

王志文,潘保芝,李舟波,等. 基于等温吸附线的煤层气储层的测井评价技术. 地球物理学进展,2010,25(4):1352~1359,DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2010.04.025.

Wang Z W, Pan B Z, Li Z B, *et al.* Logging evaluation methods of coal-bed methane reservoirs based on adsorption equation. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2010, 25(4):1352~1359, DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2010.04.025.

基于等温吸附线的煤层气储层的测井评价技术

王志文^{1,2}, 潘保芝², 李舟波², 夏志林³, 龚劲松³, 徐卫良³
(1. 吉林油田勘探开发研究院, 松原 138000; 2. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026;
3. 中石化华东石油公司测井站, 扬州 225000)

摘 要 煤层气以吸附状态赋存在煤层中而有别于常规天然气,导致传统评价常规天然气储层的方法不再适于评价煤层.煤层气含量的计算是煤层评价中最重要的一个环节,总结对比前人应用地球物理技术评价煤层气含量各种方法得出,兰格缪尔等温吸附法是计算煤层气最合适的方法,因此被广泛应用到煤层气的评价中.一般的兰格缪尔等温吸附方程都是由某一温度下甲烷的等温吸附试验数据,得出适用于该温度条件下甲烷的等温吸附方程,而不能预测其它温度.本文针对烟煤和无烟煤提出了适于不同温度条件的等温吸附方程,此外还重点论述了在无煤心实验数据情况下的煤质测井分析方法.

关键词 兰格缪尔等温吸附方程,测井评价,煤质分析,煤层气,含气量

DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2010.04.025 中图分类号 P631 文献标识码 A

Logging evaluation methods of coal-bed methane reservoirs based on adsorption equation

WANG Zhi-wen^{1,2}, PAN Bao-zhi², LI Zhou-bo², XIA Zhi-lin³,
GONG Jin-song³, XU Wei-liang³
(1. *Exploration and Development Research Institute of Jilin oilfield company, Songyuan 138000, China;*
2. *College of Geo-Exploration Science and Technology Jilin University, Changchun 130026, China;*
3. *Logging station in Hua Dong petrol company of petrochemical, Yangzhou 225000, China*)

Abstract Coal-bed methane is much different from conventional natural gas because of its adsorpted condition. So the conventional method is not suitable for coal evaluation of this kind. The calculation of coal-bed methane content is an important aspect in the coal evaluation. Compare and summary of all the previous methods for calculating coal-bed methane content using geophysical technology, suggest that the Langmuir adsorption method is the most suitable method which has been widely applied to the evaluation of coalbed methane. The general Langmuir adsorption equation is obtained from adsorption test data under a particular temperature of methane that yields the adsorption equation under this temperature, which can not predict the other temperature. In this paper, we propose the temperature adsorption equation suitable for bituminous and anthracite coal. And we also focus on the coal quality analysis using logging data when there is no experimental data.

Keywords langmuir adsorption equation, logging evaluation, coal analysis, coalbed methane, gas content

0 引 言

煤层气是煤层在地质历史漫长的煤化作用过程中所生成的与煤层共生的气体.气体的主要成分是甲烷,还有少量二氧化碳、一氧化碳、二氧化硫及氧化氮等气体^[1].我国煤炭资源丰富,煤层气可采资源

量相当于常规天然气的 50%,煤层气产业具有广阔的发展前景.

在煤层气勘探开发过程中,广泛使用测井方法确定煤层厚度和埋深,进行煤质的测井分析和结合室内分析化验资料计算煤层含气量,处理解释煤层力学参数.针对煤层的复杂性和特殊性,以煤心分析实验资料为依据,建立测井解释模型,进行参数处理,深化煤层气地质研究.测井解释快速直观、分辨率高、费用低廉等特点,可弥补取心、试井及煤心分析等方面的不足^[2~6].

煤层气的储集机理和常规天然气有着本质的区别,常规天然气在地层中是以游离和溶解两种状态存在,而煤层气主要是以吸附状态存在于煤基质中^[1],煤层储集气体的特殊性意味着常规气层评价方法已经不再适用于评价煤层气.

1 煤层气储层的评价方法

1.1 划分煤层

煤层相对于围岩,物理性质差异明显,因此利用常规测井方法可以成功的划分出煤层^[7],并确定其深度和厚度.

1.2 煤质测井分析

许多文献^[8~10]利用体积模型只限于将煤质分成碳、灰分和水分三者来建立体积模型.实际上,碳应该细分成固定碳和挥发分,可以看到在煤质组分的测井响应表 1 中,由于挥发分和水分两者测井响应基本一致,因此将煤质划分为:固定碳+灰分+挥发物(挥发分+水分)三个组分,然后再利用图 2 中的关系根据灰分含量推测挥发分和水分的内容.在没有实验分析数据的情况下,可以利用测井资料,结合测井分析模型求取各个组分的含量.一般使用密度、中子和声波三孔隙度曲线中的任意两条建立体积模型,如密度测井和中子测井的组合,响应方程组为:

$$\begin{aligned}\rho_b &= V_g \rho_c + V_a \rho_a + V_{w+v} \rho_{w+v}, \\ \varphi_N &= V_g \varphi_{Ng} + V_a \varphi_{Na} + V_{w+v} \varphi_{N(w+v)}, \\ V_g + V_a + V_{w+v} &= 1,\end{aligned}\tag{1}$$

