

江汉测井情报

(译文集)

1

江汉测井公司情报室

1 9 8 4

江汉测井情报

(译文集)

江汉测井公司
情报室编

一九八四年第一期
总 第 一 期

目 录

分析脉冲中子—电阻率测井的一种新方法·····	(2)
确定残余油饱和度的一种方法·····	(7)
用“测井—注入—测井”方法评价水淹层的剩余油饱和度·····	(21)
确定残余油和可动油饱和度·····	(36)
在北美自然伽玛能谱测井的经验·····	(42)
蒙特利泥岩裂缝性储集层的测井评价·····	(68)
用测井曲线分析半定量地预测储集层生产能力极限的技术·····	(78)
新的SP解释图版在墨西哥湾路易斯安那油田的应用·····	(83)
简述实验室测量液体接触电位的稳定性·····	(89)

翻译：薛 中

分析脉冲中子—电阻率测井的一种新方法

Roberte Aguilera

摘 要

整理脉冲中子——电阻率组合测井资料的一种流行的方法,是在反平方根刻度尺上对俘获截面 Σ 和与地层真电阻有关的测井读数 R_t 进行交绘。资料点必须选自纯地层,且地层的孔隙度的分布范围要受到一定的限制。 $\Sigma-R_t$ 交绘图产生一条清楚的油水直线,斜率为 $\sqrt{\alpha R_w} (\Sigma_w - \Sigma_{hy})$,从这条直线能够直接确定地层的含水饱和度。

本文提供一种用脉冲中子——电阻率组合测井资料对单一岩性的纯地层进行整理的新方法。它除具有与前面提及的方法相同的能力外,还具有以下优点。

1. 本方法可分析孔隙度变化的地层。
 1. 孔隙度指数 m 的值不必假设为2。
 3. 在有利的条件下,本方法可根据单一的测井曲线估算饱和度指数 n 的数值。
- 本方法是受Pickell介绍的典型识别方法的启发而写的。

方 法 原 理

分析测井资料的基本公式是:

$$S_w = 1^{-1/n} \quad (1)$$

$$I = R_t / (F R_w) = R_t / R_o \quad (2)$$

$$F - \alpha \phi^{-m} = R_o / R_w \quad (3)$$

用脉冲中子测井定量评价纯地层的基本公式是:

$$\Sigma = (1 - \phi) \Sigma_{ma} + \phi S_w \Sigma_w + \phi (1 - S_w) \Sigma_{hy} \quad (4)$$

解出孔隙度得到:

$$\phi = \frac{\Sigma - \Sigma_{ma}}{(1 - S_w) \Sigma_{hy} + S_w \Sigma_w - \Sigma_{ma}} \quad (5)$$

合并公式(2), (3)和(5),两边取对数得到:

$$\log R_t = \log I + \log (\alpha R_w) - m \log (\Sigma - \Sigma_{ma}) + m \log \beta \quad (6)$$

式中:

$$\beta = [(1 - S_w) \Sigma_{hy} + S_w \Sigma_w - \Sigma_{ma}] \quad (7)$$

分析等式(6)和(7)指出, R_t 对 $\Sigma - \Sigma_{ma}$ 的双对数交绘图,对于100%含水层,当 α 、 R_w 、 m 、 Σ_{ma} 和 Σ_w 的值一定时,必然得到一条以 $-m$ 为斜率的直线。如果 Σ_{ma} 值不知道,这种类型的分析方法允许我们通过试凑的办法确定 Σ_{ma} 。事实上,如果所用的 Σ_{ma} 的值不正确,就不可能得到一条所期望的直线,而只能得到一条曲线。

一旦建立起100%含水线的趋势, 我们就能够画出一组平行线族, 每条平行线表示一种含水饱和度。

最后, 从关系式

$$\Sigma - \Sigma_{ma} = \phi \text{ 常量 } \beta \quad (8)$$

中确定出 $\Sigma - \Sigma_{ma}$ 的值, 并画出孔隙度为常量的曲线。

实 例

图一所示为Guif Coast井的感应电测井和脉冲中子测井曲线。地层水矿化度为230000 PPMNaCl ($\Sigma_w = 115$)。

表一所示为含水井段的数字化数值。电导率是从线圈距为40吋(1.0米)的感应测井曲线上读数的, 并转换成为电阻率值。

Σ_{ma} 通过试凑计划用8。事实上, ($\Sigma - 8$)与 R_{40} 的双对数交绘图, 对于含水地层, 结果是一条直线, (图二)。如果所用的 Σ_{ma} 值有别于8, 则获得的是一条曲线, 而不是直线, (图三)。对于大的电阻率值, 这种影响更为显著。

孔隙度指数 m 值为1.58, 它是100%含水线的斜率。

含水饱和度曲线族, 是根据如表二所示的事先用公式(1)计算的电阻增大率 I , 用公式(7)计算的 β 值和乘积 $I \cdot (aR_w)$ 绘制的。从表一知常数($\alpha \cdot R_w$)为0.035, 它是用外推法, 延长含水线至 $\Sigma - \Sigma_{ma} = \Sigma_w - \Sigma_{ma} = 107$ 而得到的。把 $I \cdot (\alpha R_w)$ 的数值绘制在横坐标上, 与其对应的 β 值, 绘在纵坐标上, (图三)。通过这些点, 绘出平行于100%含水线的平行线。

