

文章编号: 1001-1986(2007)01-0037-04

鄂尔多斯盆地东部上古生界煤层气储层特征

刘新社^{1,2}, 席胜利², 周焕顺²

(1. 西北大学地质系, 陕西 西安 710069;

2. 中国石油长庆油田勘探开发研究院, 陕西 西安 710021)

摘要:鄂尔多斯盆地东部上古生界煤层气储层的孔隙类型以气孔和植物组织孔占优势, 孔隙体积比中, 大孔和微孔达 80%~90%。煤层的有效孔隙度低, 使裂隙成为煤层气的主要运移通道。主干裂隙走向受古应力场的控制, 与主应力方向相一致; 裂隙发育程度从北向南具有明显的分带性。综合分析认为, 南部吴堡—柳林和乡宁—韩城一带煤层气储集条件有利, 是煤层气勘探开发的有利地区。

关键词:煤层气; 储集特征; 石炭系; 二叠系; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: P618.11 **文献标识码:** A

Features of upper Paleozoic coalbed methane reservoir in eastern Ordos Basin

LIU Xin-she^{1,2}, XI Sheng-li², ZHOU Huan-shun²

(1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China;

2. Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oil Field, Xi'an 710021, China)

Abstract: It is indicated that, as far as the upper Paleozoic coal bed methane reservoir is considered, the gas pore and plant tissue holes are the dominant storing spaces in eastern Ordos Basin. The large pores and micro-pores are amount to 80%~90% of the pore volume. The poor effective porosity of coal makes the cracks as the principal migration tunnel. Meanwhile, the orientation of main crack is controlled by stress field, and accords with the principal stress. The cracks are obviously zonally developed from the north to the south. Based on the analysis above stated, it is therefore concluded that, Wupu~Liulin and Xiangning-Hancheng areas should be taken as target areas for coalbed methane exploration.

Key words: coalbed methane; reservoir feature; Carboniferous; Permian; Ordos Basin

鄂尔多斯盆地东部位于晋陕蒙黄河沿岸附近, 北起内蒙准格尔旗, 南抵陕西韩城, 东到山西临县, 西邻陕西延川。区内不但煤炭资源丰富, 而且煤层气资源也相当可观。该区埋深小于 2 000 m 的煤层面积达 $3.7 \times 10^4 \text{ km}^2$, 初步预测煤层气资源量约 $3.32 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 具有形成大型煤层气气田的有利条件^[1-3]。东部上古生界煤层气勘探开始于 20 世纪 90 年代, 主要集中在山西兴县、三交、柳林和陕西韩城一带, 已钻井 50 口, 并在山西大宁—吉县地区控制煤层气地质储量 $1 500 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。随着煤层气勘探与开发的进一步深入, 煤储层评价成为影响煤层气勘探选区、经济开发的重要因素^[4-8]。

1 煤层分布及煤岩特征

1.1 煤层分布特征

鄂尔多斯盆地东部煤层主要分布在石炭—二叠系的本溪组、太原组和山西组。根据煤层纵向分布

规律, 自上而下划分为 10 个煤层组, 即 1[#]煤~10[#]煤。其中, 山西组 5[#]煤、太原组 8[#]煤是上古生界煤层气勘探的主力层位, 厚度分别为 5~10 m 和 5~15 m, 总厚度约 5~25 m, 占煤层总厚度的 85%以上, 且分布非常稳定, 具有北厚南薄的特点(见图 1)。

1.2 煤岩特征

上古生界煤中, 光亮型煤占 69.7%, 半亮型煤占 28.8%, 半暗型煤仅占 1.5%。煤岩显微组分以镜质组为主, 平均为 79%; 其次为惰质组, 平均为 16.5%; 稳定组平均为 5.64%; 无机矿物平均为 3.2%。煤岩显微组分在纵向上略有变化, 太原组煤较山西组煤镜质组含量略高, 而丝质组和无机矿物略低。平面上, 从北向南镜质组含量增加。

1.3 煤质特征

煤中水分一般较低, 为 0.26%~3.10%, 横向变化不明显, 但低成熟样品水稍高。煤中灰分含量变化较大, 为 3.4%~34.49%。其中, 5[#]煤受陆相沉

