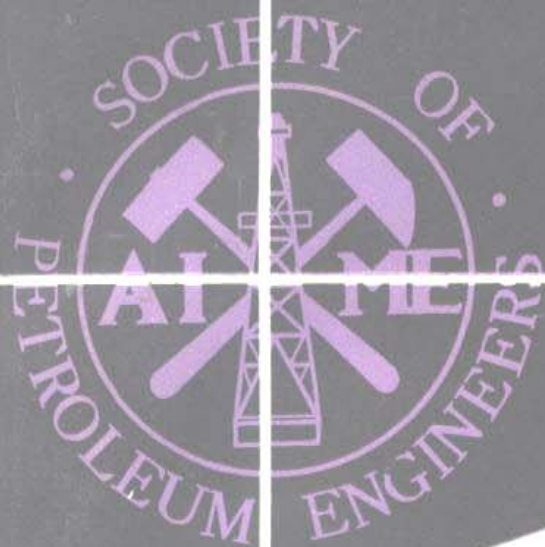




1983年年会论文选译

美国石油工程师学会 1983年年会论文选译

测井部分

石油工业部科学技术情报研究所

说 明

美国石油工程师学会于1983年10月在美国加利福尼亚旧金山召开了第58届技术年会，同年11月在得克萨斯卢博克召开了采油技术会议。在这两次会议上，宣读了有关测井方面的论文和报告十五篇，这些论文内容对我国测井工作有一定的参考价值，读者可以从中了解目前国外测井技术的发展和动向。为了便于测井工作者学习和了解这些论文内容，石油部勘探司委托《油气勘探译丛》编辑部组织翻译出版这个论文集，供有关同志阅读，并望大家提出宝贵意见。

《油气勘探译丛》编辑部

一九八五年

目 录

成功的老油田套管井再评价(确定剩余储量和提高产量)	(1)
在充满天然气和液体的地层中侵入对补偿中子测井的影响	(28)
改进的放射性示踪—注入剖面测井分析方法	(43)
过套管的储集层评价	(59)
次生伽马能谱测井仪(GST)的蒙特卡罗计算模型	(73)
通过随钻自然伽马测井检测孔隙压力	(83)
随钻录取井下地层资料	(99)
一种判断层段封堵的方法成功率达90%	(112)
数字双感应测井仪介绍	(127)
利用电磁波传播的随钻电阻率测井仪器	(142)
电磁波传播测井在西得克萨斯州二叠纪盆地的应用	(160)
北路易斯安那气田用棉谷砂岩的测井解释实例	(174)
在接近20兆赫的工作频率下实验室测量介电常数	(193)
在怀俄明沉积盆地用测井资料预测异常地层压力	(202)
应用实用的反褶积滤波器改进感应测井的纵向分辨力	(215)

成功的老油田套管井再评价 (确定剩余储量和提高产量)

T.E.Libson 等

陆大卫 译
声 远 校

摘 要

以往,关于斯特拉顿(Stratton)油田二次完井的决定,由于存在许多产量变化大的薄砂层透镜体而变得复杂起来。套管井地层评价仪器——双源距脉冲中子(DD-PN)测井仪器的问世,揭示了有关储集层岩石性质和含流体饱和度的详细信息,从而使事情大大地简化了。应用Champlin公司四年的二次完井资料,已能识别出DD-PN测井曲线的特征和测井求出的参数,并成功地用它们来划分油、气、水层,预计为增加天然气产量需要采取压裂强化措施的时间,识别枯竭气层,以及依据产层敞喷时的各自产能,列出可能的二次完井层位。

前 言

斯特拉顿-阿古达斯(Stratton-Agua Dulce)油田是在三十年代后期发现的,它是位于得克萨斯州 Corpus Christi 以西约45英里的一个海湾地区油田(见图1)。产层是 Frio 到

