

SPWLA Logging Symposium Transactions

测井分析家协会 第二十五届年会论文集

测井分析家协会 编

石油工业出版社

070504

p631-53

005 : 25



测井分析家协会 第二十五届年会论文集

5409/68

测井分析家协会 编



200403107



0069*1086

石油工业出版社

内 容 提 要

测井分析家协会第二十五届年会是1984年在美国路易斯安那州新奥尔良召开的。会议共发表论文69篇。本书选出61篇出版。书中着重介绍了声波测井、地层倾角、核测井、电测井、氡测井、生产测井、井下电视等新方法,介绍了最新的测井资料评价方法,对我国测井、地质、开发技术人员,有关大专院校师生均有参考价值。

Transaction of the SPWLA
Twenty-Fifth Annual Logging Symposium
Volume I, II
SPWLA 1984

测井分析家协会
第二十五届年会论文集
测井分析家协会 编

石油工业出版社出版
(北京安定门外安华里二区一号楼)
北京顺义燕华营印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

787×1092 毫米 16开本39 3/4 印张 985 千字 印 1—1,500

1990年6月北京第1版 1990年6月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0336-8/TE·326

定价: 9.35 元

目 录

一、意大利薄含气砂岩的解释 (A)	1
二、瞬时压力测试时井底流量监测的重要性 (B)	18
三、井下电视的一些现场实例 (C)	28
四、通过烃气显示的数学处理描述储集层的特征 (E)	42
五、SHDT地层学高分辨地层倾角测井仪在沉积环境方面的应用 (G)	48
六、岩石中子截面的测定 (I)	65
七、电磁波传播测井在地层评价中的应用 (J)	69
八、应用井眼补偿技术的声波测井纵波幅度分析 (K)	78
九、提高测井质量: 测井公司井场作业和测井质量的基本评价 (L)	89
十、数字感应——改善感应测井响应的一种新方法 (M)	101
十一、用氯测井评价低电阻率砂岩 (N)	107
十二、GEARHART环境校正程序库 (O)	116
十三、用于感应测井反褶积的加权重叠相加法 (P)	126
十四、在不完全饱和介质中中子测井的刻度之四: 探头—井壁间隙的影响 (Q)	140
十五、应用校正后的 R_{∞} 比值法对碎屑泥质地层进行测井评价 (R)	150
十六、声波波形分析在安哥拉碳酸盐岩储集层中的应用 (S)	158
十七、长源距声波测井仪器 (T)	169
十八、连续横波测井 (U)	179
十九、有限差分法在电位电阻率测井中的应用 (V)	187
二十、测井直接计算剩余电导率方法用于泥质砂岩测井解释 (X)	199
二十一、利用最小平方技术求感应测井数据的反演 (AA)	211
二十二、油基泥浆的地层评价 (BB)	218
二十三、在套管井中用声波全波测井确定地层特性 (CC)	227
二十四、低速地层中的横波测井 (DD)	240
二十五、根据测井资料预测淡水长石砂岩含水量 (EE)	247
二十六、利用随钻头记录的测井资料进行地层评价 (FF)	257
二十七、声波波形测井使用的低频电火花震源的现场试验 (GG)	271
二十八、快速计算感应测井和深电磁波传播测井响应的新方法 (HH)	280
二十九、声波立体扫描测井在固井评价中的应用 (JJ)	290
三十、转换、插值、回归分析、图形显示和 Q_v —孔隙度关系 (KK)	297
三十一、泥质含量对北海北部地区泥质砂岩电导率的影响 (LL)	306
三十二、含水饱和度的级别对砂岩介电常数的影响 (MM)	313
三十三、由声波测井波形测量衰减 (NN)	323
三十四、自然伽马测井的标定及原理 (OO)	335
三十五、随钻自然伽马和电阻率测井的井眼校正 (PP)	344
三十六、连续碳/氧 (C/O) 比测井和中子寿命测井 (NLL) 对有机沉积环境及泥质沉积环境的解 释 (QQ)	358
三十七、得克萨斯东部一口气井的产能分析 (RR)	368
三十八、计算机模拟多相生产动态井温曲线 (SS)	375

三十九、斜井中流体密度测量的预期精度 (TT)	384
四十、解决自动深度调整问题的一种方法 (VV)	394
四十一、应用井下重力仪和深探测电测井组合确定油气饱和度和孔隙度 (WW)	405
四十二、薄层砂岩分析 (XX)	412
四十三、高分辨地层倾角测井资料的地质评价 (YY)	426
四十四、斯通利波——求 Δt 的横波测井 (ZZ)	441
四十五、流体和频率对声波速度的影响 (AAA)	450
四十六、怀俄明州波德河盆地Hartzog Draw油田多井相测井评价 (BBB)	460
四十七、在现场利用测井资料确定毛细管压力、孔隙喉道半径及其分布、渗透率 (CCC)	474
四十八、用电磁波传播测井确定残余油饱和度的定量试验 (DDD)	482
四十九、实时横波测井 (EEE)	492
五十、一种根据中子迁移计算程序刻度油井测井仪器的新原理 (FFF)	498
五十一、用测井探测人工裂缝 (GGG)	514
五十二、模拟孔隙介质电阻的模型 (HHH)	523
五十三、用激发极化法确定煤中所含的黄铁矿硫 (III)	530
五十四、补偿自然伽马能谱测井的应用 (JJJ)	536
五十五、TMD脉冲中子测井在异常井下环境中的应用 (KKK)	550
五十六、泥质砂岩的感应极化——粘土平衡离子类型的影响 (LLL)	563
五十七、六臂地层倾角仪——由GEOSOURCE公司提出的一种新概念 (MMM)	578
五十八、Beaufort海薄浊流砂层测井曲线解释 (NNN)	590
五十九、应用改进的测-注-测程序准确测量残余油饱和度 (OOO)	603
六十、使用DUCKPOND/McBEND程序以蒙特卡罗微扰法研究中子孔隙度测 井仪 (PPP)	608
六十一、用计算机模型辅助中子测井和伽马射线测井解释 (QQQ)	616

