

油气勘探专题资料之五

任丘油田测井 评价报告

石油部科学技术情报研究所

目 录

引 言	(1)
一、概述	(1)
二、裂缝性油藏	(2)
三、任丘油田	(4)
测井解释	(7)
一、探测裂缝	(7)
二、格罗巴尔解释方法	(10)
三、岩性解释	(12)
四、确定孔隙度	(17)
五、确定饱和度	(18)
六、地震测井的应用	(19)
结 果	(20)
结 论	(23)
附 录	(23)
参考文献	(24)

任丘油田测井评价报告

陈英豪 译

谭廷栋 邱玉春 校

引 言

一、概 述

1980年,斯仑贝谢公司在中国开始电缆测井。第一个作业区集中在任丘油田——中国的高产油田之一(图1)。在二叠纪和奥陶纪期间沉降的古老的碳酸盐岩地层中,由于大范围的风化和断裂作用,形成了适宜的油藏。在偶尔含有石灰石和燧石的这些低孔隙度的硬白云岩地层中,裂缝系统对原油采出起着主导的作用。

以下各节叙述任丘油田电缆测井的评价:介绍裂缝性油藏的基本特征,并与普通油藏进行比较;详细地描述适用于任丘油田特殊性质的解释方法。特别是,推导了双侧向测井裂缝

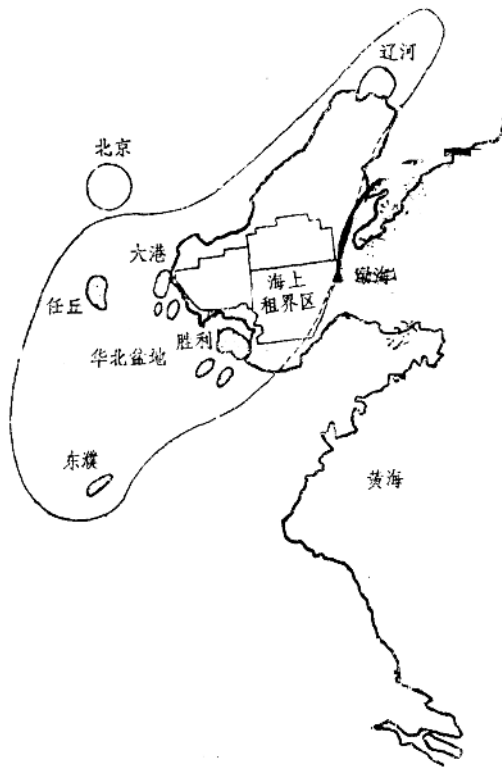


图1 任丘油田地理位置

孔隙度指数。在含复杂矿物的情况下,曾经采用格罗巴尔(GLOBAL)解释方法来判别岩性和求孔隙度。

本文还阐述新的电导率异常检测程序 (DCA) 与老的裂缝识别测井程序 (FIL) 并用来探测裂缝。绘出了裂缝的方位和走向。根据新型测井仪器, 如自然伽马能谱测井仪 (NGT)、电磁波传播测井仪 (EPT) 和次生伽马能谱测井仪 (GST) 所得到的资料, 讨论了铀的存在和燧石条带等一些特殊的问题。阐述了用相测井程序由电缆测井曲线判别岩相的方法。

文中附有实例成果图, 与岩心分析结果并列。利用每层的平均孔隙度资料, 讨论了油藏孔隙度的分布。

二、裂 缝 性 油 藏

与普通油藏不同, 裂缝性油藏具有交错切割原生岩石基块的裂缝网络。这样的油藏可以看作是双重孔隙度系统。生产特性取决于裂缝和基块强烈变化的特征。

下面研究如图2所示的模型。

在普通油藏中, 流体是通过孔隙运移到井内, 因而为获得高产必须有高的渗透率或高的压力降。在低渗透率的油藏中, 生产指数通常在 5 脱气原油桶/天/磅/英寸² (STB/D/psi) 以内。

然而, 在典型的裂缝性油藏中, 发育的裂缝系统大大地扩大了井的供油面积。流体容易从低渗透率的基块短距离运移到裂缝, 并通过裂缝到井内。因此, 基块和裂缝系统的储藏量是很重要的参数。在基块渗透率相同的裂缝性油藏中, 生产指数一般大于 10 STB/D/psi, 通常达到 100 STB/D/psi 或更高。这反映出裂缝性油藏与普通油藏具有同样的生产率, 但压力降不同 (见图3)。

裂缝性油藏压力下降的速度比普通油藏低得多, 这是由于油藏上部的气顶地层所致。溶解的天然气的释放后很容易沿裂缝系统上升, 这有助于保持气顶的压力。这种有效的动态把裂缝性油藏的生产特性提高到这样一个水平, 即相当于普通油藏把产出的天然气再注入到油藏中去。

