



王奥,刘健,孙安祥. 向斜构造中煤体孔隙结构发育规律研究[J]. 矿业安全与环保,2024,51(2):53-58.  
WANG Ao,LIU Jian,SUN Anxiang. Study on the development law of coal pore structure in syncline structure[J]. Mining Safety & Environmental Protection,2024,51(2):53-58.  
DOI: 10.19835/j.issn.1008-4495.20230472

扫码阅读下载

## 向斜构造中煤体孔隙结构发育规律研究

王奥<sup>1</sup>,刘健<sup>1,2</sup>,孙安祥<sup>1</sup>

(1. 安徽理工大学 安全科学与工程学院,安徽 淮南 232001;  
2. 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室,安徽 淮南 232001)

**摘要:**为探究向斜构造中煤体孔隙结构发育规律,以长城三矿 1311S 工作面向斜构造为研究对象,从向斜构造区域不同位置选取煤样,通过低温氮气吸附实验,对煤体孔隙结构特征进行分析。结果表明,向斜构造区域内煤体孔隙结构呈现规律性分布,比表面积与总孔体积从轴部向两翼逐渐减小,平均孔直径则逐渐增大;最可几孔径均分布在 2 nm 左右,向斜轴部最可几孔径小于两翼;通过对比分析分形维数得出,随着两翼距离向斜轴部越近,分形维数数值呈现线性增大趋势。通过对同一向斜不同位置煤体的孔隙结构特征进行分析,总结出向斜构造中煤体孔隙结构发育规律。

**关键词:**构造煤;孔隙结构;低温氮气吸附;比表面积;分形维数;吸附能力

**中图分类号:**TD712.52 **文献标志码:**A **文章编号:**1008-4495(2024)02-0053-06

### Study on the development law of coal pore structure in syncline structure

WANG Ao<sup>1</sup>,LIU Jian<sup>1,2</sup>,SUN Anxiang<sup>1</sup>

(1. School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;  
2. Key Laboratory of Safety and High-Efficiency Coal Mining, Ministry of Education, Huainan 232001, China)

**Abstract:** In order to explore the development law of coal pore structure in syncline structure, taking the syncline structure in 1311S working face of Changcheng No. 3 Coal Mine as the research object, the characteristics of coal pore structure were analyzed by low temperature nitrogen adsorption experiment which the coal samples were drilled from different positions in syncline structure region. The results show that the pore structure of coal sample in the syncline structure region shows regular distribution; the specific surface area and total pore volume gradually decrease from the axis to the two wings, while the average pore diameter increases gradually; the maximum pore sizes are all distributed around 2 nm, and the diameter of the maximum pore size in the syncline axis is less than that of the two wings; through the comparative analysis of the fractal dimension, the value of the fractal dimension increases linearly with the nearer the distance between the two wings to the oblique axis. Based on the analysis of the pore structure characteristics of coal samples in different positions of the same syncline, the development law of coal pore structure in the syncline structure is summarized.

**Keywords:** structural coal; pore structure; low temperature nitrogen adsorption; specific surface area; fractal dimension; adsorption capacity

地质构造是影响瓦斯赋存的主要因素。向斜构造是常见的地质构造形式之一,其形成的原因是

岩(煤)层受水平应力挤压,应力分布不均匀,因此构造部位煤体会出现一定的应力增高现象,对煤体孔隙结构产生影响。煤的孔隙结构不仅会影响原始煤体瓦斯赋存,还会影响煤层开采时瓦斯的解吸、扩散与渗流。故而,对向斜构造区域煤体孔隙结构开展研究,分析并总结其演化规律,可以为构造区域煤体瓦斯治理提供理论依据,对矿井安全生产具有重要意义。

收稿日期:2023-06-08;2024-04-08 修订

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC28000900);  
安徽省高校协同创新项目(GXXT-2020-057)