式中: V_g 、 V_a 、 V_{w+v} 是固定碳、灰分和挥发物(挥发分+水分)的相对体积; ρ_g 、 ρ_a 和 ρ_{w+v} 分别是固定碳、灰分和挥发物的密度值; φ_{Ng} 、 φ_{Na} 和 φ_{Nw+v} 分别是固定碳、灰分和挥发物的中子孔隙度值; ρ_b 和 φ_N 是煤层的密度测井和中子测井响应值.解此方程组得到固定碳、灰分和挥发物的体积含量 V_g 、 V_a 和 V_{w+v} . 然后利用下列关系式可以把固定碳 V_g 、灰分 V_a 和挥

发物 V_{w+v} 的体积含量转换为重量含量 W_g 、 W_a 和 W_{w+v} .

$$\begin{aligned}W_g &= V_g \frac{\rho_g}{\rho_b}, \\ W_a &= V_a \frac{\rho_a}{\rho_b}, \\ W_{w+v} &= V_{w+v} \frac{\rho_{w+v}}{\rho_b}.\end{aligned}\tag{2}$$

表 1 煤质组分测井响应^[11]
Table 1 The logging response of coal component

	密度 g/cm ³	中子 vol/vol	光电系数俘获截面 barn/cm ³	自然伽马 API
灰分	2.75	0.05	12	400
固定碳	1.35	0.45	0.2	20
挥发分	0.9	1	0.5	0
水分	1	1	0.5	0

但是由于煤层中灰分的组分变化很大,给解释中参数的选择带来一些不确定性.为了解决这个问题,目前广泛利用元素测井获得更为准确的煤层灰分的成分和含量^[12,13],从而使测井分析结果更可靠.

1.3 割理开度和孔隙度的计算

根据 A. M. Sibbit 与 O. Faiver(1985 年)公式,可用双侧向测井计算垂直裂缝的开度(宽度) ϵ ^[14]:

$$\Delta C = 4 \times 10^{-4} \cdot \epsilon \cdot C_m,\tag{3}$$

式中 ΔC 为浅侧向与深侧向的电导率之差, mS/m; ϵ 为裂缝开度(宽度), μm ; C_m 为侵入钻井液的电导率, S/m.

Yuanhai Yang 等人借助于常规储层的“地层因子”^[15,16],获得煤层的渗透率指数,用煤层的微球聚焦电阻率代替常规地层电阻率,对煤层割理孔隙度做初步计算:

$$\phi_f \approx \sqrt[1.6]{\frac{R_m}{R_{\text{MSFL}}}},\tag{4}$$

R_{MSFL} 为煤层微球聚焦电阻率, R_m 为泥浆滤液电阻率.

聚焦电阻率测井具有浅的探测深度并且受井眼影响小,因此用微球聚焦电阻率来计算.

1.4 煤层含气量的计算

利用测井资料计算煤层含气量的方法有两种:密度测井计算法和等温吸附理论计算法.密度测井法进行含气量计算的公式为^[17]:

$$C = \phi S_g / \rho,\tag{5}$$

C 为煤层含气量, m^3/t ; ϕ 为孔隙度, %; S_g 为含气饱和度, %; ρ 为地层密度, g/cm^3 .

煤层对甲烷的吸附状态符合等温吸附理论, 因此本文将采用等温吸附理论对实际地区的煤层含气量进行评价.

1.5 煤层渗透率的研究

渗透率是煤层气有效开发中最关键的参数之一. 影响煤层渗透率的因素十分复杂, 地质构造、应力状态、煤层埋深、煤体结构、煤岩煤质特征、煤级和裂隙系统都不同程度地影响着煤层渗透率^[18~27].

由于煤层气储层的煤基质的渗透率非常低, 煤层中流体和压力的传递几乎完全依靠自生裂隙(割理)和天然裂缝, 因此煤层渗透率主要受割理密度和割理发育情况控制. 此外随开启割理数量的增加, 煤层渗透率会增大, 气流主要沿分布广泛的面割理流动. 可见割理发育的区域是煤层气勘探开发的优选靶区.

将计算的裂缝开度和裂缝孔隙度与试井的渗透率相比较, 可以找出渗透率与裂缝开度或裂缝孔隙度的关系^[28].

2 基于等温吸附线煤层含气量的计算

为了对煤层含气量进行有效的评价, 前人经过大量的实验研究并总结了许多不同的方法, 这些方法主要有: 统计分析法^[2,7,29~35]、背景值法^[36]、神经网络法^[37~39]和等温吸附法^[40~45].

但是以目前的研究技术, 还无法实现直接确定煤层气含量, 而是根据测井资料间接获得, 鉴于煤层气特殊的储存状态, 目前普遍认为煤对甲烷的吸附属于物理吸附且采用等温吸附模型来进行表征. 等温吸附模型通常用兰格缪尔(Langmuir)方程描述:

$$C = \frac{V_L P}{P_L + P}, \tag{6}$$

其中 $C(\text{m}^3/\text{t})$: 压力为 P 时对应的理论含气量; C' 为临界解吸压力 P_{cd} 时对应的实测含气量; $P(\text{MPa})$: 吸附平衡时的气体压力; $V_L(\text{m}^3)$: Langmuir 体积, 其物理意义是, 在给定温度条件下单位质量煤饱和吸附气体时所吸附的气体体积; $P_L(\text{MPa})$ 为 Langmuir 压力, 其物理意义是, 煤对甲烷吸附量达到 Langmuir 体积一半时所对应的压力.

