

## 煤层气

# 焦作煤田煤储层物性特征及控气因素

张小东<sup>1</sup>, 刘炎昊<sup>1</sup>, 张子戌<sup>2</sup>, 王利丽<sup>1</sup>, 刘浩<sup>1</sup>

(1. 河南理工大学能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000;

2. 河南理工大学资源环境学院, 河南 焦作 454000)

**摘要:**根据以往资料和实验测试结果,研究了焦作煤田主力煤层二<sub>1</sub>煤层的储层结构、渗透性、吸附性等物性特征及分布规律,采用定性与定量相结合的方式,对煤层含气性的变化规律及控制因素进行了探讨。研究认为:焦作煤田二<sub>1</sub>煤层微孔含量最高,其次是过渡孔,而大中孔含量要低得多,具有很强的吸附能力和较强的扩散能力,但渗流或层流能力很弱;煤层渗透率较低,且随着埋深的增加而减小,但地质构造对煤层渗透性具有一定的影响,并且研究区内煤层压裂处理渗透性可明显改善;煤层顶、底板岩性为煤层气体提供了良好的保存条件,而有效埋深、断裂构造对本区煤层含气性具有重要的控制作用。随着有效埋深的增加,含气量先是急剧增大,到了一定阶段后,增大趋势变缓,之间具有对数正相关关系;向斜轴部煤层气含量高于两翼,而背斜则呈现相反的趋势;区域大断裂带附近以及多组断裂的交会部位,煤层含气量往往较低。

**关键词:**焦作煤田;煤层气;储层物性;含气性;影响因素

**中图分类号:**TE132.2

**文献标识码:**A

**文章编号:**1672-1926(2009)03-0446-08

## 0 引言

焦作煤田地处焦作市东北部,东西长 60 km,南北宽 15 km,含煤面积为 970 km<sup>2</sup>,是我国优质无烟煤的产出基地之一,累计探明煤炭资源储量为 44.7 亿 t,保有煤炭资源储量为 26.38 亿 t。煤层气资源蕴藏丰富,据最新的河南省焦作煤田煤层气资源潜力调查报告显示,研究区在 2 000 m 以浅、风化带以深、含气量在 8 m<sup>3</sup>/t 以上的可采煤层的煤层气资源量为  $1\,583.82 \times 10^8$  m<sup>3</sup>,资源丰度为  $1.27 \times 10^8$  m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup><sup>[1]</sup>,具有良好的开发前景。焦作煤田也是我国煤田瓦斯突出严重的煤田之一,现有 13 对矿井,其中先后有 11 对矿井发生过煤与瓦斯突出,自 1955 年以来共发生较大煤与瓦斯突出 276 次,随着开采深度的增加,煤与瓦斯突出危险性有增大的趋势。

通过对煤田的地质构造及煤储层物性特征分析,系统探讨研究区内煤层含气性变化规律及其主

控因素,旨在为研究区的煤层气勘探开发和瓦斯防治提供依据。

## 1 区域构造与地层

焦作煤田位于华北晚古生代聚煤盆地的南部,处于华北板块板内太行构造区太行断隆的南段,研究区内地层由老到新有太古界、中元古界蓟县系、下古生界寒武系和奥陶系、上古生界石炭系和二叠系、中生界三叠系、新生界新近系和第四系。地层总体为一走向 NE—NNE、倾向 SE 的单斜构造形态,地层倾角为 5°~20°。

研究区内广泛发育自燕山运动以来所生成的各种构造形迹,构造相对复杂。主要以断裂构造为主,褶皱构造表现微弱。

断裂构造主要为高角度的正断层,整个煤田以近 EW 向的凤凰岭断层为界分为 2 个构造带:以南为纬向构造带,构造形迹以轴向近 EW 的褶曲和走向近 EW 的断裂为主;以北为新华夏系构造带,构

收稿日期:2008-11-06;修回日期:2009-03-05.

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:40602017);国家重点基础研究发展规划(“973”)项目(编号:2006CB202204);河南理工大学博士基金项目(编号:648513)联合资助.

第一作者 E-mail:z\_wenfeng@163.com.

造形迹以走向 NE 的断裂为主,另有 NW 向断裂和罕见的 NNE 向断裂。

## 2 煤层及煤储层特征

### 2.1 煤层及围岩

全区含煤地层 15 层,煤层平均总厚约 16 m,可采煤层总厚约 9 m,主要可采煤层为山西组二<sub>1</sub>煤和太原组一<sub>2</sub>煤层。其中二<sub>1</sub>煤层全区稳定可采,煤层厚 0~19.64 m,平均为 5.36 m,煤层结构较简单,局部分岔;一<sub>2</sub>煤层属大部可采的薄—中厚煤层,煤层厚 0~5.14 m,平均为 1.34 m,结构简单—复杂。

根据煤体破坏类型划分,本区煤体结构纵向变化呈规律性的变化:九里山断层以南的可分为 3 层:上部一层约 0.3~1.0 m 的松软煤层带,中部为 3.0~4.5 m 的破坏程度微弱的块状煤带,接近煤层底板发育一层为 0.25~1.5 m 的夹小块状的松软煤层带;九里山断层以北、北碑断层以东多为粉状、次为碎粒、块状的煤层;九里山断层以北、北碑断层以西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,下部为块状煤层带。煤田东北部的赵固勘探区的煤层多为单一的块状煤带,夹少量粒状煤。

