

煤体结构差异的吸附响应及其控制机理

张小东, 刘浩, 刘炎昊, 苏现波

河南理工大学能源科学与工程学院, 河南焦作 454000

摘要: 为了研究不同煤体结构煤的吸附行为差异和作用机理, 以焦作煤田为研究区, 对煤体破坏严重的糜棱煤和原生结构煤的岩石学组成、吸附性和孔隙性进行了测试, 结果表明: 煤体破坏后, 吸附、解吸能力增大; 温度增加, 煤的吸附能力均为下降, 解吸能力增加。相比于原生结构煤, 随着温度增加, 糜棱煤吸附能力下降趋势和解吸能力增大趋势比原生结构煤更为明显。研究认为: 煤体破坏后, 不同孔径段的孔隙数量均有增大, 使得煤样容纳气体的能力增大。特别是大中孔含量的增大, 导致了糜棱煤样更容易发生解吸。另外, 煤体破坏后的煤级增高、镜质组含量增大和惰质组含量减小也对吸附能力增大具有重要作用, 而灰分含量不是决定两类煤吸附性差异的主要因素。

关键词: 焦作煤田; 煤体结构; 孔隙性; 吸附性; 机理分析。

中图分类号: P618.11

文章编号: 1000-2383(2009)05-0848-07

收稿日期: 2009-01-20

Adsorption Response of Different Coal Body Structures and Its Influence Mechanism

ZHANG Xiao-dong, LIU Hao, LIU Yan-hao, SU Xian-bo

College of Energy Science & Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China

Abstract: In order to study the difference and its controlling mechanism of gas adsorption on coals with different body structures, such parameters as the macroscopic petrographic constituents, the adsorption capacity and pore structure of undeformed and mylonitic coal samples of Jiaozuo coalfield were measured. The experimental results show that the mylonitic coal is of higher ability of absorption and desorption than that of the undeformed coal. With the rising of temperature, the mylonitic coal is more evident than undeformed coal in the tendency of decline in absorption and increase in desorption. The study concludes that the pores in different pore diameter increases after the coal body is deformed, so the gas-containing capacity of mylonitic coals is stronger. Especially, the contents of macro- and meso-pore are higher in mylonitic coals, so the desorption becomes easier. Moreover, other factors, including the coal rank rise, the vitrinite content increase and inertinite content decrease after the coal body is deformed, lead to the increase of absorption ability. The study also concludes that the ash content is not the main controlling factor on the adsorption difference between two types of coals with different coal body structures.

Key words: Jiaozuo coalfield; coal structure; porosity; adsorbability; mechanism analysis.

0 引言

我国的煤盆地以具有复杂构造演化史而呈现明显特色, 不同期次、性质、规模的构造作用的叠加, 不仅导致煤盆地结构复杂多变, 也使得煤层结构发生了强烈改造, 煤的储层物性发生了根本变化(姜波和秦勇, 1998)。袁崇孚(1985)根据煤体在构造作用下

的破碎程度, 将煤分为原生结构煤、碎裂煤、碎粒煤、糜棱煤4类。其中, 原生结构煤和碎裂煤主要发育在成煤期后构造变动轻微的地区和煤层中, 煤体原生条带状结构和割理及孔隙系统得以保存或仅遭受轻微的改造, 煤中割理及裂隙连通性好, 渗透性较高, 煤体强度较大, 利于煤层气的开采。碎粒煤和糜棱煤主要发育在构造变动较强烈的地区和煤层中, 原生

基金项目: 国家自然科学基金(No. 40602017); 国家重点基础研究发展规划“973”项目(No. 2006CB22204); 河南省重大公益性科研项目(No. 080090010500); 河南理工大学博士基金(No. 648513)。

作者简介: 张小东(1971-), 男, 博士, 副教授, 从事煤层气地质与工程、瓦斯地质研究。E-mail: Z-wenfeng@163.com

结构和割理及孔隙系统在构造应力作用下遭受了严重的破坏, 裂隙方向杂乱, 连通性差, 渗透性较低, 煤层气开采难度很大, 甚至被认为是煤层气开采的“禁区”(杨陆武和孙茂远, 2001)。目前, 世界上煤层气地面开发仍集中在原生结构煤和碎裂煤发育区, 而这两类煤在开采过程中几乎不发生突出, 煤层气开发的减灾意义就无从谈起。近些年来, 随着工程实践和科学研究的深入, 我国转变了以往构造煤发育区的煤层气开发工艺的思路, 探求煤层气地面开发和井下抽放相结合的地面与井下抽采技术, 并在安徽淮南煤田取得了初步成果。