有煤心分析数据时, V_L 和 P_L 由等温吸附实验或解吸实验获得. 上世纪 90 年代以前, 我国一直利用干燥煤样, 采用容量法或重量法进行等温吸附实验. 近年来, 我国引进先进的高压吸附实验设备模拟

煤层条件获取等温吸附曲线, 最后二者均采用最小二乘法求出 V_L 和 P_L 的值.

无煤心分析数据时, 可由煤层的测井分析得到, 于是可以利用测井数据获得煤层等温吸附线和计算含气量的方法^[3,11].

1977 年 Kim 综合分析了煤心资料、压力和温度后得出基于测井分析结果的等温吸附关系式来评估煤层气含量. 1992 年 Hawkins 等人利用导出 Kim 方程的同一组数据建立了一个 Langmuir 煤级等温吸附方程. 在吸附平衡温度恒定的条件下, 煤吸附甲烷的量与甲烷平衡压力之间满足一定的关系, 称为等温吸附线(图 1), 反映了不同煤层对甲烷气体的吸附(解吸)特征和能力.

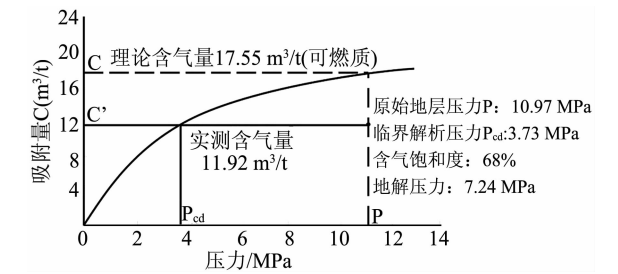


图 1 煤层气的等温吸附线
Fig. 1 Isothermal adsorption curve
of the coalbed methane

2.1 煤层气饱和度

煤层气储层含气饱和度的定义是实测含气量与理论含气量的比值, 而不是常规天然气储层所定义的单位孔隙中的气体体积. 实测含气量是煤心实验室解吸得到的含气量(图 1 中的 C'); 理论含气量是等温吸附线上与原始地层压力对应的含气量(图 1 中的 C), C 通过式(1)获得.

煤层气的饱和度的表达式如下:

$$S_g = \frac{C'}{C} = \frac{C'}{\frac{V_L P}{P_L + P}} = \frac{C'}{V_L} \frac{P + P_L}{P} \times 100\% . \tag{7}$$

2.2 煤层气理论最大采收率

临界解吸压力是指在煤层压力降低过程中, 气体开始解吸时对应的地层压力, 用 P_{cd} 表示(图 1). 此时用 Langmuir 方程表示临界解吸压力的表达式如下:

$$P_{cd} = \frac{C' P_L}{V_L - C'}, \tag{8}$$

式中 C 为压力为 P 时对应的理论含气量; C' 为临界解吸压力 P_{cd} 时对应的实测含气量.

预计煤层所能达到的最低储层压力 P_{ad} ,即煤层气储层的枯竭压力.通过等温吸附线可估计出残余气含量,实际含气量 C' 减去残余含气量 C'' 即为可采气量,煤层气理论最大采收率 η 为:

$$\eta = \frac{C' - C''}{C'} = 1 - \frac{C''}{C'} = 1 - \frac{\frac{V_L P_{ad}}{P_L + P_{ad}}}{\frac{V_L P_{cd}}{P_L + P_{cd}}} = 1 - \frac{P_{ad}(P_L + P_{cd})}{P_{cd}(P_L + P_{ad})} = 1 - \frac{V_L P_{ad}}{C'(P_L + P_{ad})} \tag{9}$$

3 等温吸附线煤层含气量计算的改进

多年来,人们一直习惯于用等温吸附模型来描述煤的甲烷等温吸附线,因为该等温吸附模型简明,其中的特征参数 V_L 和 P_L 具有明确的物理意义,并且得到大量煤吸附甲烷试验数据的证实^[46].但是,利用该等温吸附模型存在两个缺点:①没有对无机质(灰分和水分)进行校正;②受温度的限制.因此,需要对该模型作如下改进:

3.1 对无机质的校正

Langmuir 煤级等温吸附方程的 Langmuir 参数除了可以通过实验的等温吸附曲线模拟得到外,还可通过煤质测井分析得到的固定碳与挥发分的比值导出,由于煤层甲烷是吸附在煤基质的微孔隙中,而煤基质中也只有有机质(固定碳和挥发分)才吸附甲烷,无机矿物质是不吸附甲烷的.因此 Hawkins 等人在用等温吸附理论估算煤层含气量时去除了灰分和水分的影响,即认为灰分和水分几乎没有储气能力,所以需要一定温度条件下对灰分和水分加以校正^[29].

3.2 Langmuir 参数与温度的关联

从某一个温度下煤的甲烷等温吸附试验结果数据,只能得出适用于该温度条件下煤吸附甲烷的等温吸附式,而不能预测其它温度和压力下煤的甲烷吸附量.而实际工作中,需要利用已知深度煤层在一定温度下煤的甲烷吸附特性预测深部或浅部煤层不同温度 and 不同压力下煤的甲烷吸附量.显然,Langmuir 等温吸附模型满足不了这样的需要.只有分别进行不同温度下煤的甲烷等温吸附试验,才能获取不同温度的吸附特征参数,这不仅实验工作量大,成本费用高,时间长,而且实验需要的深部煤样往往难以得到^[47].因此需要对不同温度下的 Langmuir 等温吸附参数进行关联.

