

淮北煤田煤的介孔孔隙结构及其分形特征分析

李胜杰¹, 易王菲^{1,2}, 魏强^{1,2*}, 李浩杰¹, 王文月¹, 夏胡斌¹, 刘志恒¹, 王艺翔¹

¹宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州

²长江大学油气地球化学与环境湖北省重点实验室, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年6月17日; 录用日期: 2025年9月8日; 发布日期: 2025年9月17日

摘要

为了定量描述孔隙结构的复杂程度, 以淮北煤田的煤为研究对象, 分别计算不同煤体结构煤的孔隙分形维数, 采用分形模型、对其孔隙结构特征进行了低温 N_2 吸附性分析。结果表明: 煤中组织孔、角砾孔、张裂隙和剪裂隙均有发育。孙疃煤矿样品的平均孔容为 $0.0025 \text{ cm}^3/100\text{g}$, 平均比表面积为 $2.021 \text{ m}^2/\text{g}$ 。许疃煤矿样品的平均孔容为 $0.002 \text{ cm}^3/100\text{g}$, 比表面积 $0.189 \text{ m}^2/\text{g}$ 。信湖煤矿样品的平均孔容为 $0.0083 \text{ cm}^3/100\text{g}$, 比表面积 $5.89 \text{ m}^2/\text{g}$ 。朱仙庄煤矿样品孔容为 $0.007 \text{ cm}^3/100\text{g}$, 比表面积为 $0.46 \text{ m}^2/\text{g}$ 。煤中介孔以狭窄缝隙形孔、长柱状和平行板状孔为主, 同时含有部分两端开口透气孔和少量狭窄墨水瓶形孔。孔隙分形维数 D_1 介于 $2.42\sim 2.71$, 分形维数 D_2 介于 $2.43\sim 2.70$, 表明其具有复杂的孔隙结构。

关键词

介孔, 孔隙结构, 分形维数, 淮北煤田

Mesopore Structure and Fractal Characteristics of Coals in the Huaibei Coalfield

Shengjie Li¹, Wangfei Yi^{1,2}, Qiang Wei^{1,2*}, Haojie Li¹, Wenyue Wang¹, Hubin Xia¹, Zhiheng Liu¹, Yixiang Wang¹

¹School of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou Anhui

²Hubei Key Laboratory of Petroleum Geochemistry and Environment, Yangtze University, Wuhan Hubei

Received: Jun. 17th, 2025; accepted: Sep. 8th, 2025; published: Sep. 17th, 2025

Abstract

In order to describe the complexity of pore structure, the fractal dimension of coal with different

*通讯作者。

文章引用: 李胜杰, 易王菲, 魏强, 李浩杰, 王文月, 夏胡斌, 刘志恒, 王艺翔. 淮北煤田煤的介孔孔隙结构及其分形特征分析[J]. 自然科学, 2025, 13(5): 1011-1018. DOI: 10.12677/ojns.2025.135106

coal structures was calculated, and the adsorption of low temperature N_2 was analyzed by fractal model. This result shows that the tissue pore, gravel pore, tension fractured and shear fractured were developed in coal. The average pore capacity of the sample in Suntuan coal mine is $0.0025 \text{ cm}^3/100\text{g}$, and the average specific surface area is $2.021 \text{ m}^2/\text{g}$. The average pore capacity of Xutuan coal mine sample is $0.002 \text{ cm}^3/100\text{g}$, and the specific surface area is $0.189 \text{ m}^2/\text{g}$. The average pore capacity of Xinhua coal mine samples is $0.0083 \text{ cm}^3/100\text{g}$, and the specific surface area is $5.89 \text{ m}^2/\text{g}$. The pore capacity of the sample in Zhuxianzhuang coal mine is $0.007 \text{ cm}^3/\text{g}$, and the specific surface area is $0.46 \text{ m}^2/\text{g}$. The coal intermediary pore is dominated by narrow cracks, long column and parallel plates, with some openness pores at both ends and a small amount of narrow ink bottle pores. The pore fractal dimension D_1 is between $2.42\sim 2.71$ and the fractal dimension D_2 from $2.43\sim 2.70$, indicating a complex pore structure.

