

天然气层测井分析述评

文华川

(四川石油管理局勘探处)

内容提要 天然气因其固有特点使测井响应具明显特征。本文阐述了识别气层、划分油、气、水界面的测井分析技术和气层储层参数的评价方法。指出了应发展独立的气层测井分析技术的意义。

发展专门勘探天然气的测井技术,对我国未来天然气工业的发展会起积极作用。纵观当代一系列石油测井方法,我认为对天然气较灵敏的主要有七种:声波、中子、井温、自然声波、电缆式地层测试器测压及取样、重力测井和生产测井。当然也不排斥其他测井方法在寻找和评价气层方面的作用。

天然气测井分析技术

根据国内、外气田的实践,天然气测井分析技术分类如下:

一、探测气层的主要测井分析方法

1. 井温低异常

在适当时刻和适当工程条件下,可用井温仪测量记录地层扩散逸出的天然气膨胀、吸热所引起的井眼低温异常。现代井温仪已能记录井中 $0.1\sim 0.01^{\circ}\text{F}$ 的微小温度变化。只要测井前一段时间里有天然气从地层溢入井中,这种测量就卓有成效。图1是四川某井的测井实例,图中气层、产水层变化明显,特征清楚。

在四川运用井温找气层已有30多年历史。然而,近年来很少受人重视。国外,在大量采用新的、“复杂的”测井方法的今天,却比以往更加重视井温找气技术。这是值得我们借鉴及注意的。应把井温测井重新列入气田的常规测井系列,以低异常指示含有天

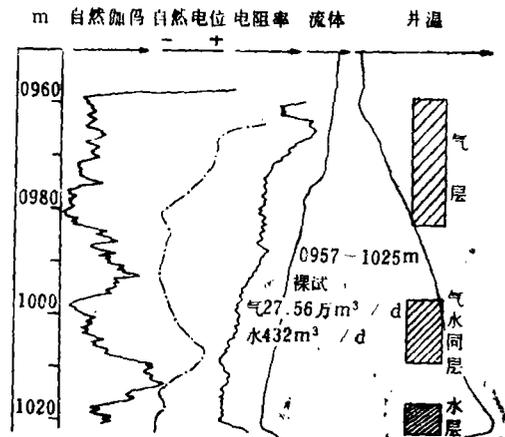


图1 显示出产气层、产水层的井温、流体测井实例

然气的油、气、水层,并以高异常指示水层和不含(或少含)天然气的油层。当然,解释时应注意剔除漏层及大井眼等引起的假象。将此法与井内流体电阻率测井一起运用,有助于区分气层、水层和气水同层。

2. 声波纵波时差增高

(1) Δt “不正常”增高——曲线周波跳跃

声波滑行纵波也受地层孔隙中流体性质制约而衰减。当气层孔隙度(或低角度裂缝)发育、含气饱和度较高且泥浆侵入不深时,首波衰减剧烈,使远接收探头检测不到首波而推迟记录到后续周波, Δt 曲线发生

“周波跳跃”， Δt 不正常地大幅度偏高，曲线显示为异常尖峰。这种异常与不含气的裂缝发育带的异常相比，具有跳波形状和数值大小较不稳定且跳波更为剧烈的特点。图2为性能良好（不易因其它因素而发生跳波）的斯仑贝谢测井仪所测四川一口井在良好气层处的周波跳跃。

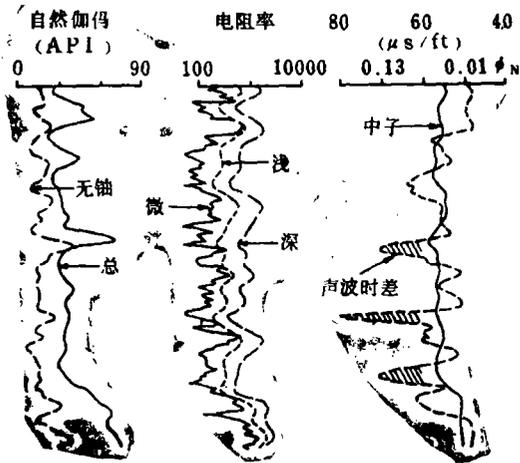


图2 四川某高产气井 Δt 曲线周波跳跃

(2) Δt “正常” 增高

以孔隙度5%的地层为例，其孔隙度含油与含水时 Δt 仅差 $7.5\mu\text{s}/\text{m}$ ，而含气与含水则差达 $84\mu\text{s}/\text{m}$ 。这决定了气层 Δt 及实际以水作孔隙流体所计算的声波孔隙度 ϕ_s 都显著歪曲偏高。这种 Δt 及 ϕ_s 的增高并非记录 Δt 跳波所致，故称为“正常”增高。

