

文章编号: 1001- 6112(2006)03- 0302- 05

煤层排烃系数的定量计算方法

——以临清坳陷东部康古 4 井为例

徐春华^{1,2}, 孔凡顺³, 王欣辉⁴

(1. 中国地质大学 研究生院, 武汉 430074; 2. 中国石化 胜利油田分公司
勘探项目管理部, 山东 东营 257000; 3. 山东煤炭地质工程勘察研究院,
山东 泰安 271000; 4. 中国石化 胜利油田分公司 胜利采油厂, 山东 东营 257041)

摘要: 煤层作为一种重要的煤成气源岩和特殊的储集岩, 在热演化程度一定的前提下, 其生气量和甲烷生成量是一定的, 其吸附气量与排出量互为增减, 并处于动态平衡。根据这一认识, 首次提出定量计算煤层排烃系数的思路与方法。利用热压模拟试验确定煤的不同显微组分的生气量; 针对不同地区、不同层位煤层显微组分组成不同的特点, 提出采用公式法计算煤层的甲烷生成量; 同时重点对 Kim 建立的煤层甲烷含量与煤的变质程度和埋深的关系曲线进行了计算机拟合, 得到不同演化阶段埋深与吸附气量的关系曲线和方程, 用以预测煤层的含气量。以临清坳陷东部康古 4 井区石炭—二叠系煤层为例进行了煤层排烃系数的计算, 计算出的甲烷生气量与模拟甲烷生气量可比性较好, 但仍存在小于 5% 的误差; 计算出的煤层排烃系数随煤层成熟度的增高而增大, 由低演化阶段的 77% 逐渐增至高演化阶段的 90% 以上。

关键词: 模拟生气量; 甲烷生成量; 吸附气量; 排气量; 排烃系数; 煤层; 临清坳陷

中图分类号: TE155

文献标识码: A

1 问题的提出

油气资源量评价过程中, 一个比较重要的参数是合理选择出的生聚系数值, 这对油气资源前景的评价起决定作用。

所谓生聚系数是指烃源岩生成的油气总量中, 排出和聚集的量占油气总生成量的百分比, 它包括排烃系数和聚集系数 2 个参数。由于无法恢复排烃的全过程, 对排烃系数这一中间过渡性参数很难求取。因此, 通常采用生聚系数(聚集量/生成量)进行资源量的估算。生聚系数的选择方法包括推测或与邻区类比和地质因素分析法等, 但这些方法缺乏一定的理论依据^[1], 因而成为长期困扰石油地质界的难题。但煤层的特殊性决定该问题可以解决。

煤层作为煤成气的主要源岩之一, 其生气量主要受煤的显微组分和成烃演化阶段的影响; 同时作为一种特殊的储集岩, 其吸附气量则受埋藏深度、构造条件、煤层顶底板岩性、煤层厚度等因素的综合影响^[2~5]。

Tissot 等^[6]曾指出: 与煤和含煤岩系的巨大固相有机物含量及其甲烷生成量相比, 煤系生成重烃的潜力是很有限的。煤层生成的天然气即煤型气

一部分被煤层本身吸附, 形成煤层气; 另一部分发生运移, 即排烃作用, 其中的部分气体在运移过程中散失, 部分运移至圈闭中聚集, 形成煤成气藏。发生运移的气体量占总生气量的比例, 即是所谓的排烃系数。模拟试验表明, 随着热演化程度的提高, 甲烷的累积生成量越来越大, 并具有一定的规律性^[7~10]。因此对于演化程度一定, 即埋藏深度一定的煤层, 其生气量是一定的, 甲烷生成量也是一定的, 煤层吸附甲烷的量与排出量是互为增减的, 并处于动态平衡。

因此, 只要能够预测煤层的生气量、甲烷生成量和甲烷气吸附量, 就可确定煤层的排出气量, 进而定量计算出煤层的排烃系数。

2 煤层生气量的确定

热压模拟实验是确定烃源岩生烃潜力的主要手段, 包括常规热模拟试验和水介质热模拟试验。水介质热模拟试验是在常规热模拟试验基础上更接近实际地质条件的热模拟, 由 Lewan 等在 1979 年提出, 20 世纪 80 年代得到世界范围内的广泛重视和应用^[11]。

