

低温氮吸附法判识构造煤的实验研究

李建楼^{1,2,3}, 张 治⁴

(1. 宿州学院资源与土木工程学院, 安徽宿州 234000; 2. 安徽省煤矿勘探工程技术研究中心, 安徽宿州 234000; 3. 国家煤矿水害防治工程技术研究中心, 安徽宿州 234000; 4. 淮北矿业股份有限公司桃园煤矿地测科, 安徽宿州 234000)

[摘 要] 煤体结构是煤与瓦斯突出防治和煤与瓦斯共采的重要地质因素之一。为了区分煤体结构在地应力作用下的破坏程度, 采集了淮北矿业股份有限公司桃园煤矿 8₂83 采煤工作面煤样, 基于自相似原理和实验室内对煤样的加压模拟实验, 通过煤基质纳米级孔隙在低温氮吸附-解吸曲线上的响应对比分析, 建立了低温氮吸附法判识煤体结构的方法, 并对淮北矿业股份有限公司桃园煤矿 10 号煤层内 1026 和 1035 工作面煤体宏观结构及微观孔隙发育特征进行了对比研究。结果表明, 煤体微观孔隙结构变化与构造煤发育程度密切相关; 随着煤体破坏程度的提高, 在吸附-解吸曲线上表现为吸附量明显增大, 纳米级孔隙的比表面积和比孔容明显增加, 平均孔径略有增加; 构造煤解吸曲线上有明显的陡降点, 而原生结构煤的解吸曲线不具有这个特征。

[关键词] 构造煤 煤体结构 低温氮吸附 纳米级孔隙 桃园煤矿

[中图分类号] P624.8 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2020)04-07

Li Jianlou, Zhang Zhi. Experimental study on identification of tectonic coal using the low-temperature nitrogen adsorption method[J]. *Geology and Exploration*, 2020, 56(4): 0838-0844.

煤炭是我国的重要能源, 煤和煤层气的开采都离不开煤储层发育特征的研究。随着开采深度的增加, 瓦斯地质灾害发生的可能性也在增大, 对构造煤发育地点的预测显得尤为重要。因此, 构造煤的识别就成了煤田地质勘查阶段的一个重要内容。构造煤的识别技术包括肉眼识别、坚固性系数法和测井曲线法。不同地质体之间具有物性差别(陈伟军等, 2016a, 2016b, 2017; 徐晓培, 2019; 杨阳等, 2019; 陈树民等, 2019), 通过煤矿井下煤壁宏观结构观察, 结合附近钻孔的测井曲线, 发现测井曲线和煤体宏观结构具有对应关系(王定武, 1997; 龙王寅等 1999, 2003; 严家平等, 2003); 但测井曲线技术复杂, 数据采集和资料处理受人为因素的影响较大(陈萍等, 2014; 张俊杰等, 2019), 在已知信息有限的情况下, 往往具有多解性(张扬等, 2019)。因此, 有必要探索新的构造煤识别方法。

根据成因, 煤的孔隙可分为植物组织孔、气孔

(或热成因孔)、分子间孔、溶蚀孔、晶间孔等孔隙类型(据宜文等, 2005)。煤孔隙的形状可划分为两端开口型、一端封闭型和细颈瓶状(或墨水瓶状)等三大类。其中, 两端开放孔产生吸附回线, 一端封闭的孔不能产生吸附回线, 墨水瓶状孔在解吸曲线上具有明显的陡降点(陈萍等, 2001; 姚艳斌等, 2006)。煤的孔隙大小从纳米级到毫米级连续分布(傅雪海等, 2005), 并具有分形特征(谢和平, 1996; 傅雪海等, 2001; 张松航等, 2008)。煤孔隙发育受煤的物质组成、煤体温度、瓦斯压力、构造煤的发育程度等多种因素制约。其中, 构造煤与共生的原生结构煤相比, 构造煤的孔容和孔比表面积都有所增加(降文萍等, 2011, 2016; 李阳等, 2019)。随煤体结构破坏程度的加强, 孔容逐渐增大, 微孔比例增加(据宜文等, 2009; 宋晓夏等, 2014; 姜家钰等, 2015; Pan Jie-nan et al., 2015; Niu Qing-he et al., 2017), 煤对瓦斯的吸附能力增强(张玉贵等, 2007; 魏建平等, 2008; 姜波等, 2009)。基于前人的研究, 笔者尝试

[收稿日期] 2019-06-13; **[改回日期]** 2020-04-12; **[责任编辑]** 郝情情。

[基金项目] 国家自然科学基金项目(编号: 41502057)、安徽省煤矿勘探工程技术研究中心平台项目(编号: 2014YKF02)和宿州学院博士科研启动基金(编号: 2011jb05)联合资助。

[第一作者] 李建楼(1973年-), 男, 2010年毕业于安徽理工大学, 获博士学位, 副教授, 长期从事煤田地质勘查研究与教学工作。E-mail: jianlouli1973@126.com。

