

文章编号: 1001-1986(2018)05-0182-06

构造煤纳米级孔隙特征及其对含气性的影响

高彬¹, 黄华州¹, 宁娜², 刘明杰³, 张宇⁴, 王紫襄⁵

(1. 中国矿业大学资源与地球科学学院 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏 徐州 221008; 2. 中国石油华北油田山西煤层气勘探开发分公司, 山西 晋城 048026; 3. 晋煤集团 煤与煤层气共产国家重点实验室, 山西 晋城 048000; 4. 山西铭汇燃气有限公司, 山西 晋城 048006; 5. 山西蓝焰煤层气集团有限公司, 山西 晋城 048204)

摘要: 煤孔隙对储层含气性具有重要影响, 构造煤储层尤甚。采集淮南煤田潘一矿 13 号煤层中 4 种煤体结构的煤样进行低温液氮实验, 运用最小二乘法原理并采用 FHH 分形模型, 系统地分析了煤储层纳米级(1.7~20 nm)孔隙结构特征及其与分形维数之间的关系。结果表明: 煤体破坏程度增强致使 BJH 孔容和 BET 比表面积增大, 过渡孔与微孔含量增加; 构造煤中毛细凝聚开始发生在 2~3 nm 并随着相对压力的增大而逐渐增强; 对气体吸附做主要贡献的是孔径为 5 nm 的孔隙, 糜棱煤中此类孔隙最多致使含气性最好; 研究区内除原生结构煤外, 其他煤储层纳米级孔隙分形维数均大于 2.6, 平均孔径与分形维数呈明显负相关且相关性系数在 0.9 以上, 表明此类孔隙具有明显的分形特征, 孔隙结构复杂程度较高。综合孔隙特征表明: 构造煤中孔隙结构越复杂且 5 nm 附近吸附孔隙含量越高, 含气性越强。

关键词: 煤体结构; 孔隙结构; 分形维数; 含气性

中图分类号: P618.11 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2018.05.028

Pore size characteristics of tectonic coal and its influence on gas bearing properties

GAO Bin¹, HUANG Huazhou¹, NING Na², LIU Mingjie³, ZHANG Yu⁴, WANG Zixiang⁵

(1. Key Laboratory of Coalbed Methane Resources and Reservoir Formation Process, Ministry of Education, School of Resource and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. PetroChina North China Oil Field Shanxi Coalbed Methane Exploration and Development Branch, Jincheng 048206, China; 3. Communist State Key Laboratory of Coal and Coalbed Methane in Shanxi Coal Group, Jincheng 048000, China; 4. Shanxi Minghui Gas Co., Ltd., Jincheng 048006, China; 5. Shanxi Blue Flame Coalbed Methane Group Co., Ltd., Jincheng 048204, China)

Abstract: The coal pores have an important effect on the gas bearing property of the reservoir, especially in the tectonic coal reservoir. The low temperature liquid nitrogen experiments were carried out in the coal samples with 4 kinds of coal structure, the coal samples were collected from the No. 13 coal seam of Panyi coal mine, Huainan coalfield. The characteristics of pore structure of coal reservoir at the nanoscale (1.7–20 nm) and its relationship with fractal dimension were systematically analyzed based on the least square method principle and the FHH fractal model. The results show that the increase of coal destruction increases the BJH pore volume and BET surface area, and the content of transitional pores and the micropore in mylonite. The capillary condensation in tectonic coal began to occur at 2–3 nm, gradually increased with the increase of relative pressure. The pores with size of 5 nm are the main contribution to gas adsorption, the better development of which leads to the best gas content of mylonitized coal. Besides the primary tectonic coal, the fractal dimension of nanoscale pores of the other coal reservoir in the study area is more than 2.6, and the average pore size is negatively correlated with the fractal dimension and the coefficient of correlation is above 0.9, which shows that the pore has obvious fractal characteristics and the complexity of pore structure is high. The comprehensive pore characteristics indicate that the more complex pore structure in tectonic coal and the higher the adsorption pore content with near 5 nm, the stronger the gas content.

收稿日期: 2018-06-16

基金项目: 国家重大科研仪器研制专项(41727801)

Foundation item: National Key R&D Project for Scientific Instruments(41727801)

第一作者简介: 高彬, 1995 年生, 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 从事煤与煤层气开发地质及工程的相关科研工作。E-mail: 1912593756@qq.com

引用格式: 高彬, 黄华州, 宁娜, 等. 构造煤纳米级孔隙特征及其对含气性的影响[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(5): 182–187.

GAO Bin, HUANG Huazhou, NING Na, et al. Pore size characteristics of tectonic coal and its influence on gas bearing properties[J]. Coal @ Geology Exploration, 2018, 46(5): 182–187.

