

测井解释凝析油气层

谭 廷 栋

(石油部石油勘探开发科学研究院)

内容提要 大港油田板桥地区,是典型的凝析油气藏。本文提出电阻率比值法、声波差值法与饱和度挖补法解释该地区凝析油气层,获得了显著的地质效果。可供其他地区参考。

凝析油气层与一般油、气层的性质有别,其测井分辨率比后者低,采用传统的测井解释方法来识别,直观性极差,有时难于发现。本文针对凝析油气层特点提出的测井解释新方法(结合实例)提高了直观识别的分辨率和解释精度。

电阻率比值法

测量的原状地层电阻率与计算的水层电阻率之比,定义为地层电阻率比值;计算的凝析油气层临界电阻率与计算的水层电阻率之比,定义为地层临界电阻率比值。当地层电阻率比值等于或大于地层临界电阻率比值时,直观指示是凝析油气层(油层电阻率比值与凝析油气层相似);反之,当地层电阻率比值小于地层临界电阻率比值时,直观指示是水层。这是电阻率比值法解释凝析油气层的基本法则,其特点是直观识别性强。

大港油田板桥地区普遍使用盐水泥浆钻井,在地层温度条件下,泥浆电阻率低于地层水电阻率5至10倍,通常选用侧向测井探测其原状地层电阻率。

因此,对黔北的奥陶、志留系应引起重视。

3. 中值区的西部,泥盆至奥陶系处于过成熟阶段,有干气存在。据赫章西侧铁矿山等地资料,推测威宁至水城狭长地带的地腹可能有奥陶、志留系。因此,在该地区寻找奥陶、志留系气藏有一定的希望。

4. 黔南地区虽处于变质区,但中泥盆统的成熟度稍低,仍可能有干气存在,亦应适当注意。

本文承蒙邓宗淮、赵志东和刘特民等审阅,任卫丽绘图、表,在此深致谢意。

参 考 文 献

- [1] 金晓华 贵州煤的变质规律与古生界油气远景《石油与天然气地质》1983年第4卷第2期
- [2] Waples, D.W. Time and temperature in petroleum formation, Application of Lopatin's method to petroleum exploration, AAPG vol.64, P.916—926, 1980
- [3] 蒂索等 《石油的形成和分布》石油工业出版社 1982年

(本文收到日期 1986年5月16日)

侧向测井电阻率不仅与原状地层电阻率有关,而且还与侵入带直径和冲洗带电阻率有关。

深侧向测井电阻率响应方程是:

$$R_{LLd} = \left(\frac{K_d}{2\pi h} \ln \frac{D_i}{d_c} \right) R_{x_0} + \left(1 - \frac{K_d}{2\pi h} \ln \frac{D_i}{d_c} \right) R_1 \quad (1)$$

式中: R_{LLd} ——深侧向测井电阻率, Ωm ; R_1 ——原状地层电阻率; R_{x_0} ——冲洗带地层电阻率; D_i ——侵入带直径, m; d_c ——井眼直径; h ——主电流层厚度, m; K_d ——深侧向测井电极系数, m。

浅侧向测井电阻率响应方程是:

$$R_{LLs} = \left(\frac{K_s}{2\pi h} \ln \frac{D_i}{d_c} \right) R_{x_0} + \left(1 - \frac{K_s}{2\pi h} \ln \frac{D_i}{d_c} \right) R_1 \quad (2)$$

式中: K_{LL} ——浅侧向测井电阻率; K_s ——浅侧向测井电极系数。其余符号同前, 不另说明, 下同。

侧向测井电阻率要受泥浆侵入的影响, 通过解联立方程可以校正, 获得原状地层电阻率:

$$R_1 = \frac{K_s}{K_s - K_d} R_{LLd} - \frac{K_d}{K_s - K_d} R_{LLs} \quad (3)$$

把已知深、浅侧向测井电极系数代入(3)式, 最后获得原状地层电阻率:

$$R_1 = 2.589 R_{LLd} - 1.589 R_{LLs} \quad (4)$$

大港油田板深某井电阻率的比较 表1

解释层号	深侧向测井电阻率	原状地层电阻率
10	2.9	4.65
11	5.3	7.68
12	4.4	6.30
13	7.9	12.35
14 ^上	5.2	9.96
14 ^下	3.5	6.2

