

湖南煤层气地质特征及远景评价

李启桂 谢征康 彭再兰

(中南石油地质局地质大队, 长沙 410117)

湖南主要含煤地层为下石炭统测水组 and 上二叠统龙潭组, 含煤面积约 $5.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。区内煤系发育, 煤的演化程度处于成熟—过成熟阶段, 生气能力和吸附能力均较强。煤层含气量主要受控于含煤岩系的沉积环境、煤演化程度、埋藏深度、水文条件与构造条件; 煤层的孔渗性主要受控于煤岩类型、煤化程度及地应力。水力压裂和洞穴完井是改善煤层低孔渗性的较有效方法。湘中洪山殿贫煤试验区和斗笠山焦煤试验区为煤层气开发最有利地区, 目的层是上二叠统龙潭组煤层。

关键词 煤层气 地质特征 生气能力 远景评价 试验区 湖南

第一作者简介 李启桂 男 31岁 工程师 石油及天然气地质

湖南是中国南方诸省煤炭资源相对丰富的省份, 1994年在洪山殿试验区施工的湘煤1井, 经测试已获得煤层气流, 日产气最高 $2\,419 \text{ m}^3$ 。这一突破为湖南乃至南方煤层气勘查开发打开了新的局面。

1 区域成气地质条件

湖南含煤盆地的主体在湘中、湘东南地区, 其范围为北纬 $26^\circ \sim 28^\circ 30'$, 东经 $110^\circ \sim 113^\circ 30'$, 含煤面积约 $5.5 \times 10^4 \text{ km}^2$, 具工业价值的煤层在下石炭统测水组、上二叠统龙潭组及上三叠统一侏罗统。其中前二组煤的资源量占全区资源量的90%以上, 是研究的主要对象。

1.1 下石炭统测水组

测水组分布于北纬 $28^\circ 20'$ 以南, 东经 $110^\circ 30'$ 以东, 以涟源、邵阳两地区发育最好, 郴州地区次之, 含煤面积约 $2.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

测水组为海陆交互相含煤沉积, 由灰色粉砂岩、砂质泥岩、黑色泥岩及灰白色细砂岩、煤层组成, 厚 $155 \sim 495 \text{ m}$, 含煤1~8层, 其中三煤层和五煤层普遍发育, 单层厚 $0.70 \sim 4.70 \text{ m}$ 。可划分出四类不同的成煤区: (1) 冷水江-太平寺海湾泻湖成煤区; (2) 长沙-浏阳滨海三角洲成煤区; (3) 郴州耒阳陆缘滨海成煤区; (4) 邵阳-宁远滨海成煤区。以冷水江-太平寺海湾泻湖成煤区煤层发育最好。

1.2 上二叠统龙潭组

上段由灰、深灰色石英砂岩、粉砂岩、砂质泥岩、泥岩、页岩和煤层组成, 厚度变化较大, 有的地方仅 30 m 左右, 有的厚度达 $220 \sim 165 \text{ m}$ 。总的变化趋势是北纬 $27^\circ 40'$ 以南的“南型”沉积厚度大, 含煤3~7层, 总厚 $1.8 \sim 15.7 \text{ m}$, 煤层结构较简单, 层位较稳定; 以北的“北型”, 含煤1~6层, 仅一层煤稳定可采, 厚度变化在 $0.7 \sim 13 \text{ m}$ 之间, 涟源一带发育最好, 平均厚度大于 2 m 。

龙潭组为一套以过渡相为主的含煤沉积, 可划分出三个较好的成煤区, (1) 长沙-涟源滨海沼泽相成煤区; (2) 娄底-邵阳、醴陵-郴州海湾泻湖成煤区; (3) 祁东-零陵覆水海湾泻湖成煤区。

