

鄂尔多斯盆地东缘煤储层微孔隙结构特征及其影响因素

张松航, 汤达祯, 唐书恒, 许浩, 林文姬, 张彪

中国地质大学(北京)能源学院, 北京, 100083

内容提要:在对鄂尔多斯盆地东缘58套采自不同层位不同地域煤样显微组分测试和低温液氮比表面测试的基础上,从比表面积、吸附曲线形态、阶段孔径结构分布、阶段孔径比表面积贡献、FHH分形特征几个方面刻画了煤储层微孔隙特征。同时,就“孔比表面积—孔隙结构—煤物质组成与化学结构”这一因果链,分析了鄂尔多斯盆地东缘煤微孔隙特征与煤变质程度、煤岩显微组分以及矿物组分与类型的关系。研究发现, R_0 在0.60%~1.91%范围内,比表面积及FHH分形分维数先明显降低, R_0 至1.3%后又略有回升,同时吸附回线“滞后环”及分形尺度对应的压力范围明显减小,孔径3~4 nm“墨水瓶”型孔明显减少乃至消失,并成为比表面积减少的主要贡献者。在相似煤级条件下,惰质组分较镜质组分有更多的比表面积贡献。粘土矿物组分含量>10%时,孔径3~4 nm“墨水瓶”型孔对比表面贡献明显,且随煤级增高影响作用相对加大。

关键词:鄂尔多斯;煤储层;微孔隙结构;影响因素

对于煤层气储层而言,煤是一种多孔介质,其孔隙大小及成因多种多样。国内外许多学者分别就空间尺度(霍多特,1966;Gan et al.,1972;傅雪海等,2005)、成因类型(Gan et al.,1972;张慧,2001;郝奇,1987)、固气作用类型(桑树勋等,2005)以及形态(陈萍等,2001)对其进行了分类。目前国内应用较多的是霍多特(1966)的孔径结构分类:大孔($\Phi > 1000$, Φ 为孔隙直径,单位:nm)、中孔($100 < \Phi < 1000$)、小孔($10 < \Phi < 100$)、微孔($\Phi < 10$)。本文所谓的微孔隙是指煤储层中<100 nm的孔隙,即霍多特分类中的小孔和微孔,同时从孔隙成因上看主要为链间孔、分子间孔以及有机大分子缺陷,从孔隙功能上看主要发生气体的吸附、毛细管凝聚及物理扩散作用。对微孔隙的研究可以通过扫描电镜、核磁共振以及吸附等方法,其中技术比较成熟,描述孔隙特性比较全面准确,应用也比较多的当属低温液氮吸附法。陈萍等(2001)通过研究低温氮吸附回线探讨了煤岩孔隙形态,胡宝林(2003)、傅雪海等(2005)分别通过液氮比表面数据分析了煤纳米孔隙的BET分形特征。但煤孔隙低温氮吸附曲线随煤级的变化,以及煤岩显微成分、煤中矿物对吸附曲线形

态(孔径结构)和FHH分形特征的影响,也即“孔比表面积—孔隙结构—煤物质组成与化学结构”这一因果链前人尚未探讨。本文拟通过对鄂尔多斯东缘58套煤岩样品的显微组分、低温氮吸附实验研究对以上问题进行讨论。

1 实验方法

1.1 样品的取得

研究过程中,58组煤储层岩样均采自鄂尔多斯盆地东缘河曲、保德、柳林、韩城、蒲城、澄合等矿区14个矿点煤矿井下新鲜工作面现场(图1)。根据宏观煤岩类型,分层采样。为了尽可能反映煤储层的孔隙及比表面特征的实际情况,采样过程中,充分考虑了煤层的形成时代、变质程度及煤岩类型,并尽量在盆地均匀布置采样点(表1)。

1.2 实验方法

镜质组反射率测定、煤岩显微组分定量统计采用德国Leitz MPV-3显微光度计,油浸50倍物镜,测得随机反射率 R_0 (%);油浸32倍物镜,点距,行距 0.5×0.5 mm,测点数大于500有效点,统计煤岩显微组分含量。

注:本文为国家重点基础研究发展规划“973”项目(编号2002CB11702)资助成果。

收稿日期:2008-05-07;改回日期:2008-08-26;责任编辑:周健。

作者简介:张松航,中国地质大学(北京)能源学院矿产普查与勘探专业博士研究生,从事煤层气地质与勘探研究。Email:zshangdream@126.com。

表 1 鄂尔多斯盆地东缘煤储层低温氮比表面和煤岩分析试验数据

Table 1 The specific area and petrology analysis data of coal samples in eastern margin of Ordos Basin