收稿日期: 2006-09-11

基金项目: 国家“973”项目(2003CB214601)及国家重大基础研究计划项目(2002CCC01400)资助

作者简介: 刘新社(1971—), 男, 陕西富平人, 在读博士研究生, 高级工程师, 从事石油天然气地质综合研究。

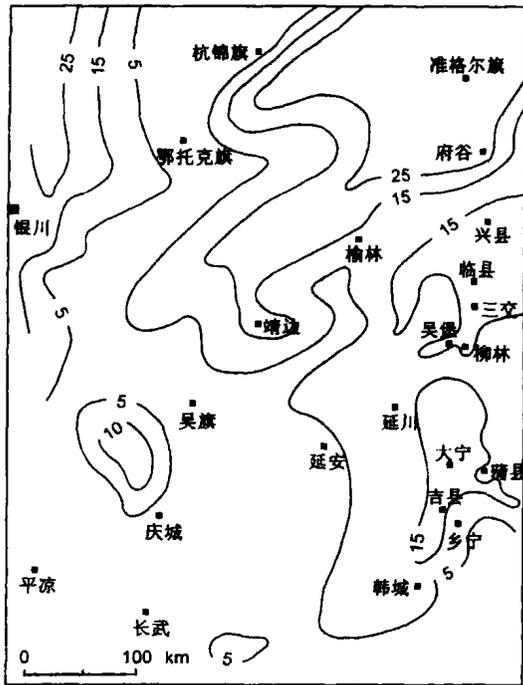


图 1 鄂尔多斯盆地石炭—二叠系煤层厚度等值线图

Fig. 1 Coalbed thickness isoline map of Permian-Carboniferous in Ordos Basin

积环境控制,灰分含量从北向南含量减小,且变化范围大;⁸煤受陆表海环境控制,灰分含量从北向南也有减小趋势,但变化幅度小。

受地史期最大沉积埋深所控制,从北向南,煤岩镜质组反射率增加,北段煤化程度低, R 值一般为 0.6%~1.5%,南段煤化程度高, R 值一般为 1.3%~2.4%,有机质已大量进入主成气阶段,煤层生气量大^[9]。

2 煤的孔隙特征

2.1 孔隙类型

气孔 为该区煤的主要孔隙类型,在北部神木—兴县地区发育相对较少,向南逐渐增加,到永和—乡宁—韩城一带最为发育。它们多以规则或不规则的圆形和椭圆形成群出现。此类孔隙在各种显微组分中均可见到,但以镜质组为主,且很少被充填,有利于油气的储集和运移。气孔的发育程度与煤的变质程度、显微组分的平面分布情况基本一致,即随煤的变质程度的加深和镜质体含量的增高,气孔发育程度也相应增加。

植物组织孔 在兴县—府谷一带最为发育,且保存较为完整,向南发育程度减弱。多为结构镜质体和丝质体中残留的植物细胞组织,排列较为规则、完整,具有一定的方向性,但在构造活动较强烈区因应力作用而严重破碎。与气孔相比,孔隙充填严重,

连通性差,对气体的储集和运移不利。

粒间孔 多发育在地史期构造活动强烈的中南部地区,对气体的储集和运移较为有利,但其所占比例远较气孔和植物组织孔少。

溶蚀孔和铸模孔 多以孤立状出现,在煤的孔隙中所占比例较小,对煤层气的储集和运移意义不大。

2.2 孔隙度

表 1 是采用氦密度法测定的煤层总孔隙度,单个样品的测试结果差异较大,从 0.92%~15.23%均有分布,但不同地区和不同地层,孔隙度平均值较为集中,为 4%~7%,平均为 5.2%。

表 1 煤层总孔隙度测定结果 %

Table 1 Statistics of total porosity in coalbed

地层	韩城	吴堡	府谷
山西组	0.92~11.63 5.91(6)	1.61~7.88 4.03(9)	4.27~9.06 7.26(5)
太原组	1.39~15.23 6.725(8)	1.84~9.25 5.49(7)	4.42~6.28 5.35(2)

注:最小值~最大值
平均值(样品数)。

2.3 孔隙体积分数

煤孔隙的孔径变化范围很大,一般而言,微孔 (<0.01 μm) 构成煤的吸附容积,小孔 (0.01~0.1 μm) 构成瓦斯毛细凝结和扩散区域,中孔 (0.1~1 μm) 构成瓦斯缓慢层流渗透区域,大孔 (>1 μm) 构成剧烈层流渗透区域^[10]。表 2 是各类孔隙的体积比。其中,大孔、中孔和小孔的体积是根据 9220 II 型压汞仪实验获得,微孔的体积是利用氦密度法先测取煤的总孔隙体积,然后再减去大孔、中孔和小孔体积而得。

