

文章编号: 0253-9993(2009)10-1297-08

鄂尔多斯盆地东缘煤层气储集与产出条件

张松航, 汤达祯, 唐书恒, 许浩, 张彪, 陈贞龙

(中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083)

摘要: 对鄂尔多斯盆地东缘58件煤岩样品进行块煤光片法显微裂隙测试、低温氮比表面测试和压汞孔隙结构测试。结果表明, 鄂尔多斯盆地东缘煤储层孔裂隙系统具有以下特点: 显微裂隙密度大多数在20~100条/(9 cm²)之间, 构造活动强烈地区微裂隙发育增多; 煤储层孔隙度相对较小, 孔隙结构以小孔和微孔为主, 大孔次之, 中孔发育最差; BET比表面积总体较高, 介于0.092~20.480 m²/g, 煤储层吸附能力强。运用Q型聚类分析方法, 划分出4类具有不同孔隙系统的储层, 结合显微裂隙发育情况得出: I类储层显微裂隙较发育, 孔隙度大, 孔隙结构合理, 比表面积较高, 为煤层气勘探开发的有利储层; III类储层构造微裂隙发育, 但渗透性差, 孔隙度、比表面积较小, 中孔不发育, 为煤层气勘探开发的不利储层; II类储层介于I, III类储层之间, 为煤层气勘探开发的较有利储层; IV类储层微裂隙发育, 孔隙度中等, 大、中孔发育, 渗透性能较好, 但储层比表面积较低, 限制了储层的吸附能力, 为煤层气勘探开发的较有利储层。

关键词: 煤层气; 煤储层; 显微裂隙; 孔隙系统

中图分类号: P618.11 文献标识码: A

Preservation and deliverability characteristics of coalbed methane in east margin of Ordos Basin

ZHANG Song-hang, TANG Da-zhen, TANG Shu-heng, XU Hao, ZHANG Biao, CHEN Zhen-long

(School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Fifty eight coal samples from east margin of Ordos Basin were examined using the microfracture analysis by fluorescence microscope, liquid nitrogen adsorption analysis and mercury-injection analysis. The results show that the frequency of microfractures in coals is about 20~100 strips per 9 cm², and increases in the tectonically active areas. The porosity is relatively low. The pore is dominated by transition pores and micropores. Macropores take the second places, and mesopores develop least. The BET surface area is relatively high ranging from 0.092 to 20.480 m²/g. The coal reservoirs have good adsorption capacity. Four reservoir types with different pore-fracture systems were classified by Q cluster analysis and the difference of reservoir physical property were analyzed. Type I with more microfractures, large porosity, reasonable pore structure, high specific surface area makes the good reservoir for CBM exploration and development. Type III with more structural microfractures, poor permeability, low porosity and specific surface area, less mesopores, is bad reservoir for CBM exploration and development. The characteristics of type II are between type I and III, which makes it to be the relatively favorable reservoir for

收稿日期: 2008-10-27 责任编辑: 王婉洁

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)基金资助项目(2009CB219604); 国家自然科学基金资助项目(40730422, 40772096); 国家高科技发展计划(863)基金资助项目(2006AA06Z235); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0211)

作者简介: 张松航(1982—), 男, 河南南阳人, 博士研究生。E-mail: zshangdream@126.com

CBM exploration and development. Type IV which has the good permeability, but the weak adsorption capacity is relatively beneficial for CBM exploration and development.

Key words: coalbed methane; coal reservoir; microfracture; pore system

鄂尔多斯盆地东缘(含渭北煤田)面积约 170 000 km², 煤层气资源量大(2 000 m 以浅为 2 697.329 km³), 构造相对简单, 是沁水盆地之外最有利的富气带, 亦是目前煤层气勘探的热点地区^[1]. 然而区内的煤层气勘探试验并未获得较大突破, 有必要对控气地质因素做进一步的探讨. 煤储层孔裂隙系统作为煤层气抽采的起点和通道, 深刻影响煤层气的解吸以及渗透性能, 进而影响产能. 笔者通过系统采样测试对鄂尔多斯盆地东缘煤储层的孔渗性能进行探讨.

1 样品采集与测试

充分考虑地域分布、主力煤层等因素, 58 件煤岩样品分别取自鄂尔多斯盆地东缘 14 个煤矿(图 1)井下新鲜采掘工作面. 根据宏观煤岩类型, 对各个采掘工作面垂直分层采样, 并对所有样品进行煤镜质组反射率($R_{o,max}$)分析、煤岩显微组分定量分析、煤质分析等基础项目测试. 本文采用显微荧光法确定煤岩光片的裂隙, 测试仪器选用 LABORLXE 12 POL 型荧光显微镜. 煤储层孔隙系统测试分别采用了压汞法(测试仪器: 9310 型压汞仪; 测试范围: 孔径 > 7.2 nm), 低温液氮比表面法(测试仪器: ASAP2000 比表面仪及孔径分布测定仪; 测试范围: 孔径为 1.7 ~ 300 nm). 同时对部分样品进行空气渗透率测试, 样品为圆柱样(直径 2.5 cm, 长度约 3.8 cm), 平行层面及面割理钻取, 执行标准: SY/T 5336 - 1996 (测试仪器: 中石油勘探开发研究院廊坊分院渗透率测定装置).