作者简介:王奥(1998—),男,安徽宿州人,硕士,主要从事瓦斯灾害防治方面的研究工作。E-mail:2275156010@qq.com。

近年来,众多学者针对构造煤孔隙结构的相关特征研究较多。程远平等<sup>[1]</sup>通过压汞法分析构造煤孔隙结构,认为构造作用导致煤体具有更大的总孔隙体积和比表面积;李宗翔等<sup>[2]</sup>通过低温氮气吸附实验,对断层构造煤进行研究分析,发现断层构造煤的比表面积、孔径、孔容均大于原生结构煤;李铭杰<sup>[3]</sup>、马瑞帅<sup>[4]</sup>等通过对构造煤孔隙结构与分形维数进行分析,得出构造煤孔隙结构越复杂,微孔孔容越大,煤样的吸附能力越强;林华颖等<sup>[5]</sup>通过压汞法与氮气吸附联合分析,得出构造煤具有更加复杂的孔隙结构和更加粗糙的孔隙表面;周睿等<sup>[6]</sup>通过对逆断层不同距离煤体开展实验研究,得出逆断层构造改变了煤体裂隙发育程度,导致煤体部分封闭孔隙打开;ZHANG 等<sup>[7]</sup>运用 FHH 模型对比分析原生煤与构造煤,得出构造煤孔隙结构更均匀且孔隙表面更粗糙;WANG 等<sup>[8]</sup>通过分析构造煤的孔径分布曲线,发现构造作用会导致煤的孔隙结构变得更加曲折或复杂;李希建等<sup>[9]</sup>采用 BJH 法绘制了煤样的孔径分布图,得出在受构造影响之后,煤体的平均孔直径和最可几孔径均有不同程度的减小。

目前,学者们多是通过对比原生结构煤来分析构造煤的相关特征,但是针对煤的具体构造类别研究相对较少。由于向斜构造煤在形成过程中不同区域的应力分布不同,其孔隙结构特征会受到相应影响,不同位置煤体孔隙结构也会发生不同程度的改变,因此有必要对其开展规律性研究。

## 1 取样及实验方法

### 1.1 煤样采集与制备

以长城三号煤矿 1311S 工作面向斜构造为研究对象,在 1311S 工作面运输巷不同位置分别取新鲜块状煤样,各煤样分别取自向斜轴部不同水平距离点。

向斜轴部取样点用 O 表示,在轴部左右两侧 200 m 和 400 m 处的取样点分别用 Z2、Z4 和 Y2、Y4 表示,如图 1 所示。

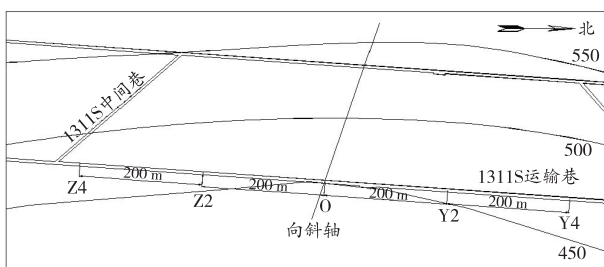


图 1 取样位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sampling position

使用保鲜膜对采集到的实验煤样进行密封并运送至实验室,去除表面风化部分后按照 GB 474—2008 煤样制备方法对煤样进行加工。煤样的工业分析结果见表 1。

表 1 实验煤样的工业分析结果  
Table 1 Results of industrial analysis of experimental coal samples

煤样编号	$M_{ad}/\%$	$A_{ad}/\%$	$V_{ad}/\%$	$FC_{ad}/\%$
Z4	2.87	5.06	42.86	52.08
Z2	3.45	7.59	35.58	56.83
O	2.25	21.01	35.85	43.14
Y2	2.79	7.03	37.44	55.53
Y4	2.64	4.61	38.85	56.54

### 1.2 低温氮气吸附及原理

低温氮气吸附法是利用煤体孔隙表面具有吸附小分子气体这一特性,测定孔隙比表面积、孔径分布。通过改变氮气的相对压力  $p/p_0$ ,从而改变氮分子在煤体孔隙表面的吸附量。由于吸附量与煤体表面微孔的大小相关,因而其可作为定量表征孔径的计算依据。计算模型方面,常采用 Brumauer-Emmett-Teller 提出的多层吸附模型<sup>[10]</sup>,当相对压力为 0.02~0.40 时,吸附量与相对压力的关系符合 Brumauer-Emmett-Teller (BET) 方程,所以其又可作为比表面积定量表征的计算依据。比表面积计算采用 BET 公式:

$$\frac{p/p_0}{V(1-p/p_0)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{C-1}{V_m C} \cdot \frac{p}{p_0} \quad (1)$$