最后, 用公式8计算出资料点(表三), 用以绘制孔隙度线, 如图二所示。

讨 论

图一提供的测井曲线, 在以前德莱赛·阿托拉斯的文献中已经讨论过。从6608到6617呎井段(2014.1到2016.9米)当井段被钻完时被指为含水井段。以后进行的脉冲中子测井指出有油存在, 并已被从该井段生产的纯油所确证。这说明油是在感应测井完成后运移到这个位置的。只把含水层段绘制在图二上, 虽然测井是在不同的时间完成的, 但结果取得的资料是一致的。

服务公司指出对于平均孔隙度为27%的地层在考虑之中。图二的资料点表明从地层1到4, 以及从地层7到8, 具有相同数量级的孔隙度值。地层5和6的孔隙度值分别为21%和16%。

在有利的条件下, 脉冲中子和电阻率组合测井, 允许我们单从测井资料去估计饱和度指数 n 。通过用 Σ 对孔隙度的常规交绘, 计算出 S_w , 然后从等式(1)得到饱和度指数 n 。

本文提出的方法, 是建立在地层评价等式的基础上的。这些等式先前已被证明是符合实际的。作为本文提出的等式的利用, 可导致在更一般的条件下对资料进行分析, 包括出现孔隙度变化时的地层评价(流行的方法要求孔隙度固定不变), 也包括 $m \neq 2^*$ 时的地层评价(流行的方法要求孔隙度指数 m 等于2)。

本方法的精确性和它作为基础方程式的精确性相同, 脉冲中子——电阻率测井是一种有价值的地层评价方法。由于 Σ 和 R 数值小的变化, 在计算孔隙度和含水饱和度时会 导致大

的误差，所以应用脉冲中子——电阻率组合测井资料时，应小心谨慎。

原文为 $m = 2$ ，但从全文看，应为 $m \neq 2$ 。

——译者注

本文所用符号

α = 地层因素等式中的常数

F = 地层因素

I = 电阻增大系数

m = 孔隙度指数

n = 含水饱和度指数

S_w = 含水饱和度，单位分数

R_o = 100% 含水地层的电阻率 $\Omega \cdot m$

R_w = 地层水电阻率 $\Omega \cdot m$

ϕ = 孔隙度，分数

Σ = 从测井曲线得到的中子俘获截面。C、U (俘获单位)

Σ_{hy} = 碳氢化合物的中子俘获截面 C、U

Σ_{ma} = 岩石骨架的中子俘获截面 C、U

Σ_w = 地层水的中子俘获截面 C、U

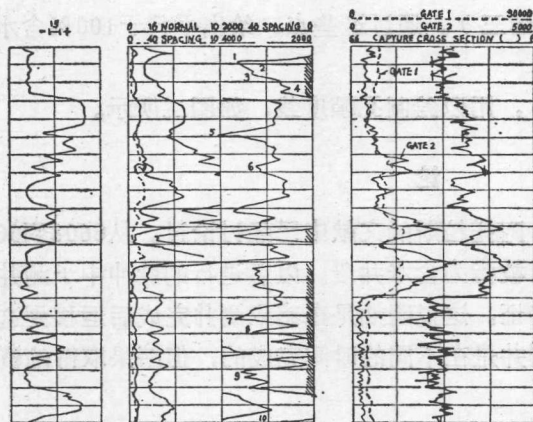


图1 Guif Coast井的感应电测井和脉冲中子测井曲线

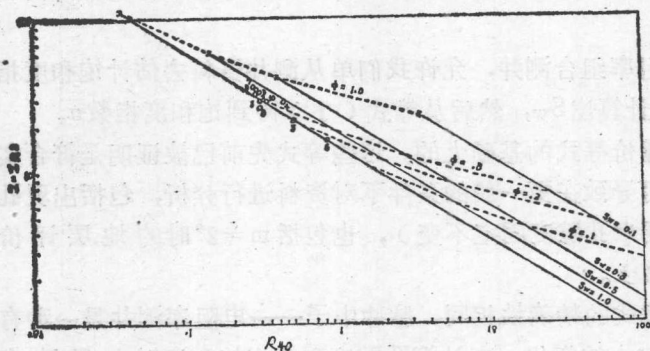


图2 R_{40} 与 Σ_m 对于不同的含水饱和度和孔隙度的关系图

表 1: 图 1 中含水井段的数字化数值

井 段	Σ	C40in	R40in	$\Sigma - \Sigma_{ma}$
1	40	3.600	0.28	32
2	37	3.300	0.30	29
3	40	3.400	0.29	32
4	36	2.600	0.38	28
5	30	2.000	0.50	22
6	24	1.200	0.83	16
7	44	3.700	0.27	36
8	36	3.300	0.30	26
9	42	3.500	0.29	34
10	37	3.000	0.33	29

表 2: 绘制图 2 中含水饱和度直线的数值

S_w	I^*	B^{**}	$I(aR_w)$
1.00	1.00	107.00	0.035
0.50	4.00	60.50	0.14
0.30	11.11	41.90	0.39
0.10	100.00	23.30	3.50
*假设 $n = 2.0$			
**假设 $\Sigma hy = 22$			

表 3: 绘制图 2 中孔隙度线的资料点

$\Sigma - \Sigma_{ma}$

S_w	$\Phi = 0.30$	$\Phi = 0.20$	$\Phi = 0.10$
1.00	32.10	21.40	10.70
0.50	18.15	12.10	6.05
0.30	12.57	8.38	4.19
0.10	6.99	4.66	2.33

