

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.566>



低一中煤级构造煤纳米孔分形模型适用性及分形特征

宋 昱^{1,2}, 姜 波^{1,2*}, 李凤丽^{1,2}, 闫高原^{1,2}, 么玉鹏^{1,2}

1. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏徐州 221116

2. 中国矿业大学煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏徐州 221008

摘要:构造煤纳米孔非均质性研究对于揭示煤层气赋存状态和传输特性具有重要意义。选取低一中煤级典型序列构造煤样品, 基于高压压汞和低温液氮相结合的方法计算了构造煤基质压缩系数, 并分析了 Menger、热力学、Sierpinski 和 FHH 分形模型对构造煤的适用性, 进一步揭示了孔隙分形特征。糜棱煤的 Menger 分形曲线呈现三段式分布, 而对于原生煤、碎裂煤、片状煤、鳞片煤和揉皱煤而言, Sierpinski 模型、Menger 模型、热力学模型以及 FHH 模型分段点分别为 100 nm、72 nm、72 596 nm 和 8 nm。Menger 模型分形维数大于 3 且拟合偏差较大, 不适合表征构造煤的孔隙非均质性。Sierpinski 模型适合于描述构造煤的纳米孔分形特征; FHH 模型适合于表征原生煤及构造煤 8~100 nm 的孔隙非均质性。Sierpinski 模型微米孔(>100 nm)的分形维数(D_{s1})随着构造变形的增强先升高, 而后降低, 在片状煤中达到最高; Sierpinski 模型纳米孔(<100 nm, D_{s2c})和 FHH 模型<8 nm 的孔隙的非均质性随构造变形的增强逐渐升高。原生煤和脆性变形煤中, $D_{s1} > D_{s2c}$, 表明为微米孔非均质性强于纳米孔; 鳞片煤中, D_{s1} 接近于 D_{s2c} ; 揉皱煤中, $D_{s1} < D_{s2c}$, 表明纳米孔的非均质性强于微米孔。

关键词:构造煤; 纳米孔; 基质压缩; 分形特征; 模型适用性。

中图分类号: P595

文章编号: 1000-2383(2018)05-1611-12

收稿日期: 2017-10-01

Applicability of Fractal Models and Nanopores' Fractal Characteristics for Low-Middle Rank Tectonic Deformed Coals

Song Yu^{1,2}, Jiang Bo^{1,2*}, Li Fengli^{1,2}, Yan Gaoyuan^{1,2}, Yao Yupeng^{1,2}

1. School of Resources and Geosciences, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China

2. Key Laboratory of Coal Bed Methane Resource & Reservoir Formation Process, Ministry of Education, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China

Abstract: The investigations of nanopore heterogeneity in tectonically deformed coals are of significance for the study of occurrence state and transmission characteristics of coalbed methane (CBM). The low-middle rank tectonic deformed coals were screened out firstly in this study and then the matrix compressibility and the applicabilities of Menger, thermodynamics, Sierpinski, and FHH of tectonic deformed coals, as well as the fractal characteristics, were analyzed based on high-pressure mercury intrusion and low-pressure gas adsorption. The fractal curves of Menger model for mylonitic coals can be divided into three stages. However, for primary coals, cataclastic coals, schistose coals, scaly coals, and wrinkle coals, the fractal curves of Sierpinski, Menger, thermodynamics, and FHH can be obviously divided into two stages and the piecewise points locates at 100 nm, 72 nm, 72 596 nm, and 8 nm respectively. The fractal dimensions of Menger model are >3 and have a fitting deviation, so it is not suitable to characterize the pore heterogeneity. The Sierpinski model is suitable to characterize the fractal characteristics of the nanopore of the tectonic deformed coals whereas the FHH model is for the pores of 8—100 nm in primary

基金项目:国家自然科学基金重点项目(No.41430317); 国家科技重大专项(No.2016ZX05044001-02)。

作者简介:宋昱(1991—), 博士研究生, 主要从事煤、油气资源评价、煤层气和页岩气等非常规天然气资源的勘探开发等研究。

ORCID: 0000-0001-6602-3895. E-mail: songyu10094488@126.com

* 通讯作者: 姜波, E-mail: jiangbo@cumt.edu.cn

引用格式:宋昱, 姜波, 李凤丽, 等, 2018. 低一中煤级构造煤纳米孔分形模型适用性及分形特征. 地球科学, 43(5): 1611-1622.

coals and various tectonic deformed coals. The fractal dimension (D_{sl}) of micron pores at Sierpinski fractal curve (>100 nm) increases firstly and then decreases with the increase of tectonic deformation, reaching the highest values in schistose coals. The heterogeneity of both nanopores at Sierpinski fractal curve (<100 nm, D_{s2c}) and that of pores of 8–100 nm at FHH fractal curve increase with the enhancement of the tectonic deformation. In primary coals and brittle deformed coals, $D_{sl} > D_{s2c}$, indicating that the heterogeneity of micron pores are stronger than that of nanopores. In scaly coals, D_{sl} is close to D_{s2c} . In wrinkle coals, $D_{sl} < D_{s2c}$, indicating that the heterogeneity of nanopores is stronger than that of micron pores.

Key words: tectonic deformed coals; nanopore; matrix compressibility; fractal characteristics; applicability of model.

0 引言

煤是一种对应力和应变敏感的多孔介质 (Green *et al.*, 2011), 在不同的应力—应变环境和构造应力作用下, 形成不同结构特征的、不同类型的构造煤 (Li, 2001; 据宜文等, 2004; Qu *et al.*, 2010). 构造煤在世界主要产煤国家皆有分布, 我国华北、华南广泛发育不同类型的构造煤 (Beamish and Crosdale, 1998; Cao *et al.*, 2000). 构造煤特有的孔隙结构深刻影响了瓦斯突出防治和煤层气开发 (Li, 2001; Jiang *et al.*, 2010), 据宜文等 (2005) 指出纳米孔 (0.1~100 nm) 和微米孔 (100~20 000 nm) 分别是煤层气的主体吸附和渗流空间 (Ma *et al.*, 1999; Busch *et al.*, 2003; Mosher *et al.*, 2013), 对其非均质性特征的研究是揭示煤层气赋存规律传输特性的关键 (Nishioka, 1992; Fu *et al.*, 2009; Schmitt *et al.*, 2013; 吴松涛等, 2015; 张文静等, 2015).

针对非常规油气储集层, 世界各国学者主要是基于流体注入、气体吸附和图像分析方法而展开 (Li, 2001; 熊承仁等, 2007; 雷超等, 2015; 杨永飞等, 2016). 对于构造煤, 据宜文等 (2005) 采用液氮吸附法对不同变质变形环境、不同变形系列构造煤的纳米级孔隙分类和结构特征进行了深入系统的研究; 并开展了平衡水条件下原生煤及构造煤的等温吸附和解吸实验, 发现由于孔隙结构和化学结构的差异, 构造煤的吸附和解吸机理不同于原生结构煤. 范俊佳等 (2010) 基于镜质组反射率测定和低温液氮方法, 对不同变质变形条件下纳米孔特征进行了表征. 李明 (2013) 基于压汞和低温液氮方法系统分析了不同构造作用方式下, 构造煤孔裂隙的结构演化特征. Pan *et al.* (2016) 通过小角散射分析了构造煤中封闭孔的特征.

