

# 测井解释煤层气藏

谭廷栋\*

(中国石油天然气集团公司石油勘探开发科学研究院)

谭廷栋. 测井解释煤层气藏. 天然气工业, 1999; 19(4): 30~33

**摘要** 煤层气是指煤层中吸附和游离状态的甲烷天然气。石油与天然气勘探测井系列可以用来勘探煤和煤层气,包括基本测井系列和辅助测井系列。前者有岩性测井、饱和度测井和孔隙度测井3种方法;后者包括地层倾角测井、超声波成像测井、声波波列测井、自然伽马能谱测井、碳氧比能谱测井等8种方法。文中探讨了两种测井解释煤层气藏的思路和方法,它们是中子—密度孔隙度重叠法和中子—声波孔隙度重叠法。通过在广西百色盆地江1井、南海西部气田和胜利油田等地的实践证明,该方法是勘探煤层气藏的一种有效手段。

**关键词** 煤成气 天然气 气藏形成 测井解释

测井解释煤层气藏与砂岩气藏的方法既有同一性,又有特殊性。用测井孔隙度重叠法解释煤层气藏和砂岩气藏,这是同一性;用煤层气层背景值和测量值解释煤层气含量,这是特殊性。必须指出,煤层气含量为评估煤层气藏储量提供了科学依据。

## 煤和天然气

### 1. 煤和天然气分布

在中国,煤和天然气分布在第四纪、第三纪、白垩纪、侏罗纪、三叠纪、二叠纪、石炭纪地层中。奥陶纪和寒武纪地层没有发现煤,但是发现了天然气。由此看出,中国的煤和天然气资源丰富,它是勘探、开发和利用煤层气的物质基础。

### 2. 能源替代趋势

1950年以前,世界上主要用煤作能源,之后,在世界能源构成中煤所占的比例在下降,石油所占的比例在上升。据预测,到2010年煤和石油在世界能源构成中所占的比例继续下降,而天然气能源所占的比例继续上升。因此,天然气将要成为未来世界的主要能源。

中国煤层气勘探起步较晚。进入21世纪,煤层气将会得到充分的勘探、开发和利用,为人类社会的发展做出重要的贡献。

## 测井系列

### 1. 基本测井系列

基本测井系列是由岩性测井方法、饱和度测井方法和孔隙度测井方法三部分组成,采集9种原始测井信息,输入计算机处理解释,用于发现油气藏,评估油气储量及其产量。这个基本测井系列也适用于勘探煤和煤层气。

岩性测井方法。测量地层自然电位(SP)、自然伽马(GR)和井径(CAL),用于判别岩性,划分储层与非储层,确定地层水矿化度和泥质含量,识别沉积相和沉积环境。

饱和度测井方法。测量深侧向电阻率( $R_{LLD}$ )、浅侧向电阻率( $R_{LLS}$ )和微球形聚焦电阻率( $R_{MSFL}$ ),根据这3种电阻率求解地层真电阻率,用于计算油气层含水饱和度,发现油气层,确定油气层有效厚度及其埋藏深度。电阻率测井信息还能判断煤层,计算煤层灰分及发热量,识别沉积相及沉积环境等。

孔隙度测井方法。测量地层体积密度( $\rho_b$ )、含氢指数( $H_b$ )和声波(纵波)时差( $t_p$ ),用于解释岩性、孔隙度,识别气层,计算岩石弹性模量,确定岩石矿物成分。三孔隙度测井方法也是勘探煤层和煤层气层的有效手段。

### 2. 辅助测井系列

根据地质和工程的需要选择使用。

地层倾角测井。测量地层倾角和方位角,分析地层产状,识别裂缝,研究构造、沉积、断层、不整合等。

超声波成像测井。测量井壁周围地层图像,用

\*谭廷栋,作者简介见本刊1997年第17卷第1期。地址:(100083)北京市学院路20号910信箱。电话:(010)62097105。

于判断岩性、层理、煤层,直观识别裂缝、洞穴及其产状。

声波波列测井。测量地层纵波、横波及斯通利波信息,用于判断煤层、气层,计算岩石泊松比,识别裂缝发育带,计算地层渗透率。

自然伽马能谱测井。测量地层铀、钍、钾含量,用于划分岩性、煤层、钾盐和放射性矿产层,估算煤层灰分、粘土类型及含量,识别沉积相及沉积环境。

碳氧比能谱测井。测量地层碳氧比和硅钙比,用于确定地层含水饱和度,发现煤和煤层气,确定岩石渗透率。

温度测井。测量地层温度和地温梯度,用于判断水层及气层,发现地热矿产层,分析煤田和油气田水文地质条件。

压力测井。测量地层孔隙流体压力,根据压力梯度确定孔隙流体密度,用于划分气—油和油—水界面,识别气层、油层和水层。

井斜测井。测量井眼的倾角和方位角,校正煤层和油气层真垂直厚度及深度,计算煤层及油气层在地下的空间位置,评价钻井井身质量。

上述众多的辅助测井方法可优选使用。但是,基本测井系列必须坚持测全,采集的测井信息量多、质量高,才能有效地评价煤层、油层和气层,有利于排除多解性,为评估煤、油、气储量及其产量提供科学依据。