本研究利用了胜利油田“八五”国家重点科技

收稿日期: 2006- 01- 25; 修订日期: 2006- 03- 27。

作者简介: 徐春华(1967—), 男(汉族), 山东莱州人, 博士生、高级工程师, 主要从事油气勘探综合研究及管理工作。

基金项目: 国家油气战略选区项目(XQ2004- 03)。

成果——烃源岩快速模拟评价法, 该方法是将样品置于 10 mL 带高压阀门排气口的不锈钢样品管内, 将样品管放入同一恒温炉内进行热模拟试验。

2.1 煤岩显微组分的生气量模拟

研究表明, 不同地区煤的热模拟产烃率明显不同^[7-10], 究其原因, 是由于不同地区煤的显微组分不同造成的。实验表明, 镜质组、丝质组和壳质组在煤化作用过程中, 产烃能力有很大的差别^[8-10, 12-14]。为了确定不同显微组分的生烃能力, 对山西浑源石炭—二叠系长焰煤的显微组分进行了分离, 并进行了热模拟试验。

原样品镜质组反射率为 0.59%, 分离纯度均在 95.5% 以上(表 1), 满足热模拟试验要求。

通过热模拟试验, 获得不同显微组分的产烃率(图 1), 从中可以得出 3 点结论: 1) 丝质组的产气量最低, 终极产气量($R_o = 4.0\%$) 为 $322 \text{ m}^3/\text{t}$, 且气体组分中 C_2 以上烃类极少, 而 CO_2 生成量最高; 2) 壳质组的产气量最高, 终极产气量达 $884 \text{ m}^3/\text{t}$, 且气体组分中重烃含量较多; 3) 镜质组产气量居中, 终极产气量为 $408 \text{ m}^3/\text{t}$, 重烃含量较丝质组多, 较壳质组少。

综上所述, 3种显微组分生气量总趋势是壳质

组> 镜质组> 丝质组, 其终极产气量的比例大致为 2.75: 1.27: 1。

2.2 源岩生气量的计算方法探讨

前面介绍了山西浑源长焰煤的热模拟试验结果, 确定了不同显微组分在不同演化阶段的生气量。从煤岩学角度出发, 煤岩的有机显微组分是由镜质组、丝质组和壳质组构成的, 它们在煤中的含量差别很大, 决定了不同地区甚至同一地区不同层位、同一层位不同层段煤的煤岩显微组分也不甚相同。因此, 根据不同煤岩显微组分的模拟生气量计算具体煤层的生气量十分必要且有实际意义。

在经过煤岩显微组分鉴定, 确定某煤层的显微组分含量之后, 可以粗略地计算其在不同演化阶段的生气量, 公式如下:

$$Q_c = AE + BF + CV$$

式中: Q_c 为计算所得源岩生气量, m^3/t ; E, F, V 分别为壳质组、丝质组和镜质组百分含量, %; A, B, C 分别为壳质组、丝质组和镜质组在某一演化阶段的甲烷生成量, m^3/t 。

在缺少低演化阶段煤样的地区, 进行资源量计算时, 采用计算生气量的方法比直接引用其他地区的产烃率曲线进行资源量预测, 其结果更为可靠。原因是研究者可能不了解所引用产烃率曲线原煤样品的显微组分含量与研究区是否一致, 这样产烃率可能大也可能小, 同时确定的主生气期也可能与研究区的实际不符, 造成研究上的失误。

3 煤层吸附气量的确定方法

近几十年来, 国内外许多学者提出了不同的测定和估算煤层吸附气量的方法, 最准确、最有效的方法是通过解吸试验获取煤层的吸附气量, 但在不具备使用该方法的地区, 其关键是预测煤层的吸附气量。

Kim^[15], Eddy^[16], 张新民^[17] 等对于煤层的吸附气量与埋深和变质程度的关系做了大量的研究工作, 并建立了关系图版, 但这些研究成果都没有考虑煤层厚度及顶、底板岩性。Topuz 和 Kramis 提出采用煤层埋藏深度和煤质化验资料计算煤层甲烷含量, 并建立了相应的计算公式^[3], 其前提是掌握样品的镜质体反射率和挥发分产率资料。研究过程中, 可以根据研究区的资料情况, 选择不同的方法进行煤层吸附气量的计算。