3. 中子孔隙度偏低

气层处因中子测井探测空间内地层孔隙含气而使所测中子孔隙度减小，这已是众所周知的。

4. 电缆式地层测试器取气样

直接在井中已知指定深度取出气样，确定产气层。

5. 自然声波异常

从地层向井冲出之流体会产生某些频率、强度自然振动的声波，产气层最容易诱

发自然声波，在平静的基线上可看到剧烈异常，并可定点记录观测其波形。

自然声波频谱特性与产流体性质有关，其强度与单位地层厚度之产量及地层与井液柱之压差有关。

6. 声波纵、横波时差比值增高

气层处侵入带纵波时差比原状地层的小。L.J.Baker研究指出，这种“冲洗带”纵波速度比气层原状地层的高40%，但二者横波速度差别不大。如果仪器源距比“冲洗带”深度大得多，由于泥浆——冲洗带界面临界折射能量随源距增大而减小，我们就能探测到气层原状地层的纵波速度，却不能观测到横波速度，仅在侵入深度极浅（ $<50\text{m}$ ）时才例外。利用这些特征探测气层，有一定潜力。苏联已应用纵、横波时差比值 $\Delta t_s/\Delta t_c$ （气层高于非气层）来确定裂缝性气层。斯仑贝谢也成功地运用直接相确定法（DPD）提取长源距声波测井记录的横波信息，预料将促使声波全波列探测气层技术的逐渐成熟起来。

7. 重力测井异常^[1:2]

无论砂岩或碳酸盐岩，气层的体积密度都低于油层和水层。探测深度可深达几十米的重力测井，自然最能清晰反映原状地层的含油、气、水真象。60年代并眼重力仪开始试验用于油气储集层评价以来，国外近年又开始以其所测之地层体积密度来计算孔隙度，并与深探测电阻率测井组合求解出地层深部真实的含烃饱和度，从而有力地气层与油、水层区分开。对于裂缝、溶洞和生物礁的气藏，尤为清楚。这种探测气层的方法，将普遍发展起来。

8. 地层声阻抗的差别

作为声阻抗近似值的实数声阻抗 $Z = \rho \cdot V$ ，用声波和密度测井求得。目前，在国内、外都开始有少量实验，已发现气层的 Z 值有别于油层和水层。因而，这可能会

成为一种待开拓的方法。

二、探测气层的快速直观方法

用对天然气有不同响应（即在气层处朝相反方向响应）的两种或多种测井参数作交会图，或以曲线形式重叠，可突出气层。这是探测和评价气层又一类常用的分析技术³。

1. 声波——中子交会图 ($\phi_s \sim \phi_N$ 或 $\Delta t \sim \phi_N$)

天然气使声波时差及声波孔隙度增高，使中子孔隙度减小，这两种异常响应的方向恰巧相反。图3是示意图，箭头指示出天然气影响的趋向。在这类交会图上，天然气引起的层点位置偏离比后述的其它交会图明显，是探测气层最为普遍有效的、最易于识别气层的一类交会图。这种交会图的基础方程是：纯水层线 $\phi_s = \phi_N$ ，气层处与侵入带残余气饱和度 S_{hr} 及轻烃中子孔隙度 ϕ_{Nh} 有关，即 $\phi_s = \frac{\phi_N}{1 - S_{hr} \cdot \phi_{Nh}}$ 。