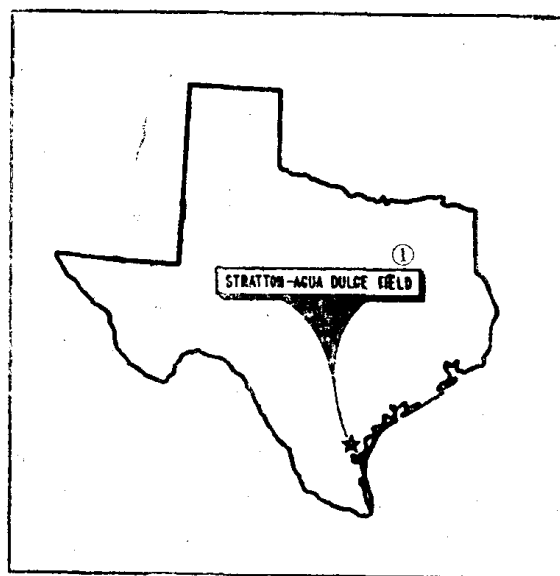


图1 斯特拉顿-阿古达斯油田的地理位置

①斯特拉顿-阿古达斯油田

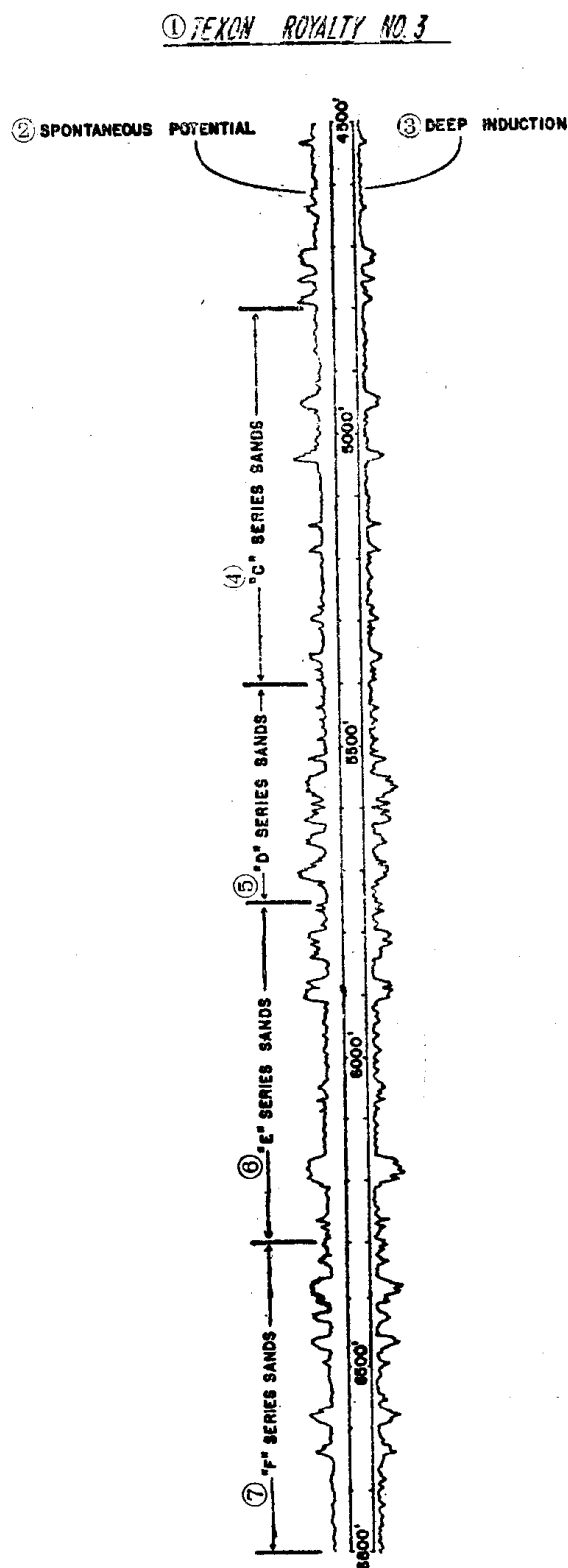


图2 Texon Royalty 3号井的感应-电测井曲线, 斯特拉顿油田型测井曲线

①Texon Royalty 3号井, ②自然电位, ③深感应,
④“C”系列砂岩, ⑤“D”系列砂岩, ⑥“E”系
列砂岩, ⑦“F”系列砂岩

上 Vicksburg 地层 (奥陶系泥质砂岩), 在典型井里有25个以上储集层分布在3000英尺井段上 (见图2)。这些储集层是5~10英寸的薄砂层透镜体。由于在地区有许多近岸下落断层, 并由于砂岩沉积环境而使储集层变薄, 限制了这些储集层的面积范围。二次完井试验, 历来不仅由于存在这么多的储集层, 而且还由于该地区的地质条件复杂而变得复杂化了。通常, 二次完井试验是寻找含水、枯竭或致密的砂层, 而它们在紧邻的井眼中为产层。同样, 在有些井中已知的砂层是含水或枯竭层, 而在邻井二次完井中往往发现是工业性产层。

1978年以来, 随着油气价格的上涨, 二次完井的经济效益大大地提高了, 而且有必要借助测井仪器来识别井眼中剩余的最可能产层。原来的裸眼井测井系列 (在所有的老井中都是由简单的电测井组成) 已经不适用, 因为从邻井的某一储集层采油将使有希望的层产液面上升或压力递减。还发生管外层间气窜。

双源距脉冲中子 (DDPN) 测井仪是最成功的用于二次完井试验的仪器。它专用于套管井测井, 在测井探头内包括有高能中子源和两个探测器。在1978年以前, 主要在得克萨斯州海湾地区使用, 该地区地层水为高矿化度, 然而斯特拉顿油田地层水矿化度较低 (15,000ppm 总 Cl^-), 因而推迟了DDPN测井的应用。经过一些试验后, 确定在斯特拉顿油田也能使用DDPN测井。虽然不完全了解, 但是在斯特拉顿油田的含水、泥质的Frio砂层中, DDPN 仪器通常可记录到24~30个俘获单位的俘获截面 (Σ) 值。当地层水矿化度较高 (总含氯量在 50,000~80,000ppm) 时, 它也能按要求的分辨力划分出含油气层和含水层。另外, 较新一代的 DDPN 仪器具有孔隙度指示和天然气检测的作用^[1]。因此, DDPN 测井被选择用于套管井二次完井分析, 以及作为二次完井层段选择和储集层开采条件改进的辅助手段。

基于DDPN仪器响应的理论计算^[1,2,3,4], 通常可计算管外地层的岩石孔隙度和流体饱和度。斯伦贝谢公司自1978年以来积累的二次完

井的经验，确定了一定的测井曲线特征和测井求出的参数，并把它们作为预测斯特拉顿油田二次完井后备地层工业性产能的指南。用 $\Phi_e \cdot S_w$ （有效孔隙度 $\times$ 含水饱和度）的乘积等于或小于10%作为工业性油气层的指标。

本文通过建立Champlin 公司在斯特拉顿油田得到的实际二次完井结果与相应的DDPN测井曲线读数之间的相关性，修定测井公司定的产层截止值。在过去的四年中，Champlin 公司在斯特拉顿油田进行了27次DDPN测井（见图3），在被测的井段总共有76层进行了二次完井。这些资料已制成表，根据 DDPN 测井曲线读数计算了地层参数，把数据绘成了图，并检查了趋势线。如果把测井公司的测井分析家和采油公司的油藏工程师这二者的智慧结合起来，那么不同的研究地区都可以对研究结果的质量作出大的贡献。这些结果包括：改善了的气层的 $\Phi_e \cdot S_w$ 截止值； Φ_e 值，低于此值就要采取压裂强化措施，以建立工业性产量；一种用来探测压力递减的气层的方法；根据敞喷产能列出有希望的二次完井层段的方法。虽然油层的资料很不足，但仍可提供产油层截止值的某些对比情况，并可作出结论。另外，文中还附有各种交会图，以证明在应用 DDPN 测井和分析的指定地区进一步进行探测的建议是正确的。

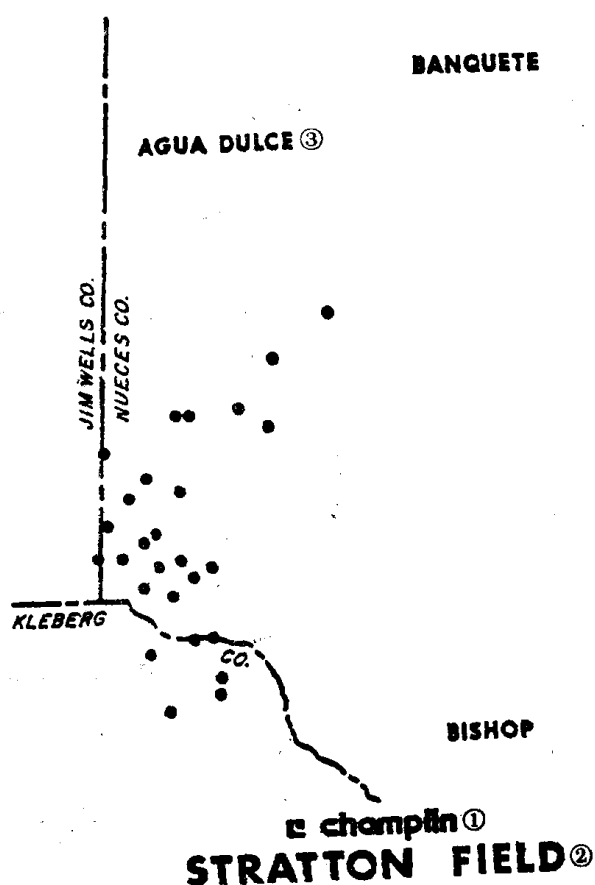


图3 Champlin公司在斯特拉顿油田进行 DDPN测井的井位
①Champlin公司，②斯特拉顿油田，③阿古达斯

生产测试结果数据的分类

斯特拉顿油田二次完井评价计划的最初目的，是为了增加油气产量和收益。自1978年以来，Champlin 公司利用DDPN测井信息，使76层中的34层（45%）最后投入工业性完井，其余的层段包括水层测试、过于致密（或已破坏）的储集层和枯竭砂层。这个研究结果是有