### 2.2 煤岩及煤质

焦作煤田煤种较为单一,均为高变质程度的无烟煤。其中,二<sub>1</sub>煤为灰黑—黑色,似金属光泽,以贝壳状断口为主,节理劈理发育,可选性好。煤的宏观岩石学特征以亮煤为主,暗煤次之,夹丝炭和镜煤透镜体或线理状镜煤,煤岩类型以光亮型—半亮型煤为主;显微煤岩成分中有机组含量高,一般大于 86%,且绝大多数为镜质组,占总组成的 80% 以上。镜质组反射率( $R_{0,max}$ )在 3.16%~4.70% 之间,为低灰、低硫、高热量的无烟煤。

一<sub>2</sub>煤总体与二<sub>1</sub>煤相似,个别性质稍有差异,但以煤中硫份含量高而显著区别于二<sub>1</sub>煤。

### 2.3 孔、裂隙性

煤是具有基质孔隙和裂隙组成的双重孔隙介质。基质孔隙和裂隙的大小、形态、孔隙度、渗透率和连通性决定着煤层气的储集、运移和产出,从而制约了煤层气的渗流和煤层气的产能<sup>[2-3]</sup>。

#### 2.3.1 裂隙

研究区不同井田煤层裂隙发育不均一,煤层渗透性差异较大。井下煤层观察发现,煤层中存在着大小不等的裂隙,既有穿过整个煤层甚至插入顶底板的大裂隙以及切穿煤层夹矸而中止于煤层顶底板

的较大裂隙,也有中止于煤层夹矸仅在煤分层分布的小裂隙以及仅发育于镜煤条带中的微裂隙。裂隙走向主要有 NNW、NE、NNE 或近于 SN 向(图 1),多为倾角大于 50° 的高角度裂隙,往往 2 组裂隙共存,其中大裂隙切割小裂隙,同组裂隙成雁型排列,间隔为 0.2~7 cm。局部地区如古汉山井田煤层出现有 3 组裂隙。

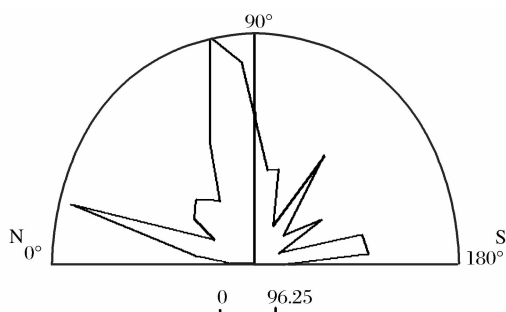


图 1 九里山井田二<sub>1</sub>煤层显微裂隙走向玫瑰花图

手标本和显微镜下观测发现:二<sub>1</sub>煤层割理不甚发育,仅在镜煤条带中有割理存在,局部被高岭石或方解石充填或半充填。即使同一井田,不同地段次生裂隙分布也不同,反映了矿区不同地段煤层裂隙发育的不均一性和渗透性的差异性。显微裂隙走向主要为 NE、近 EW 和 NEE 向,与区域断裂构造以及宏观裂隙走向大致相同(图 1、图 2)。

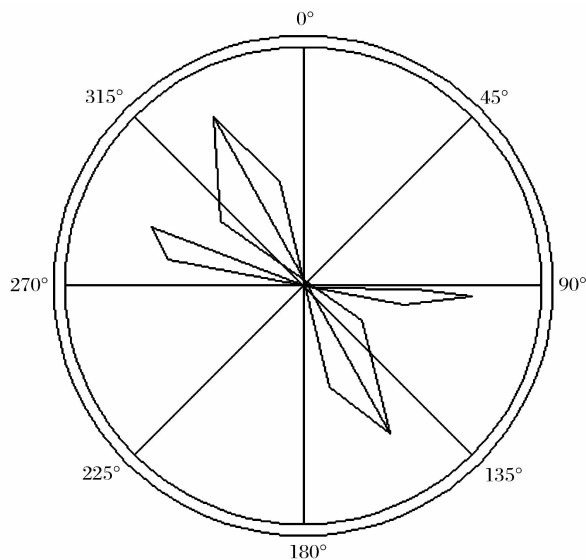


图 2 冯营井田二<sub>1</sub>煤层宏观裂隙倾向玫瑰花图

#### 2.3.2 孔隙

研究区二<sub>1</sub>煤的孔隙率一般为 7%~12%,煤田由东到西、由浅部至深部,煤的孔隙度有增大的趋势。

本次研究对不同井田的 24 个煤样采用压汞法进行了孔隙测试(表 1)。二<sub>1</sub>煤内微孔(10~

7.2 nm)比表面积大,平均为 38 624 cm<sup>2</sup>/g,其次为过渡孔(100~10 nm),平均为 28 972 cm<sup>2</sup>/g,大中孔孔径范围尽管分布最宽,但其比表面积要小得多,平均为1 617 cm<sup>2</sup>/g;而大中孔、过渡孔孔容基本相当,统计平均值分别为 284. 6×10<sup>-4</sup> cm<sup>3</sup>/g、154. 2×10<sup>-4</sup> cm<sup>3</sup>/g,微孔孔容最小,平均为 82. 9×10<sup>-4</sup> cm<sup>3</sup>/g。各孔径段的孔隙的孔比表面积差比孔容差