然而, 由于煤结构的复杂性, 用传统的欧式几何理论难以描述其非均质性, 尤其对于构造煤, 而分形理论可定量表征孔隙结构的复杂程度. 自 Pfeiferper and Avnir (1983) 用分子吸附法得出储层岩石的孔

隙具有分形结构性质的结论以来, 世界各国学者广泛采用分形理论表征煤和页岩等多孔介质的孔裂隙特征. Garbacz (1998) 基于低温液氮方法证明煤中微小孔符合分形理论. Katz and Thompson (1985) 用扫描电镜观察岩石断面, 发现各种砂岩、页岩及碳酸盐岩在 0.2~50 μm 的孔隙尺度范围内具有良好的分形性质, 分形维数为 2.27~2.89. Yao *et al.* (2008, 2009) 采用 FHH 和 Menger 分形模型分别对煤的液氮和压汞孔隙测定结果进行分形, 获得了不同煤阶煤的纳米孔 (<100 nm) 和微米孔 (>100 nm) 的分形特征, 并由此分析了微孔和宏孔分形对吸附性能和渗透率的影响. 世界各国学者多沿用此方法开展煤中孔隙分形特征研究. 基于液氮吸附和压汞实验, 李子文等 (2015) 分别从 FHH 和 Menger 分形的角度研究煤体性质对瓦斯吸附和流动的影响. 王秀娟等 (2014) 基于热力学分形模型, 分析了渭北煤田韩城矿区 10 个煤样的微米孔分形维数, 并揭示了分形维数与渗透率的关系. 傅雪海等 (2005) 采用 Menger 模型分析了中国 146 个矿井煤样的分形特征, 并依据分形维数对煤中纳米级孔隙进行定量划分. 赵爱红和廖毅 (1998) 基于孔隙比孔容的分形维数计算方法定量表征了煤的孔隙特征, 发现最小孔半径在 65~87 nm 的宏孔具有分形特点且分形维数能反映组成煤的煤岩组分的复杂程度和煤结构遭受破坏的严重程度. 对于构造煤中孔隙的分形特征, 宋晓夏等 (2013) 基于低温液氮吸附方法和 FHH 分形模型对中梁山矿区构造煤纳米孔分形特征进行了研究, 得出构造煤纳米孔分形特征与气体吸附能力的关系. 王有智和王世辉 (2014) 通过 FHH 分形研究了鹤岗煤田构造煤孔隙分形特征, 随着分形维数增大, 煤岩变形程度增加, 微孔含量增加, 比表面积增大, 孔表面粗糙度增加, 使得煤岩孔隙系统复杂化. 以上研究成果表明, 分形分维的方法可以有效表征煤中纳米孔的孔隙结构, 然而前人主要针对原生结构煤展开, 对于典型序列构造煤的孔隙结构分形特征研究较少, 且分形维数计算方法较多, 如 Menger 模型、

Sierpinski模型、BET(Brunauer-Emmett-Teller)分形模型、FHH(Frenkel-Halsey-Hill)分形模型、热力学分形模型和 Langmuir 分形模型(Rigby,2005)等. Li *et al.*(2015)对中煤级构造煤压汞测定的孔径分布进行多重分形,并讨论了微米孔和纳米孔的影响因素.构造煤中的纳米孔分形结构特点如何? 不同的分形模型适用的孔径范围及构造煤孔隙结构如何表征? 实际上,探讨上述问题对于揭示构造煤纳米孔隙结构非均质性特点,韧性变形煤尤其是糜棱煤发育区煤与瓦斯突出机理以及脆性序列构造煤发育区煤层气资源潜力评价等方面具有重要的理论和实践意义.

因此,本文选取同一矿区(宿县矿区)中低变质程度原生煤及典型序列构造煤样品,基于高压压汞、低温液氮吸附实验,并综合运用 Menger 模型、Sierpinski模型、热力学分形模型和地毯模型来揭示

原生煤及典型序列构造煤的纳米孔隙结构分形特征,同时划分和厘定了不同分形模型所反映的纳米孔结构界限.孔隙结构划分方案参考国际纯化学与应用化学委员会的划分依据,即微孔(<2 nm)、介孔(2~50 nm)和宏孔(>50 nm);同时由于孔径<100 nm的孔隙构成毛细管凝聚和甲烷的吸附空间;>100 nm 的孔隙提供了甲烷渗流的主体空间,因此将二者分别定义为纳米孔和微米孔(Yao *et al.*,2008,2009; 据宜文和李小诗,2009).

1 地质概况

华北南部两淮地区古生代形成的石炭—二叠纪煤系受中生代构造影响,多保存于向斜位置.以宿北断裂为界,宿县矿区整体位于徐宿弧形逆冲推覆构造的南部,区内煤矿分布于徐宿弧形逆冲推覆前锋

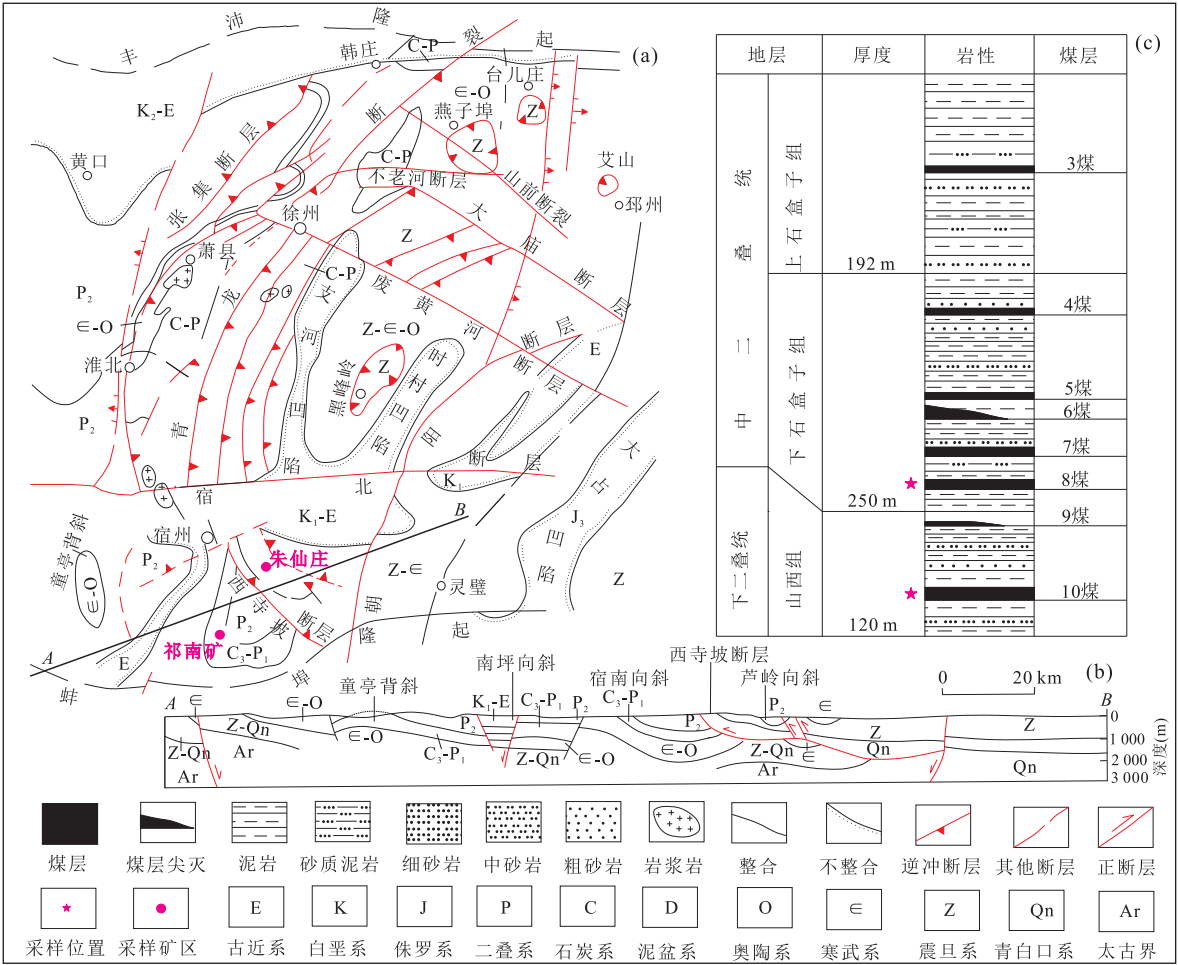


图 1 淮北地区徐宿弧形双冲—叠瓦扇推覆构造与采样位置

Fig.1 Schematic map showing the Xuzhou-Suzhou arcuate duplex-imbricate fan thrust system and sampling location in the Huaibei area
据据宜文等(2005);Jiang *et al.*(2010);Li *et al.*(2013);姜波等(2016).a.淮北煤田构造纲要图;b.AB 线剖面图;c.矿区煤系地层综合柱状图

断层西寺坡逆冲断层的两盘(图 1a),断层两盘构造变形发生分异,东部断层上盘矿井构造以强烈的挤压断裂和紧闭褶皱发育为主,逆冲推覆构造发育,从东向西呈叠瓦状推覆(图 1b).西部断层下盘矿井构造变形强度有所减弱、以宽缓向斜和网格状断层发育为主.研究区中下二叠统煤系主要发育上石盒子组的 3 煤,下石盒子组的 5、7、8 煤以及山西组的 9、10 煤(图 1c).构造对煤层产生了明显的改造作用,尤其是徐宿逆冲推覆构造的发育及演化,对宿县矿区构造煤的发育具有重要的控制作用,导致不同类型构造煤普遍发育(Jiang *et al.*,2010).