样号	采样地点	煤层号	层组	镜质组 (%)	惰质组 (%)	矿物 (%)	BET 比表面 (m ² /g)	BJH 总孔体积 (mL/g)	平均孔直径 (nm)	镜质组反射率 (%)		
XYK2-1	韩城下峪口矿	2	山西组	61.6	38.0	0.4	0.183	0.00106	10.060	1.76		
XYK2-2				69.6	30.4	0	0.462	0.00233	9.551	1.80		
XYK2-3				73.8	24.1	2.1	0.738	0.00357	9.590	1.83		
XYK3-1		3		75.0	24.5	0.5	0.605	0.00265	9.597	1.78		
XYK3-2				75.1	23.8	1.1	0.303	0.00127	9.482	1.74		
XYK3-3				74.2	20.9	4.9	0.193	0.00120	11.130	1.78		
XYK3-4				18.8	72.8	8.4	0.608	0.00283	9.481	1.84		
SSP11-1	韩城桑树坪矿	11	太原组	80.8	13.5	5.7	0.162	0.00108	10.180	1.77		
SSP11-2				13.9	48.7	37.4	1.305	0.00198	4.867	1.79		
SSP11-3				86.7	10.4	2.9	0.285	0.00103	8.537	1.77		
SSP11-4				41.0	53.8	5.2	0.350	0.00166	9.363	1.83		
SSP11-5				69.3	30.0	0.7	0.655	0.00366	10.680	1.83		
XSH3-1	韩城象山矿	3	山西组	77.3	21.1	1.6	0.200	0.00080	7.636	1.81		
XSH3-2				77.1	22.0	0.9	0.256	0.00125	10.250	1.90		
XSH3-3				16.3	80.2	3.5	1.706	0.00416	6.631	1.90		
XSH3-4				61.5	35.5	3.0	0.384	0.00105	6.521	1.88		
WC5-1	澄合王村矿	5	山西组	73.8	18.7	7.5	0.557	0.00194	8.035	1.76		
QJH5-1				69.2	30.0	0.8	0.400	0.00241	11.630	1.57		
QJH5-2				28.3	69.4	2.3	1.550	0.00712	10.100	1.60		
QJH5-3				68.4	30.8	0.8	0.305	0.00160	10.920	1.60		
QJH5-4	蒲城金宇矿	5	山西组	65.1	33.7	1.2	0.863	0.00314	8.619	1.86		
JY5-1				64.4	32.9	2.7	0.656	0.00249	7.895	1.55		
JY5-2				38.4	60.6	1.0	0.729	0.00175	6.429	1.55		
JY5-3				77.5	21.4	1.1	0.392	0.00196	9.689	1.57		
JY5-4	58.5	30.2	11.3	1.161	0.00498	9.381	1.56					
XW2	柳林兴无矿	4	山西组	3.9	79.7	16.4	6.896	0.01050	4.896	1.43		
XW3				95.0	4.6	0.4	0.103	0.00080	11.210	1.40		
XW4				81.3	15.4	3.3	0.237	0.00137	10.740	1.42		
XW5				76.7	21.9	1.4	0.281	0.00155	9.956	1.41		
L-8-1	柳林龙门塔	8	太原组	83.5	10.1	6.4	0.379	0.00194	9.546	1.49		
L-8-2				84.4	14.9	0.7	0.199	0.00132	9.990	1.46		
L-8-4				80.6	17.1	2.3	0.119	0.00072	10.910	1.50		
L-8-6				80.7	11.8	7.5	0.170	0.00081	9.435	1.50		
L-9-1				82.1	17.8	0.1	0.413	0.00143	8.383	1.48		
L-9-2				73.8	9.8	16.4	20.480	0.01730	3.619	1.51		
L-9-3				87.1	11.4	1.5	0.213	0.00085	8.614	1.49		
L-9-4		7.0		86.8	6.2	0.285	0.00115	9.610	1.57			
L-9-5		82.3		13.6	4.1	0.180	0.00095	8.386	1.51			
L-9-6		76.0		22.8	1.2	0.092	0.00057	7.418	1.53			
L-9-7		90.5		8.1	1.4	0.122	0.00066	8.683	1.57			
BDXX-2		保德细线矿		8	山西组	77.7	9.6	4.3	0.913	0.00373	10.850	0.72
BDXX-3						72.2	15.9	0.1	3.276	0.00947	9.507	0.71
BDXX-4						80.7	6.1	0.7	0.619	0.00213	9.121	0.74
BDWJY-1	保德王家焉矿	13	太原组	66.7	24.4	0	2.869	0.00969	9.518	0.79		
BDWJY-3				72.3	16.9	0.3	1.495	0.01300	8.827	0.65		
BDWJY-4				29.2	55.5	1.1	2.412	0.00867	9.747	0.75		
BDWJY-6				24.8	67.6	0.6	3.676	0.01470	9.379	0.72		
HQHSC-2	河曲火山村矿	8	山西组	86.5	5.6	4.2	4.572	0.01240	8.360	0.72		
HQHSC-4				74.9	17.3	1.0	4.141	0.01090	8.461	0.60		
HQHSC-5				22.4	52.8	15.5	9.115	0.02050	7.173	0.72		
FGDYG-2	府谷	2	山西组	86.5	5.6	4.2	1.369	0.00343	7.807	0.72		
FGWY-5	府谷	5	太原组	90.6	0.7	3.8	4.597	0.01010	6.776	0.74		

续表 1

样号	采样地点	煤层号	层组	镜质组 (%)	惰质组 (%)	矿物 (%)	BET 比表面 (m ² /g)	BJH 总孔体积 (mL/g)	平均孔直径 (nm)	镜质组反射率 (%)
HQLJT-1	河曲刘家塔矿	13	太原组	66.3	19.4	1.7	5.283	0.01580	9.204	0.62
HQLJT-2				60.9	22.2	0.2	6.453	0.01780	9.260	0.60
HQLJT-3				1.8	81.6	12.2	7.472	0.01160	5.465	0.76
HQLJT-4				53.0	37.5	0.4	5.450	0.01660	8.883	0.68
HQLJT-6				19.4	68.5	1.2	5.159	0.01680	9.106	0.74
HQLJT-7				9.2	79.2	0.4	4.617	0.01470	9.570	0.76