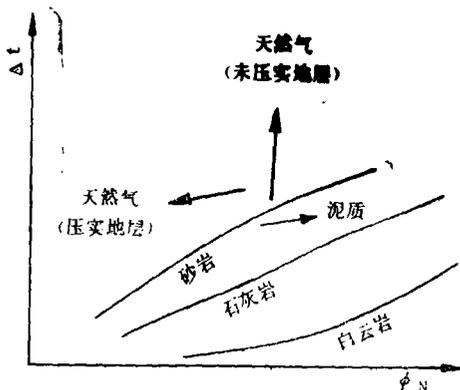


图3 $\Delta t \sim \phi_N$ 交会图的天然气效应

2. 密度——中子交会图 ($\rho_b \sim \phi_N$)

用天然气对密度和中子两种测井求解孔隙度的不利影响，作为探测天然气的基础，把这两种测井孔隙度 (ϕ_D 和 ϕ_N) 之差异认定是轻烃造成。轻烃密度 ρ_b 越小，轻烃饱和度 S_b 越高，差异就越明显。 $\phi_D \sim \phi_N$ 交会图基础方程是：纯水层线 $\phi_D = \phi_N$ ，油气层

$$\phi_D = \left(\frac{1 + S_{hr} \cdot \phi_{Dh}}{1 - S_{hr} \cdot \phi_{Nh}} \right) \cdot \phi_N。实践中常$$

采用 $\rho_b \sim \phi_N$ 形式作图。根据1972年以来德克萨斯等地的使用经验，这类交会图在复杂岩性地层应用效果较好。在非气层处求孔隙度最好，在气层处对识别气层也较有效。

3. 电阻率——孔隙度交会图 ($R_t \sim \phi$)

四川普遍使用的亨格尔交会图和皮克特交会图都属此类。以后一种为例，其基础方程是：水层线 $\log R_t = -m \log \phi + \log(aR_w)$ ，油气层处 $\log R_t = -m \log \phi + \log(aR_w) - \log \frac{S_w}{(1 + S_{hr} \cdot \phi_b)^m}$ 。四川地区普遍使用声波测井，以 ϕ_s 作 ϕ ，这类交会图上可看出气层层点明显偏离水层线。但只能把油层及气层与水层分开，而不能区分油、气层。

与此相似，四川常用的深、浅电阻率交会图 ($R_x \sim R_l$) 及 $P^{\frac{1}{2}}$ 概率图，都是只能把油、气层与水层分开。而不能分开油、气层的。但在已知无油的气田，这些方法对探测气层仍有效果。

4. 对岩性敏感的交会图

基于三种以上矿物模型求解的矿物岩性

$$(M \sim N) \text{ 交会图 } (M = \frac{\Delta t_{mf} - \Delta t}{\rho_b - \rho_f},$$

$$N = \frac{\phi_{Nm} - \phi_N}{\rho_b - \rho_{mf}})、骨$$

架识别 (MID) 交会图 ($(\rho_{ms})_s \sim (\Delta t_{ms})_s$)、 $M \cdot N$ 乘积——骨架密度交会图 ($M \cdot N \sim \rho_{ms}$)、 $M \sim \rho_b$ 交会图和 $A \sim K$ 交会图 ($A = \frac{1}{N}$, $K = \frac{M}{N}$) 等，都是基本不

取决于孔隙度而只取决于岩石骨架和孔隙流体的交会图。因此，在确定岩性的前提下，用这些交会图都可能发现层点的天然气趋向，成为探测气层的分析方法，在欧洲北海地区已有应用。

5. 声波——电磁波交会图 ($\phi_s \sim \phi_{EPT}$)

天然气效应使电磁波孔隙度 ϕ_{EPT} 减小 ϕ_s 增大, 此法用于找气较有效, 且具分辨率高的优点。这种交会图在欧洲已有应用, 并获得了较高的成功率。

6. 重力密度——脉冲中子交会图

($\rho_b \cdot BHGM \sim \phi_{TDT}$)

可在套管井里发现地层水矿化度不低于 30000mg/l 的气层及管外旁串天然气。天然气使层点明显偏离水层线而趋向低孔隙度、低密度的方向。近年美国某老油田用此法找出“死气”, 效果极好⁴。