2 样品与实验

2.1 样品

以位于宿北断裂以南,西寺坡逆冲推覆断裂上盘的朱仙庄矿和下盘的祁南矿为采样区(图 1a),系统采集祁南煤矿 10115 工作面 and 朱仙庄煤矿 II1053、II832 工作面上典型序列构造煤样品.在综合考虑构造煤结构成因分类的基础上(据宜文等,2005;姜波等,2016),将所采集构造煤划分为碎裂煤、片状煤、鳞片煤、揉皱煤和糜棱煤 5 种类型.根据样品的宏观、微观特征及 $R_{o,max}$ 测试结果筛选出低中煤级($R_{o,max}=0.54\% \sim 1.34\%$,光度计型号:MSP UV-VIS 2000)构造煤样品 30 块,其中 10115 工作面 17 块,编号 Q1~Q17;II1053 工作面 9 块,编号 Z1~Z9;II832 工作面 4 块,编号 Z10~Z13(表 1),宏观及微观变形特征见图 2.

2.2 实验

2.2.1 高压压汞 笔者对 30 块原生煤及构造煤样品均进行高压压汞实验,采用 Micrometrics Auto Pore IV 9510 型压汞仪(0.689 5~413 700 kPa),取出 1 cm 大小碎粒样品 1~2 g,置于 70 °C 烘箱中干燥 12 h,采集压力点 108 个(单点平衡时间 10 s),所得到的孔径范围为 3~178 010 nm.测试过程中压力高达 413 MPa,对应孔喉为 3 nm.研究表明,煤的可压缩性对压力高于 20 MPa 时压汞的测试结果具有显著影响(Li *et al.*,1999;Cai *et al.*,2013),因此压汞测试结果在高压段需要进行校正(Yao and Liu,2012).本文参考 Cai *et al.*(2013)的研究成果,从 3.2 MPa 开始计算压缩系数与校正量.忽略汞的压缩性,煤的压缩系数定义为(Guo *et al.*,2014):

$$\omega_c = dV_c / (V_c \times dP), \tag{1}$$

式中: dV_c/dP 为单位压降对应的煤基质的体积变

化; V_c 为煤基质体积,由氦气测得.对于可压缩固体而言(Li *et al.*,1999):

$$\Delta V_{obs} = \Delta V_P + \Delta V_c, \tag{2}$$

式中: ΔV_{obs} 、 ΔV_P 、 ΔV_c 分别代表进汞量、孔隙充填和固体压缩的体积.

压力为 3.2~35 MPa(对应孔径为 100~18 nm)时,进汞体积与压力呈现很好的线性关系(Cai *et al.*,2013;Guo *et al.*,2014),即 $\Delta V_{obs}/\Delta P$ 可以通过阶段进汞量和压力变化获取,为常数,则:

$$\Delta V_c / \Delta P \approx \Delta V_{obs} / \Delta P - \sum_{18\text{ nm}}^{100\text{ nm}} \Delta V_P / \Delta P, \tag{3}$$

式中: $\sum_{18\text{ nm}}^{100\text{ nm}} V_P$ 是通过氮气吸附数据获取, $\Delta V_c / \Delta P$ 与压力无关,则 dV_c/dP 等同于 $\Delta V_c / \Delta P$,则构造煤基质的压缩系数可由式(3)获得,由式(1)可知, $dV_c = \omega_c \times V_c \times dP$,接下来将用此压缩系数校正 3.2~413 MPa 的孔体积(Yao and Liu,2012).

3.2~413 MPa 压力段,当进汞压力为 P_i 时,相对于 3.2 MPa,压力段 $P_i \approx 3.2$ MPa 的孔体积(ΔV_{Pi})可表示为:

$$\Delta V_{Pi} = V_{Pi} - V_{P0} = V_{obs} - V_{obs(P0)} - \omega_c V_{c(Pi)} (P_i - P_0), \tag{4}$$

其中, $V_c(P_i)$ 为 P_i 时压缩后的基质体积,可表示为:

$$V_{c(Pi)} = V_c - dV_c/dP (P_i - P_0), \tag{5}$$

式中: V_{Pi} 即为 P_i 时校正后的累积孔隙体积; $V_{obs(Pi)}$ 为压力在 P_i 时的进汞量.

2.2.2 低温 N₂ 吸附 本文对 Q1~Q17 样品进行低温液氮吸附实验,采用 Quanta chrome Autosorb-1 物理吸附仪.分析气:N₂(77.3 K).将样品粉碎,取粒径<6 mm 的样品 5 g,先在烘箱内干燥,再在 70 °C 真空脱气 12 h 后放在盛有液氮的钢瓶中与仪器分析系统相连,处理机对分析系统的压力和温度按预定的程序进行监控、处理,获得在某一压力下样品的吸附量.在相对压力 0.05~0.35 时,进行线性分析,通过单分子层饱和吸附量获得 BET 比表面积;采用 BJH(Barrett-Joyner-Halenda)模型计算孔径分布及介孔体积,根据脱附曲线,由相对压力为 0.99 时的吸附量得到.

2.3 分形模型

2.3.1 Sierpinski 模型 将一单位正方形等分成边长 1/3 的 9 个小正方形,去掉中心的 1 个小正方形,保留剩下的 8 个小正方形,重复迭代 n 次,这样就形成了一个分形几何图形即 Sierpinski 地毯.根据表面

表 1 样品及其基本特征

Table 1 Basic properties of tectonically deformed coal samples

样品编号	煤体结构	孔容(mm ³ /g)		$R_{o,max}(\%)$	样品编号	煤体结构	孔容(mm ³ /g)		$R_{o,max}(\%)$
		>1 000	100~1 000				>1 000	100~1 000	
Q3	原生煤	11.1	1.4	0.89	Q2	鳞片煤	15.7	5.1	0.79
Q11	原生煤	9.6	9.8	1.00	Z8	鳞片煤	11.4	6.1	0.81
Z2	原生煤	1.8	1.4	0.98	Q5	鳞片煤	20.4	4.2	0.89
Q16	原生煤	2.3	1.6	0.90	Z12	鳞片煤	4.8	2.2	1.34
Q14	原生煤	8.7	2.3	0.84	Z11	鳞片煤	2.4	0.6	0.91
Q1	碎裂煤	5.4	1.7	1.00	Q15	揉皱煤	42.9	3.9	0.85
Q8	碎裂煤	5.7	1.9	0.89	Z5	揉皱煤	7.9	2.1	0.93
Q4	碎裂煤	1.9	0.8	0.80	Q9	揉皱煤	7.6	2.6	0.90
Z7	碎裂煤	14.6	8.7	0.85	Z9	揉皱煤	25.6	17.3	0.86
Q17	碎裂煤	5.5	1.7	0.54	Q7	揉皱煤	33.2	12.8	0.91
Q12	片状煤	8.5	3.5	0.83	Z4	糜棱煤	12.3	4.0	0.84
Z12	片状煤	7.5	3.7	0.89	Z3	糜棱煤	22.8	13.7	0.91
Z1	片状煤	5.0	1.2	0.89	Q6	糜棱煤	21.7	21.3	0.91
Q10	片状煤	8.3	2.3	0.87	Z10	糜棱煤	30.2	20.7	0.81
Q13	片状煤	11.3	6.3	0.83	Z13	糜棱煤	30.2	20.7	0.81