一、意大利薄含气砂岩的解释 (A)●

J. 苏奥等

王文祥 译 尚作源 校

引 言

从1959年以来阿吉普公司(AGIP)在北亚得里亚海的勘探调查活动中非常活跃;在短时间内在上新统和第四纪地层中发现了许多气田。最近在下上新统很薄的砂岩层找到了具有工业价值的天然气,以前由于储集层厚度太薄而未能发现。本文中叙述的波多科西尼东(Porto Corsini Est) 33号井就是这类储集层明显的例子。这口井钻自一个生产平台,该平台位于拉文纳东面约20公里处波多科西尼东构造的顶部。

地 质 条 件

这是从1960年发现拉文纳马雷气田之后阿吉普公司在亚得里亚海发现的第二个气田。该气田位于由上新统沉积物构成的背斜的顶部。海底的深度大约为24米。气田的地层情况概述如下:

第四系:颗粒很细的砂岩,与泥岩互层(平均厚度:1600米)

上/中上新统地层:上部主要是泥岩,往下是中等颗粒的厚砂岩层,与很薄的泥岩层互层(大约为1300米)。

下上新统:交替为颗粒很细的厚砂岩层和厚泥岩层;至少有2000米;下上新统的底部从未钻到。

在构造上,波多科西尼马雷东背斜属于一系列延伸入海的构造,其方向在波谷(Povalley)识别为南东—北西向。在该背斜构造,只有上新统地层清楚地受到褶皱而第四系沉积主要是单斜层。在构造的东北侧还存在逆断层系统,但这些断层只影响到上新统地层,而第四系地层未受到扰动。一个位移很小发育较差的断层影响背斜的西侧。

地震勘探的解释结果指出上中新统的蒸发岩层未被褶皱,并且朝着海岸方向规则地向西南方向倾斜,该层未被钻到。

波多科西尼马雷东气田的上新统和第四系砂岩是含气层,该气田通过一条海底管线和拉文纳的集气中心相连接。

存 在 的 问 题

在意大利的东北部,很薄的层状泥质砂岩生产大量天然气。资料解释中的严重问题是砂

● 标题后面括号内英文大写字母系原版序号。——编者

岩层可以薄到几厘米。另一方面，单个小层常常似乎是纯泥岩或比较纯净的砂岩。因而预计水平方向的渗透性极好而垂直方向的渗透性很差。这就产生另外一个问题：一般情况下侵入将相当深，可能在80英寸左右或更深一些，并且只有在相当厚的砂岩层中，侵入才会通过天然气和泥浆滤液之间的流体分离而消失。很薄的层除非进行开采，否则将长时间地保持侵入的滤液。此外，侵入剖面很可能是环带类型：

条件极有利于形成环带：水平方向渗透率高，原始含气饱和度高和 R_{af}/R_o 的比值大(5或更大)。

反之，垂向渗透率低阻碍了由于重力分离作用使环带消失过程。

现在我们回顾不同测井方法的特点：

(1) 感应测井只在比较厚的地层中获得接近 R_t 的读数；在薄的砂岩层中，由于常常存在环带，读数将更接近 R_o 而不是 R_t 。

(2) 电阻率测井通常受薄层影响，此外，也严重地受到冲洗带 R_{xo} 的影响。

(3) 因而对于真正的薄层，实际不能获得可靠的 R_t 值。

(4) 中子和密度测井由于深的侵入，所受到的天然气的影晌常常比较小，侵入不足的较深的井段除外。

(5) 对于探测天然气幸运的是以下的情况，声波测井读数和地层中含气量的关系远不

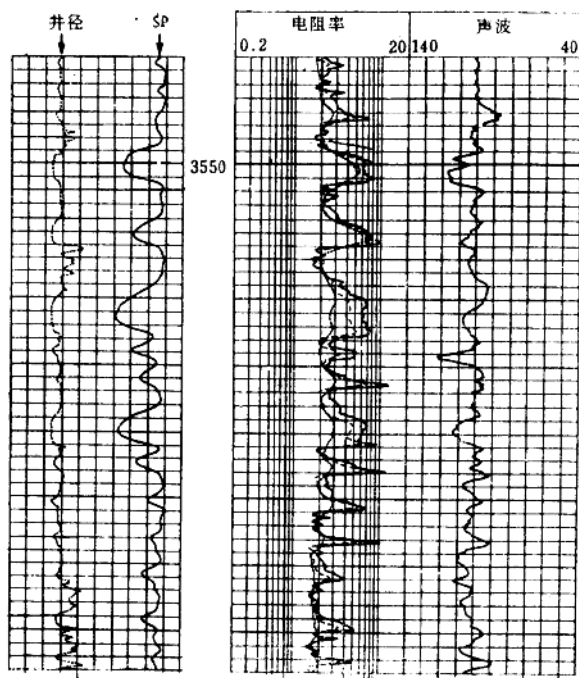


图1 实例1

是线性关系，在非常低的含气饱和度条件下常观察到大的天然气的影响（增大的传播时间），对于长源距声波测井这种影响更大，其影响的原因尚不清楚。

(6) 在淡水泥浆环境下，EPT 测井仪一般工作得非常好：事实上，衰减率曲线主要受粘土含量的影响；因而这条曲线是一种非常灵敏和有效的泥质指示。另一方面，TPL 虽然准确但由于侵入的影响也几乎不能反映天然气的存在，它主要受砂岩和泥质之间的差别的影响。