7. 双孔隙度重叠和三孔隙度重叠

国、内外曾用 ϕ_s 与 ϕ_R 曲线重叠 ($\phi_R = \sqrt{R_w/R_{11d}}$), 中子与声波 (在适当横向比例下) 曲线重叠、深侧向 ϕ_{11d} ($\phi_{11d} = \sqrt{R_w/R_{11d}}$) 及微球形聚焦测井 ϕ_{MSFL} ($\phi_{MSFL} = \sqrt{R_{mf}/R_{MSFL}}$) 与 ϕ_s 或 ϕ_N 作三孔隙度曲线重叠。后一种意味着地层孔隙度 ϕ 与地层含水孔隙度 ϕ_w 及冲洗带含水孔隙度 ϕ_x 的重叠, 故还可用以估计可动油气。

三、时间推移测井分析技术

时间推移测井用来了解侵入带孔隙空间中原状地层流体因平衡过程或条件改变引起的变动情形。前后对比, 采用同一种仪器方法, 可消除岩性、孔隙度和泥质等因素的影响, 从而突出孔隙流体 (油、气、水) 因素的作用。这对于在复杂岩性地区找气, 有较大价值。

1. 侵入过程时间推移测井

钻开目的层作第一次测井后一至数月, 再作同样测井, 气层处电阻率将会降低、 Δt 或 ϕ_s 将会变小、 ϕ_N 增高、 ϕ_D 减小 (ρ_b 增高)¹⁵。

2. 侵入区恢复时间测井

套管固井后, 发生地层中油、气、水往侵入带回返的过程。将刚固完井时 (或裸眼

时) 所测曲线与固井后一至数月所测同类曲线重叠或对比, 气层处后一次测井的 ϕ_N 明显变低、 ϕ_s 或 Δt 增高、 ϕ_D 增大 (ρ_b 减小)。这种方法易于实施和见效, 值得在一些重点探井中采用、推广。

3. 开采过程中的时间推移测井

油气开采过程中用孔隙度测井和生产测井多次测量, 可明确指示产气层位。近年美国还用井眼重力仪在开采期中测量 ρ_b 的变化来确定疑难气层, 见到了好效果。

四、区分油、气、水层和划分油、气、水界面

区分油、气层, 划分气~油界面, 用裸眼井测井的中子、声波、密度三种孔隙度测井中的任意两种进行交会, 在理想条件下, 可能从纵向上油、气层两种层点的逻辑分布见到效果。原理和经验表明, 不能从 $R_1 \sim \phi$ 、 $\phi_s \sim \phi_{EPT}$ 之类交会图及 P^2 概率图区分开油、气层, 其他如 $M \sim N$ 、 $(\rho_{m_2})_s \sim (\Delta t_{m_2})_s$ 等交会图效果也差。

区分气、水层, 划分气~水界面较为容易, 电阻率测井信息具有明显优势, 可发挥较大作用。同时, 井温和井内流体电阻率测井、深、浅侧向的径向电阻率特征 (正、负幅度差)、电阻率~孔隙度交会图及其他双孔隙度交会图的分析, 以及时间推移测井技术和生产动态测井, 都会有明显的效果。

现代测井技术提供的电缆式地层测试器是非常有效的手段。在初步测井分析基础上, 可用它取样, 直接根据所获油、气样品作出油、气、水层的结论, 并以系统测压所测地层压力值按井深点图, 从压力梯度的变化 (石油为 0.085MPa/m, 天然气为 0.01~0.02MPa/m) 确定出气~油~水界面。划分气~水界面, 应用效果更明显、可靠 (地层水的压力梯度不小于 0.1MPa/m), 这在四川和巴基斯坦都很成功。这是今后应当大力提倡、普遍采用的有效方法。

五、探测裂缝气层

由于在不少测井方法上裂缝与天然气响应趋势一致,裂缝气层比均匀孔隙性气层具有更加突出的特征:

- (1) 井温曲线低温异常更容易表现出来;
- (2) Δt 周波跳跃更易发生,表现更加强烈;
- (3) 横、纵波时差比值 $\Delta t_s/\Delta t_c$ 更低;
- (4) 声波能量(幅度)衰减更加剧烈;
- (5) $\Delta t \sim \phi_N$ 交会图和重迭图在低孔裂缝气层比在低孔无裂缝均质气层更易见效;
- (6) 重力测井更能探测远离井眼大范围的裂缝——溶洞型天然气层。

