

用多门热中子衰减测井监测储集层

D. W. Oliver, et al.
Welex/A. Halliburton Company

尚作源 译
尚海筹 校

摘 要

文中介绍了多门热中子衰减 (TMD) 脉冲中子测井仪的工作原理和在多次监视的应用中重要的系统特征, 讨论了数据处理的方法。文中说明了辅助和质量曲线的应用, 这些曲线用于确定仪器的稳定性、井眼条件及测井曲线的质量, 所有这些对监视测井的准确的环境条件都是重要的。文中以实例说明了TMD测井在监测储集层和测一注一测工程中的应用, 尤其是重点说明了如何用响应于井眼条件的曲线和质量曲线来协助进行常规的监视测井解释工作和确定由井眼条件可能引起的解释问题。

引 言

多门热中子衰减测井仪设计用于测量 Σ_{FM} 值, Σ_{FM} 是井下地层的热中子宏观俘获截面。多年来, 用测量 Σ_{FM} 的仪器来区分含盐水储集层的油 (气) 和水。脉冲中子测井能测量和定量确定套管外地层的含油 (气) 饱和度, 因而使这种方法具有以下多方面的用途:

- 1) 确定漏掉的含油 (气) 层位;
- 2) 观测油 (气) / 水接触面的移动状况;
- 3) 监测储集层的衰竭状况;
- 4) 在测一注一测工作中确定残余油饱和度;
- 5) 测定二次采油和三次采油工程的效率, 如注入二氧化碳 (CO_2) 等。

以前发表的文章⁽¹⁻⁴⁾已介绍了其它能够测量 Σ_{FM} 的脉冲中子测井仪。虽然这些仪器的主要目的是确定 Σ_{FM} , 但数据分析所采用的方法也会使测量值发生明显的变化。两次测井时井眼条件的改变经常引起 Σ_{FM} 的变化, 在两次测井中常常故意使井内液体发生变化, 或者经常无法保持井内液体恒定, 在监视测井的应用中特别需要鉴别井眼影响并减少其影响。

以前发表的文章⁽⁵⁻⁷⁾中对TMD测井系统已作了详细介绍, 本文只是简单地回顾一下这种测井系统的工作原理。文中将讨论数据分析方法, 特别要介绍如何使井眼影响减少的方法和如何使 Σ_{FM} 值具有很好的统计重复性。上述方法还能给出另外的测井曲线, 这些曲线对测井质量的确定及提供与井内液体含量有关的资料方面是很有用的, 同时还能指示出井内和井周围的水流情况。另外还要给出说明用TMD方法监测储集层方面的实例, 其中也包括测一注一测工作和注入二氧化碳时的应用。

工 作 原 理

图1是TMD测井系统的简图。象以前的脉冲中子俘获系统一样,它有一个14MeV的加速器,在井周围建立随时间变化的热中子分布。通过测量俘获热中子后放射出的伽马射线的衰减率,即可得出宏观俘获截面。

TMD测井系统确定 Σ_{FM} 值的方法与其它测井系统有明显的不同。图2给出了该系统的中子脉冲和时间门参数的示意图。中子源每秒发射1250个中子脉冲,其重复频率固定,每个脉冲的宽度为60微秒。在每个中子脉冲发射以后的时间内,用六个门来测量伽马射线,这些门合起来几乎覆盖了全部的衰减时间,即从一个中子脉冲结束到下一个脉冲开始之前所经历的全部时间。正如图2所示,在发射中子脉冲后很短的时间内前两个门即被打开,置位这两个门用来测量地层和井眼内产生的中子俘获伽马射线。后面的四个门顺次加宽,而且在发射中子脉冲后延迟较长的时间才打开,这些门主要用来探测地层的中子俘获伽马射线。最后一个门(第6门)的延迟时间相当长,井眼范围的伽马射线只占其总计数率的3%或者更低(只有在井眼垮塌和套管外有净水泥环时例外)。

在中子发生器工作1秒钟后,把中子发生器关掉60毫秒,在这段时间内测量每个探测器的本底计数率。为了避免测出剩余的热中子俘获伽马射线,门宽55毫秒的本底门被延迟5毫秒才开启。

从每个探测器六个主要门的经过死时间校正后的计数率中减去滤波后的本底值。得出的计数率都用点表示在井眼和地层的合成衰减曲线上,在一短的垂向井段内(长1到几英尺,具体值决定于滤波参数)对计数率进行滤波,然后输入到野外计算机系统。在计算机系统中对衰减曲线上的六个点用最小二乘法进行迭代运算,把合成衰减曲线分解为井眼衰减分量和地层衰减分量⁽⁵⁾。图3中给出了计算的井眼衰减分量和地层衰减分量的曲线,曲线上的点子是实验测出的计数率,而实线表示计算出的井眼衰减分量(虚线)和地层衰减分量(虚线)之和。图4是对不同的井眼衰减率和地层衰减率计算出的类似结果。

野外计算机根据两个探测器得出的地层衰减分量的曲线斜率,计算出扩散校正后的地层俘获截面 Σ_{FM}^{COR} 。根据测出的井眼俘获截面 Σ_{BH-SS} 、井内液体矿化度及套管尺寸,可在算后测井程序中对地层与井眼的相互影响来稍微调整 Σ_{FM}^{COR} 值。一般说来可以忽略井眼校正,但在套管内有低矿化度(<70000ppm NaCl)淡水时例外。校正后的输出值是 Σ_{FM}^{INT} ,即地层的固有俘获截面 Σ 。还要计算出井眼的俘获截面 Σ_{BH} ,即根据每个分量曲线的截距(中子脉冲结束后的初始值 A_{FM} 和 A_{BH})来计算。对长源距(LS)和短源距(SS)探测器的数据都要完成上述计算,在测井图上显示出短源距的结果。由于在数据处理过程中,实际上已从总衰减曲线中“减去”了井眼部分,所以计算的 Σ_{FM} 值已尽可能除去了井眼影响。在监测储集层和进行测一注一测工作时,常常故意使两次测井的井眼条件(套管内的液体矿化度和井眼内套管等)发生变化,或无法保持井眼条件不变,因此上述的最后一个特点就非常重要。