显著得多,一定程度上反映二<sub>1</sub> 煤层中微孔含量最高,其次是过渡孔,两者远大于大中孔含量。

根据煤吸附研究表明,一般微孔(<10 nm)构成煤的吸附空间;过渡孔(100~10 nm)构成煤层毛细凝结和扩散区域;大中孔(>100 nm)构成渗流和层流区域<sup>[4]</sup>。由此可见,焦作煤田二<sub>1</sub> 煤的吸附能力很强,并且具有较强的扩散能力,但渗流或层流能力很弱。

表 1 焦作煤田二<sub>1</sub> 煤的孔隙结构参数

项目	大中孔	过渡孔	微孔	合计
	(10 000~100nm)	(100~10 nm)	(10~7.2 nm)	
比表面积	范围(cm <sup>2</sup> /g)	31~1 1307	12 370~47 146	16 567~61 745
	平均(cm <sup>2</sup> /g)	1 617	28 972	38 624
	所占比例(%)	0.02~12.50	29.93~47.38	35.35~69.72
	平均(%)	2.27	41.98	55.75
孔容	范围(×10 <sup>-4</sup> cm <sup>3</sup> /g)	22~2 400	45~128	36~128
	平均(×10 <sup>-4</sup> cm <sup>3</sup> /g)	284.6	154.2	82.9
	所占比例(%)	8.4~89.85	7.4~49.22	2.7~41.23
	平均(%)	39.1	37.9	23

2.4 渗透性

煤层渗透率是煤储层评价的关键参数,直接影响着煤层气的产出速率和煤层气井的产气历程。渗透率可由多种方法获取,如实验室测定、地球物理测井曲线换算、煤层透气性系数换算、试井测定和储层数值模拟。不同方法由于测试的原理、方法以及计算点位或煤样代表性的差别,求出的结果相差很大,难以对比。

研究区内二<sub>1</sub> 煤层的试井渗透率有 6 组,主要分布在中部的古汉山、中马井田和南部的恩村井田。由于该煤层煤化程度较高,割理发育少且局部被方解石脉充填,导致煤层整体渗透率较低。但区域构造对渗透性具有重要影响:断裂构造附近的煤层渗透性较好,古汉山井田的 4 个煤层气井,试井渗透率最高达 82.62×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>;处于挤压应力状态的墙南向斜轴部附近,渗透率仅为(0.001 8~0.071)×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>。研究区内煤层压裂处理渗透性可明显改善,中马村井田煤层经水力压裂渗透率由 0.001×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup> 增至 0.761 6×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,提高了 2 个数量级。

本次研究对 6 件块状煤样,在实验室内进行了渗透率测定,测定值反映煤层的渗透率值级差较大:中部的白庄、方庄、古汉山井田的渗透率较高,围压在 2.5 MPa 下,绝对渗透率为(0.061~0.951)×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,平均为 0.371×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,而西部的朱村

矿绝对渗透率值仅为 0.020×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>;同一井田,不同深度的煤样绝对渗透率差异极大,围压在 2.5 MPa 下,方庄井田埋深 160 m、512 m 的煤样,渗透率分别为 0.269×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>、0.061×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,两者相差 4 倍多;随着围压的增大,渗透率有减小的趋势,方庄井田埋深 512 m 的煤样在围压 3.5 MPa 时测得的渗透率为 0.028 8×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,约为围压 2.5 MPa(0.061×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>)的二分之一。原因在于,埋深增加后,由于地层的压实作用,使得煤层的孔、裂隙宽度减少,气体运移阻力增大,导致渗透率降低。

2.5 吸附性

本次研究采用美国 Raven Ridge 公司生产的 ISO-100 高压等温吸附仪进行了吸附性测试。测试结果表明,研究区内二<sub>1</sub> 煤的吸附能力强。温度在 30℃时,原煤对 CH<sub>4</sub> 的平均吸附量为38.07 cm<sup>3</sup>/g,可燃基则可达到44.54 cm<sup>3</sup>/g。

总体上,煤的吸附量随温度的增加而减少(图 3)。进一步比较发现,不同井田在不同温度区间吸附量随温度增加衰减速率不同。古汉山井田和五里源井田,在 30~40℃区间,吸附量衰减速率约为0.18 m<sup>3</sup>/(t·℃),在 40~50℃区间为0.10 m<sup>3</sup>/(t·℃),前者约为后者的 1.8 倍;方庄井田和冯营井田,不同压力区间内煤样在 30~40℃和 40~50℃范围内随温度的增加的吸附衰减速率几乎相同。