Keywords

Mesopore, Pore Structure, Fractal Dimension, Huaibei Coalfield

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

煤的孔隙作为煤层气的主要储集场所和运移通道，裂隙作为煤层气产出的主要通道，二者的发育特征及连通性，直接关系到煤层气的吸附/解吸、扩散、渗流和产出[1][2]。深刻认识和理解煤层孔隙、裂隙发育特征及其连通关系，对深入认识煤层气储层、探究煤层流体流动机理和渗流规律、指导煤层气井增产措施实施和排采制度优化具有关键意义[3]-[5]。煤的孔隙结构特征包括孔比表面积、孔径分布、孔容分布、孔隙连通性等，不同煤储层具有明显区别的孔隙结构特征[6]。煤是一种高度非均质多孔材料，从作为具有双重孔隙 - 破裂网络的介质，基于 IUPAC 分类方案煤中的孔隙分为微孔($<2 \text{ nm}$)、介孔($2 \text{ nm}\sim 50 \text{ nm}$)和大孔($>50 \text{ nm}$)组成的原生孔和次生孔。

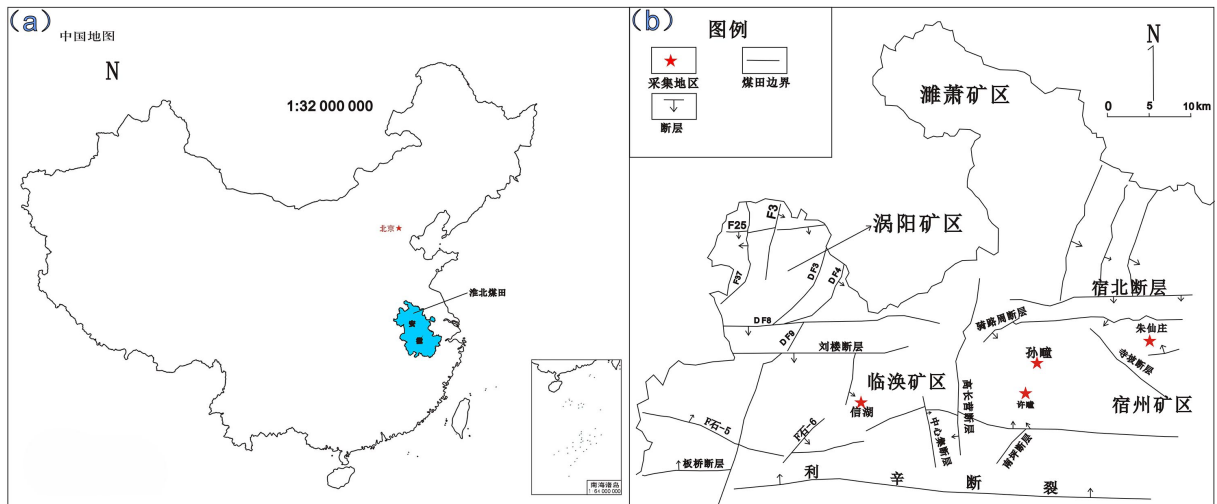
低温氮气吸附被广泛地应用于孔隙结构的测量与分析，降文萍等在低温液氮实验的基础上对不同煤体结构煤的孔隙特征及其对瓦斯突出影响进行了实验分析，阐述了气体优先吸附的孔隙大小和低温液氮吸附回线[7]；陈萍等使用低温氮气吸附的方法对 24 个煤样进行了处理和分析，说明了煤的低温氮气吸附等温曲线和孔隙结构类型[8]；戚灵灵等使用低温氮气吸附法对无烟煤的孔隙结构进行测试，阐述了不同的孔隙对比表面积的贡献程度和对瓦斯吸附、迁移的影响[9]。本文在对前人的研究成果理解的基础上，基于分形理论和 N_2 吸附结果，定量分析了煤孔隙结构的表面粗糙度和非均质性。

2. 地质概况

淮北矿区是中国华东地区重要能源基地，位于安徽省北部苏鲁豫皖交界处。矿区煤炭开发最早可追溯至唐代，1958 年启动现代化开发建设，形成年产 3585 万吨的产能规模。现有 17 对生产矿井，探明储量 274.2 亿吨，主产主焦煤、瘦煤等优质煤种，煤质具有低硫低磷特性。其构造分布为：以宿北断裂为界将淮北煤田划分为南、北 2 个构造分区，北区构造线总体走向近 SN-NNE，呈向西凸出的弧形展布，以逆冲断层为主，发育侏罗山式长轴褶皱；南区构造线走向 NNW 和 NNE，以正断层和开阔短轴褶皱为主。自石炭 - 二叠纪含煤地层沉积后，淮北煤田至少经历了 3 期较大的构造事件，即印支期近 SN 方向的挤压，形成近 EW 向断裂构造为主；燕山早期 NNW-SEE 方向的强烈挤压作用，形成徐宿弧形构造；燕山