2 煤层气地质特征

2.1 物理化学特征

煤的显微组分一般以镜质组为主, 惰质组次之, 壳质组含量较低(表1)。其中镜质组含量随煤阶升高而增加。煤岩类型多样, 同一煤层中部多为亮煤, 顶底部为暗淡煤。不同煤阶煤质差异较大, 随煤阶上升, 挥发分减少。气煤常以低—中灰、中硫、低磷为特点; 肥、焦煤则低灰、低硫、低磷; 瘦煤以低灰为主, 低—中含硫; 贫煤一般为中灰、中含硫; 无烟煤以中灰为主, 比烟煤灰分、水分高, 而含硫较低(表2)。煤的地化特征有如下特点: (1) 有机碳含量在 75%~90% 之间; (2) 有机质类型为腐殖型; (3) 有机质演化程度高 R_o 。一般大于 0.9%, 最高达 5.8%, 均已进入成熟或过成熟阶段。

表1 湘中、湘东南煤岩显微组分表

%

地区	地 层	有机组分	有 机 显 微 组 分			无机组分	R_o
			镜质组	惰质组	壳质组		
湘中	测水组	$\frac{38.4 \sim 98.85}{88.44}$	$\frac{29.3 \sim 89.1}{84.07}$	少量~6.18	—	$\frac{1.05 \sim 61.6}{11.56}$	$\frac{2.42 \sim 3.65}{2.874}$
	龙潭组	北型 $\frac{72.3 \sim 98.62}{93.41}$	$\frac{54.16 \sim 93.7}{67.54}$	$\frac{6.35 \sim 43.82}{27.28}$	$\frac{3.0 \sim 8.10}{3.19}$	$\frac{1.38 \sim 27.7}{6.59}$	$\frac{0.67 \sim 1.63}{1.317}$
		南型 $\frac{91.5 \sim 98.92}{96.15}$	$\frac{59.32 \sim 76.13}{68.94}$	$\frac{13.0 \sim 37.62}{20.60}$	$\frac{1.38 \sim 10.08}{7.27}$	$\frac{1.08 \sim 8.50}{3.85}$	$\frac{0.8641 \sim 3.12}{1.484}$
湘东南	龙潭组	$\frac{55.09 \sim 100.0}{91.73}$	$\frac{65.32 \sim 75.34}{70.10}$	$\frac{18.28 \sim 25.2}{20.64}$	$\frac{0 \sim 0.20}{0.10}$	$\frac{\text{微量} \sim 44.1}{8.27}$	$\frac{2.475 \sim 6.74}{3.895}$

注: ①— $\frac{\text{最小}-\text{最大值}}{\text{平均值}}$; ②—有机组分+无机组分=100%

表2 湘中、湘东南地区煤层煤质表

%

含煤地层	地区	煤阶	W^*	A^*	V^*	S	C	H	N
龙潭组 (P ₂ l)	湘东南	无烟煤	$\frac{0.8 \sim 4.80^*}{2.42}$	$\frac{5 \sim 30}{15.97}$	$\frac{1.5 \sim 7.7}{5.97}$	$\frac{0.5 \sim 1.5}{0.77}$	—	—	—
	湘中	肥、焦、瘦 贫煤为主, 无烟煤次之	$\frac{0.4 \sim 4.57}{1.56}$	$\frac{2.88 \sim 36.96}{13.84}$	$\frac{6.35 \sim 36.43}{17.02}$	$\frac{0.51 \sim 5.59}{1.97}$	$\frac{84.04 \sim 91.97}{88.98}$	$\frac{3.95 \sim 5.34}{4.63}$	$\frac{1.0 \sim 3.18}{1.83}$
		气、肥、 焦煤为主	$\frac{0.96 \sim 2.94}{1.37}$	$\frac{2.69 \sim 27.0}{11.22}$	$\frac{15.22 \sim 40.86}{23.94}$	$\frac{0.41 \sim 4.78}{1.81}$	$\frac{83.89 \sim 90.46}{89.84}$	$\frac{4.20 \sim 90.46}{87.84}$	$\frac{0.91 \sim 2.19}{1.74}$
	测水组 (C ₁ d ²)	无烟煤	$\frac{0.82 \sim 5.10}{2.70}$	$\frac{3.52 \sim 43.33}{16.20}$	$\frac{2.67 \sim 12.33}{6.55}$	$\frac{0.40 \sim 5.84}{1.37}$	$\frac{75.38 \sim 94.77}{91.91}$	$\frac{2.10 \sim 4.59}{9.26}$	$\frac{0.50 \sim 3.52}{1.06}$