用的,42个没有工业价值的层从来没有测试过。显然,投入工业性完井的所有这些测试,都可以认为是有效的,它反映出油层的生产能力。然而,由于下面的原因,如井眼内地层损坏、不适当的射孔、套管外的水窜等而导致测试失败,在评价中不能作为有效数据进行分类。最初生产测试分类如下:

一、成功的测试(有效的数据)

1. 工业性气层测试:此类包括从生产干气到生产任何工业性的气、凝析油和水的混合物。

2. 油层测试:此类包含生产适量的油,包括高油气比或高油水比的测试。

二、不成功的测试(某些数据点可能是不正确的)

1. 水层测试:此类包括没有油气显示和总产水量超过10桶的任何测试。

2. 没有开采意义的测试:此类包括不生产任何油气,总的产水量不超过10桶的抽汲井或强化处理井的测试。未经强化处理而地层已损坏的层段、枯竭层和致密层的测试也都归入此类。

DDPN 测井求出的值

DDPN 测井曲线可以用于“快速直观”检查,以寻找目的层。图4所示为电测井曲线、DDPN测井曲线以及利用裸眼井和套管井数据作为输入的计算机产生的测井曲线。在6232~6240英尺处可看到 N_1 与 F_1 曲线的分异^[1],这是最可靠的一个气层的指示。这就是已知的“含气特征”的影响。在6350~6375英尺处,两曲线分异更大,这是已枯竭的气层的特征(压力低于750磅/英寸²),本文后面将讨论到。

为了全面评价产层,需要有如图4所示的计算机处理成果图,并要求深入研究有关DDPN测井参数的详细计算^[1,5]。选择测井参数的依据和计算每个参数的方法,将在附录A和B中

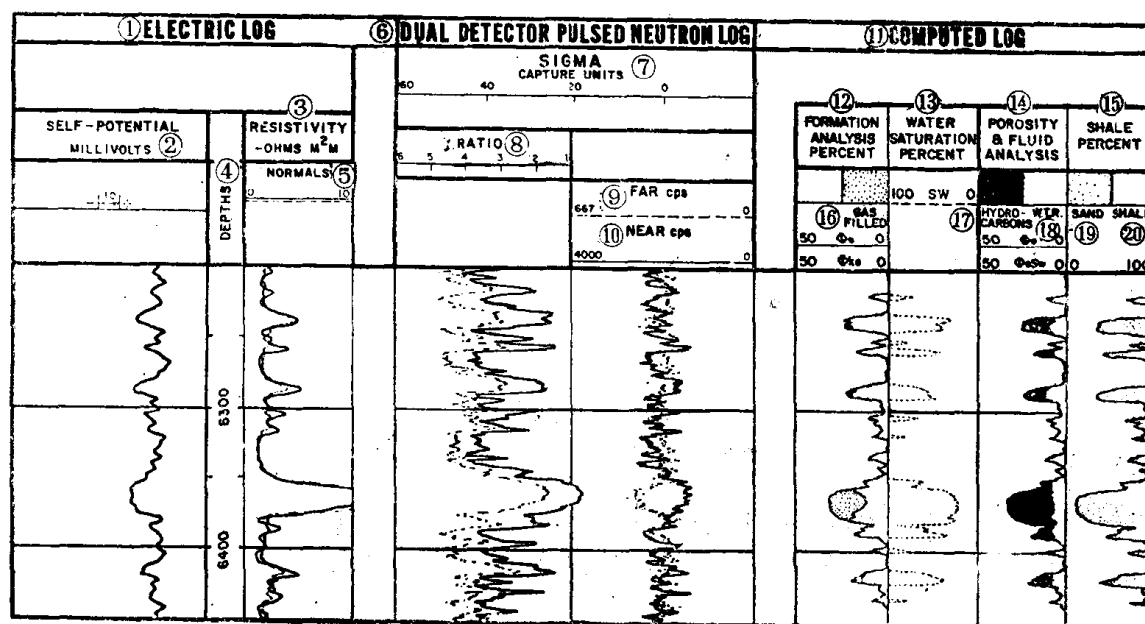


图4 DDPN测井曲线与电测井曲线及计算机处理成果图的实例

①电测井, ②自然电位, 毫伏, ③电阻率, 欧姆米, ④深度, ⑤电位电极系, ⑥双探测器脉冲中子测井, ⑦ Σ (俘获单位), ⑧比值, ⑨远探测器计数率(计数/秒), ⑩近探测器计数率(计数/秒), ⑪计算机处理成果图, ⑫地层分析(%), ⑬含水饱和度(%), ⑭孔隙度与流体分析, ⑮泥质(%), ⑯含气, ⑰油气, ⑱水, ⑲砂岩, ⑳泥岩

讨论。

1. ϕ_c ——经泥质校正的有效孔隙度。
2. ϕ_k ——由比值曲线和 Σ 曲线读数计算的孔隙度值。它代表含100% 液体的纯地层的总孔隙度 ϕ_t 。在气层中，计算的 ϕ_k 值要比实际的 ϕ_t 值小得多。
3. ϕ_{NF} ——包括有效孔隙度和束缚水孔隙度的总孔隙度。它是由近—远 (N_1-F_1) 探测器计数率曲线求出的。在斯特拉顿油田，用 N_1-F_1 值求总孔隙度，是为适应本地区条件而进行多次实验研究的结果。
4. S_{wb}^4 ——表示在地层泥质中的束缚水饱和度。用自然电位曲线、 Σ 曲线和自然伽马曲线计算得到的束缚水饱和度值，通常是最小值。在枯竭储集层中，可以单独用 Σ 曲线计算束缚水饱和度。
5. S_{wf} ——作为总孔隙度 ϕ_t 百分比的自由水饱和度。
6. S_{wt} ——在总孔隙度 ϕ_t 中的总的含水饱和度。它是束缚水饱和度 S_{wb} 与自由水饱和度 S_{wf} 之和。
7. S_w ——作为有效孔隙度 ϕ_c 百分数的自由水饱和度。不要与 S_{wf} 混同，它是由有效孔隙度中的束缚水和任何可动水两部分所组成的。
8. S_{gf} ——在气层中，由经过泥质补偿的 ϕ_k/ϕ_c 关系式求出的自由气饱和度(见附录B)。

斯特拉顿油田的产层截止值

这项研究的最初目的，是结合利用DDPN测井求出的参数与曲线的特征来确定产层的截止值。分析了各油井所有有用的二次完井测试资料和DDPN测井曲线之后，必须确定什么样的测井值可以用来精确表示一个层段的生产特征。