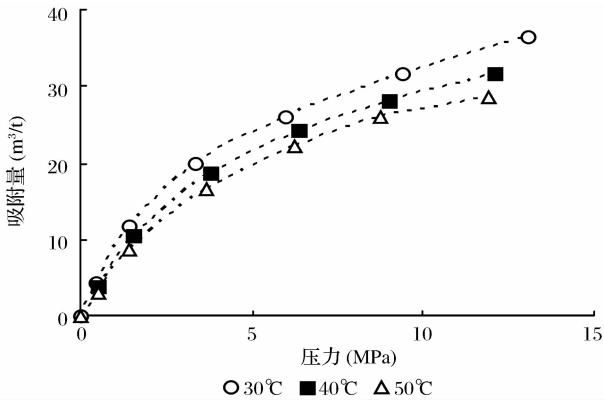


图3 不同温度下煤样的等温吸附曲线

### 3 含气性及其控制因素

#### 3.1 含气性

根据收集的研究区以往煤田地质勘探中瓦斯含量实测资料,埋深在163~1 064.3 m之间,实测二<sub>1</sub>煤层煤层气含量为4.65~45.75 m<sup>3</sup>/t,平均为18.33 m<sup>3</sup>/t。含气量分布规律见图4。由图4可以看出:就整个煤田而言,含气量自东北向西南有逐渐增大的趋势,且中部偏南区域含量最高;深部断块的煤层含气量总体高于浅部。在同一断块内,煤层含气量整体呈现随埋深增加而增高的趋势,但含气量

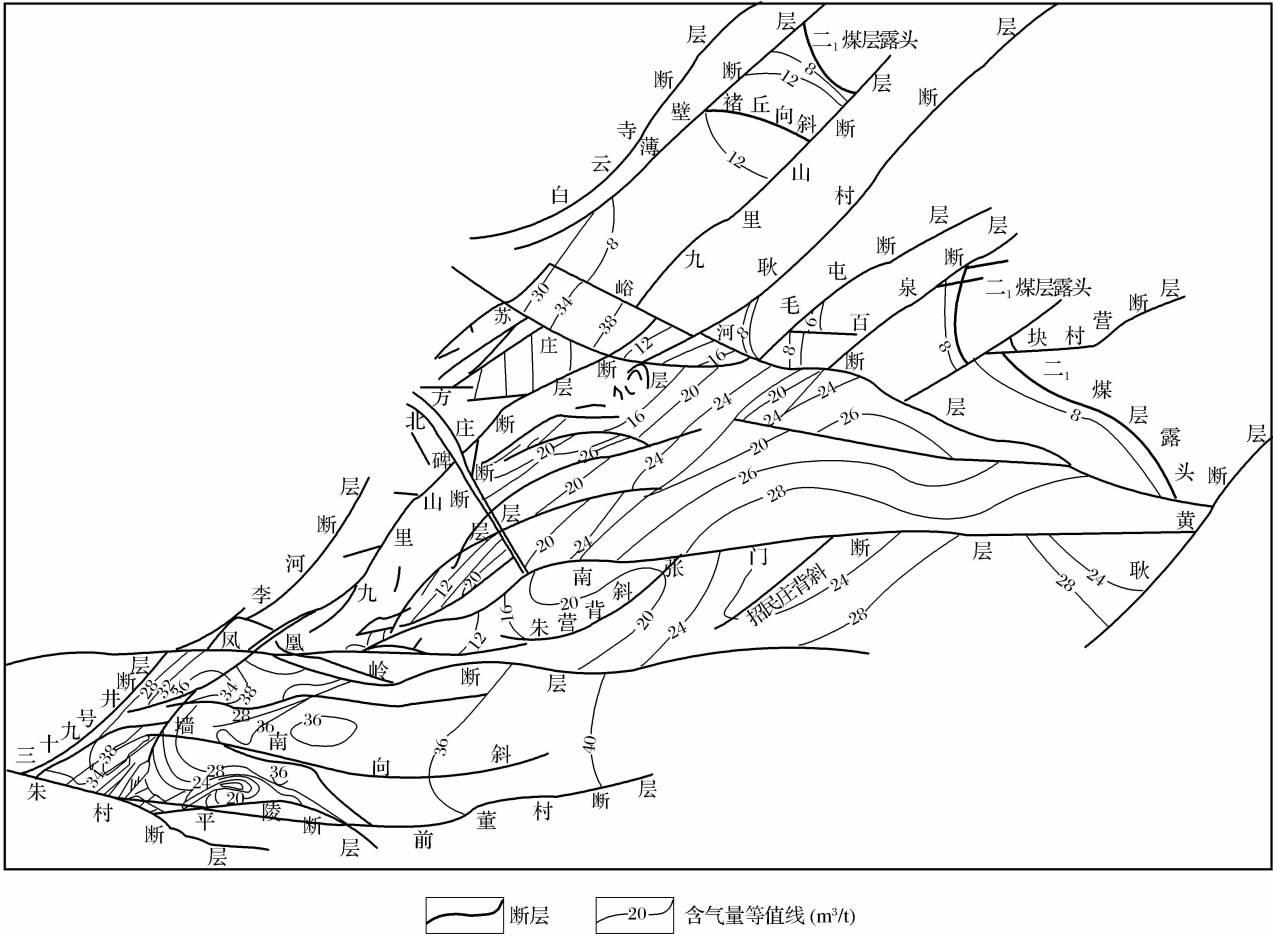


图4 研究区二<sub>1</sub>煤层含气量等值线

并非随着深度的增加无限增大,如恩村井田,含气量等值线与煤层底板等高线相交的趋势有向深部延展的趋势,含气量最高值区不是出现在向斜轴部,而是出现在轴部北侧。由此说明,即使构造变化不大的同一块段,煤储层含气量到一定深度趋于饱和值,深度增加,含气量增大幅度很弱。