确定残余油饱和度 的一种方法

翻译 薛 中

表 1 不同含水率下原油的相对渗透率

含水率 (%)	相对渗透率	含水率 (%)	相对渗透率
0.0	0.00	0.0	0.00
1.0	0.01	1.0	0.01
2.0	0.02	2.0	0.02
3.0	0.03	3.0	0.03
4.0	0.04	4.0	0.04
5.0	0.05	5.0	0.05
6.0	0.06	6.0	0.06
7.0	0.07	7.0	0.07
8.0	0.08	8.0	0.08
9.0	0.09	9.0	0.09
10.0	0.10	10.0	0.10

表 2 不同含水率下原油的相对渗透率

含水率 (%)	相对渗透率	含水率 (%)	相对渗透率
0.0	0.00	0.0	0.00
1.0	0.01	1.0	0.01
2.0	0.02	2.0	0.02
3.0	0.03	3.0	0.03
4.0	0.04	4.0	0.04
5.0	0.05	5.0	0.05
6.0	0.06	6.0	0.06
7.0	0.07	7.0	0.07
8.0	0.08	8.0	0.08
9.0	0.09	9.0	0.09
10.0	0.10	10.0	0.10

确定残余油饱和度 的一种方法

charles • M • Kidwell,

Abner J • Guillorg.

引

言

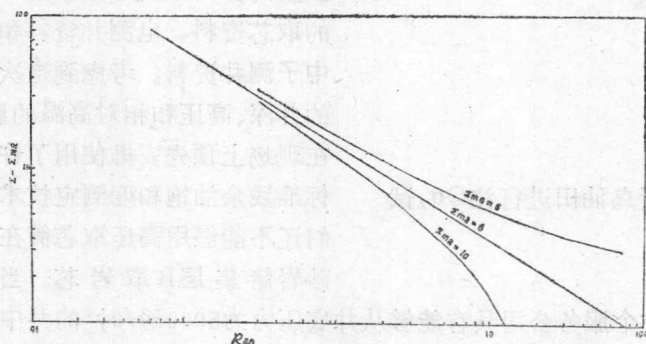
面临着石油价格的增长,三次采油技术正在变得更加具有经济吸引力。因为在评价任何一种三次采油计划的经济效益时,必须遵从有关残余油饱和度的数值,因此对于残余油饱和度的测量,就变得更加普遍。常规的测量残余油饱和度的工艺方法,在现场上将变得更加需要。无论如何,我们将论及这样一种细致的系统,以致设计其作业的细节,将显得非常繁杂。

在1978年,壳牌石油公司与美国DOE一起,在埋藏深、高湿、高压的美国海湾油田,进行了残余油饱和度的研究。该项工作,是在开始注 CO_2 的三次采油试验之前进行的。

在文集中讨论了作为主要方法被用来确定残余油饱和度的“测—注—测”作业的设计及结果。在试验井中,在井段3935~3938米之间,用几种独立的方法计算了残余油饱和度。总的来说,几种方法计算出的残余油饱和度的数值相互之间符合得较好,其数值一般在22~24%之间。

在测量残余油的井段,也测量出了自由气饱和度。该自由气饱和度的存在,可能是美国海湾油层的很好的典型,因为在那里,在三次采油开始的时候,地层压力是低于原始饱和压力的。作为一种结果,残余油饱和度的数值较在实验室内用“注水”方法或者逆流吸收试验法得到的数值要低。而且用裸眼井中电阻率和孔隙度测井曲线用传统的方法计算的残余油饱和度,可能是残余烃饱和度而不是残余油饱和度。

试验是在“S”砂岩储集层B(SRB)中进行的。“S”砂岩储集层B深3901米,是美国



(上接第5页)

图3 用试凑法来
估计 Σ_{ma}

伊布里帕林斯兰地区韦克斯岛油田的海湾油层。设计位置如图一。

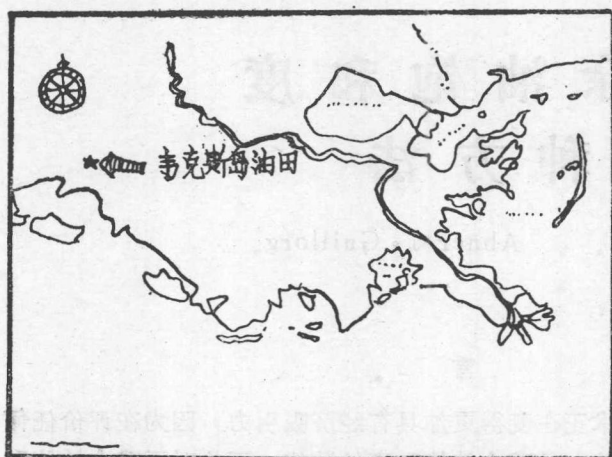


图1 一井位图

为了提高采油效果，作为评价潜在产量程序的一部分，于1977年11月在韦克斯岛打了一口井—S. S. U. well—17井。打该井的目的，是为了获得全部岩性资料，以及精确地测量水淹井段的残余油饱和度。需要精确测量残余油饱和度数值的理由有二：（1）核实残余油的数量以便更好的制定用 CO_2 进行驱替试验的工艺方法；（2）在用注 CO_2 驱替工艺采出的原油量的基础上对该工艺方法进行评价。well—17井有多种用途。除提供残余油饱和度资料之外，该井还是一口观察井，通过它我们可以监测水淹情况。该井最终将转入试验生产井。图二是该井的剖面图，上倾部位是注 CO_2 井，下倾部位是注水井。