### 3. 测井响应参数

测井响应参数是解释煤层、气层和水层的基础。表 1 给出沉积岩主要矿物部分测井响应参数。

表 1 沉积岩主要矿物部分测井响应参数

名 称	体积密度 (g/cm <sup>3</sup> )	含氢指数 (%)	纵波时差 (μs/ft)	电阻率 (Ω·m)	自然伽马 (API)
石 英	2.65	- 2	55.5	10 <sup>9</sup> ~ 10 <sup>12</sup>	
方解石	2.71	0	46.5	10 <sup>7</sup> ~ 10 <sup>12</sup>	
白云石	2.87	1	41.5		
高岭土	2.96	28	77 ~ 210	10 <sup>11</sup>	6
绿泥石	3.39	26	52		8
伊利石	2.90	21		10 <sup>11</sup>	69
蒙脱石	2.88	41		10 <sup>11</sup>	
无烟煤	1.51	38	105	1 ~ 10 <sup>3</sup>	
烟 煤	1.27	60	120	10 ~ 10 <sup>6</sup>	
褐 煤	1.23	52	160	10 ~ 10 <sup>2</sup>	
纯 水 <sup>1)</sup>	1.0	100	189		
盐 水 <sup>1)</sup>	1.22	60	185	3 ~ 10 <sup>-2</sup>	
原 油 <sup>1)</sup>	0.88	60	235	10 <sup>4</sup> ~ 10 <sup>9</sup>	
甲 烷 <sup>2)</sup>	0.000 716 8	2.25 CH <sub>4</sub>	626	10 <sup>4</sup> ~ 10 <sup>9</sup>	

注:1) 条件为 25 ;2) 条件为 76 cmHg, 0。

表 1 指出,孔隙度测井对煤和天然气的响应具有较大的差异,可以利用孔隙度测井信息解释煤层和煤层气藏。

## 解释方法和实例

测井解释煤层和煤层上下围岩气层的分辨率高,直观性强。但是,测井解释煤层气层比较困难,因为煤层裂隙和基质孔隙度小,含气量低,结果降低了测井对煤层气的分辨率,难于区分煤层和煤层气层。采用测井孔隙度重叠法解释煤层、煤层气层和围岩气层,应用实例表明仍能获得令人满意的效果。

### 1. 中子—密度孔隙度重叠法

根据岩石体积模型,煤层、煤层气层和围岩气层的物质平衡方程分别表示如下:

$$\text{煤层} \quad 1 = V_c + V_w + V_a \quad (1)$$

式中:  $V_c$  为碳含量;  $V_w$  为水含量;  $V_a$  为灰分含量。

$$\text{煤层气层} \quad 1 = V_c + V_g + V_w + V_a \quad (2)$$

式中:  $V_g$  为气含量。

$$\text{围岩气层} \quad 1 = V_g + V_w + V_{ma} \quad (3)$$

式中:  $V_{ma}$  为骨架含量。

煤层的中子和密度孔隙度响应方程为:

$$N = V_c \frac{H_c - H_a}{H_w - H_{ma}} + V_w \frac{H_w - H_a}{H_w - H_{ma}} + \frac{H_a - H_{ma}}{H_w - H_{ma}} \quad (4)$$

式中:  $N$  为中子孔隙度;  $H_c$ 、 $H_w$ 、 $H_a$ 、 $H_{ma}$  分别为碳、水、灰分、骨架的含氢指数。

$$D = V_c \frac{a - c}{ma - w} + V_w \frac{a - w}{ma - w} + \frac{ma - a}{ma - w} \quad (5)$$

式中:  $D$  为密度孔隙度;  $c$ 、 $w$ 、 $a$ 、 $ma$  分别为碳、水、灰分、骨架的体积密度。

煤层的主要成分是碳含量,水含量极少,优质煤灰分含量也不多。因此,中子和密度孔隙度响应主要取决于煤层碳含量。在多数情况下,煤层中子孔隙度与密度孔隙度接近,即  $N \approx D$ 。

煤层气层的中子和密度孔隙度响应方程为:

$$N = V_c \left[ \frac{H_c - H_a}{H_w - H_{ma}} \right] + V_g \left[ \frac{H_a - H_g}{H_w - H_{ma}} \right] + V_w \left[ \frac{H_w - H_a}{H_w - H_{ma}} \right] + \frac{H_a - H_{ma}}{H_w - H_{ma}} \quad (6)$$