其中:

$$V_m = \frac{1}{a+b} \quad (2)$$

$$C = \frac{b}{a} + 1 \quad (3)$$

比表面积  $S$  计算公式如下:

$$S = N_A a_m V_m / 22414 \quad (4)$$

式中: $p/p_0$  为相对压力; $p_0$  为吸附质在吸附温度下的饱和蒸气压, kPa; $p$  为吸附平衡后的压力, kPa; $V$  为当吸附平衡压力为  $p$  时,吸附剂对吸附质的吸附量, mL/g; $V_m$  为吸附剂对吸附质的单层饱和吸附量, mL/g; $C$  为与吸附剂的吸附性能有关的常数; $a$ 、 $b$  为拟合直线的斜率和截距; $N_A$  为阿伏伽德罗常数,  $N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ; $a_m$  为吸附质分子的截面积,  $\text{nm}^2$ 。

各煤样根据毛细管凝聚理论进行孔径计算,运

用 Kelvin 方程:

$$r = -\frac{2\sigma V \cos \theta}{RT \ln(p/p_0)} \quad (5)$$

式中:  $r$  为凝聚在孔隙中的液氮曲率半径, nm;  $\sigma$  为液氮表面张力, N/cm;  $V$  为液氮摩尔体积, mL/mol;  $\theta$  为弯月面与固体壁的接触角, 在液体可润湿表面时取 0;  $R$  为理想气体常数, 取 8.314 J/(mol·K);  $T$  为实验时的热力学温度, K。

本次研究中, 液氮吸附孔径测定采用 BMD-PM 高性能比表面积及微孔分析仪。在图 1 中所示的取样点各取 1 种煤样(共计 5 种), 对其进行处理后, 通过仪器进行孔径分析, 孔径测试范围为 0.02 ~ 400.00 nm。煤样处理: 将煤样粉碎过筛, 筛选粒径为 0.2~0.3 mm 的煤样, 然后在真空干燥箱(105 °C 条件下)干燥 24 h, 取出密封备用。分析时, 将煤样加入煤样管内, 在 110 °C 下抽真空 2 h 后移至测试仪器中进行测试分析。

## 2 实验结果分析

### 2.1 等温吸附(脱附)曲线

对 1311S 工作面向斜构造区域所取煤体煤样进行液氮吸附解吸实验, 5 种煤样的等温吸附(脱附)曲线如图 2 所示。图 2 中取  $(p/p_0)/[V(1-p/p_0)]$  为纵坐标, 代表其吸附能力; 相对压力  $p/p_0$  为横坐标。

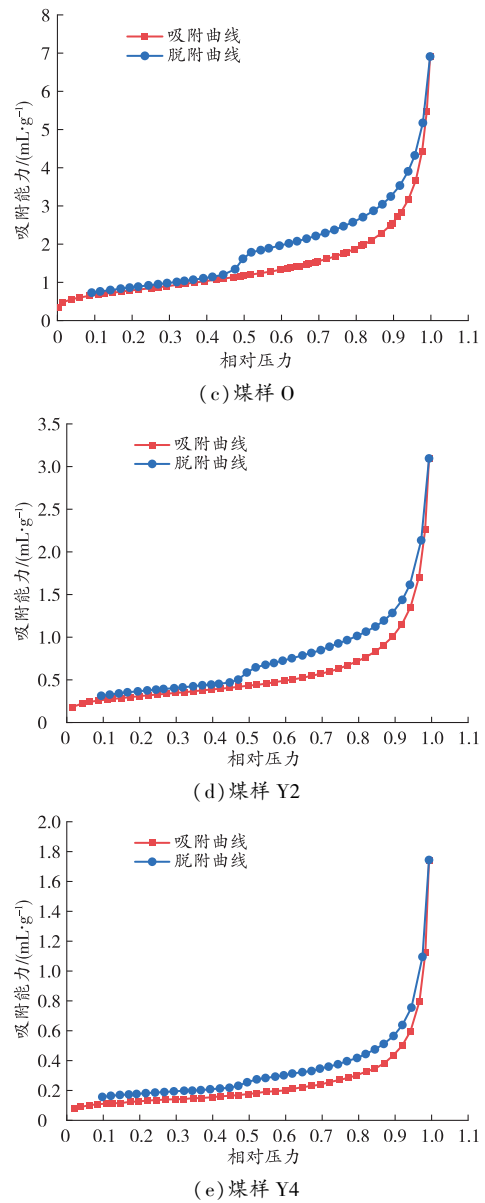
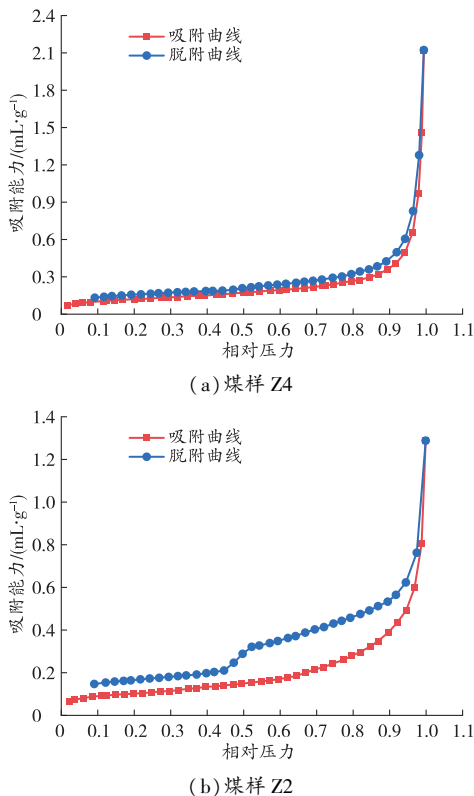