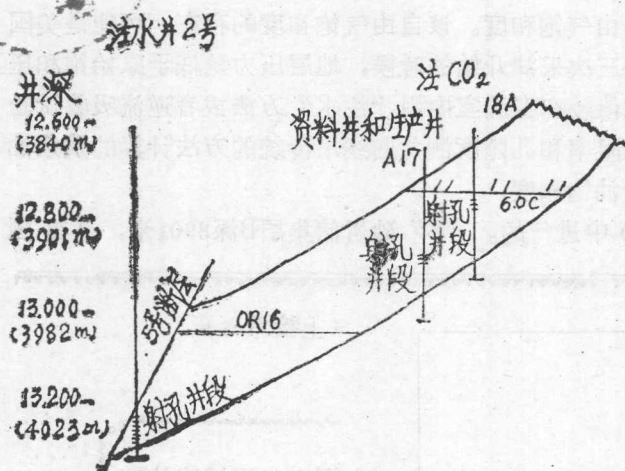


图2 “S”砂岩储集层B在韦克斯岛油田进行注 CO_2 试验的剖面图

初期，SRB包括有超过476700方原油的两个产油剖面。实际上所有这些都在试验地区内。在三次采油计划开始之前，“S”砂岩储集层B已被淡水水淹。仍保持产油的剖面厚度估计有7米。在我们打算要驱替的1110740方“S”砂岩储集层中至少也应有40996方的水驱残余油。如果在“S”砂岩储集B上所采取的工艺方法被证明是成功的话，则对韦克斯岛油田上其它的水淹油层，估计三次采油的潜在产量有4131400方。这些潜在产量可用注 CO_2 驱替的办法开采出来。

“S”砂岩储集层B是通过wellA—16A井在低压下开始生产的，直到1973年为止，那时，在下倾井wellG—2井开始注淡水，原始地层压力是5810磅/时²，估计目前约为5000磅/时²。

残余油饱和度是从三组相互独立的资料中推导出来的：常规的取芯资料、电测井资料和脉冲中子测井资料。考虑到这次试验的井深、高压和相对高温的影响，在现场上预先安排使用了许多种标准残余油饱和度测定技术。我们还不能够用高压取芯筒在“S”砂岩储集层B取岩芯。当时，

wellA—17井已在钻井，但没有一个服务公司具有能够从井底压力为5000磅/时²的井中安全地取得密封岩芯的取芯设备。“S”砂岩深度的井底温度（107℃）太高，以致不能使用已被证

实有效的确定残余油饱和度的测井技术，即：不管是核磁测井还是单井尔踪试验，都不能使用。

虽然现场试验将被作为一个事例来说明，但本文的主要目的，是要将那些需要考虑的细节以及必须遵守的操作技术文件化。以便成功地贯彻执行这样的操作。任何三次采油计划的成功或失败，都依赖于很窄的饱和度范围，所以用最小的可能误差限来执行确定残余油饱和度的工作，这是非常重要的。为了成功地完成残余油的测量，壳牌石油公司作业部和研究中心，需要详细的月计划和准备工作，由于工作的特殊性，因此需要花费很多的作业时间。当三次采油的指标变得更加吸引人时，这种设计的形式，将会变得更加普遍。因此，及时地提供指导，以便使这种程序能以一种较为常规的方式被重复执行将是很必要的。

试验程序的描述

A—17井设计在沿A—16井下倾方向的构造位置上。表层套管下至762米。在钻开“S”砂岩之前，泥浆被转换为专门设计的取芯泥浆（在后面将对该泥浆系统进行讨论）。在“S”砂岩取到了有关的普通岩芯21.6米。该井钻至井深4005米，并进行了测井。测井内容及顺序为：双感应、声波、密度、补偿中子、邻近微测井和地层倾角测井，并进行了井壁取芯。在1977年11月下37”套管，套管下入深度为4005米。为了用“测—注—测”的办法确定残余油饱和度，在选定了3米井段之后，对该地层进行了射孔并对可动油进行了抽吸试验。但是，在抽吸试验之后进行的放射性示踪测井，表明管外存在串通井段。将串通井段封接后，又选择了另一井段，重复上述工艺程序，以选择满足“测—注—测”作业要求的井段。

选择这种井段的条件如下：

1. 地层内应该有残余油饱和度分布；
2. 目的层位应该有岩芯资料可利用；
3. 作业井段的岩性应当尽可能地均匀，要评价的地层最好是典型的砂岩地层。
4. 作业井段的井眼应该是规则的，对地层损坏及泥浆滤液的侵入都应该是最小的。
5. “测—注—测”井段周围围岩的孔隙度和渗透率都不应该比该井段的为高。
6. 有好的固井质量把地层与邻层较好的隔离开来。

在1978年完成了“测—注—测”作业。从那时起，该井已经被用来用过油管核测井仪器监测注入水前缘的运动。

泥浆系统的设计

对一个确定残余油的计划来说，在设计泥浆系统时要考虑的主要目标之一，就是要避免减低含油饱和度，使其不低于正常的水淹层的残余油饱和度。因此，主要应该强调使泥浆滤液及其对原油的冲洗作用减至最少。第二个标准寄希望于试图使泥浆的矿化度与地层水的矿化度相匹配，以探测可动油。