2 煤储层显微裂隙发育特征

研究煤储集层的显微裂隙特征时, 在 50 倍的荧光显微镜下将 30 mm × 30 mm 的块煤光片划分成 10 mm × 10 mm 的 9 个微区, 分别将每个微区出现的裂隙按 4 种类型(A类: $w > 5 \mu\text{m}$, $l > 10 \text{ mm}$; B类: $w \geq 5 \mu\text{m}$, $l > 1 \text{ mm}$ 且连续较长; C类: $w < 5 \mu\text{m}$ 且 $1 \text{ mm} \geq l > 300 \mu\text{m}$, 有时时断时续延伸; D类: $w < 5 \mu\text{m}$, $l < 300 \mu\text{m}$ 且延伸较短; w 为裂隙宽度, l 为裂隙长度)进行统计(表 1).

显微裂隙是沟通孔隙与宏观裂隙的桥梁, 其发育程度影响储层的渗透性能. 鄂尔多斯盆地东缘煤储层 A 类显微裂隙少见, B 类裂隙发育弱, 主要以 C, D 类裂隙为主. 平面上澄合王村矿, 蒲城金宇矿, 韩城桑树坪矿, 河曲火山村矿裂隙密集度较高, 裂隙合计均值超过 80 条/(9 cm²); 府谷东云沟矿, 澄合权家河矿、象山矿显微裂隙密度多在 50 ~ 80 条/(9 cm²)之间, 保德王家焉矿、细线矿、中部的柳林矿、裕民矿以及南部的下峪口矿裂隙密度小于 50 条/(9 cm²). 在鄂尔多斯东缘岩样变质程度内($0.60\% < R_o < 1.90\%$)(表 2), 整体上煤岩显微裂隙条数自北向南随变质程度增加呈增加趋势, 这与 Law (1993) 等^[2]

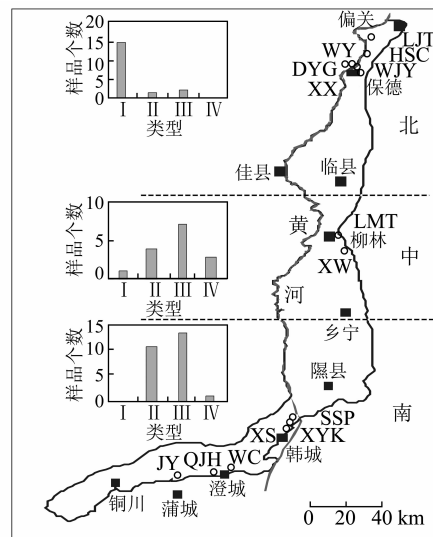


图 1 采样点分布及孔隙系统类型统计

Fig. 1 The distribution and the pore system classification statistics 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

表 1 鄂尔多斯盆地东缘煤储层显微裂隙情况统计

Table 1 Statistical results of microfissures for coal reservoir in eastern margin of Ordos Basin

采样点	层位号	R _{o,max} / %	显微裂隙数/(条·(9 cm ²) ⁻¹)				样品数		采样点	层位号	R _{o,max} / %	显微裂隙数/(条·(9 cm ²) ⁻¹)				样品数	
			A 型	B 型	C 型	D 型						合计	A 型	B 型	C 型		D 型
细线矿	8 号	0.72	0	3	12	29	44	3	王家焉矿	13 号	0.73	0	4	13	32	49	4
火山村矿	8 号	0.68	0	1	20	60	82	3	刘家塔矿	13 号	0.69	0	2	13	22	37	6
东云沟矿	2 号	0.65	0	0	20	31	51	1	东云沟矿	5 号	0.74	0	6	18	39	63	1
柳林矿	4 号	1.23	0	6	14	15	35	6	裕民矿	5 号	1.19	0	2	11	16	29	5
下峪口矿	2 号	1.80	0	1	12	29	42	3	桑树坪矿	11 号	1.80	0	5	24	60	88	5
下峪口矿	3 号	1.79	0	1	17	22	40	4	王村矿	5 号	1.76	0	8	46	525	579	1
象山矿	3 号	1.87	0	1	25	46	71	3	金宇矿	5 号	1.56	0	4	24	87	115	4
权家河矿	5 号	1.66	0	3	25	35	62	4									