开始，先研究整个砂岩层段众所周知的 ϕ_c 与 S_w 关系图。图5是在同一口井内从两个工

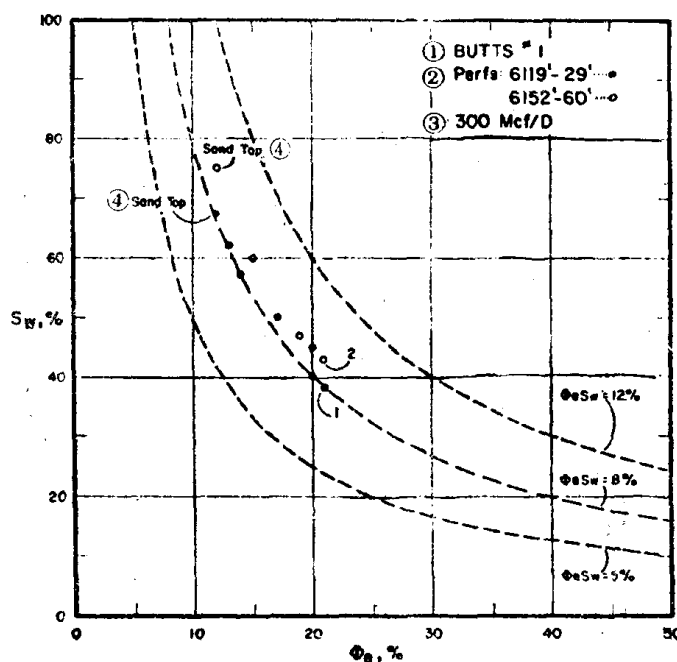


图5 工业性产气层段

①Butts 1号井，②射孔段，③300千英尺³/天，④砂层顶部

业性开采层段得到的资料，它指示沿着全井段 $\phi_e S_w$ 关系保持恒定。各有关的砂层沿着恒定、分散的 $\phi_e S_w$ 线作图，证明处于束缚水饱和度下的一个层的单个数据点，可以代表整个砂层 $\phi_e S_w$ 的关系。

由于渗透率与有效孔隙度之间存在着总的相关性，在一个砂层内有效孔隙度 ϕ_e 为最大的点，也可能是该砂层的渗透性最好的点(6)。在薄砂层中，高 ϕ_e 值的点（也是渗透率 k 高的点），可以预计从这个层段得到主要产量。对于斯特拉顿油田，也存在一种相关性，即 ϕ_e 值的大小可以作为一个砂层产能的相对指示（这个结论的详细讨论，见附录B）。从产层无论是产水，还是产油气，都必须出于 ϕ_e 值高的点。因而，利用DDPN测井曲线的读数，把砂岩层段中 ϕ_e 值为最大的点的数据制成表。这个数据表和一些计算参数及备注列成表1。为便于参考，第一栏为数据点的编号。在表1中，对于任何一个工业性完井的点，其储层压力(B-HSIP)都是按实际井底静压力测量得到的。所有其他压力都是根据抽油杆液面高度和相应的地面压力估算的。可用表1中的不同参数组合作出交会图，并作趋势线检查。下面关于交会图的讨论将按这样的方式进行，即首先讨论趋势线，然后详细说明趋势点和弥散点。

在图6的 ϕ_e 与 S_w 交会图上示出了表1中的各个数据点。射孔数据分散，是由于图中含有获得工业性油气产量的层、试水层或无开采意义的层的数据。图7仅是工业性采气层的 $\phi_e S_w$ 交会图。存在一个限定线，指出 $\phi_e S_w = 13\%$ 是工业性采气的截止值。点*9、*97、*104例外。表1的备注栏证明，在点*9和*104处的层很快就出水。*97所代表的层起源于Wardner*99。该井原来是用封隔器三次完井的，但是竟存在如此严重的连通和窜槽问题（在套管内外都有），以至于油管柱与套管间有水泥胶结。没有进行水泥胶结测井，以检查原来的套管注水泥作业。在修井期间，为把该井改成无油管完井，对*92和*93层投放了凝胶球（见表1）。这两层与*97层仅相隔20~30英尺，某些凝胶球可能在管外与*97层连通。相信有这样的可能性，因为*97层在交会图上是唯一的离开趋势线的产气点。

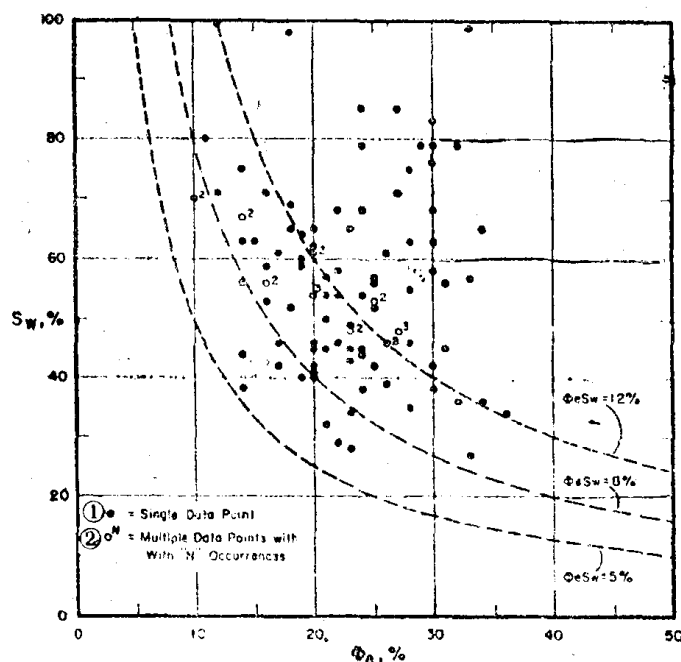


图6 表1中所列的各层的 ϕ_e 与 S_w 交会图

①一次数据点，②多次(N次)数据点

表 1

全部DDPN数据点一览表

生产测试数据										DDPN结果										DDPN井底数据										备注																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
点号	井名	砂层名	测试分类	BHSIP FIP (PSI)	气 (MMcf/D)	油 (桶/D)	总产 (桶/D)	含水 (%)	酸化时间 (天)	酸化量 (英寸)	套管尺寸 (英寸)	油管尺寸 (英寸)	φ _{sw} (%)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)		φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)	φ _{sw} (°)

全部DDPN微测井一览表(续)

油井数据				生产测试数据				DDPN结果				DDPN测井数据				备注
点号	井名	射孔井段(英尺)	测试分类	BHSIP (PSI)	FIP (PSI)	ETP (PSI)	总产油/天	总产水/天	抽提时间(天)	酸化/裂化	套管/油管(英寸)	ϕ_{NPF} (%)	ϕ_{NPF} (%)	ϕ_{NPF} (%)	ϕ_{NPF} (%)	
53	Meridian 44	6015'-19'	油水	1	-	-	-	6	1	酸化	5-1/2	12	12	12	3.3	无射孔
54	Meridian 45	5957'-46'	油水	1	-	-	-	-	2	-	5-1/2	15	15	15	3.3	无射孔
55	Meridian 45	6234'-40'	油水	1000	-	-	-	31	3	-	5-1/2	23	23	23	2.7	无射孔
56	Meridian 45	6234'-40'	油水	1000	-	-	-	31	3	-	5-1/2	23	23	23	2.7	无射孔
57	Meridian 45	7070'-76'	油水	1000	-	-	-	35	1	-	5-1/2	28	28	28	3.3	无射孔
58	Meridian 45	7031'-36'	油水	1000	-	-	-	62	1	-	5-1/2	33	33	33	3.3	无射孔
59	Meridian 45	7013'-21'	油水	1000	-	-	-	62	1	-	5-1/2	28	28	28	3.3	无射孔
60	Meridian 45	6320'-42'	油水	1	-	-	-	6	1	-	7	21	21	21	2.5	无射孔
61	Meridian 45	6190'-1204'	油水	400	-	-	-	1.3	1	-	7	21	21	21	2.5	无射孔
62	Meridian 45	6092'-1102'	油水	400	-	-	-	1.3	1	-	7	21	21	21	2.5	无射孔
63	Meridian 45	6122'-31'	油水	500	-	-	-	4	1	-	7	21	21	21	2.5	无射孔
64	Meridian 45	5885'-90'	油水	500	-	-	-	4	1	-	7	21	21	21	2.5	无射孔
65	Meridian 45	5718'-18'	油水	1300	-	-	-	90	1	-	7	21	21	21	2.5	无射孔
66	Meridian 45	5148'-44'	油水	1300	-	-	-	90	1	-	7	21	21	21	2.5	无射孔
67	Meridian 45	6220'-40'	油水	644	25	300	-	-	-	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
68	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
69	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
70	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
71	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
72	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
73	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
74	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
75	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
76	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
77	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
78	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
79	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
80	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
81	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
82	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
83	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
84	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
85	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
86	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
87	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
88	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
89	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
90	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
91	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
92	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
93	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
94	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
95	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
96	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
97	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
98	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
99	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
100	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
101	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
102	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
103	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
104	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
105	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
106	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
107	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
108	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
109	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
110	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔
111	Meridian 45	5845'-81'	油水	500	-	-	-	16	4	-	5-1/2	21	21	21	2.5	无射孔