虽然所有的泥浆都会有浸入并对地层有所损害，但将这些影响减至最小是有可能的。用淡水和炔乙烷基纤维素—XC聚合物配制成一种特殊的泥浆系统，该聚合物可在没有有害的流变影响时控制失水量。添加的聚合物是为了增加泥浆的粘度。在泥浆中没有加入粘土。用钙质碳酸盐来增加泥浆的密度和保持适当的固相粒径分布。泥浆的比重保持在1.20~1.26克/厘米³之间，在整个取芯和测井作业过程中，以API为标准的泥浆失水量低于5 cm³。泥浆

的酸碱度保持在7.0~8.0之间,这样可以避免对原油的化学剥蚀。为防止电解质污染,要求将氯化物的含量增加至12000PPm。为了应用裸眼井测井资料探测可动油的存在,这样的矿化度是需要的。为把泥浆中固相颗粒的侵入以及地层液体的喷出损失维持在一个最小水平,对泥浆中的孔隙桥接物质进行了监测和保持。与壳牌石油公司研究中心的A·阿伯拉姆斯的讨论指出,孔隙桥接物质的最优粒径应该是接近孔隙喉道直径的三分之一。先前的取芯资料说明,“S”砂岩孔隙喉道直径的平均值为31微米。在泥浆系统中,固相颗粒径中值一直被仔细地监测到取芯和取芯作业的时间内。

通过避免采用表面活性剂,扩散剂或者其它能够增加原油流动的化学药品,把泥浆对原油的冲洗作用减至最小。羟乙烷基纤维素—XC系统,提供了没有稀释剂时流变影响的需要。在过去,一种化学性质简单的监胶/淀粉泥浆系统曾经被应用并取得了某些成绩,但是。预测的高的井底温度,使得不能应用这种泥浆系统。实验室的研究已经说明,含水相的PH值是影响原油移动的一个因素。“S”砂岩储集层B原始界面张力的测量结果表明,当PH值的变化范围在7到8之间时,在油/水分界面上产生的面张力最大。因此,为了将由于泥浆滤液浸入对原油的冲洗减至最小,泥浆系统的PH值被保持在这个范围内。

裸眼井测井资料对地层的评价

用常规裸眼井测井资料计算的结果指出,注入水留下的残余烃饱和度在 0.265 ± 0.03 和

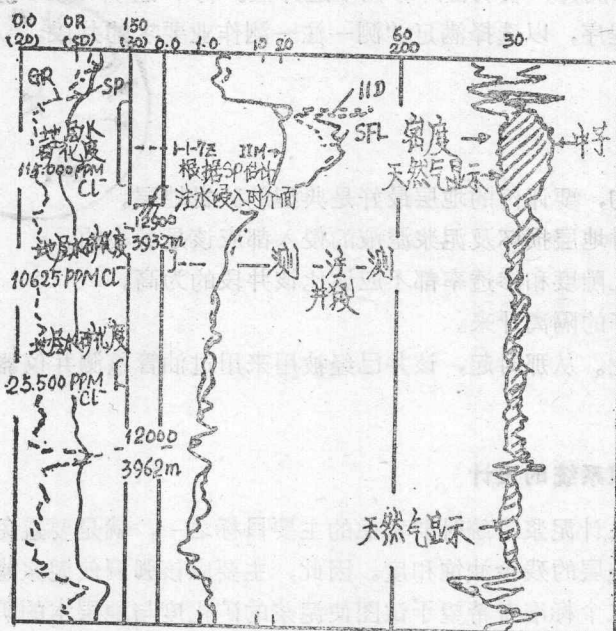


图3 A—17井的裸眼井测井曲线

化,在解释双感应测井资料(DIL™)时碰到了困难。

如从图三上能够看到的一样,通过砂岩井段的电阻率曲线是逐渐减小的。这就需要确定这种逐渐减小的电阻率是否是由于从顶部到底部的矿化度改变所引起的或者是由于含烃饱和度的变化所引起的或者是由于两种情况同时存在而引起的。自然电位曲线指出了当前的淡水浸入界面,但在浸入井段内没有显示出矿化度的改变。先前为了进行“测—注—测”作业,分

0.33 ± 0.04 之间。注意到这一点是很重要的,即指的是残余烃而不是残余油,从裸眼井密度—中子孔隙度测井曲线上注意到,自由气饱和度在5%~10%之间。在“测—注—测”井段用裸眼井测井资料计算的残余油饱和度,减去自由气饱和度之后为 0.24 ± 0.05 。水的矿化度在垂直方向上的变化,由于注入水强烈的反射,在这里显示的十分明显,清楚地证明了当井钻穿经历了二次采油的地层后,在评价电阻率测井曲线时所碰到的问题。

在裸眼井内测量了全套测井曲线。由于注入淡水(400ppm),引起的矿化度在垂直方向上的变化

别射开了两个井段并进行了抽吸试验。两个井段以每10呎小时1.6方的强度抽出了大约24方的地层水。从两个层位中都没有采出烃来，这两个层段是显示有残余烃存在条件的被注入水扫过油的层位。从“测—注—测”井段上部抽吸出的地层水含盐量接近18000ppmNace，与之相比，从下部井段抽出的地层水含盐量为58000ppmNace。这种矿化度的变化，是由于盐水的重力分异引起的，也是引起在测井曲线上看到的视电阻率变化的原因。