晚期 NNE-SSW 方向挤压,在煤田内形成大量 NNE-SSW 方向正断层。

煤田内部划分为濉萧、临涣、涡阳 4 个矿区(见图 1)。根据现有资料表明,中联煤层气公司、中石化、淮南矿业集团、淮北矿业集团和中煤科工集团西安研究院已陆续实施 130 余口煤层气地面钻井。其中在淮北煤田临涣矿区,探明煤炭可采储量为 16,500 万吨。



注:该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2016)1570 号的标准地图制作,底图无修改。

Figure 1. Location of Huaibei coalfield (a) and coal sample collection map (b)

图 1. 淮北煤田位置(a)及煤样采集图(b)

从目前资料看,该区已揭露地层有奥陶系、石炭系、二叠系、第三和第四系。由于淮北煤田的二叠系含一套完整的浅水三角洲沉积构造序列,所以二叠系地层为主要含煤地层[10]。

3. 样品及方法

样品带回实验室后,依据中国国家标准 GB/T19587-2004,采用比表面积分析仪(Microseritics Gemini VII2390)进行氮气(N_2)吸附分析。实验前,对每个样品进行粉碎,以 1 g~2 g 重、粒径 40~60 目(0.25 mm~0.45 mm)的规格筛选出留作备用,然后在 110℃ 下干燥 12 h,以除去吸附的水分。在相对压力为 0~0.995 的区间内对 N_2 吸附等温线进行采集,收集 1.70 nm~300 nm 范围的孔径分布。实验结束后,通过 Barrett-Joyner-Halenda (BJH)模型从氮气吸附数据中计算介孔体积,根据 Brunauer-Emmett-Teller (BET)模型来获得比表面积[11]。

根据 N_2 吸附实验结果,使用 Frenkel-Halsey-Hill (FHH)模型计算分形维数。公式为[12]:

$$\ln(V/V_m) = A \ln[\ln(P_0/P)] + C \quad (1)$$

式中, V 是平衡压力下的吸附体积(cm^3/g), V_m 是平衡压力下的单层覆盖体积(cm^3/g), A 是根据 $\ln(\ln(P_0/P))$ 与 $\ln(V)$ 的关系图进行直线拟合所得的值, P 是吸附过程中的平衡压力(MPa), P_0 是吸附过程中的饱和压力(MPa), C 是常数。

根据 N_2 吸附所采用的 FHH 模型分形原理,拟合所得的分形维数数值可根据公式(2)和(3)计算得到,公式为:

$$D_f = A + 3 \quad (2)$$

$$D_f = 3(A + 1) \quad (3)$$

(3)式中, D_f 是分形维数的值, 它依赖于 A 。公式(2)适用于毛细管冷凝控制条件下的分形维数计算, 而公式(3)通常用于计算范德华力控制条件下的分形维数。一般而言, 基于 FHH 模型的分形维数数值介于 2~3 之间, 接近 2 则表示较为光滑或规则的多孔介质表面。若接近于 3, 则认为多孔介质较为粗糙或极不规则 [12]。

4. 介孔结构参数特征

4.1. 吸附/脱附曲线

一般而言, 具有回滞环的低温氮气吸附/脱附曲线能够反映出多孔介质的孔隙特征和物理吸附机理。基于 IUPAC 分类方案, 氮气吸附等温线被分为 I~VI 类, 而回滞环为 H1~H4 类。图 2 显示, 孙疃、信湖、朱仙庄样品由实验所获取的吸附曲线属于 IV 型曲线, 回滞环为 H4 型。根据吸附/解吸等温线, 相对压力 (P/P_0) 可分为以下 3 个区间, 低压区间 ($P/P_0 < 0.1$)、中压区间 ($0.1 < P/P_0 < 0.9$)、高压 - 压力段 ($P/P_0 > 0.9$) [13]。