图 2 煤样等温吸附(脱附)曲线

Fig. 2 Isothermal adsorption (desorption) curve of coal samples

由氮气吸附原理可知, 在氮气吸附时, 煤体孔隙越小, 具有的吸附势越高, 越先开始吸附<sup>[11]</sup>。由图 2 可以看出, 在初始阶段, 当相对压力小于 0.02 时, 此时微孔作为吸附质的主要吸附孔, 氮气吸附量上升较快; 之后相对压力为 0.02~0.87 时, 此时氮气分子在煤样孔隙内表面残余少量单分子层吸附, 并进行了多分子层吸附, 所以吸附曲线呈现较缓增长趋势; 当相对压力大于 0.87 时, 吸附量快速上升, 直至相对压力  $p/p_0$  接近于 1.0 时, 吸附曲线陡直上升, 说明在中孔完成多层吸附后, 较大孔隙开始进行吸附且发生了“毛细管凝聚现象”<sup>[12-13]</sup>。通过对比各吸附曲线还可以看出, 当相对压力小于 0.02 时, 向斜轴部煤样 O 的吸附速率明显大于两翼煤样的吸附速率。同时, 当相对压力相等时, 向斜轴部煤样 O 的吸

附量明显高于两翼煤样的吸附量。

氮气脱附时,则与吸附过程相反,先是由大孔进行脱附,随着压力的逐渐降低,吸附质依次从大孔、中孔、小孔中蒸发脱离,从而产生脱附曲线。由图 2 脱附曲线可以看出,在相对压力为 0.49 左右时,曲线产生了明显的拐点,这是由于煤体中存在“墨水瓶”型孔所致<sup>[9]</sup>。向斜轴部煤样 O 及轴部附近区域煤样 Z2、Y2 曲线也产生了较为明显的拐点,而距离向斜轴部区域更远的煤样 Z4、Y4 曲线产生拐点范围较小,这说明其存在的“墨水瓶”型孔数量较少。

### 2.2 BJH 法孔径计算

在进行多孔固体孔径计算时,常采用 Barret-Joyner-Halenda (BJH) 法孔径计算模型<sup>[14-16]</sup>,其中相同直径数目最多的孔被称为最可几孔。根据 BJH 法孔径计算模型所得结果见表 2。

表 2 液氮吸附解吸实验测试结果  
Table 2 Experimental results of adsorption and desorption of liquid nitrogen

煤样编号	比表面积/ ( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	总孔体积/ ( $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$ )	平均孔直径/nm	最可几孔径/nm
Z4	0.439 9	0.002 5	22.732 4	2.143 0
Z2	1.373 6	0.003 4	14.989 3	2.012 2
O	2.848 5	0.008 7	12.217 0	1.831 8
Y2	1.111 6	0.004 4	15.833 0	2.042 6
Y4	0.459 3	0.002 4	20.901 4	2.035 1