Keywords: coal structure; pore structure; fractal dimension; gas bearing property

煤储层是一种多孔介质, 前人通过压汞、低温液氮、核磁共振等实验对煤储层孔隙进行了大量的研究。傅雪海等^[1]、孟召平等^[2]认为煤储层是由宏观裂隙、显微裂隙和孔隙构成的多孔介质, 不仅具有储集气体的能力, 同时具有允许气体流动的能力。姚艳斌等^[3]认为纳米级孔隙是气体主要吸附和扩散的空间。据宜文等^[4]、范俊佳等^[5]认为我国盆地多数经历了复杂的构造演化史, 煤的结构受到了不同程度的改造, 构造煤较为发育。因此系统研究构造煤纳米级孔隙特征有利于煤层气的开采。采用最常用的孔隙测试方法——低温液氮实验, 利用 FHH 分形模型定量分析了不同煤体结构煤的孔隙特征, 探索

孔隙特征对煤层含气性的影响。

1 样品采集与测试方法

以淮南煤田潘一矿区 13 号煤为研究对象, 针对性地采集了原生煤、碎粒煤、鳞片煤、糜棱煤 4 种不同煤体结构样品。煤体结构划分方案依据文献[6-7], 参考了朱兴珊(1995)的分类方案, 根据本次研究的目的及其宏观与微观特征进行识别, 按煤体结构将煤储层分为四大类, 即原生煤、碎粒煤、鳞片煤、糜棱煤, 其中碎粒煤、鳞片煤、糜棱煤被称为构造煤。实验样品基本信息如图 1、表 1 所示。

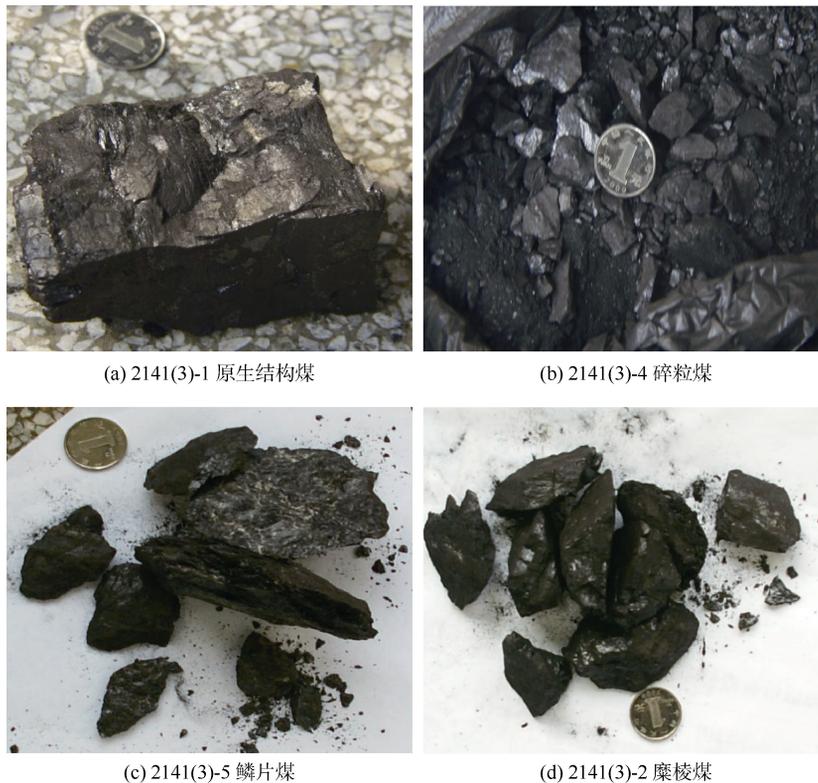


图 1 煤体的宏观特征

Fig.1 Macroscopic characteristics of coal

液氮实验测试在中国矿业大学分析测试中心进行, 测试仪器采用美国 Quantachrome 生产 Autosorb-1 型比表面孔径测定仪, 测试温度为液氮温度($T=77.3\text{ K}$), 测试孔径范围为 $0.35\sim 500\text{ nm}$, 根据液氮吸附实验数据仪器所带软件自动按照 BET(Brunauer, Emmett and Teller)多分子层吸附公式计算试样的单层吸附量, 从而计算出样品的比表面积再利用 BJH(Barret, Joyner and Halenda)模型计算煤样的孔径和孔容分布^[6,8-10]。

已有学者用分形维数对构造煤储层做出相应研

究, 表明在相对压力较大时分形维数才能反映煤孔隙结构的复杂程度^[12-13]。本文采用 P. Pfeiferper 的 Frenkel-Halsey-Hill(FHH)分形维数模型^[14-15]来研究分析相对压力为 $0.5\sim 1$ 的煤样的低温液氮吸附曲线。计算公式可表示为:

$$\ln\left(\frac{V}{V_m}\right) = A \ln\left[\ln\left(\frac{p_0}{p}\right)\right] + C \quad (1)$$