表 2 鄂尔多斯盆地东缘样品孔隙结构参数

Table 2 Pore structure parameters of samples in east margin of Ordos Basin

序号	样号	压汞实验参数							液氮实验参数			反射率/%	
		孔隙百分含量/%				视孔隙度/%	体积中值直径/nm	平均孔隙直径/nm	退汞效率/%	BET 比表面/(m ² ·g ⁻¹)	BJH 总孔体积积/(mL·g ⁻¹)		平均孔直径/nm
		大孔	中孔	小孔	微孔								
1	BDWJY1	6.6	11.3	61.1	21.0	6.7	22.3	18.9	55.0	2.869	0.009 7	9.518	0.79
2	BDWJY3	15.2	16.3	47.7	20.7	7.8	30.2	21.9	47.3	1.495	0.013 0	8.827	0.65
3	BDWJY4	21.0	9.4	53.5	16.1	4.1	33.9	24.1	88.3	2.412	0.008 7	9.747	0.75
4	BDWJY6	12.1	12.5	53.6	21.8	6.7	33.3	20.1	30.5	3.676	0.014 7	9.379	0.72
5	BDXX-2	9.9	4.8	49.9	35.4	4.6	15.0	15.2	75.8	0.913	0.003 7	10.850	0.72
6	BDXX-3	5.8	7.5	55.6	31.2	5.4	17.1	16.1	69.1	3.276	0.009 5	9.507	0.71
7	BDXX-4	9.1	3.6	52.7	34.5	4.8	14.9	14.7	80.1	0.619	0.002 1	9.121	0.74
8	FGDYC2	8.3	14.3	52.4	25.0	8.2	23.9	18.6	52.4	1.369	0.003 4	7.807	0.65
9	FGDYC5	12.3	6.1	50.0	31.6	5.7	16.5	16.0	68.2	4.597	0.010 1	6.776	0.74
10	HQHSC2	23.0	21.1	37.1	18.8	8.4	50.7	23.8	52.7	4.572	0.012 4	8.360	0.72
11	HQHSC4	6.9	5.6	56.9	30.6	7.2	16.2	15.8	68.0	4.141	0.010 9	8.461	0.60
12	HQHSC5	30.4	5.4	42.0	22.2	5.5	24.0	20.1	54.2	9.115	0.020 5	7.173	0.72
13	HQLJT1	8.1	8.4	53.4	30.2	5.7	16.5	15.8	64.6	5.283	0.015 8	9.204	0.62
14	HQLJT2	7.5	4.3	55.2	33.0	7.2	13.7	13.8	78.1	6.453	0.017 8	9.260	0.60
15	HQLJT3	13.7	6.2	41.1	39.0	3.7	15.6	15.7	71.5	7.472	0.011 6	5.465	0.76
16	HQLJT4	6.4	11.8	60.8	20.9	7.5	24.3	19.7	43.1	5.450	0.016 6	8.883	0.68
17	HQLJT6	10.0	4.6	52.5	32.9	6.0	15.9	15.6	58.8	5.159	0.016 8	9.106	0.74
18	HQLJT7	6.3	4.7	50.3	38.8	4.6	13.1	13.9	76.1	4.617	0.014 7	9.570	0.76
19	JY5-1	5.6	5.6	61.1	27.8	3.2	15.4	15.5	72.5	0.656	0.002 5	7.895	1.55
20	JY5-2	8.4	6.4	66.8	18.5	4.8	16.0	16.5	42.2	0.729	0.001 8	6.429	1.55
21	JY5-3	19.9	12.0	45.2	22.9	4.4	22.3	19.8	60.7	0.392	0.002 0	9.689	1.57
22	JY5-4	19.1	4.3	57.4	19.1	4.1	23.2	20.5	47.0	1.161	0.005 0	9.381	1.56
23	L-8-1	25.4	5.0	39.3	30.3	5.3	19.1	17.9	60.8	0.379	0.001 9	9.546	1.49
24	L-8-2	31.2	5.5	38.1	25.1	4.8	25.3	19.6	58.6	0.199	0.001 3	9.990	1.46
25	L-8-4	18.2	2.4	46.2	33.2	4.5	14.7	15.4	71.8	0.119	0.000 7	10.910	1.50
26	L-8-6	44.2	9.5	27.1	19.2	7.0	305.7	27.9	41.3	0.170	0.000 8	9.435	1.50
27	L-9-1	37.7	8.0	34.3	20.0	5.6	42.9	23.5	51.6	0.413	0.001 4	8.383	1.48
28	L-9-2	21.7	9.2	41.1	28.0	3.4	19.9	18.3	60.0	20.480	0.017 3	3.619	1.51
29	L-9-3	43.2	9.0	25.1	22.7	5.2	174.3	24.0	56.3	0.213	0.000 9	8.614	1.49