采用低温液氮吸附法识别构造煤,并用于构造煤发育地点的预测,该识别方法对煤和煤层气安全高效开采具有重要意义。

1 采样地点地质概况

实验采用的煤样取自淮北矿业集团桃园煤矿8₂83采煤工作面。桃园井田处在安徽省宿州市埇桥区北杨寨乡、桃园镇和祁县镇境内,北距宿州市约

11 km。井田北部以F1断层为界限,南部与祁南井田相接,西部边界到10号煤层风化带,东部边界到3₂煤层-800 m等高线。井田走向近南北,长度约为15 km,倾向东,宽度约为1.5~3.5 km。井田内无基岩出露,属潜伏性煤田,地表被第四系松散层所覆盖,井田按揭露地层顺序从上向下依次为第四系、新近系、二叠系、石炭系和奥陶系。研究区地理位置及构造纲要如图1。

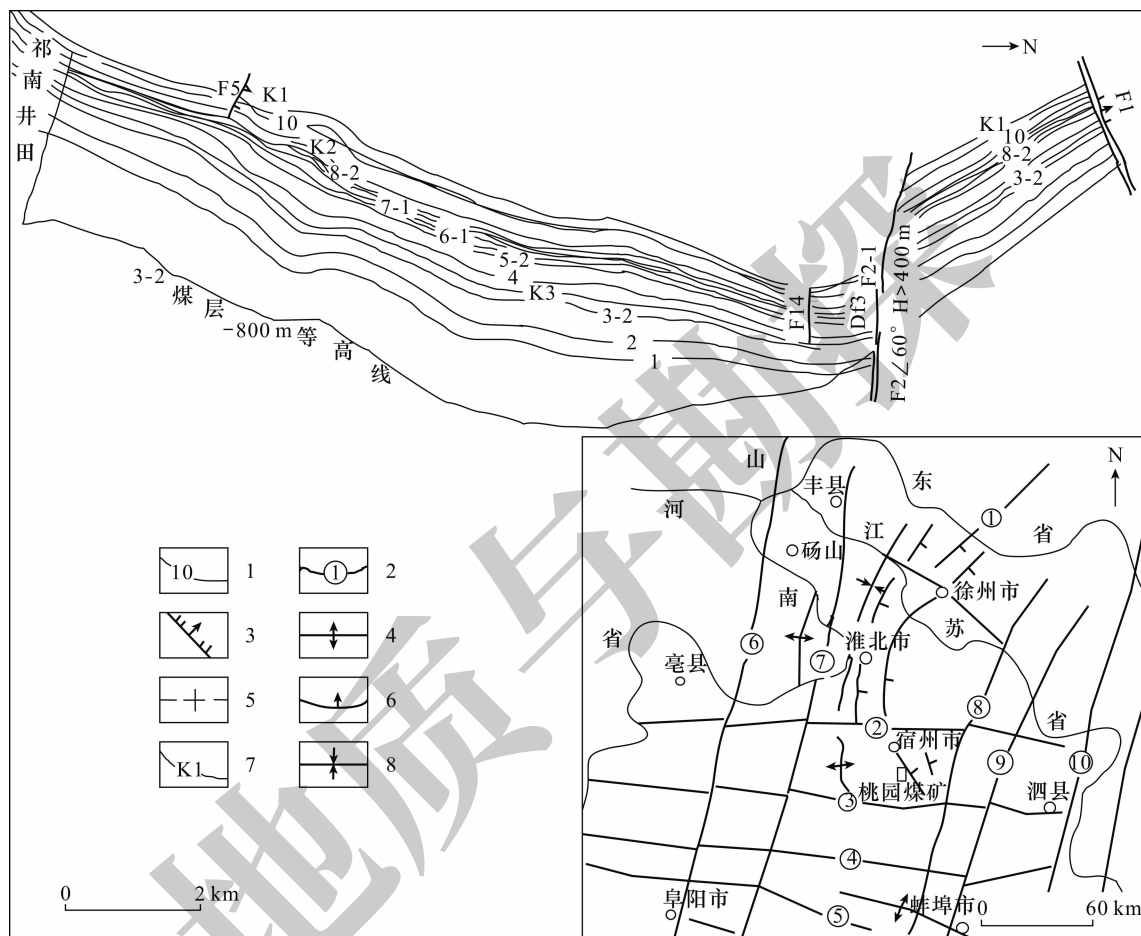


图1 桃园井田位置及地质构造纲要图(据注释①修改)

Fig. 1 Location and geologic outline of Taoyuan coal mine(modified from Note ①)