4 应用实例

临清拗陷东部目前仅有 7 口位于潜山高部位

表 1 山西浑源晚古生代长焰煤显微组分分离纯度
Table 1 The separation degree of the macerals in the Late Palaeozoic long-flame coal in Hunyuan, Shanxi

显微组分	分离纯度, %			
	镜质组(体)	惰质组(体)	壳质组(体)	黄铁矿
镜质组	98.5	1.1	0.3	0.1
丝质组	1.8	98.0	0.1	0.1
壳质组	1.2	3.1	95.5	0.2

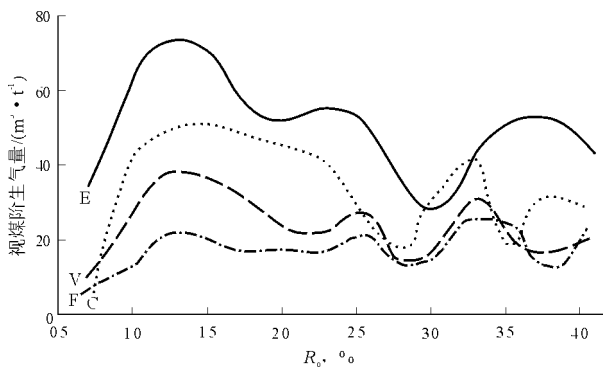


图 1 山西浑源石炭—二叠系长焰煤及不同显微组分模拟生气量曲线
C. 煤; F. 丝质组; V. 镜质组; E. 壳质组

Fig. 1 Curves of simulating gas-generated quantities in Permian-Carboniferous long-flame coal and different macerals in Hunyuan, Shanxi

的探井钻遇上古生界, 勘探和研究程度总体较低。但该区一直是煤成气勘探前景呼声较高的地区, 研究工作从“八五”开始一直没有间断。其资源量计算过程中排烃系数主要采用类比方法确定, 但由于该地区的构造运动等实际情况与其他地区存在差别^[18], 导致不同的研究者在选取排烃系数时存在较大的差异, 因而煤成气资源量也存在较大的波动。因此利用算法准确地确定煤层的排烃系数是研究该地区煤成气资源量的重要步骤之一。

根据钻遇上古生界煤系地层的探井情况, 选择了其中的康古 4 井作为煤层排烃系数计算的实验点。该井位于高唐一堂邑潜山上, 煤系地层现埋深 2 700~ 3 000 m(地质历史时期的最大埋深为 3 100~ 3 400 m)^[19], 对应的 R_o 值为 0.6%~ 0.9%, 大部分处于长焰煤—气肥煤阶段, 个别煤层可能由于火成岩烘烤而形成无烟煤。

4.1 康古 4 井模拟甲烷生气量

为了准确地确定康古 4 井石炭系煤的甲烷生气量, 利用热压模拟试验确定了煤的生气量, 剔除非烃气及重烃等组分, 确定出甲烷的生成量; 同时利用算法计算了煤的甲烷生气量, 并将二者进行了对比。

康古 4 井石炭系煤的显微组分含量为: 壳质组 6.3%, 丝质组 6.4%, 镜质组 87.3%。其热模拟甲烷生气量和计算甲烷生气量结果见表 2。

从表 2 可以看出, 模拟甲烷生气量和计算甲烷生气量可比性较好, 但仍存在一定误差。究其原因, 第一, 各显微组分中仍包括许多亚组分, 其生烃潜力各不相同^[21]; 第二, 镜质组和壳质组在热演化过程中逐渐向丝质组转化, 三者的相对含量是逐渐变化的。

4.2 吸附气量的确定

康古 4 井没有煤层含气量的解吸试验数据, 无

表 2 胜利油区康古 4 井煤样模拟与计算生气量对比

Table 2 Contrast of the simulated and calculated gas-generated quantities of the coal in well Kanggu-4 in Shengli oil area