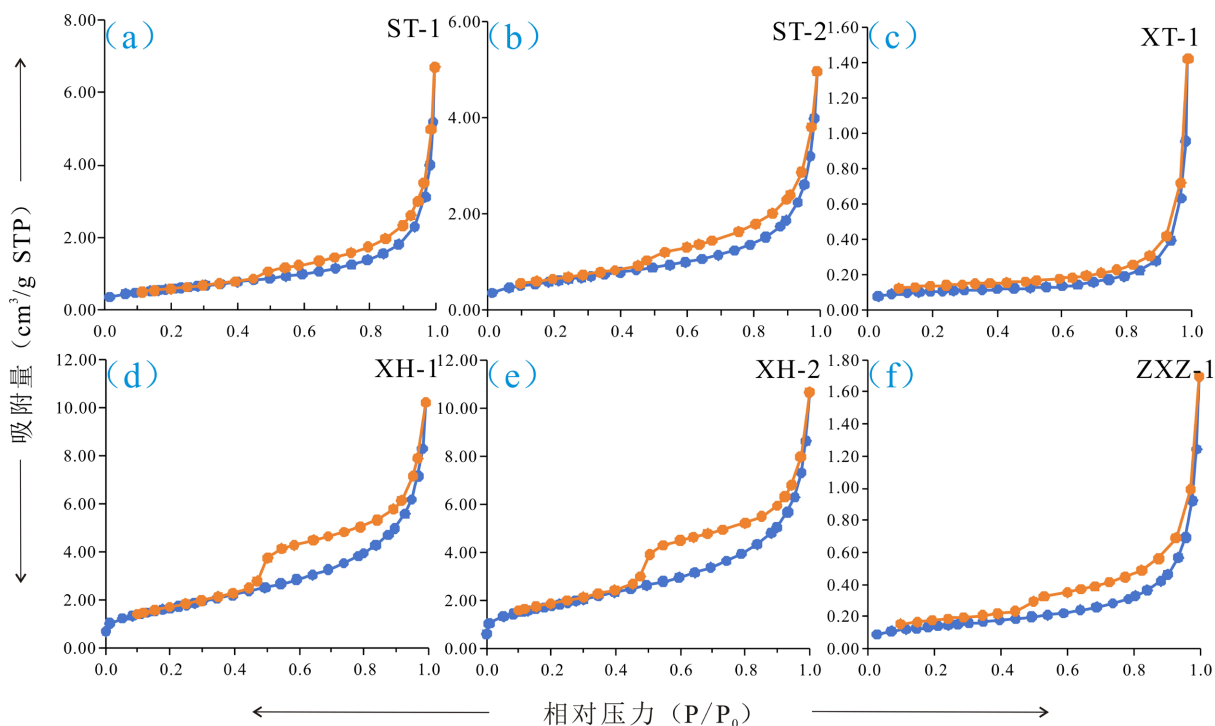


Figure 2. Low-temperature nitrogen adsorption/desorption curves of coal in Huaibei coalfield

图 2. 淮北煤田煤的低温氮气吸附/脱附曲线

孙疃、许疃朱仙庄煤样在低压区间时, 随着相对压力的增加, 吸附量显示出一个较低的值, 并且吸附/脱附等温线近乎重叠, 这表明孙疃、许疃和朱仙庄煤样的连通性差、一端为半封闭型的孔隙较多。而信湖煤样的在压强较低时, 随着相对压力的增加, 吸附曲线/脱附等温线分离, 具有较高的吸附体积, 表明其中存在相对发达和连接的孔隙。

在中等压力区间, 吸附量增加的较为缓慢, 这说明狭缝型孔隙是不可忽视的。而许疃煤样随着相对压力的增加, 吸附体积几乎不增加, 表明中孔发育为瓶颈状。信湖煤样在中等压力区间内的吸附量较高, 脱附曲线为明显的 H3 型回滞环, 表明存在大量狭缝型和墨水瓶型。

在高压压力区间范围内, 随着相对压力的升高, 吸附量显著增加。且各煤样在较高相对压力区域没有

表现出吸附饱和，表现为 H3 型回滞环。

煤样的孔隙形态由两种或多种组成：在以细小的缝隙状孔为主时，孔隙的尺度在 2~5 nm；在该段以开口的孔和墨水瓶状孔为主时，孔隙的尺度在 5~10 nm；在以长条板状孔为主时，孔隙的尺度在 10~50 nm。

4.2. 孔隙结构参数

由煤样低温 N₂ 实验测试结果(见表 1)可知：孙疃煤矿样品的平均孔容为 0.0025 cm³/100g，平均比表面积为 2.021 m²/g。许疃煤矿样品的平均孔容为 0.002 cm³/100g，比表面积 0.189 m²/g。信湖煤矿样品的平均孔容为 0.0083 cm³/100g，比表面积 5.8933 m²/g。朱仙庄煤矿样品孔容为 0.007 cm³/100g，比表面积为 0.467 m²/g。信湖煤矿介孔提供孔容的能力高于其他煤矿提供孔容的能力。通过低温液氮孔容比表面积曲线(见图 3)，可知除许疃以外的煤样是由孔径 2~3 nm 的孔提供最大比表面积。

Table 1. Low temperature liquid nitrogen specific surface area and pore volume test results
表 1. 低温液氮比表面积及孔容测试结果

样品编号	ST-1	ST-2	XT-1	XH-1	XH-2	ZXZ-1
孔容(cm ³ /100g)	0.022	0.028	0.002	0.085	0.081	0.007
比表面积	2.047	1.995	0.189	5.865	5.921	0.467

