

有关间接法预测煤层气含量的讨论

鲜学福, 辜敏

(重庆大学西南资源与环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044)

[摘要] 对间接法预测煤层气(甲烷)含量有关的煤层气在煤中赋存状态、煤层气在煤中吸附模型及其相互之间的联系、煤层中游离煤层气及其含量相关计算所需的参数进行了分析讨论,并提出了相应的建议。

[关键词] 间接法; 煤层气; 甲烷; 吸附/吸收; 游离

[中图分类号] TQ530 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)08-0015-08

研究煤层气(甲烷)含量就是预测出在自然条件下,单位质量(或体积)煤体中煤层气(甲烷)的质量(或体积)。煤层中煤层气(甲烷)含量是煤层气开发的主要依据,是研究煤层气渗流和涌出的重要参数,是煤矿井下安全生产需要掌握的重要数据。因此,其预测研究的意义重大。

1 煤层气含量的预测方法

我国研究煤层气(甲烷)含量的测定是从20世纪50年代后期才开始的,采用的测定方法有:直接法、解吸法、井下测定甲烷含量和间接法。其中,间接法广泛应用于科学研究,并且应用于对直接测定法的验证^[1]。

间接法是在对煤的物理、力学、化学性质及其与甲烷相互作用研究的基础上,根据煤层中游离煤层气(甲烷)量 Q_1 和吸附量 Q_2 两部分之和来计算煤层中煤层气含量 Q 的^[1],即:

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (1)$$

但对间接法中 Q_1 和 Q_2 这两个值的计算颇有争议,至今还在研究中。

2 在 Q_2 值研究上的争议和讨论

2.1 关于甲烷在煤中赋存状态上的争议与讨论

2.1.1 甲烷在煤中赋存状态上的争议 主要有:

1) 液态说。根据煤层气中主要成分为甲烷,而甲烷的吸附热与液化热相近,认为甲烷以液态赋存在煤体中。

2) 甲烷水合物说。甲烷水合物分子式一般写成 $\text{CH}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 1 m^3 可燃冰可释放出 164 m^3 的 CH_4 和 0.8 m^3 的 H_2O ^[2]。文献[3]指出,突出煤层中的 CH_4 是以活性甲烷水合物形态存在于煤体渗透容器内;当突出时,大量甲烷来源于甲烷水合物的分解,并促使煤层中的煤层气压力升高,在极短时间内将粉碎煤抛向采掘空间。

3) 毛细管凝聚说。煤是多孔介质,具有微小孔隙,认为甲烷在微孔中产生的是毛细凝聚。

4) 化学键说。文献[4]认为,甲烷与煤表面分子间可能存在化学键,一般是亚稳态,只存在于大的压力条件下。

5) 游离、吸附和吸收态说。甲烷以游离、吸附和吸收状态存在于煤的裂隙和孔隙中。游离态甲烷服从气体定律,吸附态甲烷不服从气体定律,吸收态的甲烷进入到煤的分子团中,被煤分子吸收,与煤分子合为一体。

2.1.2 甲烷在煤中赋存状态的讨论

1) 液态说。根据 Ross 等的研究,甲烷的液化热为 9.4 kJ/mol ;根据 Quattrocchi 等的研究,在静电场很强的 NaCl 表面甲烷的吸附热为 12 kJ/mol 左

右，二者确实相近^[5]。但是，已知甲烷的临界温度为 190.6 K，临界压力为 4.6 MPa，而在一般地层中的地温大于 190.6 K。科学研究证明，在临界温度之上，不管施加多大的压力，都不能使气体液化^[6]。在一般地层条件下液态甲烷说很难成立。

2) 甲烷水合物。甲烷水合物的形成，除必须有充足的烃类气体来源外，还必须有适当的温压条件和地质构造环境。其形成的最佳温度为 0 ~ 10℃，压力则应大于 10.13 MPa。比较普遍的看法是：在极地温度低于 0℃，形成压力不需太高；在永久冻土带成藏深度上限约 150 m；在海洋中，通常在水深 300 ~ 2 000 m 处，温度为 25 ~ 15℃ 时，水合物也能稳定存在。在这些条件之外，尚未发现地层（包括煤层）中水合物的存在^[2]。