式中 V 为平衡压力 p 下吸附的气体体积; V_m 为单分子层吸附气体的体积; A 为常数, 线性关系系数, 其值与吸附机理有关; C 为常数; p 指平衡压力,

表 1 实验样品基本信息
Table 1 Basic information of experimental samples

样品编号	煤体结构	宏观特征			微观特征
		煤体结构特征	节理	煤体破碎程度	
2141(3)-1	原生煤	原生结构构造保存完好, 线理宏观煤岩组分清晰可见	节理稀疏, 特征清晰, 不见构造擦痕	坚硬、呈块状、捏不动	结构致密、不均一, 可见少量微裂痕, 具贝壳状结构
2141(3)-4	碎粒煤	不可见原生结构, 色泽暗淡	节理密集无法辨别节理大小, 节理面能见擦痕和镜面	粒状, 颗粒直径 1~2 cm, 可捏, 易捏碎	煤中微裂隙和孔隙十分发育, 被挤压揉皱后的煤体, 呈现粒状断口, 有定向结构和弯曲的微节理面。具有微角砾状、粒状等结构
2141(3)-5	鳞片煤	呈鳞片状或片状	单向节理发育	鳞片状结构可捏成几个 mm 的页片; 片状结构可捏成 1~5 cm 长, 厚 0.5~1 cm 的片状	煤体中较多呈现被挤压揉皱后的煤体, 具有片状结构和角砾状结构
2141(3)-2	糜棱煤	原生结构消失, 呈粉末状	无法辨别节理	颗粒呈细小的粒状、片状, 很容易捏成小于毫米级粉末	结构破坏严重, 微节理面、孔隙和裂隙的形态、方向十分复杂, 呈现土状端口和扭曲的片状。具有鱼籽状、鳞片状、压扭性等结构

p_0 为饱和蒸气压。在煤吸附气体的初始阶段, 吸附能力主要来自于气/固界面间分子的范德华力, 当范德华力起主导作用时, 参数:

$$A = \frac{D-3}{3} \quad (2)$$

式中 D 为分形维数。

随着相对压力的升高, 气/液界面张力(毛细凝聚)效应逐渐显著, 文献[16]认为此时 A 与 D 关系变为:

$$A = D - 3 \quad (3)$$

实际上, 范德华力和气/液表面张力为两种极限情况, 煤对气体的吸附往往表现为这两种力的结合^[12]。文献[17]采用 δ 决定哪种效应起支配作用, 当 $\delta < 0$ 时毛细凝聚作用影响较大, 当 $\delta > 0$ 时, 可忽略毛细凝聚作用的影响:

$$\delta = 3(1+A) - 2 \quad (4)$$

2 低温液氮实验结果与分析

孔隙的划分方案有很多^[5,8], 本次孔隙形态划分研究依据 IUPAC 对孔隙介质的划分方案^[11], 将煤中孔隙按照孔径的大小分为微孔 (<2 nm)、过渡孔

(2~50 nm)、大孔 (>50 nm)。表 2 中, 笔者将本次的研究范围精确到微孔 1.7~2 nm、过渡孔 2~20 nm。

2.1 低温液氮实验结果

表 2 结果显示, 各煤样的 BJH 孔容的变化范围为 $(0.807 \sim 2.081) \times 10^{-2} \text{ cm}^3/\text{g}$, 平均总孔容大小: 糜棱煤 > 鳞片煤 > 碎粒煤 > 原生结构煤, 可知, 随着煤体结构破坏程度的增强孔容增大; 各煤样孔隙中, 除糜棱煤微孔较发育外, 其他煤样微孔均不发育。糜棱煤在各个不同阶段的比表面积和孔容均最大, 以“不同孔径孔容”与“不同孔径比表面积”数据为例, 糜棱煤的比表面积约为原生结构煤与碎粒煤的 6 倍, 鳞片煤的 3 倍; 糜棱煤的孔容约为原生结构煤、碎粒煤的 4 倍, 鳞片煤的 2 倍。表明, 煤体结构破坏程度的增强致使孔容增大, 当煤体结构破坏到糜棱煤时, BET 比表面积变化趋势明显增大, 并且随着煤体结构破坏程度的增强, 过渡孔与微孔含量增多。

2.2 煤的孔隙类型

由吸附与凝聚理论^[18]可知, 对具有毛细孔的固体进行吸附实验时, 随着压力的增加便有相应的

表 2 低温液氮比表面积孔径测试结果
Table 2 Test results for specific surface area and aperture of low-temperature nitrogen adsorption