#### 3.2 煤层气组成

研究区二<sub>1</sub>煤层、一<sub>2</sub>煤层中煤层气的组成变化

范围较大,分布规律如下:

总体上,CH<sub>4</sub>含量由浅至深有增大的趋势。煤层气风化带、氧化带以深,气体成分以CH<sub>4</sub>为主,次为N<sub>2</sub>和CO<sub>2</sub>,重烃含量甚微,一般小于1%。焦作煤田煤层气烃类稳定碳同位素组成(PBD,下同)为:δ<sup>13</sup>C<sub>CH<sub>4</sub></sub> = -3.41‰、δ<sup>13</sup>C<sub>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub></sub> = -2.879‰、δ<sup>13</sup>C<sub>CO<sub>2</sub></sub> = -2.483‰,C<sub>1</sub>/C<sub>1-5</sub> = 0.99。说明煤层气为腐殖型煤的同源热裂解气,且成熟度高。

含气量越大,  $\text{CH}_4$  含量越大(图 5), 当含气量大于  $10 \text{ m}^3/\text{t}$  时, 所有的钻孔数据中仅有个别孔的煤层气组成中  $\text{CH}_4$  成分含量小于 80%。一定程度上表明了煤层气的气体成分组成中  $\text{CH}_4$  含量与总气量的相关性。

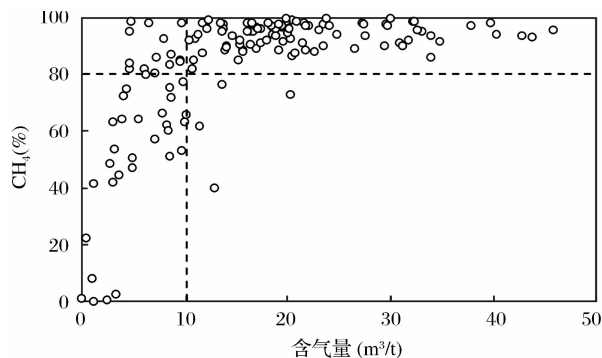


图 5 煤层含气量与  $\text{CH}_4$  含量分布关系

不同块段间  $\text{CH}_4$  含量也有较大的差别, 其中南部的恩村井田、焦南井田、墙南井田或勘探区变化范围最小。在煤田东北部的赵固井田, 除了井田西南端的 5203 钻孔和东南端的 7305 钻孔因为有效埋深较大(分别为 213.2 m 和 260.41 m)外, 其他钻孔的  $\text{CH}_4$  含量均小于 50%。

### 3.3 煤层含气量的控制因素

煤层含气量是煤化作用、构造活动、埋藏演化过程中经过多次吸附/解吸、扩散/渗流、运移后, 在现今地质条件下动平衡的产物<sup>[5]</sup>。也就是说, 煤层现所处的煤级、构造部位、埋藏深度等条件决定了煤层的含气量。总体上, 研究区内岩浆活动较弱, 煤的煤化程度较为稳定, 均为变质程度较高的无烟煤。因此, 本研究中, 主要分析构造、埋深以及顶底板岩性等对煤层气含气性的影响。

#### 3.3.1 埋深与含气量的关系

埋深是指煤层现今的埋藏深度即上覆地层厚度<sup>[6]</sup>, 对煤的吸附性具有双重作用。首先随着埋深的增加, 压力增大, 有利于气体的吸附。在围岩条件相近的情况下, 埋深增加, 煤层气向上运移的路径增长, 有利于气体的保存。其次, 由于地温梯度的客观存在, 埋深增加, 温度增高, 使得煤的生烃量增加, 但同时导致吸附态气体的相对减少。

统计数据表明, 总体上随着埋深的增加, 煤层含气性有增大的趋势(图 5), 但两者的相关性较弱。

#### 3.3.2 有效埋深与含气量的关系

煤储层上覆有效地层厚度指的是含煤盆地或地区的地层剖面中对煤层含气性能起控制作用的煤层上覆地层厚度<sup>[7]</sup>。可以用煤层到气体大量生成后第

一个不整合面的底层厚度表示, 它真实地反映了煤层气大量生成后构造运动及其造成的地层抬升、剥蚀等作用对煤层气保存条件的影响<sup>[8-9]</sup>。一般说来上覆地层有效厚度越大, 保存条件越好; 有效地层厚度越薄, 表明构造运动造成抬升、剥蚀强烈, 底层压力降低, 气体越易发生解吸散失。