本文以正在进行煤层气资源开发试验的焦作煤田为研究区, 根据区内煤层的产出状态, 在不同矿井的相邻位置分别采集原生结构煤和糜棱煤, 借助有关实验和测试手段, 对比分析两类煤的吸附性差异, 探讨吸附性差异的控制机理, 以对构造发育区煤层气资源的开采和煤矿瓦斯灾害防治提供理论借鉴。

1 研究区概况

焦作煤田位于太行山东南麓, 整体形态为走向 NE、倾向 SE 单斜构造。区内广泛发育自燕山运动以来所生成的各种构造形迹, 主要以断裂构造为主, 褶皱构造表现微弱, 岩浆活动较弱。主要含煤建造为石炭、二叠系含煤地层, 共计含煤 13 层, 其中, 只有二

煤是区内主要可采煤层, 也是煤层气赋存主要储层。

区内二₁ 煤的煤体结构分布呈规律性的变化。九里山断层以南, 可分为 3 层: 上部一层大约 0.3 ~ 1.0 m 的松软煤层带(糜棱煤), 中部为 3.0 ~ 4.5 m 的破坏程度微弱的块状煤带(原生结构煤和碎裂煤), 接近煤层底板发育一层 0.25 ~ 1.5 m 的松软煤层带(糜棱煤); 九里山断层以北、北碑断层以东的方庄井田多为块状(原生结构煤、碎裂煤)、次为粉粒状(碎粒煤、糜棱煤)的煤层; 九里山断层以北、北碑断层以西以及煤田西部的各井田煤层顶部普遍发育一层 0.5 ~ 2 m 的松软煤层(糜棱煤), 下部为块状煤层带(原生结构煤)。

2 煤样及实验

2.1 样品采集

煤样采集于焦作煤田各主要矿井, 根据研究区煤层软、硬分层的产出特征, 在回采工作面新鲜煤面相邻或相近位置采取可对比的原生结构煤和糜棱煤, 其中糜棱煤 7 件, 原生结构煤 10 件。

2.2 实验方法

对煤样进行了显微组分定量统计、最大镜质组反射率($R_{o, max} \%$)测试、孔隙结构参数测试以及吸附能力测试(表 1)。

煤样的孔隙结构测试在中国石油勘探院廊坊分

表 1 煤样的显微组分定量统计结果

Table 1 Quantitative statistic data of the macerals content of different coal samples

矿井	编号	$R_{o, max}$ (%)	有机组分(%)			无机组分(%)					煤体结构类型
			镜质组	惰质组	合计	Cl	P	Ca	Si	合计	
古汉山	1	3.413	72.1	22.8	94.9	4.3	0.2	0.4	0.2	5.1	糜棱煤
	2	3.391	48.3	40.3	88.6	6.0	0.2	4.8	0.4	11.4	原生结构煤
九里山	3	3.609	58.6	35.6	94.2	4.0	0.4	1.2	0.2	5.8	糜棱煤
	4	3.542	38.7	52.4	91.1	7.6	0.2	0.9	0.2	8.9	原生结构煤
演马	5	3.553	62.0	31.9	93.9	4.5	0.2	0.6	0.8	6.1	糜棱煤
	6	3.401	45.2	40.7	85.9	12.9	0.2	0.8	0.2	14.1	原生结构煤
中马	7	3.569	57.8	33.0	90.8	8.8	0.2	/	0.2	9.2	糜棱煤
	8	3.627	57.0	33.3	90.3	8.3	0.2	1.0	0.2	9.7	原生结构煤
韩王	9	3.742	41.2	47.5	88.7	9.7	0.2	1.0	0.4	11.3	糜棱煤
	10	3.658	42.1	48.1	90.2	6.3	0.4	2.9	0.2	9.8	原生结构煤
冯营	11	3.511	60.9	34.1	95.0	3.8	0.6	0.4	0.2	5.0	糜棱煤
	12	3.498	49.0	36.3	85.3	10.5	1.0	3.2	/	14.7	原生结构煤
方庄	13	3.562	58.8	32.9	91.7	5.8	0.2	2.3	/	8.3	原生结构煤
白庄	14	3.550	37.0	51.2	88.2	9.7	0.2	1.7	0.2	11.8	原生结构煤
朱村	15	3.980	32.0	53.3	85.3	11.4	0.4	2.5	0.4	14.7	糜棱煤
	16	3.810	59.0	32.9	91.9	6.2	0.3	1.4	0.2	8.1	原生结构煤
小马	17	3.890	52.1	31.6	83.7	13.0	0.6	2.5	0.2	16.3	原生结构煤