天然气储层参数评价法

正确估计和校正天然气对孔隙度测井响应的影晌,尤其是对中子和声波两种测井的影响,是求准储层参数的关键。

1. 基本孔隙度、饱和度评价法

目前,主要采用中子和密度两种测井信息,通过解联立方程组,求出岩心孔隙度及地层含气饱和度。迄今,此法仅应用于砂岩气层。

2. 重力测井计算气层参数

其基础方程是

$$\rho_b = (1 - \phi) \cdot \rho_{m_i} + \phi [S_w (\rho_w - \rho_h) + \rho_g]$$

与
$$\phi = \left[a \frac{R_w}{R_i} \right]^{\frac{1}{m}} \cdot S_w^{-\frac{n}{m}}$$

合并可得一个不包含 ϕ 值的新方程

$$\rho_b = \rho_{m_i} - \left[a \frac{R_w}{R_i} \right]^{\frac{1}{m}} \cdot S_w^{-\frac{n}{m}} \cdot [\rho_{m_i} - \rho_w (\rho_w - \rho_h) - \rho_g]$$

利用这一方程,不需任何其他孔隙度测井就可单一地解出 S_w 值,并继而代入上述 ϕ 方程求得 ϕ 值^[1]。这种方法不受井眼和侵入带

影响,尤其对于非均匀的裂缝~溶洞储层有最好的代表性。同时,由于重力测井和深探测电阻率测井两种方法都对天然气有灵敏的反映能力,故所求气层参数很有价值。今后应将这种方法普遍运用起来。

3. 用电磁波传播测井计算油气饱和度

对于没有纯水层电阻率资料的碳酸盐岩产气层,苏联用 $S_{og} = 1 - \frac{\epsilon - 10^{(1-\phi) \cdot 10^8 \cdot \epsilon}}{80\phi}$

计算油气饱和度。式中, ϵ 为所测气层的介电常数, $\log \epsilon_c$ 一般等于9。

4. 在套管井用核测井计算参数

主要采用热中子衰减时间测井(TDT)、补偿中子测井(CNL)和次生伽玛能谱测井(IGT)。在气层,CNL所求视孔隙度与气层真孔隙度的差别取决于含气饱和度和轻烃的含氢指数。TDT求 S_w 要求地层水矿化度不小于30000mg/l且稳定不变、精确已知。IGT所测碳氧比(C/O)很少受矿化度的影响,所求饱和度的精度与水的矿化度无关。中东地区用这些核测井方法监控套管生产井和观察井,对了解枯竭剖面和提高油气采收率有积极意义^[10]。

5. 用地区经验方程计算孔隙度

在局部地区、地层特定条件下,用统计方法求得测井孔隙度与岩心实测孔隙度间的关系,建立经验方程,用此方程来确定孔隙度。

结 语

深入研究天然气独特的测井响应,发展针对天然气层的测井分析技术,在天然气工业高速发展的时代,必将日益为人们所重视。应开拓一个勘探天然气独立的测井分支,同时解决探测气层的深井、超深井测井工艺技术问题,这对今后优化天然气勘探、开发效果将发挥显著作用。

气 藏 边 界 识 别

钟 孚 勋

(四川石油管理局地质勘探开发研究院)

内容提要 本文介绍了利用气井井口动态资料识别裂缝性气藏边界的方法。并从应用角度出发,采用重新设置初值反复辨识的方法,克服了解的不适定性,提高了识别结果的可靠性。该法能用于寻求气藏的区域大小和形状、边界的性质及其补充方向和补充量,可为认识和开发气藏提供依据。

油气藏的合理开发和管理,需要充分认识油气藏地下的实际状态,确定各类参数,其中包括边界性质、边界位置和区域形状。对于裂缝性储层,还需要知道裂缝的延伸方向,划分裂缝系统。然而,至今没有可靠的方法获得这些参数。1975年W.H.Chen把最优控制方法用于边界位置识别^[1],给出了一种辨识途径,但是,由于缺乏深入研究,至今未能实际应用。