因此综合上述两个方面的因素,改进后的

Langmuir 方程由下列方程组构成:

$$\begin{aligned} C &= (1 - W_a - W_w)V_L P / (P + P_L), & (10) \\ \log V_L &= k_1 \log(W_g/W_v) + k_2, & (11) \\ \log P_L &= k_3 \log(W_g/W_v) + k_4, & (12) \\ k_1 &= m_1 \sqrt{T} + b_1, & (13) \\ k_i &= m_i T + b_i, & (14) \end{aligned}$$

式中 C 是含气量; P 是吸附平衡时的气体压力; T 是温度; V_L 和 P_L 分别是 Langmuir 体积和 Langmuir 压力; W_g 、 W_v 、 W_w 和 W_a 分别是测井分析得到的固定碳、挥发分、灰分和水分的重量,用小数表示;对于烟煤和无烟煤,其中的 k_1 、 k_i ($i = 2, 3, 4$) 是由表 2 的 b_1 、 b_i 和 m_1 、 m_i 给出^[48].

表 2 计算 k_i 的参数求取
Table 2 Calculation of parameters k_i

i	1	2	3	4
斜率 m_i	0.00887	-0.00168	0.00259	0.00502
截距 b_i	0.21258	2.81873	-0.50899	2.20342

在 Langmuir 参数 V_L 和 P_L 的表达式(11)和(12)中,除了要确定固定碳和挥发分重量的比值(W_g/W_v)外,还需计算 k_i ($i = 1, 2, 3$),由于 k_i 是由温度决定的,因此需要知道地层温度,分别计算不同温度下煤层吸附甲烷的能力.

4 等温吸附线煤层含气量的测井评价

4.1 煤质组分含量的确定

煤质组分分为碳、灰分和水分三部分.由于煤层气含量与煤质组分有密切的关系,因此需要对煤质各组分进行准确的计算.根据世界不同地区煤层样品的测井分析表明,煤的灰分与固定碳、挥发分和水分之间有很好的相关性^[48],图 2 是美国 San Juan 盆地和印度某地区煤层的这种关系.

因此在有实验分析数据的情况下,可以通过研究区实验得到灰分与固定碳、挥发分和水分的线性关系,由灰分含量确定出煤质中固定碳、挥发分和水分的含量^[49~52,16].

在没有煤心分析数据的情况下,可以通过测井分析得到煤质的三个组分:固定碳、灰分和挥发物(挥发分+水分)的体积含量,通过式(2)求得各个组分的重量含量.然后根据相似地区有实验分析的灰分与挥发分以及灰分与水分的线性关系,求取挥发分和水分的重量含量.