(7) SP 在厚层砂岩中显示良好，但由于其垂直分辨力差以及油气的影响，在薄层中仅能定性地应用。

(8) 地层倾角测井曲线虽然在定量应用上难以胜过 R_{∞} 或 EPT 曲线，但在区分砂岩和泥岩方面很有用处。

包括许多很薄小层的地层的两个实例表明：图 1 取自波多科西尼 33 号井，由于该井采用非常完善的测井系列和典型的砂岩分布，而在本文的讨论中始终被引用。虽然图中所用的标准的 1/200 深度比例尺不适用于划分很薄的小层，但剖面还是相当明显地包含许多薄层。如下文所述，在微球形聚焦 (MSFL) 和声波曲线之间极明显的对比关系使得很容易确定含气层。另一方面，图 2 是另一个层段的例子并且可以认为是一个解释困难的实例：所有的曲线都非常平直，而且当然没有立即显出会从该地层得到很高的天然气产量。

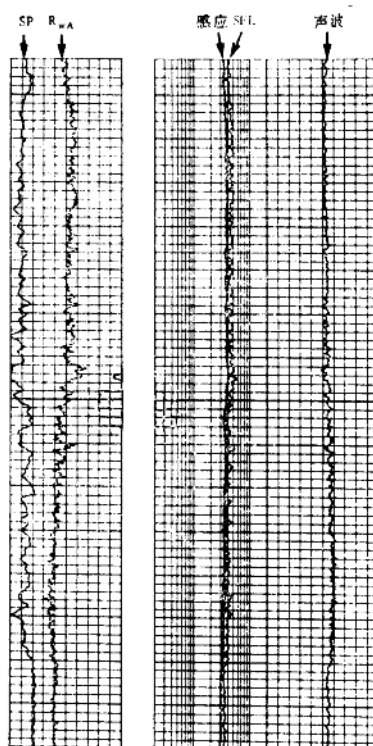


图2 实例2

测井目的

在很薄岩层的条件下：通常对于单层砂岩实际上是不能进行那种完整的解释（孔隙度和饱和度）。另一方面则能够依次获得下列资料：

- (1) 区分出厚度薄到几厘米的单个的砂岩层和泥岩层。
- (2) 发现井中某个层段中含有天然气（不是某个砂岩层）。
- (3) 在宏观范围内评价有效孔隙度：这主要是砂岩所占百分比的函数，在较小的程度上还随砂岩层孔隙度的变化而改变。

(4) 另一方面照例对于适当厚度的孔隙层（可能为 1.5 米或更厚些）可以计算出饱和度和，并被认为等于邻近已被识别出含气的很薄的砂岩中的饱和度值。

测井系列

为了得到所希望的详细资料,只要有可能必须使用高分辨力测井仪,并且在发挥这些测井仪最大潜力的条件下使用仪器,即一般应使用高采样率。从EPT微电阻率和倾角测井曲线上能获得最佳的垂直分辨力。其中每一条曲线在测量窗口接近4厘米的情况下应当能够提供的分辨能力为1厘米。

另一方面密度和中子测井的测量窗口大概长10倍,侧向测井也是如此。最后声波测井应当采用较短的间距,例如15厘米(6"),但是存在着约束条件即需要长的源距。最后,如通常那样,感应测井的垂直分辨能力最差,但对这一缺陷尚无明显的解决办法,特别是当环带可能存在的情况下更加需要深探测的时候。每当有足够的中等厚度的岩层,岩层足够均匀以使上部的侵入由于流体分离而消失,根据双侧向测井资料可能得到可靠的 R_t 测量值。

为了充分利用测井资料的潜力,这些测井资料应当以较高的采样率进行记录:以每3厘米记录一次取代每15厘米记录一次(1.2"取代通常的6"),至少对预计很薄的小层是如此。当然通过对高密度采样的资料上的每5个采样取平均值很容易回复到正常的采样率。此外,微电阻率和EPT(衰减率和传播时间)曲线的采样率在对每三个独立的深度采样自动平均之后通常和其它测井曲线相同。对于我们的特定的应用,上述曲线的三个顺序的采样应当保持和单独使用,因而这些高分辨力曲线的有效分辨能力增大到原有的三倍。因此这些曲线的实际的采样率为每厘米一次即为通常采样率的15倍。这样大量的数据可能显得有点过多,实际上,因为下井仪的测量窗口为4厘米,在这长度内取样4次是适当的,确实不算过多。

图3是EPT的衰减率曲线在“正常”(15厘米)和“最高”(1厘米)两种不同采样率的条件下的对比图;两条曲线是在两次测井中记录的但除了很明显的采样频率的影响之外两条曲线非常一致;