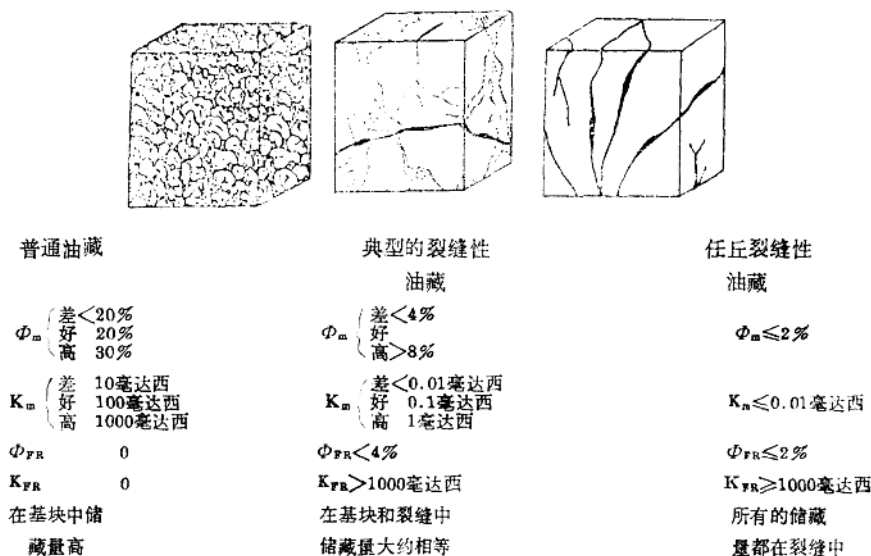


图 2

天然气通过裂缝向气顶运移的另一个结果是改变气—油的产量。图4和图5所示的普通油藏和裂缝性油藏典型的压力曲线和油气比 (GOR) 曲线。

裂缝性油藏可能以很高的初始产量生产储藏在裂缝中的流体。持续高产取决于油从低渗透率的基块向裂缝渗流的速率。如果在基块中储藏的油很少或没有，或者基块渗透率很低，那么在裂缝中就不可能产油，产量将会下降。

当基块有很大的储藏量时，流体置换的机理控制着生产因素。一般来说，这些因素与流体密度、毛细管压力、吸收率和基块平均尺寸有关。这些都是决定临界产量的要素。如果油井产量高于临界产量，含水量会突然地从0增加到100%。

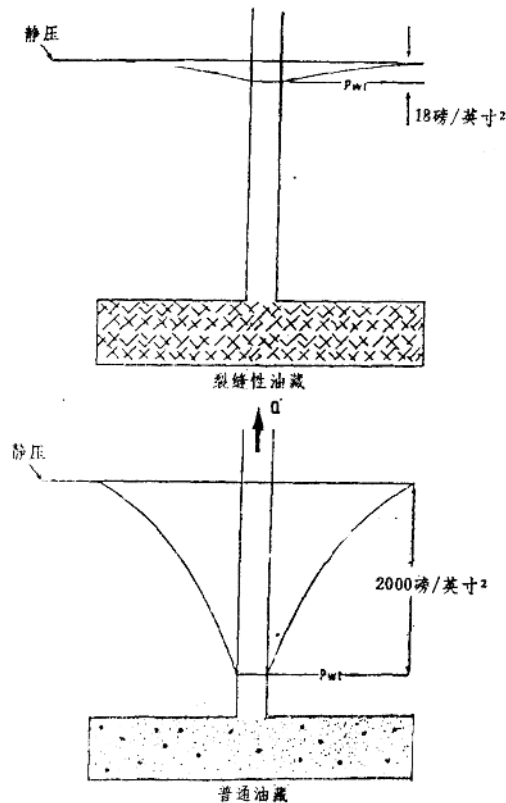


图3 在产量相等时典型的裂缝性油藏与普通油藏压力降的比较

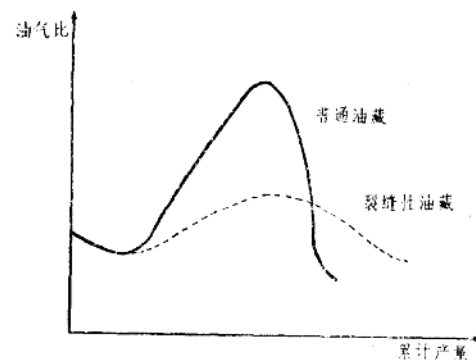


图4 普通油藏和裂缝性油藏油气曲线

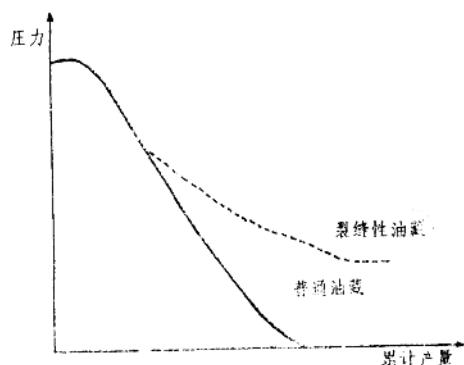


图5 普通油藏和裂缝性油藏压力曲线

在普通油藏中，油井见水和含水量受置换过程及水锥等其他影响因素的控制。图6是裂缝性油藏与普通油藏含水量的比较。

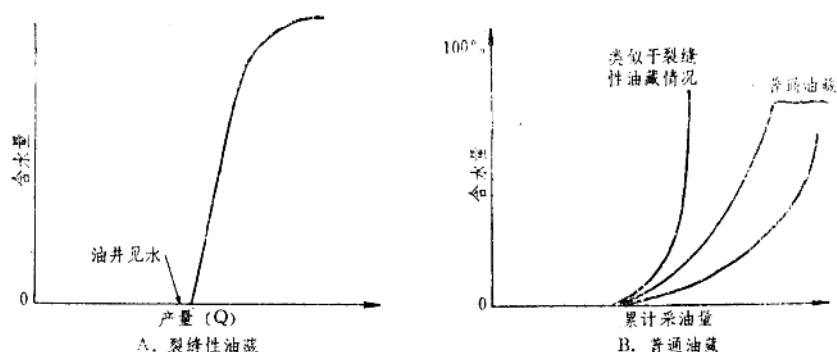


图6 裂缝性油藏与普通油藏的含水量

三、任丘油田

在许多裂缝性油藏中，储藏在基块中的石油形成大量的储量。然而在任丘，基块的孔隙度和渗透率极低。岩心资料和一般的油田经验表明，裂缝的储藏量比基块可采的石油更有意义。

在一个典型的裂缝性油藏中，它的生产能力取决于裂缝的特征，而不取决于基块的性质。这个特征是重要的。为了计算地层的净采油量，要求输入裂缝孔隙度、裂缝系统的含油饱和度和油藏体积参数。为了实际完井，还必须找出裂缝带位置。