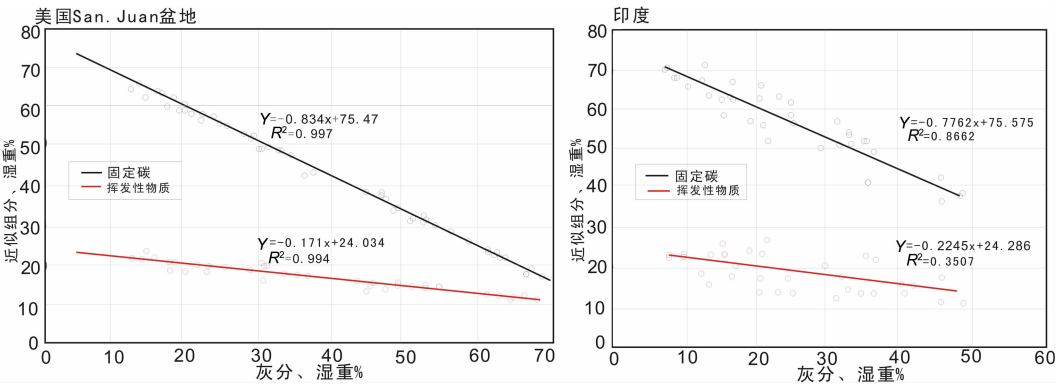


图 2 煤层分析组分之间的相关关系
Fig. 2 Correlation of coalbed methane components

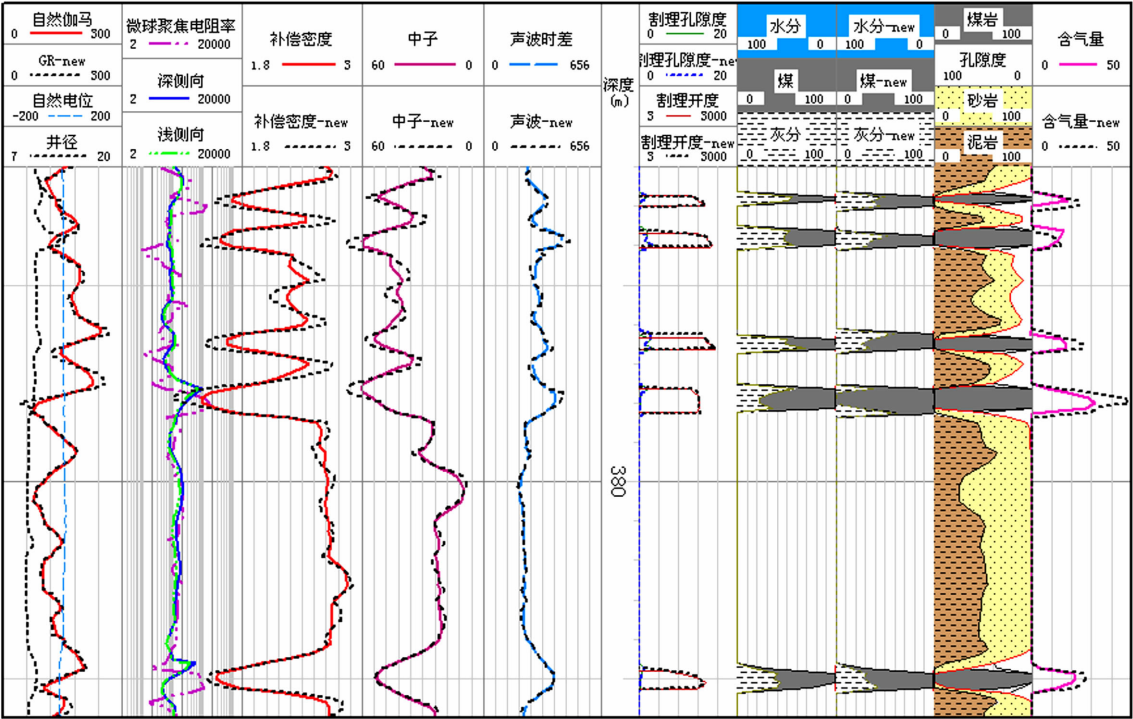


图 3 山西沁水盆地某煤层 a 段
Fig. 3 Section a of a coal bed in the Qingshui basin, Shanxi province

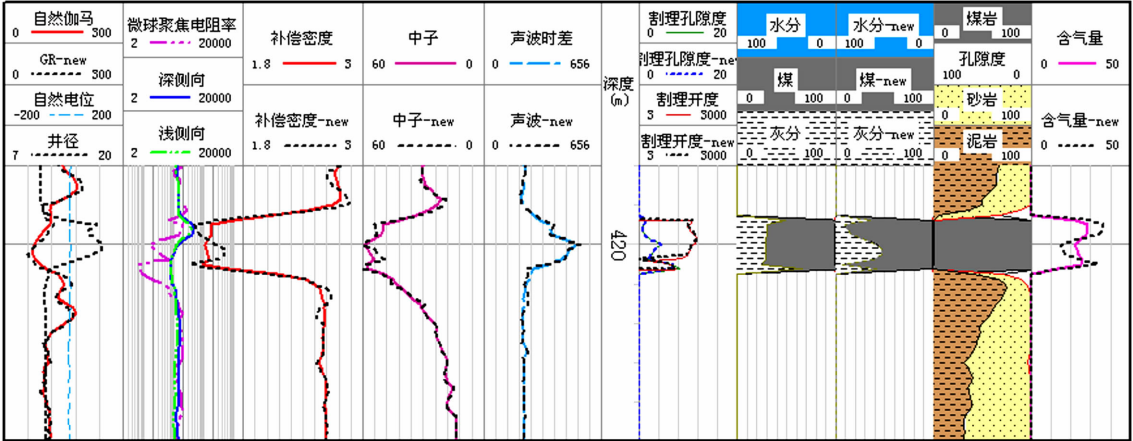


图 4 山西沁水盆地某煤层 b 段
Fig. 4 Same as Fig. 3 but for section b

4.2 压力、温度的确定

在 Langmuir 等温吸附解吸实验中,煤样吸附气体的能力是通过在给定的实验温度 T 条件下,煤样吸附的含气量随吸附平衡气体压力 P 变化获得的等温吸附曲线反映出来的.但是在实际煤层气的开采中,原状煤层吸附的甲烷气体含量是在相应的地层温度和压力下获得的,因此在实际计算中,用上覆地层压力替代 Langmuir 方程中的 P ,用实际地层温度替代方程中的 T .

以上参数确定之后,就可以用来评价煤层含气量,如果有实测含气量,还可根据等温吸附曲线上对应地层压力的理论含气量计算含气饱和度.

综上所述,利用测井资料不仅可以计算煤层含气量,还可以评价含气饱和度、孔隙度和渗透率,因此实现了利用测井资料评价煤储层的目的.

4.3 实际资料处理

本文利用改进的等温吸附理论对山西沁水盆地某煤田进行了综合评价.由于该研究区的薄煤层比较多,对薄层进行了提高测井曲线纵向分辨率处理,恢复了地层的真实信号.由图可以看出,提高分辨率之后,对煤层的识别明显增强.

图 3 和图 4 是该研究区某煤层段的测井综合评价图,图 4 煤层的原始厚度为 1.257 m,提高分辨率之后煤的厚度增厚为 1.333 m.煤层的密度(DEN)平均值为 $1.43 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$,中子(CNL)均值为 53,声波时差(Δt)均值为 $437 \mu\text{s}/\text{m}$,自然伽玛(GR)均值为 70 API,自然电位(SP)均值为 19 mV,深侧向电阻率(LLD)均值为 182 Ωm .割理孔隙度(φ_r)均值为 3%,割理开度(ϵ)均值为 110 μm ,含气量(C)均值为 $25 \text{ g}/\text{cm}^3$.