测 井 曲 线 显 示

在TMD测井系统中,采用了数据分析的“双指数拟合”法,因此能测定有关地层和井

表 1 TMD测井输出曲线

曲线符号	说明	用途
主要测井曲线 Σ_{FM}^{CORR}	对地层扩散效应作了校正后的地层俘获截面	计算Sw
$R_{N/F}$	第3—第6门短源距探测器计数率与长源距探测器计数率的比值	确定孔隙度
Σ_{BH-SS}	短源距探测器的井眼俘获截面	确定井内液体的矿化度或矿化度的变化; 砾石充填识别标志; 井内液体的接触面; 封隔器的位置; 水泥回返高度; 井眼附近的天然气或空气
(G3-6)SS和 (G3-6)LS	长短源距探测器3—6门作死时间和本底值校正后的计数率, 在测井图上是重叠曲线	能直观划分含天然气和低孔隙度井段, 其响应与普通中子测井计数率相似
Σ_{QUAL}	用第6门观测到的总计数率除第6门中计算出的地层分量计数率	能指示 Σ_{FM} 数据的质量; 井眼条件; 水泥环厚度; 井眼垮塌; 残余侵入带 (主要用于低矿化度井眼条件)
GR	自然伽马测井曲线	地层对比, 鉴别岩性, 确定泥质含量
CCL 质量测井 曲线	套管接箍定位曲线	校正深度
Σ_{FM-SS}	短源距探测器测出的地层俘获截面 (由于有较好的统计重复性, 有时在测—注—测和监视测井中使用)	Σ_{FM-LS} 与 Σ_{FM-SS} 重叠, 指示 Σ_{FM} 的重复性; 地层扩散效应和每个探测器的工作情况
Σ_{FM-LS}	长源距探测器测出的地层俘获截面	
G_{4ERROR}	拟合误差曲线, 可写成下述形式 $G_{4ERROR} = 1 - \frac{G_{4BH-CALC} + G_{4FM-CALC}}{G_{4OBS}}$	检查仪器的工作情况; 检查双指数拟合优良度
$R_{BH/FM}$	对短源距探测器计算得出的井眼计数率与地层计数率之比	是井眼周围天然气或空气的指示方法, 通常能提供类似于井径的资料, 象井眼尺寸, 井眼冲蚀等。特别用于含盐水井, 能指示套管变化; 水泥回返高度; 砾石充填和封隔器等
$(A_{BH} \cdot T_{BH})SS$	短源距探测器井眼分量计数率	能反映井眼条件的变化, 与 $R_{BH/FM}$ 组合应用

续表

曲线符号	说明	用途
SS—BKG LS—BKG	每个探测器的滤波后的本底计数率	通过测量氧活化后产生的伽马射线来鉴别向上的水流, 也能指示探测器的稳定性和TMD系统电子线路的噪声
EQUAL, GR CCL	与主要测井曲线中的相同	

眼环境的大量信息。由于能输出许多有用曲线, 所以在野外测井图中有两种显示, 即主要测井曲线和质量测井曲线。前者包括有基本的TMD测井解释通常所需的资料; 后者提供一部分补充曲线, 在评价测井曲线质量和对一些非正常井眼状况下的测井曲线进行解释时, 这些补充曲线是很有用的。

表1中列出了TMD测井提供的所有曲线, 同时还说明了每种曲线的功能和应用, 尤其着重阐明了监视测井的特点。表2所列的是TMD测井仪器的技术性能。

表2 TMD测井仪器的技术指标

A. 外径	1 ¹¹ / ₁₆ 英寸
B. 全长(包括自然伽马和接箍定位器)	约34英尺
C. 额定压力	15000磅/英寸 ²
D. 额定温度	300°F 150℃
E. 中子源参数	
1. 中子发生器	14MeV
2. 重复频率	1250脉冲/秒
3. 脉冲宽度	60微秒
F. 探测器参数	
1. 类型	NaI(Tl)
2. 尺寸	
短源距探测器	0.75×4英寸
长源距探测器	0.75×6英寸
3. 每个探测器的时间门	6个门和本底测量
4. 能量偏置值	约60KeV
G. 地面仪器	DLS/DLS II /PLS
H. 额定测井速度	15—30英尺/分

测井实例

用以下实例说明, 在几种不同的强化采油工程中, TMD测井系统使用的情况。除非另

有说明,所有测井曲线都是用标准野外测井系统测量的,测井速度近似于10英尺/分,所有曲线都如同所观看到的那样被显示出来(未作偏移和规格化)。

A井,测—注—测

在开始强化采油作业之前,测—注—测(L—I—L)技术是确定残余油饱和度(ROS)最经济最准确的方法^[8,9]。在用已知特性的液体冲洗储集层的过程中或冲洗之后,立即取得测井资料,就可以在测井资料分析中消除大部分解释参数。应用原始测量的数据的优点是评价储集层时能得出可信度很高的最后结果。井内液体的变化对 Σ_{FM}^{CORR} 的影响不大,这是TMD测井的另一优点,这就减少了通常井眼影响对于用单指数系统的测—注—测分析所产生的误差。

1955年在得克萨斯东部钻了A井,所测井段是砂泥岩层序,目的砂岩储集层的主要产层是自然水驱油层,在二次采油阶段注了几年水。为了评价三次采油工程的经济效益,设计了测—注—测作业,在作业中进行TMD测井时储集层已经水淹。A井的该砂岩储集层从未生产过,在钻进过程中进行全井段取芯。

在对目的砂岩层(X640—75)挤水泥和射孔之前,于1984年2月进行了TMD的初次测井。在完井后,为了清除射孔的遗留物和为测—注—测工程提供水槽,在第二次基准测井之前,该层于几天内产出矿化度为95 kppm NaCl的原生水,注入一个大罐内。为了在测井时地层保持残余油饱和(ROS)状况,又把原生水重新注入目的层,然后再进行测—注—测的基准测井。初次TMD测井读数与测—注—测的TMD的基准测井读数之间没有明显的差别。图5给出了井眼几何形状及TMD测井的基准测井曲线。在目的砂岩层井段进行了5次测井,测速为10英尺/分。其中两次测到上部挤压封隔器以上的地层,该地层的 Σ 值低,并把它当作参考层。图5中的 Σ_{FM}^{CORR} 、 $R_{N/F}$ 和 Σ_{BH-SS} 的曲线是5次测井的平均值,并对每条曲线标出其统计误差的范围,以指示每条曲线平均值的一个标准偏差。图5中也给出了5次测井中第一次测井的质量测井曲线,这些曲线是在开始重新注水阶段测出的。根据 $R_{BH/FM}$ 值低而且均匀的显示,表明所测井段的井眼条件是好的。应该注意到在挤压封隔器的上部X490处质量测井曲线的LS—BKG曲线有明显的增大。本底值的增大(没有显示高的自然伽马强度)表明在这个深度的上部的井眼范围内有垂直向上的水流,并且由于氧活化而使本底增大^[10,11]。由于挤压封隔器漏水引起水的流动,结果在封隔器上部的油管—套管环形空间内充满了水。当环形空间充满水时,注入速率由600桶/日降至约50桶/日,而且在进行其余基准测井时仍保持这样的水平。在环形空间充满水后进行的几次测井,没有观测到本底值的增大。

在作业的第二个阶段,把矿化度为185 kppm NaCl的盐水注入目的层,并且为了检查地层的冲洗状况,在高矿化度条件下进行了几次TMD测井。对最后的5次测井(在整个层段注入了几个孔隙体积的水后)采取与基准测井数据类似的处理方法。图6中把 Σ_{FM}^{CORR} 和 Σ_{BH-SS} 的平均值曲线与基准测井的相应曲线重叠在一起,也画出了这些曲线的差值 $\Delta\Sigma_{FM}^{CORR}$ 和 $\Delta\Sigma_{BH-SS}$,同时也给出了 $\Delta\Sigma_{FM}^{CORR}$ 和 $\Delta\Sigma_{BH-SS}$ 的以俘获单位表示的标准偏差值。在X570英尺以上有较大的误差值,这是由于在这个深度以上的每次注入阶段只进行两次测井。由 Σ_{BH-SS} 曲线可以看出,不仅在下部封隔器以下,而且在穿过两个封隔器及其上部的井眼,现在全部含有较高矿化度的水(由事先观测到的封隔器漏水,已预计到这种情况)。 Σ_{FM}^{CORR} 曲线清楚地显示出地层是均匀吸液的,而且在目的砂岩层上部(X608—620)也吸入了盐水。尽管井