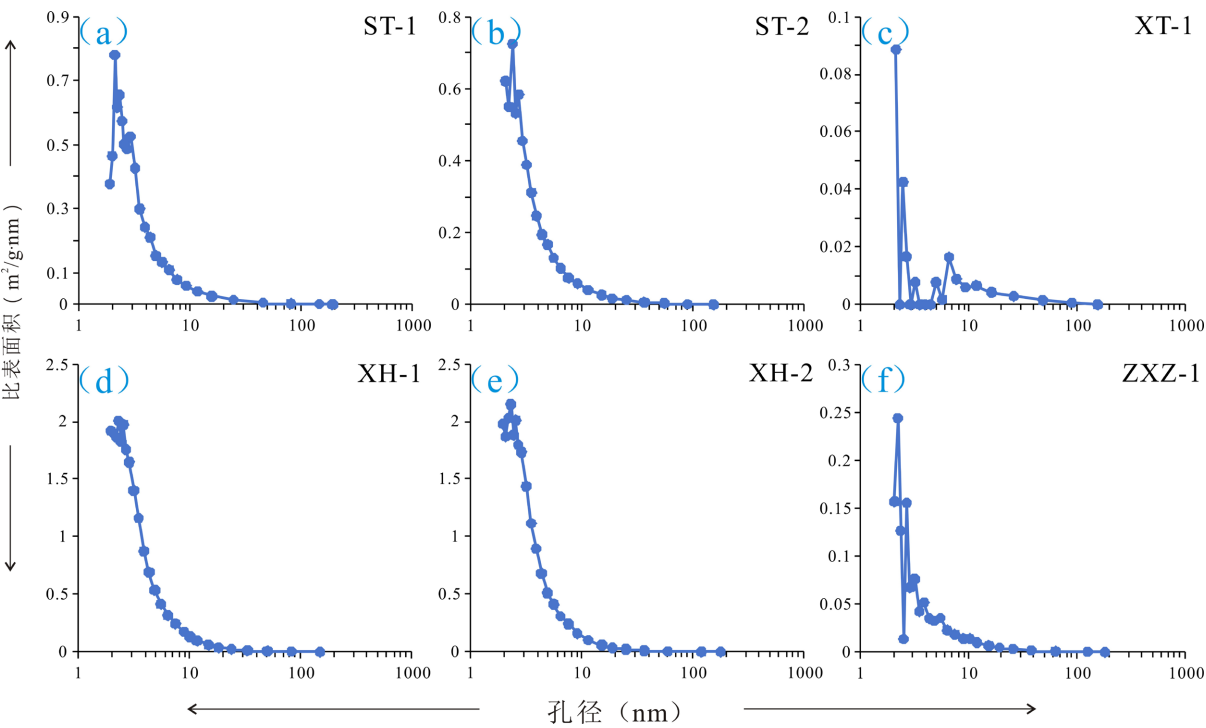


Figure 3. Pore size distribution curve based on specific surface area
图 3. 基于比表面积的孔径分布曲线图

由煤样的孔容孔径分布(见图 4)可知：样品的孔容孔径分布曲线具有相似特点：孔容随孔径增大而锐减，主峰位于 2~4 nm 处；当孔径 > 50 nm，对应的孔容极小，说明样品以介孔为主，大孔不太发育。而许疃样品的孔容孔径分布与上述样品有一定的差异，孔容随孔径的变化呈现出一个主峰，多个次峰的特

