

压裂液处理对煤岩孔隙结构的影响

康毅力, 陈德飞, 李相臣

(西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川成都 610500)

摘要:煤层气压裂作业中必然发生压裂液与煤层的相互接触, 煤岩微裂隙发育和毛管压力高等特点导致压裂液极易侵入煤层对煤岩孔隙结构造成严重损害, 进而改变煤岩对煤层气的吸附能力。选取宁武盆地 9 号煤和现场用压裂液, 采用氮气吸附和扫描电镜 (SEM) 表征压裂液处理前后煤样孔隙结构, 探求不同体系压裂液处理对煤岩孔隙结构的影响, 开展压裂液处理前后煤样的等温吸附实验。结果表明: 压裂液处理后煤样孔径分布、比表面积及孔隙分形维数都将发生变化; 压裂液体系对煤样孔隙结构的影响程度为瓜胶压裂液>活性水压裂液>清洁压裂液; 压裂液处理后煤样比表面积与孔隙分形维数增量越大, 其对甲烷气体吸附能力越强, 煤岩孔隙结构的变化会改变甲烷气体的吸附能力。

关键词:煤层气; 压裂液; 孔隙结构; 氮气吸附; 等温吸附

中图分类号:P 618.11 **文献标志码:**A

引用格式:康毅力, 陈德飞, 李相臣. 压裂液处理对煤岩孔隙结构的影响 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2014, 38(5): 102-108.

KANG Yili, CHEN Defei, LI Xiangchen. Effect of fracturing fluid treatment on pore structure of coal [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(5): 102-108.

Effect of fracturing fluid treatment on pore structure of coal

KANG Yili, CHEN Defei, LI Xiangchen

(State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation in Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: Fracturing fluid and the coal seam will touch each other during fracturing operation of coal. The developed microfractures and high capillary pressure of coal make it easy for fracturing fluid intrude into coal seam and therefore cause serious damage to the pore structure, which affects further the adsorption capacity of coal bed methane. Using the NO. 9 coal sample from Ningwu Basin and three fracturing fluid samples on site, the characterization of pore structure of coal, which was treated with fracturing fluid, was analyzed with nitrogen adsorption method. Combined with the analysis results of scanning electron microscopy (SEM), the influence of different fracturing fluid on pore structure of coal was investigated. Methane isothermal adsorption experiments were also carried out using the treated coal. The results show that pore size distribution, specific surface area and pore fractal dimension of coal change after treated by fracturing fluid. The results also indicate that gel fracturing fluid has the most impact on pore structure of coal, followed by activated water fracturing fluid, and clean fracturing fluid having the least. The larger the increase of specific surface area and pore fractal dimension of coal treated by fracturing fluid, the stronger its ability of methane adsorption. Therefore, the change of pore structure in coal will change its adsorption ability of methane.

Key words: coalbed methane; fracturing fluid; pore structure; nitrogen adsorption; isothermal adsorption

煤层气自生自储于煤层中, 在储层中主要以吸附态存在^[1-4]。煤层有别于常规储层的物理化学特性, 决定了其更易发生储层损害^[5-6]。进行水力压裂

增产改造是低渗煤岩气藏高效开发的有效手段, 压裂过程中压裂液滤失与煤岩发生复杂的物理化学反应, 改变其固有的孔隙结构, 孔隙表面是煤层气吸附

的主要场所,孔隙结构的变化必然会改变煤岩的吸附能力。国内外学者针对煤岩孔隙结构开展了大量研究,但针对压裂液处理对煤岩孔隙结构的研究较少^[7-16]。笔者通过氮气吸附和扫描电镜对压裂液处理前后煤样的孔隙结构进行表征,并分析孔隙结构变化对甲烷气体吸附能力的影响,为宁武盆地煤层气井的压裂液体系优化提供理论依据。

1 实 验

1.1 实验样品

选用宁武盆地石炭统太原组下部 9 号煤作为实验研究对象,该煤层厚为 12 ~ 20 m,煤岩特征总体以半暗—半亮型和半亮—光亮型为主。工业分析测定,煤岩水分含量为 1.28%,灰分含量为 8.88%,挥发分含量为 34.32%,固定碳含量为 55.52%。显微组分中镜质组反射率为 0.92% ~ 1.16%,镜质组含量一般大于 60%,惰质组组分约为 40%,主要为中低灰分煤。含气量为较高—高,探井中煤层含气量为 6.0 ~ 20.61 m³/t。9 号煤层整体较破碎,次生构造裂隙发育,大部分裂隙被方解石充填,导致煤岩储层孔隙度和渗透率较低^[16-18]。