由表 2 可知,各煤样比表面积测定结果为 0.439 9~2.848 5  $\text{m}^2/\text{g}$ ,其中向斜轴部煤样 O 比表面积约为煤样 Z2、Y2 比表面积的 2.07 倍、2.56 倍,约为煤样 Z4、Y4 比表面积的 6.47 倍、6.20 倍;各煤样总孔体积为 0.002 4~0.008 7  $\text{mL}/\text{g}$ ,其中向斜轴部煤样 O 总孔体积约为煤样 Z2、Y2 总孔体积的 2.56 倍、1.98 倍,约为煤样 Z4 和 Y4 总孔体积的 3.48 倍、3.63 倍;平均孔直径为 12.217 0~22.732 4 nm,其中向斜轴部煤样 O 平均孔直径约为煤样 Z2、Y2 平均孔直径的 81.5%、77.16%,约为煤样 Z4、Y4 平均孔直径的 53.74%、58.45%;最可几孔径均在 2 nm 左右,且向斜轴部煤样 O 最可几孔径均小于向斜两翼部分煤样的最可几孔径。

### 2.3 孔隙分形特征分析

在进行煤体孔隙结构复杂程度分析时,往往采用分形维数来定量表示。分形维数代表了煤体孔隙结构的发育复杂程度<sup>[11]</sup>。分形维数计算有多种模型,其中 PFEIFER P 创立的 Frenkel-Halsey-Hill (FHH) 模型应用最为广泛<sup>[17]</sup>,与氮气吸附实验所获取的孔隙

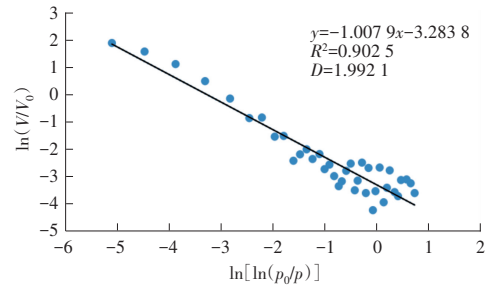
结构参数联合应用拟合性最好<sup>[18]</sup>。

在进行分形维数计算时,将氮气吸附实验所测结果代入 FHH 模型计算式,即可得到分形维数  $D$ ,计算式如下<sup>[3]</sup>:

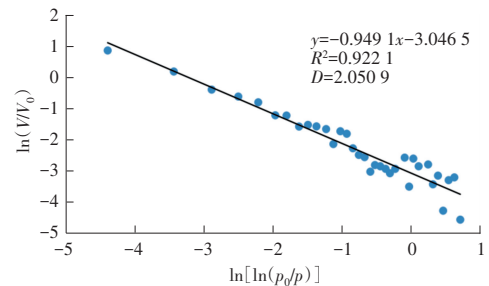
$$\ln\left(\frac{V}{V_0}\right) = C + (D-3) \ln\left[\ln\left(\frac{p_0}{p}\right)\right] \quad (6)$$

式中: $V$  为平衡压力  $p$  下煤体内表面所吸附氮气分子体积,  $\text{mL}/\text{g}$ ;  $V_0$  为使用 BET 方程计算得到的单层吸附氮气气体分子体积,  $\text{mL}/\text{g}$ 。

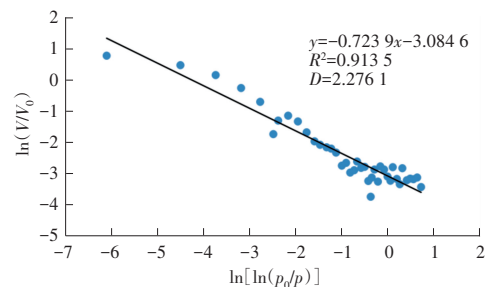
绘制  $\ln(V/V_0) - \ln[\ln(p_0/p)]$  曲线并进行拟合,拟合斜率为  $K$ ,分形维数  $D = K + 3$ 。煤样分形维数拟合图如图 3 所示。