内液体的矿化度变化了约100kppm NaCl, 然而在X500—600的泥岩处和上部封隔器上面的低 Σ 值地层, 没有观察到 Σ_{FM}^{CORR} 的变化。这是由于用双指数处理减少了井眼的影响, 同时在两次注入阶段所用水的矿化度都大于70kppm NaCl, 使井眼/地层的相互作用^[5]降到最小($\Sigma_{FM}^{CORR} \approx \Sigma_{FM}^{INT}$)。我们竭力推荐在所有测—注—测工程中采用此低矿化度截止值, 因为在井眼内液体矿化度很低时, 对 Σ_{FM}^{CORR} 进行校正所产生系统误差, 与采用矿化度范围比较受限制的冲洗液所引起的 $\Delta\Sigma_{FM}$ 的统计误差的增加相比, 这个误差大得多。

图7给出了计算的残余油饱和度曲线, 计算时输入岩芯孔隙度 ϕ 和图6中的 $\Delta\Sigma_{FM}^{CORR}$ 值, 该层计算的残余油饱和度为10—20%, 岩芯分析预计为15%, 二者符合得较好。但遗憾的是残余油饱和度太低, 使三次采油在经济上没有吸引力。

作为附注说明以下情况。在井开采足够长的时间, 使在地面观察到产液的矿化度等于原生水的矿化度几天之后, 再进行最后一组的TMD测井。从理论上讲, 矿化度为185kppm NaCl的盐水已全部产出, 因此井又恢复到基准测井时的条件, 我们期望能用测出的数据再证实上述的残余油饱和度值。然而在停产和进行TMD测井之间, 这口井关闭了12小时。把原始的基准测井、高矿化度条件下的测井及最后的测井所得出的 Σ_{FM}^{CORR} 和 Σ_{BH-SS} 平均值曲线进行重叠(见图8)。由图中可以看出, 地层的俘获截面未恢复到原来的数值, 井眼的矿化度曲线也未恢复到原来的显示, 在射孔层位的底部 $\Sigma_{水}$ 也比原来的显示高。在底部封隔器的上面井段仍然含有高矿化度的水, 在上部封隔器的上面的井段(图中未画出)显示出含有混合的盐水, 它与井底的状况类似。由于测井时井内通过射孔层位有污染, 所以最后测出的TMD测井数据不能用来再证实前面测井计算的残余油饱和度值。在以前的许多脉冲中子测—注—测研究中结果变化不定, 这可能是由于污染引起的。过去没有指示井眼状况的方法去鉴别引起地层俘获截面发生异常的潜在原因, 所以许多研究工作可能基于受井眼污染或窜槽影响的解释结果。

B井, 监测CO₂的注入

六十年代在路易斯安那州墨西哥湾沿岸地区钻了B井, 储集层是高孔隙纯净的均质砂岩, 该层砂岩在所有方向上充分发育和圈闭。为了评价在这个地区施行注入CO₂强化采油工程的可行性, 于1983年设计了这种注入试验的方案^[12]。根据物质平衡理论计算的结果表明, 该储集层已接近于一次衰竭, 因此它是注入二氧化碳的良好层位。

1984年对这个项目的井再次进行工作后, 用TMD方法作了5次测井(见图9)。以后不久, 在一口沿倾斜向上的注入井开始在气-油接触面处注入CO₂。大约在6个月后第一次进行监视测井(见图10)。过了3个月再次进行监视测井, 检查注入情况(见图11~12, 省去了质量测井曲线)。图13中是基准测井曲线和最后一次的监视测井曲线, 同时也标出了油水接触面。

把几次监视测井的结果进行对比, 发现在继续注入二氧化碳时油水界面向下移动。根据每次监视测井的 $R_{N/F}$ 曲线可以看到, 在集油带的上部有溶解的二氧化碳, 因为每次监视测井得出的 $R_{N/F}$ 值总比前一次减小。与纯含油地层相比, 地层的 Σ_{FM} 减小表明CO₂增加(100%含二氧化碳与100%含油时相比, 地层的 Σ_{FM} 值要减小7个俘获单位)。长、短源距探测器计数率曲线之间的差别增大, 也表明油中的CO₂饱和度增大。根据所有曲线的显示来看, 在集油带底部10英尺井段内没有溶解的CO₂。

在最后一次监视测井之后,即停止注入二氧化碳,开始注入油田的天然气来代替 CO_2 ,以便使集油带继续沿下倾方向移动。预计在1986年初开始初始产油测试工作。

选用TMD测井作注入 CO_2 监视测井的主要理由是这种方法能指示井眼内的情况。在储集层监视方案中,认为是由于储集层特性的变化引起测井读数的变化,因此对井眼条件变化的鉴别是至关重要的。TMD测井使用的双指数模型能够阐明大多数井眼条件的变化,同时对测井结果几乎没有影响或者完全没有影响。当井下套管设备(硬件)变化,套管损坏及井眼内有矿化度很低的液体时都会引起一些潜在的问题,而这种方法对这些问题的鉴别能力是非常宝贵的。根据计数率的减少和 $\Sigma_{\text{BH-SS}}$ 值的增加能划分出位于X318—328英尺和X418—428英尺处(图10—13)的封隔器。在深度X288—304英尺处显示 $\Sigma_{\text{BH-SS}}$ 和 R_{NIF} 的异常,这是由井下联接钢质油管的玻璃钢部件引起的。在基准测井之后和开始注气之前,井下安装了两个封隔器、油管和联接部件,同时在两个封隔器之间完成了砾石充填。应注意到,没有砾石充填时基准测井的 $\Sigma_{\text{FM}}^{\text{CORR}}$ 曲线与有砾石充填时监视测井的 $\Sigma_{\text{FM}}^{\text{CORR}}$ 曲线重复得很好。由于几次测井时井眼条件不同,因此 $\Sigma_{\text{BH-SS}}$ 曲线不同,可以利用这种差别来评价砾石充填的完整性,至少可作为定性评价的依据。在上部(X328—350英尺)几乎没有砾石存在,在X398—418英尺井段的底部,即射孔层位附近砾石充填的质量也不好。在 $\Sigma_{\text{BH-SS}}$ 曲线上也可观察到缺少砾石的显示,当在套管—油管之间充填的是高 Σ 值的盐水,不是低 Σ 值的砾石,结果使测井曲线上的 Σ 值增大。

通过这一实例表明,在监视注入二氧化碳方面可以认为TMD测井是一种有前途的方法。在这项工程完成时,进行这项作业的公司应该发表注入二氧化碳的效果和详细的资料分析。

C井,测—注—测

C井位于俄克拉何马州的狭长地区,是砂泥岩剖面,这个油田已水淹了近17年,而且其水源是多种多样的。1983年钻了C井,在进行了生产测试之后,确认这口井的储集层接近残余油饱和状态。