$R_o, \%$	热模拟甲烷 生气量/ $(m^3 \cdot t^{-1})$	计算甲烷 生气量/ $(m^3 \cdot t^{-1})$	误差, %
0.75	77	79	2.5
1.00	119	121	1.2
1.50	213	198	- 7.0
2.00	268	256	4.5
2.50	319	306	4.0
3.00	345	339	1.7
3.50	392	394	0.5
4.00	428	432	0.9

法直接得到煤层的吸附气量资料, 也没有进行煤质分析, 可利用的资料只有煤层的埋藏深度和镜质体反射率(R_o), 因此只能借助 Kim^[15]建立的煤层甲烷含量与埋深、煤级的关系曲线(图 2)进行煤层含气量的探讨。

对 Kim 建立的煤层甲烷含量与煤变质程度和埋深的关系曲线图进行计算机拟合, 得到不同演化阶段埋深与吸附气量的关系曲线, 其函数表达式为:

$$\begin{aligned}
 y &= 3.48 \ln H - 8.42, 0.8\% & R_o < 1.1\% \\
 y &= 3.66 \ln H - 8.31, 1.1\% & R_o < 1.5\% \\
 y &= 4.24 \ln H - 9.22, 1.5\% & R_o < 1.9\% \\
 y &= 4.47 \ln H - 4.94, 1.9\% & R_o
 \end{aligned}$$

式中: y 为煤层吸气量, m^3/t ; H 为煤层埋藏深度, m 。

据向奎等^[20]研究, 胜利油区上古生界煤系烃源岩 R_o 与埋深的关系式为:

$$H = -2466.70 \ln(R_o) - 3550.03$$

式中: H 为煤系地层埋深, m ; R_o 为镜质体反射率, %。

依据上述 2 种方程, 得到康古 4 井上古生界煤层不同演化阶段的最大吸附气量(表 3)。

4.3 煤层排烃系数的计算

前面确定了康古 4 井煤的生气量及不同演化阶段煤层的吸附气量, 再利用公式 $Q_{排} = Q_{生} - Q_{滞}$ 即可计算不同演化阶段煤层的排烃量。式中 $Q_{滞}$ 表示仍滞留在煤系烃源岩中的气态烃, 以吸附气、游离气和水溶气的形式赋存在煤层中。根据张新民等^[17]获得的不同深度下煤层中各种状态甲烷含量的计算值得出, 煤层水中的甲烷溶解量不到 1%,

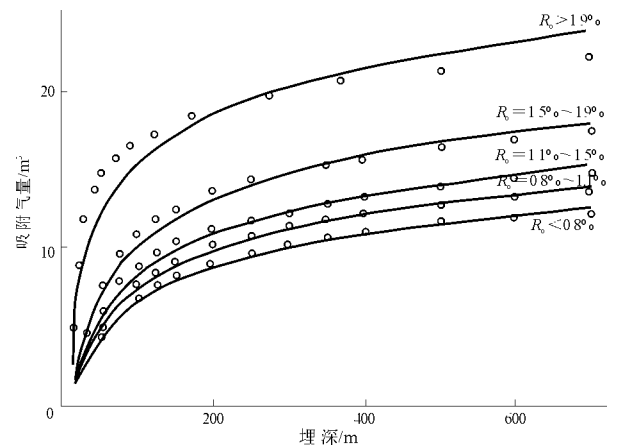


图 2 煤层甲烷含量与煤变质程度和埋深关系曲线
Fig. 2 Relationship of coal bed methane content, metamorphic grade of coal and burial depth

表3 胜利油区康古4井区上古生界
煤岩成熟度与排烃系数计算结果

Table 3 Maturity of the Upper Palaeozoic coal and calculation results of hydrocarbon expulsive coefficient in the well Kanggu-4 in Shengli oil area

$R_o, \%$	甲烷生 气量/ $(m^3 \cdot t^{-1})$	吸附气量/ $(m^3 \cdot t^{-1})$	排烃系数, %
0.85	87	19.65	77.4
1.00	119	20.07	83.2
1.25	169	22.15	86.9
1.50	213	26.49	87.6
1.75	244	26.83	89.0
2.00	268	33.47	87.5
2.25	319	33.71	89.5
2.75	319	33.96	89.4
3.00	345	34.13	90.1