注: * 1. 因为没有BHSIP(井底压力)资料,该S_{gr}值不作为图13的数据。
 * 2. N/A代表测井时井内未下油管。
 * 3. ϕ_{NPF} 是在小于 ϕ_{NPF} 的场合采用。
 4. 在各井内,DDPN测井都是2%KCl修井液条件下进行的。
 5. U不是表示砂层名称。
 6. NSR表示没有开泵意义。

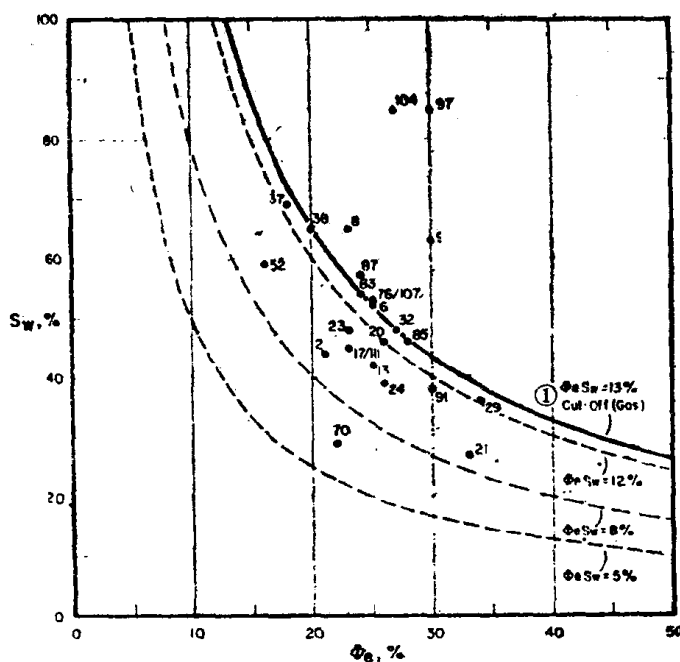


图7 所有工业性气层的 ϕ_e 与 S_w 交会图 $\phi_e S_w = 13\%$ 为采气截止线

①截止线(气)

还应当指出, 只有少数 ϕ_e 值低于20%, 这是斯特拉顿油田工业性采气的 ϕ_e 截止值。进一步应用这个概念来指导检查初次完井时采取的强化措施。点*38和*52(均具有高的油层压力), 在交会图上落在 ϕ_e 等于或小于20%处。这两层经压裂强化处理后投入工业性完井。与点*37和*38相应的层来进行压裂, 仅获得少量产量。建议把 $\phi_e = 20\%$ 规定为二次完井的最低孔隙度值。低于这个截止值, 就要采取压裂强化措施, 以获得工业性气产量。点*84是属于没有开采意义的类型, 有效孔隙度为14%, 压裂后只冒气。因此, 建议把 $\phi_e = 14\%$ 规定为绝对最低产能的孔隙度标准, 通过压裂强化处理可以获得产量。当然, 如果在需要压裂的有希望的砂层中, 在几英尺处存在着水层, 那么也可以进行完井, 因为在别处可进行裂缝纵向保护。

图8是试油时产1桶以上油的各油层的 ϕ_e 与 S_w 交会图。在许多情况下, 试油出水影响了工业性产量。在交会图上有一个明显的趋势, 即 $\phi_e S_w$ 值越大的点, 出水量越多。只有点*78不出水, 因此建议, 为达到产不含水的油, $\phi_e S_w$ 必须等于或小于8%。由于点*35和*77是来源于高压的储集层(两层均未进行压裂处理), 但是日产量很低, 所有其余各点 $\phi_e = 20\%$, 这20%看来是适用于产液层的孔隙度

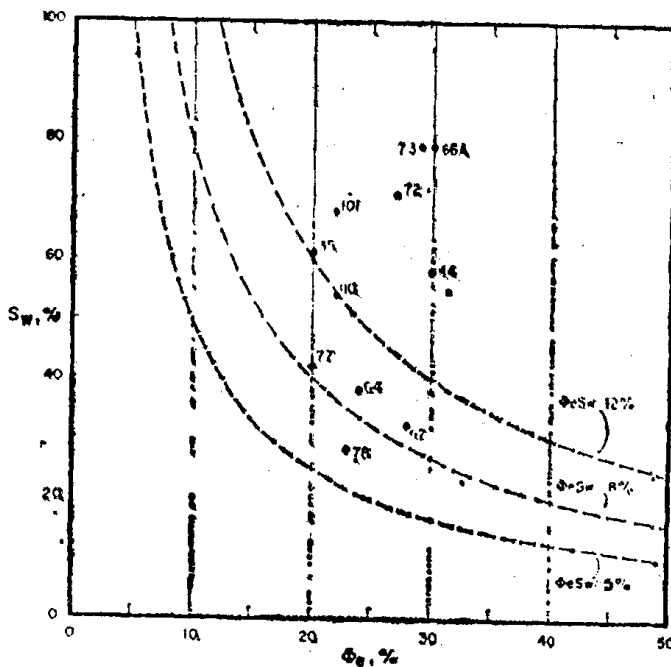


图8 所有油层的 ϕ_e 与 S_w 交会图

截止值。虽然相对少数的数据点可以提供作为进一步作出结论的依据,但是看来 $\phi_e S_w = 12\%$ 以上会大量出水,而得不到工业性油流。根据这个规律,在图8上有6个层段没有进行测试。

图9是所有水层的 ϕ_e 与 S_w 交会图,产水超过10桶。当然,在水层测试中,有的是套管外水窜的结果,而不是射孔层段的有效测试。选用20%作为孔隙度截止值,对点*33和*34二次