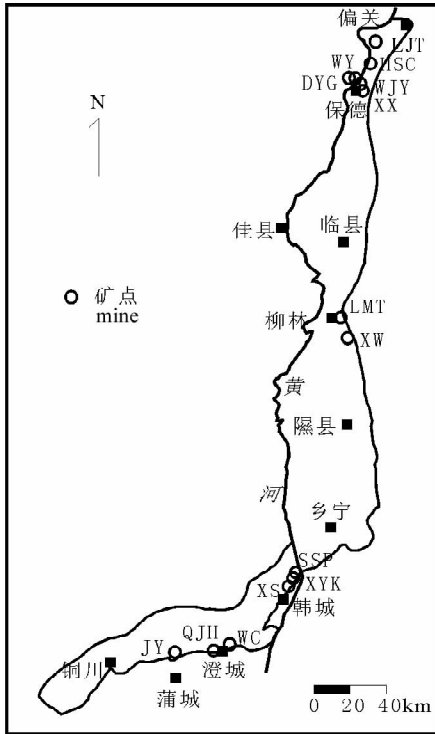


图 1 采样点分布图

Fig.1 The distribution of the samples

LJT—河曲刘家塔矿; HSC—河曲火山村矿; WY—府谷五一矿; DYG—府谷东云沟矿; WJY—保德王家焉矿; XX—保德细线矿; LMT—柳林龙门塔矿; XW—柳林兴无矿; SSP—韩城桑树坪矿; XYK—韩城下峪口矿; XS—韩城象山矿; WC—澄合王村矿; QJH—澄合权家河矿; JY—蒲城金宇矿
 LJT—Liujiata mine, Hequ; HSC—Huoshancun mine, Hequ; WY—Wuyi mine, Fugu; DYG—Dongyungou mine, Fugu; WJY—Wangjiayan mine, Baode; XX—Xixian mine, Baode; LMT—Longmenta mine, Liulin; XW—Xingwu mine, Liulin; SSP—Sangshuping mine, Hancheng; XYK—Xiayukou mine, Hancheng; XS—Xiangshan mine, Hancheng; WC—Wangcun mine, Chenghe; QJH—Quanjiahe mine, Chenghe; JY—Jinyu mine, Pucheng

等温线,按朗格缪尔方程计算出比表面积,再利用 BJH 法计算孔径分布。测试孔径在 1~100 nm 之间,采用 SY/6154-1995 标准。

通过低温氮吸附数据计算煤的微小孔的分形维数的方法,主要有分形 BET 模型 (Brunauer-Emmett-Teller Model)、分形的 FHH 模型 (Frenkel - Halsey - Hill Model) 和热力学模型等。本文采用应用较多的 FHH 模型,其计算方法主要基于方程(1):

$$\ln \frac{V}{V_0} = C + A \left[\ln \left(\ln \frac{P}{P_0} \right) \right] \quad (1)$$

式中 V 为平衡压力 P 下吸附的气体分子体积; V_0 为单分子层吸附气体的体积; P_0 为气体吸附的饱和蒸汽压; C 为常数; A 为系数,与分形维数 D 相关。 A 值即 $\ln V$ 和 $\ln \left(\ln \frac{P_0}{P} \right)$ 的双对数曲线的斜率。当范德华作用力对吸附起主要作用即忽略毛细管作用时, $D=3(1-A)$,而当吸附行为主要受毛细凝结作用所控制时, $D=3-A$ 。 Neimark(1990)、Pfeifer 等(1990)和 Jaroniec 等(1997)认为 FHH 理论适用于 cryptopores (1 至数十纳米)中的吸附、脱附过程。此时毛细凝结作用为吸附的主要机理,吸附时相对压力范围为 $0.7320 < p < 0.9826$,脱附时相对压力范围为 $p > 0.35$ 。

2 实验结果

本次实验结果见表 1。区内镜质组含量变化于 1.8%~95.0%之间,多数情况下不小于 60%,在同一煤层不同宏观煤岩类型中两种组分的含量通常在较大的数值区间变化。研究区北部保德、河曲、府谷,中部柳林,南部韩城、澄合、蒲县各矿煤样(为讨论方便下文分别称作北部、中部、南部煤样) R 值分别变化于 0.60%~0.79%, 1.40%~1.57%, 1.55%~1.90%。相应低温液氮比表面测试结果表现出明显的层域及地域特征。地域上北部样品比表面积总体比较高,除保德山西组 8# 煤层样品

煤储层比表面积及孔径分布利用低温氮吸附仪(美国 Micromeritics ASAP2000 型)测定,采用容量法在 77.4 K 以下氮(99.99%)为吸附介质,在相对压力 0.01~1 之间测定吸附等温线。根据得到的吸附