三叠纪末, 研究区的地层抬升剥蚀作用可能会降低煤层含气量。二<sub>1</sub> 煤层顶板至新生界地层基底之间的厚度即基岩厚度, 也反映了二<sub>1</sub> 煤层含气性的有效埋藏深度。本次研究统计结果表明, 煤层含气量随着有效埋藏深度的增加而增大, 在浅部具有很好的线性关系, 但随着有效埋深的增加, 含气量增大趋势减缓(图 6)。两者间具有一定的对数关系, 相关方程式为:

$$W = 11.662 \ln(h) - 47.62 \quad R = 0.78$$

式中:  $Y$  为含气量,  $\text{m}^3/\text{t}$ ;  $h$  为煤层有效埋深, m。

由此可以认为, 有效埋深对含气量的影响要比埋深显著, 是影响焦作煤田煤层含气量的主要因素之一。

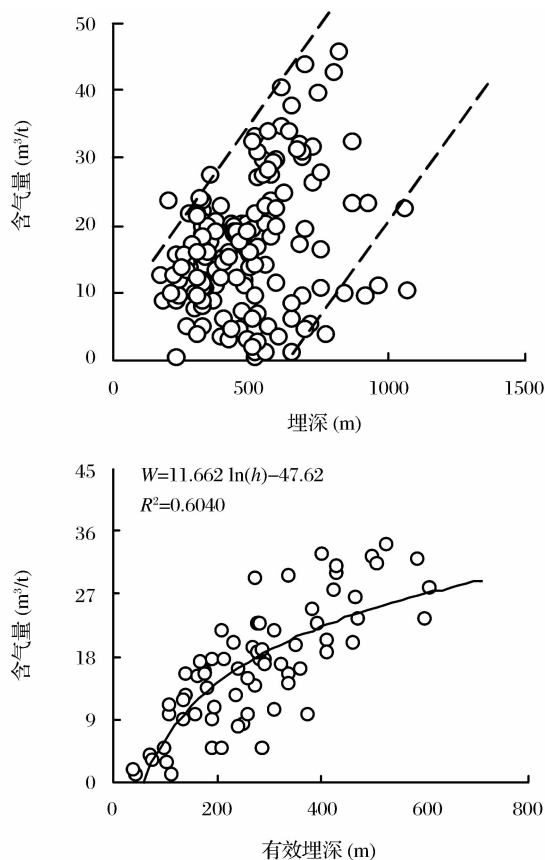


图 6 煤层埋深与含气量关系

#### 3.3.3 断裂构造的控制作用

不同类型的地质构造, 在其形成过程中构造应力场特征及其内部应力分布的不同, 均会导致煤储

层和封盖层的产状、结构、物性、裂隙发育状况及地下水径流条件等出现差异,进而影响到煤储层的含气特性<sup>[10]</sup>。就研究区而言,区域构造(主要是断裂和褶皱)控制着煤层含气性的总体分布规律,井田构造与局部煤层含气性关系密切。

(1)区域构造对含气性的影响。

研究区煤层经历的印支、燕山和喜马拉雅 3 次主要构造运动,使断层纵横发育交织成网,将煤田分割成一系列断块构造,呈地堑、地垒和阶梯状。研究区内褶皱发育较弱,多为宽缓型,主要分布在井田中南部(图 4)。这些构造作用使煤田原有的煤层埋深发生改变并破坏了盖层封闭性,对煤层气含量影响较大。

总体上,区域大断裂带附近的煤层含气量较小,特别是区域大断裂交汇部位含气量明显减小,如峪河断层、赤庄断层南端将九里山断层切割,后期受耿村断层切割,几组断层交会的部位,含气量明显低于相邻区段;断块沉降端和倾斜端,由于煤层埋深增加,煤的吸附能力加大且更有利于煤层气的保存,煤层气含量明显较高;断块抬升端,煤层埋深变浅,封存条件遭到破坏,煤层气大量运移散失,导致含气量减少。煤田中北部的方庄井田东部、南部、北部边界均为开放性正断层,断裂构造相对发育,破坏了煤层及其围岩的完整性,使得煤层及其围岩构造裂隙相对发育,煤、岩层透气性变好,加之断层的错动,煤层或被第四系松散沉积物所覆盖,或与透气性较好的山西组、下石盒子组砂质岩对接,形成了相对较好的煤层气逸散条件。因此,该井田煤层气含量普遍低于周边井田。

现今煤层含气量的分布规律体现出褶皱控气的特征,但不同煤层因构造煤发育程度的差异,其含气性在不同褶曲部位的表现有所不同。在焦南断块深部为向东倾伏的宽缓向斜构造,向斜轴部埋藏深度大,煤层气不易沿垂直方向散逸,保存条件好,并且在向斜形成后该区域的岩浆变质作用对向斜不同构造部位的含气量也具有较明显影响,最终造成该区域向斜轴部煤层气含量高于两翼。煤田南部的恩村井田、焦南井田,主要构造形态为向东倾伏的宽缓向斜构造,断裂构造不甚发育,向斜轴部煤层埋藏深度大,保存条件好,煤层气不易沿垂直地层方向运移、失散,这是造成向斜轴部煤层气含量高的原因之一。此外,因为研究区存在向斜形成后的发生区域岩浆热变质作用,造成在向斜的不同构造部位煤层气含量也有明显不同。背斜轴部的含量要小于两翼,如在煤田中部的朱营背斜,两翼的含气量明显高于轴部。原因在于背斜轴部往往属于应力松弛区,张性裂隙发育,不利于煤层气的保存。