图7、8、9、10是用紫外线光拍摄的岩心截面照片。沿裂缝线清楚地看出与重质油有关的黄色荧光，但在基块中却没有。图7、8示出了相当于溶洞或溶孔的蓝色区；图9示出了已形成晶体的裂缝，用专用的滤光器来突出晶体。图10示出了一个交错的裂缝网络。整段岩心分析给出的孔隙度值低至 $0.3p.u.$ （孔隙度单位），但一般都在 $0 \sim 3p.u.$ 范围内。

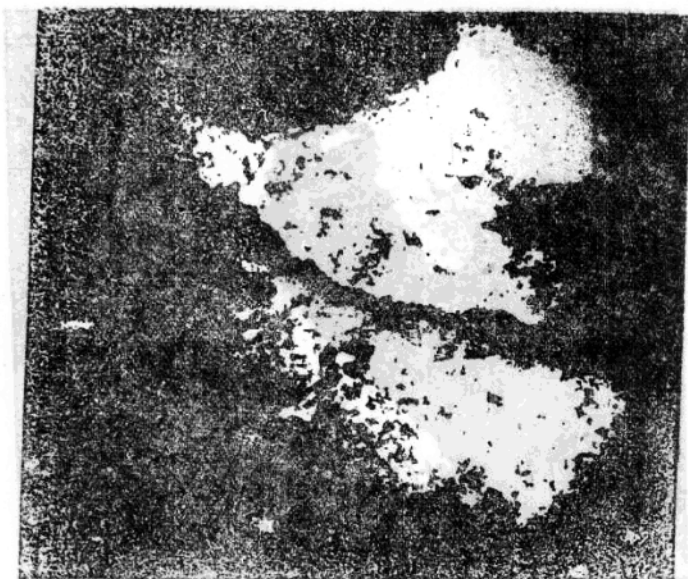


图 7

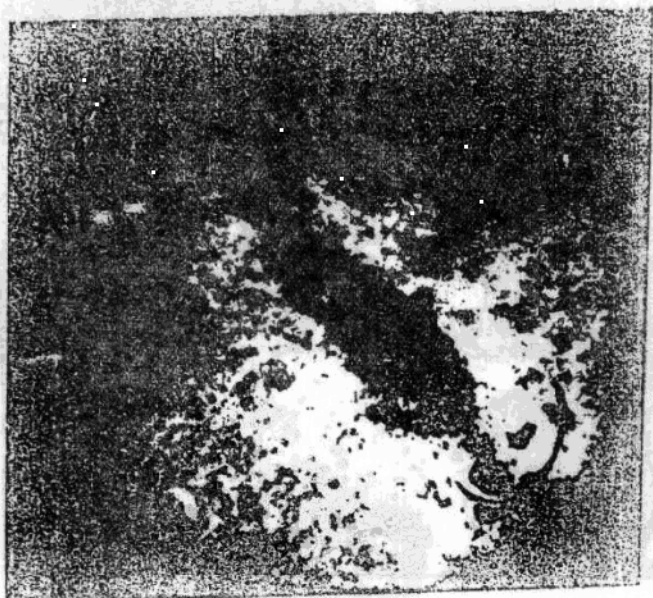


图 8

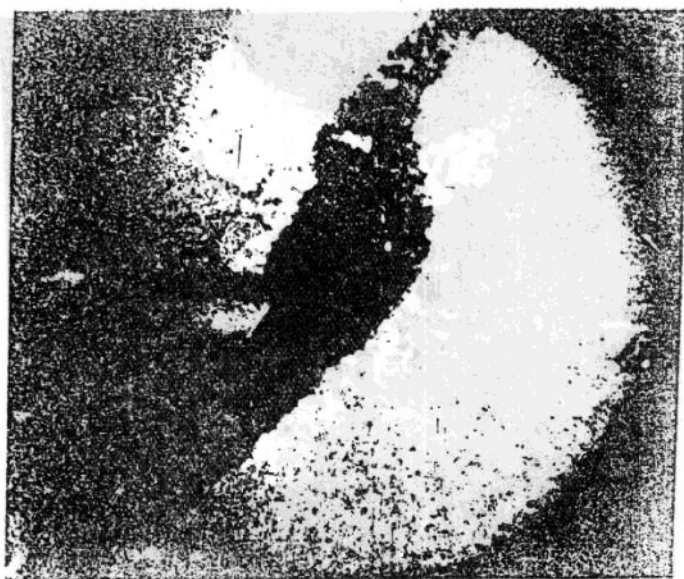


图 9

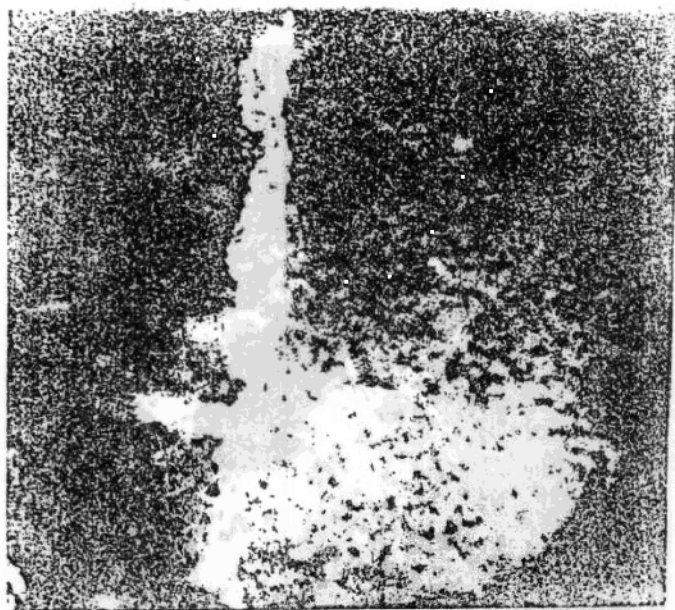


图 10

图11所示为裂缝性碳酸盐岩井下电视测井图。在上部一排,可以看出垂直裂缝。在第二排,倾斜裂缝穿过井眼,在这些360°的截面上呈弯曲状。在A处,计算出裂缝倾角为 $86^{\circ}27'$ 。在下面一排,B处和C处的显示与电测曲线相似,但在B处,井下电视显示为井眼垮塌,发现井漏,表示这里是裂缝带。在C处,缝洞被泥浆固体所填充,故图上无显示。

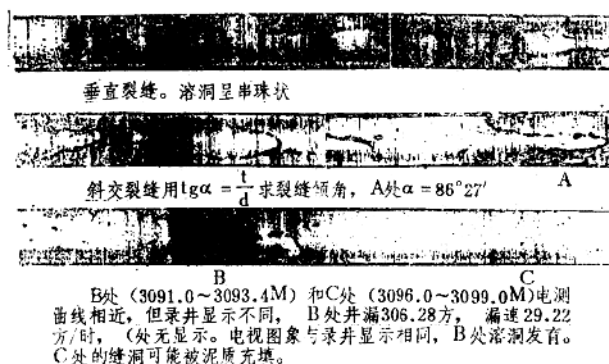


图11 雁5井声波电视测井图例(深度比例1:50)

测井解释

解释任务可以分为总的四个方面:探测裂缝,岩性解释,确定孔隙度和含油饱和度。下面叙述每种情况所应用的技术,并对格罗巴尔解释程序作一般的讨论。还阐明了数据处理的一些新进展以及地震测井的新发展。

由斯仑贝谢公司测过的井列在附录中。采用以下标准测井系列:

- 双侧向测井 (DLL)
- 微球形聚焦电阻率测井 (MSFL)
- 岩性密度测井 (LDT)
- 补偿中子测井 (CNL)
- 自然伽马测井 (GR)
- 井眼补偿声波测井 (BHC)
- 高分辨率地层倾角测井 (HDT)