煤样号	BJH 孔容/ ($10^{-2} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	BET 比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	平均孔径/ nm	不同孔径孔容/($10^{-6} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)		不同孔径比表面积/($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	
				1.7~2 nm	>2~20 nm	1.7~2 nm	>2~20 nm
2141(3)-1	0.807	5.707	5.654	0.000	0.361	0.000	1.120
2141(3)-4	0.938	2.341	16.02	0.000	0.424	0.000	1.284
2141(3)-5	1.271	3.567	14.25	0.000	0.647	0.000	2.235
2141(3)-2	2.081	8.787	9.472	0.049	1.410	1.058	6.175

Kelvin 半径的孔发生毛细凝聚, 且当同一孔的吸附与解吸压力不同时会形成吸附回线。吸附回线可在一定程度上反映孔形复杂程度和外貌特征。据文献[19]可知, Kelvin 公式为:

$$r_k = -2\gamma V_m \cos \varphi / R \cdot T \cdot \ln x \quad (5)$$

式中 r_k 为产生毛细孔凝聚的最大孔半径; 液氮的表面张力 $\gamma=8.85 \times 10^{-3} \text{ N/m}$; 摩尔体积 $V_m=3.465 \times 10^{-5} \text{ m}^3$; 温度 $T=77.3 \text{ K}$; 接触角 $\varphi=0^\circ$; $R=8.15 \text{ J/(K}\cdot\text{mol)}$ 。

实验结果表明, 图 2a 曲线属于 H1 类^[20], 实验过程中吸附分支与解吸分支基本重合, 未出现拐点与吸附回线, 反映孔隙中未发生毛细凝聚现象且存在大量一端开口的圆筒形孔, 在相对压力接近于 1 的时候, 二者急剧上升, 说明在较大的孔隙内发生毛细凝聚现象。这类吸附回线主要存在于所研究的原生结构煤中。

图 2b、图 2c 两条曲线属于 H2 类^[20], 在相对压力小于 0.4 时吸附分支与解吸分支大致平行或重合, 反映在较小的孔径内并未产生毛细凝聚现象且存在着—端开口的圆筒形孔。相对压力在 0.4~1 时出现较明显的吸附回线, 表明吸附质在较大孔隙内产生

毛细凝聚且存在着两端开口的圆筒形孔; 在相对压力接近于 1 时二者急剧上升, 反映在更大的孔隙内毛细凝聚现象加重氮分子大量聚集。这类吸附回线主要出现在所研究的碎粒煤和鳞片煤中。根据式(5), 当相对压力为 0.4 时对应孔径约为 2.08 nm。由此表明, 在碎粒煤和鳞片煤中孔径在 2.08 nm 以下的孔为—端开口的圆筒形孔, 2.08 nm 以上的孔为两端开口的圆筒形孔。

图 2d 曲线属于 H3 类^[20], 相对压力较低时曲线上缓慢, 吸附分支与解吸分支近似平行无吸附回线, 反映在较小的孔隙内存在着—端开口的圆筒形孔; 在相对压力 0.4~1 内出现明显吸附回线, 并在 0.5 时解吸分支出现明显拐点, 反映在较大孔径内发生明显毛细凝聚现象且存在着墨水形孔和狭缝平板形孔。这类吸附回线主要出现在所研究的糜棱煤中。相对压力为 0.5 时对应孔径约为 2.76 nm。由此表明, 在糜棱煤中孔径在 2.08 nm 以下的孔为—端开口的圆筒形孔, 在 2.08 nm 以上的过渡孔为墨水形孔和狭缝平板形孔且拐点处的孔径约为 2.76 nm。