(1) 在高采样率的曲线上,曲线形状是突然变化的,这恰好对应于岩相的实际变化(例如3478米或3479~3487米之间的薄层),但象3478.5米这样的连续变化是很少见的。

(2) 此外,低采样率条件下将漏失许多薄层或者至少使曲线形状畸变,例如3480米、3481米、3483米(这些层的厚度为5~10厘米)。

总之,测井系列中除了有标准测井方法(电阻率、密度、中子、声波、自然电位、自然伽马)之外,还应包括具有最佳纵向分辨力的测井方法:即微电阻率测井,特别是应该有E-PT测井。实际上,发现在这种环境下,衰减率曲线是区分砂泥岩的最好的手段。当泥浆是淡水泥浆,这种特性尤其显著,因为由于泥浆滤液的导电性所引起的衰减比由于固着于粘土活性表面的吸附水造成的衰减要小得多。即使用淡水泥浆会形成影响感应测井的导电环带,但淡水泥浆($R_{mf}/R_m=5$ 或更大)对EPT测井特别有利。

地层倾角测井曲线也能用于区分砂泥岩。可惜该曲线与EPT衰减率曲线相比在定量反映地层特性方面比较差,因为地层倾角测井曲线依赖于几个难以预测的参数,例如:极板位置、泥饼、聚焦电流的变化和对流体饱和度的依赖关系。实际上如下文所述,地层倾角测井曲线对于那些测井资料不全或较少的油井提供了非常有价值的资料,但有一点看来是清楚的,即只要有可能,确定砂岩层应当借助于EPT衰减率曲线。

确定砂岩层

区分砂泥岩最容易的方法是采用某个参数截止值的定量解释的方法，该参数对于上述两种岩性是非常不相同的。常用的参数是电阻率，可以认为含气砂岩对应于那些测井读数高于截止值的地层，而低于截止值的则被认为是泥岩。显然，这种方法在选取截止值方面必然借助于主观判断并且在很大程度上依赖于岩层的厚度。

上述的层厚影响可以通过应用高纵向分辨力的测井资料来减少，这种资料可以是微电阻率测井曲线（无论是一条单独的曲线或倾角测井曲线的一部分）或电阻率以外的其它参数即EPT测井的传播时间和衰减率曲线。

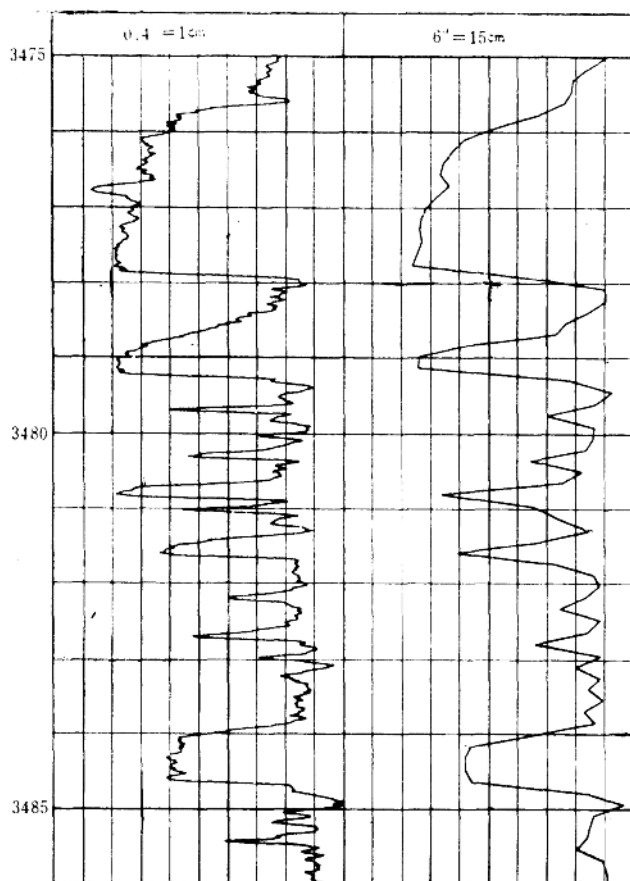


图3 采取率的影响

所需要的截止值常常可取自测井读数的频率直方图。图4是TPL读数的直方图，图5是同

一层的衰减率读数的直方图。实际上采用的数值各为15.2和370，可以看到这两个数值相当清楚地划分直方图（在这个例子中！）为砂岩和泥岩两部分。用这种方法，将目的井一波多科西尼33号井的地层根据三种独立的测井资料分成砂岩和泥岩，所用测井资料为EPT的衰减率曲线，TPL传播时间曲线和MSFL曲线。如图6所示，这三种独立的测量结果非常一致，图中这三条曲线并列显示。