点, 表明其孔隙的分布相较于其它煤样复杂, 主峰位于 2~3 nm, 当孔径 > 50 nm, 对应的孔容没有趋于零, 介孔发育而大孔较发育。

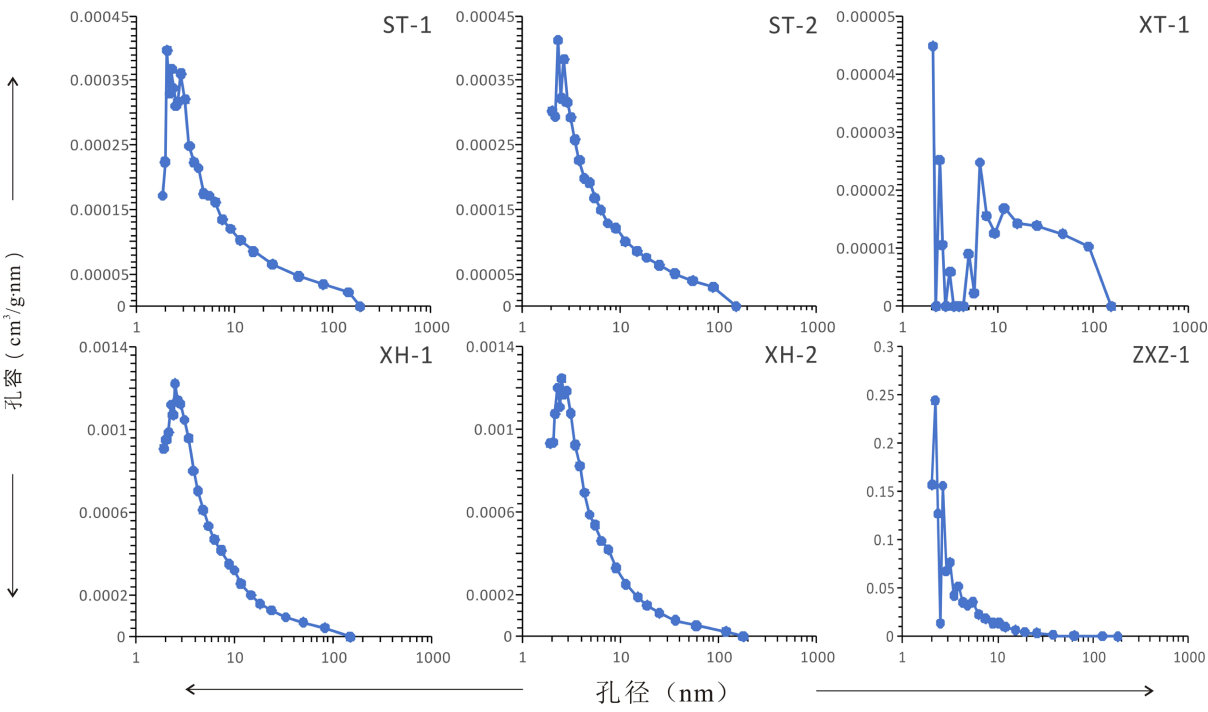


Figure 4. Pore size distribution curve based on pore volume
图 4. 基于孔容的孔径分布曲线

5. 孔隙分形维数特征

如图 5 所示, 分形维数 D_1 和 D_2 分别由处于相对压力 0~0.5 (孔径 < 0.4 nm) 和 0.5~1 (孔径 > 4 nm) 的部分得来。分形维数 D_1 和 D_2 拟合图中 R^2 超过 0.98, 表明本次所用煤样具有明显的 FHH 分形特征。低压段($P/P_0 < 0.5$)氮气分子被吸附在固-气主导的孔隙表面上, 氮气分子吸附在煤颗粒表面的主要作用力为范德华力, 与孔隙表面粗糙程度相关, 因此 D_1 被称为孔隙表面分形维数; 高压段($P/P_0 > 0.5$)分界线左边的范德华力减弱, 毛细管力为氮气吸附的主要作用力, 氮气分子由单层吸附转换为多层吸附, 或者达到孔隙填充吸附状态, 与孔隙结构复杂程度有关, 因此 D_2 被称为孔隙结构分形维数[14]。

Table 2. Calculation results of mesopores pore fractal dimension of coal in Huaibei coalfield
表 2. 淮北煤田煤的介孔孔隙分形维数计算结果表

样品编号	相对压力(P/P_0) < 0.5			相对压力(P/P_0) > 0.5		
	A_1	D_1	R^2	A_2	D_2	R^2
ST-1	-0.5111	2.4889	0.9998	-0.4251	2.5749	0.9999
ST-2	-0.4843	2.5157	0.9991	-0.4067	2.5933	0.9998
XT-1	-0.2878	2.7122	0.9626	-0.568	2.432	0.9906
XH-1	-0.5508	2.4492	0.9870	-0.3307	2.6693	0.9948
XH-2	-0.5762	2.4238	0.9610	-0.297	2.703	0.9899
ZXZ-1	-0.4836	2.5164	0.9936	-0.4546	2.5454	0.9993