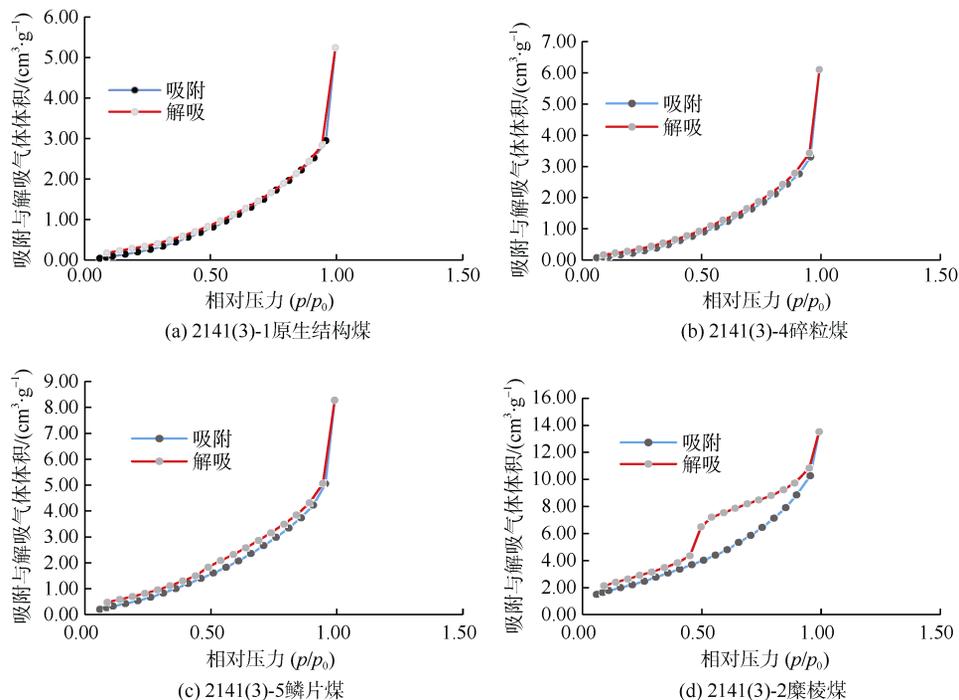


图 2 不同煤体结构煤低温液氮吸附回线曲线

Fig.2 Curves of low temperature liquid nitrogen adsorption of coal with different structure

2.3 煤比表面积与孔径分布关系

图 3 为煤的比表面积与孔径分布的关系曲线。碎粒煤、原生结构煤、鳞片煤 3 条曲线显示, 2~20 nm 孔径段内孔隙分布比较均衡, 在这 3 种煤样中, 过渡孔比较发育, 其中孔径 5 nm 左右的孔隙呈现高峰形态; 糜棱煤曲线显示, 曲线呈单峰形态, 煤样中

发育有孔径小于 2 nm 的微孔, 但过渡孔比微孔发育, 5 nm 左右的孔隙占主要比例。

图 3 结果显示, 4 块煤样对气体吸附做主要贡献的孔隙是过渡孔, 在原生结构煤中, 这类孔隙主要为—端开口的圆筒形孔, 具有较强的连通性; 在碎粒煤和鳞片煤中, 此类孔隙主要为两端开口的圆

筒形孔,连通性好;在糜棱煤中,尽管有微孔出现,但对气体吸附贡献较小,此类孔隙主要为墨水瓶形孔和狭缝平板形孔,连通性最差。4 块煤样中,孔径 5 nm 左右的孔隙比表面积最大,其吸附量也最大。

可知,当孔径为 5 nm 左右的孔隙占主要比例时,气体将主要吸附在此类孔隙中。此类孔隙含量,糜棱煤>鳞片煤>碎粒煤>原生结构煤,因此糜棱煤的吸附能力最强。

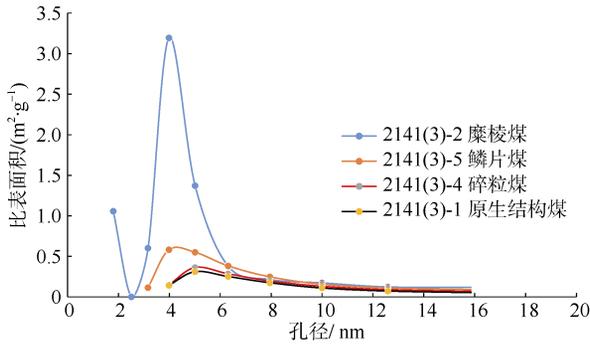


图 3 不同煤体结构煤的比表面积与孔径分布关系
Fig.3 The relationship between the specific surface area and aperture of coal with different structure

3 低温液氮吸附孔隙分形特征

根据分形理论,孔比表面积分维数越大说明孔隙几何形态、孔喉发育越复杂。分形维数一般在 2~3,分形维数 D 趋于 2 说明孔隙表面光滑,趋于 3 说明孔隙很不规则且复杂程度高, $D > 3$ 说明孔隙不具有分形特征。利用最小二乘法原理,拟合出 4 块煤样的曲线斜率(图 4),并结合低温液氮数据代入式(1)—式(4)得出表 3。

图 4、表 3 结果显示,原生结构煤 $R^2=0.753 2$, $D=2.242 3$,表明原生结构煤相关性较低,表面较光滑,因此仅研究余下 3 块煤体结构的分形特征。其他 3 块构造煤相关性系数均大于 0.9,呈现出很高的相关性;分形维数均大于 2.6,表明本次实验测试的孔径具有明显的分形特征, $\delta < 0$ 说明在较大孔隙内,毛细作用对气体吸附做主要贡献。