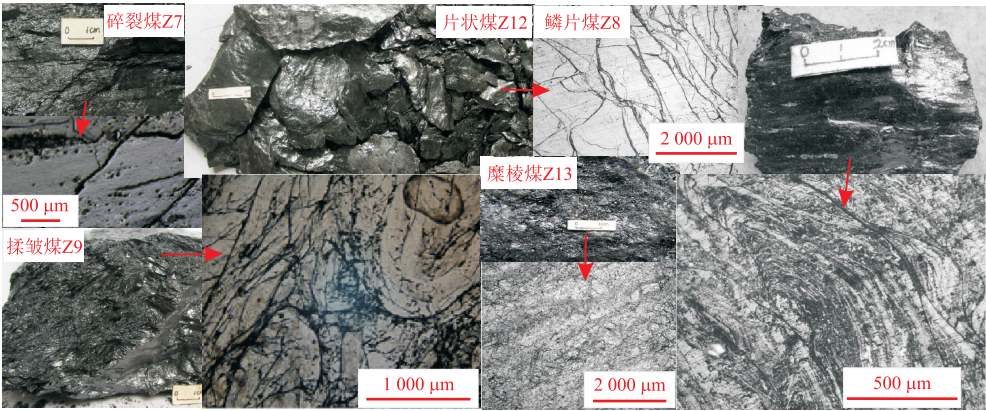


图 2 构造煤样品宏观及显微变形特征(手标本及反射光)

Fig.2 Macroscopic and microscopic deformation characteristics of typical sequence tectonically deformed coals (hand specimens and reflection)

分形维数的定义,可得计算表面分维数的公式(姜文等,2013):

$$V=\alpha(P-P_i)^{3-D}, \tag{6}$$

其中, V 为样品进汞量; P 为压力; P_i 为门限压力; D 为分形维数; α 为常数.将式两边求对数得:

$$\ln(V)=(3-D)\ln(P-P_i)+\ln\alpha. \tag{7}$$

因此,可以对煤样压汞法测量结果进行统计,并计算出 $\ln(V)$ 和 $\ln(P-P_i)$,通过作图得出斜率 K ,便可求得煤孔隙体积分形维数 $D=3-K$.

2.3.2 Menger 模型 利用 Menger 模型的孔隙构建方法对孔隙结构的分形特征进行分析,其分形维数为多孔结构体的孔隙体积分形维数(Washburn, 1921):

$$D=\{\ln[dV_{P(r)}/dP(r)]-\ln\alpha\}/\ln P(r)+4. \tag{8}$$

以双对数 $\ln[dV_{P(r)}/dP(r)]$ 和 $\ln P(r)$ 的比值为斜率 K ,则分形维数 $D=K+4$.其中: $P(r)$ 为进汞压力(MPa); $V_{P(r)}$ 为在压力 $P(r)$ 下的进汞量(mL); r 为煤样孔隙半径(nm).

2.3.3 热力学分形模型 在压汞过程中,随着压力的增加,进汞量逐渐增加,导致孔表面能不断升高.外界环境对汞所做的功等于进入孔隙内汞液的表面能的增加,进汞增量与孔表面能满足以下关系式(Zhang and Li,1995):

$$dW=-PdV=-\gamma_L\cos\theta dS, \tag{9}$$

式中: W 为孔表面能(J); γ_L 为汞与孔表面的表面张力(J/m); θ 为汞与孔表面的接触角($^{\circ}$); S 为孔隙表

面积(m^2).

由此,可得出进汞增量 Q_n 与相应的表面能 W_n 的表达式为:

$$W_n = \sum_{i=1}^n P_i \Delta V_i, \quad Q_n = V_n^{1/3} / r_n. \quad (10)$$

文献(Zhang *et al.*, 2006)对式(2)进行了修正,得出式(3):

$$\ln\left(\frac{W_n}{r_n^2}\right) = D \ln\left(\frac{V_n^{1/3}}{r_n}\right) + C, \quad (11)$$

式中: V_n 为孔隙体积,斜率为孔表面分形维数 D .根据压汞实验数据,对数据($\ln(V_n^{1/3}/r_n)$ 和 $\ln(W_n/r_n^2)$)进行线性拟合,从而获得煤样孔隙分形维数.

2.3.4 FHH 模型 根据 Pfeiferper and Avnir (1983)提出的理论,分形表面的分形维数可以由 FHH 方程计算(Cai *et al.*, 2013; 李子文等, 2015):

$$\ln(V/V_0) = C + A \times \ln[\ln(P_0/P)], \quad (12)$$

式中: V 为平衡压力 P 下吸附的气体体积; V_0 为单分子层吸附气体体积; P_0 为气体吸附的饱和蒸汽压; A 为 $\ln(V/V_0)$ 和 $\ln[\ln(P_0/P)]$ 在双对数坐标下的斜率,取决于样品的分形维数; C 为常数,分形维数 $D = A + 3$.

3 结果与讨论

3.1 构造煤纳米孔压缩性

通过高压压汞,并结合低温液氮测试结果计算可知,原生煤压缩系数为 $1.62 \times 10^{-10} \sim 3.52 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$ (平均值为 $2.34 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$),和 Cai *et al.* (2013) 对于原生结构煤的计算结果($1.55 \times 10^{-10} \sim 2.37 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$)与 Guo *et al.* (2014) 的烟煤($R_{o, \max} = 0.65\% \sim 0.99\%$)的计算结果($1.6 \times 10^{-10} \sim 2.9 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$)相接近.本文的计算结果、Cai *et al.* (2013)和 Guo *et al.* (2014)三者均高于文献 Mitra *et al.* (2012)中计算的煤压缩系数,这是由于以上的压缩系数忽略了汞的压缩性($0.4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$)所致;碎裂煤和片状煤压缩系数分别为 $1.52 \times 10^{-10} \sim 6.12 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$ (平均值为 $3.45 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$)和 $2.24 \times 10^{-10} \sim 5.79 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$ (平均值为 $4.31 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$),均高于原生结构煤;脆韧性变形的鳞片煤压缩系数为 $2.70 \times 10^{-10} \sim 8.71 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$ (平均值为 $5.66 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$),韧性变形的揉皱煤压缩系数最高 $9.24 \times 10^{-10} \sim 13.25 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$;表明随着构造变形的增强,煤的可压缩性有增高趋势,高压压汞产生的煤基质块

的压缩量逐渐增大,这是由不同构造煤受构造作用改造的程度不同决定的.以下均采用此压缩系数对压汞测试的累积孔容进行校正.在脆性~脆-韧性~韧性变形环境过程中,累积孔容增大,孔隙发育程度提高,同时“滞后环”现象也越来越明显.由于开放孔和“细颈瓶”孔能滞留汞并产生滞后环而半封闭孔不产生滞后环(Yao and Liu, 2012),表明煤体变形强度逐渐增加,孔隙喉道大量发育,开放孔和“细颈瓶”孔的发育程度提高.

3.2 分形模型阶段性分析

基于 Sierpinski、Menger、热力学和 FHH 模型分别对原生煤和构造煤样品进行分形,通过分形曲线可知不同模型具有不同的孔隙结构阶段性特征.其中压汞计算表面 Sierpinski 模型分形维数,可明显分为低压段(微米孔 D_{s1} , $r > 100 \text{ nm}$)和高压段(纳米孔 D_{s2} , $r < 100 \text{ nm}$)两部分.其中纳米孔 $D_{s2} = 2.289 \sim 2.971$,分布范围较宽,一方面表明不同类型的构造煤表面不连续性和粗糙度的差异较大,另一方面与煤基质压缩造成的误差有关(Cai *et al.*, 2013);因此在利用式(7)进行分形维数计算时,需要进行校正,校正方法参考文献(Li *et al.*, 1999; Cai *et al.*, 2013),假设校正后的分形维数为 D_{s2c} ,校正后的累积进汞量可表示为:

$$V_{Pi} = a + bP_i^{D_{s2c}-3}, \quad (13)$$

式中: a 、 b 为拟合常数,因 P_0 时的绝对孔隙体积未知,上式可写成:

$$V_{Pi} - V_{P0} = b(P_i^{D_{s2c}-3} - P_0^{D_{s2c}-3}). \quad (14)$$

利用校正的进汞量从中间某段压力点 P_i 开始拟合,一直到最大压力 $P_{\max}$ 处, D_{s2c} 最终趋于稳定,得到不同构造煤校正后的纳米孔分形维数 D_{s2c} ;从原生煤样品 Z2 来看, D_{s2c} 较之于 D_{s2} 略微降低(图 3a),使得校正后 Sierpinski 分形曲线分段性更明显.