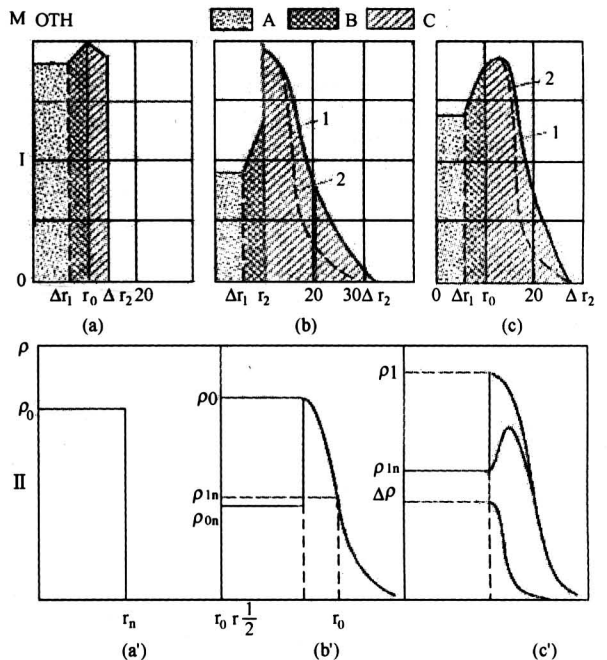
3) 毛细管凝聚说。Bruhauer 在研究等温吸附时指出，对吸附剂孔径仅 2 ~ 3 nm 以下的微孔，当相对压力由零增加时，发生多层吸附与毛细管凝聚^[7]。结果使吸附量急剧增加，而一旦所有微孔被填满后，吸附量便不再随相对压力增加了，呈现吸附饱和。根据笔者测定 9 个煤样的资料，小于 10 nm 的超微孔（或微孔）的孔容变化在 26% ~ 34.5% 之间^[1]，因此，毛细凝聚的现象只能在煤中的部分孔隙中发生。

4) 化学键说。笔者根据量子化学的计算，当甲烷分子吸附于煤（石墨）(002) 晶面时，最大吸附势仅为 2.65 kJ/mol^[5]，这显然属于物理吸附过程，即 Gasser 等人著作中所说的表面凝聚^[8]。根据辛勤、李灿、田一光等人的研究，要使甲烷分子在吸附过程中被活化（化学吸附），必须要有 O²⁻（如 Al₂O₃，CeO₂）的参加以便形成氢键才行^[5]。事实上，根据 -100 ~ 30℃ 温区的现场红外光谱实验也未观察到 CH₄ 在煤中形成化学吸附，即使是重氢甲烷 CH₄ 和 CO 亦是如此。因此，可以说，甲烷与煤的吸附属物理吸附（范德华力的作用）。

5) 游离、吸附和吸收态说。文献[9]介绍了用 X-射线衍射、电子显微镜等手段对“煤-甲烷-天然湿度”介质系统进行了研究，图 1 所示是用电子—影像光度测量法测定结果的示意图。图 1 中给出的是肥煤（实线，挥发分析出率为 18% ~ 24% 的煤）和焦煤（虚线，挥发分析出率为 24% ~ 30% 的煤）在有效半径为 1 000 nm 的孔隙（过渡孔或中孔）中，不同气压下甲烷的存在形式。图 I（a）、图 II（a'）表示小于临界压力时煤孔隙中甲烷的饱

和状态；图 I（b）、图 II（b'）表示在甲烷透入到孔周围空间之后，一个孔内的游离甲烷和吸着甲烷之间的比率；图 I（c）、图 II（c'）表示饱和作用缓和之后的 20 min，甲烷的分布。当煤承受 800 ~ 1 200 m 深的地应力作用时，中等变质程度煤层中甲烷的绝大部分（可达 85.9%）都是以吸附态赋存于煤的孔隙表面之上，游离甲烷仅占 5% ~ 12%。

以上的讨论说明，甲烷是以游离、吸附和吸收态赋存于煤的孔隙和裂隙的物理吸附。



I—The qualitative diagram of conversion process of methane from free to combination state; II—The methane volume ration during different disappeared stages. A—free methane; B—adsorbed methane; C—methane exits space between molecules; Moth—relative molecular weight

图 1 甲烷由游离状态向结合状态转变的动态图
Fig.1 The dynamic conversion process of methane from free to combination state

2.2 关于甲烷在煤中吸附模型上的争议和讨论

2.2.1 甲烷与煤物质相互作用的主要模型 根据不同的吸附理论现已提出了许多吸附等温式模型，如 Henry 公式、Langmuir 公式、Freundlich 公式、BET 方程、D - A 方程等等^[7]，但用于甲烷与煤物质相互作用的模型，主要是：

1) Freundlich 公式。是研究多孔物质吸附气体时得出的一个经验规律，也适用于液体。对于气体，其表达式可写成^[7,9]：

$$Q_2 = K(p/p_0)^{1/n} \quad \text{或} \quad Q_2 = K'p^{1/n} \quad (2)$$

式中， Q_2 为吸附量； p 为气体压力； p_0 为标准气体压力； K, K', n 为实验常数。

2) Langmuir 公式。是 1915 年 Langmuir 研究低压气体在金属上吸附时，根据实验数据和动力学观点得出的^[7]，其表达式为：

$$\theta = bp/(1 + bp) \quad (3)$$

式中， θ 为表面覆盖度； p 为气体压力； b 为吸附系数（吸附平衡常数）。

在理论上它来自于以下基本假设：是表面均匀的单分子层吸附；被吸附分子间无作用力；吸附平衡属动态平衡。由于这些假设与实际不符，因此其理论基础长期受到质疑。不过，由于 Langmuir 公式能较好地描述甲烷在煤物质中的吸附规律，所以现仍较普遍使用。