表 2 煤的孔隙体积分数

Table 2 Character of pore volume in coal

样品	煤层	R/%	总孔隙度/%	总孔隙容/mL·g ⁻¹	孔隙体积分数/%			
					大孔	中孔	小孔	微孔
榆 5 井	8	2.24	2.37	0.016 9	30.04	6.53	6.44	56.99
府谷五一矿	4	0.57	6.37	0.051 6	43.35	11.02	7.24	38.39
榆 8 井	8	1.5	5.43	0.042 5	23.89	7.40	5.10	63.61
临县虎虎塔	4	0.73	4.38	0.032 8	63.52	18.59	11.01	6.88
柳林大庄	4	0.94	3.86	0.030 1	47.00	7.99	4.47	40.54
柳林麻则塔	5	0.84	1.59	0.012 1	53.42	6.28	4.81	35.49
榆 6 井	5	2.6	3.14	0.022 6	25.89	2.47	5.68	65.95
蒲县南湾	3	0.98	7.99	0.063 8	14.43	6.82	5.29	73.45
乡宁甘草山	2	1.24	11.63	0.096 6	10.86	18.34	5.30	65.50
乡宁台头	8	1.38	5.72	0.041 2	6.58	5.97	4.79	82.66
韩城马沟渠	8	1.55	8.66	0.067	47.42	6.71	5.67	40.20

由表 2 可以看出,孔隙中主要以大孔和微孔为主,它们占总孔隙的 80%~90%以上;小孔和中孔所占比例较小,一般不超过 15%,且不同地区差异不大。孔隙体积分数的平面变化规律为:随煤变质

程度的加深, 大孔逐渐减少、微孔逐渐增加。在吴堡—柳林及其以南地区, 以微孔为主, 体积分数达 60%~80%, 大孔次之; 往北至临县—府谷一带, 微孔所占比例下降, 大孔体积分数增加, 达 30%~60%。

3 煤层甲烷吸附能力及含气性

煤层气(甲烷)在煤层中的储存形式有吸附、游离、溶解 3 种状态, 吸附状态的甲烷占 55.83%~95.63%, 成为甲烷在煤层中的主要储存形式^[11]。从煤层等温吸附实验数据(表 3)可以看出, 北部吴堡—府谷地区 Langmuir (V_L) 体积为 7.71~12.38 m^3/t , 明显低于韩城地区的 16.34~25.19 m^3/t , 反应了南部煤层甲烷最大吸附量明显高于北部地区, 这与南部较北部地区微孔发育特征相一致。Langmuir (P_L) 压力正好相反, 南部韩城地区为 1.11~1.54 MPa, 北部吴堡—府谷地区为 1.54~3.82 MPa, 说明北部地区煤层甲烷较南部地区容易解吸。通过对研究区煤心实测知, 煤层含气量在 5~20.87 m^3/t 之间, 并有从北向南增加的局势, 北部府谷—兴县含气量一般小于 6 m^3/t ; 中部吴堡—柳林含气量 8~17 m^3/t ; 南部大宁—韩城含气量 8~22 m^3/t 。

表 3 煤层吸附实验数据表

Table 3 Measurement data of coal adsorption capacity

矿区	煤层	R/%	$V_L/m^3 \cdot t^{-1}$	P_L/MPa	水分/%	灰分/%
府谷五一矿	3	0.72	12.38	3.14	4.27	13.16
府谷五一矿	8	0.7	8.18	1.54	2.66	18.66
府谷凤场沟矿	3	0.62	10.49	3.82	3.31	15.09
吴堡麻塔则矿	3	1.2~1.4	7.71	2.43	0.77	19.98
韩城下峪口矿	2	1.62	19.48	1.12	0.72	10.22
韩城下峪口矿	3	1.67	25.19	1.39	0.58	11.96
韩城下峪口矿	11	1.66	16.34	1.11	0.66	9.27
韩城象山矿	5	1.96	21.37	1.54	0.98	13.02

4 煤层渗透性

4.1 孔隙渗透性

煤层孔隙大小、几何形状及其连通情况对煤层中气体的流动方式和难易程度有一定的影响。煤的压汞实验分析表明, 当压力超过 100 MPa 时, 煤的进汞曲线与退汞曲线完全重合, 此时煤的进汞量主要是由于煤压缩造成, 并非煤中微孔的反映。在压力低于 100 MPa 时, 煤的进汞曲线和退汞曲线较为一致, 退汞率较高。因此, 以煤的孔喉半径大于 $6.2 \times 10^3 \mu m$ (相当于 100 MPa 压力时汞进入煤样的孔喉半径) 的孔隙代表有效孔隙度。经计算, 研究区有效孔隙度平均为 2.87%, 其中, 临县以南地区为 1%~