* 注①— $\frac{\text{最小}-\text{最大值}}{\text{平均值}}$; ②—未分析

2.2 变质特征

以无烟煤为主, 占 67.6%, 其中测水组为大面积的单一无烟煤。湘东南地区有少量烟煤; 湘中地区有湘潭—浏阳、娄底—涟源、邵阳—祁阳—隆回三个环形变质带^[1], 共同特点是靠近隆起区或隐伏体的环状外圈变质程度高, 离热源较远的环状内圈, 变质程度低, 多为低—中挥发分烟煤。

测水组煤层时代较老, 加上上覆地层厚度大, 以深成变质作用为主, 但后期的岩浆热变质作用对其亦有较大的影响。龙潭组煤层以岩浆热变质作用为主, 其次是深成变质作用, 局部叠加动力变质作用。含煤盆地

边部—200 m 以上的浅部，为高变质煤，向深部逐渐变为低—中挥发分烟煤。

2.3 含气特征

根据本区 101 个瓦斯样品的组分分析，气体组分具“三高一低一无”的特点。三高即高甲烷（均在 85% 以上）、高干燥比（ C_1/C_2-C_3 约为 636.63~750），高 $\delta^{13}C_1$ 值（一般在 -30 ‰ 左右，最重为 -25.4 ‰）；一低为低重烃组分（均小于 2%）；一无为无 H_2S 气体（或含量甚微），表明为典型的煤层气成因类型。

通过含气量资料统计，本区具有煤层含气量高、解吸速度快的特点，具备了煤层气开发的有利条件，其中龙潭组煤层的平均含气量达 19.07 m^3/t ，测水组煤为 19.86 m^3/t ，含气量最大的达 59.05 m^3/t （6901 井）。其中有些含煤矿区，与美国主要含煤层气盆地相比，具有含气量大的特点（表 3）。

煤层含气量高的矿区与下列五个因素有较密切关系。

2.3.1 沉积环境

湘中、湘东南地区龙潭聚煤初期，海域广泛收缩，在开阔的滨海平原上，泥炭沼泽普遍发育，成为最有利成煤区。煤层稳定、煤质最佳，含气量也大，如白沙、斗笠山、永来洪山殿等矿区。

2.3.2 煤的演化程度

大量的甲烷是由中挥发分烟煤（气肥煤）演变至低挥发分烟煤（焦—瘦煤）的

表 3 湖南与美国部分矿区煤层气含量表 单位： m^3/t

湖南	层位	平均含气量	美国盆地 ^[2]	含气量
渣渡	C_1d^2	24.05	阿巴拉契亚	0.16~16.04
冷水江	C_1d^2	16.63	勇士	9.00~13.98
芦毛江	C_1d^2	18.90	拉顿	2.84
斗笠山	P_2l	19.66	圣胡安锡达希尔	10.45
洪山殿	P_2l	18.48	皮申斯	6.97~22.74

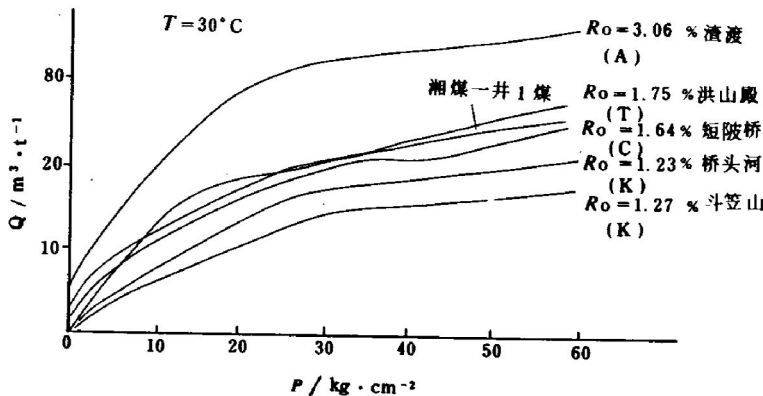


图 1 湘中矿区等温吸附曲线

过程中形成的（大约 150℃）^[2]。在保存条件和煤岩成分相似的情况下，以长焰煤到无烟煤 3 号，煤层含气量逐渐增高。主要原因是：（1）煤层生气量依赖于煤化程度；（2）随变质程度加深，煤的气体渗透率下降，气体沿煤层向外运移的速度变慢；（3）变质程度增高煤的吸附能力增强。煤层中可保留更多的吸附气体（图 1）。