注: Ca. 碳酸盐类; Cl. 粘土类; P. 硫化铁类; Si. 氧化硅类。

院进行,所用仪器为美国 Micromeritics Instrument 公司的 9310 型微孔结构分析仪. 仪器工作压力为 0.0035~206.8430 MPa, 分辨率为 0.1 mm³, 测定下孔径限值为 7.2 nm. 每个样品用量大约 3 g 左右, 粒度为 0.25~0.5 mm. 整个测试过程由计算机控制量, 并根据 B. B. XOJOT 的十进制方案对不同孔径段的孔容和孔比表面积进行了计算. 需要说明的是, 尽管糜棱煤的粒度选取符合仪器要求, 但由于该粒级的颗粒之间并不是物理意义上的整块, 只是压实作用下无数微小颗粒的集合体, 颗粒间可能存在很多较大尺度的裂隙. 因此, 在孔隙结构参数计算中, 将孔径 10 000 nm 作为计算上限.

等温吸附实验在中国石油勘探院廊坊分院进行, 所用仪器为美国 Terra Tek 公司生产的 IS-100 等温吸附仪. 吸附质为纯度 99.99% 的甲烷气体, 实验温度为 30 °C (为了研究温度对原生结构煤和糜棱煤吸附性的影响, 对古汉山井田的一组煤样在 40 °C 和 50 °C 下进行了等温吸附实验), 最高实验压力为 15 MPa, 吸附的最大平衡压力一般在 10~13 MPa 左右, 每次实验压力点数为 6 个. 每件样品用量在 100 g 左右 (干燥条件下的重量). 所有样品测试前, 都对样品缸进行了死体积的校正.

3 实验结果

3.1 孔隙结构参数

煤样的孔隙结构参数主要指孔比表面积、孔容

及孔径等参数. 前人对煤的孔径结构划分提出了诸多方案, 其中在国内煤炭工业界应用最为广泛的是 B. B. XOJOT 的十进制方案 (霍多特, 1966), 煤样孔隙结构参数测试结果见表 2.

3.2 吸附性

煤的吸附性参数测试结果见表 3. 不同温度下不同煤体破坏类型的煤样等温吸附曲线见图 1.

总体上, 糜棱煤样的 Langmuir 体积参数 (V_L) 和压力参数 (P_L) 大于原生结构煤样, 这种对比关系并不因温度变化而改变. 其中, 温度 30 °C 下, 糜棱煤样的 V_L 为 31.98~45.97 m³/t, 平均 38.5 m³/t. P_L 为 2.37~3.98 MPa, 平均 3.63 MPa; 原生结构煤样的 V_L 为 33.83~42.85 m³/t, 平均 36.9 m³/t. P_L 为 2.71~3.55 MPa, 平均 3.63 MPa. 就各井田可对比的两类煤样而言, 除了中马、朱村井田外, 其他井田的糜棱煤样的 V_L 、 P_L 均大于原生结构煤样. 由此说明, 糜棱煤样容纳气体的能力要大于原生结构煤, 且在同等降压条件下, 比原生结构煤更容易解吸.