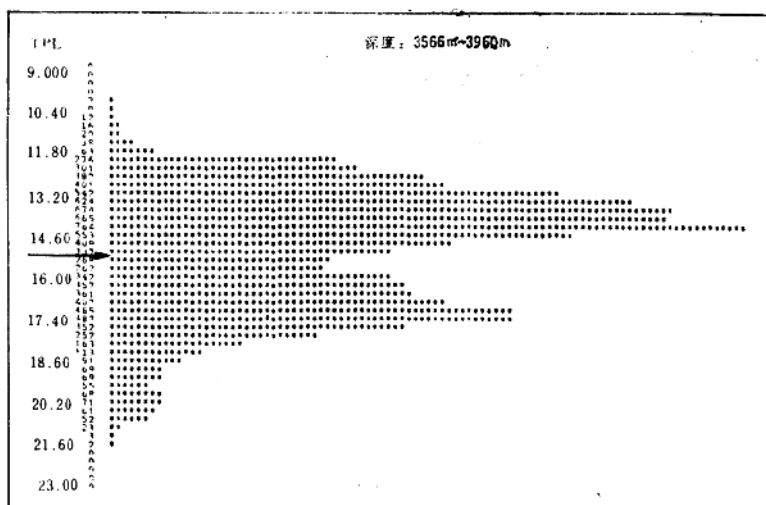


图4 TPL直方图

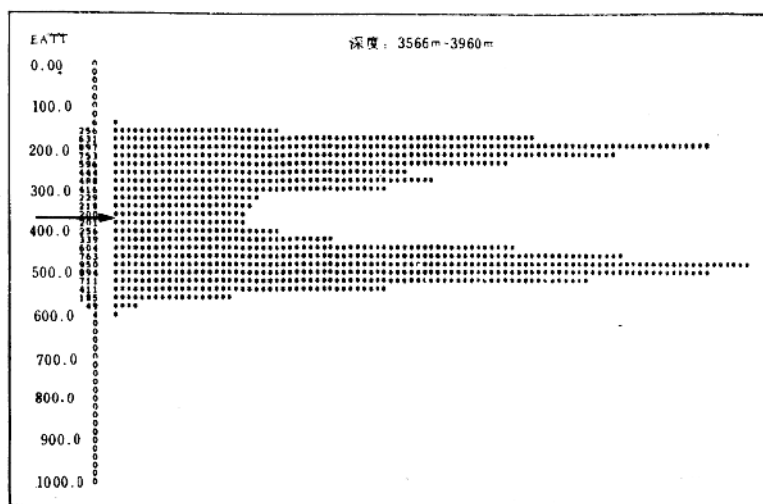


图5 EATT直方图

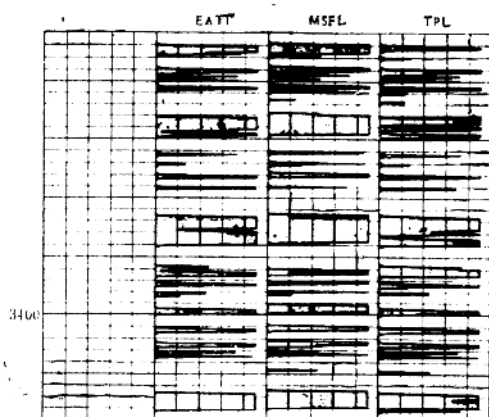


图6 确定砂岩层的比较

砂岩层标以浅灰色。虽然认识到单个小层是纯砂岩或纯泥岩，为了便于比较图上曲线采用1/200的深度比例尺，曲线代表的是4次采样的平均值，因而假如单个薄层的厚度仅为1、2或3次采样的地层厚度，该薄层中央处的读数可能为25%、50%或75%的砂岩应有的数值。这种看法同样适用于块状砂岩中很薄的泥岩夹层（例如3441米、3451米）。MSFL和TPL（程度较轻）曲线还都受到其它一些次要的参数如孔隙度或含气饱和度。并趋于在井的深部侵入较浅的地层中找到更多的砂岩层。相反，EPT衰减率曲线更为独特地受到粘土含量的影响，因而该曲线是这三种确定砂岩层的测井资料中最好的●。另一方面，很薄的砂岩层可能未被测井仪足够充分地“见到”以超越截止值。例如在图3，取泥岩和砂岩之间的平均值作为截止值将完全漏失3480米处的薄砂岩，还将漏失3482.2米和3485.3米处更加明显的砂岩层。

另一方面，所有这三种指示曲线可能由于泥饼的影响或极板的不完全接触而多少有些畸变。这一点对于地层倾角测井曲线更是如此。因此看来一个比较好的确定砂岩层的方法应当是根据对曲线形状的识别而不是其绝对值。

图形识别的一个非常简单的问题，是自动识别指示曲线上的峰值是否位于泥岩或砂岩的方向。这样做的一个方法是应用测井变量的二阶微商作为测井曲线凹度的量度，例如对于EPT衰减率曲线，当凹状对着最低值（即二阶微商是负的）该层必定是泥岩；在相反的情况下（二阶微商是正的）则为砂岩。因为采用采样的数据，简单的方法是对三个顺次采样的数据计算微商值；然而得到的数值趋于有很大的噪声。比较实际的方法是对较长的一个井段计算“平均二阶微商”，通常在计算微商的深度处集中了奇数的顺次采样的数据。所采集的数据按下述方式进行加权。即计算的数值是对所分析井段的数据以最小二乘法作抛物线最佳拟合得到的那部分曲线的二阶微商。例如7个采样值的平均微商为对7个数据点作最佳拟合得到的近似抛物线的微商值。在选择井段长度时要谨慎地兼顾两种相反的要求：