上式是侧向测井侵入校正方程^[1], 用它以确定原状地层电阻率。

大港油田板深某井深侧向测井电阻率与原状地层电阻率示于表1中。原状地层电阻率是由(4)式计算获得的。

该表指出, 在盐水泥浆侵入影响情况下, 深侧向测井电阻率始终小于原状地层电阻率。例如, 解释层号13层是泥质砂岩凝析油气层, 深侧向测井电阻率为7.9 Ωm , 应用(4)式作过盐水泥浆侵入校正后获得的原状地层电阻率为12.35 Ωm , 它比深侧向测井

电阻率提高1.56倍。

计算的水层电阻率不受盐水泥浆侵入的影响。大港油田板桥地区凝析油气层主要为泥质砂岩, 计算的水层电阻率由“双水法”公式^[2]确定:

$$R_0 = \frac{a}{\phi_T^m} \left[\frac{R_{WB} R_{WF}}{S_{WB} R_{WF} + (1 - S_{WB}) R_{WB}} \right] \quad (5)$$

式中: R_0 ——计算的水层电阻率; R_{WF} ——纯砂岩地层水电阻率; R_{WB} ——粘土水电阻率; S_{WB} ——粘土水饱和度; ϕ_T ——泥质砂岩总孔隙度; m ——孔隙度指数; a ——阿尔奇公式经验常数。

泥质砂岩总孔隙度由声波测井获得;

$$\phi_T = \frac{\Delta t - \Delta t_{m_1}}{\Delta t_f - \Delta t_{m_1}} \cdot \frac{1}{C_p} \quad (6)$$

式中： Δt ——地层纵波时差， $\mu s/m$ ； Δt_w ——流体纵波时差； Δt_{m_1} ——矿物纵波时差； C_p ——压实校正系数。

计算的水层电阻率是指岩石孔隙空间不含凝析油气时的岩石电阻率。

计算的凝析油气层临界电阻率同样地不受盐水泥浆侵入的影响，计算的凝析油气层临界电阻率仍由“双水法”公式²确定：

$$R_{lc} = \frac{R_0}{[S_w(1 - S_{WB}) + S_{WB}]^n} \quad (7)$$

式中： R_{lc} ——计算的凝析油气层临界电阻率； S_w ——凝析油气层有效孔隙空间含水饱和度； n ——饱和度指数。

大港油田板桥地区凝析油气层有效孔隙空间内含水饱和度50%作为计算的凝析油气层临界电阻率标准，使用效果良好。

1. 地层电阻率比值

地层电阻率比值等于测量的原状地层电阻率与计算的水层电阻率之比，用公式表示：

$$I = \frac{R_1}{R_0} \quad (8)$$

式中： I ——地层电阻率比值。

2. 地层临界电阻率比值

地层临界电阻率比值等于计算的凝析油气层临界电阻率与计算的水层电阻率之比，用公式表示：

$$I_c = \frac{R_{lc}}{R_0} \quad (9)$$

式中： I_c ——地层临界电阻率比值。

图1是大港油田某井用电阻率比值法直观指示凝析油气层实例³¹。 I (实线)由(8)式算出， I_c (点线)由(9)式计算出，解释层号绘在深度栏右边。

该井使用盐水泥浆钻井，砂岩自然电位幅度为正值。

13层地层电阻率比值大于地层临界电阻率比值，直观指示是凝析油气层，射孔测试凝析油产量48t/d，天然气产量53800m³/d。11层与12层地层电阻率比值小于地层临界电阻率比值，直观指示是水层，射孔测试只产水。