4 不同煤体结构煤的吸附性差异的控制机理

煤吸附甲烷的能力相差甚大, 国内外研究表明, 吸附性的高低不仅取决于煤的岩石学组成、物理化学结构、煤级、气体组成、水分含量等煤自身因素, 另外储层温度、压力也对煤层气的吸附性有较大的影

表 2 煤样孔隙结构参数测试结果

Table 2 Measured data of pore structure parameters of different coal samples

编号	孔容 (10 ⁻⁴ cm ³ /g)				孔比表面积 (m ² /g)					
	V_1	V_2	V_3	V_4	V_L	S_1	S_2	S_3	S_4	S_t
1	67	108	192	83	450	0.008 9	0.186 3	3.324 4	3.917 9	7.438 0
2	4	8	120	79	211	0.000 3	0.020 2	2.605 4	3.689 0	6.315 4
3	100	121	199	93	513	0.018 3	0.169 2	3.578 6	4.357 1	8.123 9
4	9	4	119	83	215	0.000 8	0.002 7	2.473 5	3.844 6	6.321 8
5	50	102	202	99	453	0.008 3	0.176 0	3.494 8	4.558 1	8.237 5
6	0	7	127	83	217	0.000 0	0.013 6	2.634 6	3.877 7	6.526 2
7	41	83	206	105	435	0.007 6	0.132 3	3.665 5	4.850 4	8.656 2
8	3	12	134	84	233	0.000 5	0.020 1	2.730 7	3.887 3	6.638 7
9	31	25	135	82	273	0.005 5	0.046 1	2.727 8	3.777 4	6.557 2
10	6	10	147	87	250	0.001 2	0.018 9	3.166 2	4.084 1	7.270 7
11	94	145	187	108	534	0.015 5	0.206 3	3.387 2	5.077 2	8.687 2
12	4	11	96	97	208	0.000 9	0.017 7	2.490 4	4.525 3	7.035 0
15	45	49	124	83	301	0.007 5	0.086 7	2.595 6	3.904 8	6.594 9
16	21	20	120	79	240	0.003 0	0.027 2	2.478 3	3.709 0	6.217 7

V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 和 V_L 分别表示孔径在 10 000~1 000 nm、1 000~100 nm、100~10 nm、10~7.2 nm 的大孔、中孔、过渡孔、微孔的孔容以及总孔容; S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 和 S_t 为与孔容相对应的孔径段的比表面积; 编号煤体结构类型同表 1.

表 3 煤样吸附性实验测试结果

Table 3 Adsorption experiment results of the different coal samples

编号	温度(°C)	水分(%)	灰分(%)	V_L (m ³ /t)	$V_{L,dif}$ (m ³ /t)	P_L (MPa)
1	30	4.82	7.98	45.97	52.71	3.98
	40			42.54	48.79	4.48
	50			40.43	46.37	4.96
2	30	3.28	14.20	35.40	42.89	2.94
	40			33.13	40.15	3.47
	50			30.98	37.54	3.63
3		4.39	10.64	42.45	49.96	3.81
4		2.60	9.41	37.23	42.31	2.71
5		4.04	10.54	39.58	42.84	3.67
6		2.78	20.14	34.50	44.76	2.78
7		4.40	15.70	33.23	41.59	2.37
8		3.56	10.39	42.85	49.80	3.55
9		3.48	10.52	41.88	48.70	3.71
10	30	4.79	9.56	35.99	42.03	2.97
11		3.42	17.92	33.21	43.53	3.93
12		3.70	13.88	32.83	41.05	3.46
13		3.08	9.16	41.34	47.10	3.37
14		3.06	7.44	37.90	42.35	3.00
15		4.55	15.23	31.98	39.86	3.92
16		4.40	10.46	34.48	40.50	2.89
17		4.28	20.40	34.98	46.45	2.72

编号煤体结构类型同表 1.

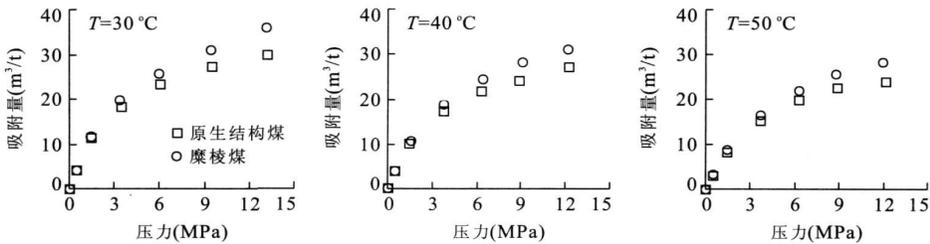


图 1 不同温度下古汉山井田两类煤的等温吸附曲线

Fig. 1 Isotherm adsorption curves of two kinds of coals of Guhanshan coalfield under different temperatures

响(Joubert *et al.*, 1973; 钟玲文和张新民, 1990; Laxminarayana and Crosdale, 1999; Krooss *et al.*, 2002; 钟玲文等, 2002). 本次研究从以下几个方面探讨不同煤体破坏类型的煤的吸附性的控制机理.