续表

序号	样号	压汞实验参数							液氮实验参数			反射率/%	
		孔隙百分含量/%				视孔隙度/%	体积中值直径/nm	平均孔隙直径/nm	退汞效率/%	BET 比表面/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	BJH 总孔体积 积/($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)		平均孔直 径/nm
		大孔	中孔	小孔	微孔								
30	L-9-4	13.5	6.8	43.2	36.5	2.6	14.0	15.4	73.3	0.285	0.001 1	9.610	1.57
31	L-9-5	24.7	4.8	45.2	25.3	4.5	20.5	18.6	67.8	0.180	0.000 9	8.386	1.51
32	L-9-6	27.9	5.1	42.3	24.8	4.7	24.6	19.9	62.4	0.092	0.000 6	7.418	1.53
33	L-9-7	21.4	7.2	43.8	27.6	4.0	20.0	18.1	68.4	0.122	0.000 7	8.683	1.57
34	QJH5-1	12.5	8.9	51.8	26.8	4.4	17.2	16.8	69.2	0.400	0.002 4	11.630	1.57
35	QJH5-2	15.2	5.7	53.0	26.0	4.5	18.2	17.3	68.0	1.550	0.007 1	10.100	1.60
36	QJH5-3	13.2	6.6	50.7	29.4	3.8	15.1	15.6	72.0	0.305	0.001 6	10.920	1.60
37	QJH5-4	8.7	5.2	51.9	34.3	4.0	14.7	15.1	74.9	0.863	0.003 1	8.619	1.86
38	SSP1-1	15.3	4.0	46.5	34.2	4.2	16.9	16.1	70.0	0.162	0.001 1	10.180	1.77
39	SSP1-2	13.7	2.6	58.2	25.5	2.6	17.9	17.8	69.2	1.305	0.002 0	4.867	1.79
40	SSP1-3	10.5	5.3	52.6	31.6	2.9	14.8	15.1	73.4	0.285	0.001 0	8.537	1.77
41	SSP1-4	7.7	5.1	52.3	34.9	2.9	13.7	14.6	76.3	0.350	0.001 7	9.363	1.83
42	SSP1-5	10.9	2.7	57.0	29.4	3.2	15.6	15.6	67.4	0.655	0.003 7	10.680	1.83
43	WC5-1	19.1	33.0	33.0	14.9	7.0	168.5	29.1	44.7	0.557	0.001 9	8.035	1.76
44	XSH3-1	18.8	3.9	49.9	27.4	4.5	17.3	17.1	66.6	0.200	0.000 8	7.636	1.81
45	XSH3-2	25.4	5.5	41.8	27.3	4.9	21.9	18.4	61.7	0.256	0.001 3	10.250	1.90
46	XSH3-3	18.9	12.3	43.5	25.3	5.1	21.6	19.2	58.5	1.706	0.004 2	6.631	1.90
47	XSH3-4	22.9	6.3	46.1	24.6	4.2	21.4	18.4	62.6	0.384	0.001 1	6.521	1.88
48	XW2	12.7	8.0	61.3	18.0	2.7	45.3	22.8	41.8	6.896	0.010 5	4.896	1.43
49	XW3	20.5	6.7	46.6	26.2	3.9	18.3	17.7	72.1	0.103	0.000 8	11.210	1.40
50	XW4	7.1	5.7	50.0	37.1	3.7	14.0	14.5	78.5	0.237	0.001 4	10.740	1.42
51	XW5	13.1	5.2	54.1	27.5	3.9	16.6	16.4	71.3	0.281	0.001 5	9.956	1.41
52	XYK2-1	11.5	3.8	52.1	32.6	4.3	16.6	15.4	76.1	0.183	0.001 1	10.060	1.76
53	XYK2-2	21.5	6.2	46.2	26.2	5.1	22.1	19.3	64.8	0.462	0.002 3	9.551	1.80
54	XYK2-3	15.8	4.8	53.1	26.3	4.8	17.2	17.0	68.7	0.738	0.003 6	9.590	1.83
55	XYK3-1	10.1	4.0	55.7	30.2	4.0	15.1	15.5	80.7	0.605	0.002 7	9.597	1.78
56	XYK3-2	9.5	4.3	46.8	39.4	3.4	14.0	14.3	79.2	0.303	0.001 3	9.482	1.74
57	XYK3-3	22.4	6.2	46.7	24.6	4.6	20.0	18.8	63.2	0.193	0.001 2	11.130	1.78
58	XYK3-4	21.3	4.7	45.3	28.7	3.7	17.3	17.1	66.5	0.608	0.002 8	9.481	1.84

注: 孔隙分类采用霍多特的十进制分类, 大孔 $>1\ 000\ \text{nm}$, 中孔 $100 \sim 1\ 000\ \text{nm}$, 小孔 $10 \sim 100\ \text{nm}$, 微孔 $<10\ \text{nm}$, 表 3 与此相同。

“煤级与割理间距关系”研究结果一致。其中, 王村矿裂隙密度明显偏高, 火山村矿裂隙密度偏高与下峪口矿裂隙密度的偏低都与各自煤岩发育的构造背景相关, 一定的构造强度会增加裂隙密度, 而强烈的构造变形及矿物的充填又会使裂隙模糊不清乃至无法辨认。据张尚虎^[3] (2004) 沁水盆地显微裂隙平均 29.6 条/ $(9\ \text{cm}^2)$, 对比沁水盆地的研究结果, 鄂尔多斯盆地东缘显微裂隙相对较发育, 总平均 58.9 条/ $(9\ \text{cm}^2)$ 。由此看出, 鄂尔多斯盆地东缘裂隙发育条件中等, 好于沁水盆地。

3 煤储层孔隙系统发育特征

煤样压汞法测试一方面得到煤储层各孔径段孔隙含量的数据, 从而定性地来判定储集于孔隙系统中的气体解吸及渗流的难易程度^[4]; 另一方面得到视孔隙度、平均孔隙直径、退汞效率等反映孔隙系统渗流物性的参数。低温液氮比表面测试主要得到煤储层的比表面积参数, 评价储层的吸附解吸性能, 还可了解孔隙的形态特征^[5-6], 鄂尔多斯盆地东缘煤储层压汞和液氮测试结果见表 2, 煤储层视孔隙度偏低, 一般为 2.55% ~ 8.43%, 平均为 4.83%, 且自北向南随煤阶增高呈明显降低趋势。煤储层孔隙以小孔、微孔