孔隙分形维数 D 随着煤体结构破坏程度的增强而增大(糜棱煤>鳞片煤>碎粒煤)。平均孔径碎粒煤>鳞片煤>糜棱煤,与分形维数呈明显的负相关。可见分形维数可以定量的表征孔隙的复杂情况,糜棱煤

表 3 基于分形 FHH 模型的构造煤孔隙分形维数
Table 3 Fractal dimensions of coal pore by fractal FHH model for tectonically deformed coals

煤样	构造煤类型	相对压力(0.5~1)			R^2
		A	δ	D	
2141(3)-1	原生结构煤	-0.757 7	-1.273 1	2.242 3	0.753 2
2141(3)-4	碎粒煤	-0.392 1	-0.176 3	2.607 9	0.936 5
2141(3)-5	鳞片煤	-0.361 5	-0.084 5	2.638 5	0.948
2141(3)-2	糜棱煤	-0.275 3	-0.174 1	2.724 7	0.919

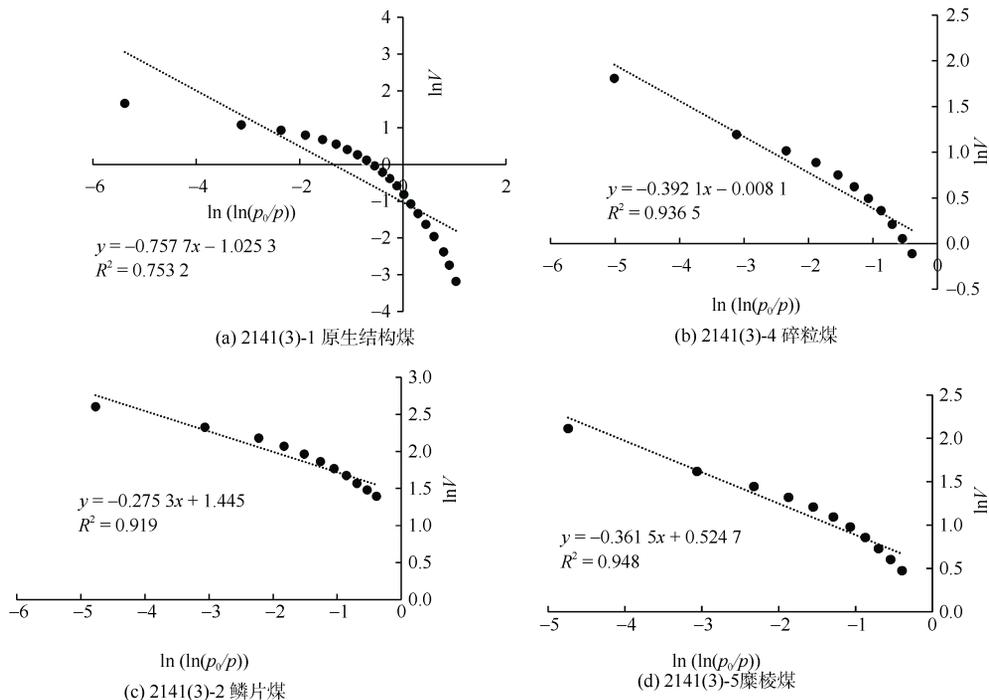


图 4 不同煤体结构的低温氮吸附体积与相对压力的双对数曲线
Fig.4 Plots of $\ln V$ vs $\ln(\ln(p_0/p))$ reconstructed from the N_2 gas adsorption isotherms

复杂程度最高, 其次是鳞片煤和碎粒煤。糜棱煤中存在墨水瓶形孔和狭缝平板形孔以及一端开口的圆筒形孔 3 种孔隙结构, 且糜棱煤孔容与孔径分布曲线呈单峰分布, 5 nm 附近过渡孔含量占比高达 85%, 毛细凝聚作用强烈致使糜棱煤具有很高的吸附性, 且具有很充足的吸附孔隙致使煤层含气性强。

4 结 论

a. 煤体结构破坏程度增强致使孔隙 BJH 孔容增大, 过渡孔和微孔含量增加。在 2~20 nm, 糜棱煤比表面积约为鳞片煤的 3 倍, 为碎粒煤、原生结构煤的 6 倍; 孔容约为原生结构煤、碎粒煤的 4 倍, 糜棱煤的 2 倍。且在各个孔径段糜棱煤的比表面积、孔容均最大。

b. 煤中含有大量孔径约 5 nm 的孔隙, 气体会优先吸附存储于此类孔隙中, 糜棱煤中拥有此类孔径的孔隙最多, 吸附性最好。

c. 研究区内除原生结构煤外, 构造煤分形特征明显($D > 2.6$), 相关性系数较高($R^2 > 0.9$)且均具有明显吸附回线, 反映孔隙几何形态、孔喉结构十分复杂, 且在较大的孔径段内毛细凝聚作用明显($\sigma < 0$), 3 块煤样约在相对压力 0.4, 孔径约在 2~3 nm 处开始产生毛细凝聚现象, 并随着相对压力的增大凝聚作用增强致使煤储层吸附性增强。

d. 糜棱煤中含有 3 种孔隙结构, 孔喉形态复杂透气性差且吸附性较好的孔隙体积分数高达 85%, 毛细凝聚作用强烈致使其含气性最强, 其次是鳞片煤、碎粒煤、原生结构煤。