开始进行测—注—测工程,以确定该技术在这个油田中的可行性。1983年春开始了测—注—测工作,这口井开始放喷,直到获得高质量的水样时才停。水样分析表明,矿化度约为48kppm NaCl。在注入高矿化度水之前进行了TMD基准测井,测速10英尺/分,进行了5次测井。然后用矿化度为160kppm NaCl盐水冲洗地层,以替代孔隙中可动的液体。在注入阶段进行TMD监视测井,以确定何时完成了对地层的冲洗,在注入过程中取得了最后一组TMD测井曲线。

为了有助于数据处理,对TMD测井数据采用统计分析程序进行处理,对每次测井数据进行平均,计算各条测井曲线的平均值和平均值的标准偏差。图14-A*给出了冲洗之前所取得的TMD测井的多次测井曲线,对测井曲线平均值在其两侧都画出了标准偏差带,对主要测井曲线还画出平均值的标准偏差曲线。在第1栏中包括有“NUM—FILES”曲线,该曲线表示取得用于计算平均值和标准偏差值的数据的测井次数。应注意,在目的层段(X194—227英尺)显示低的 $\Sigma_{\text{FM-SS}}$ 的标准偏差值(约0.1俘获单位)。图14-B给出了类似的TMD测井根据测井数据计算得出的曲线,这些测井是在注入高矿化度水期间或注入高矿化度水之后

* 译者注:文中未见此图。

进行的。为了便于测井曲线的对比,在图15中给出了冲洗前和冲洗后的 Σ_{BH-SS} 平均值和作过井眼校正的 Σ_{FM-SS} 平均值的重叠曲线。应注意,在封隔器下面(X075—82英尺)井段显示较高的 Σ_{BH-SS} 值,而且一直向下延续到射孔层位的底部(X227英尺),这表明冲洗后井眼中有较高矿化度液体,而且如所希望的那样较高矿化度液体也存在于整个目的层段的地层中。另外也观察到矿化度较高的液体没有延伸到封隔器的上面,这证明封隔器封堵得很好,另外在射孔层位的下面,也没有时间使较高矿化度液体与低矿化度液体混合。图14-B中没有包括注水阶段初次测井的结果,从 Σ_{BH-SS} 曲线可以看出,在9英尺射孔层位的底部不是盐水冲洗液,仍是原来较低矿化度的水(见图15)。

对基准测井的 Σ_{FM-SS} 用目的层上面的地层作规格化,移动约1个俘获单位(与所用的 Σ_{FM}^{CORR} 对 Σ_{FM}^{INT} 的图板一致),以校正井眼内低矿化度液体(48kppm NaCl)所引起的地层衰减率变化。正如前面所讨论的,为了避免作这种校正,建议所用冲洗液的最低矿化度为70kppm NaCl。一般来说,偏移1个俘获单位相当于水淹时观测的差值 $\Delta\Sigma$ 的20~30%,这样会使引入到解释中的允差过大。

用Welex公司的SANDCAL计算机辅助测井解释系统对裸眼井测井资料进行分析^[13],计算出有效孔隙度和岩性。为了进行最后的评价,裸眼井测井解释结果与TMD的基准测井和最后一次测井的 Σ_{FM}^{INT} 数据一起送入TMD测井分析程序。图16的结果表明,分析结果与所提供的油田的资料非常一致。由一邻井取得的岩芯数据(见图17)与计算解释得出的孔隙度和岩性都对比得很好。对整个目的层得出的残余油饱和度为35—40%,残余油饱和度值与根据该井和油田其它井中有关层位的裸眼井测井,岩芯冲洗分析及单井示踪等预计的结果非常接近。

这一令人鼓舞的试验结果导致在油田测—注—测工作中广泛使用TMD测井来评价残余油饱和度。计划于1987年初用注入CO₂的方法来开采剩余油,因为残余油饱和度足够高,这表明进行三次采油是有经济效益的。

结 束 语

TMD测井系统采用双指数模型来区分井眼和地层的 Σ 效应,因此在测—注—测和监视测井工作中该测井系统是一种有效的手段。把井眼参数对 Σ_{FM}^{CORR} 的影响减到最小,结果使计算出的残余油饱和度与预计值对比得很好。同时测量的井眼参数使用户能确定井下是否达到了预期的冲洗效果,以及射孔井段是否受到井内液体污染而引起潜在的解释问题。

根据试验井数据和现场的测量结果,我们认为在测—注—测工程中使用的所有冲洗液的矿化度应大致高于70000ppm NaCl,如果不作这样的限定,在用 $\Delta\Sigma_{FM}^{CORR}$ 计算残余油饱和度之前必须对观测到的地层衰减率(Σ_{FM}^{CORR} 值)作显著的井眼影响的校正,这一校正会给计算结果带来潜在的系统误差,通常该误差大于矿化度差别不大时计算残余油饱和度所增加的统计误差。

参 考 文 献

1. Youmans, A.H., Hopkinson, E.C., Bergan, R.A., and Oshry, H.I.: "Neutron Lifetime, a New Nuclear Log," *Journal of Petroleum Technology*, March, 1964.
2. Dewan, J.T., Johnstone, C.W., Jacobson, L.A., Wall, W.B., and Alger, R.P.: "Thermal Neutron Decay Time Logging Using Dual Detection," Transactions of the SPWLA Fourteenth Logging Symposium, 1973.
3. Hall, J.E., Johnstone, C.W., Baldwin, J.L., and Jacobson, L.A.: "A New Thermal Neutron Decay Logging System - TDT-M," *Journal of Petroleum Technology*, January, 1982.
4. Randall, R.R., Lawrence, T.D., Frost, E., and Ferti, W.H.: "PDK-100 Log Examples in the Gulf Coast," Transactions of the SPWLA Twenty-Sixth Annual Logging Symposium, June, 1985.
5. Schultz, W.E., Smith, H.D. Jr., Verbout, J.L., Bridges, J.R., and Garcia, G.: "Experimental Basis for a New Borehole Corrected Pulsed Neutron Capture Logging System (TMD)," Transactions of the SPWLA Twenty-Fourth Logging Symposium, June, 1983.
6. Smith, H.D. Jr., Arnold, D.M., and Peelman, H.E.: "Applications of a New Borehole Corrected Pulsed Neutron Capture Logging System (TMD)," Transactions of the SPWLA Twenty-Fourth Logging Symposium, June, 1983.
7. Buchanan, J.C., Clearman, D.K., Heidbrink, L.J., and Smith, H.D. Jr.: "Applications of TMD Pulsed Neutron Logs in Unusual Downhole Logging Environments," Transactions of the SPWLA Twenty-Fifth Logging Symposium, June, 1984.
8. Ferti, W.H.: "Determination of Residual Oil Saturation from Geophysical Well Logs in Tertiary Recovery Projects," Proceedings of the DvG1/DGMK Symposium, Köln, West Germany, October 6-7, 1977.
9. Richardson, J.E., Wyman, R.E., Jorden, J.R., and Mitchell, F.R.: "Methods for Determining Residual Oil Saturation with Pulsed Neutron Capture Logs," *Journal of Petroleum Technology*, May, 1973.
10. Lamb, G., and Webber, G.: "Measurements of Water Flow in Deviated Production Wells by Oxygen Activation Logging," Paper Z, Transactions of the SPWLA Twenty-Fourth Logging Symposium, June, 1983.
11. Smith, H.D. Jr.: "Use of Oxygen Activation on the TMD Pulsed Neutron Capture Logging System to Measure Water Flow in Producing Wells," Welox Technical Memorandum, March 8, 1984.
12. Moore, J.S.: "Design, Installation and Early Operation of the Timbalier Bay S-2B(RA) Su Gravity Stable Miscible CO₂ Injection Project," Proceedings of SPE Symposium, September 22-25, 1985.
13. Ruhovets, N.: "Methods to Determine Porosity, Clay Content and Mode of Distribution in Gas Bearing Shaly Sand Reservoirs," Transactions of S.A.I.D. Symposium, October 24-26, 1984.