Menger 分形曲线中,糜棱煤(Z3、Z4 和 Z13)和其他煤体结构类型煤的分形曲线存在差异(图 3b~3c);具体表现为原生煤、脆性序列构造煤和揉皱煤的 Menger 分形维数可分为 2 段,分形维数分别为 D_{m1} ($r > 72 \text{ nm}$)和 D_{m2} ($r < 72 \text{ nm}$).而糜棱煤 Menger 分形曲线可则分为三阶段,其分形维数分别定义为 D_{m1}' ($r > 523 \sim 1\,163 \text{ nm}$)、 D_{m2}' ($36 \text{ nm} < r < 523 \sim 1\,163 \text{ nm}$)和 D_{m3}' ($r < 36 \text{ nm}$),三段分形维数的存在表明了糜棱煤孔隙非均质性差异强.热力学分形曲线可分为 $r > 72\,596 \text{ nm}$ (D_{t1})和 $r < 72\,596 \text{ nm}$ (D_{t2})两段,其中 30 块样品中,18 块样品的 D_{t1} 介于 $0.728 \sim 1.990$,表明 $r > 72\,596 \text{ nm}$ 孔隙

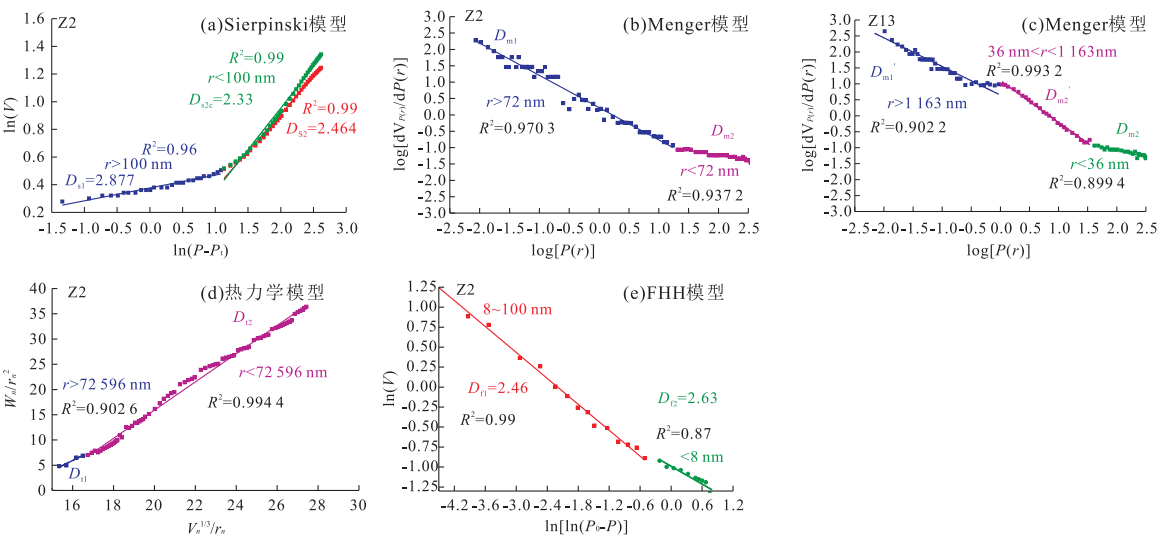


图 3 不同分形曲线对于孔隙结构表征的阶段性

Fig.3 Phase characteristics of pore structure of different fractal curves

不具备显著的热力学分形特征。 D_{t2} 介于 2.795 7~3.039 7, 具备较好的分形特征, 因此取热力学模型的 D_{t2} 来分析构造煤的 $r<72\ 596\text{ nm}$ 的孔隙非均质性(图 3d). 对 N_2 吸附数据利用 FHH 进行分形, 在相对压力为 $P_0/P=0.5$ 左右时, 存在明显的分段(图 3e). 样品均表现出当 $0.5<P_0/P<1.0$ 时($<8\text{ nm}$) 分形维数(D_{f2}) 高于 $P_0/P<0.5$ ($8\sim100\text{ nm}$) 的分形维数(D_{f1}), 表明孔宽 $L<8\text{ nm}$ 的孔隙结构比 $8\sim100\text{ nm}$ 的孔隙结构更复杂.

3.3 分形模型适用性

值得注意的是, Menger 分形维数 D_{m1} 范围为 2.70~3.24, 有 13 块煤样的 D_{m1} 大于 3, D_{m1} 在碎裂煤中出现最高值(2.90~3.18, 平均 3.07) 且平均值大于 3(图 4a), 由压缩系数可知, 煤的可压缩性不好, 尤其是脆性系列煤; 本文的研究成果也表明脆性序列构造煤的基质可压缩性弱于韧性序列构造煤, 因此在相同孔径的介孔和宏孔条件下, 为了使汞液进入脆性煤就必须升高压力, 而过高的压力会使煤的孔隙结构造成破坏, 单位压力下增加的阶段孔容量变多, $\log[dV_{P(r)}/dP(r)]$ 与 $\log[P(r)]$ 关系图的斜率就会加大, 相应的 D_{m1} 也变高, 这也是导致分形维数 $D_{m1}>3$ (糜棱煤中为 $D_{m1}'>3$) 的主要原因; 因此 Menger 模型不适合于计算脆性序列构造煤的分形维数. D_{m2} 随着构造变形的增强, 逐渐增大, 且 30 块样品均大于 3(图 4b), 表明 Menger 模型对小于 72 nm 孔隙分形结果较差, 且随着构造变形的增强, D_{m2} 逐渐变大, 表明 D_{m2} 适用性逐渐变差. 因此 Menger 模型不适合于表征构造煤的孔隙结构

非均质性.

其他模型得到的分形维数均在 2~3, 符合分形维数的几何意义. 且 Sierpinski 模型、Menger 模型和热力学模型计算的压汞分形维数以及 FHH 计算的 17 个样品的纳米孔分形维数均为非线性模型, 采用相关系数无法有效评价其相关性(赵龙等, 2014). 因此引入标准偏差 S , 分别对不同煤体结构类型煤的 7 种分形维数进行定量优度评价. 其中:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (D_c - \overline{D_c})^2}, \tag{15}$$

其中, N 为数据个数; D_c 、 $\overline{D_c}$ 分别为模型计算得到的某种构造煤的分形维数和该段平均分形维数.

某一种分形模型对某种构造煤标准偏差越小, 则表示该模型对该类型构造煤具有较好的适用性(如图 4c 中 S_{s1} 在除糜棱煤外的其他构造煤中均最低, 则表示 D_{s1} 模型对除糜棱煤外的其他构造煤具有较好的表征效果). 总体来看, 除糜棱煤外, D_{s1} 模型对原生煤及其他类型构造煤的拟合偏差均为最低; 其次为 D_{s2c} 模型(S_{s2c} 在原生煤中出现高值). 对于糜棱煤来说, D_{m3}' ($S_{m3}'=0.018\ 7$)、 D_{t2} ($S_{t2}=0.036\ 4$)、 D_{s2c} 模型($S_{s2c}=0.045\ 4$) 均具有较好的表征效果且偏差均小于 0.1; 而 Menger 模型分形维数会出现大于 3 的情况. 热力学模型可以得到 3~72 596 nm 的孔隙总体分形维数, 无法单独描述 0.1~100 nm 孔隙的分形维数; 因此 D_{s2} 模型可以较为合理地描述糜棱煤纳米孔的分形特征. 对鳞片煤而言, D_{s1} ($S_{s1}=0.057\ 4$) 模型和 D_{s2c} 模型($S_{s2c}=0.061\ 4$) 均具有较好的表征效果; D_{m1} 模型($S_{m1}=$