两个井段在钻井作业期间都进行了常规的岩芯录井，并对岩芯做了实验室加压分析。应用的岩石特征参数概括在表一中，地层水电阻率是从抽吸出来的水样中得到的。计算了井段3935~3938米和3950~3953米的含水饱和度，分别为 0.670 ± 0.04 和 $0.7350 \pm .03$ 。因此，在这种情况下， S_o 不仅仅是 $(1 - S_w)$ 。在井段3929米到3979米的地层中，密度测井和中子测井响应曲线，显示有逐渐减小的含气饱和度存在。（注意图三中密度—中子孔隙度测井曲线 FOC^{TM} 和 CNL^{TM} 的离差）应用这些密度和中子测井响应以及已出版的施伦贝谢测井公司解释图板，计算出的含气饱和度接近于10%。在套管井的地层评价测井程序部分也注意到了自由烃饱和度的异常显示。热中子衰减时间测井（ $TDT-K^{TM}$ ），虽然仅仅是定性的，但在向地层注入任何液体之前，也显示了覆盖同一井段的天然气的存在。向地层注入第一次“测—注—测”的液体之后，热中子衰减时间测井在整个注入井段没有含气饱和度存在的异常显示，但在其余的未注入井段，继续存在含天然气的异常显示。这样，就更坚信了开始对存在逐渐减少的含气相的解释。

在目的层段（3935米到3938米）以及（3950米到3953米）的含气饱和度，能够用密度测井响应方程和伴随而来的恒等式定量地计算出来：

$$\rho_b = \rho_{ma} - \phi (\rho_{ma} - \rho_f) \quad (1)$$

$$\rho_f = S_w \cdot \rho_w + S_o \cdot \rho_o + S_g \cdot \rho_g \quad (2)$$

以及：

$$1 = S_w + S_o + S_g \quad (3)$$

表 1—岩 性 平 均 参 数 的 摘 录

参 数 名 称	3934.8~3937.8米	3950~3953米
加压分析岩芯孔隙度	0.256	0.261
孔隙度胶结指数m	1.70	1.70
饱和度指数n	2.60	2.75
岩石骨架密度	2.644	2.645
空气渗透率d	3.10	3.95
阳离子交换能力毫克当量/毫升	0.062	0.019

在现场上，孔隙度 ϕ 是从岩芯的加压分析中得到的。从岩芯分析资料得到 ρ_{ma} ，从密度测井曲线的平均读数得到 ρ_b ，则 ρ_f 能够被确定。当 S_w 值先前已经用阿尔奇公式确定， ρ_w 、 ρ_o 以及 ρ_g 可从实验室的PVT资料得到或者从手册上查知时， S_o （在这种情况下就是 S_{or} ）

和 S_g 能够被计算出来。在先前提到的井段中,计算的 S_g 分别为 0.087 ± 0.032 和 0.068 ± 0.033 。

应该注意的是,对于 S_g 来说,这些赋值的不确定性是很小的。因此,在用测井资料计算 S_o 值时,所引用数值的不确定性也是很小的。

岩芯资料分析

测一注一测井段的残余油饱和度也用常规的岩芯分析资料进行了测量。它之所以进行了常规的取芯,是因为当时没有能够在最高压力为347个大气压力的储集层中,安全地进行取芯的高压取芯设施。

用汀斯塔克抽提法从“测一注一测”井段的岩芯中得到了含液体饱和度的测量结果。从“测一注一测”井段的岩芯分析中得到的残余油饱和度的平均值进行了现场条件的校正之后,是 0.23 ± 0.04 。

表二: 岩芯分析测量的含油饱和度

深度 a (英尺)	ϕ_b	ϕ_c	S_o^d	S_{or}^e
12910	0.264		0.166	0.272
12911	0.266	0.256	0.136	0.222
12912	0.269		0.117	0.19
12913	0.261	0.248	0.172	0.282
12914	0.265		0.174	0.285
12915	0.267		0.166	0.272
12916	0.274	0.246	0.117	0.191
12917	0.268		0.124	0.203
12918	0.253	0.243	0.232	0.380
12919	0.270		0.122	0.199
12920	0.269		0.115	0.188

a: 对1978年元月1日所测的双感应测井曲线进行校正后的数据。

b: 非加压岩芯分析结果。

c: 加恒压7800磅/时²时岩芯分析结果。

d: 用储油箱中密度为0.862克/厘米³的原油经过校正后的实验室测量的结果。

e: 校正到现场条件下的数值。

从岩芯资料分析得到的真实的含油饱和度,是用以下的公式校正到现场条件下的。

$$S_{or} = S_{or,cor} \cdot \frac{\phi}{\phi_s} \cdot \frac{1 - \phi_s}{1 - \phi_1} \cdot B_o \quad (4)$$

由于泥浆滤液浸入形式的粘度剥蚀作用以及当岩芯从井下取到地面后由于气体体积膨胀

引起原油从岩芯中被排出的影响,使得用公式(4)算出的残余油饱和度的数值一般地小于或者等于现场条件下的数值。无论如何,在韦克斯岛取芯的条件下,这些影响因素被减至最小或者全部消除。特别设计的泥浆使得泥浆的失水量及地层的喷出损失减至最小。不如从岩芯分析资料中所看到的一样,岩石的渗透率非常高。对于含水饱和度高的、高渗透性的均匀岩石,从常规的取芯资料或橡胶套筒取芯资料测量的残余油饱和度,其结果能够较好地逼近现场上的条件。气体能在低得不能使储集层中的油流动的压力差的作用下,从高渗透性岩层中排出。温伯兰特对比了对高渗透率($>600\text{md}$)高孔隙度($>29\%$)的岩石用常规的取芯资料 and 高压取芯资料确定的残余油饱和度,其结果,两者符合的相当好。我们当然不主张用常规的取芯资料确定残余油,但是,可以看出,至少在渗透率很高的岩石中,当岩芯被取至地面时,由于气体的膨胀,而使残余油从岩芯中排出,其量较少。