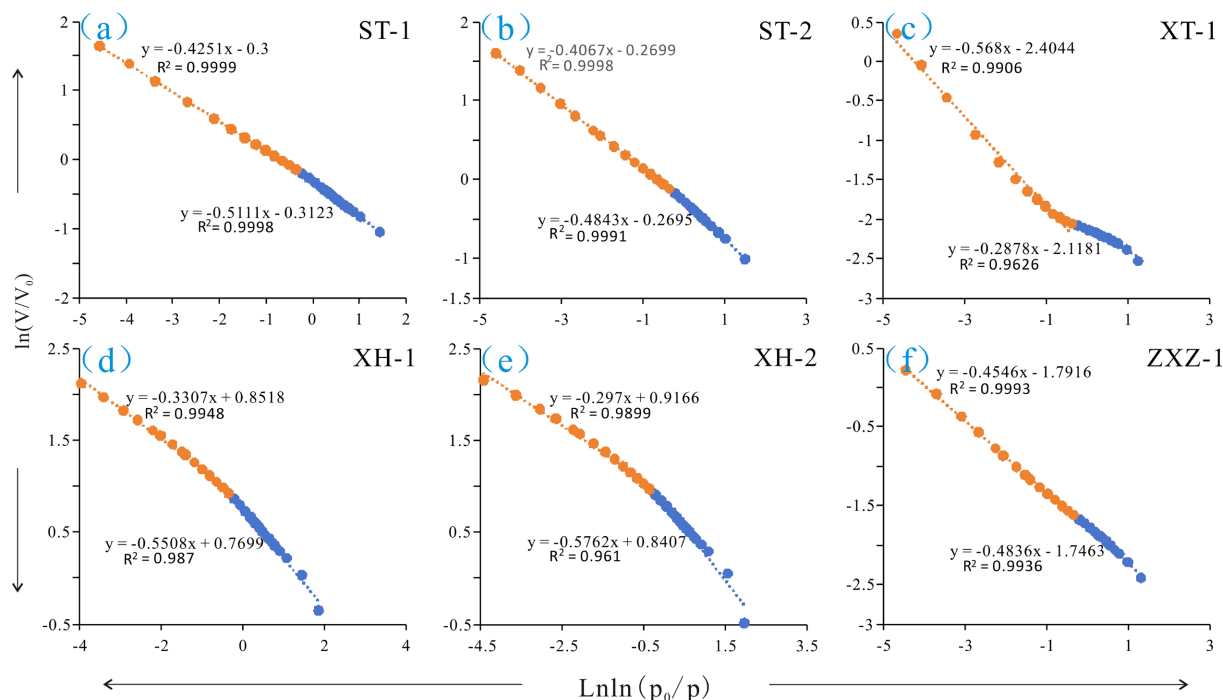


Figure 5. $\ln(\ln(P_0/P))$ vs $\ln(V/V_m)$ plot of coal in Huaibei coalfield

图 5. 淮北煤田煤的 $\ln(\ln(P_0/P))$ vs $\ln(V/V_m)$ 图

由表 2 数据可知煤的介孔孔隙分形维数数据以及所选煤样的分形维数 D_1 大小关系为 $XH-2 < XH-1 < ST-1 < ST-2 < ZXZ-1 < XT-1$, 煤样的孔隙的表面粗糙程度随分形维数 D_1 增大而逐渐增高。煤样的分形维数 D_2 大小关系为 $XT-1 < ZXZ-1 < ST-1 < ST-2 < XH-1 < XH-2$ 。煤样的孔隙的孔隙结构复杂程度随分形维数 D_2 增大而逐渐增高。并观察到分形维数 D_2 的数值在同一处矿区之间变化幅度不大, 表明同一煤矿煤的孔隙结构复杂程度类似。但仅仅从数值大小上看, 并不能直接体现出孔隙表面的粗糙程度或孔结构本身的不规则性, 需要参考分形维数 D_1 和 D_2 与孔隙结构参数相关关系。

6. 结论

1) 低温 N_2 吸附/脱附实验测试结果表明: 在所选煤样中, 信湖的煤样中介孔提供孔容的能力大于其他煤中介孔提供孔容的能力; 除许疃以外的煤样是由孔径 2~3 nm 的孔提供最大比表面积。

2) 本文所选煤样的低温 N_2 吸附/脱附曲线为 H_3 型曲线, 按照孔隙的尺度大小可分为以下三种: 在以细小的缝隙状孔为主时, 孔隙的尺度在 2~5 nm; 在以盲段开口的孔和墨水瓶状孔为主时, 孔隙的尺度在 5~10 nm; 在以长条板状孔为主时, 孔隙的尺度在 10~50 nm。

3) 孙疃煤矿样品的平均孔容为 $0.0025 \text{ cm}^3/100\text{g}$, 平均比表面积为 $2.02 \text{ m}^2/\text{g}$ 。许疃煤矿样品的平均孔容为 $0.002 \text{ cm}^3/100\text{g}$, 比表面积 $0.18 \text{ m}^2/\text{g}$ 。信湖煤矿样品的平均孔容为 $0.0083 \text{ cm}^3/100\text{g}$, 比表面积 $5.89 \text{ m}^2/\text{g}$ 。朱仙庄煤矿样品孔容为 $0.007 \text{ cm}^3/100\text{g}$, 比表面积为 $0.46 \text{ m}^2/\text{g}$ 。