可以忽略不计。因此, $Q_{\text{排}} \approx Q_{\text{吸}}$, $Q_{\text{排}} \approx Q_{\text{生}} - Q_{\text{吸}}$; 煤层的排烃系数 R 可以表示为:

$$R = Q_{\text{排}} / Q_{\text{生}} \\ = (Q_{\text{生}} - Q_{\text{吸}}) / Q_{\text{生}}$$

式中: $Q_{\text{排}}$ 为煤层排气量, m^3/t ; $Q_{\text{生}}$ 为煤层甲烷生气量, m^3/t ; $Q_{\text{吸}}$ 为煤层甲烷吸附气量, m^3/t ; R 为煤层排烃系数, %。

由此计算出康古4井区石炭—二叠系煤层的排烃系数为 77%~90% (表3)。从表3可以看出, 随着煤层热演化程度的提高, 生气量不断增大, 吸附气量也在增加, 但生气量的增加幅度大于吸附气量的增大幅度, 综合作用的结果, 导致煤层排烃系数也不断增大, 从低演化阶段 ($R_o = 0.85\%$) 的 77.4% 上升到高演化阶段 ($R_o = 3.00\%$) 的 90%。换言之, 在高演化阶段的烃源岩区, 寻找煤层甲烷气和煤成气都是有利的。这一结果与秦建中等^[21] 利用岩石热解法确定的煤系泥岩的排烃系数 (79%) 相近, 说明结果具有其合理性; 同时也从理论上证实了煤层高成熟度地区仍然是煤层气勘探的有利地区的认识^[17, 22]。

在 Kim 所建立的煤层甲烷含量与煤级、埋深的关系曲线中, 其煤层甲烷含量为煤层的最大吸附气量, 因而所得的排烃系数是最小排烃系数。

5 结束语

煤层的排烃系数是煤成气研究的重要组成部分, 过去通常采用类比的方法进行估计, 缺乏一定的理论依据。本文提出的煤层排烃系数定量计算方法, 对煤成气资源量的预测可能有一定的借鉴作

用。但由于临清拗陷东部上古生界资料所限, 只能利用 Kim 所建立的煤层甲烷含量与煤级、埋深的关系曲线进行煤层排烃系数的探讨, 没有结合煤层厚度、煤层顶、底板岩性等进行深入的研究, 这是本文的一大遗憾。希望通过该方法的探讨, 能对今后煤成气及常规油气资源评价过程中排烃问题的研究起到抛砖引玉的作用。

参考文献:

- 张洪年, 罗荣, 李维林. 中国煤成气资源预测[A]. 见: 地质矿产部石油地质研究所. 石油与天然气地质文集(1)[C], 北京: 地质出版社, 1988. 270~283
- 李明潮, 张伍济. 中国主要煤田的浅层煤成气[M]. 北京: 科学出版社, 1990. 120~130
- 杨申德, 徐春华, 宋国奇. 煤层气勘探与开发[M]. 山东: 石油大学出版社, 1994. 1~101
- 钱凯, 赵庆波, 汪泽成等. 煤层甲烷气勘探开发理论与实验测试技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997. 1~188
- 张建博, 王红岩. 山西沁水盆地煤层气有利区预测[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1999. 26~49
- Tissot B P, 威尔特 D H. 石油形成与分布[M]. 徐永元译. 北京: 石油工业出版社, 1989. 1~469
- 季生杰. 褐煤煤化作用模拟试验及其地质意义[A]. 见: 地质矿产部石油地质研究所. 石油与天然气地质文集(1)[C], 北京: 地质出版社, 1988. 295~302
- 张文正, 刘桂霞. 低阶煤及煤岩显微组分的生烃模拟试验[A]. 见: 煤成气地质研究编委会. 煤成气地质研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 1987. 222~228
- 关德师, 戚厚发, 甘利灯. 煤和煤系泥岩产气率试验结果讨论[A]. 见: 煤成气地质研究编委会. 煤成气地质研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 1987. 182~193
- 张福礼, 黄舜兴, 杨昌贵等. 鄂尔多斯盆地天然气地质[M]. 北京: 地质出版社, 1994. 81~84
- 中国石油天然气总公司勘探局. 石油地球化学进展[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998. 1~102
- 刘全有, 刘文汇, 秦胜飞. 煤岩及其显微组分热模拟成气特征[J]. 石油实验地质, 2002, 24(2): 147~151
- 李荣西. 煤源岩单组分化学结构及生烃性定量分析[J]. 石油实验地质, 2001, 23(1): 84~86, 107
- 何伟钢, 金奎励, 郝多虎. 煤中单组分湿式高压釜热模拟实验研究——以海拉尔盆地伊敏组褐煤为例[J]. 石油实验地质, 2004, 26(1): 89~93
- Kim A G. Estimating the methane content of bituminous coal-bed from absorption data[A]. In: U S Bureau of Mines. Report of Investigation[C], Washington D C: U S Bureau of Mines, 1977. 8245
- Eddy C E, Rightmire C T, Byrer, C W. Relationship of methane content of coal rank and depth: theoretical vs observed[A]. In: SPE/DOE. Unconventional gas recovery symposium [C], Pittsburgh: SPE/DOE, 1982. 117~122
- 张新民, 张遂安, 钟玲文. 中国的煤层甲烷[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1991. 1~294