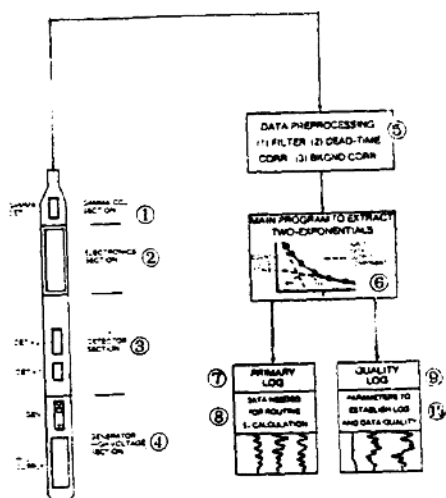


图 1 多门热中子衰减测井系统

①自然伽马、套管接箍定位器部分；②电子仪器部分；③探测器部分；④中子发生器和高压部分；⑤数据处理：(1)滤波、(2)死时间校正、(3)本底值校正；⑥提取双指数的主程序；⑦主要测井曲线；⑧常规计算 S_w 所需的数据；⑨质量测井曲线；⑩确定测井曲线和数据质量的参数

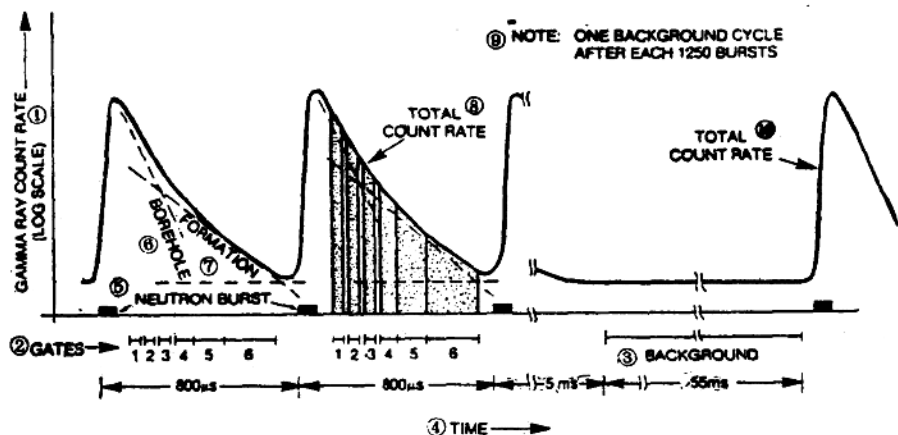


图 2 TMD测井仪的中子脉冲和时间门

①伽马射线计数率 (测井比例尺)；②门；③本底值；④时间；⑤中子脉冲；⑥井眼；⑦地层；
⑧总计数率；⑨注：每发射1250次中子脉冲测一次本底值；⑩总计数率

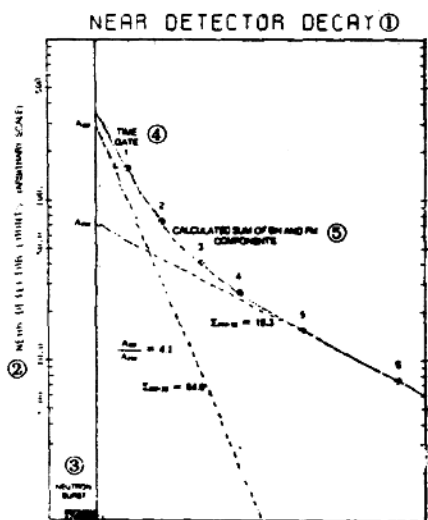


图 3 孔隙度为42%淡水砂岩的近探测器的衰减曲线，10英寸井径，下有7英寸套管并已固井，套管中有矿化度为135kppm的NaCl盐水

①近探测器的衰减曲线；②近探测器计数率 (任意比例尺)；③中子脉冲；④时间门；⑤计算的井眼衰减分量和地层衰减分量之和

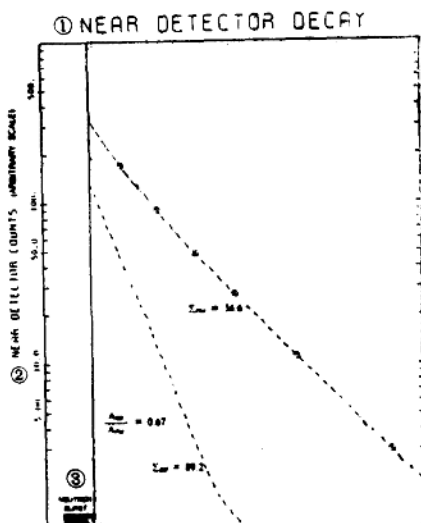


图 4 孔隙度为20%，含有硼酸盐水的砂岩衰减曲线；8英寸井眼内有7 1/2英寸套管，套管中有淡水

①近探测器的衰减曲线；②近探测器计数率 (任意比例尺)；③中子脉冲

PRIMARY LOG ②③

QUALITY LOG ②④

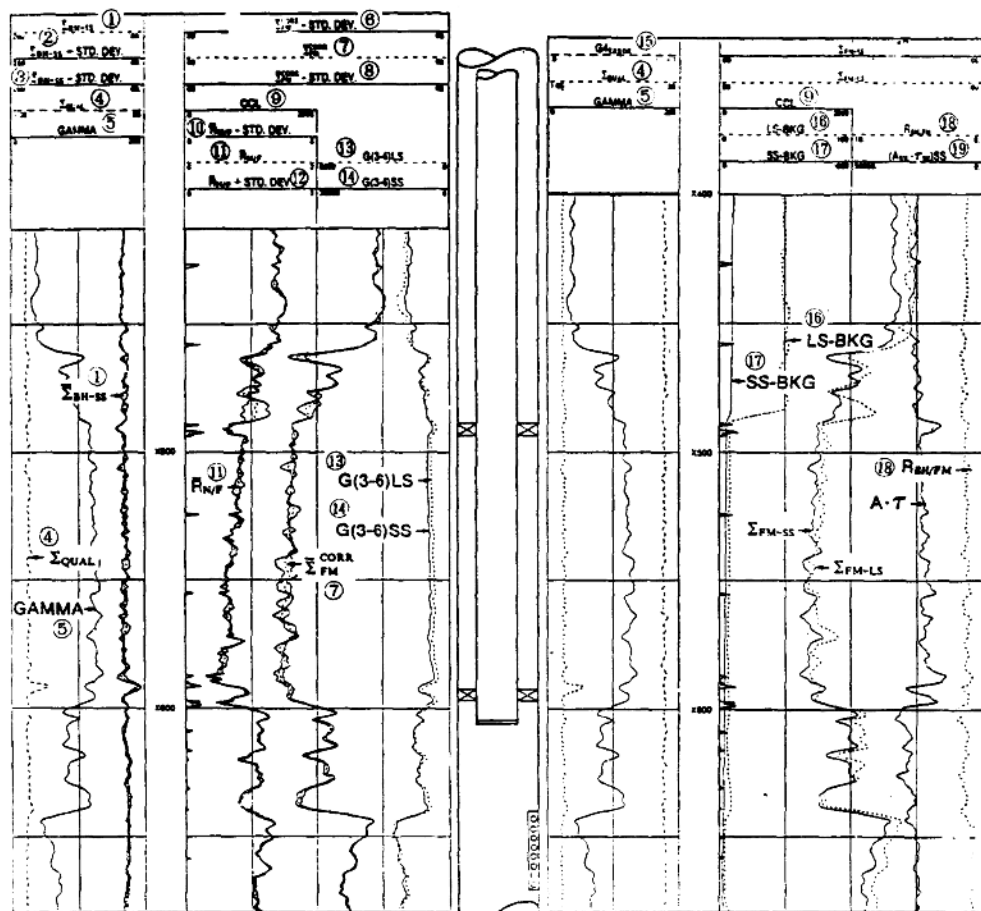


图 5 A井的基准测井曲线