- 重复式地层测试器 (RFT)

一、探测裂缝

裂缝以它特有的方式影响许多测井仪器。不同的电阻率测井仪器,在对着裂缝带时读出的差异增大,利用它来求出裂缝孔隙度指数(见后)。核测井仪器受裂缝附加孔隙度的影响。裂缝被泥浆填充,往往使密度曲线出现高的校正值,这可以作为有用的裂缝指示。单臂井径仪可测量由于岩石松软而造成的扩径和井眼不规则。 P_c 曲线显示的大尖峰,往往表示为重晶石泥浆进入裂缝。声波测井的周波跳跃,则往往是由于在裂缝带中声波信号因反射和折射而减弱所致。在变密度测井图上,可以观察到扰乱波(V形波)。根据异常高的自然伽马读数或自然伽马能谱测井的铀曲线,可以探测裂缝中的铀盐沉积。生产测井如井温测量和流量测量,尤其是结合注入测试,可以提供裂缝带生产能力的直接证据。

在任丘油田,确定裂缝带位置,一般采用裂缝识别测井(FIL)。裂缝识别测井成果图

显示出四对重叠的地层倾角曲线：1-2、3-4、2-3、4-1与井斜，1号极板方位和两条井径曲线。这些曲线读出的基块电阻率一般为高值。当一个极板通过裂缝时，在裂缝中的泥浆引起电导率异常，显示为尖峰或曲线幅度有差异。尖峰的频率是裂缝密度的指示。井眼截面呈椭圆形和仪器旋转的非周期性也是裂缝及其方位的证据。当与双侧向测井的裂缝孔隙度指数组合时，就很容易选定需要完井的层位。

最近研究出一种先进的裂缝探测程序。裂缝识别测井不容易区分由于裂缝引起的电导率异常和由于薄层或其他沉积特征引起的假异常。这种称为电导率异常检测（DCA）的新程序是利用地质倾角（Geodip）程序的输出成果图。Geodip 利用图形识别来寻找每条曲线上的沉积特征，并计算地层倾角。DCA 着眼于发现非相关的地层并检测任何电导率异常。它能有效地从裂缝识别测井显示中消除由地层的层理等引起的假的电导率异常。为了给出深度和方位的信息，将每个极板的方位相对于深度与对应的 DCA 电导率异常重叠显示出来。在第一道，1号极板与2号极板的方位加上井径与钻头直径的差值，表明井眼呈椭圆形。图12是任28井的 DCA 例子。