BDXX2、BDXX4 分别为 $0.913 \text{ m}^2/\text{g}$ 、 $0.619 \text{ m}^2/\text{g}$ 稍低外,其余各样介于 $1.369 \sim 9.115 \text{ m}^2/\text{g}$ 之间。中部煤样比表面积呈现明显的两极特征,总体上煤层的比表面积较小,其值变化于 $0.092 \sim 0.413 \text{ m}^2/\text{g}$ 之间,同时山西组 4# 煤层的 XW2 号样品,太原组 9# 煤层的 L-9-2 号样品又表现为异常高值,分别达到 $6.896 \text{ m}^2/\text{g}$ 和 $20.84 \text{ m}^2/\text{g}$ 。南部煤样比表面积整体上较北部低,而略高于中部柳林地区。层域上一般太原组较山西组煤层比表面积值高。煤层内一般接近煤层顶底板泥岩和夹矸的暗淡煤分层比光亮、半亮、半暗煤分层比表面积大,如南部暗淡分层比表面积一般大于 $1 \text{ m}^2/\text{g}$,而大部分光亮、半亮、半暗煤分层比表面积值介于 $0.183 \sim 0.863 \text{ m}^2/\text{g}$ 之间,中部柳林地区这种差异更为突出,北部煤样由于煤样比表面积总体较大,差异性表现相对较小。各样品 BJH 总孔体积差异性与比表面积差异性表现一致,平均孔直径差异性总体较小,基本与比表面积差异表现相反。

2.1 鄂尔多斯盆地东缘微孔隙结构特征

研究区各煤样的微孔隙结构同样表现出不同的地域层域特征。总体上东缘煤样液氮吸附曲线斜率先由大变小,然后又由小变大缓慢上升,压力接近 P_0 时变陡为典型的 II 类吸附曲线,说明煤中的孔是小至分子级大至无上限的较连续的孔隙系统。脱附曲线在相对压力 0.5 处出现拐点,将曲线分为两段,在相对压力 $0 \sim 0.5$ 段吸附曲线与脱附曲线基本重合,由吸附回线理论说明该压力段下对应的孔隙主要为两端封闭孔;在相对压力 $0.5 \sim 1.0$ 段,明显存在吸附回线“滞后环”或滞后环特征不明显。通过对比归纳低温氮吸附曲线、阶段孔径分布曲线、阶段比表面积贡献曲线特点,发现所采煤样孔隙结构分别在北、中、南各区表现一定相似性,同时接近泥岩顶底板和夹矸煤样的孔隙结构具备自身的特点,此区内煤样孔隙结构基本上可划分为 4 种基本类型(图 2),分别代表北部、南部、中部及接近泥岩顶底板和夹矸煤样的孔隙结构。

类型 I 以 HQLJT-2 号样品为北部煤孔隙结构特征的代表性样品。从图 2 中 I-a 可以看出类型 I 拐点明显,脱附曲线在相对压力 $0.5 \sim 1.0$ 段,明显存在吸附回线滞后环,表现出该压力段下对应的孔隙为多种孔隙的复合,包含“墨水瓶”型孔及部分开放性的连通孔(两端开口圆筒形孔、四边开放的平行板孔)。1~100 nm 各孔径段孔隙均有分布,小于 10 nm 的微孔较为发育且在 $3 \sim 4 \text{ nm}$ 存在峰值(图

2, I-b)。比表面积贡献以小于 10 nm 的微孔为主,3~4 nm 孔隙贡献较大(图 2, I-c)。

已知液氮的表面张力 $\gamma = 8.85 \times 10^{-5} \text{ N/m}$,摩尔体积 $V_m = 34.65 \times 10^{-4} \text{ m}^3$,温度 $T = 77.3 \text{ K}$,接触角 $\varphi = 0^\circ$, $R = 8.315 \text{ J/(K} \cdot \text{mol)}$,根据 Kelvin 方程,在相对压力 0.5 处,产生毛细凝聚的最大孔半径为 $r_k = -2\gamma V_m \cos\varphi / (RT \ln x) = -2 \times 8.85 \times 10^{-5} \times 34.65 \times 10^{-4} / (8.315 \times 77.3 \times \ln 0.50) = 1.38 \text{ nm}$,同时结合图 2 中 I-b 可以看出 $3 \sim 4 \text{ nm}$ 处存在孔隙分布峰值主要为大量瓶口孔径 2.76 nm ,瓶腹孔径 $3 \sim 4 \text{ nm}$ 的“墨水瓶”型孔。

类型 II 以 XYK2-2 为代表性样品,显示了南部样品的主要孔隙结构特征,吸附回线“滞后环”及孔隙阶段分布曲线在 $3 \sim 4 \text{ nm}$ 处存在一较小峰值,明显较类型 I 小(图 2, II-a, II-b),显示孔隙形态为开放性连通孔为主,部分墨水瓶孔和一端不透气孔。微孔隙分布呈双峰形态,一峰为 $3 \sim 4 \text{ nm}$ 的“墨水瓶”型孔,另一峰为大于 10 nm 的小孔。两峰孔隙比表面积贡献基本相当(图 2, II-c)。

类型 III 以 L-9-2 为代表性样品,反映中部样品的主要孔隙结构特征。吸附曲线在下降中有些样品出现负斜率,说明孔隙间的连通性较差,在压力作用下孔隙的连通造成相对压力降低而引起吸附量的波动;脱附曲线拐点不明显,小或微存在吸附回线“滞后环”,说明煤储层微孔隙系统主要为开放性透气孔,可能存在一端封闭的不透气孔(图 2, III-a)。主体煤层样品阶段孔径分布曲线上, <10 nm 的微孔含量甚微,比表面积主要来自于小孔,微孔有一定贡献。从直观上说明了研究区中部煤比表面积值总体较低的原因(图 2, III-b, III-c)。