参考文献

- [1] 傅雪海, 秦勇, 韦重韬. 煤层气地质学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007.
- [2] 孟召平, 田永东, 李国富. 煤层气开发地质学理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [3] 姚艳斌, 刘大锰. 煤储层孔隙系统发育特征与煤层气可采性研究[J]. 煤炭科学技术, 2006, 34(3): 64-68.
YAO Yanbin, LIU Dameng. Developing features of fissure system in Henan coal reserves seams and research on mining of coal bed methane[J]. Coal Science and Technology, 2006, 34(3): 64-68.
- [4] 据宜文, 姜波, 侯泉林, 等. 华北南部构造煤纳米级孔隙结构演化特征及作用机理[J]. 地质学报, 2005, 79(2): 269-285.
JU Yiwen, JIANG Bo, HOU Quanlin, et al. Evolution characteristics and mechanism of nanoscale pore structure of structural coal in southern north China[J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(2): 269-285.

- [5] 范俊佳, 据宜文, 侯泉林, 等. 不同变质变形煤储层孔隙特征与煤层气可采性[J]. 地学前缘, 2010, 17(5): 325-335.
FAN Junjia, JU Yiwen, HOU Quanlin, et al. Pore structure characteristics of different metamorphic-deformed coal reservoirs and its restriction on recovery of coalbed methane[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(5): 325-335.
- [6] 黄华州. 远距离被保护层卸压煤层气地面井开发地质理论及其应用研究——以淮南矿区为例[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010.
- [7] 朱兴珊, 徐凤银, 肖文江, 等. 破坏煤分类及宏观和微观特征[J]. 焦作矿业学院学报, 1995, 14(1): 38-44.
ZHU Xingshan, XU Fengyin, XIAO Wenjiang, et al. Classification and macroscopic and microscopic characteristics of destroyed coal[J]. Journal of Jiaozuo Institute of Mining. 1995, 14(1): 38-44.
- [8] 孟召平, 刘珊珊, 王保玉, 等. 不同煤体结构煤的吸附性能及其孔隙结构特征[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1865-1870.
MENG Zhaoping, LIU Shanshan, WANG Baoyu, et al. Adsorption capacity and its pore structure of coals with different coal body structure[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1865-1870.
- [9] 姜玮, 吴财芳, 赵凯, 等. 多煤层区煤储层孔隙特征及煤层气可采性研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(8): 135-139.
JIANG Wei, WU Caifang, ZHAO Kai, et al. Study on pore characteristics of coal reservoir and CBM recoverability in multiple coal seam blocks[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(8): 138-139.
- [10] 刘爱华, 傅雪海, 梁文庆, 等. 不同煤阶煤孔隙分布特征及其对煤层气开发的影响[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(4): 104-108.
LIU Aihua, FU Xuehai, LIANG Wenqing, et al. Pore distribution features of different rank coal and influences to coalbed methane development[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(4): 104-108.
- [11] EVERETT D H. Manual of symbols and terminology for physicochemical quantities and units: Appendix: Definitions terminology and symbols in colloid and surface chemistry: Part [J]. Pure and Applied Chemistry, 1972, 31(4): 577-638.
- [12] 张晓辉, 要惠芳, 李伟, 等. 韩城矿区构造煤纳米级孔隙结构的分形特征[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(5): 4-8.
ZHANG Xiaohui, YAO Hui芳, LI Wei, et al. Fractal characteristics of nano-pore structure in tectonically deformed coals in Hancheng mining area[J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(5): 4-8.
- [13] YAO Yanbin, LIU Dameng, TANG Dazhen, et al. Fractal characterization of adsorption-pores of coals from north China: An investigation on CH₄ adsorption capacity of coals[J]. International Journal of Coal Geology, 2008, 73(1): 27-42.
- [14] PFEIFER P, AVNIR D. Chemistry in nonintegral dimensions between two and three[J]. the Journal of Chemical Physics, 1983, 79(7): 3369-3558.