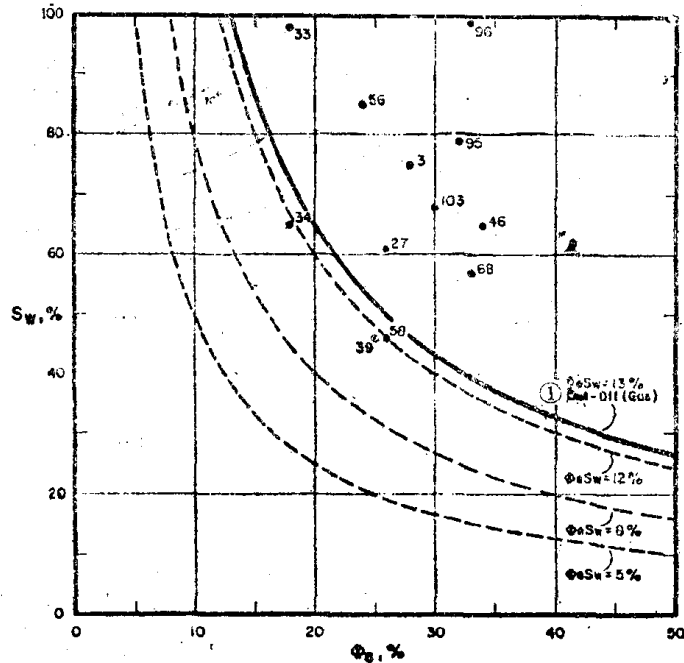


图9 所有水层的 ϕ_e 与 S_w 交会图

①截止线(气)

完井的结果,产量接近枯竭,除非对这些层采取强化措施。生产结果(见表1)证实,经过两天抽汲,这些层只采出很少量的水。在特征上,数据点的有效孔隙度 ϕ_e 越高,在较短的时间内出水量也就越多。

在 $\phi_e > 20\%$ 的点中,有8个点 $\phi_e S_w > 13\%$,因而预计为产水层。两个点(*39, *58) $\phi_e S_w$ 在13%以下,因此预计为产气层。DDPN测井试验表明,每层都显示 N_1-F_1 交互,这是气层特征。建议选择这两层进行局部挤水泥。可惜,这些井未进行水泥胶结测井,无法证实这个假设是否正确。值得注意的是,绘在图上的12层中有10层没有按本研究所定的准则进行射孔。

不产油气和采液量小于10桶的二次完井测试分类为“没有开采意义”(NSR)。图10示出了这些层的数据点。24个点中有15个点有效孔隙度 ϕ_e 低于20%这个截止值,在预先未了解到为达到工业性开采而需要采取压裂强化措施的情况下,将不

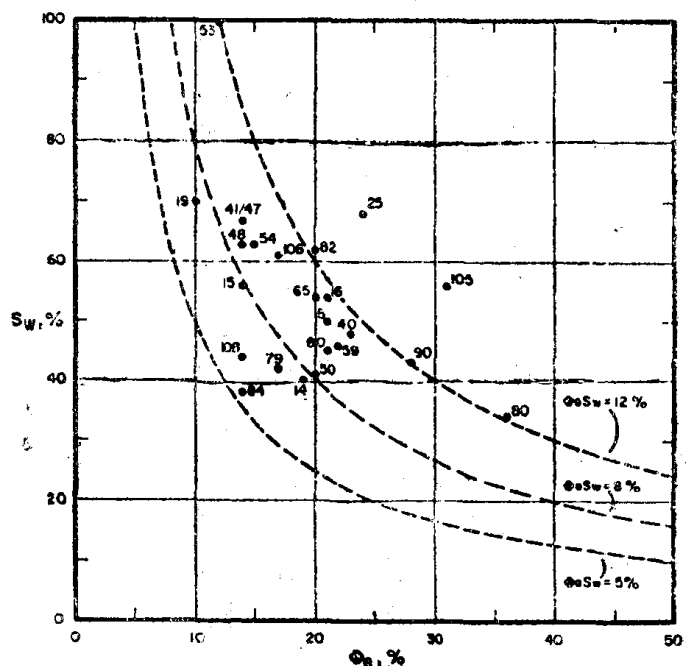


图10 所有无开采意义层的 ϕ_e 与 S_w 交会图

进行测试。点*25和*105落在 $\phi_c S_w = 13\%$ 线之上，可能产水。本文后面还将讨论的方法，是用来评价 ϕ_c 大于20%而 $\phi_c S_w$ 低于13%的点（点*5，*16，*40，*59，*80和*90）的油层压力。计算发现，点*8和*80的压力低于750磅/英寸²，为枯竭层。这两层在二次完井过程中进行了酸化压裂处理，但产液量仍然甚少，这与预计为枯竭层的特性是一致的。点*59和*90未进行酸化处理（可能地层已损坏）。对点*90进行了一系列静井底压力测试，后来井底压力由开始的534磅/英寸²，在11个月内上升到800磅/英寸²，在14个月内上升到1100磅/英寸²。压力上升缓慢是很致密层的或已损坏的地层的特征。根据这个结果，该层（在表1中为点*91）于1978年再次射孔并进行酸化，后来产气。基于这个分析，对点*16和*40进行了稀酸酸化，但不产任何东西，这可能在废弃之前已进行过压裂。

以前的 ϕ_c 与 S_w 交会图全是由许多不同的储集层组合的数据构成的。两个储集层，即E-4（一般是低渗透率油层）和E-31，曾进行了大量的测试，以取得有意义单独的交会图。图11所示为E-31砂岩层所有测试层段的 ϕ_c 与 S_w 关系图。 $\phi_c S_w = 13\%$ 线（从整个斯特拉顿油田许多储集层取得的数据）代表单个储集层的有效截止值。斯特拉顿油田二次完井的补充数据可供将来使用，因此进一步检查单个储集层的 $\phi_c S_w$ 交会图，以观察油田范围的产层截止值是否真正是通用的，这是一项有意义的工作。点*38和*84（如前面所讨论的）在图上落在 $\phi_c = 20\%$ 孔隙度截止线之下，它们都是低产层。