类型 IV 在研究区全区均存在,主要发育在各煤层泥岩顶底板或夹矸附近煤分层。吸附线一直缓慢上升,脱附线平缓下降,在中等相对压力时急剧下降,孔隙形态主要为“墨水瓶”型孔(图 2, IV-a)。孔体积贡献在 $3 \sim 4 \text{ nm}$ 左右有一峰值,其他孔径值贡献较少,比表面贡献也基本集中在 $3 \sim 4 \text{ nm}$ 左右(图 2, IV-b, IV-c)。这类储层一般粘土矿物含量较高。

2.2 孔隙 FHH 分形特征

Mandelbrot(1983)提出的分形概念及其发展形成的分形几何学是描述这一复杂表面的有效手段,在物质结构非线性研究方面表现出特有的优势和潜力。本文通过吸附过程探讨各样的分形特征,根据式(1),以 $r^2 > 0.995$ 为界,拟合直线得到 A,计算分形维数 D,并读取压力范围。由于数据点较多,且

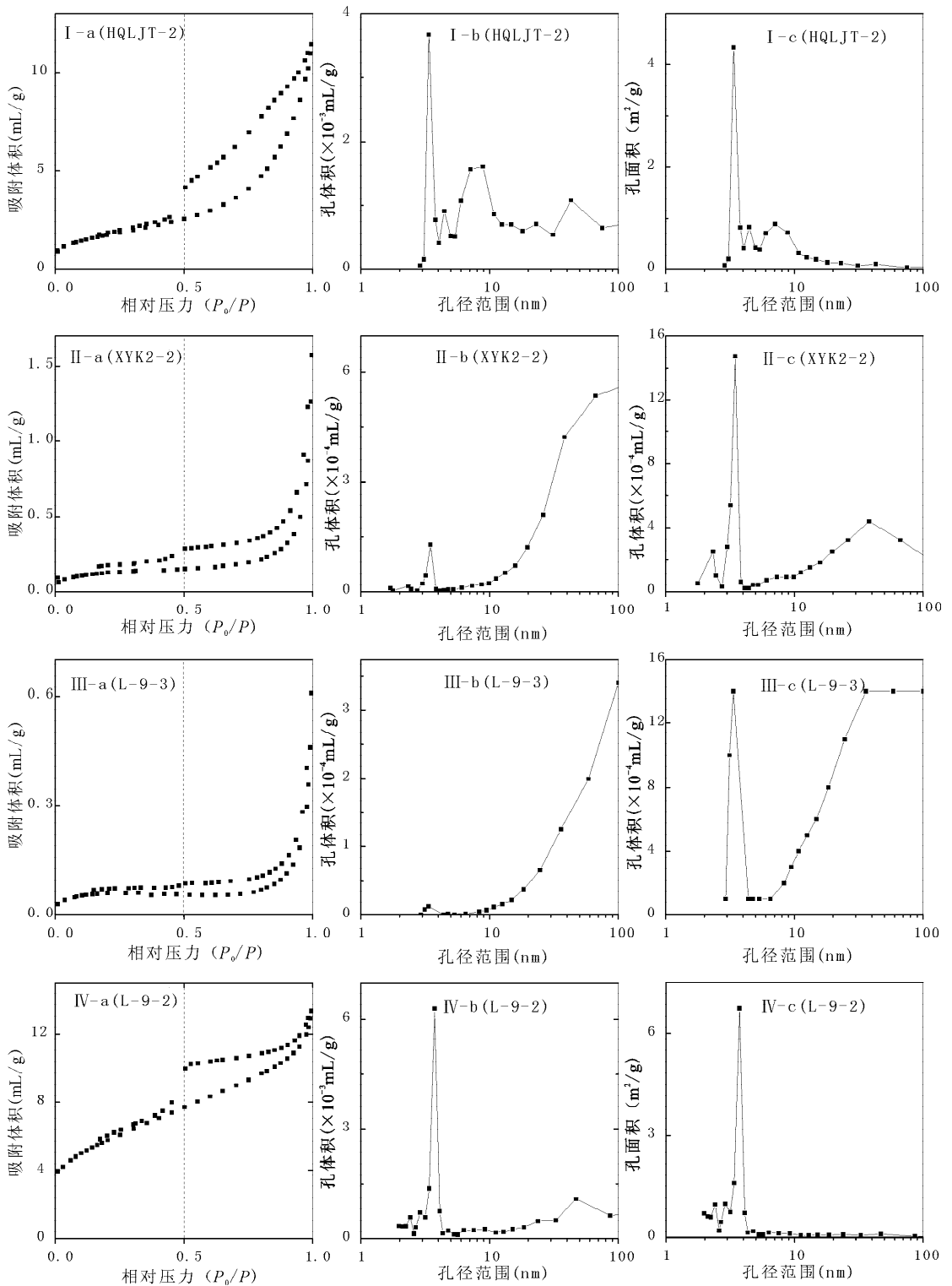


图 2 鄂尔多斯盆地东缘微孔隙结构类型图

Fig. 2 The structure types of micropore in eastern margin of Ordos Basin

a—低温氮吸附曲线; b—阶段孔容分布曲线; c—阶段比表面积贡献曲线

a—The nitrogen adsorption curve of low-temperature; b—the distribution curves of pore volume in different stages;