1.2 实验方法

1.2.1 氮气吸附和脱附

将所取煤样粉碎后进行筛分,选取粒径小于 1

mm 的煤样在 100 ℃ 真空干燥箱中烘 24 h,然后称取相同质量煤样于三口瓶中,分别加入瓜胶压裂液、活性水压裂液、清洁压裂液滤液,在 38 ℃ 下震荡反应 10 h,用去离子水洗涤煤样,直至滤液澄清,在 100 ℃ 真空干燥箱中烘 24 h 待用。

氮气吸附和脱附实验采用 Quantachrome 公司的 NOVA2000e 比表面分析仪。通过 N₂ 对煤岩的孔隙体积、比表面及孔径分布进行测定。测定 77.46 K 下压力与 N₂ 的吸附体积之间的关系。

1.2.2 甲烷等温吸附

将氮气吸附和脱附实验后煤样制备成粒度为 0.18 ~ 0.25 mm 的粉碎样品,进行平衡水分处理,利用 HKY-II 型全自动吸附气含量测试系统开展等温吸附实验。

2 实验结果分析

2.1 煤样氮气吸附实验结果

2.1.1 煤样孔形

压裂液处理前后煤样氮气吸附和脱附等温线如图 1 所示,均属于 H1 型吸附回线^[12]。各种压裂液体系处理后煤样吸附曲线相对压力最高时的氮气吸附体积均比原煤大。煤样在相对压力 0 ~ 0.5 时:随相对压力的增加,吸附量缓慢增加,曲线上升缓慢,呈下凹形态,为单分子层向多分子层吸附过渡阶段,

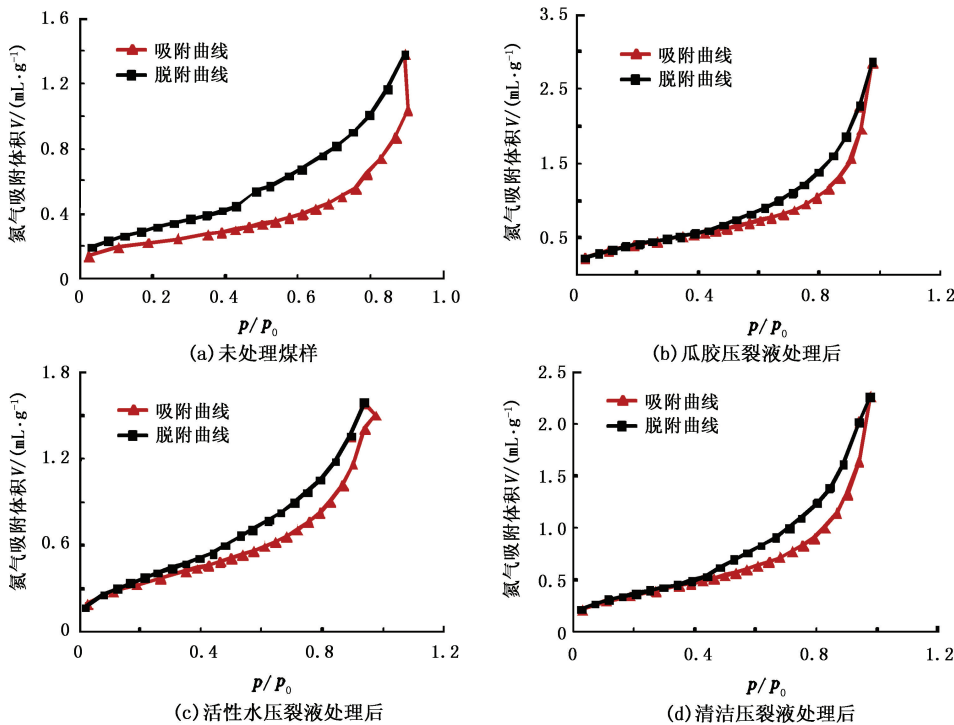


图 1 煤样氮气吸附和脱附等温线

Fig. 1 Nitrogen adsorption-desorption curves of coal

此时吸附与脱附曲线基本重合,表明在该压力段,孔隙主要为—端封闭孔;压裂液处理后吸附与脱附曲线重合度更高,表明—端封闭孔所占比例上升。相对压力为 0.5~1.0 时:随相对压力的增加,吸附量增加,曲线上升,呈现下凹形态,此时等温线存在明显的吸附回线“滞后环”,表明在该压力段对应多种复合孔隙,包括细颈瓶孔及部分开放性连通孔,即两端开口圆筒形孔、四边开放平行板孔等,压裂液处理后“滞后环”幅度有所减小,表明细颈瓶孔比例下降,孔隙连通性变差。