含量为主，尤以小孔含量占优，其孔隙体积百分含量为 26.06% ~ 66.78%，均值为 48.75%，微孔变化为 14.89% ~ 39.39%，平均为 27.47%；大孔次之，介于 5.56% ~ 44.24%，均值为 16.43%；中孔发育最差，变化为 2.35% ~ 32.98%，平均为 7.33%。煤储层的 BET 比表面积为 0.092 ~ 20.480 m²/g，平均为 2.046 m²/g，其中研究区北部煤储层比面积较大，平均为 4.083 m²/g，中部和南部比面积较小。煤储层 BJH 总孔容为 0.000 57 ~ 0.020 50 mL/g，平均为 0.005 395 mL/g。所有煤样平均孔直径介于 3.619 ~ 11.210 nm，平均为 8.874 nm。结果表明，鄂尔多斯盆地东缘煤储层孔隙系统发育具有明显的差异性，这种差异必然导致储层孔渗性能的差异。为更好地对储层性能进行总结、归类、分析，采用 Q 型聚类方法分析，聚类方法选取离差平方和法（Ward method）。在进行聚类分析之前，采用总和和标准化方法对原始定量观测数据进行了标准化。聚类变量选择包含压汞、液氮测试结果多种参数（表 3），能较好地地从吸附解吸及渗流的共同角度反映样品的性质。聚类结果如图 2 所示，所有 58 件样品被较好地分成 4 类。研究认为，每一簇样品每种属性的平均值（表 3）是对该簇样品特征的集中反映，是每簇样品的模型或近似模型，可作为该簇样品的共同特征加以研究。而研究中可以选择属性与每簇样品属性平均值非常接近的代表性实测样品作为实例来讨论各簇样品的孔隙系统发育特征。

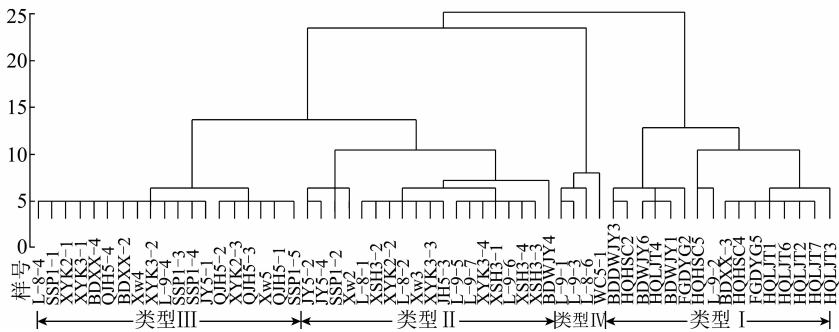


图 2 压汞试验、液氮试验测试结果的 Q 型聚类谱系

Fig. 2 The pedigree chart of Q cluster analysis of mercury inject and liquid nitrogen test results

表 3 压汞、液氮比表面试验参数聚类分析结果统计

Table 3 The results statistics of the cluster analysis for the parameters determined by mercury injection and nitrogen adsorption

簇 样号	统计项	压汞实验参数								液氮实验参数			
		孔隙百分含量/%				视孔隙度/%	体积中值直径/nm	平均孔隙直径/nm	退汞效率/%	BET 比表面/(m ² · g ⁻¹)	BJH 总孔体积/(mL · g ⁻¹)	平均孔直径/nm	
		大孔	中孔	小孔	微孔								
I	16	均值	12.14	9.33	50.67	27.85	6.24	22.08	17.76	59.35	5.627	0.013 4	8.18
	最小值	5.80	4.26	37.06	18.85	3.44	13.10	13.80	30.50	1.369	0.003 4	3.62	
	最大值	30.35	21.09	61.06	39.00	8.43	50.70	23.80	78.10	20.480	0.020 5	9.57	
II	19	均值	20.90	6.42	48.27	24.40	4.31	22.53	19.03	62.27	0.936	0.002 6	8.50
	最小值	8.39	2.61	38.12	16.11	2.55	16.00	16.50	41.80	0.092	0.000 6	4.87	
	最大值	31.22	12.28	66.78	30.35	5.34	45.30	24.10	88.30	6.896	0.010 5	11.21	
III	19	均值	11.45	4.98	51.62	31.96	3.89	15.46	15.55	73.64	0.500	0.002 3	9.89
	最小值	5.56	2.35	43.24	26.03	2.61	13.70	14.30	67.40	0.119	0.000 7	7.90	
	最大值	18.24	8.93	61.11	39.39	4.83	18.20	17.30	80.70	1.550	0.007 1	11.63	
IV	4	均值	36.06	14.89	29.84	19.21	6.19	172.85	26.13	48.48	0.338	0.001 3	8.62
	最小值	19.15	8.05	25.06	14.89	5.21	42.90	23.50	41.30	0.170	0.000 8	8.04	
	最大值	44.24	32.98	34.25	22.74	7.02	305.70	29.10	56.30	0.557	0.001 9	9.44	