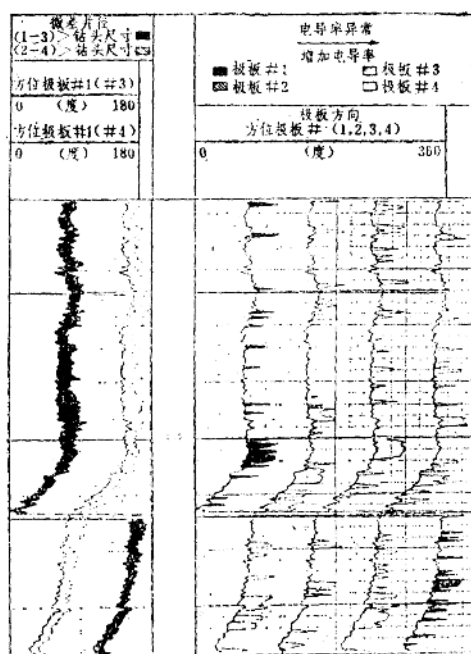


图12 任28井 DCA 实例

然后，由程序汇编的统计数据产生指示仪器方位的极性频率图、电导率异常频率图和加权电导率异常图。加权电导率异常图由前两种图得来的，以便减小仪器旋转的影响。

从任28井、任204井、任810井和任813井得到的极性图绘在任丘油田局部示意图上。电导率异常极性图（图13）表明，在任204井、任28井和任810井之间有类似的相关性，即几乎与东西方向断层平行。图14表示测井仪器方位。每张图有四重对称性，相当于4个地层倾角极板。任204井和任810井有一个十字图形，指示测井仪器几乎不旋转。在任28井中，测井仪器经常旋转，但择优取向与任204井和任810井的类似。在任813井中，测井仪器也旋转。如图15所示，加权电导率异常减小了仪器旋转的影响，指示出一些有意义的走向。任204井示出明显的

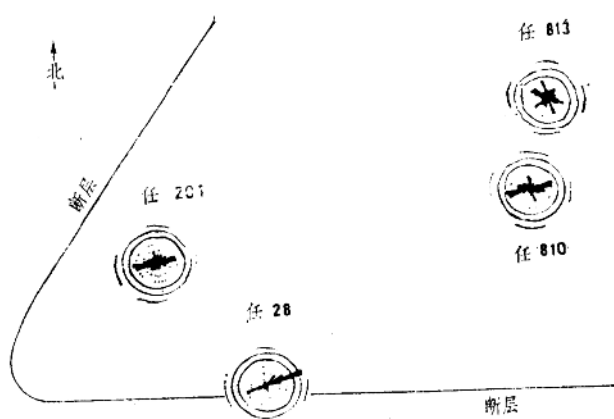


图13 电导率异常

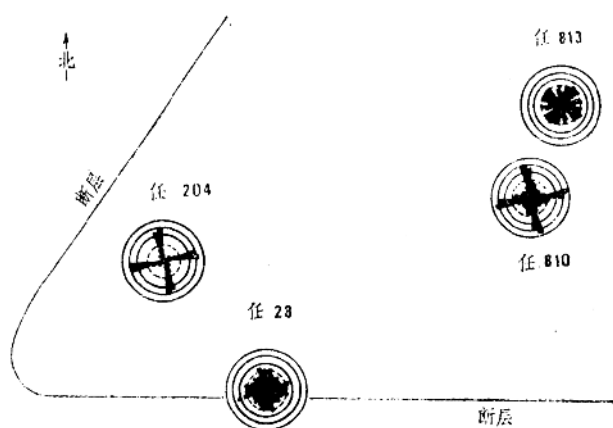


图14 测井仪器方法

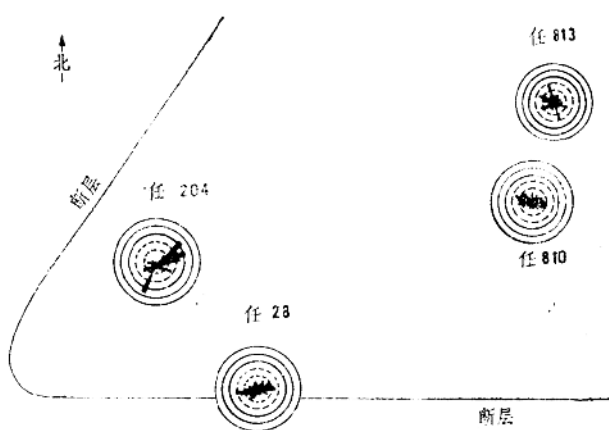


图15 加权电导率异常

走向，它与附近的北—东断层平行。任28井示出测井仪器方位与附近的东—西断层平行，这与世界范围观察的裂缝通常平行于断层的情况一致。任810井表明一般的走向在 $110^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 范围内，这也许与东—西断层有关。任813井有三个主要走向，分别为 $110^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 、 $160^{\circ}\sim 170^{\circ}$ 和 240° 。这些走向可能是由于局部褶皱产生剪切应力而形成的裂缝或者由于钻井形成的裂缝。

DCA 极性频率图还有助于识别断层类型。已经观察到两种特征图形：只有一个断层面，相当于张力断层；或者是两个大约相隔 60° 的断层面，它与剪切断裂有关。当绘制区域构造图时，能够识别所有的构造应力图形以及由于褶皱产生的局部裂缝。

高分辨地层倾角测井仪（SHDT）的引用能进一步改善 DCA 的结果。在每个极板上装有两个小圆形的钮扣电极，以代替宽的矩形电极，这样更容易探测电导率异常。一个钮扣电极通过充满泥浆的裂缝，与旁边的钮扣电极测量的信号作比较，就可以探测出电导率异常。

如果裂缝是接近垂直的，那么第二个钮扣电极穿过它的路径几英寸以后，就可以算出裂缝的倾角（图16）。借助于钮扣电极与钮扣电极的对比（亦称边与边之对比）和极板与极板的对比，可以减小井眼的影响，从而得到更优的数据。用这种改进了的数据获取的方法，可以得出更高质量的正常点阵（CLUSTER）结果，并且更容易识别构造的细节。也可以用立体网格图来识别构造倾角和裂缝面的倾角与方位。