2.1.2 煤样孔径分布

压裂液处理前后煤样微孔和小孔体积分布如图 2 所示。经压裂液处理后煤样较未处理煤样微孔、小孔体积均有所增加。当呈酸性和碱性压裂液与煤样接触后,使得煤岩表层小分子物质溶出生成小孔,随着处理时间的延长,微小孔生成量越来越多。煤岩中的有机质基团($-\text{CH}_2-\text{NH}_2$)与压裂液接触后将产生物理吸附、化学吸附、化学反应 3 个过程^[19],导致基团中的化学键发生较大的变化,并断裂生成新的化学键,同时煤岩中的无机质也将部分反应,进而造成煤岩微孔增大,也可能引起孔隙坍塌,从而导致煤样微孔和小孔体积相应增加,其中瓜胶压裂液对煤样孔隙结构的影响最大,其次是活性水压裂液,最后是清洁压裂液。

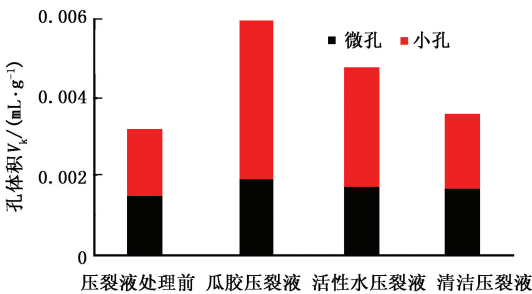


图 2 Pore volume distribution of coal before and after treated by fracturing fluid

图 3 为不同压裂液处理对煤样孔径分布的影响,可用以分析煤样在各个孔径范围内孔隙的分布情况。可以看出压裂液处理后煤样微孔和小孔含量总体高于压裂液处理前煤样。压裂液对煤样孔隙结构的影响主要集中在半径小于 12 nm 以内的孔隙。

2.1.3 煤样比表面积

运用氮气低温吸附法测试孔径范围比较有限,只能比较准确地测试出煤样中微孔与小孔的体积、比表面积及其分布^[13],研究过程中只考虑了各种压裂液体系对煤样微孔与小孔部分的影响,如前所述

压裂液处理后煤样微小孔数量将增加,而煤样中微小孔是比表面积的主要贡献,随着微小孔含量的增加煤样比表面积将增加^[13]。不同压裂液体系处理前后煤样依据 BET 模型拟合得到的总比表面积结果见表 1。

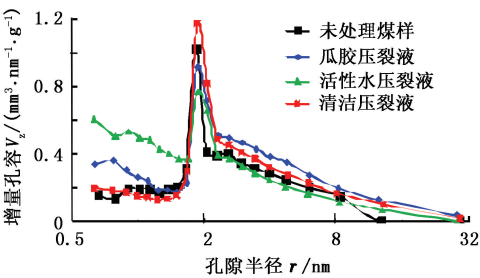


图 3 压裂液处理前后煤样孔隙分布
Fig.3 Pore distribution of coal before and after treated by fracture fluid

表 1 压裂液处理前后煤样比表面积
Table 1 Specific surface area of coal before and after treated by fracturing fluid

压裂液类型	比表面积 $A/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	比表面积增量 $\Delta A/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	比表面积增加幅度/%
未处理煤样	0.788	—	—
瓜胶压裂液	1.523	0.735	93.27
活性水压裂液	1.310	0.522	66.24
清洁压裂液	1.230	0.442	56.09

3 种压裂液体系处理后煤样总的比表面积与未处理煤样相比均有所增加。压裂液与煤样接触后使得煤岩中部分无机矿物和小分子有机物质溶蚀产生小孔,导致煤岩内小孔和微孔增多,微孔含量增加的同时生成小孔,导致煤岩中微孔和小孔总比表面积增加,因此表现为压裂液处理后煤样总比表面积较处理前有所增加^[13]。