①短源距探测器井眼俘获截面的平均值；②短源距探测器井眼俘获截面的平均值+标准偏差；③短源距探测器井眼俘获截面的平均值-标准偏差；④在6门中计算的地层分量计数率与观测的总计数率之比；⑤自然伽马测井曲线；⑥对地层扩散效应作了校正的地层俘获截面的平均值+标准偏差；⑦对地层扩散效应作了校正的地层俘获截面的平均值-标准偏差；⑧对地层扩散效应作了校正的地层俘获截面的平均值+标准偏差；⑨3—6门短源距探测器计数率与长源距探测器计数率比值的平均值-标准偏差；⑩3—6门短源距探测器计数率与长源距探测器计数率比值的平均值+标准偏差；⑪3—6门短源距探测器计数率与长源距探测器计数率比值的平均值；⑫3—6门短源距探测器计数率与长源距探测器计数率比值的平均值+标准偏差；⑬3—6门长源距探测器死时间和本底校正后的计数率；⑭3—6门短源距探测器死时间和本底校正后的计数率；⑮拟合误差曲线；⑯长源距探测器的滤波后的本底计数率；⑰短源距探测器的滤波后的本底计数率；⑱对短源距探测器计算得出的井眼计数率与地层计数率之比；⑲短源距探测器井眼分量计数率；⑳主要测井曲线；㉑质量测井曲线

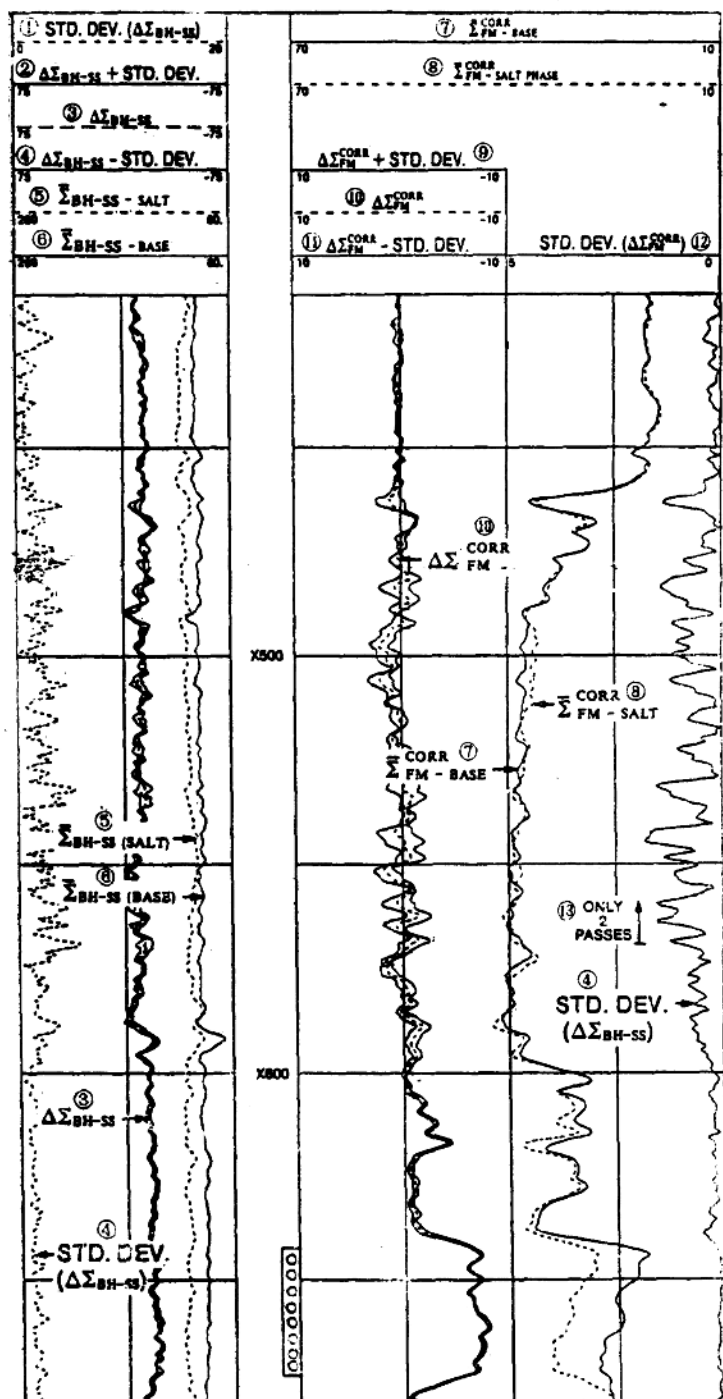


图 6 A井的基准测井曲线与注盐水时测井曲线的重叠

①用俘获单位表示的短源距探测器两次测出的并眼俘获截面差值的标准偏差；②短源距探测器两次测出的并眼俘获截面差值+标准偏差；③短源距探测器两次测出的并眼俘获截面差值；④短源距探测器两次测出的并眼俘获截面差值-标准偏差；⑤注盐水时，短源距探测器的并眼俘获截面的平均值；⑥基准测井时，短源距探测器的并眼俘获截面的平均值；⑦基准测井时，对地层扩散效应作了校正后的地层俘获截面的平均值；⑧注盐水时，对地层扩散效应作了校正后的地层俘获截面的平均值；⑨两次测出的对地层扩散效应作了校正后的地层俘获截面的差值+标准偏差；⑩两次测出的对地层扩散效应作了校正后的地层俘获截面的差值；⑪两次测出的对地层扩散效应作了校正后的地层俘获截面的差值-标准偏差；⑫两次测出的对地层扩散效应作了校正后的地层俘获截面的差值的标准偏差；⑬只作过两次测井（图6中的标准偏差曲线的下注应为 $\Delta\Sigma_{FM}^{CORR}$ ——译者注）