4.1 温度、压力

煤对气体的吸附过程属于吸附、解吸动态平衡过程. 吸附化学研究表明, 多孔介质对气体的吸附属于放热过程, 解吸属于吸热过程(郭立稳等, 2000). 因此, 温度的增加, 必然会降低煤样的吸附性, 增大解吸能力. 同时, 在气体压力梯度作用下, 气体向煤的孔隙中发生运移, 吸附速度与压力成正向关系. 因此, 在未达到最大吸附量之前, 压力增大, 吸附速度大于解吸速度, 直至达到吸附饱和.

根据古汉山井田两类煤样的不同温度下的等温

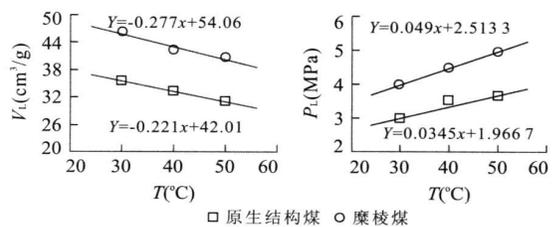


图 2 不同温度下两类煤的吸附参数变化

Fig. 2 Langmuir adsorption parameter changes of two kinds of coals under different temperatures

吸附实验结果(表 3 和图 1), 可以看出:

- (1) 随着温度增加, 无论是原生结构煤还是糜棱煤, 饱和吸附量和等压条件下的吸附量均呈现下降的趋势, 而压力参数呈现增大的趋势(图 1 和图 2),

说明了温度的增加,无论是原生结构煤还是糜棱煤,吸附能力均减小,解吸难度降低。相比而言,随温度的增加,糜棱煤的 V_L 下降趋势要略大于原生结构煤,而 P_L 增加趋势要大于原生结构煤(图 2),表明温度变化对糜棱煤的影响程度更大。

(2)两类煤的等温吸附曲线偏离程度显示:低压下,等温吸附曲线基本重合;高压下,吸附曲线明显分离。暗示着随着压力的增加,两类煤吸附量差异有增大的趋势。进一步研究发现,随着温度增加,两类煤吸附曲线在高压下的偏离程度有减缓的趋势(图 1)。反映了随着温度的增加,温度对两类煤体的吸附影响有弱化的趋势。

钱凯等(1996)认为,在理论上,最大饱和吸附量 V_L 不受温度的影响,在任何温度条件下,极限吸附量都相同。研究认为,等温吸附实验所得 V_L ,只是通过 Langmuir 等温吸附方程推测得到饱和吸附量值,并不代表煤样实际能容纳气体的最大值。Levy *et al.* (1997)研究表明,在 5 MPa 时,温度每升高 1 °C,甲烷的吸附量下降 0.12 cm³/g。

本次研究根据不同温度条件下获得的 Langmuir 体积和 Langmuir 压力,分别计算了不同压力下的吸附量,发现同一样品在相同压力条件下,温度与吸附量也呈现类似于如图 2 的温度与 V_L 的线性负相关,线性公式中的斜率(吸附量差/温度差)呈现规律性的变化。压力越高,斜率的绝对值越大,并随压力的增大趋于定值。暗示随着压力的增加,吸附量随温度增加的下降趋势增大,但增大到一定程度将不会继续增大。相比而言,糜棱煤等压条件下的吸附量随温度增加的减少幅度大于原生结构煤,并在高压下两者的减少幅度趋于一定(图 3)。说明相同温

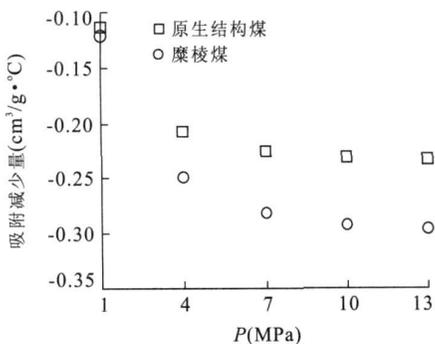


图 3 温度增加 1 °C 后两类煤的吸附减少量与压力的关系

Fig. 3 Relation between the absorption decrement of two kinds of coals under per unit temperature rise and pressure