3) D - A (Dubinin Astaknov) 方程。是在微孔充填理论中使用较多的吸附方程。微孔充填理论是 20 世纪 40 年代 Dubinin 及其合作者提出的，当孔径尺寸与被吸附分子的大小相当时，吸附是对微孔的充填而不是像大多数吸附理论认为的吸附过程是发生在吸附剂表面上。这与 Langmuir 公式推导的基本假设不同。

D - A 方程，即取一个质量单位吸附剂（煤），它具有几何容积的微孔，如果完全充满微孔容积的甲烷量用 Q_{max} 表示，微孔中聚集的低于饱和压力的甲烷量用 Q 表示，并且 Q/Q_{max} 的比值 θ 称微孔充满程度^[6]，则：

$$\theta = f(A/E_0, n) \quad (4)$$

就表示微孔充满程度与吸附势 A 的关系。方程式 (4) 中的参数 E_0, n 为不决定于温度的常数，并且 n 表征微孔尺寸特性；常数 E_0 称之为特性能量。采用数学统计原理后，获得的热力学方程为：

$$\theta = \exp[-(A/E_0)^n] \quad (5)$$

2.2.2 对三种主要吸附模型（公式或方程）的讨论

1) Freundlich 公式。中国煤炭科学研究院重庆分院由实验得出 $n = 2$ ^[11]：

$$Q_2 = K'p^{1/2} \quad (6)$$

其适用范围在甲烷压力 $p \leq 2$ MPa 时。

2) Langmuir 公式。图 2 是从实验得到的甲烷在煤上的吸附等温线^[5]，并且在吸附和脱附过程中不存在所谓的吸附回线。这种类型的吸附等温线按照 Bruhauer 等人的分类，应属于第 1 类吸附等温

线。这类吸附等温线首先被 Langmuir 称之为单分子层吸附类型。其实，除单分子层吸附表现出第 1 类型吸附等温线外，当吸附剂仅有 2~3 nm 以下的微孔时，虽发生多层吸附与毛细管凝聚，其吸附等温线仍可表现为第 1 类型。就是说 Langmuir 公式理论的假设不符合实际，但由于它本质上是一种经验关系，所以仍然能用来描述甲烷在煤中的等温吸附关系。

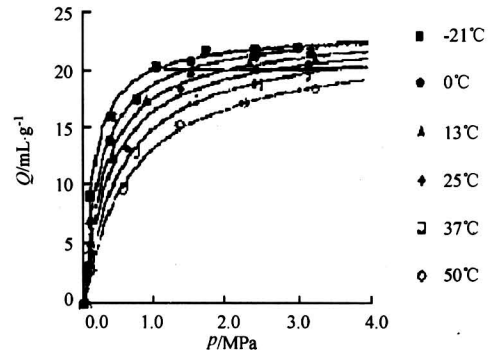


图 2 甲烷在煤上不同温度下的吸附等温线^[5]
Fig.2 The adsorption isotherms of methane on coal at different temperatures^[5]

3) D - A 方程。20 世纪 70 年代 Dubinin 及其合作者又把提出了根据一条吸附等温线确定的经验参数来计算不同温度时微孔吸附剂的吸附等温线。同时，提出微孔中的吸附质处于液体状态。

因为方程式 (5) 为吸附热力学方程，因此可用它来计算其他的温度下的吸附平衡。当用微孔吸附剂吸附蒸汽时，当转向超临界区域，也就是转变为吸附气体时，在吸附中未观察到跳跃形式的变化。这就使研究者可以把微孔容积充填的概念推广到临界温度之上的温度。

已知式 (5) 中的 A 可表示成 $A = 4.754 T \lg(p_s/p)$ ，为确定 p_s 的有效值曾提出了以下公式^[11]：

$$\lg p_s = M - NT \quad (7)$$

式中 M 和 N 为计算临界温度 T_c 和 $p_s = 101$ kPa 时蒸发温度 T_e 和临界压力 p_c 的常数。这个公式与 p_s 从 101 kPa 到 p_c 的实验资料非常满意的一致。

上述的吸附热力学方程的主要优点之一就在于把热力学的一些基本规律放到了其推导中，所以容易把方程的参数转变为热力学量，比如方程式 (5) 可以写成^[5,10]：

$$\theta = \exp[-(\Delta G/E_0)^n] \quad (8)$$

式中 ΔG 为吉布斯吸附自由能, 且 $\Delta G = RT \ln(p/p_s)$ 。

文献[4]介绍了用方程式(5)获得压力1~4 MPa区间天然煤甲烷吸附等温线的满意结果; А.Э.Перосян 则用方程式(5)计算了温度为30℃, 压力从0.1~0.81 MPa区间天然煤的吸附等温线, 获得与实验资料对比不超过13.9%的较好结果^[11]。然而用获得的参数计算其他温度的吸附等温线时未获得如此好的结果, 大多数情况计算资料与实验结果比较, 分散性很大。但是若用式(9)的两个指数式组成的热力学吸附方程来近似实验吸附等温线时, 即

$$Q_2 = Q_{\max 1} \exp[-(A/E_{01})^n] + Q_{\max 2} \exp[-(A/E_{02})^n] \quad (9)$$