类型 I 由聚类结果可知, 类型 I 样品主要来自研究区北部保德王家焉矿、细线矿, 河曲刘家塔矿、火山村矿(图 1)。该类样品镜质体反射率较低, 一般为 0.6%~0.8%, 孔隙度相对较高, 孔隙发育小孔为主, 微孔次之, 大、中孔隙发育均衡。平均孔隙直径较高, 退汞效率较低, 表明粗孔喉孔隙占用一定数量, 孔隙连通性好。BET 比表面积均值为 5.627 m²/g, 较其他各类样品高 1 个数量级, 在同地质条件下, 储层可具更大吸附潜量。从代表性样品(HQLJT-6, 取自河曲刘家塔矿 13 号煤层)液氮比表面曲线(图 3(a))看, 低温氮吸附等温线有明显的吸附回线且有 1 个拐点, 表明孔隙系统为开放型孔, 包括两端开口圆筒形孔及 4 边开放的平行板孔, 含有部分“墨水瓶”型孔, 这样的孔隙形态有利于煤层气的解吸扩散。因此, 该类样品的孔隙结构最有利于煤层气的解吸、扩散及渗透, 其所代表的储层是煤层气勘探开发的有利储层。

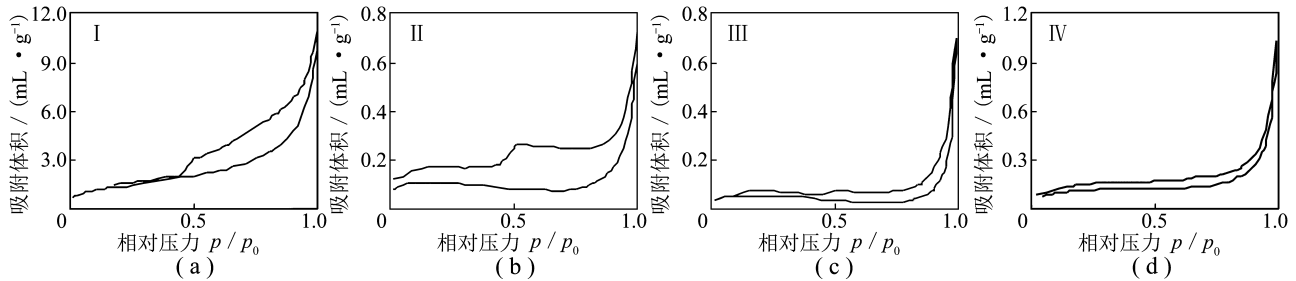


图 3 代表性样品吸附等温线

Fig. 3 Adsorption isothermal curves of samples

类型 II 类型 II, III 样品主要为东缘中部和南部样品(图 1)。从表 2 可看出, 类型 II 样品较类型 I 样品视孔隙度低, 均值为 4.31%, 大孔含量明显增加, 中孔含量减少, 小、微孔含量相近。体积中值直径、平均孔隙直径比类型 I 样品略大, 退汞效率比类型 I 样品略高, 表明粗孔喉孔隙含量比类型 I 样品略高。BET 比表面积均值为 0.936 m²/g, 表明煤储层吸附能力较强。代表性样品(XSH3-4 取自韩城象山矿 3 号煤层)液氮比表面吸附等温线(图 3(b))同类型 I 一样, 有明显的吸附回线且有 1 个拐点, 表明孔隙系统为开放型孔, 包括两端开口圆筒形孔及 4 边开放的平行板孔, 且可能包含部分“墨水瓶”型孔。类型 II 样品的中孔孔隙含量略少, 可能会形成孔隙连通的“瓶颈”, 但大孔含量相对较多, 孔隙形态多为开放孔, 总体评价类型 II 样品代表的储层仍为较有利于煤层气的解吸、扩散及渗透的有利储层。

类型 III 类型 III 样品孔隙度偏低, 介于 2.61%~4.83% 之间, 均值为 3.89%, 成为制约其孔渗性能的主要因素。与类型 I 样品相比, 大孔、小孔、微孔含量相似, 但中孔含量比较少, 均值仅为 4.98%, 造成孔隙分布的不均衡, 影响孔隙间的连通, 可能成为煤层气扩散渗流的“瓶颈”。体积中值直径、平均孔隙直径明显比类型 I, II 样品小, 表明粗孔喉孔隙含量相对较少, 退汞效率较高也说明大、中孔隙含量偏少, 显示该类样品吸附能力一般。代表性样品(XYK2-1 取自下峪口矿 2 号煤层)液氮比表面吸附等温线(图 3(c))无明显拐点, 甚至呈现“负斜率”, 吸附回线不明显, 表明其孔隙系统多为一端开口的半封闭型孔。鉴于中孔含量少造成的“瓶颈”作用及孔隙形态的封闭性, 认为该类样品的孔隙结构不利于煤层气的解吸、扩散及渗透。从图 1 上看 III 类样品个数较多、分布广, 其所代表的储层是各区乃至各垂直分层中煤层气勘探开发的较差储层。