应用岩芯资料的其它两种技术——逆流吸收(CCI)和介面相对渗透率试验法,也被用以确定在取芯井段的残余油饱和度分布范围。用这两种间接的方法试图去模拟现场条件。两种方法都假设岩石是100%水湿的,因为,用去油后的岩芯,我们可以迫使其水湿,用逆流吸收资料确定的平均残余油饱和度是0.293。这个数值一般地对于100%水湿的岩石在水淹的条件下被定为最大值。在“S”沙岩储集层B的条件下,这个数值应该等于或小于用裸眼井测井资料计算的总的含烃饱和度,这是由于有自由气饱和度存在的缘故。用介面相对渗透率试验法确定的平均残余油饱和度是0.232。这种试验是在7800磅/呎²的压力下,以及盐水与现场情况相匹配的条件下进行的。用岩芯资料确定的测井解释所需要的岩石参数,概括在表一中。请注意特别高的饱和度指数值(n)。对于不同的岩芯样品,在排放和吸收周期中,反复地进行了试验,取得了一致的结果。

用“测—注—测”确定残余油饱和度

测—注—测作为一种确定残余油的方法,已经在文献中被很好地文件化了。但是,正确地执行这种方法的现场作业,是非常繁琐和包括非常彻底的工程效果的。

脉冲中子测井的响应方程,由以下公式给出:

$$\Sigma_L = (1 - \phi) \Sigma_m + \phi S_w \Sigma_w + \phi (1 - S_w) \Sigma_o + \Delta \quad (5)$$

如果两次测井是在已知的两种有明显差别的水的矿化度(液体A和液体B)的情况下进行的,第一次脉冲中子测井响应与后一次测井响应对比,在假定扩散效应,孔隙度和含水饱和度保持为常数,并且 Σ_L 是在中子脉冲之后足够长的时间以后测量的,则:

$$\Sigma_{LA} - \Sigma_{LB} = \phi S_w (\Sigma_{wA} - \Sigma_{wB}) \quad (6)$$

或者:

$$\phi S_w = \frac{\Sigma_{LA} - \Sigma_{LB}}{\Sigma_{wA} - \Sigma_{wB}} \quad (7)$$

对于短源距的PNL测井设备,由于 Δ 不是常数,故公式(6)(7)不总是有效的。罗宾逊证明了这样一点:如果仪器的源距是60公分或者更长一些,则经过几个衰减时间之后, Δ 将趋近于一常数值,斯伦贝谢公司为了进行测—注—测作业,制造了一种这样的仪器。改进后的仪器是具有TDT—G电子设备的TDT—K下井仪器。由于大的源距,需要减少统计超误差以达到测井读数的稳定性。该仪器的结构是这样的:伽玛射线随着每240微秒14Mev的脉冲中子之后,能够被一种有256个通道窗宽为20微秒的渡越时间分析器所收集。

为了精确计算热中子在 2.5 和 5.0τ 之间衰减曲线的斜率,以及确保在这两点之间曲线的斜率是直线性的,该渡越时间分析器是必须的。数据须对本底及脉冲宽度进行校正。 τ 值是这样计算的:斜率/ $L_n 2 = \tau$, (微秒) = $4550/\Sigma$ (俘获单位)。图4是用一个测量点的资料绘制的曲线图,它图解了热中子衰减计数率曲线在 2.5 和 5.0τ 之间的线性部分。

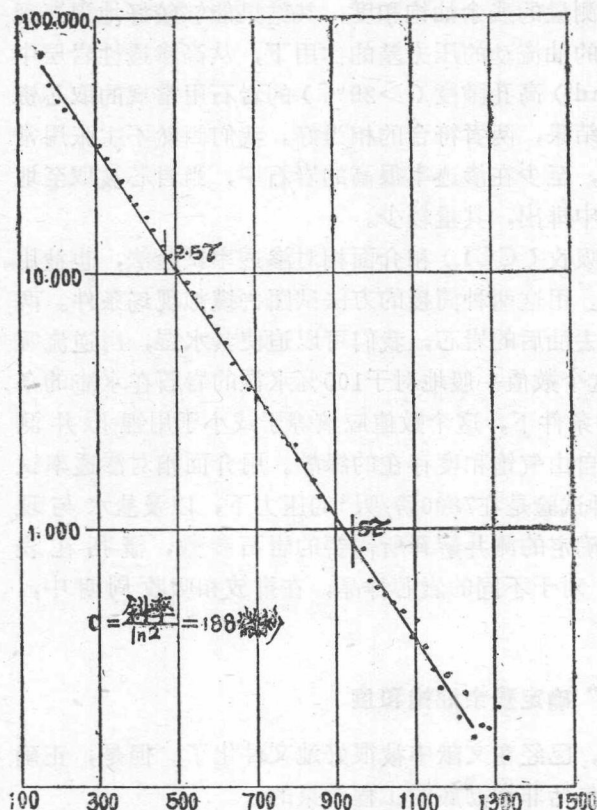


图4 热中子衰减计数率随时间变化关系图

于粘滞剥离速度。

4.在DNL探测范围以内的岩石体积中,假定每次注入阶段都是完全的液体驱替。对于完全置换井筒液体的适当的注入体积,是建立在假设对于射孔是 0° 相位的数字模拟程序上的。已知孔隙度数值,并且在每只射开一孔或不超过四孔的基础上进行计算。