度变化范围内,随着温度的增大,糜棱煤吸附量下降的趋势要大于原生结构煤,并且在高压下,两者的变化趋势不变。图 3 进一步反映了温度变化对糜棱煤的影响程度要大于原生结构煤。

4.2 煤级、显微组分

传统理论认为,随煤级的增高, V_L 分别在 $R_{o,max}$ 1.3% 和 $R_{o,max}$ 3.5% 附近达到极小值和极大值,具有“三段式”的演化模式,至无烟煤中一晚阶段吸附性消失。但该模式是以干燥煤样或煤中不含水分为基础的,不符合地层条件下煤储层含水甚至被水饱和的实际(秦勇, 2003)。为此,有研究者进一步对煤在平衡水条件下的吸附及演化规律进行系统研究,发现 V_L 仅在 $R_{o,max}$ 为 4.5% 附近达到最大值,实际呈现为“两段式”演化模式(张群和杨锡禄, 1999; 傅雪海等, 2002)。

钟玲文和张新民(1990)基于干燥煤样,研究了显微组分对煤吸附能力的影响关系为:在瘦煤之前,惰质组 II (指有胞腔结构无充填物的丝质体) > 镜质组 > 惰质组 (粗粒体和有胞腔结构但被充填的丝质体),原因是在变质较低的煤中惰质组中有大量的纹孔,而镜质组孔隙和内表面积纹孔少,造成惰质组 II 比镜质组吸附能力强;在无烟煤 3 号变质阶段,煤的吸附能力是:镜质组 > 惰质组,原因是在高变质阶段,镜质组中有更多的挥发物质产出,引起微孔增多之故。

本次研究所用煤样均属于无烟煤 3 号。对实验所有煤样而言,煤级与吸附量并没有明显的正相关关系。但就同一井田两类煤的吸附量与煤级的对比关系表现为,构造煤的煤级总体要高于原生结构煤,一定程度上反映了煤级对两类煤体吸附性差异的控制作用。

除韩王、朱村井田外,其他井田的糜棱煤中镜质组含量要大于原生结构煤,而惰质组含量均小于原生结构煤;除了朱村井田外,原生结构煤要大于糜棱煤(表 1)。对于所有煤样,显微组分与吸附性能之间的关系如图 4 所示。

由图 4 可以看出,煤的 V_L 基本与镜质组呈正相关趋势,而与惰质组呈负相关趋势,这一结果与钟玲文和张新民(1990)对无烟煤阶段显微组分的研究结果相似。也就是说,尽管煤体结构不同,对无烟煤来说,镜质组含量越高,煤的吸附性越强,显微组分对吸附性的影响规律并不因煤体结构不同而有差异。进一步研究发现,朱村井田由于糜棱煤中惰质组含量(53.3%)远大于原生结构煤(32.9%),镜质组含量(59.0%)则小于原生结构煤(32.0%),这也可