- 18 柳忠泉, 邱连贵, 周桂芹等. 临清拗陷东部构造变动特征及控制作用[J]. 石油实验地质, 2004, 26(1): 31~ 34
- 19 徐春华. TTI法恢复地层厚度应用实例[J]. 石油地球物理勘探, 1996, 31(1): 131~ 135
- 20 向奎, 闫书忠. 济阳拗陷煤型气源岩特征及资源前景[J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(5): 11~ 15
- 21 秦建中, 贾蓉芬, 郭爱明等. 华北地区煤系烃源层油气生成、运移、评价[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 1~ 365
- 22 刘洪林, 赵国良, 王红岩. 中国高煤阶地区的煤层气勘探理论与实践[J]. 石油实验地质, 2004, 26(5): 411~ 414, 421

QUANTITATIVE CALCULATION OF HYDROCARBON EXPULSIVE COEFFICIENT OF COAL FORMATION

—TAKE WELL KANGGU-4 IN THE EAST OF LINQING DEPRESSION AS AN EXAMPLE

Xu Chunhua^{1,2}, Kong Fanshun³, Wang Xinhui⁴

(1. Graduate School, China University of Geoscience, Wuhan, Hubei 430074, China; 2. Administrative Department of Exploration Programs, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257000, China; 3. Shandong Research Institute of Coal Geological and Engineering Exploration, Taian, Shandong 271000, China; 4. Shengli Production Plant, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257041, China)

Abstract: Coal formation is not only an important source rock but also a kind of important reservoir of coal-formed gas. In a definite thermoevolutional degree, the generated gas quantity and methane quantity are also definite. The adsorption quantity and the expulsion quantity are convertible and in a dynamic equilibrium state. The method of calculating compulsive coefficient can be obtained according to this understanding. In this article, a method to calculate the gas-generated quantity was put forward based on the thermal-pressure simulating tests, by which the gas-generated quantities of different microlithotypes in different coal formations in different areas can be determined. At the same time, a way to determine the coal formation absorption quantity is introduced briefly. The curve showing the relations of coal formation methane content and its metamorphic grade and burial depth developed by Kim was fitted using computer. A series of curves showing the relationship between burial depth and absorption quantity during different evolutional periods are gotten. These can be used to predict gas-generated quantities. All the methods have been used to calculate the gas-generated quantity of Permian-Carboniferous coal formation and absorption coefficient in well Kanggu-4 area in the east of Linqing Depression. The calculated methane quantity matches the simulated methane quantity with the error less than 5%. The calculated hydrocarbon expulsive coefficients are increased with increased maturities, from 77% in the low evolutional period to 99% in the high evolutional period.

Key words: simulated gas-generated quantity; methane-generated quantity; gas absorption quantity; gas expulsive quantity; hydrocarbon expulsive coefficient; coal formation; the Linqing Depression