本文在Chen的研究基础上,针对四川气藏的特征,推导出了裂缝性气藏边界识别计算公式,并在大量的计算和理论分析基础上,建立了一套行之有效的算法,保证了在一定条件下识别结果的可靠性。虽然文中仅使用了单相气驱模型,但是对于边水气藏,可以识别早期水侵方向和侵入量大小。对于寻求裂缝的延伸方向,划分裂缝系统,也有价值。

本文只讨论了裂缝性储层,均质储层可视为特殊情况。

理 论 基 础

使用最优控制方法确定气藏边界,类似于多元函数求极值的方法。在一些附加约束条件下,求解与井口实测压力和井口预算压力间差值相关的目标函数的最小值,以求得最佳的气藏边界参数。

1. 目标函数的建立

对于裂缝性单相气驱气藏,我们有如下描述系统:

参 考 文 献

- (1)L.S.Gournay, W.D.Lyle: "Determination of Hydrocarbon Saturation and Porosity Using A Combination Borehole Gravimeter (BHGM) and Deep Investigation Electric Log". 《SPWLA 25th Annual Logging Symposium》. June 1984
- (2)李德芬、文华川、赵良孝 国外测井技术译文选 四川石油管理局测井评价组 1984年
- (3)W.H.Fertl: "Openhole Crossplot Concepts —A Powerful Technique in Well Log

Analysis", J.P.T., 1981, 33, NO.3

(4)L.S.Gournay et al: Detection of Bypassed Gas Using Borehole Gravimeter and Pulsed Neutron Capture Logs", 《The Log Analyst》. 1982, 23, NO.3

(5)魏凤菊 中原油田气层解释初探 1985年11月

(6)P.Westaway et al: "Application of Nuclear Technique to Reservoir Monitoring". J.P.T., 1981, 33, No.1

(本文收到日期 1986年10月30日)

Discovery of the Organic Reef in Changxing Formation at Jiantianba of Western Hubei and a Primary Analysis of its Control Factories

Some people had systematically researched the organic reef in Changxing formation at Jiantianba of Western Hubei and considered it was one of the most typical reefs in our country. This paper gives a necessary and additional discussion on the discovering process and the key indicators defined as a reef: The geological structure conditions forming the reef are discussed also.

Hu Chaoyuan

Reef Rocks and Pores

Petroleum geologists always think that the framework pores in organic reef are the best accumulation space for oil and gas. Through determining, analyzing and contrasting the petrophysics of the reef rocks on surface and in subsurface in South-West region of our country, it is demonstrated that the ancient reef rock is not a good reservoir and not even a reservoir. The conditions necessary for the ancient reef rock to become a reservoir are that either the ancient reef rock had been corroded and leached or it had been dolomitized by mixture replacement of salt water and fresh water.

Zhang Yinben, Chen Jigao

Forming Conditions of the Organic Reef in Changxing Formation of Upper Permian in Eastern Sichuan and Western Hubei

The Changxing Age of Late Permian had the geological base for the organic reef to grow in Eastern Sichuan and Western Hubei. The source rock, reservoir rock and cap rock of reef gas reservoir are favourable and the reef type is various, so it can create gas reservoirs of lithologic and lithologic-structural traps. The prospecting is optimistic.

Liu Lingshan

A Commentary on Logging Analysis of Gas Reservoirs

Natural gas, because of its intrinsic attributes, enables the log response to be of obvious characteristics. This article briefly states the logging analysis technique for distinguishing gas reservoirs and dividing oil-water and gas-water surfaces and the method for evaluating gas reservoir parameters, and it also points out the significance of distinctive developing the logging analysis technique for gas reservoirs.

Wen Huachuan

Identification of Gas Reservoir Boundary

A method for identifying the boundary of fractured gas reservoir by using gas wellhead performance data is presented in this paper. From the application point of view the uncertainty of the solution is overcome by re-setting up initial value to identify repeatedly and the reliability of the identifying results is raised. This method is able to search the size, shape boundary property of the gas reservoir and the gas supply orientation and its amount. It may also provide basis for identifying and developing gas reservoirs.

Zhong Fuxun