程学报*, 31(6): 1222—1229.
- 胡耀青, 赵阳升, 杨栋, 等, 2010. 温度对褐煤渗透特性影响的试验研究. *岩石力学与工程学报*, 29(8): 1585—1590.
- 黄远智, 王恩志, 2007. 低渗透岩石渗透率对有效应力敏感系数的试验研究. *岩石力学与工程学报*, 26(2): 410—414.
- 李志强, 鲜学福, 隆晴明, 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.
- 刘向君, 高涵, 梁利喜, 2011. 温度围压对低渗透砂岩孔隙度和渗透率的影响研究. *岩石力学与工程学报*, 30(增刊 2): 3771—3778.
- 彭苏萍, 孟召平, 王虎, 等, 2003. 不同围压下砂岩孔渗规律试验研究. *岩石力学与工程学报*, 22(5): 742—746.
- 王瑞飞, 陈明强, 2008. 特低渗透砂岩储层可动流体赋存特征及影响因素. *石油学报*, 29(4): 558—561, 566.
- 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.
- 许浚远, 彭大钧, 罗蛰潭, 1995. 围压对构造裂缝孔隙度的重要影响. *石油学报*, 16(3): 44—47.
- 袁崇孚, 1985. 构造煤和煤与瓦斯突出. *煤炭科学技术*, 1(1): 53—60.