2.1.4 煤样表面分形

常用分形维数定量描述一个集合不规则程度,整数部分反映体系空间规模,对研究煤样孔隙结构的表面形态,由于研究对象基于表面,因而分形维数 D 的整数部分为 2,分数部分取决于孔隙表面结构规则程度, D 取 2~3 之间的分数,表面越粗糙 D 值越大^[20-23]。

表面分形维数 D 可以定义^[20-21]为

$$n \propto r^{-D} \tag{1}$$

式中, n 为覆盖材料的表面需要半径为 r 的分子数目;对光滑表面, $D=2$ 。

Pfeifer 等^[20-21,24]提出基于 FHH(Frenkel-Halsey-Hill)模型的分形维数的计算方法。对气体吸附在分形表面,有

$\ln(V/V_m)=C+S\ln[\ln(p_0/p)]$. (2)

式中, V 为平衡压力 p 对应的表面吸附气体的体积; V_m 为单分子层时吸附气体的体积; p_0 为饱和压力; C 和 S 为与吸附机制及分形维数相关的常数。

当压力 p 较小时, 吸附界面主要受 van der Waals 力控制^[20-21], 有

$$S=\frac{D-3}{3}.$$
 (3)

当覆盖程度比较高时, 吸附界面主要受表面张力控制,

$$S=D-3.$$
 (4)

据低温液氮实验测得的等温吸附线, 以 $\ln(V)$ 对 $\ln(\ln(p_0/p))$ 作图, 斜率为 S , 然后由式(3)或式(4)求得分形维数 D , 吸附过程是受到以上两种机制共同作用的结果, 为准确判断选用式(3)或(4),

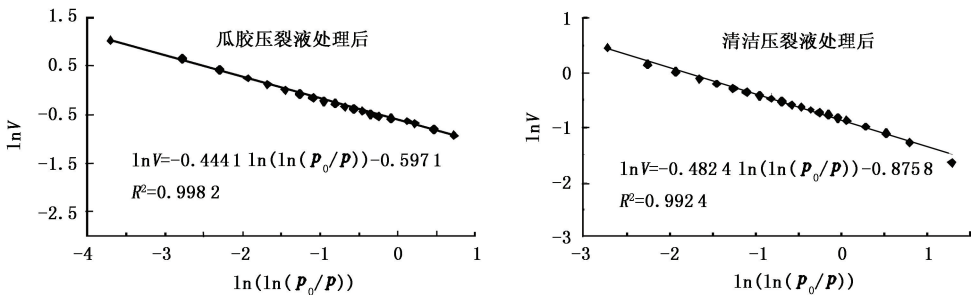


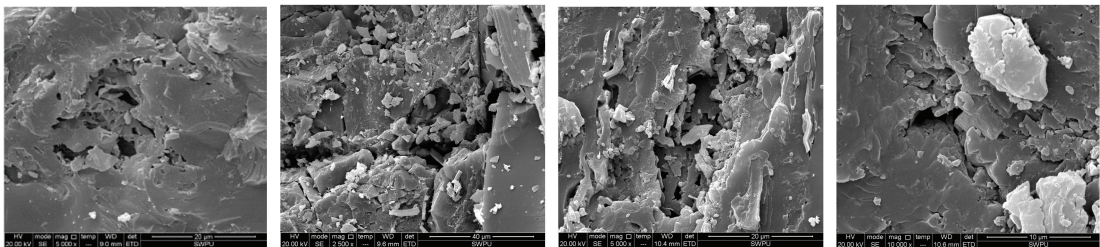
图 4 煤样分形分析
Fig.4 Fractal analysis of coal

表 2 压裂液处理前后煤样分形维数

Table 2 Fractal dimension of coal before and after treated by fracturing fluid

压裂液类型	比表面积 $A/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	S	分形维数 D	R^2
未处理煤样	0.788	-0.586	2.414	0.9946
瓜胶压裂液	1.523	-0.444	2.556	0.9982
活性水压裂液	1.310	-0.473	2.527	0.9987
清洁压裂液	1.230	-0.482	2.518	0.9924

为进一步验证上述低温液氮实验结果, 对压裂液处理前后煤样进行扫描电镜观察, 图 5 为观察结果。从图 5 可以看出, 煤样经压裂液处理后表面粗糙程度均有所增加, 其中粗糙程度为: 瓜胶压裂液>活性水压裂液>清洁压裂液。这与分形维数的分析结果吻合, 在电镜下的表观行为在一定意义上印证了氮气吸附实验中的结果。