(1) 井段应较短以能够确定较薄的岩层；

●在较轻的程度上影响这三种曲线的另一个次要的参数是温度。对于衰减率曲线采用截止值随温度或深度而稍微线性变化的方法来克服这一影响。

(2) 井段应较长以能够更有效地消除测量中随机的高频噪声。应当注意计算井段中的可由一条直线(例如斜率)来估计的低频噪声通过二阶微商的计算将被消除。

一般, 对 $2n+1$ 个采样的数据平均得到的二阶微商看来能相当清楚地拣出厚度薄到 n 的岩层: 在我们每厘米一次的采样频率的情况下, 这意味着能够识别的层厚的下限大约为几厘米。实际上曾对有 9 个采样数据的井段进行了计算, 可探测确定的最小层厚大约为 3~4 厘米^①。

表1给出最佳的加权系数用来计算 5、7、9 或 11 个采样数据的平均二阶微商, 虽然已经发现包括 9 个采样数据的井段长度能够满足这一问题的要求。

表1 采样数据的平均二阶微商

取 样 数 目	公 式	K
5	$2(y_2 + y_{-2}) - (y_1 + y_{-1}) - 2y_0$	7
7	$5(y_3 + y_{-3}) - 3(y_1 + y_{-1}) - 4y_0$	42
9	$28(y_4 + y_{-4}) + 7(y_3 + y_{-3}) - 8(y_2 + y_{-2}) - 17(y_1 + y_{-1}) - 20y_0$	462
11	$15(y_5 + y_{-5}) + 6(y_4 + y_{-4}) - (y_3 + y_{-3}) - 6(y_2 + y_{-2}) - 9(y_1 + y_{-1}) - 16y_0$	429

在深度取样 0 处计算微商值;

y_i 是在取样 i 处的曲线数值;

为了定量比较不同井段处的平均值, 相应的公式应当除以对应的 K 值。

一个几乎是荒谬的问题是二阶微商对于识别薄层很有效但却不能区分厚层的砂泥岩, 因为这两种情况下的曲线都是线性的, 二阶微商都为零值。在接近砂岩和泥岩的界面处才能识别。为了从泥岩区分出砂岩, 对于曲线(例如 EPT 衰减率曲线)必须保留原始的截止值, 该值仅用于二阶微商接近于零的情况。因而判断的逻辑如下:

(1) 微商为大的正值: 砂岩(薄层或界面附近);

(2) 微商为大的负值: 泥岩(薄层或界面附近);

(3) 微商接近零值: 厚层砂岩或泥岩(离开界面)或均匀逐渐变化的岩层。这第三种情况通过应用原始曲线的截止值来解决。

以使逻辑稍微复杂化为代价可对以前的方法(简单的截止值)取得三方面有价值的改进:

(1) 可以确定很薄的岩层(砂岩或泥岩): 这就能更清楚地了解地层的结构, 这对采油工程师是重要的;

(2) 该方法几乎不受定量识别的限制: 因而能更好地应用受环境影响的曲线(例如地层倾角测井曲线);

(3) 对泥质指示曲线大大降低了关于准确的截止值方面的要求, 因而排除了主观选择的做法: 这是因为厚层砂岩和厚层泥岩之间的差别是大的。只有匀变层(从砂岩逐渐变化到泥岩)还存在有问题但这种岩层不很普遍, 总之, 砂泥岩之间精确的界限是很难确定的。

砂岩检测逻辑的输出提供下列资料(非常冗长):

(1) “矩形测井图”类型的输出, 图上的地层分为纯砂岩和泥岩;

(2) 累积砂岩体积输出, 可能表示以累积尖头记号的形式;

(3) 用于纵向分辨力较差的测井资料校正的宏观 V_{sh} 曲线: 这是简单地通过计算规格化

①采用 9 个数据计算得到的微商看来曾检测到 2 厘米厚的很薄岩层非常小的异常, 但可能不会始终如此。

为地层内一薄层的泥质体积来得到的,该薄层的厚度大体上等于要校正的下井仪的“测量窗口”。除了感应测井之外,对于所有的测井,当然是用于砂岩检测的测井,50厘米的一个薄层(大约为1.5英尺)看来是可以接受的。因而泥质百分含量是对测量范围内中央的50厘米厚的地层计算的。

(4) 看来地层垂直方向的非均匀性的量度对于储集层监视是有意义的:对同一个50厘米的层计算界面的数目;这与平均层厚密切相关。

天然气指示

通常根据密度-中子曲线上形成的大的异常来识别天然气。在目前的例子中,除了最下面的井段外,泥浆侵入排除了这种可能性。另一个有效的天然气指示方法是把中子和声波曲线作对比;虽然这种方法优于密度-中子曲线,但在很薄的层状泥质砂岩的情况下效果也是相当差的。实际上,不是绝对不重视这两种常规的方法,而是必须和一种更好的方法结合在一起使用。

在这种层状砂岩的实际解释中曾采用长源距声波测井曲线和变化尖锐的电阻率曲线进行比较的方法,假如可能就取MSFL曲线。如上所述,声波测井对很少的天然气含量就可能作出响应,因为天然气对地层弹性的影响比对地层密度的影响表现得更快(当天然气含量增加)。微电阻率测井常常受到泥浆滤液侵入的影响,而且比天然气的影响更强,虽然高残余气饱和度增强了它的影响。总之,一个气层的标志是声波传播时间和电阻率的读数都增大。这和通常预计的这两条曲线之间的关系相反:例如当孔隙度增大,一般将使声波传播时间增大而使电阻率降低。在图1上可以找到这种天然气特征的几个明显的例子,例如3551米、3555.5米和3564米深度处的曲线显示。

这种天然气检测的方法有几个缺点:

- (1) 不是自动操作而且有相当的主观成分;
- (2) 这两条曲线应当准确地在同一深度处进行比较,即使它们在同一次测井过程中取得(例如声波和MSFL)也会受到“yo-yo”影响,即不规则的仪器的移动,这种现象常被低估。
- (3) 这种天然气的对比关系可能非常弱,例如见图2,但这种关系可能还是存在的并且通过将曲线放入能够识别。
- (4) 天然气的指示必须不是一种孤立的现象:应当有并能识别出某种垂直方向上的连续性。

为了说明以上的第二点,可以用图7来比较波多科西尼33号井另一个井段的声波和MSFL曲线。在3650米处,二条曲线有一个清楚的对应于天然气的异常,但异常的形状却完全不同:MSFL曲线上的异常超过1米,而声波曲线的异常却小于50厘米。原因何在?在二条曲线上3664.5米附近显示很清晰的单个异常,但是声波曲线的异常清楚地向上移动了大约20厘米;这二条曲线上的异常确实是同一个异常吗?这两个问题将在以下给予答复。

防止发生上述四个问题的实际途径是再次采用图形识别的方法,换言之即识别曲线的形状而不是其绝对值^①。因为目的在于比较二条曲线的形状而不是对一条曲线进行分析,我们

^①不是完全忽视绝对值!例如,即使是非常薄的层状泥质砂岩,其总的电阻率以及可能总的声波传播时间应当比泥岩或含水砂岩稍许高一些。

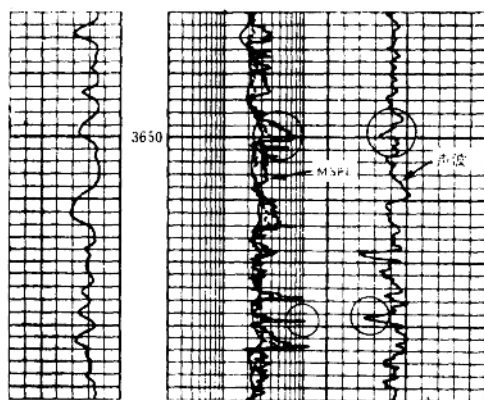


图7 天然气影响

采用一般解释中所使用的测井对比程序的派生方法使所有的测井曲线对同一个深度基准取得一致。一般通过对“次要曲线”应用可变的深度移动和在一个被称为“对比长度”的固定长度的深度间隔上使该曲线和“主要曲线”相关的方法来对比二条曲线。对于每一个移动值，相关系数作为所谓相关曲线上的一个点来进行计算。该系数被规格化，范围在-100（完全非相关）和+100（完全相关）之间。当用于次要曲线的指出的移动值为产生相关系数最大值的移动值，这二条曲线通常是相关的。当指出的移动值对应于相关系数的代数最小值，这二条曲线应该是非相关的。对于每个计算深度，打印的表格给出下列数据：

- (1) 相关曲线的最大值（标以“FIT+”）：数值在0和100之间，并且在可能的移动值的水平比例尺上，对应的推荐移动值标以“+”号；
- (2) 类似的最小值（“FIT-”）：数值在0和-100之间，对应的推荐移动值列在相同的比例尺上。

通常这二组数据中只有一组数据具有物理意义：曲线相关时为“FIT+”，曲线非相关时为“FIT-”。这种物理意义可以通过以下二个条件来检验：

- (1) 所推荐的移动值应当比较一致（垂直方向上）；
- (2) 对应的“FIT+”或“FIT-”值在绝对值上应该相当大。

应当指出，最大值或最小值为零值并不意味着为真正的零值，实际上这表明在“FIT+”的情况下只存在负值或在“FIT-”的情况下只有正值。

这里以下述特征来选择上述的二条曲线：

当地层含天然气，二条曲线在同一个方向相关（例如正相关或正态相关），但地层不含气时，在不同方向相关（例如非相关）。这种情况的例子是声波和MSFL曲线。

在上述程序的输出表格上，通过综合下列的判别标准能给出可靠的天然气指示：

- (1) 在垂直方向连续的层段上而不是在一点上的“FIT+”高值；
- (2) 比较连续的（垂直方向）推荐的移动值（+号）；
- (3) 伴随着相当低的（甚至可能为零）“FIT-”；
- (4) 通常但不一定是：“-”号的位置不规则或停留在移动值比例尺的一端。

对于不含气的地层，所有这些判别标准都趋于反向。

实际上，从一段厚的含气层段到一个泥岩层，可发现在垂直方向上在气层的“+”和泥岩层的“-”之间有比较连续的变化。

这种输出的一个例子示于图8。在3650米和3648.4米之间极明显的天然气指示，除了在3649.3米处的突然跳动之外显示出推荐的移动值几乎不变，这个跳动是由于“yo-yo”的影响，测井仪几乎在瞬间实际跳跃了将近50厘米的距离。