类型 IV 类型 IV 主要为柳林矿的 3 个样品及澄合王村矿的 1 个样品, 样品数量较少。煤变质程度主要处在焦煤阶段。类型 IV 样品孔隙度较高, 介于 5.21%~7.02% 之间, 均值为 6.19%, 大孔、中孔含量较大, 孔隙分布均衡, 连通性好。BET 比表面积较低, 均值为 0.5 m²/g, 表明该类样品煤储层吸附性能较差, 含气性受限。低温氮吸附等温线(图 3(d), 代表性样品 L-9-1, 采自柳林龙门塔矿 9 号煤层)弱回线或无吸附回线, 表明孔隙系统主要为一端封闭孔, 含有部分开放孔, 较不利于煤层气的解吸及扩散。因此, 该类样品的孔隙结构有利于煤层气的渗流, 较不利于解吸、扩散, 且含气量受限, 代表的储层是煤层气勘探开发的较不利储层。

分析聚类结果的地质内涵（图 1），变质程度是 I 类储层，区别于其他 3 类储层的主因，I 类储层变质程度低（ $0.60\% < R_0 < 0.80\%$ ），煤岩压实度小，孔隙度大，储层原生孔隙结构保存较好。因此，I 类储层多在研究区北部分布，中、南部几乎不发育。II，III 类储层变质程度相似（ $1.40\% < R_0 < 1.90\%$ ），同为中高变质程度烟煤，但 III 类储层明显较差，原因有 2 方面：① III 类储层多为半暗、暗淡煤储层，凝胶化作用不强，随变质程度增加，煤岩压实，大、中孔隙减少，同时由于生烃能力弱，新的微孔裂隙发育少；② 下峪口矿、桑树坪矿及权家河矿等处，构造运动及煤层与其顶、底板“两硬夹一软”岩层结构造成局部煤储层构造煤发育，孔隙度较低，且孔隙多为封闭孔^[7-9]，同时中孔含量的减少成为扩散渗流的“瓶颈”。IV 类储层主要在中部柳林地区，变质程度处在焦煤阶段，成煤环境为深覆水森林泥炭沼泽相^[10]，凝胶化作用强烈，煤岩缩聚及“气胀”作用较强^[11]，割理发育，煤储层孔隙度大，渗透性好，而气孔的孤立性、封闭性及小微孔的不发育性应是该区煤层气未获得大规模商业开发成功的主因。

4 煤储层孔裂隙系统的渗透性响应

煤层气的吸附及扩散、渗透能力都与煤储集层的孔隙度、孔隙结构、孔隙形态和连通性及裂隙发育密切相关。对于煤储层，孔隙是煤层气的主要储集场所和扩散渗流通道，显微裂隙构成煤层气的层流及紊流混合渗透区间并沟通宏观裂隙。鄂尔多斯盆地东缘煤储层渗透性测试结果见表 4，从表 4 中可看出研究区北部煤样（包含王家焉矿、火山村矿、细线矿、东云沟矿煤样）渗透率较高，这与分析研究区北部孔隙发育属于类型 I，储层原生孔裂隙系统保存较好，连通性强，显微裂隙密度较高或中等相对应。澄合王村矿，蒲城金宇矿，韩城桑树坪矿煤样显微裂隙密度高，特别是王村矿 WC5-1 样品裂隙密度达到 525 条/ (9 cm^2) ，但渗透率却比较低。分析原因，与这几个矿区构造活动强烈，煤层原始结构遭到严重破坏，孔隙发育特征多属类型 III，裂隙部分被粉煤充填且多为超微裂隙相关^[12]，也说明储层的渗透性不仅受控于裂隙的条数，也与裂隙及孔隙系统的连通性紧密相关。下峪口矿煤储层孔隙特征多为 III 型，显微裂隙密度也比较低，渗透率测试结果也显示为最低。从实际资料上看，东缘河东地区煤层气储层的渗透率一般大于 $3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，而沁水盆地南部 3 号煤层的渗透率为 $1 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，因此，从储层孔-裂隙系统看，鄂尔多斯盆地东缘储层物性亦明显优于沁水盆地。

表 4 鄂尔多斯盆地东缘样品渗透率测试结果

Table 4 The permeability test results of the samples in east margin of Ordos Basin

样号	渗透率/ μm^2	样号	渗透率/ μm^2	样号	渗透率/ μm^2
BDXX-2	0.449×10^{-3}	JY5-2	0.063×10^{-3}	XSH3	0.016×10^{-3}
DYG	4.402×10^{-3}	QJH5-3	0.195×10^{-3}	XYK2-3	0.016×10^{-3}
HQLJT	0.144×10^{-3}	QJH5-4	0.890×10^{-3}	XYK3-2	0.007×10^{-3}
HSC	1.461×10^{-3}	WC5-2	0.122×10^{-3}	XYK3-1	0.307×10^{-3}
WJY-1	4.777×10^{-3}	SSP11-1	0.012×10^{-3}	SSP11-5	0.148×10^{-3}
WJY-3	0.241×10^{-3}	SSP11-4	0.021×10^{-3}		

5 结 论

(1) 煤储层性质基本上受控于煤岩变质程度，煤岩类型及构造背景起次要控制作用。总体上裂隙密度中等，构造强烈地区 D 裂隙明显增多，但这类裂隙对储层渗透率贡献不大。孔隙度偏低，孔隙结构以小、微孔为主，大孔次之，中孔发育最弱。BET 比表面积为 $0.092 \sim 20.480 \text{ m}^2/\text{g}$ ，平均为 $2.046 \text{ m}^2/\text{g}$ ，总体显示了较强的吸附能力。