2.3.3 埋藏深度

随煤层埋深的增加，煤层气的保存能力不断增强，含气量与瓦斯压力也随之增加，但当增加到一定深度煤层的储集性能及热稳定性变差，因而含气量与瓦斯压力增加的速度呈递减趋势。本区煤层气的富集深度一般为 600~800 m（图 2），但这并不意味着深部气量可以忽略，如金竹山矿区 8 805 孔于 958.9 m 深处含气量亦达 22.54 m^3/t 。

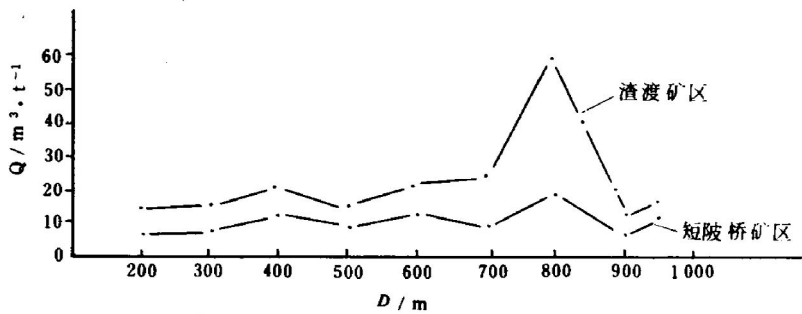


图 2 含气量 (Q) 与深度 (D) 关系图

2.3.4 水文地质条件

测水组水文地质条件相对简单,气体的保存较好。龙潭组“北型”煤水文条件复杂,煤层含水性较强,因而含气量相对较低,如恩口、桥头河等矿区,含气量小于 $10 \text{ m}^3/\text{t}$;“南型”煤水文条件简单,隔水层厚度大,煤层含水微弱,含气量一般大于 $15 \text{ m}^3/\text{t}$ 。

2.3.5 构造作用

在构造应力下,煤层最易变形、变位,导致含气量重新分布。在压扭性应力较强的地区,气量保存较好;张应力过强的地区,则不利于保存,煤层气逸散。

2.4 储集特征

2.4.1 孔隙

基岩孔隙度、孔容、孔面积、平均孔径等随煤变质程度(煤阶)不同而变化。孔隙度在焦煤和无烟煤3号较高,分别为9.8%和14.1%;孔容变化在 $0.013 \sim 0.0668 \text{ mm}^3/\text{g}$ 之间,有两个高峰段,前段峰为肥—焦煤、后峰在贫煤—无烟煤3号之间;孔面积一般大于 $13 \text{ mm}^2/\text{g}$,但气煤略低于各牌号烟煤;孔径 $700 \times 10^{-10} \sim 1300 \times 10^{-10} \text{ m}$ 以焦煤最高,气煤最低;微孔体积变化复杂,数据波动大,趋势是随煤阶增高,体积增大。总体而言,焦煤—无烟煤3号的孔隙发育较好,以次生孔隙为主,有气孔、溶蚀孔、失水孔等。显微组分中镜质体、丝质体含量高,孔隙度较好,壳质体的孔隙最不发育,光亮煤的孔隙度最发育。

裂缝包括内生裂隙和外生裂隙^[3]。前者的发育程度严格受煤阶、煤质及煤岩类型的控制(表4);后者主要受控于煤体结构。

表4 煤岩类型与内生裂隙线密度(条/5 cm)关系表

矿区	煤阶	光亮煤	光亮-半亮煤	半亮煤	半亮-半暗煤	半暗煤	半暗-暗淡煤	暗淡煤
斗笠山	焦煤	45	38	32	31	27	20	11
洪山殿	瘦、贫煤	35	33	20	19	—	—	—
晓云	无烟煤	22	—	—	—	10	7	6