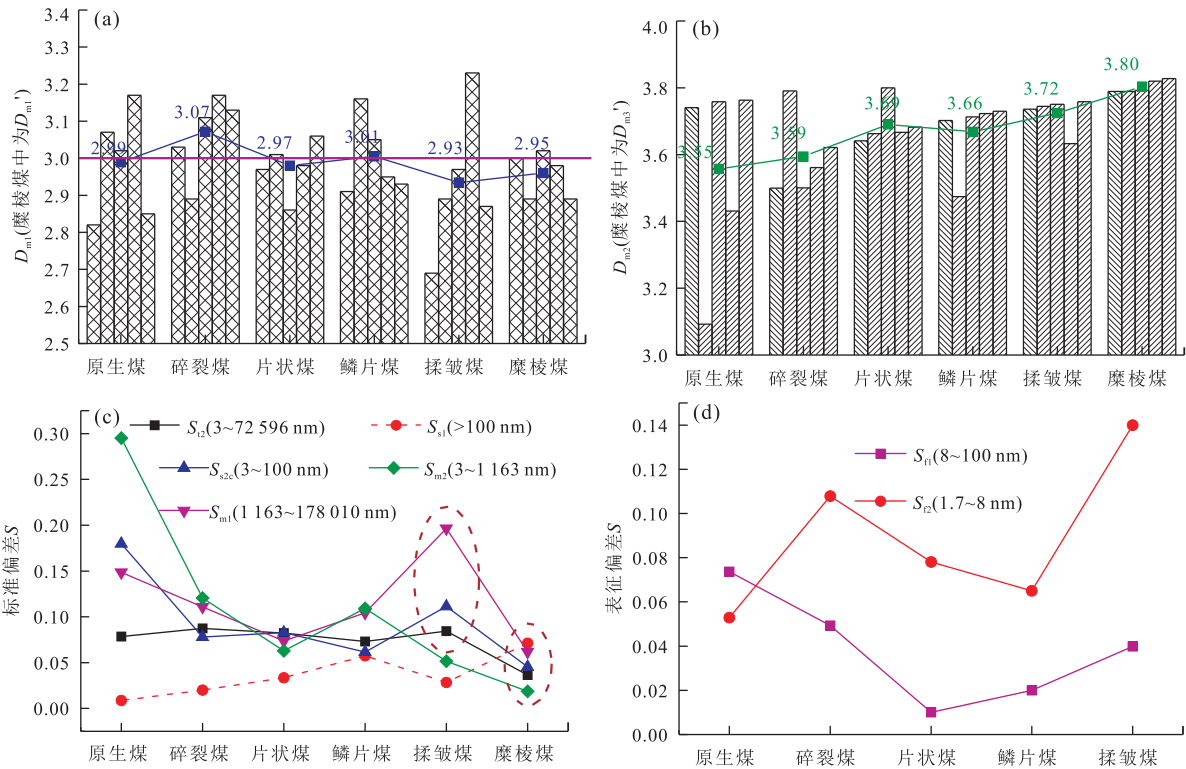


图 4 不同构造煤的 D_{m1} (a) 和 D_{m2} (糜棱煤中为 D_{m3}') (b) 以及不同分形模型对原生煤及构造煤孔隙结构表征偏差 (c, d)
Fig.4 D_{m1} (a), D_{m2} (D_{m3}' in mylonitic coals) (b), and characterization deviation of different fractal models for primary coals and tectonically deformed coals (c, d)

0.104 4) 和 D_{m2} 模型 ($S_{m2}=0.109 1$) 偏差较大, D_{f1} 模型对于原生煤及构造煤具有较好的表征效果, 尤其对于片状煤 (0.0781) 和鳞片煤 (0.0200) (图 4d). 值得指出的是, D_{m1} ($S_{m1}=0.196 5$)、 D_{m2} ($S_{m2}=0.051 6$)、 D_{t2} ($S_{t2}=0.084 29$)、 D_{f1} ($S_{f1}=0.039 8$) 以及 D_{f2} 模型 ($S_{f2}=0.14$) 均在揉皱煤时出现高值, 相对于其他类型构造煤而言, 上述模型表征效果均相对较差, D_{s2c} ($S_{s2}=0.011 1$) 模型对揉皱煤纳米孔非均质性表征效果相对较好, 表征优度显著高于其他模型. 因此, 综上所述, 将采用 D_{s1} 模型来表征原生煤、碎裂煤、片状煤、鳞片煤和揉皱煤的微米孔的非均质性, 其中糜棱煤的 D_{s1} 仅用于参考对比分析; D_{s2c} 模型用于描述构造煤的纳米孔的分形特征, 原生煤用于参考; D_{f1} 模型用于表征原生煤及构造煤 8~100 nm 的孔隙非均质性.

3.4 孔隙分形特征

碎裂煤 D_{s2c} 和 D_{s1} 分别为 2.46~2.61 (平均值为 2.51) 和 2.85~2.89 (平均值为 2.87); 片状煤分别为 2.43~2.63 (平均值为 2.50) 和 2.82~2.91 (平均值为 2.88), 脆性序列构造煤 D_{s2c} 和 D_{s1} 平均值均高于原生煤, 表明脆性变形作用使得纳米孔形态趋于复杂, 且 D_{s1} 均高于 D_{s2c} , 这与脆性构造煤广泛发育的裂

隙有关 (据宜文等, 2005). 以上表明原生煤及脆性序列构造煤微米孔具备强非均质性, 同时结合原生煤和脆性构造煤的压汞孔隙分布数据可知, 其 100~1 000 nm 的孔隙数量较少, 微米孔形态更趋复杂. 脆韧性的鳞片煤分别为 2.78~2.91 (2.71) 和 2.50~2.84 (2.82), 与脆性序列构造煤相比, D_{s2c} 增加而 D_{s1} 降低, 且 $D_{s2c} \approx D_{s1}$, 这与其 10~100 nm、100~1 000 nm、>1 000 nm 孔隙数量均相对发育是相符的, 表明鳞片煤中纳米孔和微米孔的非均质性接近. 揉皱煤 D_{s2c} 和 D_{s1} 分别为 2.63~2.89 (2.82) 和 2.70~2.76 (2.73), 相对于鳞片煤, D_{s2c} 逐渐升高, 而 D_{s1} 逐渐降低. 揉皱煤 D_{s2c} 较高, 表明纳米孔具备强非均质性且高于微米孔, 100~1 000 nm 的孔隙数量大量发育. 糜棱煤具备最高的 D_{s2c} , 表明其纳米孔非均质性最高, 如果参考其 D_{s1} 可知, 糜棱煤纳米孔形态复杂程度远高于微米孔 (图 5a, 5b).

FHH 模型表征的 8~100 nm 的孔隙分形维数 (D_{f1}) 如图 5c 所示. D_{f1} 在原生煤 (2.46~2.54, 2.63~2.77)、碎裂煤 (2.42~2.56, 2.74~2.81)、片状煤 (2.43~2.57, 2.87~2.88)、鳞片煤 (2.43~2.49, 2.83~2.87)、揉皱煤 (2.57~2.59, 2.89~2.91) 和糜棱煤 (2.45~2.73, 2.91~2.98) 中均表现随着构造变

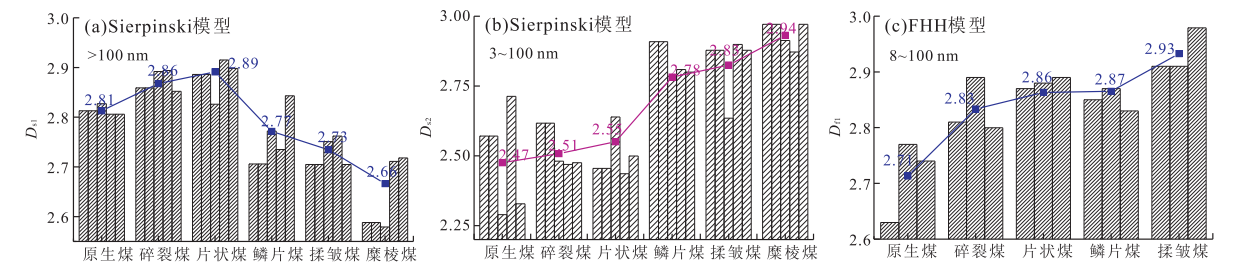


图 5 原生煤及构造煤 Sierpinski 模型微米孔(a)、Sierpinski 模型纳米孔(b)以及 FHH 模型 8~100 nm 孔隙(c)的分形维数
Fig.5 Fractal dimensions of the micron pores- (a) and nanopores (b) at Sierpinski fractal curve and pores with the diameter 8—100 nm (c) at FHH fractal curve in primary- and tectonically deformed coals