(a) 未处理煤样 (b) 瓜胶压裂液处理煤样 (c) 活性水压裂液处理煤样 (d) 清洁压裂液处理煤样

图 5 压裂液处理前后煤样扫描电镜图片

Fig.5 SEM images of coal before and after treated by fracturing fluid

2.2 煤样甲烷吸附能力测试结果

在 38℃ 下, 对未处理煤样及压裂液处理后煤样开展等温吸附实验, 测试结果如图 6 所示。对各种

状态煤样的等温吸附数据运用最小二乘法进行回归处理, 可得到 4 组煤样的 Langmuir 参数 V_L 和 p_L 具有一定规律, 如表 3 所示。Langmuir 体积(V_L)决定

煤样对甲烷气体的吸附能力,甲烷的吸附能力越强 V_L 也越大。

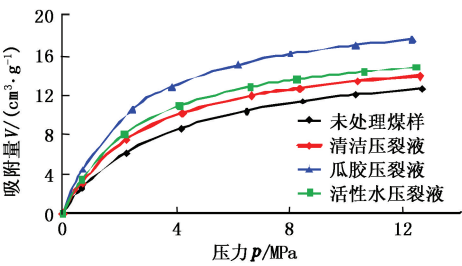


图 6 压裂液处理前后煤样等温吸附曲线
Fig.6 Isothermal adsorption curves of coal before and after treated by fracturing fluid

表 3 甲烷等温吸附实验结果

压裂液类型	$V_L/(cm^3 \cdot g^{-1})$	p_L/MPa	R^2
未处理煤样	16.13	3.60	0.9999
瓜胶压裂液	21.39	2.60	0.9999
活性水压裂液	18.21	2.81	0.9998
清洁压裂液	17.37	3.09	0.9998

不同体系压裂液处理后煤样等温吸附曲线(图 6)形态特征相似,均属于 I 型等温吸附线^[25]。在低压区,吸附曲线迅速上升,发生微孔吸附,曲线彼此接近,吸附量差距小^[26];在高压区,曲线变平坦,发生表面吸附,曲线彼此分离,出现吸附量明显差异。相对未处理煤样,瓜胶压裂液处理后煤样吸附能力增加最大,其次是活性水压裂液,最后是清洁压裂液。

2.2.1 甲烷吸附量与比表面积的关系

图 7 为煤样比表面积与 Langmuir 体积的关系。由图 7 可以看出,压裂液处理后甲烷气体的吸附量与煤样比表面积成正比关系,随着煤样比表面积的增加而增大。用 Origin 软件对实验数据进行分析拟合得出的数学方程为: $V_L = 14.865A^2 - 27.198A + 28.331$, 相关系数 $R^2 = 1.000$ 。

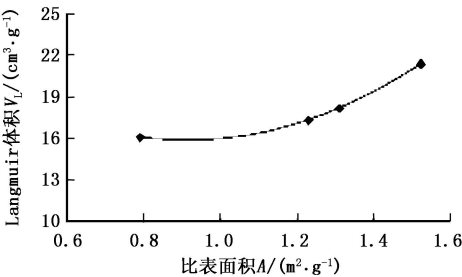


图 7 煤样比表面积与 Langmuir 体积的关系
Fig.7 Relationship of surface area and Langmuir volume of coal

煤岩的比表面积是表征煤岩表面特征和微孔结构的一个重要指标,煤岩的比表面积与煤层气的吸

附量有着密切关系,压裂液与煤样接触后使煤岩中小分子物质溶出生成小孔,导致煤岩中微孔生成量越来越多,微孔数量的增加将导致煤岩比表面积明显增加,比表面积增加使甲烷气体的吸附面积增加,从而增加甲烷气体的吸附量。

2.2.2 甲烷吸附能力与分形维数的关系

图 8 为煤样分形维数与 Langmuir 体积关系。由图 8 可以看出,当分形维数 $D < 2.46$ 时,随着分形维数的升高煤样对甲烷气体的吸附能力增加并不明显;当 $D > 2.46$ 时随着分形维数的升高煤样对甲烷气体的吸附能力显著增加。研究中压裂液处理后煤样表面分形维数均大于 2.46,随着煤样处理后分形维数的增大,煤样对甲烷气体的吸附能力增强。用 Origin 软件对实验数据进行分析拟合得到的数学方程为: $V_L = 654.86D^2 - 3217.5D + 3967.2$, $R^2 = 0.9999$ 。