则获得满意结果^[9]。文献[11]将此解释为煤中存在宽广的微孔分布, 是实验中所用的煤有两种微孔结构所造成的。

上述把式(5)中的 n 称为微孔尺寸的特性参数。有的学者称之为失去的自由度, 这是从另一个角度来说明孔尺寸特性的。当 $n=1$ 时, 方程(5)变为 Freundlich 方程; 当 $n=2$ 时, 变成 D-R (Dubinin Radushkevich) 方程, 它特别好地描述了在活性炭上的蒸汽吸附; 当 $n>2$ 时, 它比较好地应用于小孔煤 ($n=3$) 和沸石 ($n=3\sim 5$) 上的吸附^[11]。在后一种情况时, 方程式(8)可能描述极不同电子结构的分子吸附。

以上的讨论, 说明容积充填理论更适合于对超微孔(微孔)的吸附描述。

4) 对 Freundlich 公式、Langmuir 公式与 D-A 方程间的关系的讨论。Л.Т.Лйруни 曾论述了在有限压力范围 Langmuir 公式与 Freundlich 公式几乎相同^[9]; 陈昌国则从以下两个方面研究了 D-A 方程与 Freundlich 公式的关系^[5]:

根据式(8), 当 $p \rightarrow 0$ 时, $Q_2 \rightarrow 0$; 当 $p \rightarrow p_s$ 时, $Q_2 \rightarrow Q_{\max}$ 。由于 p_s 较大, 所以这两个极限值与 Langmuir 方程的极限值相同; 当 $p \ll p_s$ 时, 若选择适当的压力单位以保证 $\ln p / \ln p_s \ll 1$ 时, 可推导出 $Q_2 \approx Kp^n$ 。这与式(2)中的第2式相同。

根据上面的讨论可见, 在一定条件下 Freundlich 公式和 D-A 方程均可用 Langmuir 公式来表示。不过, 陈昌国研究微孔充填理论的吸附热后指出: 尽管 D-A 方程与 Langmuir 方程对煤和碳化样的吸附等温过程都能给予定量描述, 但导出的吸

附热却不一样, 这说明二理论有着本质上的区别。同时, 建议在讨论热力学参数时, 应以微孔充填理论的结果为好。

由于 Langmuir 方程简单适用, 尽管有些过程属微孔填充, 人们仍习惯使用它。

2.2.3 对 Langmuir 公式中一些参数的讨论 对于天然煤在除去灰分、水分后的有机煤物质吸附甲烷时, 若考虑水分和温度的影响, 常用以下修正的 Langmuir 公式表示天然煤中的甲烷含量^[1]。

$$Q_2 = Q_{\max} bp [\exp n(t_0 - t)] (100 - A - W) / 100(1 + 0.31w)(1 + bp) \quad (10)$$

式中 Q_{\max} 为饱和甲烷含量, 即 Langmuir 公式中的 a 值; b 为与温度有关的值; p 为煤中甲烷压力; A , W 为灰分、水分, t_0 为实验室测定煤的 a , b 值时的实验温度; t 为煤层温度, n 为实验系数, 它与 p 值有关, 常表示为:

$$n = 0.02 / (0.993 + 0.0714p) \quad (11)$$

实际上, 煤的煤化度对煤吸附甲烷含量有很大的影响。虽然不同学者的研究, 在量上有差异, 但其变化的规律是一致的, 似无须做深入讨论。现在, 仅就煤物质一定时, 温度变化对 Langmuir 公式中常说的吸附常数 a 和 b 值的影响加以讨论。

В.В.Ходот 根据实验资料得出, a 值随温度的变化没有规律, 而 b 值随温度的增高而减小^[12]。对这一问题陈昌国也做过研究, 当用煤物质中镜质组做的实验表明, Q_{\max} (或 a) 基本上不随温度的变化而变化^[5] (见图 3a); 采用文献[8]中吸附常数 $b(T)$ 的关系式:

$$b(T) = b_0 \exp(q/RT) T^{1/2} \quad (12)$$

和实验讨论了温度与 b 的关系, 得出了 $\ln(T^{1/2}, b)$ 与 T 成非常好的线性关系。式中 q 为吸附热。

图4是用天然煤样做的 a , b 值与温度 T 关系的实验^[5]。在进行数据处理时, 考虑到煤物质的不均匀性, 做了技术上的平均处理。从实验结果看出, 虽然由于灰分的影响, 实验点有些分散, 但 a , b 值与 T 的变化规律是清楚的, 在工程计算时, 可以采用

$$b = A - BT \quad (13)$$

式中 A , B 为实验常数。

2.2.4 多组分 Langmuir 方程的应用 矿井抽放煤层气中, 除主要成分甲烷外, 还有 N_2 , CO_2 以及微量或少量的重烃类气体和 H_2 , He , H_2S 等。这种气体组分吸附量的计算, 需要多组分 Langmuir 方程。