4) 本文所采用的煤样的分形维数 D_1 大小关系为信湖煤样小于孙疃煤样小于朱仙庄煤样小于许疃煤样, 煤样的孔隙的表面粗糙程度随分形维数 D_1 增大而逐渐增高。煤样的分形维数 D_2 大小关系为许疃煤样小于朱仙庄煤样孙疃煤样小于信湖煤样。煤样的分形维数 D_1 与分形维数 D_2 数值呈反相关性。煤样的孔隙的孔隙结构复杂程度随分形维数 D_2 增大而逐渐增高。而且可以看到分形维数 D_2 在相同矿区的变动规模不明显, 可以推测相同煤矿孔隙结构复杂程度类似。

致 谢

感谢安徽省煤田地质局第三勘探队、许疃煤矿和朱仙庄煤矿相关工作人员提供的煤样，在此一并致谢！

基金项目

油气地球化学与环境湖北省重点实验室项目(HKLPGE-202304)；宿州学院博士(后)基金项目(2019jb20; 2022BSH001)；宿州学院大学生创新创业训练计划项目(ZCXM24-246; ZCXM24-251; ZCXM24-261)；省级大学生创新创业训练计划项目(S202310379184)；安徽省教育厅自然科学基金(KJ2021A1113)。

参考文献

- [1] 桑树勋, 刘世奇, 王文峰, 等. 深部煤层 CO₂ 地质存储与煤层气强化开发有效性理论及评价[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [2] Zhang, S., Tang, S., Tang, D., Pan, Z. and Yang, F. (2010) The Characteristics of Coal Reservoir Pores and Coal Facies in Liulin District, Hedong Coal Field of China. *International Journal of Coal Geology*, **81**, 117-127. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2009.11.007>
- [3] Liu, S., Sang, S., Liu, H. and Zhu, Q. (2015) Growth Characteristics and Genetic Types of Pores and Fractures in a High-Rank Coal Reservoir of the Southern Qinshui Basin. *Ore Geology Reviews*, **64**, 140-151. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.06.018>
- [4] Moore, T.A. (2012) Coalbed Methane: A Review. *International Journal of Coal Geology*, **101**, 36-81. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2012.05.011>
- [5] Liu, S., Sang, S., Pan, Z., Tian, Z., Yang, H., Hu, Q., *et al.* (2016) Study of Characteristics and Formation Stages of Macroscopic Natural Fractures in Coal Seam #3 for CBM Development in the East Qinnan Block, Southern Quishui Basin, China. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **34**, 1321-1332. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.08.010>
- [6] 刘锋. 原煤孔隙拓扑特征对 CO₂-ECBM 过程的影响机制[J]. 煤炭工程, 2023, 55(7): 139-144.
- [7] 降文萍, 宋孝忠, 钟玲文. 基于低温液氮实验的不同煤体结构煤的孔隙特征及其对瓦斯突出影响[J]. 煤炭学报, 2011, 36(4): 609-614.
- [8] 陈萍, 唐修义. 低温氮吸附法与煤中微孔隙特征的研究[J]. 煤炭学报, 2001(5): 552-556.
- [9] 戚灵灵, 王兆丰, 杨宏民, 等. 基于低温氮吸附法和压汞法的煤样孔隙研究[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(8): 36-39.
- [10] 宋立军, 李增学, 吴冲龙, 等. 安徽淮北煤田二叠系沉积环境与聚煤规律分析[J]. 煤田地质与勘探, 2004(5): 1-3.
- [11] 舒建生, 贾建称, 王跃忠, 等. 地质构造复杂程度量化评价——以涡北煤矿为例[J]. 煤田地质与勘探, 2010, 38(6): 22-26.
- [12] Wei, Q., Li, X., Zhang, J., Hu, B., Zhu, W., Liang, W., *et al.* (2019) Full-size Pore Structure Characterization of Deep-Buried Coals and Its Impact on Methane Adsorption Capacity: A Case Study of the Shihezi Formation Coals from the Panji Deep Area in Huainan Coalfield, Southern North China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **173**, 975-989. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.10.100>
- [13] Wei, Q., Zheng, K., Hu, B., Li, X., Feng, S., Jiang, W., *et al.* (2021) Methane Adsorption Capacity of Deep-Buried Coals Based on Pore Structure in the Panji Deep Area of Huainan Coalfield, China. *Energy & Fuels*, **35**, 4775-4790. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c03800>
- [14] 黄婷, 刘正. 榆社-武乡区块煤储层孔隙结构特征及其影响因素分析[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(7): 227-233.