1 - 煤层露头线;2 - 断裂;3 - 正断层;4 - 背斜;5 - 井田边界线;6 - 单斜;7 - 标志层;8 - 向斜;① - 丰沛断裂;② - 宿北断裂;③ - 光武 - 固镇断裂;④ - 太和 - 五河断裂;⑤ - 刘府断裂;⑥ - 夏邑断裂;⑦ - 丰县 - 口孜集断裂;⑧ - 固镇 - 长丰断裂;⑨ - 灵璧 - 武店断裂;⑩ - 埇庐断裂
1 - coal seam outcrop;2 - fault;3 - normal fault;4 - anticline;5 - well - field boundary;6 - monocline;7 - mark bed;8 - syncline;① - Fengpei fault;
② - Subei fault;③ - Guangwu - Guzhen fault;④ - Taihe - Wuhe fault;⑤ - Liufu fault;⑥ - Xiayi fault;⑦ - Fengxian - Kouziji fault;⑧ - Guzhen -
Changfeng fault;⑨ - Lingbi - Wudian fault;⑩ - Tanlu fault

2 构造煤样品的制备

构造煤是原始沉积的煤经历后期构造运动改造形成的,在地应力的作用下煤体结构产生了破坏;破坏程度越大,构造煤越发育。为了模拟不同破坏程度的构造煤,实验采用了YP-15型压片机,按照不同的

压力对采集的煤样分别进行了压片处理,制备了不同压力条件下的构造煤样品。制取的具体步骤如下:

(1) 煤块的破碎和筛分

将煤矿井下取来的新鲜煤样放入铜质捣药罐内捣碎,然后使用60目和80目的细筛进行筛分,取60目和80目之间的颗粒作为进一步处理的样品,

分别按照合适的量(1.5 g 左右)装入 5 个样品管,并分别贴上标签。

(2) 样品的加压处理

1 号样品管中的样品不作加压处理,2 号至 5 号样品管的样品分别按照 10 MPa、15 MPa、20 MPa、25 MPa 的压力进行压片,加压时间保持 4 h。

将加压处理过的样品重新装入原来的样品管内,等待脱气干燥处理。

(3) 样品的脱气干燥处理

将 5 个装有煤样的样品管分别放入脱气装置,将温度设定在 105℃,加热 2 h 后,煤样内的水分可认为完全排出。

(4) 将加热干燥后的煤样连同样品管放入试管架中自然冷却至常温,等待低温氮吸附实验。

样品的制备过程中,在加热干燥之前和干燥之后都要用电子天平称重,以获取样品的湿重、干重和水分含量。

3 煤的微观孔隙结构参数测试

3.1 实验设备及测试原理

实验采用美国麦克仪器公司生产的 Gemini VII 型全自动比表面积和孔隙分析仪,对煤的纳米级孔隙结构进行分析。实验设备如图 2。



图 2 实验设备

Fig. 2 Experimental device

其测试分析原理为静态容量法,即以氮气为吸附介质,在液氮温度(−195℃)环境下, N_2 分子进入待测样品中,在低压时先进行单层吸附,然后开始多层吸附;依据吸附质凝结和充填顺序, N_2 分子充填的过程为先充填大于 N_2 分子直径的最小孔隙,再充填较大一级的孔隙。

当温度恒定且吸附和解吸达到平衡时,不同孔径对应的液氮吸附量是气体相对压力 p/p_0 的函数,该函数可以用开尔文方程表示;根据玻义耳-马略特定律可以计算出标准条件下氮气的吸附量。测定不同相对压力下的吸附量后,即可画出吸附等温曲线,同时可以计算出煤的比表面积、比孔容和平均孔径等特征参数值,还可以根据曲线判定煤的基质孔隙形态发育特征。

3.2 实验步骤

(1) 测试前的准备工作

将第一个待测样品管安装在比表面积和孔隙分析仪上,小心加入液氮到杜瓦瓶规定位置(液面距离瓶口 2.5 cm),然后将杜瓦瓶平稳放置在分析仪的升降台上,关闭分析仪的玻璃门。考虑到气体管线产生的压降,将氮气和氢气的出口压力均调整为 0.12 MPa,以保证仪器测量压力可以达到 0.1 MPa。

(2) 实验参数的设置

在电脑上打开 Gemini VII 全自动比表面积和孔隙分析仪软件,将实验的参数值(包括干燥后煤的质量、吸附压力范围、测量点数、吸附平衡时间等)输入到分析控制软件中。设置完成后,点击软件中的“开始分析”,仪器便会自动分析,直至分析完成,生成分析报告,点击“保存”即可存储实验数据及报告。本实验的主要技术参数设置见表 1。

(3) 当第一个样品的测试完成后,对数据进行保存,然后开始第二个样品的测试;以此类推,直到 5 个样品全部测试完成。

表 1 实验技术参数设置

Table 1 Setting of experimental technical parameters

抽真空速率(mmHg/min)	吸附平衡时间(s)	最小相对压力(p/p_0)	最大相对压力(p/p_0)	测量点数
500.0	5	0.01	0.99	39

4 测试结果与分析

4.1 煤的吸附-解吸曲线分析

五个煤样的低温氮吸附-解吸曲线对比如图

3。由图 3 可以看出,各煤样的吸附曲线呈稳步上升状态,已知相对压力和孔径是一一对应关系,即各孔段均能够测量出明显的吸附量,可以说明孔隙的连通性较好,且各孔段吸附量随着孔径的增大而增大。