c—the distribution curves of BET specific area in different stages

北、中、南各区的吸附等温曲线有一定的相似性, 特选取小分层煤岩类型较齐全的河曲 13# 煤层、柳林

9# 煤层及韩城 3# 煤层计算分维数(表 2)。

分析河曲 13# 煤层、柳林 9# 煤层、韩城 3# 煤

层的分形特征,不难看出同样具有明显的地域特征。河曲9#煤层表面分形维数相对较大,达2.50~2.63,其对应的相对压力区间也较宽,为0.0600~0.9488。中部柳林9#煤层除个别小分层较大($D_{L-9-2}=2.91$)外,总体分形维数较小,为2.07~2.46,其相对压力区间较狭窄0.7701~0.9906,有两个小分层(L-9-5、L-9-6)比表面积较小,求得的分形维数小于2,不具备分形特征。南部韩城象山矿3#煤层分形维数2.34~2.61,相对压力区间较柳林地区稍宽。同时各煤层内部样品分形特征具有一个共同的特点,矿物含量较高的暗淡煤分层具有较高的分形维数。这种分形维数的分异作用,在北部河曲13#煤层、南部韩城3#煤层分异度较小,而在柳林地区分异度非常大。较高的比表面积对应较高的表面分形维数,这也恰好说明了分形维数越高,孔隙系统越复杂,比表面积越大。

表2 鄂尔多斯盆地东缘代表性煤层 FHH 分形特征计算结果表

Table 2 The FHH fractal character of typical coal beds in eastern margin of Ordos Basin

地区	样号	A	r ²	D=3-A	相对压力范围	
北部 河曲 13#	HQLJT-1	0.47	0.9992	2.53	0.0600	0.9488
	HQLJT-2	0.50	0.9987	2.50	0.0702	0.9255
	HQLJT-3	0.37	0.9983	2.63	0.0817	0.8999
	HQLJT-4	0.47	0.9989	2.53	0.0692	0.9243
	HQLJT-6	0.45	0.9990	2.55	0.0813	0.9498
	HQLJT-7	0.47	0.9998	2.53	0.0842	0.9271
	中部 柳林 9#	L-9-1	0.54	0.9995	2.46	0.7511
L-9-2		0.10	0.9961	2.91	0.8015	0.9836
L-9-3		0.64	0.9995	2.36	0.7713	0.9829
L-9-4		0.53	0.9982	2.47	0.7530	0.9906
L-9-5		1.50	0.9269	1.50	-	-
L-9-6		1.67	0.9691	1.33	-	-
L-9-7		0.93	0.9930	2.07	0.7701	0.9829
南部 韩城 3#	XSH3-1	0.52	0.9974	2.48	0.7226	0.9961
	XSH3-2	0.66	0.9977	2.34	0.6695	0.9281
	XSH3-3	0.39	0.9958	2.61	0.3540	0.9943
	XSH3-4	0.64	0.9968	2.36	0.7222	0.9816

3 鄂尔多斯盆地东缘微孔隙特征影响因素

3.1 煤变质程度

一般认为,煤对气体的吸附能力随着煤级的增高而增大(张新民等,2002),与此同时随煤岩成分、煤储层孔隙度、孔隙结构以及比表面积发生改变。鄂尔多斯东缘煤级范围内,煤样 BET 比表面积随煤

变质程度的增高逐渐降低(图3),推测当 $R_o > 1.3\%$ 时开始略有回升。从阶段孔容分布曲线、阶段比表面积贡献曲线看(图2),研究区煤样微孔隙结构可以划分为1~3 nm,3~4 nm,4~10 nm,10~100 nm 4段,各段孔隙含量随反射率变化如表3,总孔隙含量和3~4 nm 孔径段含量与比表面积变化相同,在 $R_o = 0.5\% \sim 1.3\%$ 段明显降低,在 $R_o = 1.3\% \sim 2.0\%$ 段略有升高;1~3 nm 孔径段含量甚微,基本不变;4~10 nm 孔径段含量在减小后基本保持较低含量;10~100 nm 孔径段含量则与比表面积变化相反,先升后降。在孔隙形态的变化上,主要体现在一端不透气孔含量的先减后略增,其中3~4 nm“墨水瓶”型孔含量变化对比表面影响显著。分形维数作为煤岩孔隙结构特性的总体表征,随变质程度增高表现了与 BET 比表面积相同的变化特征,自北向南至柳林明显减小,到韩城又略有增加,同时分形尺度对应的压力区间也相应改变。

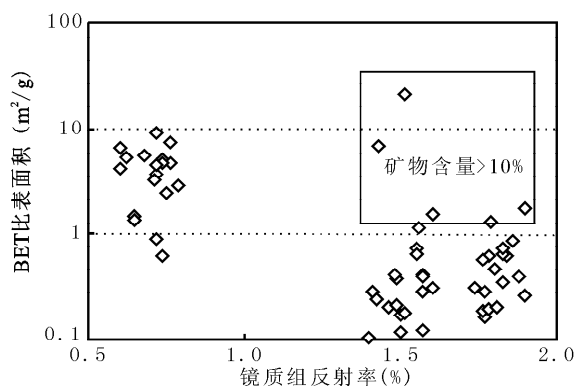


图3 鄂尔多斯盆地东缘 BET 比表面积随煤级变化图
Fig.3 The variation of BET specific area with coal rank in eastern margin of Ordos Basin