(2)井田地质构造对含气性的影响。

研究区内同一断层的不同部位的含气量分布见表 2,与构造关系较为密切的钻孔含气量数据如表 3 所示。

表 2 同一断裂构造上、下盘的含气量对比

断层名称	性质	落差(m)	煤层气含量(m <sup>3</sup> /t)		
			上升盘	下降盘	断裂带
团相断层	张扭性正断层	25~150	25	30	22
魏村断层	张扭性正断层	50~180	10	18	8
界碑断层	正断层	100~130	10	20	8
小凤凹断层	正断层	40	10	13	3

表 3 与断裂构造相关的含气量数据

采样点位置	含气量(m <sup>3</sup> /t)	采样点位置	含气量(m <sup>3</sup> /t)
魏村断层断裂带	9.16	魏村断层尖灭端	32
魏村断层下盘,距离断层面 30 m	8.47	距魏村断层尖灭端 250 m	21.92
F <sub>6</sub> 断层下盘,距断层面约 70 m	14.87	团相正断层下盘,距断层面 25 m	12.53
魏村断层下盘,距离断层面 200 m	16.26	团相正断层下盘,距断层面 200 m	29.16
魏村断层下盘,距离断层面 400 m	19.03	小凤凹正断层上盘,距断层面 250 m	8.08

根据不同断层上、下盘的实测含气量数据(表 2),可以发现,断层上升盘的含气量明显要小于下降盘。其原因在于:一是由于下降盘下降过程中,构造活动相对较强,其对煤层揉搓作用期间,温度增加,使得更多的煤层大分子结构及侧链或支链发生热解,从而造成局部生烃量的增大;二是由于下降盘伴

生次级断裂较为发育,破坏了煤层气的逸散通道,以及构造的揉搓使得煤体结构的破坏程度增强,减弱了煤层的透气性,形成了聚气和阻气构造,不利于气体逸散,使得煤层气相对富集。

由表 3 可以看出,在断层上升盘(正断层的下盘),距离断裂面越远,含气量越大,主要是由于区域内的较大断裂构造全部为张性正断层,这些断裂往

往会形成导气构造,并且距离断裂面越近,透气性越好,生成的煤层气更易逸散,从而降低了煤层气含量。断层尖灭端附近的含气量可达到 32 m<sup>3</sup>/t。主要是由于断层尖灭端附近,应力集聚,煤体破碎,降低了煤层的透气性,从而形成了聚气构造,使得气含量增大。

3.3.4 顶底板岩性对煤层气富集的影响

煤层顶、底板是煤层气封存的第一道天然屏障,因此煤层顶、底板的岩性、厚度及其稳定性等将对煤层气的保存具有重要的作用。一般来说,岩性越致密,厚度越大,其渗透性就越低,对煤层气的保存也就越有利<sup>[10]</sup>。

对比研究区内煤层不同顶、底板岩石的微米级、

纳米级孔隙性测试结果(表 4)可知,泥岩的大中孔含量远小于砂岩,且纳米级孔隙测试结果与煤样相当,为各类岩石中最高,因此泥岩对煤层气的容纳能力较强,并且成为煤层气封存的重要条件。研究区煤层顶底板都普遍发育较厚泥岩层,单层厚度多在 1 m 以上,稳定性好封盖能力强且分布较稳定,构成了一个良好的封闭环境,有效地阻止了气体散逸,使煤层气在其间逐渐运移富集。

局部顶底板岩性的差异也可造成煤层含气量的变化,如处于同一断块内的冯营井田和中马村井田,前者顶底板岩性以透气性差的砂质泥岩、粉砂岩为主,后者则以透气性较好的粉砂岩、细粒砂岩为主,从而使煤层气含量一高一低。

表 4 围岩微米级、纳米级孔隙结构参数

岩性	微米级孔隙								纳米级孔隙		
	比孔容( $\times 10^{-4}$ cm <sup>3</sup> /g)				比表面积(m <sup>2</sup> /g)				比表面积 (m <sup>2</sup> /g)	比孔容 ( $\times 10^{-4}$ cm <sup>3</sup> /g)	孔径 (nm)
	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>t</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>t</sub>			
泥岩	32	68	30	130	0.109 4	1.672 2	1.682 5	3.464 2	13.197 2	201	5.3
砂质泥岩	22	78	36	136	0.018 6	1.563 1	1.653 5	3.235 2	9.892 0	165	5.4
炭质泥岩	23	66	29	118	0.011 7	1.240 9	1.336 5	2.589 1	0.989 5	35	6.1
炭质砂岩	74	138	59	271	0.171 5	2.328 3	2.731 5	5.231 2	7.856	144	6.0
粉砂岩	90	78	21	189	0.611 0	3.393 7	3.295 9	7.300 6	3.384 0	90	7.3
细砂岩	93	85	24	202	0.079 6	1.322 6	1.169 8	2.572 0	4.196 0	120	7.4
煤	285	154	83	522	0.161 7	2.897 2	3.862 4	6.921 3	12.198 7	64	5.6

注:V<sub>1</sub>、V<sub>2</sub>、V<sub>3</sub>、V<sub>t</sub> 分别表示孔径>100 nm、100~10 nm、10~7.2 nm 的大中孔、过渡孔、微孔以及总孔容,S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>、S<sub>3</sub>、S<sub>t</sub> 表示对应孔径段的比表面积。