应用结果表明，电阻率比值法解释凝析油气层不仅直观性好，而且分辨率高，它是

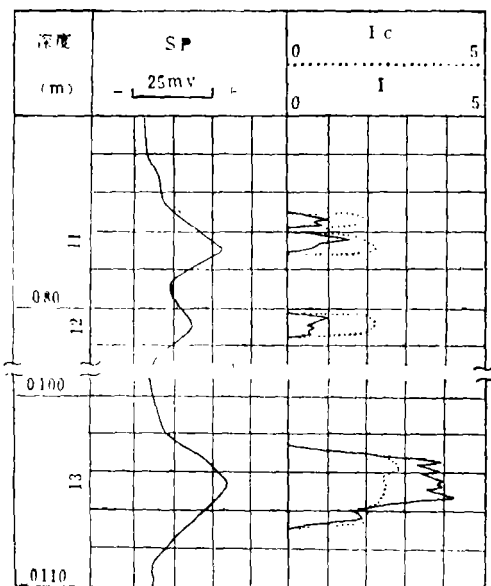


图1 板深某井用电阻率比值法直观指示凝析油气层

测井直观识别凝析油气层的有效方法之一。

声波差值法

凝析油气在地层温度和压力条件下是单相气体。因此，可以采用声波测井与中子伽马测井勘探凝析油气层。

由声波测井获得测量声波时差，由中子伽马测井获得合成声波时差。测量声波时差减合成声波时差，定义为声波差值。在相同岩性和相同孔隙度条件下，凝析油气层的测量声波时差大于水层的测量声波时差；凝析油气层的合成声波时差小于水层的合成声波时差。因此，当测量声波时差大于合成声波时差时，声波差值大于零，直观指示是凝析油气层；反之，当测量声波时差等于合成声波时差时，声波差值等于零，直观指示是水层。这是声波差值测井解释凝析油气层的基本法则。

大港油田板桥地区的测井程序是：在裸眼井中测量声波时差和在套管井中测量中子伽马，如果地层是凝析油气层，前者只受冲洗带剩余凝析油气饱和度的影响，后者要受原始凝析油气饱和度的影响。所以，在套管井中测量中子伽马，能够提高直观识别凝析油气层的分辨率。

声波在岩石中的传播速度不仅取决于岩石的体变模量、剪切模量和体积密度，而且还取决于岩石孔隙度和流体饱和度。根据弹性力学理论导出计算声波速度的公式是：

$$V_c = \sqrt{\left[K_d + \frac{4}{3} \mu_d + \frac{(1 - \frac{K_d}{K_{m_s}})^2}{(1 - \phi - \frac{K_d}{K_{m_s}}) \frac{1}{K_{m_s}} + \frac{\phi}{K_f}} \right] \frac{1}{\rho_b} \times 10^{-2}} \quad (10)$$

式中： V_c ——声波（纵波）速度，m/S； K_d ——干岩石（孔隙空间无流体）体变模量，dyn/cm²； K_{m_s} ——岩石矿物（骨架）体变模量； K_f ——孔隙流体体变模量； μ_d ——干岩石剪切模量，dyn/cm²； ρ_b ——岩石体积密度，g/cm³； ϕ ——岩石孔隙度。

声波在凝析油气层中的传播速度与气层相似。因此，可以利用（10）式描述凝析油气层声波速度的变化。凝析油气层孔隙流体体变模量与单相气体饱和度的关系是：

$$\frac{\phi}{K_f} = \frac{\phi S_g}{K_g} + \frac{\phi(1 - S_g)}{K_w} \quad (11)$$

式中： K_g ——凝析油气体变模量； K_w ——水的体变模量； S_g ——凝析油气饱和度。

凝析油气层岩石体积密度与孔隙度及其含凝析油气饱和度的关系是：

$$\rho_b = \phi [S_g \rho_g + (1 - S_g) \rho_w] + (1 - \phi) \rho_{m_s} \quad (12)$$