表3 鄂尔多斯盆地东缘微孔隙含量变化表
Table 3 The content of micro-pores variation in eastern margin of Ordos Basin

地区	反射率 (%)	V	V _{1~3nm} (%)	V _{3~4nm} (%)	V _{4~10nm} (%)	V _{10~100nm} (%)
北部	0.5					
中部	1.3	↘	→	↘	↘	↗
	↓	↗		↗	→	↘
南部	2.0					

注:→:含量基本不变;↘:含量降低;↗:含量略增加。

分析煤变质程度(深成变质作用)对煤储层微孔隙系统的影响主要体现在两个方面:一方面,埋深增加,煤岩压实,部分煤岩原生孔隙闭合消失,孔隙度减

小;另一方面,煤的大分子含氧官能团以及烷基侧链的消失或减少,以及大量伴生的强粘结性沥青质的吸附与充填作用造成微小孔隙的减少。但是当 $R_o > 1.3\%$ 时,煤岩成烃演化由低—中成熟阶段,向高成熟阶段过渡,在较高温度作用下液态烃急剧减少,胶质和沥青质逐渐减少乃至消失,充填作用减弱,同时芳环缩合过程中新产生的微孔造成了孔体积及比表面积的小幅回升(傅家谟等,1990;陈昭年,2005)。

3.2 煤岩组成

煤岩显微组分对煤储层微孔系统的影响是在煤级背景上的叠加,BET 比表面积随煤级增高发生规律性变化,同时煤级相似条件下又在一定范围内波动(图 3)。为了探讨煤岩显微组分对煤储层微孔系统的影响,运用聚类分析方法(李汉林等,1998)将所测样品进行分类,其中类型 I 以丝质体+半丝质体为主,类型 II 以惰屑体为主同时含有较高矿物含量,类型 III 以基质镜质体+镜屑体为主要组分,类型 IV 以均值镜质体+结构镜质体为主要组分(图 4)。

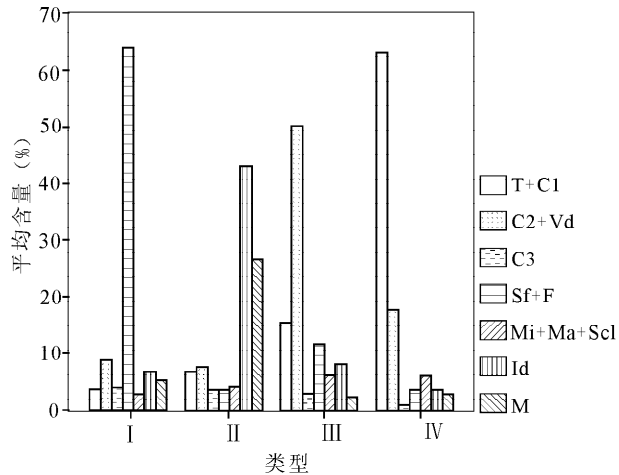


图 4 鄂尔多斯盆地东缘煤岩显微组分平均含量聚类分析

Fig. 4 The mean content of maceral in cluster analysis in eastern margin of Ordos Basin

T—结构镜质体;C1—均质镜质体;C2—基质镜质体;C3—团块镜质体;Vd—镜屑体;Sf—半丝质体;F—丝质体;Mi—微粒体;Ma—粗粒体;Scl—菌类体;Id—惰屑体;M—矿物
T—Telinite; C1—telocollinite; C2—desmocollinite; C3—corpocollinite; Vd—vitrodetrinite; Sf—semifusinite; F—fusinite; Mi—micrinite; Ma—macrinite; Scl—sclerotinite; Id—inertodetrinite; M—mineral

在相似煤级条件下,从各类型样品比表面积对比图(图 5、6)可以看出在相似煤级条件下,从类型 I 到类型 IV,各煤样比表面积有降低趋势。究其原因

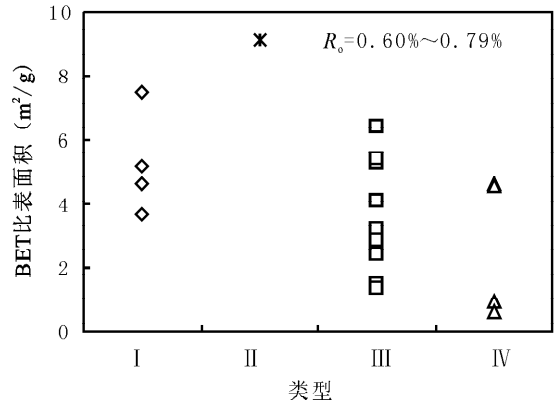


图 5 鄂尔多斯盆地东缘北部各类型煤样 BET 比表面积对比

Fig. 5 The contrast of BET specific area of northern coal samples in northern part of eastern margin of Ordos Basin

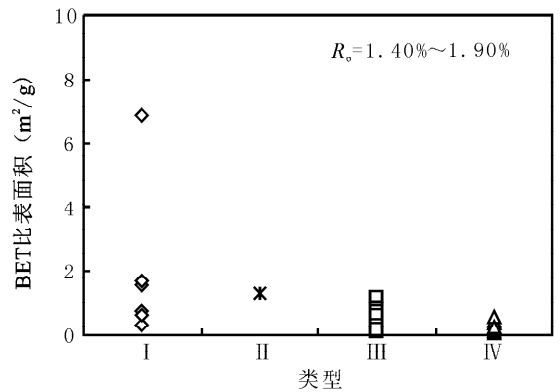


图 6 鄂尔多斯盆地东缘中南部各类型煤样 BET 比表面积对比

Fig. 6 The contrast of BET specific area of coal samples in middle and southern parts of eastern margin of Ordos Basin