5 结 语

(1)煤层不同于常规天然气储层,常规评价气层的方法已经不适合与评价煤层气,因此需要根据煤层气储层自身特点,应用 Langmuir 等温吸附理论进行评价.

(2)改进的 Langmuir 等温吸附模型增强了 Langmuir 等温吸附理论评价煤层含气量的精确度,而且实现了不同温度 Langmuir 参数的求取方法.

(3)目前还没有一种测井方法能直接确定煤层气含量,而是根据影响煤层气的各个因素间接确定的,因此,应加强与实验室分析相结合,建立准确的煤层气含量与相关参数的关系.

(4)应用 Langmuir 等温吸附模型可以预测深

部煤层的甲烷吸附量,估算煤层气含量和瓦斯含量,在煤层气资源评价、煤矿深部水平瓦斯防治方案设计等方面具有好的应用前景.

(5)通过对测井曲线进行提高分辨率处理之后,特别是使用改进的方法提高了测井曲线纵向分层能力,恢复地层测井参数的真值,特别地提高了对薄层的分辨能力.

参 考 文 献 (References):

- [1] 蔚远江,杨起,刘大锰,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):55~60.
Wei Y J, Yang Q, Liu D M, *et al.* A review on studies of coalbed methane reservoirs in China[J]. Geological Science and Technology Information, 2001, 20(1): 55~60.
- [2] 潘和平.煤层气储层测井评价[J].天然气工业,2005,25(3):48~51.
Pan H. Evaluating coalbed methane reservoir by log data[J]. Gas Industry, 2005, 25(3): 48~51.
- [3] 朱杰,车长波,等.我国煤层气产业发展趋势预测[J].中国矿业,2006,15(11):20~25.
Zhu J, Che C C, *et al.* The trend forecast of coal-bed methane industry in China[J]. China Mining, 2006, 15(11): 20~25.
- [4] 赵金海.我国煤层气勘探开发现状与发展建议[J].中外能源,2008,13:30~34.
Zhao J H. Current status of coal-bed gas exploration in China and suggestions on its development[J]. Chinese and foreign energy, 2008, 13: 30~34.
- [5] 李景明,李剑,谢增业,等.中国天然气资源研究[J].石油勘探与开发,2005,2(32):15~18.
Li J M, Li J, Xie Z Y, *et al.* The resource of natural gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 2(32): 15~18.
- [6] 蔚远江,杨起,刘大锰,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):55~60.
Wei Y J, Yang Q, Liu D M, *et al.* A review on studies of coalbed methane reservoirs in China[J]. Geological Science and Technology Information, 2001, 20(1): 55~60.
- [7] 叶晓斌.煤层气常规测井方法探讨[J].云南地质,2000,19(4):371~375.
Ye Xiaobin. A discussion about the common logging methods of coalbed methane[J]. Yunnan Geology, 2000, 19(4): 371~375.
- [8] 高绪晨,张春才,段铁梁,等.煤层气测井资料解释初探[J].中国煤田地质,2003,15(4):54~57.
Gao X C, Zhang C C, Duan T L, *et al.* Probe into interpretation on logging informations of coalbed gas[J]. China Coal Geological, 2003, 15(4): 54~57.
- [9] 侯俊胜.煤层气储层评价的地球物理测井技术[J].现代地质,1998,12(1):130~133.
Hou J S. The logging evaluation method for coal quality and