式中： ρ_g ——凝析油气体积密度； ρ_w ——水的体积密度； ρ_{m_s} ——岩石矿物体积密度。

把（11）与（12）式代入（10）式，可以看出，声波在凝析油气层中的传播速度与孔隙度和凝析油气饱和度有关，这是利用声波测井勘探凝析油气层的理论基础。

测量声波时差等于测量声波速度的倒数：

$$\Delta t_c = \frac{10^9}{V_c} \quad (13)$$

式中： Δt_c ——测量声波时差， $\mu s/m$ 。

在“油气层速度计算方法的研究”¹⁴一文中,应用弹性力学公式与时间平均公式计算了胜利油田A井油层与B井气层的声波速度,并与实际测量的声波速度作了比较,结果表明,用弹性力学公式与时间平均公式计算的油层声波速度同实际测量的声波速度基本一致(水层声波速度与油层类似);然而,用弹性力学公式与时间平均公式计算的气层声波速度相差极大,弹性力学公式计算的气层声波速度远小于时间平均公式计算的气层声波速度,但是它们之间的变化趋势基本相同,实际测量的气层声波速度与弹性力学公式计算的气层声波速度十分接近。对比指出,弹性力学公式适用计算水层、油层和气层的声波速度,时间平均公式只适用计算水层和油层的声波速度,而不适用计算气层的声波速度。在声波差值法中,我们是用时间平均公式转换成声波时差,可以利用弹性力学公式与时间平均公式计算气层声波速度的差别,提高直观识别凝析油气层的分辨率。

在地层中,测量声波时差与声波测井孔隙度的关系是:

$$\Delta t_c = \phi_s \Delta t_w + (1 - \phi_s) \Delta t_m \quad (14)$$

式中: ϕ_s ——声波测井孔隙度。

地层中合成声波时差与中子伽马测井孔隙度的关系是:

$$\Delta t_{c..yn} = \phi_{NG} \Delta t_w + (1 - \phi_{NG}) \Delta t_m \quad (15)$$

式中: $\Delta t_{c..yn}$ ——合成声波时差, $\mu\text{s}/\text{m}$; ϕ_{NG} ——中子伽马测井孔隙度。

大港油田板桥地区中子伽马测井读数相对值与中子伽马测井孔隙度的经验关系是:

$$\phi_{NG} = 10^{-(0.35218 + 0.9247\Delta NC)} \quad (16)$$

式中: ΔNC ——中子伽马测井读数相对值。

中子伽马测井读数相对值求法如下:

$$\Delta NG = \frac{NG - NG_{min}}{NG_{max} - NG_{min}} \quad (17)$$

式中: NG ——中子伽马测井读数, 条件单位; NG_{min} ——中子伽马测井读数最小值; NG_{max} ——中子伽马测井读数最大值。

声波差值等于测量声波时差减合成声波时差:

$$\delta_{\Delta t} = \Delta t_c - \Delta t_{c..yn} \quad (18)$$

或者

$$\delta_{\Delta t} = 458(\phi_s - \phi_{NG}) \quad (19)$$

式中: $\delta_{\Delta t}$ ——声波差值, $\mu\text{s}/\text{m}$ 。

凝析油气层的声波测井孔隙度大于中子伽马测井孔隙度, 声波差值为正值。水层或油层声波测井孔隙度等于中子伽马测井孔隙度, 声波差值为零。

图2是大港油田某井用声波差值法直观指示凝析油气层实例⁵。

从12到19层, 声波差值 $\delta_{\Delta t}$ 大于零, 直观指示是凝析油气层。其中12层自然伽马GR特别低, 是钙质砂岩凝析油气层, 19层是砂岩凝析油气层, 两层射孔合试, 产凝析油气。17层是泥质砂岩凝析油气层, 射孔测试, 凝析油产量3.28t/d, 天然气产量22148m³/d。