式中:  $H_g$  为气含氢指数。

煤层气引起中子孔隙度减小,其减小程度主要取决于煤层气含量。

$$D = V_c \left[ \frac{a - c}{ma - w} \right] + V_g \left[ \frac{a - g}{ma - w} \right] +$$

$$V_w \left( \frac{a - w}{ma - w} \right) + \frac{ma - a}{ma - w} \quad (7)$$

式中： $\rho_g$  为气体密度。

煤层气引起密度孔隙度增大，其增大程度也是主要取决于煤层气含量。

由此可以得出结论，煤层气层的中子孔隙度小于密度孔隙度，即  $N < D$ 。

围岩(砂岩)气层的中子和密度孔隙度响应方程为：

$$N = V_w - V_g \left( \frac{H_w - H_g}{H_w - H_{ma}} \right) \quad (8)$$

$$D = V_w + V_g \left( \frac{w - g}{ma - w} \right) \quad (9)$$

式(8)与式(9)指出，围岩气层气含量引起中子孔隙度减小和密度孔隙度增大。类似地，围岩气层中子孔隙度也是小于密度孔隙度，即  $N < D$ 。

### 2. 中子—声波孔隙度重叠法

由于声波测井受地层各向异性和压实程度的影响，采用中子—声波孔隙度重叠法解释煤层、煤层气层和围岩气层，有时候会出现多解性。但是，中子—声波孔隙度重叠法仍在使用，它与中子—密度孔隙度重叠法相互验证，排除多解性。

煤层的声波孔隙度响应方程为：

$$s = V_c \frac{t_c - t_a}{t_w - t_{ma}} + V_w \frac{t_w - t_a}{t_{ma}} + \frac{t_a - t_{ma}}{t_w - t_{ma}} \quad (10)$$

式中： $s$  为声波孔隙度； $t_c$ 、 $t_w$ 、 $t_a$  和  $t_{ma}$  分别为碳、水、灰分和骨架的声波(纵波)时差。

由式(4)与式(10)看出，煤层的中子孔隙度接近于声波孔隙度，即  $N \approx s$ 。

煤层气层的声波孔隙度响应方程为：

$$s = V_c \left( \frac{t_c - t_a}{t_w - t_{ma}} \right) + V_g \left( \frac{t_g - t_a}{t_w - t_{ma}} \right) + V_w \left( \frac{t_w - t_a}{t_w - t_{ma}} \right) + \frac{t_a - t_{ma}}{t_w - t_{ma}} \quad (11)$$

式中： $t_g$  为气声波时差。

根据式(6)和式(11)，煤层气层的中子孔隙度小于声波孔隙度，即  $N < s$ 。

围岩(砂岩)气层的声波孔隙度响应方程为：

$$s = V_w + V_g \left( \frac{t_g - t_w}{t_w - t_{ma}} \right) \quad (12)$$

由式(8)和式(12)看出，围岩气层的中子孔隙度小于声波孔隙度，即  $N < s$ 。

如果围岩气层是碳酸盐岩气层，同样地，中子孔隙度小于密度孔隙度 ( $N < D$ ) 和中子孔隙度小于声波孔隙度 ( $N < s$ )。

采用中子、密度、声波孔隙度重叠法解释煤层气层和围岩气层，目的在于提高测井解释气层的分辨率和直观性。

### 3. 解释实例

图1是广西百色盆地江1井用测井孔隙度重叠法解释煤层和围岩气层的实例。层号2是煤层，中子、密度、声波孔隙度彼此接近，即  $N \approx D \approx s$ 。层号4是围岩气层，中子孔隙度小于密度孔隙度 ( $N < D$ ) 和声波孔隙度 ( $N < s$ )。层号1、3和5是泥岩。煤层与围岩气层之间有个泥岩隔层。该井围岩气层岩性为第三系砂岩，射开井段662~670 m，获天然气产量17 820 m<sup>3</sup>/d。