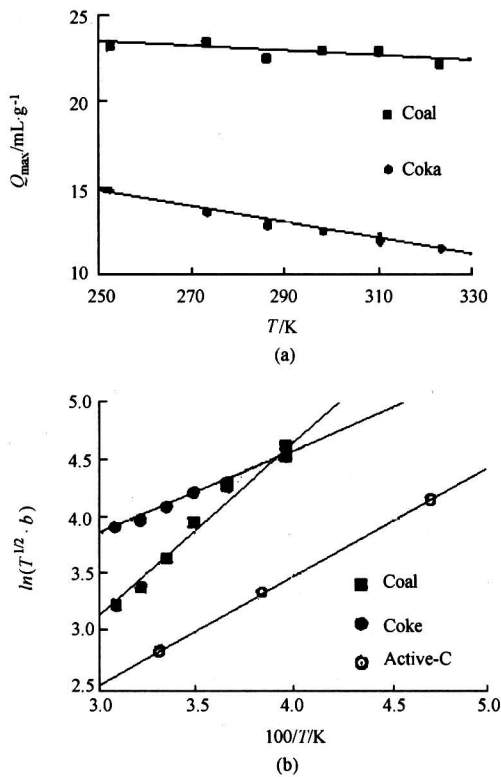
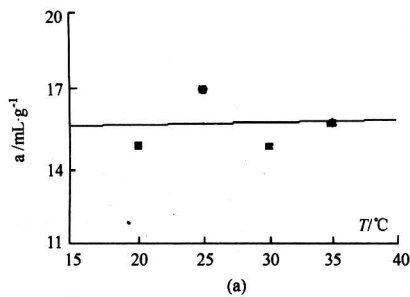


图 3 吸附常数随温度的变化

Fig.3 The dependence of adsorption constant on temperature



(a) —The dependence of the average of b value for coal of No.1 and No.2 on temperature;

(b) —The dependence of the average of a (Q_{max}) value for coal of No.1 and No.2 on temperature

图 4 天然煤 a, b 值与温度 T 的关系

Fig.4 The relations between a and b values of nature coal and temperature (T)

程导出了游离甲烷的体积分数计算公式^[14]。

以上两项研究说明，即使大深度煤层，其中甲烷的含量仍由两部分组成。

3.2 游离甲烷含量计算方法上的讨论

1) 最早的计算是把地下煤层孔裂隙中的游离甲烷含量利用 $p-v$ 方程转换成大气压（视为 101.325 kPa）下的甲烷体积^[1]，表示成：

$$Q_1 = m_0 p \quad (15)$$

式中， Q_1 为大气压下游离甲烷的体积； m_0 为煤的

辜敏曾对此问题做过详细的研究^[13]，其中用多组分 Langmuir 公式研究了 CH_4 和 N_2 在活性炭 T103 吸附剂上的吸附特性。实验结果表明，多组分气体的特性仍然可用 Langmuir 公式来描述：

$$Q_i = Q_{mi} b_i p y_i / (1 + \sum_{j=1}^n b_j p y_j) \quad (14)$$

式中 Q_{mi} ， b_i 值均为组分 i 单纯气体的 Langmuir 常数； y_i 为组分 i 气相分数；混合气体吸附总量

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i$$

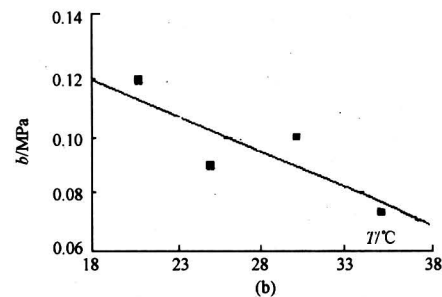
3 在 Q_1 值研究上的争议和讨论

3.1 大深度煤层中是否有游离甲烷存在

这是一个有争议和待讨论的问题。

1) Г.Д.Лидин 等讨论了大深度煤层中甲烷的势含量，利用 D-A 方程计算了 1 000 ~ 3 000 m 深，温度在 40 ~ 100 $^{\circ}\text{C}$ 区间无烟煤和焦煤的吸附甲烷体积分数和吸附饱和程度，得出即使在 1 000 ~ 3 000 m 的深度范围内仍有游离甲烷存在^[10]。