形的增强逐渐升高,表明 8~100 nm 的孔隙对构造变形敏感,随着构造变形增强,具有更加复杂的孔隙结构和更加粗糙的孔隙表面(图 5c)。

4 结论

本文选取低—中煤级典型序列构造煤样品,基于高压压汞和低温液氮的方法计算了构造煤基质可压缩性,在此基础上,综合分析了 Menger 模型、热力学模型、Sierpinski 模型和 FHH 模型对构造煤的适用性,并进一步揭示了构造煤孔隙分形特征,主要结论如下:

(1)不同分形对原生煤及构造煤孔隙分段性表征存在显著差异,糜棱煤的 Menger 分形曲线呈现三段式分布,Sierpinski 模型、Menger 模型、热力学模型以及 FHH 模型分段点分别为 100 nm,72 nm,72 596 nm 和 8 nm.Menger 模型分形维数大于 3 且拟合偏差较大,不适合表征构造煤的孔隙非均质性。优度分析表明,Sierpinski 模型适合于描述构造煤的纳米孔分形特征;FHH 模型适合于表征原生煤及构造煤 8~217 nm 的孔隙非均质性。

(2)Sierpinski 模型微米孔的分形维数(D_{s1})随着构造变形的增强先升高,而后降低,在片状煤中达到最高;Sierpinski 模型纳米孔(D_{s2c})和 FHH 模型 <8 nm 的孔隙的非均质性随着构造变形的增强逐渐升高。脆性变形煤中, $D_{s1} > D_{s2c}$,表明微米孔非均质性强于纳米孔;鳞片煤中, D_{s1} 接近于 D_{s2c} ;揉皱煤中, $D_{s1} < D_{s2c}$,表明纳米孔非均质性强于微米孔。

致谢:感谢匿名审稿专家提出的宝贵修改建议和意见!

References

Beamish, B. B., Crosdale, J. P., 1998. Instantaneous Outbursts in Underground Coal Mines: An Overview and Associa-

tion with Coal Type. *International Journal Coal Geology*, 35: 27 — 55. [https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(97\)00036-0](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(97)00036-0)

Busch, A., Gensterblum, Y., Krooss, B. M., 2003. Methane and CO₂ Sorption and Desorption Measurements on Dry Argonne Premium Coals: Pure Components and Mixtures. *International Journal of Coal Geology*, 55 (2): 205 — 224. [https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(03\)00113-7](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(03)00113-7)

Cai, Y., Liu, D., Pan, Z., et al., 2013. Pore Structure and Its Impact on CH₄ Adsorption Capacity and Flow Capability of Bituminous and Subbituminous Coals from North-east China. *Fuel*, 103: 258 — 268. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.06.055>

Cao, Y. X., Mitchell, G. D., Davis, A., et al., 2000. Deformation Metamorphism of Bituminous and Anthracite Coals from China. *International Journal Coal Geology*, 43: 227 — 242. [https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(99\)00061-0](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(99)00061-0)

Fan, J. J., Ju, Y. W., Hou, Q. L., et al., 2010. Pore Structure Characteristics of Different Metamorphic-Deformed Coal Reservoirs and Its Restriction on Recovery of Coalbed Methane. *Earth Science Frontiers*, 17 (5): 325—335 (in Chinese with English abstract).

Fu, X. H., Qin, Y., Wang, G. X., et al., 2009. Evaluation of Coal Structure and Permeability with the Aid of Geophysical Logging Technology. *Fuel*, 88 (11): 2278 — 2285. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.05.018>

Fu, X. H., Qin, Y., Zhang, W. H., et al., 2005. The Natural and Fractural Classification Based on Methane Migration. *Chinese Science Bulletin*, 50 (Suppl. I): 51 — 55 (in Chinese).

Garbacz, J. K., 1998. Fractal Description of Partially Mobile Single Gas Adsorption on Energetically Homogeneous Solid Adsorbent. *Colloids and Surfaces A: Physico-chemical and Engineering Aspects*, 143 (1): 95 — 101. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(98\)00487-7](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(98)00487-7)

- Green, U., Aizenstat, Z., Geldmeister, F., et al., 2011. CO₂ Adsorption inside the Pore Structure of Different Rank Coals during Low Temperature Oxidation of Open Air Coal Stockpiles. *Energy & Fuels*, 25(9): 4211–4215. <https://doi.org/10.1021/ef200881w>
- Guo, X., Yao, Y., Liu, D., 2014. Characteristics of Coal Matrix Compressibility: An Investigation by Mercury Intrusion Porosimetry. *Energy & Fuels*, 28(6): 3673–3678. <https://doi.org/10.1021/ef5004123>
- Jiang, B., Li, M., Qu, Z. H., et al., 2016. Current Research Status and Prospect of Tectonically Deformed Coal. *Advances in Earth Science*, 31(4): 335–346 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, B., Qu, Z., Wang, G. X., et al., 2010. Effects of Structural Deformation on Formation of Coalbed Methane Reservoirs in Huaibei Coalfield, China. *International Journal of Coal Geology*, 82(3): 175–183. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2009.12.011>
- Jiang, W., Tang, S. H., Zhang, J. P., et al., 2013. Characteristics of Pore Permeability of Highly Metamorphic Bone Coal. *Coal Geology & Exploration*, 41(4): 9–13 (in Chinese with English abstract).
- Ju, Y. W., Jiang, B., Hou, Q. L., et al., 2004. The New Structure-Genetic Classification System in Tectonically Deformed Coals and Its Geological Significance. *Journal of China Coal Society*, 29(5): 513–517 (in Chinese with English abstract).
- Ju, Y. W., Jiang, B., Hou, Q. L., et al., 2005. Structural Evolution of Nano-Scale Pores of Tectonic Coals in Southern North China and Its Mechanism. *Acta Geologica Sinica*, 79(2): 269–285 (in Chinese with English abstract).
- Ju, Y. W., Li, X. S., 2009. Behavior and Mechanism of the Adsorption/Desorption of Tectonically Deformed Coals. *Advances in Natural Science*, 19(2): 131–140 (in Chinese).
- Katz, A. J., Thompson, A. H., 1985. Fractal Sandstone Pores: Implications for Conductivity and Pore Formation. *Physical Review Letters*, 54(12): 1325. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.54.1325>
- Lei, C., Ren, J. Y., Zhang, J., 2015. Tectonic Province Divisions in the South China Sea: Implications for Basin Geodynamics. *Earth Science*, 40(4): 744–762 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2015.062>
- Li, H., 2001. Major and Minor Structural Features of a Bedding Shear Zone along a Coal Seam and Related Gas Outburst, Pingdingshan Coalfield, Northern China. *International Journal of Coal Geology*, 47(2): 101–113. [https://doi.org/10.1016/S0140-6701\(02\)86160-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6701(02)86160-4)
- Li, M., 2013. Structure Evolution and Deformation Mechanism of Tectonically Deformed Coal (Dissertation). China University of Mining & Technology, Xuzhou (in Chinese with English abstract).
- Li, M., Jiang, B., Lin, S., et al., 2013. Characteristics of Coalbed Methane Reservoirs in Faer Coalfield, Western Guizhou. *Energy Exploration Exploitation*, 31(3): 411–428. <https://doi.org/10.1260/0144-5987.31.3.411>
- Li, W., Liu, H., Song, X., 2015. Multifractal Analysis of Hg Pore Size Distributions of Tectonically Deformed Coals. *International Journal of Coal Geology*, 144: 138–152. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2015.04.011>
- Li, Y. H., Lu, G. Q., Rudolph, V., 1999. Compressibility and Fractal Dimension of Fine Coal Particles in Relation to Pore Structure Characterisation Using Mercury Porosimetry. *Particle & Particle Systems Characterization*, 16(1): 25–31. <https://doi.org/0721-3115/99/0102-0025>
- Li, Z. W., Hao, Z. Y., Pang, Y., et al., 2015. Fractal Dimensions of Coal and Their Influence on Methane Adsorption. *Journal of China Coal Society*, 40(4): 863–869 (in Chinese with English abstract).
- Ma, J., Qi, H., Wong, P. Z., 1999. Experimental Study of Multilayer Adsorption on Fractal Surfaces in Porous Media. *Physical Review*, 59(2): 2049–2059. <https://doi.org/2049.10.1103/PhysRevE.59.2049>
- Mitra, A., Harpalani, S., Liu, S., 2012. Laboratory Measurement and Modeling of Coal Permeability with Continued Methane Production: Part 1—Laboratory Results. *Fuel*, 94: 110–116. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.10.052>
- Moshier, K., He, J., Liu, Y., et al., 2013. Molecular Simulation of Methane Adsorption in Micro- and Mesoporous Carbons with Applications to Coal and Gas Shale Systems. *International Journal of Coal Geology*, 109: 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2013.01.001>
- Nishioka, M., 1992. The Associated Molecular Nature of Bituminous Coal. *Fuel*, 71(8): 941–948. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(92\)90246-K](https://doi.org/10.1016/0016-2361(92)90246-K)
- Pan, J., Niu, Q., Wang, K., et al., 2016. The Closed Pores of Tectonically Deformed Coal Studied by Small-Angle X-Ray Scattering and Liquid Nitrogen Adsorption. *Microporous and Mesoporous Materials*, 224: 245–252. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2015.11.057>
- Pfeiferper, P., Avnir, D., 1983. Chemistry Nonintegral Dimensions between Two and Three. *The Journal of Chemi-*