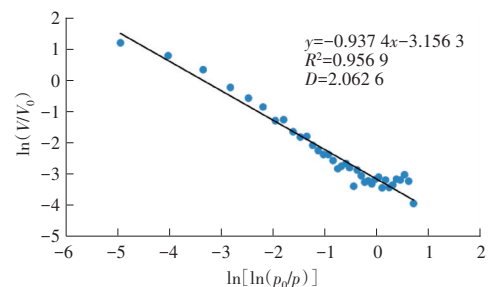
(a) 煤样 Z4



(b) 煤样 Z2



(c) 煤样 O



(d) 煤样 Y2



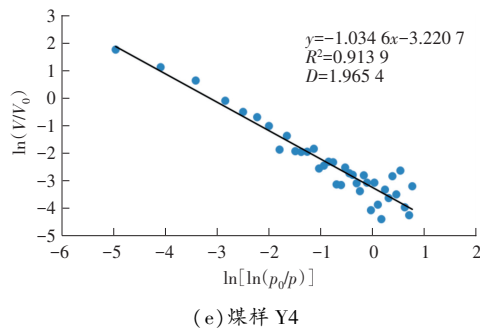


图 3 煤样分形维数拟合图

Fig. 3 Fractal dimension fitting graph of coal samples

由图 3 可以看出,分形维数拟合结果在 1.965 4~2.276 1,其中,向斜轴部煤样 O 分形维数最大,且距离向斜轴部 200 m 处煤样 Z2、Y2 分形维数均大于距离向斜轴部 400 m 处煤样 Z4、Y4 的分形维数,呈现规律性变化。

### 3 结果分析

对比向斜构造轴部区域煤体与构造左右两翼煤体的测试结果,发现向斜轴部区域煤体与两翼煤体有较大差别,而对比左右两翼煤体,不论是在 200 m 处还是在 400 m 处,都没有明显差别。这说明在向斜构造区域,煤体孔隙结构呈对称分布,且以向斜轴部为对称轴。

通过对比分析低温氮气吸附(脱附)曲线发现,在吸附过程中向斜轴部煤体吸附速率快、吸附总量大,同时两翼煤体距离向斜轴部越远吸附速率越慢、吸附总量越少,这说明构造区域煤体吸附能力由轴部向两翼煤体逐渐降低。煤的吸附能力取决于其孔隙结构特征,其中微孔数量越多,吸附速率越快,孔隙体积越大,吸附总量越高。

通过分析表 2 中数据可以看出,受向斜构造影响,向斜构造区域煤体比表面积、总孔体积及平均孔直径皆呈现规律性变化。其中向斜轴部处比表面积与总孔体积最大(与文献[19]研究结果一致),且随着向两翼方向距离的增大而逐渐减小;而向斜轴部处平均孔直径最小,且向两翼方向随着距离的增大逐渐增大。

煤体的分形维数、煤的吸附能力和孔隙结构特征存在一定的关系,其分形维数越大,说明其吸附能力越强,孔隙结构越复杂<sup>[20-21]</sup>。对向斜构造区域不同距离处各煤样分形维数进行拟合分析,结果如图 4 所示。

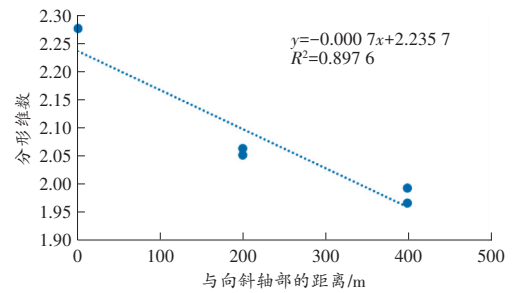


图 4 煤样分形维数与向斜轴部距离关系

Fig. 4 The relationship between fractal dimension of coal samples and the distance of syncline axis

由图 4 可见,随着两翼煤体与向斜轴部的距离减小,分形维数数值呈现线性增大趋势,说明其孔隙结构逐渐复杂,吸附能力也逐渐增强。由此也可知,在向斜构造区域采取瓦斯防治措施时,处于向斜构造区域轴部位置的煤体,发生煤与瓦斯突出的危险性更高,应采取更加细化的瓦斯防治措施。