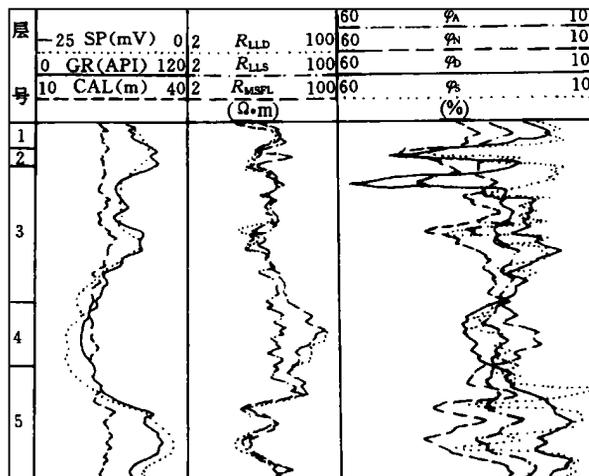


图1 测井孔隙度重叠法解释气层结果

图2是南海西部气田1口井用中子孔隙度—密度重叠法解释气层结果

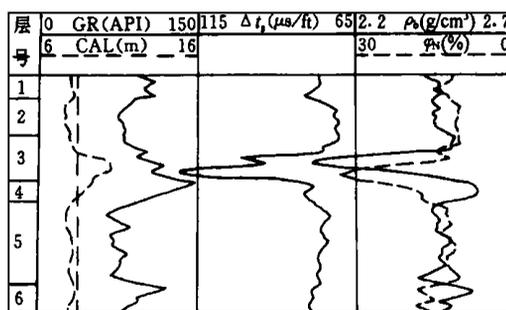


图2 中子和密度测井重叠法解释气层结果

积密度重叠法解释煤层气层和围岩气层的实例。层号3是煤层气层，层号2和5是围岩气层，层号1、4

和 6 是泥岩。图 2 指出,煤层气层与围岩气层直接接触,声波时差对煤层气层也有明显的指示。该井围岩气层岩性为第三系砂岩,射开层号 2 和 5,获天然气产量  $57 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,水产量  $3.3 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

在胜利油田,用测井孔隙度重叠法解释煤层和围岩气层也取得了同样的效果。

## 测井解释煤层气含量

下面提出一种测井解释煤层气含量的新方法,值得研究和试用。

### 1. 煤层气层背景值

它是指煤层气层不含天然气时的测井读数。以密度测井为例,计算煤层气层密度背景值的响应方程为:

$$b^* = V_c \rho_c + V_w \rho_w + (1 - V_c - V_w) \rho_a \quad (13)$$

式中:  $b^*$  为煤层气层密度背景值。

同样地,计算煤层气层中子和声波背景值,可以建立与式(13)类似的响应方程。

### 2. 煤层气层测量值

该值是从测井信息中获得的煤层气层测井读数。仍以密度测井为例,煤层气层密度测量值的响应方程是:

$$b = V_g \rho_g + V_c \rho_c + V_w \rho_w + (1 - V_g - V_c - V_w) \rho_a \quad (14)$$

式中:  $b$  为煤层气层密度测量值。

煤层气层中子和声波测量值,也可以建立与式(14)类似的响应方程。

### 3. 计算煤层气含量

根据式(13)和式(14),求解煤层气含量的计算公式为:

$$V_g = \frac{b - b^*}{\rho_w - \rho_g} \quad (15)$$

煤层气含量既可以用来解释煤层和煤层气层,又可以用来估算煤层气藏储量。煤层气藏储量的计算公式是:

$$V_{gs} = AHV_g \frac{1}{Z_2} \frac{T_1 p_2}{T_2 p_1} \quad (16)$$

式中:  $V_{gs}$  为在地面标准温度和压力条件下的煤层气藏储量;  $A$  为煤层气藏面积;  $H$  为煤层气藏厚度;  $Z_2$  为煤层气偏差系数;  $T_1$ 、 $p_1$  分别为地面标准温度和压力;  $T_2$ 、 $p_2$  分别为煤层气藏温度和压力。

### 参 考 文 献

- 1 朱训著. 地质科学与地质矿产. 昆明: 云南科技出版社, 1997
- 2 Hether A R. Methene technology energy bridge through the 21st century. BPGS, 1984
- 3 谭廷栋著. 天然气勘探中的测井技术. 北京: 石油工业出版社, 1994
- 4 [法]塞拉著, 谭廷栋等译. 测井解释基础与数据采集. 北京: 石油工业出版社, 1992
- 5 雍世和, 张超漠编著. 测井数字处理与综合解释. 山东东营: 石油大学出版社, 1997

(收稿日期 1998 - 04 - 27 编辑 韩晓渝)

## 我国西部地区形成四大天然气田

我国西部的塔里木盆地、柴达木盆地、陕甘宁盆地和川渝盆地经过多年油气勘探开发, 现已形成了四个国家级天然气田, 为我国组织实施西气东输工程奠定了雄厚的资源基础。

据中国石油天然气集团公司的资料表明, 到 1998 年底, 西部地区累计探明的天然气储量已超过 1.5 万亿立方米, 其中塔里木、陕甘宁和川渝盆地探明的天然气储量均在 3 000 亿立方米以上, 成为大型天然气田。1998 年, 西部地区生产天然气 149 亿立方米, 实际年生产能力已超过 180 亿立方米。

西部地区蕴藏着 26 万亿立方米天然气资源, 占全国陆上天然气资源总量的 86.7%。目前, 上述四个盆地的油气勘探工作正按照总体部署, 层层推进。预计到 2010 年, 累计探明的天然气储量将达到 3.45 万亿立方米。

(王协琴 摘)