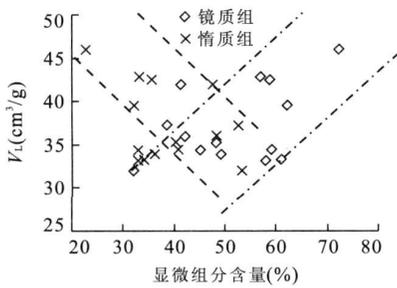
图4 显微组分含量与 Langmuir 体积参数(V_L)的关系

Fig. 4 Relation between maceral composition and Langmuir volume parameter

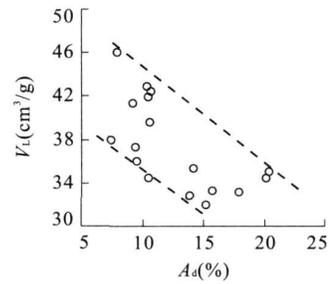
图5 灰分含量(A_d)与 Langmuir 体积参数(V_L)的关系

Fig. 5 Relation between ash content and Langmuir volume parameter

能是该井田的糜棱煤样吸附性小于原生结构煤的主要原因。

4.3 孔隙结构对吸附性的影响

孔隙是煤中气体储存的主要场所, 孔径大小及分布均匀程度不仅对气体的运移、扩散方式具有重要影响, 还对气体在孔隙中吸附的先后有一定的影响。其中, 微孔对煤的吸附性影响最大。煤吸附气体过程中, 在孔径大小允许气体分子通过的前提下, 孔径越小, 孔隙内表面能迭加后的表面势能也越大, 对气体吸附能力也就越大。因此, 研究认为气体分子在多孔介质运移过程中, 优先吸附在微孔, 其后随着流体压力的增大, 气体分子在较大孔隙中吸附。

根据表 2 可知, 糜棱煤不同孔径段的孔容均大于原生结构煤, 尤以大中孔和过渡孔明显, 而微孔含量略大于或与原生结构煤相当。这也是糜棱煤饱和吸附量大于原生结构煤的主要原因。同时, 由于两类煤微孔含量相当。因此, 两者的吸附曲线在低压下基本重合。随着压力的增加, 气体分子在较大孔隙内吸附, 由于糜棱煤的中孔、过渡孔远大于原生结构煤, 使得高压下其吸附量显著大于原生结构煤。一般认为, 等温条件下, 煤的吸附和解吸是可逆的, 在较大孔隙中保存的气体, 在压力降低条件下, 其气体更容易脱出表面势能的控制, 发生解吸。由此导致糜棱煤样的解吸能力大于原生结构煤样, 表现为前者的 P_L 大于后者。

4.4 灰分对吸附性的影响

灰分是煤完全燃烧后剩下的残渣, 几乎全部来自于矿物质。一般来说, 灰分含量与矿物质含量成正比关系。灰分对煤吸附性的影响机理主要在于: 一是矿物质自身对甲烷的吸附能力很微弱或不吸附; 二是矿物质充填在孔、裂隙内, 占据了甲烷的吸附点位(傅雪海和秦勇, 2003)。两方面的综合作用, 不仅降低了煤中有机质吸附甲烷的能力, 而且使得扣除水

分、灰分后糜棱煤的可燃基吸附量仍小于原生结构煤。鉴于此, 在评价灰分对两类煤吸附量的影响机理时, 不仅要考虑灰分大小的影响, 同时还要考虑灰分对吸附点位的占有状态。

本次研究表明, 对于所有煤样, 随着灰分含量的增加, 吸附量有减小的趋势(图 5)。这也许是中马、朱村两个井田的糜棱煤样吸附能力小于原生结构煤的主要原因。但就所有可对比井田煤样而言, 两类煤的灰分含量对比与吸附性对比并没有体现灰分含量大, 吸附性就大的关系。由此说明, 灰分对煤吸附性的影响具有普适性, 但不是同一井田、相邻位置的不同破坏类型煤吸附性差异的决定性因素。

5 结论

(1) 煤体发生破坏后, 煤样的吸附能力增大, 气体解吸更为容易。其主要原因在于煤体破坏后不同孔径段的孔隙数量均有增大, 使得煤样容纳气体的能力增大, 同时由于中大孔含量的急剧增大, 造成了煤样降压过程中, 更容易发生解吸。

(2) 温度增加, 原生结构煤和糜棱煤的吸附能力均下降, 解吸能力增加。相比于原生结构煤, 温度对构造煤的影响更大。主要体现在随着温度增加, 糜棱煤的吸附量下降趋势和 P_L 增大趋势比原生结构煤更为明显。

(3) 煤体破坏后的煤级增高、镜质组含量增大和惰质组含量减小也对吸附能力增大具有重要作用, 而灰分含量不是决定两类煤吸附性差异的主要因素。

References

- Fu, X. H., Qin, Y., 2003. Theories and techniques of permeability prediction of multiphase medium coalbed methane reservoir. China University of Mining and Technology Press.