- cal Physics*, 79(7): 3369—3558.
- Qu, Z., Wang, G. X., Jiang, B., et al., 2010. Experimental Study on the Porous Structure and Compressibility of Tectonized Coals. *Energy & Fuels*, 24(5): 2964—2973. <https://doi.org/10.1021/ef9015075>
- Rigby, S. P., 2005. Predicting Surface Diffusivities of Molecules from Equilibrium Adsorption Isotherms. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 262(1): 139—149. <https://doi.org/10.1016/j.col-surf-a.2005.04.021>
- Schmitt, M., Fernandes, C. P., Dacunhaneto, J. A., et al., 2013. Characterization of Pore Systems in Seal Rocks Using Nitrogen Gas Adsorption Combined with Mercury Injection Capillary Pressure Technique. *Marine and Petroleum Geology*, 39(1): 138—149. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2012.09.001>
- Song, X. X., Tang, Y. G., Li, W., et al., 2013. Fractal Characteristics of Adsorption Pores of Tectonic Coal from Zhongliangshan Southern Coalmine. *Journal of China Coal Society*, 38(1): 134—139 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. J., Yao, H. F., Li, W., et al., 2014. Fractal Characterization of Pore Structure in Coals Based on Thermodynamics Model. *Coal Geology & Exploration*, 42(6): 20—23 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. Z., Wang, S. H., 2014. Fractal Characteristics of Tectonic Coal from Hegang Coal Field. *Journal of Northeast Petroleum University*, 38(5): 61—66 (in Chinese with English abstract).
- Washburn, E. W., 1921. The Dynamics of Capillary Flow. *Physical Review*, 17: 273—83.
- Wu, S. T., Zou, C. N., Zhu, R. K., et al., 2015. Reservoir Quality Characterization of Upper Triassic Chang 7 Shale in Ordos Basin. *Earth Science*, 40(11): 1810—1823 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2015.162>
- Xiong, C. R., Tang, H. M., Liu, B. C., et al., 2007. Using SEM Photos to Gain the Pore Structural Parameters of Soil Samples. *Earth Science*, 32(3): 415—419 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-2383.2007.03.016>
- Yang, Y. F., Wang, C. C., Yao, J., et al., 2016. A New Method for Microscopic Pore Structure Analysis in Shale Matrix. *Earth Science*, 41(6): 1067—1073 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.088>
- Yao, Y., Liu, D., 2012. Comparison of Low-Field NMR and Mercury Intrusion Porosimetry in Characterizing Pore Size Distributions of Coals. *Fuel*, 95: 152—158. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.17.273>
- Yao, Y., Liu, D., Tang, D., et al., 2008. Fractal Characterization of Adsorption-Pores of Coals from North China: An Investigation on CH₄ Adsorption Capacity of Coals. *International Journal of Coal Geology*, 73(1): 27—42. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2007.07.003>
- Yao, Y., Liu, D., Tang, D., et al., 2009. Fractal Characterization of Seepage-Pores of Coals from China: An Investigation on Permeability of Coals. *Computers & Geosciences*, 35(6): 1159—1166. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.09.005>
- Zhang, B., Li, S., 1995. Determination of the Surface Fractal Dimension for Porous Media by Mercury Porosimetry. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 34(4): 1383—1386. <https://doi.org/10.1021/ie00043a044>
- Zhang, B., Liu, W., Liu, X., 2006. Scale-Dependent Nature of the Surface Fractal Dimension for Bi- and Multi-Disperse Porous Solids by Mercury Porosimetry. *Applied Surface Science*, 253(3): 1349—1355. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2006.02.009>
- Zhang, W. J., Ju, Y. W., Wei, M. M., et al., 2015. Study on Characteristics and Mechanism of Adsorption/Desorption on Different Metamorphic-Deformed Coal Reservoirs. *Earth Science Frontiers*, 22(2): 232—242 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, A. H., Liao, Y., 1998. Quantitative Analysis of Pore Structure by Fractal Analysis. *Journal of China Coal Society*, 23(4): 439—442 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, L., Qin, Y., Yang, Z. B., et al., 2014. Study on Supercritical Isothermal Adsorption Model of Methane in Coal. *Natural Gas Geoscience*, 25(5): 753—760 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 范俊佳, 琚宜文, 侯泉林, 等, 2010. 不同变质变形煤储层孔隙特征与煤层气可采性. 地质前缘, 17(5): 325—335.
- 傅雪海, 秦勇, 张万红, 等, 2005. 基于煤层气运移的煤孔隙分形分类及自然分类研究. 科学通报, 50(增刊 I): 51—55.
- 姜波, 李明, 屈争辉, 等, 2016. 构造煤研究现状及展望. 地球科学进展, 31(4): 335—346.
- 姜文, 唐书恒, 张静平, 等, 2013. 基于压汞分形的高变质石煤孔渗特征分析. 煤田地质与勘探, 41(4): 9—13.
- 琚宜文, 姜波, 侯泉林, 等, 2004. 构造煤结构—成因新分类及其地质意义. 煤炭学报, 29(5): 513—517.
- 琚宜文, 姜波, 侯泉林, 等, 2005. 华北南部构造煤纳米级孔隙结构演化特征及作用机理. 地质学报, 79(2):

269—285.

据宜文,李小诗,2009.构造煤超微结构研究新进展.自然科学进展,19(2): 131—140.

雷超,任建业,张静,2015.南海构造变形分区及成盆过程.地球科学,40(4): 744—762.

李明,2013.构造煤结构演化及成因机制(博士学位论文).徐州:中国矿业大学.

李子文,郝志勇,庞源,等,2015.煤的分形维数及其对瓦斯吸附的影响.煤炭学报,40(4): 863—869.

宋晓夏,唐跃刚,李伟,等,2013.中梁山南矿构造煤吸附孔分形特征.煤炭学报,38(1): 134—139.

王秀娟,要惠芳,李伟,等,2014.基于热力学模型的煤孔隙结构分形表征.煤田地质与勘探,42(6): 20—23.

王有智,王世辉,2014.鹤岗煤田构造煤孔隙分形特征.东北石油大学学报,38(5): 61—66.

吴松涛,邹才能,朱如凯,等,2015.鄂尔多斯盆地上三叠统长7段泥页岩储集性能.地球科学,40(11): 1810—1823.

熊承仁,唐辉明,刘宝琛,等,2007.利用 SEM 照片获取土的孔隙结构参数.地球科学,32(3): 415—419.

杨永飞,王晨晨,姚军,等,2016.页岩基质微观孔隙结构分析新方法.地球科学,41(6): 1067—1073.

张文静,据宜文,卫明明,等,2015.不同变质变形煤储层吸附/解吸特征及机理研究进展.地学前缘,22(2): 232—242.

赵爱红,廖毅,1998.煤的孔隙结构分形定量研究.煤炭学报,23(4): 439—442.

赵龙,秦勇,杨兆彪,等,2014.煤中超临界甲烷等温吸附模型研究.天然气地球科学,25(5): 753—760.