2) 许江等根据上述研究结果提出，煤的微孔隙中也是由吸附甲烷和游离甲烷两部分体积组成，并根据地应力和地温对孔隙体积的影响和 D-A 方



孔裂隙度； p 为地下煤层某点游离甲烷的压力。

这个计算式存在如下问题： m_0 难于确定；地层中的温度与地表大气压的温度并非总是一致的。

2) 在文献[12]中则把地下煤层孔裂隙中的游离甲烷含量用 $p-v-T$ 方程，并考虑到气体的压缩系数，转换成地表的甲烷体积，表示成：

$$Q_1 = m_0 p T_s / p_s T \xi \quad (16)$$

式中 p ， T 为地下煤层某点游离甲烷的压力和温度； p_s ， T_s 为标准状态下游离甲烷的压力和温度；

ξ 为气体压缩系数; m_0 同上。

这个计算式虽然弥补了式 (15) 的缺陷, 但仍存在 m_0 难于确定的问题

3) 程瑞端等则根据以下关系式导出了游离甲烷的计算式^[15]:

$$Q_1 = mp/\xi RT, m = (v' - v)/v',$$

$$m_0 = (v_0 - v_m^0)/v_0.$$

在将 $v_m^0 \approx v_m$ 作为近似, 得出: $m = 1 - (1 - m_0)v_0/v'$ 后, 再利用 $v_0/v' = \exp(\alpha\Delta\sigma_m - \beta\Delta T)$, 导出了 $m = 1 - (1 - m_0)\exp(\alpha\Delta\sigma_m - \beta\Delta T)$, 并将其代入 Q_1 的表达式和利用有效应力、地应力梯度和地温梯度的概念, 得出了游离甲烷含量的计算式 Q_1 , 它表示成:

$$Q_1 = \{1 - K'(1 - m_0)e^{-\alpha p}/\exp[(\beta G - \alpha D)]H\} p / \xi R(T'_0 + GH) \quad (17)$$

式中 R 为气体常数; m 为煤的孔裂隙度; v_0, v_m^0 为地下煤微元体和其卸压后, 在室温下的体积和煤骨架的体积; m_0 为相当于 v_0 时煤的孔裂隙度; v' 为温度、地应力 (围压) 改变后, 该含气煤微元体体积; β, α 分别为含气煤的热膨胀系数和体积压缩系数; D, G 分别为地应力梯度和地温梯度; H 为该微元体煤的埋藏深度; T'_0 为计算起点的温度; $K' = e^\alpha$ 。

式 (17) 算出的是煤层地下某埋藏深度处游离甲烷的量。同时, 其计算中找到了该埋深处煤的孔裂隙度与取出后 (即卸压) 煤在地表的 m_0 (容积测定) 的关系, 其计算具有一定的可操作性。

4 对 Q_1 和 Q_2 计算中所需甲烷压力、地应力和地温梯度的讨论

4.1 煤层中的甲烷压力

4.1.1 煤层甲烷的压力测定 甲烷压力的测定, 既可从地面在地质勘探时打钻孔测定, 也可在生产矿井的井下测定, 我国主要采用后者。其中又分为注入高压氮气, 以建立压力平衡的主动测压法以及被动测压法。多年来, 已对全国 24 个地区的煤层甲烷压力进行了测定 (如图 5 所示), 得到了以下两个经验公式^[5]:

$$\begin{aligned} p &= 0.1H, \\ p &= 0.1H - 20 \end{aligned} \quad (18)$$

式中, H 为煤埋深; p 为甲烷压力。图 5 的两根直线是企图用来界定甲烷突出危险性的, 用途有限。

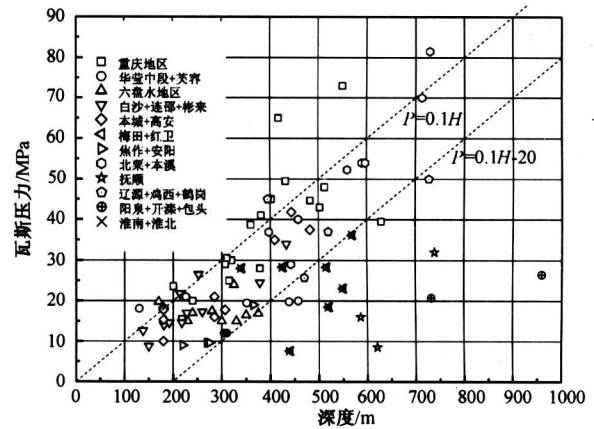


图 5 煤层甲烷压力与其埋深的关系^[1]

Fig. 5 The relation between the pressure of methane in coal bed and the ground depth^[1]

4.1.2 煤层甲烷原始压力的半经验计算公式 封闭体系的甲烷原始压力计算: 鲜学福等曾根据弹塑性力学和热力学理论, 采用 A.Бан 和 B.A.Максимов 的方法^[16] 导出了在封闭条件下甲烷原始压力与煤层埋藏深度 H 之间的关系式^[1]:

$$p = p_c + D(H - H_c) - \{2 - [4 - 2\beta G(H - H_c)]^{1/2}\} / K \quad (19)$$

式中 D, G 分别为地应力和地温梯度; β 为含甲烷煤的热膨胀系数; K 为含甲烷煤的体积压缩系数; p_c 为煤层埋深 H_c 时甲烷的原始压力; H 为计算的煤层埋深。