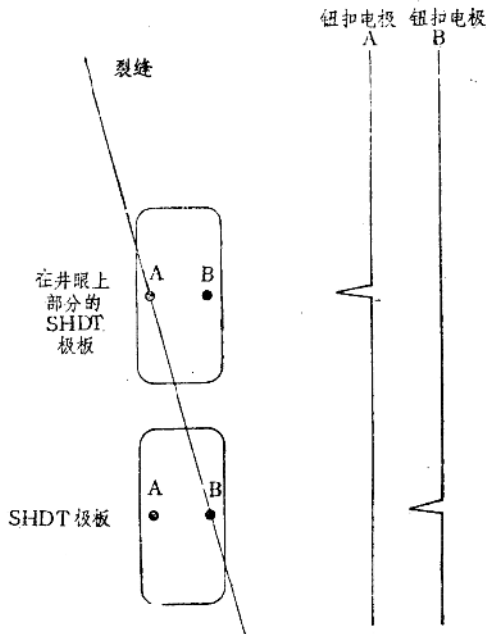


图16

二、格罗巴尔解释方法

传统的测井评价程序是根据测井读数，使用一组固定的转换关系式来计算油层的未知物理参数。在格罗巴尔解释方法中，则使用所有有用的信息（包括岩心资料），按一致的方式，由一组给定的输入参数导出最可能的结果。该方法包括对一组结果参数（诸如 ϕ_e 、 S_w 、 V_{cl} ……）的初步直观估计。然后，程序使用一组响应方程计算出理论测井曲线，这一组响应方程是建立在测井仪器的物理原理、实验测量以及与岩心测量数据相对比的基础上的。运用

最小二乘法, 使重新计算的测井值与原始的测井值之间的差值极小化。

一组约束条件(由地质报告、岩心分析和地区知识得来的有用数据的数学表达式)提供一个框架, 在这个范围内获得的结果在地质上是相关的。

上述理论可用下面的例子加以说明:

现有的数据

$a = (a_1, a_2, a_3 \dots a_n)$ 例: $(\rho_b, \phi_N, \Delta t, GR, P_c)$

测井的不定性

例: $\sigma_{\rho_b}, \sigma_{\rho_N}$

期望的结果

$X = (X_1, X_2, X_3 \dots X_n)$ 例: $(\phi, V_{Cl}, S_w, \dots)$

测井仪器响应

$a_i = f_i(X)$ 例: $\rho_b = \phi S_{xo} R_{mt} + \phi(1 - S_{xo}) \rho_h + (1 - \phi) \rho_{ma}$

方程的不变性

例: 函数 f_i 的 τ_i

约束

$g_i(x) > 0$ 例: $S_{xo} > S_w$

约束的不定性

例: 约束 g_i 的 σ_i

极小化了的非相关函数可以写成:

$$\Delta(a, x) = \sum_i \frac{[a_i - f_i(x)]^2}{\sigma_i^2 + \tau_i^2} + \sum_j \frac{g_j(x)^2}{\tau_j^2}$$

使用该函数极小化, 将对解释问题给出最可能的相关答案。

R_t 格罗巴尔程序应用格罗巴尔方法, 由一组至少包括三种不同探测深度的电阻率测井曲线, 确定最可能的 R_t 、 R_{xo} 和 D_i 值。

每一种电阻率测井仪器的测量值按其响应方程表示成下列函数:

R_t : 非侵入地层的电阻率

R_{xo} : 冲洗带电阻率

D_i : 侵入直径

将第一组估计答案(R_t , R_{xo} , D_i)代入响应方程, 便得到理论测井读数。每一种理论测井读数同实际记录的测井读数作比较, 并计算它们之间的差值。程序继续估计新的一组答案, 直到以上的差值(非相关函数)之和减小到它的最小值为止。

格罗巴尔解释技术不局限于某一种特定的模型, 相反, 它是一种通用的方法, 即使用所有可能的输入参数, 以得出最一致的答案。它可以方便地同任何新的解释技术或测井仪器响应方程相结合。新的测井仪器包括电磁波传播测井仪(EPT)、热中子衰减时间测井仪(TDT-M)和自然伽马能谱测井仪(NGT)。

在格罗巴尔程序中还包括次生伽马能谱测井仪(GST)。事实上, 仅仅使用次生伽马能谱测井资料, 就有大量的输出供解释用。在高中子脉冲送入地层后, 测井仪器测量中子与地层岩石及流体相互作用产生的非弹性散射和俘获伽马射线的能谱。通过仔细分析能谱并将它们与实验室标准能谱相比较, 就能求出碳、钙、铁、氧、硅、氯元素的含量。下列比值都是有用的指示参数:

碳/氧(C/O)

碳-氧比值

氯/氢 (Cl/H) 矿化度指示比值
 氢/(硅+钙) (H/(Si+Ca)) 孔隙度指示比值
 铁/(硅+钙) (Fe/(Si+Ca)) 铁指示比值
 硅/(硅+钙) (Si/(Si+Ca)) 岩性指示比值

任选项目之一包括探测硬石膏和黄铁矿中的硫。还计算了由类似于热中子衰减时间测井 (TDT) 的衰减时间导出的热中子俘获截面。

三、岩性解释

主要用 $\rho_{maa}-U_{maa}$ 交会图 (图17) 和 M-N 交会图 (图18) 来识别岩性。 $\rho_{maa}-U_{maa}$ 交会图则用岩性密度测井的密度值、P_e和补偿中子孔隙度值作出。用石英点和石灰岩点的趋势线指示白云岩。因为地质年代是前寒武纪, 占优势的是燧石(SiO₂)而不是砂岩(SiO₂), 从取心证实了这一点。为了核实刻度, 还提供了其他交会图。白云岩中子响应读数低于野外白云岩线或图版数值。从其他致密白云岩地区提供的实验资料也证明了测井响应与实验室测量导出的图版值之间存在着差异。因此, 作出了修改后的交会叠加图, 如图19、20、21所示。这种方法已为最近作出的模拟各种骨架矿物中热中子特性的数学模型所肯定。