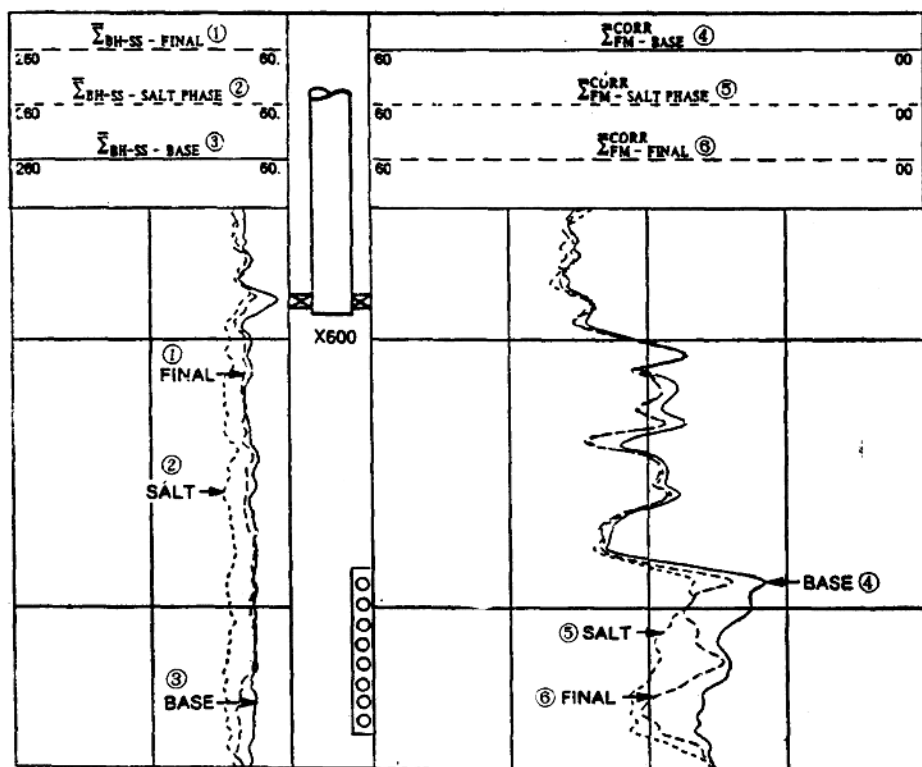


图 8 A井的基准测井曲线、注盐水时的测井曲线及最后测井曲线的重叠

①最后测出的短源距探测器的井眼俘获截面的平均值; ②注盐水时测出的短源距探测器井眼俘获截面的平均值; ③基准测井的短源距探测器的井眼俘获截面平均值; ④基准测井的对地层扩散效应作了校正后地层俘获截面的平均值; ⑤注盐水时测出的对地层扩散效应作了校正后地层俘获截面的平均值; ⑥最后测出的对地层扩散效应作了校正后地层俘获截面的平均值

(PRE-GRAVEL PACK) ①

PRIMARY LOG ②

QUALITY LOG ③

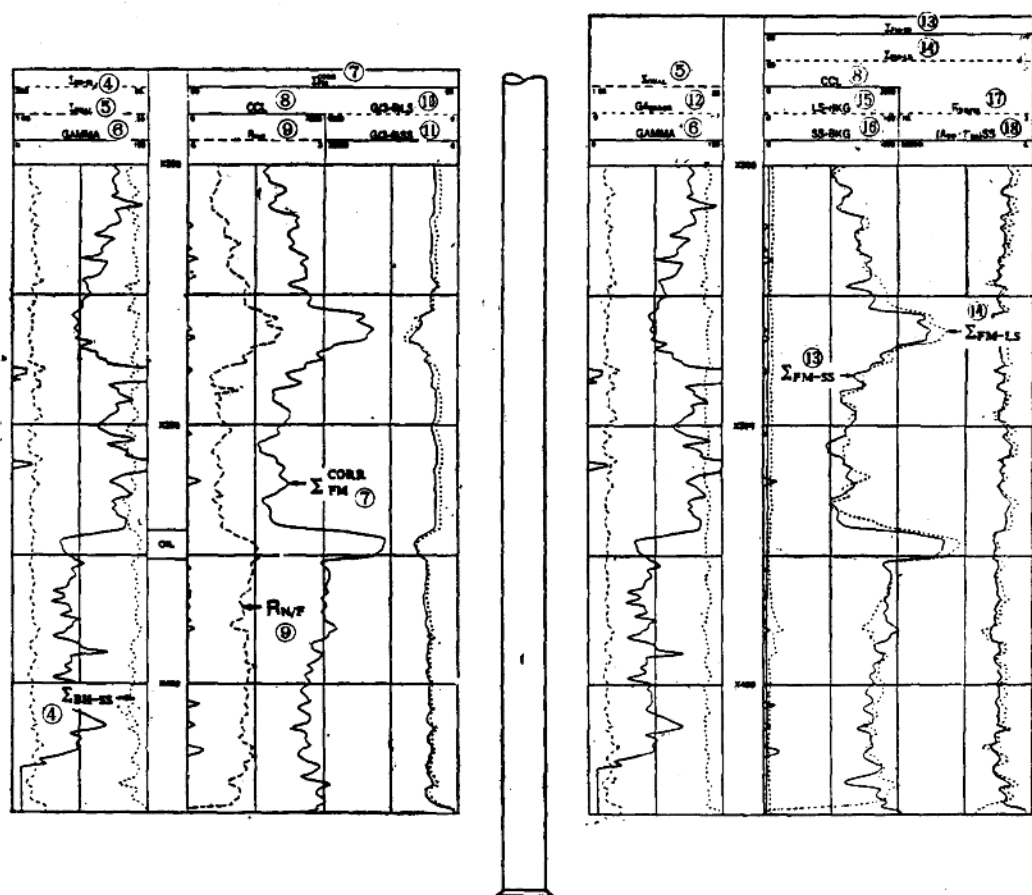


图 9 B井的基准测井曲线

①在砾石充填之前；②主要测井曲线；③质量测井曲线；④短源距探测器的井眼俘获截面；⑤在6门中计算出的地层分量计数率与在6门中观测的总计数率之比；⑥自然伽马测井曲线；⑦对地层扩散效应作了校正后的地层俘获截面；⑧套管接箍定位曲线；⑨3—6门短源距探测器计数率与长源距探测器计数率之比；⑩长源距探测器3—6门作死时间和本底值校正后的计数率；⑪短源距探测器3—6门作死时间和本底值校正后的计数率；⑫拟合误差曲线；⑬短源距探测器测出的地层俘获截面；⑭长源距探测器测出的地层俘获截面；⑮长源距探测器的滤波后的本底计数率；⑯短源距探测器的滤波后的本底计数率；⑰对短源距探测器计算出的井眼计数率与地层计数率之比；⑱短源距探测器井眼分量计数率