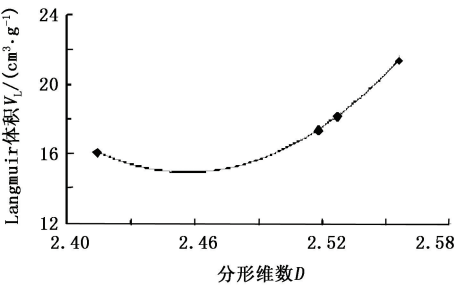


图 8 煤样分形维数与 Langmuir 体积关系
Fig.8 Relationship of fractal and Langmuir volume of coal

分形维数能够刻画出煤岩孔隙结构的本质特征,可以用于描述煤岩孔隙结构的不规则程度。压裂液处理后使煤岩表层小分子物质溶出,煤岩表面的微孔含量增加;同时煤岩中的无机质与有机质也将部分反应,使微孔含量增加的同时生成小孔,随着反应继续进行可引起孔隙坍塌或形成中孔、大孔,导致煤岩孔隙表面粗糙程度增大;分形维数与煤岩表面孔隙结构变化的剧烈程度也密切相关,煤岩孔隙结构的无规律性越强、孔隙表面越粗糙,分形维数越大,当分形维数值超过临界值 2.46 时,煤样对甲烷气体的吸附能力随分形维数的升高显著增大。煤岩孔隙表面相对越平缓,分形维数越小,吸附甲烷的量越小。

3 结 论

(1)压裂液处理后煤样比表面积及孔隙分形维数与未处理煤样相比均有所增加。瓜胶压裂液对煤样孔隙结构的影响最大,其次是活性水压裂液,最后是清洁压裂液。

(2)煤样比表面积及孔隙分形维数越大,煤样对甲烷气体的吸附能力越强,越不利于煤层气开采。

(3)煤层气井压裂作业过程中,应选择合适的压裂液,提高压裂液返排率。尽量避免使用高聚合物以及过高(过低)pH值的压裂液。

参考文献:

- [1] GAYER R, HARRIS I. Coalbed methane and coal geology [M]. London: The Geological Society, 1996: 1-338.
- [2] 冯三利, 叶建平. 中国煤层气勘探开发技术研究进展 [J]. 中国煤田地质, 2003, 15(6): 19-23.
FENG Sanli, YE Jianping. Progress in China's CBM and exploitation technical researches [J]. Coal Geology of China, 2003, 15(6): 19-23.
- [3] 张松航. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气储层物性研究 [D]. 北京: 中国地质大学能源学院, 2008.
ZHANG Songhang. Study on coal reservoir physical properties in eastern margin of Ordos Basin [D]. Beijing: Faculty of Energy, China University of Geosciences, 2008.
- [4] 李前贵, 康毅力, 徐兴华. 煤岩孔隙结构特征及其对储层损害的影响 [J]. 西南石油学院学报, 2002, 24(3): 1-3.
LI Qiangui, KANG Yili, XU Xinghua. Characteristics of pore structure and its impact on reservoir damage mechanisms of coal beds [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2002, 24(3): 1-3.
- [5] 何晓辉, 赵荣, 谢立志. 煤层气储层孔渗性评价研究 [J]. 中国煤炭地质, 2011, 23(11): 52-56.
HE Xiaohui, ZHAO Rong, XIE Lizhi. Appraisal study on CBM reservoir pore permeability [J]. Coal Geology of China, 2011, 23(11): 52-56.
- [6] 张群, 冯三利, 杨锡禄. 试论我国煤层气的基本储层特点及开发策略 [J]. 煤炭学报, 2001, 26(3): 230-235.
ZHANG Qun, FENG Sanli, YANG Xilu. Basic reservoir characteristics and development strategy of coalbed methane resource in China [J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(3): 230-235.
- [7] BYUNG-JOO Kim, SOO-JIN Park. Influence of surface treatments on micropore structure and hydrogen adsorption behavior of nonporous carbons [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2007 (311): 619-621.
- [8] 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): 27-42.
- [9] 李春住. 维多利亚褐煤科学进展 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 26.
- [10] 杨建成. 携带流反应器条件下快速热解煤焦孔隙结构试验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 2007.
YANG Jiancheng. Experimental study on the coal char porous structure of fast pyrolysis in an entrained-flow reactor [D]. Harbin: Energy Science & Engineering, Harbin Institute of Technology, 2007.
- [11] 尹志军, 盛国君, 王春光. 基于压汞法的煤岩各段孔隙的分形特征 [J]. 金属矿山, 2011, 9: 54-57.
YIN Zhijun, SHENG Guojun, WANG Chunguang. Fractal dimension of varied pore within coal based on mercury intrusion method [J]. Metallic Mine, 2011, 9: 54-57.
- [12] 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.
- [13] 宋玲玲, 冯莉, 刘炯天, 等. 碱液处理对褐煤孔隙结构的影响 [J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(4): 629-634.
SONG Lingling, FENG Li, LIU Jiongtian, et al. Effect of alkali treatment on the pore structure of lignite [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(4): 629-634.
- [14] 范俊佳, 琚宜文, 柳少波. 不同煤储层条件下煤岩微孔结构及其对煤层气开发的启示 [J]. 煤炭学报, 2013, 38(3): 441-447.
FAN Junjia, JU Yiwen, LIU Shaobo. Micropore structure of coals under different reservoir conditions and its implication for coalbed methane development [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(3): 441-447.
- [15] 赵瑞玉, 徐永强, 殷长龙, 等. 硅源对介孔分子筛结构、性能的影响 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2008, 32(6): 142-146, 150.
ZHAO Ruiyu, XU Yongqiang, YIN Changlong, et al. Effect of silica on structure and properties of mesoporous molecular sieve [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(6): 142-146, 150.
- [16] 陈德飞, 康毅力, 李相臣. 压裂液对煤岩气体解吸能力的影响 [C]//叶建平, 傅小康, 李玉忠. 2013 年煤层气学术研讨会论文集. 北京: 地质出版社, 2013: 358-364.
- [17] 陈德飞, 康毅力, 李相臣. 压裂液处理对煤岩孔隙结