未加压样品的最大吸附量最低,只有 $1.78 \text{ cm}^3/\text{g}$;随着压力加到 10 MPa ,吸附量迅速增加,达到 $3.34 \text{ cm}^3/\text{g}$;当压力加到 20 和 25 MPa 时,吸附量增加变得缓慢,达到 $4.3 \sim 4.5 \text{ cm}^3/\text{g}$ 。分析认为,煤中的脆性物质在外界压力作用下产生破裂,形成大量的微裂隙;压力越大,破碎的程度越高,产生的微裂隙越多,而且影响到的微观尺度越小;根据中科院据宜文等人的研究,高压可以影响到直径为纳米级的孔隙形态(Wang et al., 2017),这与本实验孔径测量范围 $1.6 \sim 170 \text{ nm}$ 的影响尺度范围相吻合。

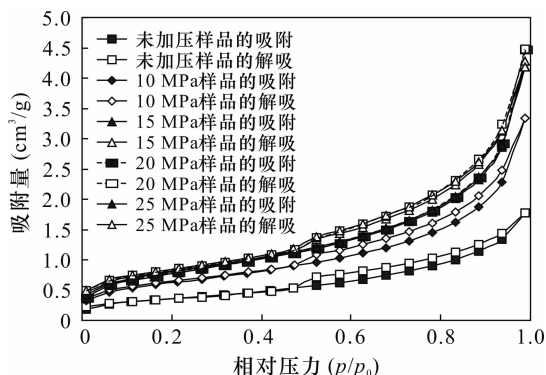


图3 不同压力条件下煤的吸附-解吸曲线

Fig. 3 Adsorption-desorption curves of coal under different pressure conditions

4.2 煤的孔隙结构参数对比分析

根据测量结果,五个煤样的比孔容对比分析如图4。可以看出,煤的纳米级孔容随着压力的增大而增大,但增加的趋势趋于平缓。也就是说,开始加压阶段煤的孔容增加较快,随着压力的继续增加,煤的孔容增量逐渐变小。分析认为,煤主要由脆性物质组成,当外加压力大于煤颗粒本身的结构强度后,结构将会产生脆性破坏,即形成微观裂隙;随着压力的增加,微观裂隙将不断增加,直至微观裂隙完全发育为止。又因为煤的孔隙结构具有分形特征,如果压力继续增大,将对超微煤孔隙($< 2.5 \text{ nm}$)继续产生脆性破坏。煤的微观孔容随外加压力增大而增加的变化特征和岩石的碎胀效应(李连崇等, 2010; 马新根等, 2019)有相似之处。