煤的渗透率均较低在 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右(表5);但通过对煤层实行解放措施后,渗透率明显改善,可以增加几倍至几十倍,有的煤层可增加100多倍。湘煤1井在未进行洞穴应力释放前产气量为 $1781 \text{ m}^3/\text{d}$,洞穴完井后气产量则高达 $2419 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

表5 煤层渗透性测试结果表

地点	煤层	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	解放煤层 渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	增加倍数
坦家冲井	6	0.006~0.011	0.048~1.300	8.1~110.0
里王庙井	6	0.003~0.008	—	—
洪山殿矿区	4	0.005~0.007	0.528~0.950	96.0~124.0

煤层的渗透率受许多地质因素控制,煤演化程度、地应力、水文地质条件及构造运动而引起的裂隙发育程度直接影响渗透性的好坏。对某一煤层来说,影响因素还包括埋深、煤岩类型及煤体结构等。

2.4.2 储层类型

根据矿区煤层的生气量、煤层结构、孔渗性、吸附性能及水文地质条件等综合因素,并着眼于钻井工艺,将本区煤储层大致划分五种类型(表6),其中Ⅰ型和Ⅰ型为优先勘探开发的对象。

表6 湘中、湘东南煤储层类型划分表

储层类型	煤 阶	储 层 特 征	代表矿区	相对级别
I 型	焦、贫煤	碎块、碎裂状,基岩孔隙度较大为5%,内生裂隙密度大于7条/cm,外生裂隙延伸不远,渗透性较好,生气量和吸附能力较大,吸附曲线形态好,含气量为15~20 m ³ /t,水文条件简单—较复杂,属较易保护型。	洪山殿矿区 蛇形山井田 斗笠山矿区 香花台井田	好
I 型	焦、贫煤	块状煤,基岩孔隙度为6%左右,外生裂隙很发育,延伸远,渗透性好,生气量和吸附能力较大,吸附曲线形态好,含气量20 m ³ /t左右,水文条件简单,属易保护型。	洪山殿矿区 咸沙坝井田 斗笠山矿区 柑子山井田	最好
II 型	无烟煤	块状为主,基岩孔隙度不发育,总孔隙度为6%,但内生裂隙较发育为3条/cm,渗透性好,生气量和吸附能力较大,含气量为15 m ³ /t左右,水文条件简单,属易保护型	冷水江矿区 晓云井田	较好
IV 型	气肥煤	块状为主,基岩孔隙度不发育,基岩孔隙度较低常小于5%,内生裂隙较发育,渗透性好,生气量低,吸附能力中等,含气量常小于10 m ³ /t,水文条件复杂	恩口、桥头河、 牛马司等矿区	一般
V 型	瘦—无烟煤	粉状煤为主,基岩孔隙很发育,常大于10%,渗透性差,煤层遭强烈褶皱变形,内生裂隙掩盖生气量很大,吸附性能很强,含气量常大于20 m ³ /t,属多生多储不易保护型。	渣渡、金竹山等 矿区	差

3 远景评价

3.1 洪山殿贫煤型试验区

该区含煤面积43 km²,上二叠统龙潭组含煤5层,总厚4.8~16.8 m,其中I、II煤层为主采层。矿区为一近椭圆形复式向斜构造,长轴呈北东东向,断层较少,有利于煤层气的保存。

I煤层平均厚1.8~2.7 m,为块煤及部分碎裂煤,结构简单、层位稳定、半亮—光亮型,属中灰低硫的贫煤,含气量平均达18.48 m³/t。基岩孔隙十分发育,孔隙度平均8%左右,孔容0.0658 mm³/g,孔面积14 mm²/g;中孔占34.72%,微孔次之,占33.52%,小孔占19.47%,大孔占12.24%;有原生孔隙和次生孔隙两类,次生孔隙中气孔占绝大部分;内生裂隙线密度达7条/m,呈网状结构。等温吸附试验表明,其V_L为33.2 cm³/g, P_L为2.188 MPa。