- in Hedong coalfield[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2016, 44(3): 21–24.
- [11] 唐书恒, 汤达祯, 杨起. 二元气体等温吸附实验及其对煤层甲烷开发的意义[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2004, 29(2): 219–223.
TANG Shuheng, TANG Dazhen, YANG Qi. Binary-component gas adsorption isotherm experiments and their significance to exploitation of coalbed methane[J]. *Earth Sciences—Journal of China University of Geosciences*, 2004, 29(2): 219–223.
- [12] 吴建光, 叶建平, 唐书恒. 注入 CO₂ 提高煤层气产能的可行性研究[J]. *高校地质学报*, 2004, 10(3): 463–467.
WU Jianguang, YE Jianping, TANG Shuheng. A feasibility study on CO₂ injection for enhancing the coalbed methane recovery[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2004, 10(3): 463–467.
- [13] 李士伦, 张正卿, 冉新权. 注气提高石油采收率技术[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2001: 31–33.
- [14] 韩雪婷, 张兵, 叶建平. 煤层气藏 CO₂-ECBM 注入过程中 CO₂ 相态变化分析及应用: 以沁水盆地柿庄北区块为例[J]. *非常规油气*, 2018, 5(1): 80–85.
HAN Xueting, ZHANG Bing, YE Jianping. Analysis and application of CO₂ phase change during CO₂-ECBM injection in CBM: Taking the study of Shizhuang north block in Qinshui basin as an example[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2018, 5(1): 80–85.
- [15] 申建, 秦勇, 张春杰, 等. 沁水盆地深煤层注入 CO₂ 提高煤层气采收率可行性分析[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(1): 156–161.
SHEN Jian, QIN Yong, ZHANG Chunjie, et al. Feasibility of enhanced coalbed methane recovery by CO₂ sequestration into deep coalbed of Qinshui basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(1): 156–161.
- [16] 赵金, 张遂安, 马东民, 等. 注二氧化碳提高煤层气采收率数值模拟[J]. *天然气与石油*, 2012, 30(1): 67–70.
ZHAO Jin, ZHANG Sui'an, MA Dongmin, et al. Numerical simulation study on carbon dioxide injection to enhance CBM recovery[J]. *Natural Gas and Oil*, 2012, 30(1): 67–70.
- [17] 张松航, 唐书恒, 潘哲军, 等. 晋城无烟煤 CO₂-ECBM 数值模拟研究[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(10): 1741–1747.
ZHANG Songhang, TANG Shuheng, PAN Zhejun, et al. Numerical simulation of CO₂ enhanced coalbed methane recovery on Jincheng anthracite coal reservoir[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(10): 1741–1747.
- [18] 叶建平, 张兵, 韩学婷, 等. 深煤层并组 CO₂ 注入提高采收率关键参数模拟和试验[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(1): 149–155.
YE Jianping, ZHANG Bing, HAN Xueting, et al. Well group carbon dioxide injection for enhanced coalbed methane recovery and key parameter of the numerical simulation and application in deep coalbed methane[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(1): 149–155.
- [19] 潘哲军, CONNELL L. 煤层气产量预测和矿区优化的储层模拟[J]. *中国煤层气*, 2006, 3(3): 27–31.
PAN Zhejun, CONNELL L. Reservoir simulation for CBM/CMM production forecasting and field optimisation[J]. *China Coalbed Methane*, 2006, 3(3): 27–31.
- [20] 雷东记. 煤储层增渗技术研究现状与展望[J]. *中国煤层气*, 2010, 7(3): 8–10.
LEI Dongji. Current status & prospect of study on techniques for enhancing permeability of coal reservoir[J]. *China Coalbed Methane*, 2010, 7(3): 8–10.

(责任编辑 范章群)

(上接第 187 页)

- [15] PFEIFER P, WU Y J, COLE M W, et al. Multilayer adsorption on a fractally rough surface[J]. *Physical Review Letters*, 1989, 62(17): 1997–2000.
- [16] PFEIFER P, COLE M W, KRIM J P. Pfeifer, Cole and Krim reply[J]. *Physical Review Letter*, 1990, 65(5): 663.
- [17] ISMAIL I M K, PFEIFER P. Fractal analysis and surface roughness of nonporous carbon fibers and carbon blacks[J]. *Langmuir*, 1994, 10(5): 1532–1538.
- [18] 严继民, 张培元. 吸附与凝聚[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [19] 陈萍, 唐修义. 低温氮吸附法与煤中微孔隙的研究[J]. *煤炭学报*, 2001, 26(5): 552–556.
CHEN Ping, TANG Xiuyi. Study on low temperature nitrogen adsorption and micro pore in coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2001, 26(5): 552–556.
- [20] 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.
JIANG Wenping, SONG Xiaozhong, ZHONG Lingwen. Research on the pore properties of different coal body structure coals and the effects on gas outburst based on the low-temperature nitrogen adsorption method[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(4): 609–614.

(责任编辑 范章群 聂爱兰)