5.孔隙度是已知的。孔隙度是通过对岩芯加压分析得到的最精确的数值;无论如何,适当地用以刻度孔隙度测井曲线是充分的。用公式(7)进行残余油饱和度计算时,对孔隙度的误差是极敏感的,在本例中,对于每1%的孔隙度误差大约可以导致3%的饱和度误差。

方法步骤

图五简略地绘出了现场作业时设备的外形。

64方盛注入液的容器在作业开始之前用蒸汽清洗干净,为了防止污染,其表面是用淡水冲洗过的。用孔径为5微米的过滤器除粒径较大的固体颗粒,以防止其堵塞污染孔隙空间。所有的注入液全部用氧清净剂进行了处理,以防止产生氢氧化铁沉淀。应当留心,保证清净剂中

Σ_{wA} 和 Σ_{wB} 能够很好的用保留的注入水样在实验中测量得到。实验室中测量的俘获截面要经过温度和压力的校正,使其与井下条件相匹配。

本着测—注—测方法计算 S_{or} 的能力,我们假定如下几点:

1. $S_{or} = (1 - S_w)$ 。正如先前提到的一样,用裸眼井测井资料测量出了自由气饱和度,因此 S_{or} 并不等于 $(1 - S_w)$ 。为确保自由气的完全溶解,在测—注—测作业开始之前,通过射开井段向地层泵入 32米^3 的欠饱和盐水。

2.在第一次稳定测量时,原油中的全部溶解气被剥离掉,由此而产生的原油的体积缩减系数是已知的。

3.在注入期间没有原油被剥离。在高的注入速度下,可能发生残余油的粘滞剥离现象。应用何伯兰姆公式计算的结果指出,以每小时向10呎厚的地层注入 1.6米^3 的注入强度,对于原油和所涉及的油层类型是较好的低

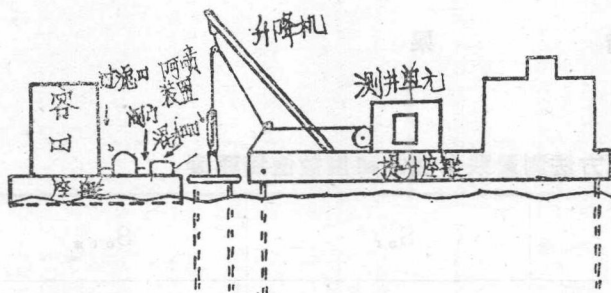
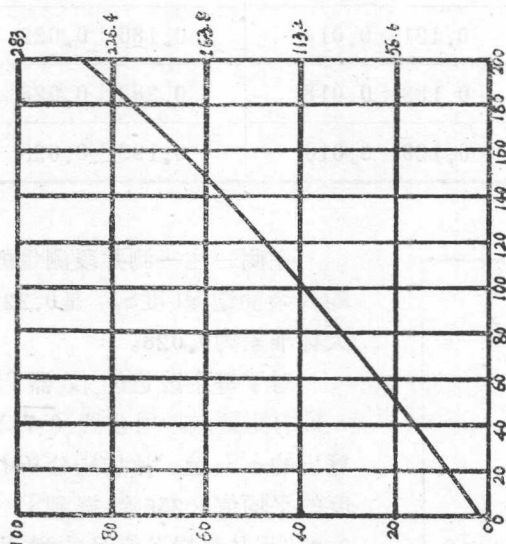


图5 在现场上“测—注—测”所用设备的侧视图



氯化钠溶液 (ppm × 1600) 75°F (23.89°)
图6 在75°F (23.9°C) 时每立方米水中应加入的氯化钠量与氯化钠溶液之间的关系

不要含有影响岩石俘获截面或对原油有化学冲洗作用的原素。在整个注入期间，每注入1.6方的注入液要取8公斤的液样做俘获截面的测量，并要保证注入液的均匀性。同一个储水容器混合盐水，以确保盐水的均匀性及混合速度。图六描述了为达到设计浓度所需要食盐数量的计算方法。

测—注—测的实际作业步骤如下所述：

1. 在目的层极测量基线，基线包括重复测量的5条用TDT—K测量的曲线和5条有稳定读数的用改进后的仪器测量的曲线。测量井段为3935~3938米；

2. 射开测—注—测井段 (3935~3938)；

3. 注入32方盐水A (30000PPm NaCl) 以排除自由气饱和度；

4. 继续注入24方的盐水A；

5. 在测—注—测井段用TDT—K进行5次连续测量，用改进后的TDT—K仪器重复测量在步骤1里描述过的相同的5条稳定读数曲线；

6. 注入43方盐水B (150000PPm NaCl)；

7. 重复步骤5。

为得到稳定的读数，仪器在每个位置需要停留的时间是在每个位置上所测量的 τ 值的基础上计算的。这种典型的测量在30和45分钟之间，对于高的 τ 值，要用更长的时间。在每个位置上停留的时间要足够长，这样可使得在计数率中的统计起伏变化变得在计算 S_{or} 时产生的总误差中没有意义。电缆要用涂料做上记号，以保证对于每个注液井段在每个测量点都能在相同的位置上进行测量。在测井作业结束时，要记录上标志，以便在 τ 的计算中对死时间的校正能够被算出。图七是在每次注入之后，来自连续测量的TDT—K读数的平均曲线的概略图。这些曲线没有进行扩散效应校正，但给出了扩散效应对每次注入后测量的 τ 值影响的概念。