4.1.3 开放体系的甲烷原始压力计算 程瑞端等采用 Л.А.Склярлов 的方法^[17] 研究了煤层在地面有露头或有通道至地表以及开采矿井下水平未采煤层中甲烷压力与深度的关系, 并利用以下渗透系数与地温和地应力的关系式^[15]:

$$K(\sigma, T) = K_2(1 + T)^n e^{-\alpha\sigma} \quad (20)$$

式中, T, σ 分别为地温和有效地应力; K_2, n, α 均为实验值, 考虑到地应力和地温梯度, 把煤层中的甲烷来源视为一无限源, 采用一维稳定渗流方程导出了煤层甲烷原始压力的计算式:

$$p_H = \{A' [e^{\alpha DH} (B_1 + B_2 H + B_3 H^2) - B_1] + 1\}^{1/2} \quad (21)$$

式中 p_H 为计算的甲烷原始压力, D 为地应力梯度, H 为煤层埋深度; α 同于式 (20), B_1, B_2, B_3 为计算参数。

4.2 实测地层中的地温和地应力变化规律的讨论

4.2.1 实测地温随埋深变化规律的讨论 国内外

曾对地温进行过测定，图 6、图 7 分别是河南平顶山矿区的钻孔地温曲线^[14]和前苏联顿巴斯斯大林诺·马克耶夫斯基区的地温变化曲线^[10]。

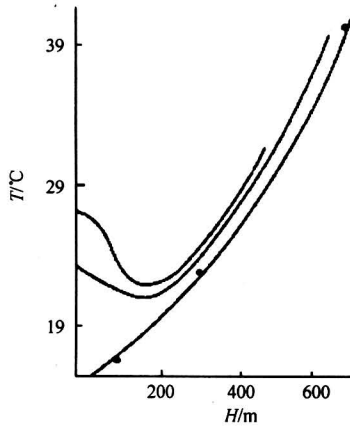


图 6 河南平顶山矿区的钻孔测温曲线^[14]
Fig.6 The temperature measured in the bore of Pingdingshan mining area^[14]

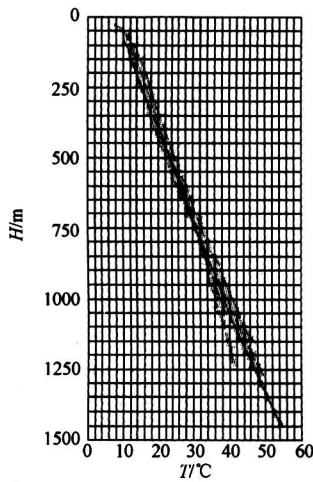


图 7 顿巴斯·斯大林诺·马克耶夫斯基区的地温曲线^[10]

Fig.7 The geotemperature curve for Dunbass Stalineo Makefske mining area^[10]

影响地温的因素很多，不过一般认为在恒温带以下，随着深度的增加，地温呈线性增加，这种关系可以表示为：

$$G = \Delta T / \Delta H = (T - T_c) / (H - H_c) \quad (22)$$

式中 G 为地温梯度值， T_c 、 H_c 分别为地表下恒温带（实际上为一点）的温度和深度， T 、 H 分别为待测定的推算温度和相应深度。对于一个具体区域，一般认为地温梯度为一常数值。若以地下 200

m 与 1 000 m 深度的地温资料作对比，二者之间相差几十度。因此，温度的影响仍然是不可忽略的，特别是对甲烷气体。

4.2.2 实测地应力随埋深变化规律的讨论 姚宝魁曾用岩石的 Kaiser 法测试了鱼田堡矿中心地带 Zk701 钻孔不同深度岩石 Kaiser 效应与应力的关系^[18]，如图 8 上的虚线所示。

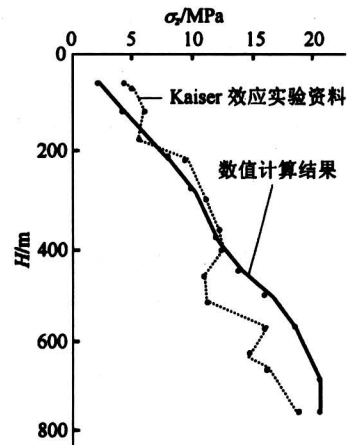


图 8 地应力 σ_v 与埋深的关系^[11,16]