五个煤样的比表面积对比分析如图5。由图5看出,煤的比表面积随着压力的增大而增大,但增加的趋势也逐渐趋于平缓。分析认为,微裂隙的增加导致了煤的比表面积增大。

五个煤样的平均孔径对比分析如图6,可以看出,煤的平均孔径随着压力的增大而略有增大,但增加的趋势也逐渐趋于平缓。分析认为,

纳米级微裂隙的大量出现导致了煤的平均孔径增大。

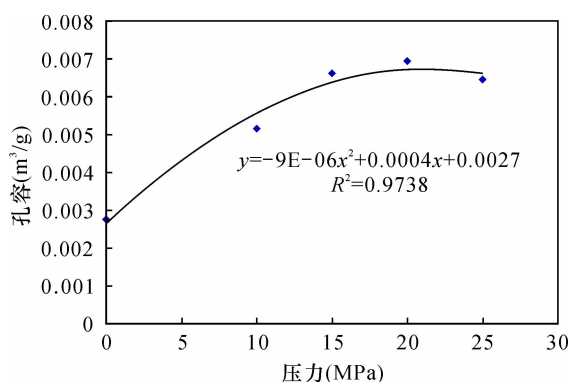


图4 煤的比孔容随压力变化曲线

Fig. 4 Curve of coal specific pore capacity varying with pressure

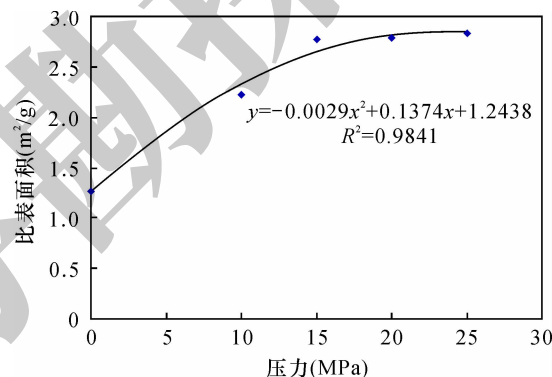


图5 煤的比表面积随压力变化曲线

Fig. 5 Curve of coal specific surface area varying with pressure

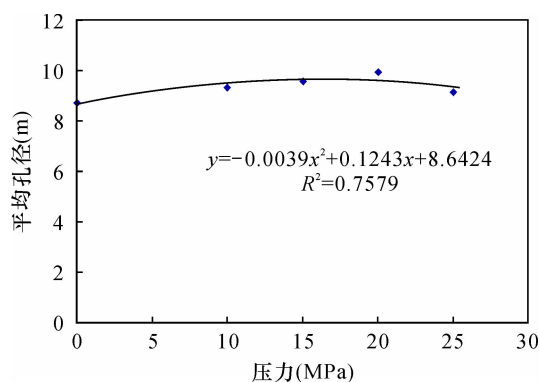


图6 煤的平均孔径随压力变化曲线

Fig. 6 Curve of average pore diameter of coal varying with pressure

综合图4~6发现,煤的纳米级孔容、比表面积和平均孔径均随着外加压力的增大呈现增加的趋势,这是微观裂隙增生的结果。

5 构造煤的判识应用实例

基于不同压力改造煤基质孔隙的模拟实验结

果,对淮北矿业集团桃园煤矿 10 号煤层的 1026 工作面 and 1035 轨道巷分别进行了样品采集和测试。测试结果如表 2。

表 2 桃园煤矿 1026 和 1035 工作面煤样孔隙结构测试数据

Table 2 Test data of pore structure of coal samples from 1026 and 1035 working faces in Taoyuan mine

采样点名称	孔容 (cm^3/g)	BET 表面积 (m^2/g)	BJH 吸附平均孔径 (nm)
1026 工作面	0.00167	0.3163	8.0279
1035 轨道巷	0.00575	2.2368	8.4347

由表 2 数据可以看出,该煤矿内同一煤层不同地点的孔隙结构存在很大差异,1035 轨道巷的各项指标值均明显大于 1026 工作面,说明 1035 轨道巷的煤样经历了明显的破坏作用。

两工作面煤样的吸附-解吸曲线特征见图 7。

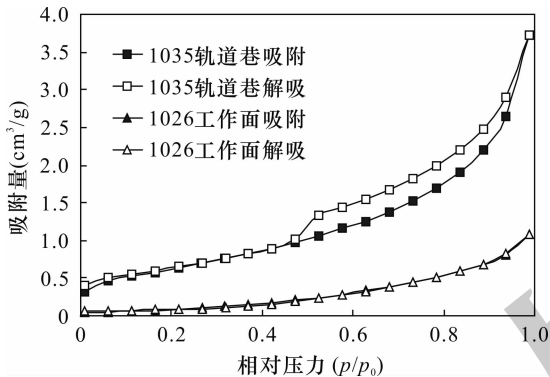


图 7 1026 工作面和 1035 轨道巷的吸附-解吸曲线对比
Fig. 7 Comparison of adsorption-desorption curves between 1026 working face and 1035 track roadway

从图 7 可以明显看出,1035 轨道巷煤样的吸附量明显大于 1026 工作面,而且曲线的形态也不同。1026 工作面煤样吸附-解吸回线不明显,且吸附曲线稳步上升,说明该煤中绝大部分孔隙为一端封闭的原生孔隙。1035 轨道巷煤样的解吸曲线具有明显的陡降点,说明该煤样中含有大量的墨水瓶状孔隙,这是经历了明显的挤压变形的标志形态。

由煤矿井下揭露地质资料可知,1035 轨道巷所处地段褶皱发育,煤体结构比较破碎;而 1026 工作面煤层比较稳定,没有褶皱发育,煤体结构比较完整。因此,煤的微观结构测试分析结果和实际地质资料相吻合。

6 结论

(1) 煤的孔隙结构受外加压力的影响较大。随着外加压力的增大,纳米级孔隙比表面积和比孔容明显增加,平均孔径略有增大。

(2) 构造煤和原生结构煤在纳米级孔隙形态上

具有明显差异,构造煤中发育较多的墨水瓶状孔,而原生结构煤中不发育。孔隙形态上的差异表现在解吸曲线上,构造煤具有明显的陡降点,而原生结构煤没有。

(3) 低温氮吸附法能够比较同一煤层不同地点构造煤的发育程度。

[注 释]

①安徽省煤田地质局第三勘探队. 2017. 淮北矿业股份有限公司桃园煤矿生产地质报告[R].

[References]