(AFTER GRAVEL PACK)①

PRIMARY LOG ②

QUALITY LOG ③

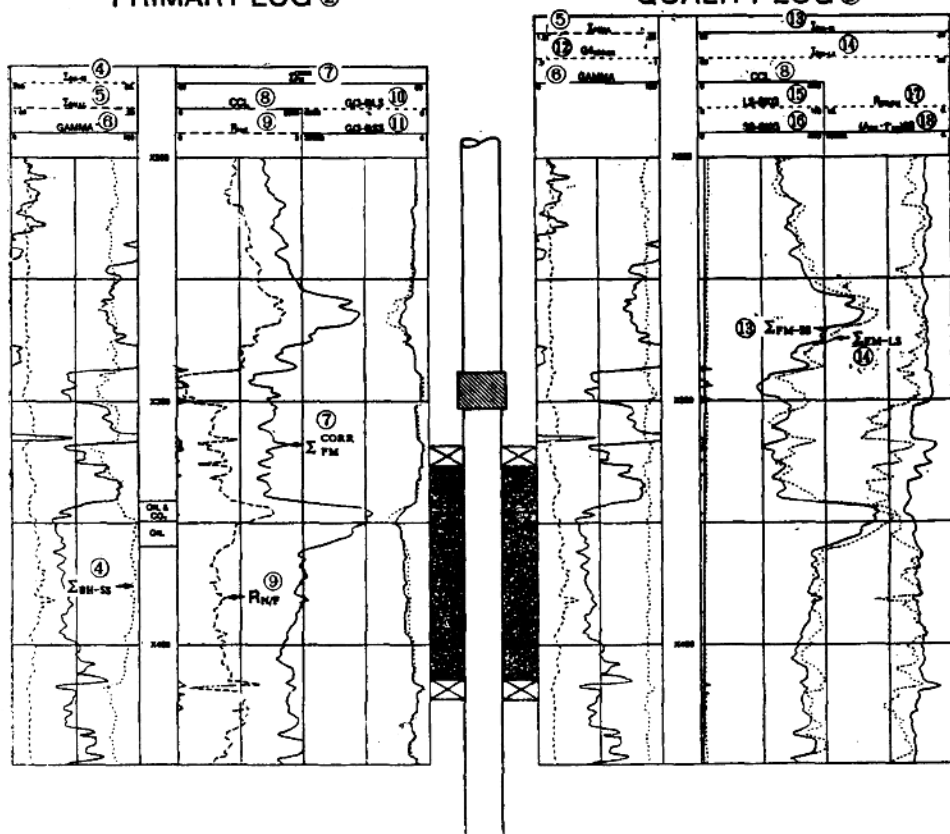


图 10 B井的第一次监视测井

①在砾石充填之后；②主要测井曲线；③质量测井曲线；④短源距探测器的井眼俘获截面；⑤在8门中计算出的地层分量计数率与在8门中观测的总计计数率之比；⑥自然伽马测井曲线；⑦对地层扩散效应作了校正后的地层俘获截面；⑧接箍定位曲线；⑨3—8门短源距探测器计数率与长源距探测器计数率之比；⑩长源距探测器3—8门作死时间和本底值校正后的计数率；⑪短源距探测器3—8门作死时间和本底值校正后的计数率；⑫拟合误差曲线；⑬短源距探测器测出的地层俘获截面；⑭长源距探测器测出的地层俘获截面；⑮长源距探测器的滤波后的本底计数率；⑯短源距探测器的滤波后的本底计数率；⑰对短源距探测器计算出的井眼计数率与地层计数率之比；⑱短源距探测器井眼分量计数率

PRIMARY LOG①

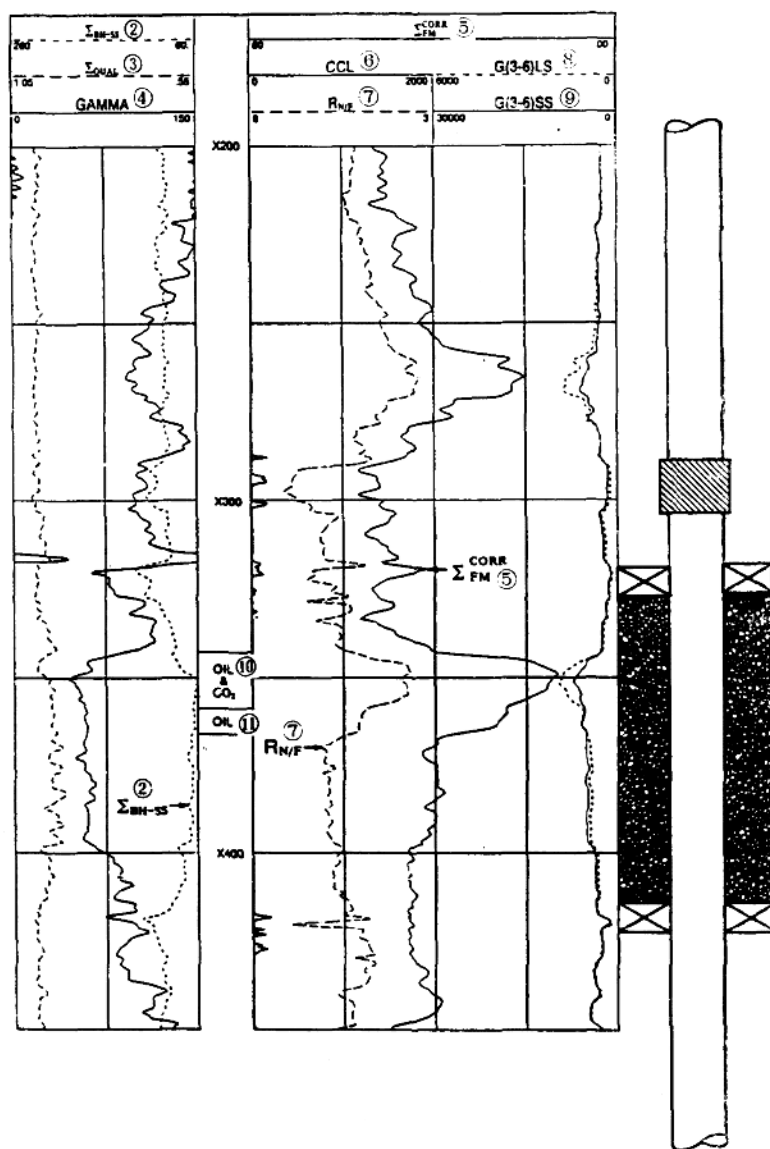


图 11 B井的第二次监视测井

①主要测井曲线；②短源距探测器的并眼俘获截面；③在6门中计算出的地层分量计数率与在6门中观测的总计数率之比；④自然伽马测井曲线；⑤对地层扩散效应作了校正后的地层俘获截面；⑥接箍定位曲线；⑦3—6门短源距探测器计数率与长源距探测器计数率之比；⑧长源距探测器3—6门作死时间和本底值校正后的计数率；⑨短源距探测器3—6门作死时间和本底值校正后的计数率；⑩油和二氧化碳；⑪油