### 4 结论

1) 受向斜构造影响,向斜构造区域煤体孔隙呈对称分布,且以向斜轴部为对称轴。

2) 向斜轴部煤体的 BET 比表面积、孔容均大于两翼煤体,且距离向斜轴部越远差距越大;向斜轴部存在更多的“墨水瓶”型孔,两翼煤体“墨水瓶”型孔数量随着距离轴部越远而逐渐减少。

3) 距离向斜轴部越近,其煤体微孔数量越多,且孔隙结构更复杂,吸附能力更强。

### 参考文献(References):

- [1] 程远平,雷杨. 构造煤和煤与瓦斯突出关系的研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 180-198.  
CHENG Yuanping, LEI Yang. Causality between tectonic coal and coal and gas outbursts [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 180-198.
- [2] 李宗翔,张明乾,杨志斌,等. 断层构造对煤结构及氧化自燃特性的影响[J]. 煤炭学报, 2023, 48(3): 1246-1254.  
LI Zongxiang, ZHANG Mingqian, YANG Zhibin, et al. Effect of fault structure on the structure and oxidative spontaneous combustion characteristics of coal [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(3): 1246-1254.
- [3] 李铭杰,卢守青,司书芳,等. 粒径损伤对原生煤和构造煤孔隙结构与分形特征的影响[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(7): 88-94.  
LI Mingjie, LU Shouqing, SI Shufang, et al. Influence of particle size damage on pore structure and fractal characteristics of intact coal and tectonic coal [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(7): 88-94.
- [4] 马瑞帅,田世祥,林华颖,等. 突出孔洞构造煤与原生结构煤瓦斯吸附特性对比研究[J]. 煤矿安全, 2021, 52(9): 16-21.  
MA Ruishuai, TIAN Shixiang, LIN Huaying, et al. Comparative study on gas adsorption characteristics between outburst hole tectonic coal