4 结论

(1)焦作煤田二<sub>1</sub> 煤微孔含量最高,其次是过渡孔,而大中孔含量小得多,具有很强的吸附能力和较强的扩散能力,但渗流或层流能力很弱。吸附能力随着温度的增加而减小,但在不同温度段,吸附量衰减速率不同,即:低温段衰减速率大于高温段。

(2)煤层中割理不大发育,煤层整体渗透率较低,并且随着埋深的增加有降低的趋势。但在断块边界断裂构造附近区域的煤层渗透性较好,处于挤压应力状态的向斜轴部附近,渗透率极差。然而,研究区内煤层压裂处理渗透性可明显改善。

(3)含气量整体分布,自西北向东南有逐渐增大的趋势,且中部偏南区域含量最高。主力煤层的顶、底板多为致密的泥岩、粉砂岩,上覆地层有效埋深厚度大,阻止了煤层气的向上逸散,这些都对煤层气的

保存有利。

(4)区域构造控制着煤层含气性的总体分布规律,而井田构造与局部煤层含气性关系密切。表现为向斜轴部煤层气含量高于两翼,而背斜则呈现相反的趋势;区域大断裂带附近以及多组断裂的交会部位,煤层含气量往往较低。

参考文献:

[1] 卢耀东,张小东,高灶其. 河南省焦作煤田煤层气资源潜力调查评价报告[R]. 河南省地质矿产勘查开发局,2008:89-93.

[2] Clarkson C R,Bustin R M. The effect of pore structure and gas pressure upon the transport properties of coal:a laboratory and modeling study 2:Adsorption rate modeling[J]. Fuel, 1999,78(11):1345-1362.

[3] Karacan T,Okandan E. Fracture/cleat analysis of coals from Zonguldak Basin(northwestern Turkey) relative to the potential of coalbed methane production[J]. International Journal of Coal Geology,2000,44(2):109-125.

[4] 桑树勋,朱炎铭,张时音,等. 煤吸附气体的固气作用机—煤孔

隙结构与固气作用[J]. 天然气工业, 2005, 25 (1): 13-15.

[5] 秦勇, 宋全友, 傅雪海. 煤层气与常规油气共采可行性探讨——深部煤储层平衡水条件下的吸附效应[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(4): 492-498.

[6] 苏复义, 宁正伟, 郭友. 豫西石炭—二叠系煤层气资源前景研究[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(2): 23-25.

[7] 宋志敏, 孟召平. 焦作矿区山西组二<sub>1</sub>煤层含气量的控制因素探讨[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(2): 179-181.

[8] 何健坤. 焦作矿区构造特征及构造控气作用[J]. 煤炭学报, 1994, 19(4): 412-421.

[9] 叶建平, 秦勇, 林大杨. 中国煤层气资源[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998: 124-184.

[10] 孙斌, 邵龙义, 卢霞, 等. 盘关向斜煤层气成藏条件评价[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(3): 427-433.

Coal Reservoir Properties and Coalbed Gas Controlling Factors of Jiaozuo Coalfield

ZHANG Xiao-dong<sup>1</sup>, LIU Yan-hao<sup>1</sup>, ZHANG Zi-xu<sup>2</sup>, WANG Li-li<sup>1</sup>, LIU Hao<sup>1</sup>

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;  
2. School of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** Based on measures on coal samples and the relative previous data, the property of fracture and pore structure, permeability and adsorption of the II<sub>1</sub> coalbed methane reservoir in the Jiaozuo coalfield were systematically studied. The gas-bearing change law and the influence factors on gas-bearing properties were discussed using qualitative and quantitative analyses. The study shows, micropores are the major pore, transitional pores are the second and macropores are far less in the II<sub>1</sub> coal, thus for the kind of coal, the adsorption capacity is very high, the diffusibility is a little strong, but the capacity of seepage and laminar flow is very weak. The permeability coefficient is low and decreases with the burial depth of the coalbed, and the permeability also is influenced by the geo-structure and can be improved under hydraulic fracturing. The roof and floor of the II<sub>1</sub> coalbed provide favorable gas-preservation conditions, and the effective burial depth and faults structure are also the major factors causing gas-bearing change in the II<sub>1</sub> coal. The effective burial depth and gas-content is in positive correlation. The gas content in the axial part of the syncline is greater than that in the wings, and the relation is the very opposite in the anticlines. The gas content is often low near the regional faults or in the intersection part of the regional faults.

**Key words:** Jiaozuo coalfield; Coalbed methane; Coal reservoir properties; Gas-bearing properties; Influence factors.

(上接第 445 页)

Study on the Mechanism of Langmuir Capacity with Coal Ranks  
on Different Experimental Conditions

JIANG Wen-ping, ZHANG Qun, LI Jian-wu  
(Xi'an Branch, CCRI, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** By the calculation and analysis of the interactions of CH<sub>4</sub> with different coal structures, utilizing the knowledges of coal structure chemistry, coal adsorption theory, the varieties and diversities of the Langmuir volume with coal rank on the different conditions of air dried basis and equilibrium moisture isothermal adsorption experiments are explained, and coal molecule structure being the primary factor of the phenomenon of Langmuir volume with coal rank is put forward especially in this paper.

**Key words:** Coal rank; Methane; Langmuir volume; Mechanism.