II煤层厚1.18~2.4 m,最厚达8.9 m,块煤为主,结构简单、半亮—半暗型煤,为低灰、低硫的贫煤,含气量平均达24.1 m³/t,气体甲烷组分高达98%。孔隙度平均10%,以中等孔隙为主;内生裂隙线密度达8条/cm,呈网状结构,渗透性较好。等温吸附试验表明, V_L为32.73 cm³/g, P_L为1.429 MPa。储层类型以II型为主。在该区施工的一口煤层气井,已获得煤层气流,日产量最高达2 419 m³。煤储量达亿吨;可采煤层气资源量达几十亿立方米,是一个小而肥的煤层气区,以立新井田为优先勘探开发区。

3.2 斗笠山焦煤型试验区

斗笠山矿区为不规则三角形,含煤面积68 km²,含煤地层为龙潭组上段属“北型”,含煤层仅II煤层为主采煤层,厚1~8 m,平均厚2.5 m,煤层结构简单,厚度较稳定,为半亮型的低灰、低硫焦煤,煤储量

达亿吨。

该区煤层基岩孔隙发育, 平均 5% 左右, 中孔、微孔为主。以次生孔隙为主, 有气孔、溶蚀孔、失水孔等。内生裂隙线密度最高达 9 条/cm, 储层类型属 I 型。煤层含气量平均 $17.91 \text{ m}^3/\text{t}$, 煤层气资源量达几十亿立方米。其中香花台井田具备了煤层气勘探开发的基本条件, 可以优先上钻。

3.3 冷水江无烟煤试验区

该区含煤面积 90 km^2 , 为下石炭统浏水组含煤地层, I 与 V 煤层为主采煤层, 全区稳定。I 煤层一般厚 1~5 m, V 煤层 2~4 m, 均为低挥发分无烟煤 3 号, 总储量达几亿立方米, 平均含气量 $16.64 \text{ m}^3/\text{t}$, 预测煤层气资源量达几十亿立方米。

该区煤层以块状为主, 孔隙度小于 5%, 内生裂隙不发育, 但为了开拓湖南乃至南方大片无烟煤的煤层气, 选择该区进行试验仍是十分必要的, 一旦成功, 将对南方煤层气勘探产生重大影响。

参 考 文 献

- 1 邓光辉, 谢征康. 湘中含煤盆地煤层气地质特征和远景评价. 湖南省地质学会会刊. 1993, 26: 104
- 2 Ayers W B Jr. 关于煤层甲烷资源的认识. 见: 中国石油天然气总公司科学技术情报研究所. 煤层甲烷气的勘探与开发技术. 北京: 石油工业出版社. 1991. 2
- 3 黄景城. 煤层甲烷开采概述. 见: 华北石油地质局情报室. 煤层气译文集. 郑州: 河南科学技术出版社, 1990. 13

GEOLOGICAL FEATURE OF COAL GAS IN HUNAN AND ITS PROSPECTS

Li Qigui Xie Zengkang Peng Zhailan

(Geological Brigade, Central-South Bureau of Petroleum Geology, MGMR, Changsha)

Abstract

Coal measures in Hunan Province are mainly in the Lower Carboniferous Cheshui Formation and Upper Permian Longtan Formation. The coal-bearing areas totalled $5.5 \times 10^4 \text{ km}^2$. The coal series within the study area are well developed. The degree of coal evolution has reached mature-over mature stage with relatively strong gas-producing capacity and absorptivity. The gas content of the coal beds is controlled by the depositional environment, the degree of coal evolution, buried depth, hydrologic condition and geological structure of the coal-bearing measures, while its porosity and permeability are mainly controlled by coal-rock type, coalification degree and ground stress. Hydraulic fracturing and cave completion are effective ways to improve poor porosity and permeability. Hongshandian lean coal experimental zone in Central Hunan and Duolishan coke coal experimental zone are the most favourable regions to develop coal-bed methane. The target bed is the Upper Permian Longtan Formation.