因,在鄂尔多斯盆地东缘相似煤级条件下,惰质组分的物理化学变化明显比镜质组分小(斯塔赫等,1990),并且由于其本身富碳贫氢,生烃特别是液态烃能力也远比镜质组分小,因此惰质组分中可能较多的保存了原始的微小孔隙,而镜质组分由于新生成液态烃充填作用,且 R_o 在 $0.60\% \sim 0.79\%$ 范围内煤阶较低尚未能显示其微小孔生成能力,其微小孔含量不及惰质组分中多。至于类型 I 与类型 II,类型 III 与类型 IV 的比较则反映了显微组分内部各亚显微组分随变质程度变化物化性质的不同改变。

3.3 矿物含量及类型

前已述及,靠近泥岩顶底板及夹矸粘土矿物含量较高的煤分层,微孔隙结构表现为类型 IV,而且随着变质程度的增加,高矿物含量煤层与一般煤层微

- 陈昭年. 2005. 石油天然气地质学. 北京: 地质出版社, 127~130.
- 傅家谟, 刘德韩, 盛国英. 1990. 煤成烃地球化学. 北京: 科学出版社, 243~247.
- 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): 131~137.
- 郝琦. 1987. 煤的显微孔隙形态特征及其成因探讨. 煤炭学报, 4: 51~57.
- 胡宝林. 2003. 鄂尔多斯盆地煤储层低温氮吸附特征研究. 煤田地质与勘探, 31(2): 20~23.
- 霍多特 B B. 1966. 煤与瓦斯突出. 宋世钊, 王佑安译. 北京: 中国工业出版社, 27~30.
- 李汉林, 赵永军. 1998. 石油数学地质. 山东东营: 石油大学出版社.
- 刘龙波, 王旭辉. 2003. 由吸附等温线分析膨润土的分形孔隙. 高校化学工程学报, 17(5): 591~595.
- 潘兆橧. 1994. 结晶学及矿物学. 北京: 高等教育出版社.
- 桑树勋, 等. 2005. 煤吸附气体的固气作用机理 (I). 天然气工业, 25(1): 13~15.
- 斯塔赫 E, 等. 1990. 斯塔赫煤岩学教程. 杨起等译. 北京: 煤炭工业出版社, 165~218.
- 张慧. 2001. 煤的成因类型及其研究. 煤炭学报, 26(1): 40~43.
- 张新民, 庄军, 张遂安. 2002. 中国煤层气地质与资源评价. 北京: 科学出版社, 38~39.
- Gan H, Nandi S P, Walker P L. 1972. Nature of porosity in American coals. Fuel, 51: 272~277.
- Jaroniec M, Kruk M, Olivier J. 1997. Fractal analysis of composite adsorption isotherms obtained by using density functional theory data for argon in slitlike pores. Langmuir, 13: 1031~1035.
- Mandelbrot B B. 1983. The Fractal Geometry of Nature (updated and augmented edition). W. H. Freeman, San Francisco, CA, 1~468.
- Neimark A V. 1990. Determination of surface fractal dimension from the results of an adsorption experiment. Journal of Chemical Physics, 64: 1398~1403.
- Pfeifer P, Colem W. 1990. Fractals in surface science: scattering and thermo-dynamics of adsorbed films (II). New. J. Chem., 14: 221~232.

The Characters of Coal Beds Micropores and Its Influence Factors in the Eastern Margin of Ordos Basin

ZHANG Songhang, TANG Dazhen, TANG Shuheng, XU Hao, LIN Wenji, ZHANG Biao
Institute of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing, 100083

Abstract

On the basis of the test of the maceral and the low-temperature liquid nitrogen specific areas of 58 coal samples which are derived from different areas and different horizons, the results depict the micro-pore characters of coal reservoirs in aspects of the specific areas, the morphologic character of the adsorption curve, the distribution of the pore configuration and the FHH fractal feature. Meanwhile, using the causal chain of the "specific area — porosity configuration — substantial composition and chemical structure of coal", the character of micro-pores, coal rank, maceral and the relationship between the mineral component and its type in the variation range of coal rank are analyzed. At the beginning, while $R_o = 0.60\% \sim 1.91\%$, the specific area and FHH fractal obviously decrease, then when R_o approaches 1.3% , these increase slightly, meanwhile, the schort's hysteresis loop of adsorption curve and the pressure scale which corresponds to fractal scale decrease obviously, and the "inkbottle" pore type with $3 \sim 4$ nm aperture diameter obviously decrease or even disappear, becoming the main contributor to the decrease of the specific area. In the condition of similar coal rank, fusinite contributes more to specific area than the vitreous coal component in the eastern margin of Ordos Basin. When the content of clay mineral is more than 10% , the "inkbottle" pore type with $3 \sim 4$ nm aperture diameter apparently contributes to the specific area, and the influence will be more correlated with the increase of the coal rank.

Key words: the eastern margin of Ordos Basin; coal reservoir; structure of micro-pores; influence factors