用来模拟中子测井仪器的响应的方法有两种: 传递方程法 (DOT) 和蒙特卡罗法。传递方程法描述中子通过小体积元的方式。中子能量、中子散射和吸收截面全都用来求解进入与离开每一个小体积元的中子的数目与能量。蒙特卡罗法按照单个中子的路径给出中子被地层散射和吸收的统计图象。图22所示为由实验得到的作为孔隙度函数的远、近探测器计数率与蒙特卡罗、传递方程模型结果的比较。显然, 这两种模型均能精确地描述实验数据, 因而可以用来模拟测井仪器在不同地层中的响应。

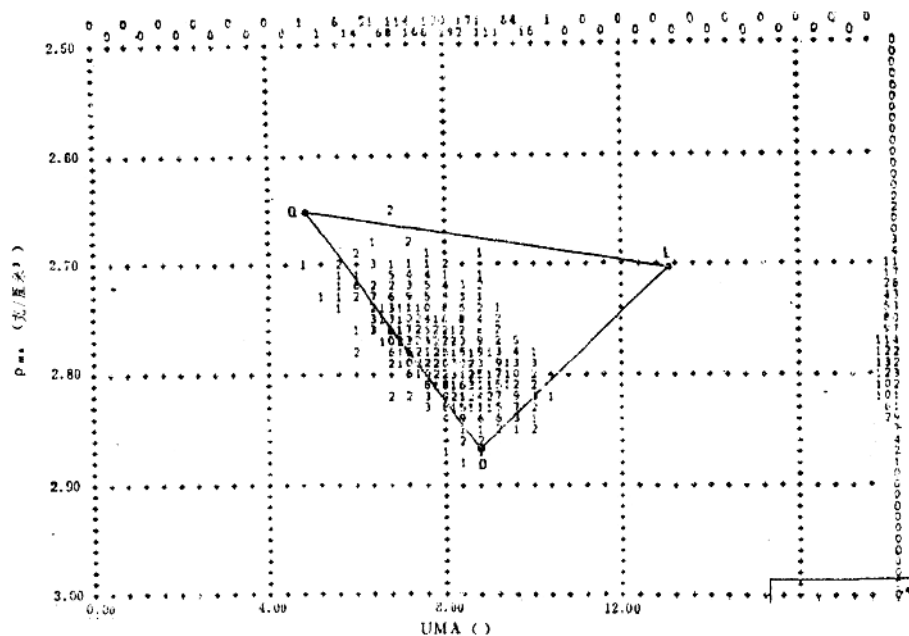


图17 任28井 $\rho_{maa}-U_{maa}$ 交会图

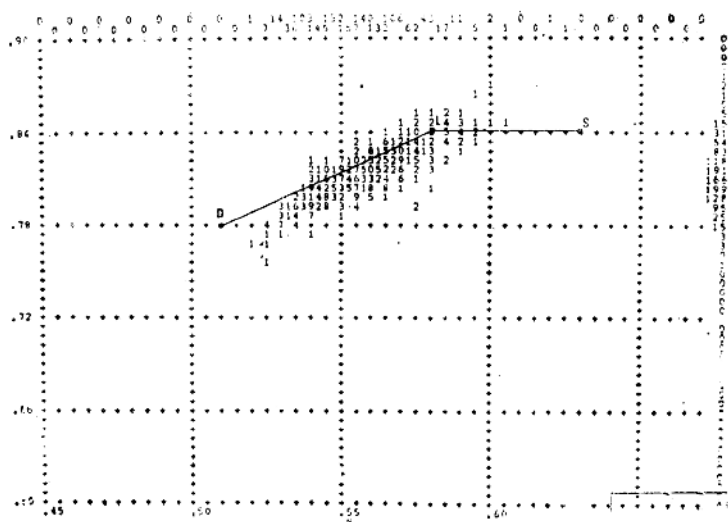


图18 任28井 M-N 交会图

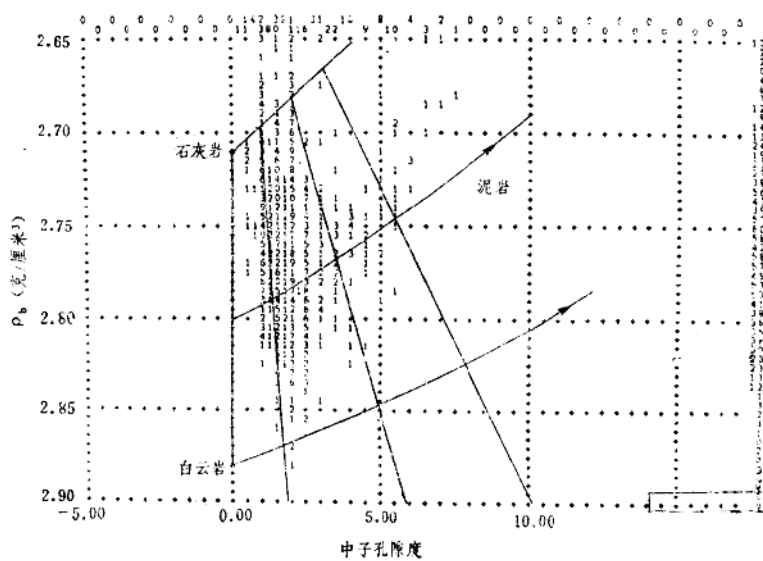


图19 任28井中子孔隙度-体积密度交会图

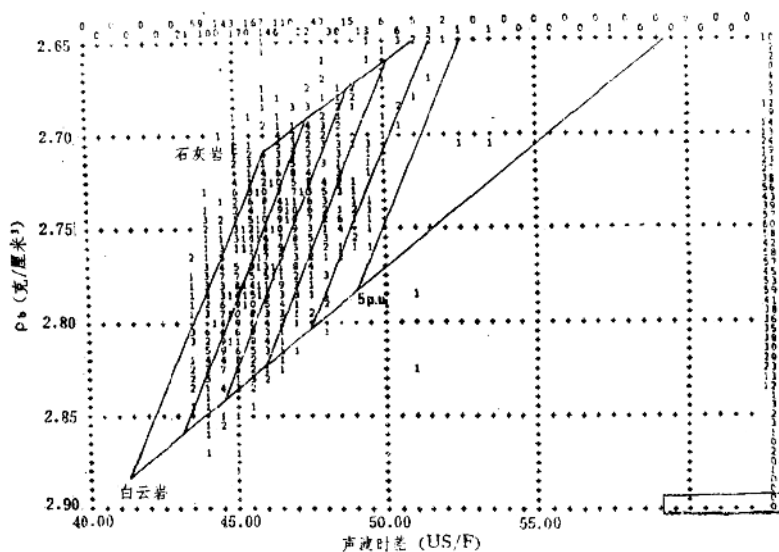


图20 任28井声波时差—体积密度交会图

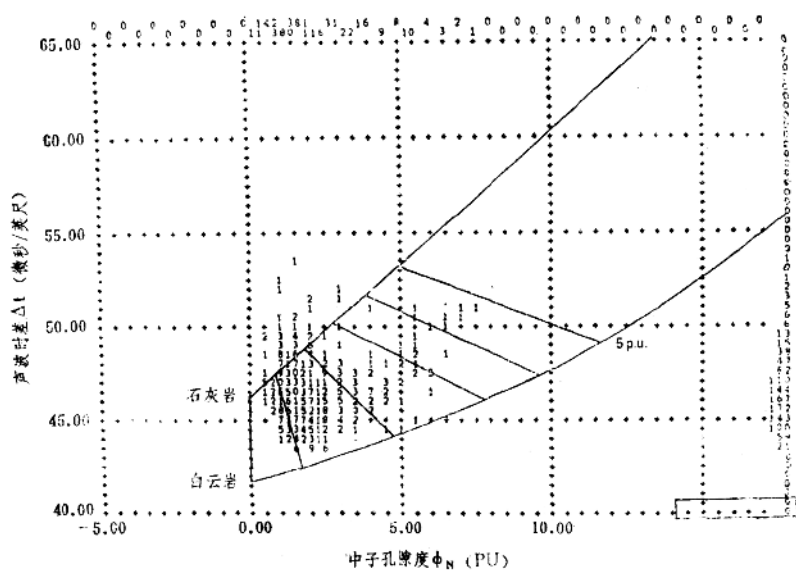


图21 任28井中子孔隙度—声波时差交会图

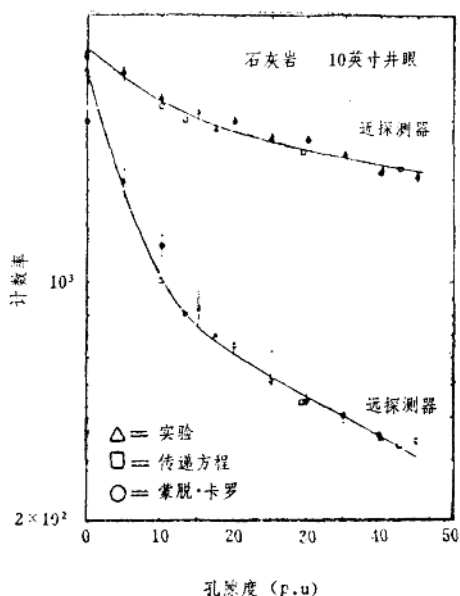


图22 在10英寸的井眼，作为孔隙度函数的实验的与计算的计数率的比较