- methane[J]. *Modern Geology*, 1998, 12(1): 130~133.
- [10] 高绪晨. 密度和中子测井对煤层甲烷含气量的响应及解释. *Coal geology & exploration*, 1999, 27(3): 25~28.
Gao X C. The responses of density and neutron loggings on the coalbed methane content and the logging interpretation [J]. *Coal Geology Exploration*, 1999, 27(3): 25~28.
- [11] 斯伦贝谢. 煤层天然气的开采[M]. 油田新技术, 2003 秋季. Schlumberger. Natural gas exploitation in coal layers[M]. Field of New Technologies, 2003 Autumn.
- [12] 李舟波, 王祝文. 科学钻探中的元素测井技术[J]. 地学前缘, 1998, 5(1): 119~130.
Li Z B, Wang Z W. TEchnique of elemental logging in scientific drilling project[J]. *Earth Science Frontiers*, 1998, 5(1): 119~130.
- [13] 李舟波. 钻井地球物理勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
Li Z B. Geophysical exploration drilling [M]. Beijing: Geological Publishing, 2006.
- [14] 欧阳健. 塔里木盆地油气勘探丛书[M]. 石油测井解释与储层描述, 北京: 石油工业出版社, 1994, 268~269.
Ou Y J. Oil well logging interpretation and reservoir description [M]. Beijing: Petroleum Industry Publishing, 1994, 268~269.
- [15] Yuan H Y, Max Peeters, Cloud T A, *et al.* Gas productivity related to cleat volumes derived from focused resistivity tools in Coalbed Methane (CBM) Fields[M]. *Petrophysics*, 47(3): 250~257.
- [16] Mullen M J, Services H L. Coalbed methane resource evaluation from wireline logs in the northeastern san juan basin[J]. A Case Study. SPE 18946, 1989: 161~172.
- [17] 李小明, 曹代勇, 王红岩, 等. 煤层气测井评价技术新进展[J]. 油气井测试, 2002, 11(6): 60~73.
Li X M, Cao D Y, Wang H Y, *et al.* Advanced logging well evaluation technique in coal bed gas[J]. *Oil and Gas Well Testing*, 2002, 11(6): 60~73.
- [18] 何伟钢, 唐书恒, 谢晓东. 地应力对煤层渗透性的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2000, 19(4): 353~355.
He W G, Tang S H, Xie X D. Effect of in-situ stress on coalbed permeability[J]. *Journal of Liaoning University of Engineering and Technology*, 2000, 19(4): 353~355.
- [19] 唐巨鹏, 潘一山, 李成全, 等. 有效应力对煤层气解吸滞流影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1563~1568.
Tang J P, Pan Y S, Li C Q, *et al.* Experimental study on effect of effective stress on desorption and seepage of coalbed methane[J]. *Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(8): 1563~1568.
- [20] 吴世跃, 赵文. 含吸附煤层气煤的有效应力分析. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1674~1678.
Wu S Y, Zhao W. Analysis of effective stress in adsorbed methane-coal system[J]. *Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(10): 1674~1678.
- [21] 连承波, 李汉林. 地应力对煤储层渗透性影响的机理研究[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(2): 30~32.
Li C B, Li H L. Mechanism research about effect of in-situ stress on coalbed permeability[J]. *Coal Geology of China*, 2005, 33(2): 30~32.
- [22] 姜德义, 张广洋, 胡耀华, 等. 有效应力对煤层气渗透率影响的研究[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 1997, 20(5): 22~25.
Jiang D Y, Zhang G Y, Hu Y H, *et al.* Study on affection to permeability of gas of coal layers by effective stress[J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 1997, 20(5): 22~25.
- [23] 李祥春, 郭勇义, 吴世跃, 等. 煤体有效应力与膨胀应力之间关系的分析[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26(4): 535~537.
Li X C, Guo Y Y, Wu S Y, *et al.* Relation between effective stress and swelling stress of coal body [J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2007, 26(4): 535~537.
- [24] 张广洋. 煤的渗透性实验研究[J]. 贵州工学院学报, 1995, 24(4): 65~68.
Zhang G Y. A test study concerning coal permeability[J]. *Journal of Guizhou Institute*, 1995, 24(4): 65~68.
- [25] 吴晓东. 煤层渗透率敏感性及其对煤层气开发效果的影响[J]. 天然气工业, 2008, 28(7): 27~29.
Wu X D. Sensitivity of coalbed permeability and its influences on production of coalbed methane[J]. *Gas Industry*, 2008, 28(7): 27~29.
- [26] 傅雪海, 李大华, 秦勇, 等. 煤基质收缩对渗透率影响的实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(2): 129~137.
Fu X H, Li D H, Q Y, *et al.* Experimental research of influence of coal matrix shrinkage on permeability[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2002, 31(2): 129~137.
- [27] 孙立东, 赵永军, 蔡东梅, 等. 煤储层渗透率模拟—以沁水盆地太原组为例[J]. 断块油气田, 2007, 14(1): 8~10.
Sun Li D, Zhao Y J, Cai D M, *et al.* An analysis on the principal control factor of coal reservoir permeability in Central and Southern Qinshui Basin[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2007, 14(1): 8~10.
- [28] 高绪晨, 张春才, 段铁梁, 等. 煤层气测井资料解释初探[J]. 中国煤田地质, 2003, 15(4): 54~57.
Gao X C, Zhang C C, Duan T L, *et al.* Coal-Bed gas log interpretation and application[J]. *Coal Geology of China*, 2003, 15(4): 54~57.
- [29] 傅雪海, 陆国桢, 秦杰, 等. 用测井响应值进行煤层气含量拟合和煤体结构划分[J]. 测井技术, 1999, 23(2): 112~115.
Fu X H, Lu G Z, Qin J, *et al.* Determination of coalbed gas content and classification of coalbody structure with log response[J]. *Logging Technology*, 1999, 23(2): 112~115.
- [30] 杜翔. 测井方法在煤层气勘查中的应用[J]. 中国煤田地质, 2007, 19(3): 63~64.
Du X. Application of well logging in CBM exploration[J]. *Coal Geology of China*, 2007, 19(3): 63~64.
- [31] 陈宏亮, 王瑞英. 煤层气测井解释与应用[J]. 吐哈油气, 2008, 8(2): 164~169.