- and primary structural coal[J]. *Safety in Coal Mines*, 2021, 52(9): 16-21.
- [5] 林华颖, 田世祥, 焦安军, 等. 贵州黔北地区构造煤与原生结构煤孔隙特征及分形[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(33): 14451-14458.
- LI Huaying, TIAN Shixiang, JIAO Anjun, et al. Pore characteristics and fractal of tectonic coal and primary coal in northern Guizhou[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(33): 14451-14458.
- [6] 周睿, 程晓之, 苏伟伟, 等. 逆断层区域煤体孔隙结构及瓦斯吸附解吸特征研究[J]. *煤矿安全*, 2021, 52(9): 22-28.
- ZHOU Rui, CHENG Xiaozhi, SU Weiwei, et al. Study on pore structure and gas adsorption and desorption characteristics of coal in reverse fault area[J]. *Safety in Coal Mines*, 2021, 52(9): 22-28.
- [7] ZHANG K Z, WANG L, CHENG Y P, et al. Geological control of fold structure on gas occurrence and its implication for coalbed gas outburst: Case study in the Qinan coal mine, Huaibei Coalfield, China [J]. *Natural Resources Research*, 2020, 29(2): 1375-1395.
- [8] WANG X L, ZHANG D M, SU E L, et al. Pore structure and diffusion characteristics of intact and tectonic coals: Implications for selection of CO<sub>2</sub> geological sequestration site [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, 81: 103388.
- [9] 李希建, 沈仲辉, 刘钰, 等. 黔西北构造煤与原生结构煤孔隙结构对吸解特性影响实验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2017, 34(1): 170-176.
- LI Xijian, SHEN Zhonghui, LIU Yu, et al. The experimental research on the impact of pore structure in tectonic coal and primary structure coal on gas adsorption-desorption characteristics in northwestern Guizhou[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2017, 34(1): 170-176.
- [10] 赵海军, 魏爱华, 张家祥, 等. 基于氮气吸附法和压汞法的玄武岩孔隙结构特征及其对储层渗透性的影响[J]. *第四纪研究*, 2023, 43(2): 560-572.
- ZHAO Haijun, WEI Aihua, ZHANG Jiexiang, et al. Microscopic pore structure characteristics of basalt and its influence on reservoir permeability based on nitrogen adsorption and mercury injection[J]. *Quaternary Sciences*, 2023, 43(2): 560-572.
- [11] 许满贵, 孟然, 魏攀, 等. 软煤体孔隙结构及其分形特征研究[J]. *矿业安全与环保*, 2015, 42(6): 22-26.
- XU Mangui, MENG Ran, WEI Pan, et al. Study on pore structure and fractal characteristics of soft coal [J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2015, 42(6): 22-26.
- [12] 杜海刚, 宋建伟, 谢军, 等. 弱酸及添加表面活性剂对煤体孔隙的影响及分形特征研究[J]. *矿业安全与环保*, 2021, 48(3): 12-16.
- DU Haigang, SONG Jianwei, XIE Jun, et al. Effect of weak acid and surfactant on coal pore and fractal characteristics[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2021, 48(3): 12-16.
- [13] 李天, 任大忠, 甯波, 等. 煤层孔隙结构多尺度联合表征及其对可动流体的影响[J]. *矿业科学学报*, 2023, 8(4): 569-582.
- LI Tian, REN Dazhong, NING Bo, et al. Multi-scale joint characterization of coal seam pore structure and its influence on movable fluid[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 8(4): 569-582.
- [14] 李志清, 沈鑫, 戚志宇, 等. 基于压汞法与气体吸附法的页岩孔隙结构特征对比研究[J]. *工程地质学报*, 2017, 25(6): 1405-1413.
- LI Zhiqing, SHEN Xin, QI Zhiyu, et al. Comparisons between mercury intrusion and gas adsorption for pore structure characteristics of shale [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(6): 1405-1413.
- [15] 董轩萌, 郭立稳, 董宏伟, 等. 不同煤种孔隙结构分布及特征研究[J]. *煤炭技术*, 2020, 39(9): 83-86.
- DONG Xuanmeng, GUO Liwen, DONG Xianwei, et al. Study on pore structure distribution and characteristics of different coal [J]. *Coal Technology*, 2020, 39(9): 83-86.
- [16] 刘成, 丁万贵, 张健, 等. 临兴区块上古生界煤系页岩孔隙结构多尺度定性-定量综合表征[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(6): 46-57.
- LIU Cheng, DING Wangui, ZHANG Jian, et al. Qualitative-quantitative multi scale characteristics of shale pore structure from Upper Paleozoic coal-measures in Linxing Area [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(6): 46-57.
- [17] 张磊, 侯昌海, 赵迪斐, 等. 煤与页岩低温氮吸附孔隙结构特征与分形特征对比: 以阳泉地区山西组 15<sup>#</sup>煤与页岩为例[J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(29): 68-75.
- ZHANG Kun, HOU Changhai, ZHAO Difei, et al. Comparison of pore structure characteristics fractal characteristics between coal and shale through nitrogen adsorption experiment with the example of Shanxi formation 15<sup>#</sup> coal and shale in Yangquan Area [J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(29): 68-75.
- [18] 安成, 柳广弟, 孙明亮, 等. 基于氮气吸附实验与分形 FHH 模型分析页岩孔隙结构特征: 以鄂尔多斯盆地华池地区区长 7 段为例[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(3): 576-586.
- AN Cheng, LIU Guangdi, SUN Mingliang, et al. Analysis of shale pore structure characteristics based on nitrogen adsorption experiment and fractal FHH model: A case study of 7th member of Triassic Yanchang Formation in Huachi Area, Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2023, 45(3): 576-586.
- [19] 魏建平, 代少华, 温志辉, 等. 不同煤级煤样的孔隙综合表征方法研究[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2015, 34(3): 305-310.
- WEI Jianping, DAI Shaohua, WEN Zhihui, et al. Research on comprehensive characterization method of different rank coal porosity [J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2015, 34(3): 305-310.
- [20] 郝兆栋, 唐书恒, 张松航, 等. 腐泥煤的孔隙结构及分形特征[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(11): 103-109.
- XI Zhaodong, TANG Shuheng, ZHANG Songhang, et al. Pore structure and fractal features of sapropelite [J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(11): 103-109.
- [21] 熊建龙, 王凯, 杜全先, 等. 基于低场核磁共振技术的酸化煤样孔隙特征研究[J]. *矿业安全与环保*, 2022, 49(1): 47-52.
- XIONG Jianlong, WANG Kai, DU Quanxian, et al. Study on pore characteristics of acidified coal samples based on low field nuclear magnetic resonance technology [J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2022, 49(1): 47-52.

(责任编辑: 陈玉涛)