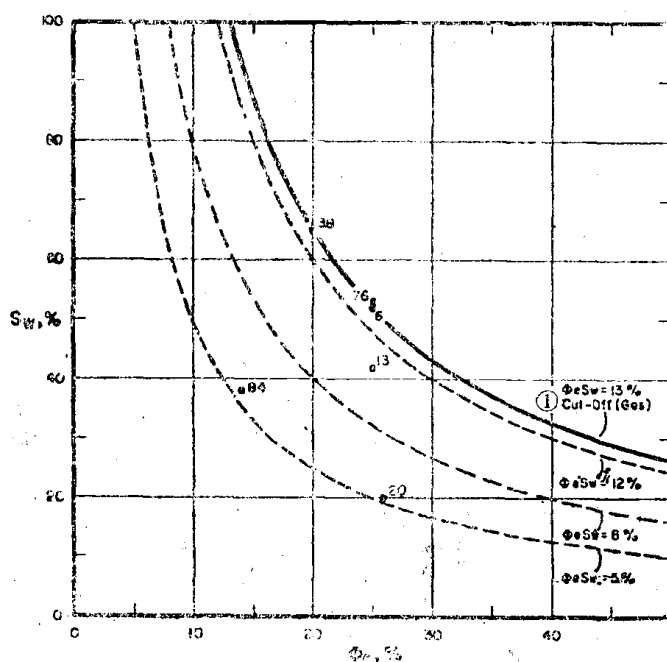


图11 斯特拉顿油田E-31储集层所有生产测试层段的 ϕ_c 与 S_w 交会图
①截止线（气）

图12为E-4储集层的 ϕ_c 与 S_w 交会图。点*33、*54和*65都落在 $\phi_c = 20\%$ 截止线以下。点*33的 N_1-F_1 交迭，但落在 $\phi_c S_w = 13\%$ 之上，因此抽汲两天只产13桶水。点*54的 N_1-F_1 没有交迭，它的孔隙度低于20%，是属于无开采意义的层。点*65也落在 $\phi_c = 20\%$ 之下，它只产6桶水和少量的油。其余各点都落在 $\phi_c S_w = 13\%$ 之上，产大量的水。应当指出，点*110落在 $\phi_c S_w = 13\%$ 线之下，因此可能产气。探测表明，实际上该层的 N_1-F_1 不发生交迭，这说明这样的事实，即生产不含水油的层显示出 N_1-F_1 几乎不交迭（ $\Delta C P S c$ 小于250），其 $\phi_c S_w \leq 8\%$ ， $\phi_c \geq 20\%$ 。

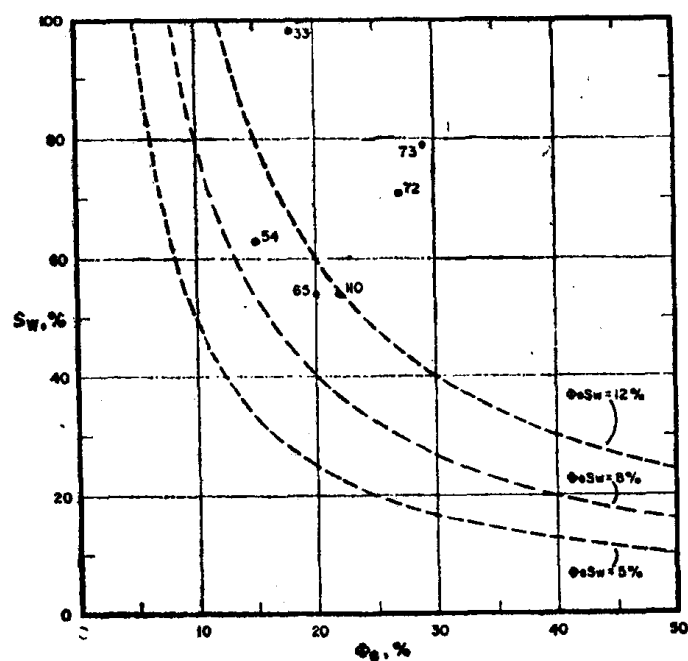


图12 斯特拉顿油田E-4储集层所有生产测试层段的 ϕ_0 与 S_w 交会图

具有足够的油气饱和度和孔隙度的层为工业性产层，它们可以根据 ϕ_0 与 S_w 的关系加以识别。现在需要一种能探测已枯竭的产层的方法。图13所示为 S_{gf} 与 ϕ_k/ϕ_{NF} 的交会图，这是有

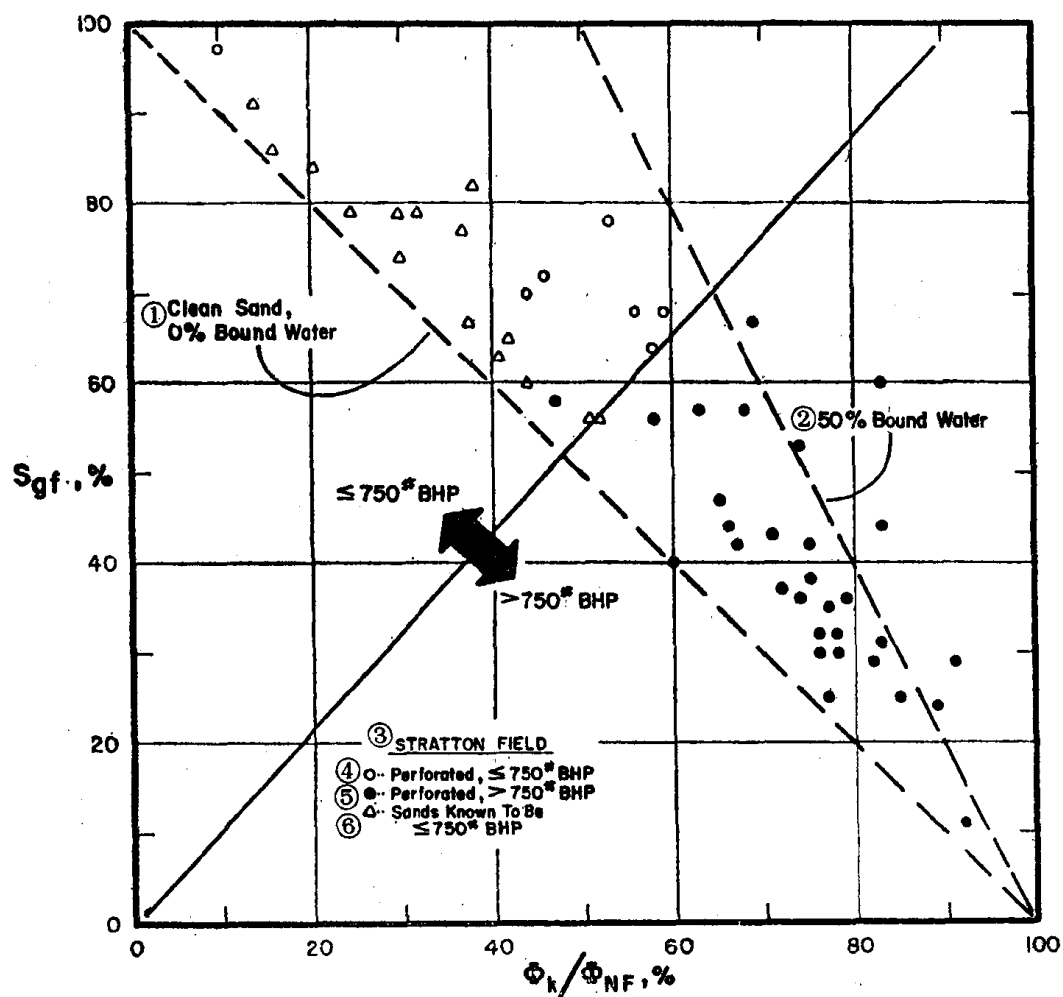


图13 斯特拉顿油田的 S_{gf} 与 ϕ_k/ϕ_{NF} 交会图

①纯砂层，0%束缚水，②50%束缚水，③斯特拉顿油田，④射孔， ≤ 750 磅/英寸²井底压力，⑤射孔， > 750 磅/英寸²井底压力，⑥已知压力 ≤ 750 磅/英寸²井底压力的砂层