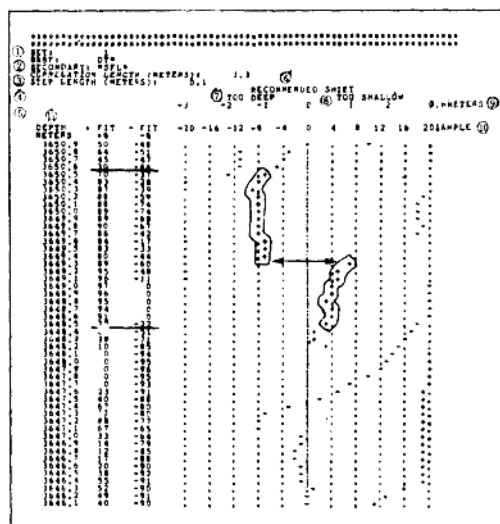


图8 通过对比确定气层的方法

①组；②主要曲线；③次要曲线；④对比长度（m）；⑤步长（m）；⑥推荐的移动值；⑦太深；⑧太浅；⑨米（m）；⑩取样；⑪深度（m）

为了定量表示天然气指示，综合以上标准中最重要的部分由下式来检验“FIT+”为高值和“FIT-”为低值的情况：

$$\text{如果 } 2(\text{FIT}+) + (\text{FIT}-) > 100 \quad \text{G.I. (DT} \times \text{MSFL)} \quad (1)$$

式中，G.I.为天然气指示；DT为声波时差。

当满足上述的不等式，就赋予该指示方法为1（即可靠的天然气指示），否则即为零。其它的成对的测井曲线即使效果差一些也能够以相同的方式来对比。总的想法是，只在符合实际的条件下才承认一种可靠的天然气指示方法。不需要对每一个小层探测天然气是否存在（绝不如此！）例如，在厚层常首先探测层的顶部（该处侵入的滤液已消散）。总之，当在规则的井段探测到气层时，有充分的条件可以认为在整个井段中都含天然气。

曾使用其它三对曲线并获得部分成功，但这也足以说明这三对曲线是有用的：

声波-电磁波衰减率曲线，声波-中子，

密度-中子。

重要的是记住，为了给出一个有效的天然气指示方法，这些成对的曲线在气层应当相关，而在非气层处则非相关，相应的公式如下，这些公式取决于这种天然气相关系数的极

性:

$$\text{如果 } 2(\text{FIT}-) + (\text{FIT}+) < -100 \quad \text{G.I. (DT} \times \text{ATT)} \quad (2)$$

$$\text{如果 } 2(\text{FIT}-) + (\text{FIT}+) < -100 \quad \text{G.I. (DT} \times \text{NPHI)} \quad (3)$$

$$\text{如果 } 2(\text{FIT}+) + (\text{FIT}-) > +100 \quad \text{G.I. (NPHI} \times \text{RHOB)} \quad (4)$$

式中, NPHI为中子孔隙度, RHOB为体积密度。

这四种指示能够独立应用或简单地求总和。后面的两种,当它们是正值时(泥浆侵入浅的情况),通常是可靠的,但前面的两种指示更灵敏,是最有用的。

很容易核实这种检测天然气的图形识别方法克服了曲线直观比较方法的4个主要缺点:

(1) 该方法确实是自动识别的而不是凭主观判断。

(2) 曲线总是在准确的深度处作比较,因为曲线是通过对比在作了所需的深度移动之后精确地进行比较的,因而对yo-yo效应自动连续地作了校正。

(3) 对于对比段每条曲线规格化后的变化,自动计算相关系数;因而微弱的变化被放大到一个恒定的数值;当然,如果存在噪声,噪声也被同样地放大,而对比的质量不断地由“FIT+”和“FIT-”的数值来监视。实际上,该程序已用于图2的实例(虽然该图的测井曲线的采样率较低并且曲线也不是最佳的),用这种方法清楚地确定出气层。

(4) 可以简便地检验天然气指示的垂直方向的连续性。

最后,从以上对图7直观检查所提出的两个问题可以很容易的回答如下:

(1) 3650米处的尖峰恰巧在图8上所示的大的yo-yo跳动之前:与MSFL测井曲线相比,声波测井曲线在层的下部显得太浅,在层的上部则太深,在层的中部纯净砂岩处突然跳跃了50厘米;因而声波曲线上异常的视厚度少了50厘米。

(2) 在3664.5米深度附近,对比程序找到一个天然气标记,但如所见到的MSFL测井曲线比声波曲线深20厘米。

孔隙度计算

对于给定的一个地区,砂岩层的孔隙度大致上比较稳定,可能为25%或稍微更高一些。因此,在纵向的放大比例尺上,有效孔隙度可以简单地取为该恒定值或零值,这取决于薄层被划为砂岩或划为泥岩。对于实际应用,更有用的是考虑在50厘米间隔上平均的宏观有效孔隙度以适合大多数测井仪的垂直分辨率。在这种情况下,孔隙度的一次近似值将只取决于50厘米薄层内砂岩占的百分数或反之取决于泥岩的宏观的百分数,即定义为 V_{sh} :

$$\phi = \phi_{\text{砂}} (1 - V_{sh})$$

通过监视砂岩孔隙度的局部变化(可能较小)将获得合理的改进,所使用的是密度和中子测井资料:

(1) 宏观的 V_{sh} 用于这两种测井读数的泥质校正;泥岩的读数在连续的泥岩层中估计,这些读数看来甚至比砂岩的读数更稳定。

(2) 最后,有效孔隙度得自密度-中子交会图,交会图上标入的是泥质校正后的密度和中子测井的读数。

通常这种方法效果很好,但是对存在某种类型泥浆滤液侵入的某些地层可能低估了孔隙度。这是由于密度测井仪和中子测井仪的探测深度很不相同,并且在中等侵入深度和流体极易流动的气层情况下尤为明显。在这种条件下,密度测井完全不受天然气的影响而中子测井