2%, 向北稍有增加, 多处于 3%~4% 之间, 这与北部煤层大孔所占孔隙体积比较高的结果相一致。

钻井岩心样品孔隙渗透率的测试结果差异明显, 大宁—韩城地区钻井岩心孔隙度为 1%~8%, 平均 3.12%, 渗透率介于 $(0.05 \sim 12) \times 10^{-3} \mu m^2$ 之间, 平均 $1.53 \times 10^{-3} \mu m^2$, 煤层具有中等孔隙、中高渗透性特征(表 4)。

表 4 孔隙度、渗透率统计结果表

Table 4 Statistics of porosity and permeability in coalbed

地区	样品数 /个	孔隙度/%		渗透率/ $10^{-3} \mu m^2$	
		5# 煤	8# 煤	5# 煤	8# 煤
大宁—吉县	12	2~8	1~6	1~20	0.5~80
韩城	8	2~6	1~5	0.5~19.6	0.05~5

4.2 裂隙特征

4.2.1 裂隙走向

裂隙作为煤层渗透率值大小的主要控制因素, 其产状很大程度受局部及区域应力场、煤岩组分和演化程度的控制, 从而使煤层渗透率值各向异性十分明显。据 A. D. Decker 等(1989)对沃里尔盆地煤层渗透性的研究结果发现, 煤层面割理方向与端割理方向的渗透率比值为 17:1^[12]。

在吴堡—离石以北地区, 煤的主干裂隙——面割理的走向为北北西向和近北西向, 倾角 $80^\circ \sim 90^\circ$; 中部的吴堡—柳林地区面割理走向为近东西向, 倾角 $70^\circ \sim 90^\circ$; 南部的乡宁—韩城地区面割理走向为近东西向到北西西向, 倾角 $70^\circ \sim 90^\circ$ 。通过对本区地表岩石节理与地下煤层主干裂隙的对比分析发现, 一般在地表均可找到与地下煤层割理走向相对应的岩石节理产状, 不同的是, 由于煤层刚性不如砂岩和碳酸盐岩, 在受到挤压应力后, 可通过塑性变形消减构造应力, 结果造成岩石节理发育组数较之煤层割理组数多。

地层中岩石节理和煤层裂隙, 除与成岩作用有关外, 还与构造应力作用息息相关。研究区从晚古生代以来, 经历了海西、印支、燕山和喜山 4 期构造运动。前两期主要表现为整体升降运动, 地层之间以整合或平行不整合接触为主; 而后两期构造作用较强, 造成了地层之间的角度不整合接触, 尤以燕山期最为强烈, 甚至发生了岩浆活动, 并伴生有强烈的热事件发生^[13], 促使煤层割理大量形成。从鄂尔多斯盆地燕山期构造应力场主应力轨迹图(图 2)来看, 研究区的南北应力场方向不同。离石以北, 应力场方向为北北西向, 其南应力场方向为北西向。正是在该应力场作用下, 煤层割理的产状从北向南由北北西向转为近东西向和北西西向, 因而, 可结合地

表岩石节理和煤层割理的成生关系,通过对本区燕山期古应力场的分析,来达到对局部地区煤层裂隙走向和有利渗透带的预测。

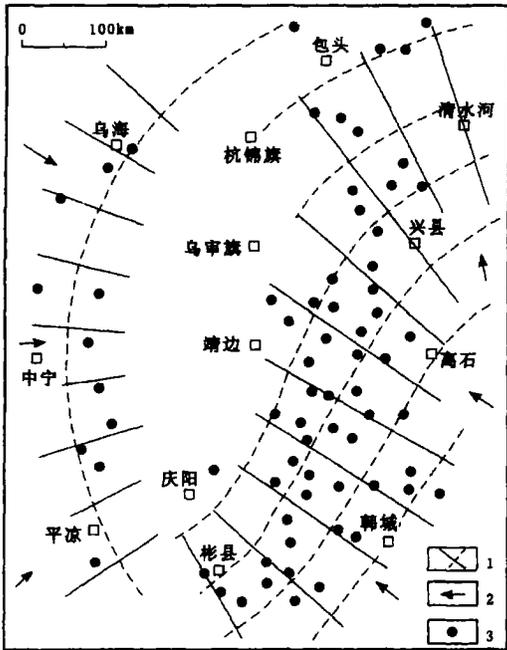


图 2 鄂尔多斯盆地燕山期构造应力场应力轴轨迹图

Fig. 2 Stress grid diagrams in Yanshan period in Ordos Basin

1——实线虚线分别表示主压应力轴、主张应力轴轨迹;
2——压缩方向;3——测点位置

4.2.2 裂隙发育程度

北部府谷地区割理密度在亮煤中仅为7~12条/5 cm,且宽度和长度均较小,连通性差,割理受后期构造活动改造较弱;向南到中部地区,由于煤层演化程度增高,加之构造活动的强烈改造,在吴堡矿区测点可以明显看出,割理密度增加,与构造活动有关的割理开启程度明显增加,且延伸长度可达20 cm,煤层连通性显著提高;向南到韩城矿区,其割理发育程度虽不如吴堡矿区,但明显优于府谷地区。该分布规律与煤岩铸体薄片孔缝鉴定所统计结果基本一致(表5、表6)。