饱和度挖补法

大港油田板桥地区凝析油气层岩心分析束缚水饱和度30~40%, 原始凝析油气饱和度

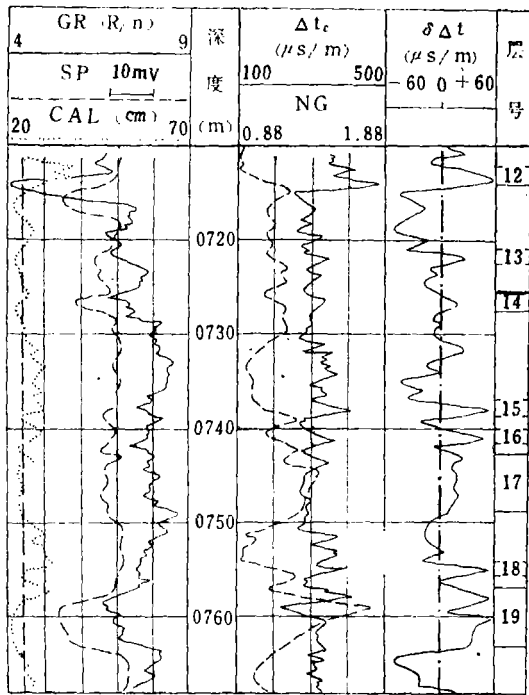


图2 板深某井用声波差值法直观指示凝析油气层

消除粘土束缚水饱和度的影响，使测井解释的泥质砂岩凝析油气层含水饱和度由原来的70%下降到30~40%，这与岩心分析的束缚水饱和度基本一致。

计算泥质砂岩凝析油气层总含水饱和度的公式如下：

$$S_{WT} = \left(\frac{R_0}{R_1} \right)^{1/n} \quad (20)$$

式中： S_{WT} ——泥质砂岩凝析油气层总含水饱和度。

在该式中，原状地层电阻率由(4)式确定，计算的水层电阻率由(5)式获得。

根据(20)式计算的泥质砂岩凝析油气层总含水饱和度，采用饱和度挖补法确定有效孔隙空间油气饱和度的公式是：

$$S_0 = 1 - \frac{S_{WT} - S_{WB}}{1 - S_{WB}} \quad (21)$$

式中： S_0 ——泥质砂岩凝析油气层有效孔隙空间原始油气饱和度。

饱和度挖补法是从总含水饱和度中挖掉粘土束缚水饱和度，补上有效孔隙空间含油饱和度。例如，用地层电阻率比值求得泥质砂岩凝析油气层总含水饱和度为60%，总孔隙空间油气饱和度只有40%，如果粘土束缚水饱和度为30%，代入(21)式，经过饱和度挖补后，获得泥质砂岩凝析油气层有效孔隙空间油气饱和度为57%，挖补效果十分显著。

图3是大港油田板深某井用饱和度挖补法确定泥质砂岩凝析油气层有效孔隙空间油气饱和度实例^[1]。深度右边第一道：泥质含量(V_{sh})，单位%，第二道：有效孔隙空间油气饱和度(S_h)，单位%，第三道：流体孔隙度(ϕ)，单位%与井径差值(CAL，单位cm)，

60~70%，而用深侧向测井电阻率采用阿尔奇公式计算的凝析油气层含水饱和度高达70%，凝析油气饱和度只有30%左右。以前把含水饱和度高达70%的地层解释为凝析油气层，但射孔测试获高产凝析油气，不产水，显然这与实际情况不符合。分析测井计算凝析油气层含水饱和度偏高的原因有二：

(1) 凝析油气粘度小，流动性好，采用高比重盐水泥浆钻井，在井眼周围地层凝析油气容易被泥浆滤液驱赶走，泥浆侵入深，使用未经侵入校正的深侧向测井电阻率确定凝析油气层含水饱和度偏高；(2) 该地区地层水矿化度低，砂岩颗粒细，有些凝析油气层含泥质，采用阿尔奇公式计算泥质砂岩凝析油气层含水饱和度偏高。基于上述原因，应用传统的测井解释方法计算的凝析油气层含水饱和度比原始束缚水饱和度高一倍左右。为了解决这个问题，采用原状地层电阻率消除盐水泥浆侵入的影响和饱和度挖补法