- Chen Ping, Tang Xiuyi. 2001. The research on the adsorption of nitrogen in low temperature and micro-pore properties in coal[J]. Journal of China Coal Society, 26(5): 552-556 (in Chinese with English abstract).
- Chen Ping, Zhang Rongfei, Tang Xiuyi. 2014. Some understanding of identifying tectonic coal by logging curve[J]. Coal Geology and Exploration, 42(3): 78-81 (in Chinese with English abstract).
- Chen Shumin, Qin Xi, Zhao Xiaoxiao, Wang Yaosheng, Jiao Ping, Liu Shenfen, Cui Xiaoling, Qin Xueye. 2019. Geophysical field characteristics and deep ore prospecting prediction of the Zhaiwa concealed rock mass in western Henan[J]. Geology and Exploration, 55(5): 1117-1131 (in Chinese with English abstract).
- Chen Weijun, Hong Wanhua, Hao Qingqing, Chu Shaoxiong, Xing Baoshan. 2016a. Application of high-power induced polarization and continuous conductivity sounding for prospecting in the Chifeng-Chaoyang gold concentration region[J]. Geology and Exploration, 52(1): 152-158 (in Chinese with English abstract).
- Chen Weijun, Jiang Xin, Hong Wanhua. 2016b. Geological and geophysical exploration and research in the Laoguoyingzi Au-Cu deposit, Inner Mongolian, China[J]. Geology and Exploration, 52(2): 246-250 (in Chinese with English abstract).
- Chen Weijun, Hao Qingqing, Chu Shaoxiong, Liu Jianming, Liu Hongtao, Jiang Xin. 2017. Application of very low frequency electromagnetic method to positioning of concealed metal deposits: An example of copper polymetallic ore occurrences in the Southwest Greater Hinggan Mountains[J]. Geology and Exploration, 53(3): 528-532 (in Chinese with English abstract).
- Fu Xuehai, Qin Yong, Xue Xiuyan, Li Guizhong, Wang Wenfeng. 2001. Research on fractals of pore and fracture-structure of coal reservoirs[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 30(3): 225-228 (in Chinese with English abstract).
- Fu Xuehai, Qin Yong, Zhang Wanhong, Wei Chongtao, Zhou Rongfu.

2005. Fractal and natural classification of the coal pore structure based on gas flowing[J]. Chinese Science Bulletin, 50(S1): 51–55 (in Chinese).
- Jiang Bo, Qin Yong, Ju Yiwen, Wang Jilin, Li Ming. 2009. The coupling mechanism of the evolution of chemical structure with the characteristics of gas of tectonic coals[J]. Earth Science Frontiers, 16(2): 262–271 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Jiayu, Lei Dongji, Xie Xiangxiang, Zhang Dawei. 2015. Coupling features of the pore structure with gas of the deformed coals[J]. Journal of Safety and Environment, 15(1): 123–128 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Wenping, Song Xiaozhong, Zhong Lingwen. 2011. 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, 36(4): 609–614 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Wenping, Zhang Qun, Jiang Zaibing, Han Baoshan. 2016. Effect on CBM drainage characteristics of pore structure of tectonic coal[J]. Natural Gas Geoscience, 27(1): 137–179 (in Chinese with English abstract).
- Ju Yiwen, Jiang Bo, Wang Guiling, Hou Quanlin. 2005. Tectonic coals: Structures and physical properties of reservoirs[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press: 10–12 (in Chinese).
- Ju Yiwen, Li Xiaoshi. 2009. New progress in structural coal ultrastructure research[J]. Progress in Natural Science, 19(2): 131–140 (in Chinese).
- Li Lianchong, Tang Chun'an, Liang Zhengzhao. 2010. Investigation on overburden strata collapse around coal face considering effect of broken expansion of rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 31(11): 3537–3541 (in Chinese with English abstract).
- Li Yang, Zhang Yugui, Zhang Lang, Hou Jinling. 2019. Characterization on pore structure of tectonic coals based on the method of mercury intrusion, carbon dioxide adsorption and nitrogen adsorption[J]. Journal of China Coal Society, 44(4): 1188–1196 (in Chinese with English abstract).