(2) 运用 Q 型聚类分析方法将研究区储层划分为 4 类，I 类储层主要分布在北部，显微裂隙较发育，孔隙度大，孔隙结构合理，比表面积较高，为煤层气勘探开发的有利储层。III 类储层主要在半暗、暗淡煤

分层, 以及东缘南部 D 类显微裂隙较多的构造煤发育地区, 孔隙度, 比表面积较小, 中孔不发育, 容易造成孔隙连通的“瓶颈”, 渗透率较低, 为煤层气勘探开发的不利储层. II 类储层性能介于 I, III 类之间, 是煤层气勘探开发的较有利储层. IV 类储层比较特殊, 主要分布在中部部分层位, 储层微裂隙发育, 孔隙度中等, 大、中孔发育, 渗透性能较好, 但储层比表面积较低, 多小于 $0.5 \text{ m}^2/\text{g}$, 限制了储层的吸附能力, 为煤层气勘探开发的较有利储层. 总体上鄂尔多斯盆地东缘煤储层孔渗性能要优于沁水盆地, 下一步应对构造发育状况、储层原地应力条件等进行深入研究, 做出更客观的评价以指导煤层气勘探选区.

参考文献:

- [1] 冯三利, 叶建平, 张遂安. 鄂尔多斯盆地煤层气资源及开发潜力分析 [J]. 地质通报, 2002, 21 (10): 658-662.
Feng Sanli, Ye Jianping, Zhang Suian. Coalbed methane resources in the Ordos Basin and its development potential [J]. Geological Bulletin of China, 2002, 21 (10): 658-662.
- [2] 秦 勇, 曾 勇. 煤层甲烷储层评价及生产技术 [A]. Law B E. 煤级与割理间距的关系及其在煤渗透性预测中的意义 [C]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1996: 97-101.
Qin Yong, Zeng Yong. Coalbed methane reservoir evaluation and production technology [A]. Law B E. Relationship between coal rank and cleat spacing and its meaning in prediction in coal permeability [C]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1996: 97-101.
- [3] 张尚虎. 沁水盆地高煤级煤储层孔隙系统发育特征及模型分析 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2004.
Zhang Shanghu. Characteristics and model analysis of pore system of the high rank coal reservoirs in Qinshui Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2004.
- [4] 霍永忠. 煤储层的气体解吸特性研究 [J]. 天然气工业, 2004, 24 (5): 24-26.
Huo Yongzhong. Research on the features of gas desorption in coal reservoir [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24 (5): 24-26.
- [5] 陈 萍, 唐修义. 低温氮吸附法与煤中微孔隙特征的研究 [J]. 煤炭学报, 2001, 26 (5): 552-556.
Chen Ping, Tang Xiuyi. The research on the adsorption of nitrogen in low temperature and micro-pore properties in coal [J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26 (5): 552-556.
- [6] 严继民, 张启元. 吸附与聚集 [M]. 北京: 科学出版社, 1979: 108-121.
- [7] 王 英. 权家河煤矿褶皱构造发育特征 [J]. 煤田地质与勘探, 2000, 28 (2): 16-18.
Wang Ying. Features of fold structures in Quanjiahe Coal Mine [J]. Coal Geology & Exploration, 2000, 28 (2): 16-18.
- [8] 王生全. 论韩城矿区煤层气的构造控制 [J]. 煤田地质与勘探, 2002, 30 (1): 21-25.
Wang Shengquan. Geologic structure control of CBM in Hancheng mining area [J]. Coal Geology & Exploration, 2002, 30 (1): 21-25.
- [9] 郑 重. 韩城矿区煤的煤岩特征及煤层气生储因素分析 [J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32 (5): 23-25.
Zheng Zhong. Analysis of coal petrographic properties and controlling factor of coalbed gas resource in Hancheng coal mining area [J]. Coal Geology & Exploration, 2004, 32 (5): 23-25.
- [10] 张 群, 陈沐秋, 高文生. 河东煤田离柳矿区煤相研究 [J]. 煤田地质与勘探, 1994, 22 (1): 5-9.
Zhang Qun, Chen Muqiu, Gao Wensheng. Coal facies research in Li-Liu mining area, Hedong coalfield [J]. Coal Geology & Exploration, 1994, 22 (1): 5-9.
- [11] 段连秀, 王生维, 张 明, 等. 河东煤田煤储层中气胀节理的发现及其研究意义 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1999, 24 (1): 54-56.
Duan Lianxiu, Wang Shengwei, Zhang Ming, et al. Discovery and significance of gas-expanding joints coal reservoir, Hedong coalfield [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 1999, 24 (1): 54-56.
- [12] 张遂安. 有关煤层气勘探过程中的理论误导剖析 [J]. 中国煤层气, 2004, 1 (2): 7-8.
Zhang Suian. Analysis of misleading theories in the progress of coalbed methane exploration [J]. China Coalbed Methane, 2004, 1 (2): 7-8.