5 结语

综上所述可知,鄂尔多斯盆地东部上古生界煤层气储层孔隙类型以气孔和植物组织孔占优势;孔隙体积比中,大孔和微孔达80%~90%。煤层具有中等孔隙和中高渗透性的特征;煤层的有效孔隙度和裂隙为煤层气的主要运移通道;主干裂隙走向受古应力场的控制,与主应力方向相一致;在研究区裂隙发育程度从北向南具有明显的分带性。

南部煤岩储集性能要明显优于北部,在吴堡一

表 5 煤层宏观割理统计表

Table 5 Statistics of cleavage in coal

地区	割理类型	煤岩类型	线密度 (条/5 cm)	宽度/mm	长度/cm
府谷	面	亮煤	1~12	0.015~0.7	0.3~2.5
	端	亮煤	2~9	0.015~1.0	0.3~2.5
吴堡	面	暗-亮煤	7~14	0.01~0.3	5~20
	端	暗-亮煤	7~12	0.01~0.05	<10
韩城	面	暗-亮煤	2~30	0.1~0.6	0.6~7
	端	暗-亮煤	5~25	0.1~0.3	0.2~1

表 6 煤层显微裂隙统计表

Table 6 Statistics of micro-cracks in coal

地区	裂隙宽/ μm	线密度/条 $\cdot\text{cm}^{-1}$	面密度/条 $\cdot\text{cm}^{-2}$
兴县-府谷	5~50	5~7	6~23
吴堡	2~100	2~12	5~27
韩城	5~300	2~8	2~25

柳林及其以南地区,煤阶为焦-瘦煤一半无烟煤阶段,镜质组含量高,孔隙以气孔为主,植物组织孔次之,微孔所占孔隙体积比达60%~80%。该区甲烷含量高,裂隙发育,且多以割理和构造裂隙叠置出现为特征,煤层渗透性能好,是煤层气勘探选区的有利地区。

参考文献

- [1] 杨 华,席胜利,马财林. 陕甘宁盆地煤层气勘探选区初步评价[J]. 天然气工业, 1998, 25(2): 18-21.
- [2] 赵庆波,孙 斌,李五忠. 鄂尔多斯盆地东部大型煤层气气田形成条件及勘探目标[J]. 石油勘探与开发, 1997, 17(6): 4-21.
- [3] 冯二利,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.
- [4] 王生维,陈钟惠,张 明,等. 大宁-吉县煤区煤层气开发需要解决的几个基本问题[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(6): 761-764.
- [5] 王生维,段连秀,陈钟惠,等. 煤层气勘探开发中的煤储层评价[J]. 天然气工业, 2004, 24(5): 82-84.
- [6] 陈江峰,王素玲. 煤层气储层特性的测井评价[J]. 中国煤田地质, 1998, 10(增刊): 44-46.
- [7] 蔚远江,杨 起,刘大猛,等. 我国煤层气储层研究现状及发展趋势[J]. 地质科技情报, 2001, 20(1): 57-60.
- [8] 张国良,贾高龙. 鄂尔多斯东缘煤层气地质及勘探开发方向[J]. 中国煤层气, 2004, 1(1): 17-20.
- [9] 汤达祯,王激流,张君峰,等. 鄂尔多斯盆地东缘煤的二次生烃作用与煤层气的富集[J]. 石油实验地质, 2000, 22(2): 140-145.
- [10] 霍多特·B·B. 煤与瓦斯突出[M]. 宋士钊,王佑安,译. 北京: 煤炭工业出版社, 1966.
- [11] 张新民,张遂安,钟玲文,等. 中国的煤层甲烷[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1991.
- [12] PALMER L D, METCALFE R S, YEE D, 等. 煤层甲烷储层评价及生产技术[M]. 秦勇,曾勇,编译. 北京: 中国矿业大学出版社, 1996.
- [13] 任战利. 鄂尔多斯盆地热演化与油气关系的研究[J]. 石油学报, 1996, 17(1): 17-24.