效识别低压气层最好的参数组合。开始,先画出一个层的最大和最小 ϕ_e 点,用750磅/英寸²的储层压力表示枯竭层的特征(表1中只有最大的 ϕ_e 值)。如上所述,所有的点根据各自的束缚水饱和度(或泥质含量)绘在图对角线右上方。两个砂层,即E-41(Bertram砂层)和F-11(Wardner),已钻了许多井,并进行了DDPN测井。作为上述相关性附加测试的测井数据,已制成表(见表2)。这两个砂层最接近斯特拉顿油田中存在的真正的冲积砂层。它们是特别纯的高孔隙度和高渗透率的层,多年来已枯竭到储层压力低于750磅/英寸²。从图上可看出,从这两个砂层得到的全部15个有用的数据点,服从于压力的相关性,落在0%束缚水饱和度线附近,证明它们已经枯竭,而且泥质含量很低。

表2 试验 S_{gr} 与 ϕ_K/ϕ_{NF} 相关性的斯特拉顿油田枯竭气层

井	储集层	深度	ϕ_K	ϕ_{NF}	ϕ_K/ϕ_{NF}	S_{wb}	S_{gr}
Texon Royalty 3号井	E-41	6193'	0.18	0.44	0.41	0.07	0.63
	F-11	6370'	0.12	0.41	0.30	0.11	0.79
Texon Royalty "B" 5井	E-41	6300'	0.18	0.35	0.52	0.41	0.56
G.P. Wardner 20号井	E-41	6334'	0.12	0.32	0.38	0.25	0.82
	F-11	6508'	0.14	0.28	0.51	0.13	0.56
G.P. Wardner 31号井	E-41	6398'	0.17	0.45	0.38	0.07	0.67
G.P. Wardner 32号井	E-41	6229'	0.08	0.39	0.21	0.07	0.84
	F-11	6479'	0.17	0.39	0.42	0.11	0.65
G.P. Wardner 63号井	E-41	6365'	0.09	0.38	0.25	0.05	0.79
	F-11	6541'	0.12	0.36	0.32	0.14	0.79
G.P. Wardner 70号井	E-41	6280'	0.15	0.33	0.44	0.07	0.60
G.P. Wardner 74号井	E-41	6308'	0.06	0.40	0.14	0.05	0.91
	F-11	6486'	0.11	0.37	0.30	0.05	0.74
G.P. Wardner 75号井	E-41	6232'	0.13	0.35	0.37	0.18	0.77
	F-11	6430'	0.06	0.36	0.16	0.02	0.86

结 论

1. $\phi_e S_w \leq 13\%$ 定为斯特拉顿油田工业性产气层。此外,任何有效孔隙度 ϕ_e 低于20%的点,均应采取压裂强化措施,以便明显增加产量。有效孔隙度 ϕ_e 低于14%的点,为过于致密的层,即使对它进行压裂,也不能达到工业性开采。有希望的气层应当显示出 N_1-F_1 特征曲线交迭(含气特征),在 S_{gr} 与 ϕ_K/ϕ_{NF} 交会图上落在指示出有足够的工业性开采压力的一个区域内。

2. $\phi_e S_w \leq 8\%$ 是斯特拉顿不含水油层的特征。为使原油的生产达到工业性产量,有效孔隙度最小值定为20%。 $\phi_e S_w = 12\%$ 以上的层出水,从而影响工业性产量。油层的 N_1-F_1 不交迭,没有方法能够指示含油砂层是否枯竭。

3. 本文提供的 S_{gt} 与 ϕ_k/ϕ_{NF} 交会图能用来识别斯特拉顿油田中压力递减的含气砂层。

4. Champlin 公司现已得到大量的基于DDPN测井分析的生产测试数据, 利用这些数据可以确定交会图的趋势线。

5. 斯特拉顿油田的经验证实, DDPN测井 N_1-F_1 曲线的分异是气层的指示。

6. 根据斯特拉顿油田的许多砂层数据求出的产量截止值, 也适用于单个储集层。

7. 斯特拉顿油田的经验证实, 对于含有束缚水的层, 任何一个点的孔隙度和含水饱和度, 可以确定整个层段的 $\phi_c S_w$ 关系。

8. 在斯特拉顿油田遇到的薄砂层中, ϕ_c 为最大的点是整个层段提供主要产量的点。据此, 该点的DDPN测井响应也许能用来指示整个层段的产能。

9. PPI 与最大 ϕ_c 交会, 可以用来按产能列出有希望的气层。

10. 在斯特拉顿油田, 测井求出的气层平均相对渗透率 (K^*) 与该层的生产率 (PPI) 之间存在着总的相关性。

11. 在斯特拉顿油田, 气层的平均有效孔隙度 (ϕ_c^*) 与该层的生产率 (PPI) 之间存在着总的相关性。

12. 在斯特拉顿油田, 一个层的最大有效孔隙度 (最大 ϕ_c) 与该层的生产率 (PPI) 之间存在着一定的相关性。

参 考 文 献

1. Dewan, J.T.; Johnstone, C.W.; Jacobson, L.A.; Wall, W.B.; and Alger, R.P.: "Thermal Neutron Decay Time Logging using Dual Detection", SPWLA 14th Annual Logging Symposium, Lafayette, LA (May 6-9, 1973).
2. Wahl, J.S.; Nelligan, W.B.; Frentop, A.H.; Johnstone, C.W.; Schwartz, R.P.: "The Thermal Neutron Decay Time Log", Soc. Pet. Eng. J. (December, 1970), 365-379.
3. Clavier, C.; Hoyle, W.R.; and Neunier, D.: "Quantitative Interpretation of TDT Logs" paper 2658 presented at SPE 44th Annual Fall Meeting, Denver, CO, Sept. 28-Oct. 1, 1969.
4. Clavier, C.; Coates, G.; and Dumanoir, J.: "The Theoretical and Experimental Bases for 'Dual Water' Model for the Interpretation of Shaly Sands", paper 6859 presented at the 1977 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, CO, Oct. 9-12, 1977.
5. Wiese, H.C.: "TDT Log Applications in California" Soc. Pet. Eng. J. (February, 1983) 429-444.
6. Morris, R.L., and Biggs, W.P.: "Using Log Derived Values of Water Saturation and Porosity" (un-published), Schlumberger Well Services.
7. "Log Interpretation Charts", Schlumberger Limited, Ridgefield, 1979.
8. Coates, G.R., and Dumanoir, J.L.: "A New Approach to Improved Log-Derived Permeability", Schlumberger Well Services.
9. Locke, S.; Smith, R.: "Computed Departure Curves for the Thermal Decay Time Log" SPWLA 15th Annual Logging Symposium (June 4-7, 1975).
10. Antkiw, S.: "Depth of Investigation of the Dual Spacing Thermal Neutron Decay Time Logging Tool", SPLWA 17th Annual Logging Symposium (June 9-12, 1976).

附录“A”

用DDPN的 N_1-F_1 曲线求孔隙度

本附录提供了用 N_1-F_1 曲线求孔隙度 ϕ_{NF} 的一些背景资料, 并且讨论了在引用这些概念中所包含的经验误差。另外, 还简要地描述了在用双水模型计算 ϕ_{NF} 时而进行的计算机测井分析⁽⁴⁾。