- Xuzhou (in Chinese).
- Fu, X. H., Qin, Y., Li, G. Z., et al., 2002. Adsorption experiment of extra-high rank coal under the condition of equilibrium moisture content. *Petroleum Geology & Experiment*, 24(2): 177—180 (in Chinese with English abstract).
- Guo, L. W., Yu, Q. X., Wang, K., 2000. Experimental study on change in coal temperature during adsorbing gas. *Journal of China University of Mining and Technology*, 29(3): 287—289 (in Chinese with English abstract).
- Huoduote, B. B., 1966. Coal and gas outburst. Translated by Song, S. Z., Wang, Y. A.. China Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Jiang, B., Qin, Y., 1998. Evolution mechanism of structures of deformed coals and its geological significance. China University of Mining and Technology Press Xuzhou (in Chinese).
- Joubert, J. L., Grein, C. T., Bienstock, D., 1973. Sorption of methane in moist coal. *Fuel*, 52(3): 181—185.
- Krooss, B. M., Bergen, F. V., Gensterblum, Y., et al., 2002. High pressure methane and carbon dioxide adsorption on dry and moisture-equilibrated Pennsylvanian Coals. *International Journal of Coal Geology*, 51(2): 69—92.
- Laxminarayana, C., Crosdale, P. J., 1999. Role of coal type and rank on methane sorption characteristics of Bowen basin, Australia coals. *International Journal of Coal Geology*, 40(4): 309—325.
- Levy, J. H., Day, S. J., Killingley, J. S., 1997. Methane capacities of Bowen basin coals related to coal properties. *Fuel*, 76(9): 813—819.
- Qian, K., Zhao, Q. B., Wang, Z. C., et al., 1996. The exploration and production theories and experimental testing and techniques of coalbed methane. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Qin, Y., 2003. Advances and reviews on research of coalbed gas geology in China. *Geological Journal of China Universities*, 9(3): 339—358 (in Chinese with English abstract).
- Yang, L. W., Sun, M. Y., 2001. Peculiarities of China CBM reservoirs and their dictation on CBM production technology. *Natural Gas Industry*, 21(6): 17—19 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, C. F., 1985. Tectonic coal and coal and gas outburst. *Gas Geology*, (Started): 45—52 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Yang, X. L., 1999. Isothermal adsorption of coals on methane under equilibrium moisture. *Journal of China Coal Society*, 24(6): 566—570 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, L. W., Zhang, X. M., 1990. The relation of adsorption capability of coal and coal metamorphose degree and coal macera. *Coal Geology and Exploration*, 18(4): 29—35 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, L. W., Zheng, Y. Z., Yuan, Z. R., et al., 2002. The adsorption capability of coal under integrated influence of temperature and pressure and predicted of content quantity of coalbed gas. *Journal of China Coal Society*, 27(6): 581—585 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 傅雪海, 秦勇, 2003. 多相介质煤层气储层渗透率预测理论与方法. 徐州: 中国矿业大学出版社.
- 傅雪海, 秦勇, 李贵中, 等, 2002. 特高煤级煤平衡水条件下的吸附实验. *石油实验地质*, 24(2): 177—180.
- 郭立稳, 俞启香, 王凯, 2000. 煤吸附瓦斯过程温度变化的试验研究. *中国矿业大学学报*, 29(3): 287—289.
- 霍多特, B. B., 1966. 煤与瓦斯突出. 宋士钊, 王佑安译. 北京: 中国工业出版社.
- 姜波, 秦勇, 1998. 变形煤的结构演化机理及其地质意义. 徐州: 中国矿业大学出版社.
- 钱凯, 赵庆波, 汪泽成, 等, 1996. 煤层甲烷气勘探开发理论与实验测试技术. 北京: 石油工业出版社.
- 秦勇, 2003. 中国煤层气地质研究进展与述评. *高校地质学报*, 9(3): 339—358.
- 杨陆武, 孙茂远, 2001. 中国煤层气藏的特殊性及其开发技术要求. *天然气工业*, 21(6): 17—19.
- 袁崇孚, 1985. 构造煤和煤与瓦斯突出. *瓦斯地质*, (创刊号): 45—52.
- 张群, 杨锡禄, 1999. 平衡水条件下煤对甲烷的等温吸附特性研究. *煤炭学报*, 24(6): 566—570.
- 钟玲文, 张新民, 1990. 煤的吸附能力与其煤化程度和煤岩组成间的关系. *煤田地质与勘探*, 18(4): 29—35.
- 钟玲文, 郑玉柱, 员争荣, 等, 2002. 煤在温度和压力综合影响下的吸附性能及气含量预测. *煤炭学报*, 27(6): 581—585.