最终选择的岩性模型是白云岩、燧石、石灰岩和泥岩。在交会图上出现一些统计性的离散点，这是由于井眼的影响，如井壁垮塌和井眼不规则所致，尤其是在裂缝带中更为明显。自然伽马 (GR) 值与其他泥岩指示参数几乎没有什么相关性。在裂缝中，由于地层水的渗透作用，可能沉淀有放射性铀盐，因而减小了它对计算的影响。

这种与岩性无关的铀的影响，可以用自然伽马能谱测井仪 (NGT) 探测出来。这种仪器能分析自然放射的伽马射线能谱。钾 (K^{40})、钍 (Th^{232}) 和铀 (238) 具有各自特征的伽马射线能量，借助于测得的能谱可以把它们区分开，从而求出这三种放射性元素的百分率。钍和钾与粘土含量有关，因而有助于识别粘土类型。铀往往与有机质、次生孔隙度、白云岩化以及裂缝中的可溶性铀盐的沉淀作用有关。

在其他低孔隙度地区，如意大利的 Malossa，曾采用特殊的记录技术 (参考文献[4])，例如用 PGT 密度测井仪器进行多次重复测量并用长源距的计数率只求密度。在任丘油田，这些方法被认为没有必要采用，因为岩性密度测井仪的使用改善了计数率的统计涨落，而且岩性密度测井仪的分辨率比标准密度测井仪的要高。

在其他致密的碳酸盐岩地区，电磁波传播测井仪 (EPT) 对确定岩性也是有效的。这种仪器测量 1.1 兆赫的电磁波通过地层传播时的传播特性。根据传播时间和幅度衰减，可以估计出地层的介电常数。由于水的介电常数比地层岩石或烃类的介电常数高得多，该仪器主要是对含水孔隙度的响应，而与水的矿化度无关。在孔隙度很低的碳酸盐岩地层中，传播时间 (见表) 能准确地指示岩性，尤其是能识别狭小的燧石条带，因为该仪器的纵向分辨率为 4 厘米。根据幅度衰减的大小，还能探测很薄的粘土层。