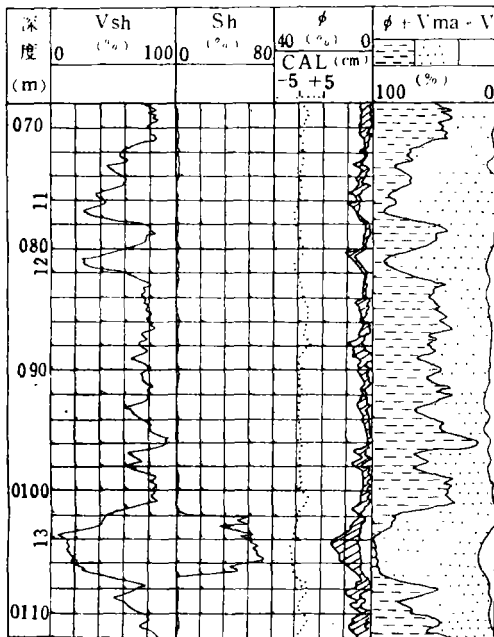


图3 板深某井用饱和度挖补法定量解释泥质砂岩凝析油气层

第四道：岩石成分 ($\phi + V_{ma} + V_{c1}$ ，单位%)。

13层是泥质砂岩凝析油气层，射孔测试有大量的凝析油气。该层使用深侧向测井电阻率算出总孔隙空间油气饱和度只有32%，使用原状地层电阻率算出总孔隙空间油气饱和度为40%，经过饱和度挖补后，求得有效孔隙空间油气饱和度为60%，这与大港油田板桥地区凝析油气层原始油气饱和度十分接近。11层与12层是泥质砂岩水层，射孔测试只产水。

饱和度挖补法用于定量解释泥质砂岩凝析油气层，它还能够提供计算油气储量参数。

我国凝析油气藏资源基础雄厚，勘探领域广阔，但测井解释凝析油气层的有效方法还不多，希望有更多的同志研究出能直观指示凝析油气层的测井解释新方法。

本项研究工作得到大港油田李盛岩同志的帮助，谨表感谢。

参 考 文 献

- [1] 谭廷栋、孙家林、陈世新、徐辉 双侧向测井侵入校正新方法 《测井技术》 1983年第4期。
- [2] 谭廷栋、杨应荣、司徒丽丽、黄燕云 双水法解释泥质砂岩油(气)水层 《测井技术》 1982年第6期。
- [3] 谭廷栋、尚海筹、李盛岩 轻质油层有效的测井评价方法 《北京石油地质会议论文》 1984年9月。
- [4] 钱绍新 油气层速度计算方法的研究 《石油地球物理勘探》 1983年第1期。
- [5] 谭廷栋、陈世新 双时差法识别含气层 《石油勘探与开发》 1986年第2期。

(本文收到日期 1986年6月10日)



Interpreting the Condensate Reservoirs by Well Logging

Abounding in gas and condensate, the Banqiao region of Dagang oil field is a typical condensate reservoirs. This paper proposes the interpretation of condensate reservoirs by use of the methods of resistivity ratio, sonic differential and saturation excavation, which has gained significant geological result and can be consulted for other regions.

Tan Tingdong

Recognition of Cave—Fractured Reservoirs of Yanxin Limestone in South—East Sichuan

It is a difficult problem to recognize the Yanxin cave-fractured reservoirs in southeast Sichuan. Based on the analyses of logging and geological data, in this paper, the author considers that the major reason making reservoir test low success ratio is the interference of limestone heterogeneity, proposes some measures to remove this interference by synthesizing geological and logging data, summarizes the indicators of recognizing reservoir and sets up the quantitative equations for recognizing reservoirs.

Lu Zhengyuan

Factors Influencing the Characteristics of Coalification Products and Their Stage Division

The effect of several main factors forming coalification products is expounded in this paper. Combined with the characteristics of coalification modelling experiment products, the process forming coalification products is divided into 3 major stages, which provides the theoretical basis for coal-formed gas (oil) exploration and development, and possesses immediate significance in practice.

Pang Xiongqi, Chen Zhangming, Fang Zukang

Detection of $C_6 - C_{13}$ in Natural Gas and Their Elementary Geochemical Explanation

Based on the brief description of detection methods of $C_6 - C_{13}$ in natural gas, the reliability of detection has been argued and the detection methods and results are considered to be correct and reliable. The distribution rules of $C_6 - C_{13}$ in partial gas-producing beds in Sichuan basin are discussed and four recognitions are presented in this paper.

Wei Guangdu

Statistical Method of Real—Time Control Prediction of Optimum Working Regime of Gas Well

A quantitative analysis method is proposed for the important problem concerning the development of gas fields i.e. the real-time control in optimum working regime of individual well is proposed in this paper. In order to conveniently use in practice, the author has worked out a software package which can be used in microcomputer. The user only trained by a short time may use the software package to carry out the real-time control in optimum working regime of gas well and to predict the major producing parameters in the near future and the abnormal changes of the gas well.

Zhu Yunmin, Wang Zurong, Yan Jin, Wang Minghua