- 构的影响研究 [C]//中国力学学会. 中国力学大会: 2013 论文摘要集. 2013:85.
- [18] 李相臣, 康毅力, 陈德飞, 等. 钻井完井液对煤层气解吸-扩散-渗流过程的影响: 以宁武盆地 9 号煤层为例[J]. 天然气工业, 2014, 34 (1): 86-91.
- LI Xiangchen, KANG Yili, CHEN Defei, et al. Effect of drill-in fluid on CBM desorption, diffusion and percolation: a case study of No. 9 coal seam of the Ningwu Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34 (1): 86-91.
- [19] YANG Zhaobiao, QIN Yong, WANG Zhaofeng, et al. Desorption-diffusion model and lost gas quantity estimation of coalbed methane from coal core under drilling fluid medium[J]. Science China (Earth Sciences), 2010, 53(4): 626-632.
- [20] 刘龙波, 王旭辉. 由吸附等温线分析膨润土的分形孔隙[J]. 高校化学工程学报, 2003, 17(5): 591-595.
- LIU Longbo, WANG Xuhui. Fractal analysis of bentonite porosity by using nitrogen adsorption isotherms [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2003, 17(5): 591-595.
- [21] 朱学云. 木糖脱色用活性炭的热再生工艺研究及其孔结构表征[D]. 昆明: 昆明理工大学材料与冶金工程学院, 2008.
- ZHU Xueyun. Thermal regeneration process research and pore structure characterization of activated carbon for xylose decoloring [D]. Kunming: Faculty of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, 2008.
- [22] RICE J A, TOMBACZ E, MALEKANI K. Applications of light and X-ray scattering to characterize the fractal properties of soil organic matter[J]. Geoderma, 1999, 88: 251-264.
- [23] 杨彦从, 彭瑞东, 周宏伟. 三维空间数字图像的分形维数计算方法[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(2): 251-258.
- YANG Yancong, PENG Ruidong, ZHOU Hongwei. Computation of fractal dimension for digital image in a 3-D space[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(2): 251-258.
- [24] PFEIFER P, LIU K. Multilayer adsorption as a tool to investigate the factual nature of porous adsorbents[J]. Studies in Surface Science and Catalysis, 1997, 79(7): 3558-3565.
- [25] 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: 61.
- [26] 孟宪明. 煤孔隙结构和煤对气体吸附特性研究[D]. 青岛: 山东科技大学化学与环境工程学院, 2007.
- MENG Xianming. Study on the pore structure of coals and characteristics of gases adsorption on coals [D]. Qingdao: College of Chemical and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, 2007.

(编辑 李志芬)