Fig.8 The dependence of the geo-stress on the ground depth

许江曾用非线性有限元数值分析方法相对应地确定了该钻孔不同深度 σ_v 随垂深的变化关系^[14]，如图 8 上的实线所示。

将二者做一对比，可看出它们的变化规律是基本一致的，即拟合直线的斜率相差无几，地应力的数量级相同。不过，这种对比只是定性的，因为二者的围压不同。尽管如此，仍可以看出，地应力与埋深存在有梯度的关系，且可表示成：

$$G = (\Gamma - \Gamma_0) / (H - H_0) \quad (23)$$

D 为地应力梯度； $\Gamma = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$ ； H 为埋深； Γ_0 、 H_0 为地下某点 0 处的 Γ 值和深度。

5 结语

根据以上对间接法预测煤层气（甲烷）含量有关争议问题的讨论，提出以下几点认识：

- 1) 在一般地层情况下，煤层中不存在真正的液态甲烷和甲烷水合物。
- 2) 甲烷分子与煤物质的相互作用属范德华力，即物理吸附。
- 3) 煤的结构十分复杂，在裂隙和中孔以上的

孔壁存在甲烷的表面吸附,在微孔中能形成孔壁多层吸附的毛细管凝聚。

4) Langmuir 公式建立的理论基础虽然与实际不符,但由于其本质上是一个实验关系,且能描述十分复杂结构煤的吸附行为和应用方便,所以仍不失为一种计算煤吸附甲烷量较好的公式。

5) 理论和实验研究表明,在大深度煤层中仍然可能存在游离甲烷。在计算游离甲烷时,应考虑到煤层孔裂隙度是受地应力和地温所控制的,当把煤层中甲烷含量转变为标准状态的甲烷量时,不能忽略二者存在着温度上的差别。

6) 煤层中甲烷压力的预测建议采用式(19)或式(21)。

7) 对于矿井煤层气中甲烷组分的计算,宜采用多组分的 Langmuir 计算公式。

参考文献

- [1] 鲜学福. 我国煤层瓦斯渗流力学的研究现状及进一步发展和应用的展望[R]. 重庆: 重庆大学矿山工程物理研究所, 1997
- [2] 金庆焕, 杨木壮, 梁金强. 21世纪可能的的新能源——天然气水合物. 中国科学技术前沿, 中国工程院版, 第5卷[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002
- [3] Клюкин Г К. К вопросу о сущности внезапных выбросов [J]. Уголь, 1976, (7): 19~22
- [4] Зтингер И Л, Яовская М Ф. Физико-химические процессы в газоносных угольных пластах [J]. Уголь, 1981, (1): 11~13
- [5] 陈昌国. 煤的物理化学结构和吸附(解吸)甲烷机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 1995
- [6] 董景山, 李敬. 流体热物理性质的计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 1982
- [7] 严继民, 张启元. 吸附与凝聚[M]. 北京: 北京科学出版社, 1979
- [8] Gasser P H P. 金属的化学吸附和催化作用[M]. 赵壁英等译. 北京: 北京大学出版社, 1991
- [9] Лйруни Л Т. 煤矿瓦斯动力学现象的预测和预防[M]. 唐修义等译. 北京: 煤炭工业出版社, 1992
- [10] Лидин Г Д, Зтингер И Л, Шульман Н В. О возможности теоретического расчёта потенциальной метан-осносности угольных пластов на больших глубинах [J]. Уголь, 1973, (5): 13~15
- [11] Перосян А Э. Исследование процессов озникновения внезапных выбросов Угля и газа [M]. Москва: Издательство Наука, 1978
- [12] Ходот В В. Внезапные выбросы угля и газа [M]. Москва: Государственное Нучно-Техническое Изательство Литературы горному Делу, 1961
- [13] 辜敏. 提高抽放煤层气中甲烷浓度的变压吸附基础研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2000
- [14] 许江, 尹光志, 鲜学福, 等. 煤与瓦斯突出潜在危险区预测的研究[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2004
- [15] 程瑞端. 煤层瓦斯涌出规律及其深部开采预测的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 1995
- [16] Бан А, Максимов В А. Влияние свойств горных пород на движение в них жидкости [M]. Гостотехиздат, 1962
- [17] Скаяров Л А. Изменение двления газа в угольном массиве с увеличением глубины его залегания [M]. Гостотехиздат, Дегазация угольных пластов, 1961
- [18] 孙广忠, 尹代勋. 矿山岩体工程地质力学研究[M]. 北京: 中国科技文献出版社, 1993

Discussion on the Content of Coal Bed Gas Predicted by Indirect Method

Xian Xuefu, Gu Min

(Key Lab for the Exploitation of Southwestern Resources and the Environmental Disaster Control Engineering of Education Ministry of Chongqing University, Chongqing 400044, China)

[Abstract] Some dispute problems about the content of coal bed gas (methane) predicted by indirect method, including the existing status of the methane, the adsorption isotherm models for coal bed gas and their relationships, the free methane state in coal seam and the parameters for its capacity calculation, were discussed and analysed. The corresponding suggestions for these problems were also put forward.

[Key words] indirect method; gas in coal seam; methane; methane adsorbed; free methane