- Long Wangyin, Li Dongping, Zeng Qinghua, Liu Yongqing, Xu Chong. 2003. Structural features of coal body in seam No. 8 and regional prognosis of coal and gas outburst in Panji mine No. 1[J]. Geology of Anhui, 13(1): 70–73 (in Chinese with English abstract).
- Long Wangyin, Zhu Wenwei, Xu Jing, Zhang Yungen, Zeng Qinghua. 1999. Discussion on coal structure identification by logging curve[J]. Coal Geology of China, 11(3): 64–66 (in Chinese).
- Ma Xingen, He Manchao, Zhang Liang, Zhang Fei, Zhang Jiabin. 2019. Determination about bulk increase coefficient and lateral pressure of caving gangue in gob-side entry retaining formed by roof cutting[J]. Coal Engineering, 51(2): 37–41 (in Chinese with English abstract).
- Niu Qinghe, Pan Jienan, Cao Liwen, Ji Zhongmin, Wang Haichao, Wang Kai, Wang Zhenzhi. 2017. The evolution and formation mechanisms of closed pores in coal[J]. Fuel, 200: 555–563.
- Pan Jienan, Zhu Haitao, Hou Quanlin, Wang Haichao, Wang Sen. 2015. Macromolecular and pore structures of Chinese tectonically deformed coal studied by atomic force microscopy[J]. Fuel, 139: 94–101.
- Song Xiaoxia, Tang Yuegang, Li Wei, Zeng Fangui, Xiang Jianhua. 2014. Pore structure in tectonically deformed coals by small angle X-ray scattering[J]. Journal of China Coal Society, 39(4): 719–724 (in Chinese with English abstract).
- Wang Dingwu. 1997. Study on identification of structural coal by using simulated logging curves[J]. Coal Geology of China, 9(3): 70–73 (in Chinese).
- Wang Sen, Pan Jienan, Ju Yiwen, Wang Kai. 2017. The super-micro-pores in macromolecular structure of tectonically deformed coal using high-resolution transmission electron microscopy[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 17(9): 6982–6990.
- Wei Jianping, Chen Yongchao, Wen Zhihui. 2008. Study of gas desorption laws of tectonically coal[J]. Coal Mine Safety, 39(8): 1–3 (in Chinese with English abstract).
- Xie Heping. 1996. An introduction to fractal-rock mechanics[M]. Beijing: Science Press: 93–123 (in Chinese).
- Xu Xiaopei. 2019. Application of the transient electromagnetic method to flooding survey in a coal mining area of Shanxi Province[J]. Geology and Exploration, 55(2): 579–584 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yang, Wen Jianliang, Xie Wei, Liu Siqin. 2019. Detecting areas of igneous rocks intruding into coal seams using the TEM method[J]. Geology and Exploration, 55(5): 1261–1267 (in Chinese with English abstract).
- Yan Jiaping, Wang Dingwu. 2003. Theory and practice of using coal-field borehole logging to distinguish tectonic coal in Qidong coal mine[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 30(6): 37–38 (in Chinese).
- Yao Yanbin, Liu Dameng, Huang Wenhui, Tang Dazhen, Tang Shuheng. 2006. Research on the pore-fractures system properties of coalbed methane reservoirs and recovery in Huainan and Huaiabei coal-field[J]. Journal of China Coal Society, 31(2): 163–168 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Junjie, Zhao Junlong. 2019. Logging discrimination of coal structures and their distribution in the Laochang mining area, eastern Yunnan Province[J]. Geology and Exploration, 55(2): 570–578 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Songhang, Tang Dazhen, Tang Shuheng, Xu Hao, Lin Wenji, Zhang Biao. 2008. The characters of coal beds micropores and its influence factors in the eastern margin of Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 82(10): 1341–1349 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yang, Wang Lu, Liu Zhihui, Liu Shengtai, Mei Zhenhua, Du Liming, Lin Xiaohui, Zhang Jianbo. 2019. Application of multi-geophysical methods in exploration of a worked-out area of gold mining in the Jiadong region[J]. Geology and Exploration, 55(3): 809–817 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yugui, Zhang Zimin, Cao Yunxing. 2007. Deformed coal structure and control to coal-gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 32(3): 281–284 (in Chinese with English abstract).