- Chen H L, Wang R Y. Log interpretation and application of coal-bed methane[J]. Tuha Oilfield, 2008, 8(2): 164~169.
- [32] 汤振清, 孙文洁, 等. 利用综合测井方法评价煤层气资源[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2007, 27(增刊): 14~19.
- Tang Z Q, Sun W J, *et al.* Ways to use the comprehensive evaluation of coalbed methane resources Logging[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2007, 27(suppl): 14~19.
- [33] 陈江峰, 刘保民, 别玉平. 测井在煤层气储层评价中的应用[J]. 煤炭技术, 1997, 4: 36~40.
- Chen J F, Liu B M, Bie Y P. The application of Logging in coalbed methane reservoir evaluation. Coal Tecnology, 1997, 4: 36~40.
- [34] 陆国桢, 张凤威, 傅雪海. 测井解释煤层甲烷含量与煤层结构的研究[J]. 煤田地质与勘探, 1997, 25(3): 54~57.
- Lu G Z, Zhang F W, Fu X H. Study on the coalbed methane content and coalbed structure interpreted by log curves[J]. China University of Mining and Technology, 1997, 25(3): 54~57.
- [35] 李松臣. 煤层气测井技术方法研究[J]. 中州煤炭, 2007, 5: 19~21.
- Li S C. The Research of logging in coalbed methane[J]. Zhongzhou Coal, 2007, 5: 19~21.
- [36] 谭廷栋. 测井解释煤层气藏[J]. 测井技术, 1999, 23(2): 83~88.
- Tan T D. Evaluating coal-bed gas reservoir with log data[J]. Logging Tecnology, 1999, 23(2): 83~88.
- [37] 庄镇泉, 王熙法, 等. 神经网络与神经计算机[M]. 北京: 科学出版社, 1991, 216~234.
- Zhuang Z Q, Wang X F, *et al.* Neural networks and neural computers[M]. Beijing: Science Press, 1991, 216~234.
- [38] 靳蕃, 范俊波, 等. 神经网络与神经计算机原理及应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1993, 146~157.
- Jin F, Fan J B, *et al.* Neural network and neural computer principle application[J]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1993, 146~157.
- [39] 吴东平, 吴春萍, 岳晓燕, 等. 煤层气测井评价的神经网络技术[J]. 天然气勘探与开发, 1999, 24(1): 31~34.
- Wu D P, Wu C P, Yue X Y, *et al.* He xuquan. Logging evaluation of neural network technology coalbed methane[J]. Natural Gas Exploration and Development, 1999, 24(1): 31~34.
- [40] 陈春琳, 林大杨, 等. 等温吸附曲线方法在煤层气可采资源量估算中的应用[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(5): 679~682.
- Chen C L, Lin D Y. Application of Isothermal curves in estimating minable resource of coalbed methane[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(5): 679~682.
- [41] 陈振宏, 王一兵, 宋岩, 等. 不同煤阶煤层气吸附、解吸特征差异对比. 天然气工业, 2008, 28(3): 30~32.
- Chen Z H, Wang Y B, Song Y, *et al.* Comparison of adsorption/desorption properties of cbm in different-rank coals[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(3): 30~32.
- [42] 李安启, 张鑫, 钟小刚, 等. 煤岩吸附曲线在煤层气勘探开发中的应用[J]. 天然气工业, 2008, 28(3): 80~81.
- Li A Q, Zhang X, Zhong X G, *et al.* Application of coal adsorption curve to cbm exploration and development[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(3): 80~81.
- [43] 赵辉, 杨子荣. 煤层气等温吸附曲线形态对产气量的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26(增刊): 37~39.
- Zhao H, Yang Z R. Effects of isothermai adsorption curve of coal seam gas on the gas production[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2007, 26(Suppl.): 37~39.
- [44] 霍永忠. 煤储层的气体解吸特性研究[J]. 天然气工业, 2004, 24(5): 24~26.
- Huo Y Z. Research on the features of gas desorption in coal reservoir[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(5): 24~26.
- [45] 周荣福, 傅雪海, 秦勇, 等. 我国煤储层等温吸附常数分布规律及其意义[J]. 煤田地质与勘探, 2000, 28(5): 23~25.
- Zhou R F, Fu X H, Qin Y, *et al.* Distribution regularities and significance of isothermal adsorption constants in coal reservoir, china[J]. Coal Geology & Exploration, 2000, 28(5): 23~25.
- [46] 赵振国. 吸附作用应用原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- Zhao Z G. Application of the adsorption principle [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [47] 张群, 崔永君, 钟玲文, 等. 煤吸附甲烷的温度—压力综合吸附模型[J]. 煤炭学报, 2008, 33(11): 1272~1278.
- Zhang Q, Cui Y J, Zhong L W, *et al.* Temperature-pressure comprehensive adsorption model for coal adsorption of methane [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(11): 1272~1278.
- [48] Hawkins J M. Estimating coalbed gas contest and sorption isotherm using well log data[J]. SPE24905, 1992.
- [49] 李纪森, 陈英. 应用密度测井值计算煤层含气量[J]. 测井专刊, 1996, 5: 70~73.
- Li J S, Chen Y. Application of density logging calculated seam gas content[J]. Logging, 1996, 5: 70~73.
- [50] 董红, 侯俊胜, 李能根, 等. 煤层煤质和含气量的测井评价方法及其应用[J]. 物探与化探, 2001, 25(2): 138~143.
- Dong H, Hou J S, Li N G, *et al.* The logging evaluation method for coal quality and methane [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2001, 25(2): 138~143.
- [51] 董红. 基于测井资料评价辽河油田东部凹陷煤层[J]. 中国煤层气, 2007, 4(4): 39~42.
- Dong H. Evaluation of depressed coal seams in eastern liaohoe coalfield based on well logging information[J]. China Coalbed Methane, 2007, 4(4): 39~42.
- [52] 刘丽民, 魏庆喜, 徐仁桂, 等. 煤层气常规测井技术与应用[J]. 中国煤层气, 2008, 5(1): 28~32.
- Liu L M, Wei Q X, Xu R G, *et al.* Conventional CBM logging technologies and their applications [J]. China Coalbed Methane, 2008, 5(1): 28~32.