[附中文参考文献]

- 陈萍, 唐修义. 2001. 低温氮吸附法与煤中微孔隙特征的研究[J]. 煤炭学报, 26(5): 552–556.
- 陈萍, 张荣飞, 唐修义. 2014. 对利用测井曲线判识构造煤方法的认识[J]. 煤田地质与勘探, 42(3): 78–81.
- 陈树民, 秦曦, 赵晓晓, 王耀升, 焦平, 刘申芬, 崔小玲, 秦学业. 2019. 豫西寨凹隐伏岩体地球物理场特征与深部找矿预测[J]. 地质与勘探, 55(5): 1117–1131.

- 陈伟军,洪万华,郝情情,褚少雄,邢宝山. 2016a. 大功率激电法和连续电导率测深在赤峰-朝阳金矿化集中区快速找矿评价中的应用[J]. 地质与勘探,52(1):152-158.
- 陈伟军,蒋鑫,洪万华. 2016b. 内蒙古老国营子金铜矿床地质-地球物理勘查与研究[J]. 地质与勘探,52(2):246-250.
- 陈伟军,郝情情,褚少雄,刘建明,刘红涛,蒋鑫. 2017. 甚低频电磁法在隐伏金属矿床定位预测中的应用—以大兴安岭西南段铜多金属矿点为例[J]. 地质与勘探,53(3):528-532.
- 傅雪海,秦勇,薛秀谦,李贵中,王文峰. 2001. 煤储层孔、裂隙系统分形研究[J]. 中国矿业大学学报,30(3):225-228.
- 傅雪海,秦勇,张万红,王重韬,周荣福. 2005. 基于煤层气运移的煤孔隙分形分类及自然分类研究[J]. 科学通报,50(S1):51-55.
- 姜波,秦勇,据宜文,汪吉林,李明. 2009. 构造煤化学结构演化与瓦斯特性耦合机理[J]. 地学前缘,16(2):262-271.
- 姜家钰,雷东记,谢向向,张大伟. 2015. 构造煤孔隙结构与瓦斯耦合特性研究[J]. 安全与环境学报,15(1):123-128.
- 降文萍,宋孝忠,钟玲文. 2011. 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,36(4):609-614.
- 降文萍,张群,姜在炳,韩保山. 2016. 构造煤孔隙结构对煤层气产气特征的影响[J]. 天然气地球科学,27(1):137-179.
- 据宜文,姜波,王桂梁,侯泉林. 2005. 构造煤结构及储层物性[M]. 徐州:中国矿业大学出版社:10-12.
- 据宜文,李小诗. 2009. 构造煤超微结构研究新进展[J]. 自然科学进展,19(2):131-140.
- 李连崇,唐春安,梁正召. 2010. 考虑岩体碎胀效应的采场覆岩冒落规律分析[J]. 岩土力学,31(11):3537-3541.
- 李阳,张玉贵,张浪,侯金玲. 2019. 基于压汞、低温 N_2 吸附和 CO_2 吸附的构造煤孔隙结构表征[J]. 煤炭学报,44(4):1188-1196.
- 龙王寅,李东平,曾庆华,刘永庆,徐肿. 2003. 潘一矿 8 煤层煤体结构特征及煤与瓦斯突出区域性预测[J]. 安徽地质,13(1):70-73.
- 龙王寅,朱文伟,徐静,章云根,曾庆华. 1999. 利用测井曲线判识煤体结构探讨[J]. 中国煤田地质,11(3):64-66.
- 马新根,何满潮,张良,孟琦,张飞,张家宾. 2019. 切顶成巷采空区冒落矸石碎胀系数及侧向压力测定研究[J]. 煤炭工程,51(2):37-41.
- 宋晓夏,唐跃刚,李伟,曾凡桂,相建华. 2014. 基于小角 X 射线散射构造煤孔隙结构的研究[J]. 煤炭学报,39(4):719-724.
- 王定武. 1997. 利用模拟测井曲线判识构造煤的研究[J]. 中国煤田地质,9(3):70-73.
- 魏建平,陈永超,温志辉. 2008. 构造煤瓦斯解吸规律研究[J]. 煤矿安全,39(8):1-3.
- 谢和平. 1996. 分形-岩石力学导论[M]. 北京:科学出版社:93-123.
- 徐晓培. 2019. 瞬变电磁方法在山西某煤矿区水患调查的应用[J]. 地质与勘探,55(2):579-584.
- 杨阳,温建亮,谢维,刘思琴. 2019. 瞬变电磁法探测岩浆岩侵入煤层范围浅析[J]. 地质与勘探,55(5):1261-1267.
- 严家平,王定武. 2003. 利用煤田钻孔测井信息判识祁东煤矿构造煤的理论与实践[J]. 矿业安全与环保,30(6):37-38.
- 姚艳斌,刘大猛,黄文辉,汤达祯,唐书恒. 2006. 两淮煤田煤储层孔隙系统与煤层气产出性能研究[J]. 煤炭学报,31(2):163-168.
- 张俊杰,赵俊龙. 2019. 老厂矿区煤体结构测井判识与分布规律[J]. 地质与勘探,55(2):570-578.
- 张松航,汤达祯,唐书恒,许浩,林文姬,张彪. 2008. 鄂尔多斯盆地东缘煤储层微孔隙结构特征及其影响因素[J]. 地质学报,82(10):1341-1349.
- 张杨,王璐,刘智慧,刘升台,梅贞华,杜利明,林晓晖,张建波. 2019. 多物探方法在胶东某金矿采空区勘查中的应用研究[J]. 地质与勘探,55(5):809-817.
- 张玉贵,张子敏,曹运兴. 2007. 构造煤结构与瓦斯突出[J]. 煤炭学报,32(3):281-284.

Experimental Study on Identification of Tectonic Coal Using the Low-Temperature Nitrogen Adsorption Method

LI Jianlou^{1,2,3}, ZHANG Zhi⁴

(1. School of Earth Science and Engineering, Suzhou University, Suzhou, Anhui 234000; 2. Coal Mine Exploration Engineering Center of Anhui Province, Suzhou, Anhui 234000; 3. National Coal Mine Water Disaster Prevention and Control Engineering Technology Research Center, Suzhou, Anhui 234000; 4. Geological Survey Department in Taoyuan coal mine, Huaibei Mining Co. LTD., Suzhou, Anhui 234000)

Abstract: Coal structure is one of the important geological factors for coal and gas co-mining and prevention of coal-gas outburst. In order to distinguish the damage degree of coal structure under the action of in-situ stress, coal samples were collected from the 8₂83 working face of the Taoyuan Coal Mine, Huaibei Mining Co., LTD. Based on the principle of self-similarity and the simulation experiment of pressurizing coal samples in the laboratory, a low-temperature nitrogen adsorption method is established to determine the structure of the coal body through the comparative analysis of the response of nanoscale pores of coal matrix in the low-temperature nitrogen sorption-desorption curve, and the macro structure and micro pore development characteristics of 1026 and 1035 working faces in No. 10 coal seam of the Taoyuan coal mine of Huaibei mining Co., LTD. The results show that the change of micro pore structure in the coal body is closely related to the development degree of tectonic coal. With the increase of the destruction degree of the coal body, the adsorption capacity increases significantly in the adsorption-desorption curve, the specific surface area and specific pore volume of nanoscale pores increase significantly, and the average pore diameter increases slightly. The curve of tectonic coal desorption has an obvious steep drop point, while the primary tectonic coal desorption curve does not have this characteristic.

Key words: tectonic coal, coal structure low temperature nitrogen adsorption, nanoscale pore, Taoyuan coal mine