

用电缆地层测试器评价储集层的改进

J.M.Gunter, Chevron Oil Field Research
C.V.Moore, Chevron Overseas Petroleum Inc.

孙济元 译
章兆洪 校

摘 要

从电缆多次压力测试器得到的垂直压力剖面,已成为更好确定储集层压力和流体分布的重要工具。讲述了为使制作垂直剖面的应变压力计和石英压力计的压力数据质量更好,数据采集的步骤和技术。本文提供了下井仪刻度检查,井场监测和一致性检查,在同一口井内和不同井内压力测量的标准化方法以及取样技巧。用例子来说明这些步骤和技术。

此外,用垂直压力剖面图的现场实例及这些图的解释,来说明其以下用途:

1. 确定流体接触面及在淡水环境里鉴别油层。
2. 从表面上是连续的油剖面里确定多个流体接触面。
3. 在超常态压力环境下鉴别多种压力体系。
4. 鉴别由于低渗透率或不渗透遮挡造成的不同的油层递减带。
5. 估计储集层条件下的流体性质。

引 言

电缆多次压力测试器一次下井可以进行次数不限的精确和比较准确的压力测量。在文献[1—7]中对这些压力测量在储集层和单井评价中的不同应用已经讨论过了。这些应用包括分析天然裂缝储集层,用脉冲测试技术来确立储集层的连续性,定性估价低渗透层的渗透率,油田的油藏管理,以及由垂直压力剖面来确定流体界面。因为多次压力测试器测量可以达到较高的精度和分辨力,这些应用是成功的。要获得高质量的压力数据的解释,需要特别注意数据采集的步骤和解释的方法。

为确保应变压力计和石英压力计的压力数据的质量更好,本文推荐了实际操作步骤和解释方法。按照推荐的方法,垂直压力剖面解释可以有把握达到1磅/英寸²的分辨力。经验表明,应变压力计和石英压力计的绝对压力读数都不能始终满足服务公司的精度要求,不如其分辨力那样可靠。推荐了把多次进行的压力测量组合起来的标准化方法。还介绍了一致性检查,以证实每次测量测量值都落在合理的范围内。当使用电缆多次压力测试器的绝对压力数据时,对这种误差要加小心,但是用其他压力测量数据应同样小心,甚至比用电缆多次压力测试器下井仪要更加小心。

用以说明推荐的数据采集方法的例子,也说明了在区分只产水的层和潜在生产层的应用。还有的例子突出了电缆多次压力测试器在饱和油气的长井段鉴别单个或多个油气柱,在

估价流体地下密度和在油田生产管理最优化的应用。因为本文只涉及电缆测试器压力数据，所以不讨论地层流体采样方法和流体采收率的解释。

电缆多次压力测试器的测量

服务公司的文献〔8—11〕对电缆多次压力测试器的下井仪结构和操作已有描述。这些测试器一次下井可在电缆定位的深度进行次数不限的地层压力测量（FP）。同一次下井还可以进行两次独立的地层流体采样。采样过程中，既可测量地层流动压力（FFP），还可测量起始压力（ISP）和最后关闭压力（FSP）。下井仪一脱离地层，测试器的压力计即暴露于井中，在每一次地层压力测量之前和测量之后泥浆压力的静水压头（HH）被记录下来。也可以在下井仪停留在井中的任何时刻记录泥浆压力的静水压头（HH）。

在电缆多次压力测试器测量中，有几种引起误差的因素，包括深度误差、压力计的质量、刻度步骤、下井仪故障，以及地层影响如增压作用。有些误差因素已被讨论过了，但是多半是从理论的观点来讨论的。

刻 度

每60到90天用高质量的静重测试器做应变压力计的例行的车间刻度，这对于获得精确的压力测量是必不可少的。做车间刻度时，应做足够数量的压力和温度测量，以确定被刻度的压力计的完整的压力和温度响应。图1所示为一张典型的刻度记录的例子。车间刻度记录应包括日期、压力计号码、下井仪的电子线路号码、测量条件。这些同其他测井下井仪的正常车间刻度是类似的，以后这些记录被用来作为对应变压力计的测量值进行压力和温度影响校正的基础。

应变压力计通常受温度的影响大，需要做温度校正。有些服务公司在测量过程应用自动校正，而有些则需要在测量后做手工校正。建议在应变压力计里装一个温度探测器，这样就可以提供压力计温度的直接的读数，用来做温度校正。

正如其他下井仪一样，在井场必须调节电缆测试器以重新确立静重刻度响应。另外，内部系统灵敏度检查在测量过程中要反复做，这对于保持适当的刻度响应是必须的。

电缆测试器的石英压力计是在制造时刻度的。用静重测试器的现场刻度是不可行的，因为这些压力计比静重测试器更精确。但是，温度校正对石英压力计来讲的确很重要，并且用静重测试器做例行检查将保证压力计的响应不随时间变化。

服务公司对它们的各个压力计规定了分辨力和精度允许误差。压力计的精度就是压力计的测量相对于静重测试器刻度的一致程度。精度允许误差确定不同压力计的预期的重复性。分辨力是压力计区分两个压力测量值的能力的量度。表1列出了典型的服务公司压力计的精度和分辨力允许误差。由于压力计质量不同和刻度步骤不同这些误差因公司而异。

除下井仪的刻度以外，建议在压力测量过程中另外提供质量控制信息，来确保下井仪内部的液压密封。用液压电机的速度或下井仪的液压作指标来监视下井仪的液压系统。

比较电缆测试和钻杆测试的压力

电缆测试器提供的垂直压力剖面通常比钻杆测试所能提供的更为详细和可靠。其可靠性

之所以比钻杆测试的梯度曲线大，主要因为采样范围大。还有，电缆测试器在储层的指定深度测压，而钻杆测试的压力计通常位于成串的井下测试仪器里，在要测试的储层的上方。因而在射孔段和钻杆测试里的压力计（深度）之间的流体的性质就有些不确定。

常常发现在共同压力系统里的几次钻杆测试的压力不能确定一个精确的流体压力梯度。图 2 用例子说明一般观察到的钻杆测试的地层压力的点子的分散情况。同电缆测试器的点子的比较。这些数据取自低渗透率的含气白垩储层。通过电缆测试器的点子划两条最好的拟合线显示合理的气和水的梯度和相当明确的气-水接触面。由三次钻杆测试得到的压力未能确定一个合理的天然气的梯度。电缆测试器和钻杆测试都曾用过石英压力计。图 3 中（以后还要讲到）由钻杆测试 2 和 3 B 的压力提供的天然气梯度同电缆测试器的压力梯度相一致。但是，钻杆测试 4 的压力测量值太高。图 4（后面还要讲到）显示电缆和钻杆测试的压力之间非常一致。三次钻杆测试的压力同电缆测试器的压力测量值确定的天然气梯度恰相符合。

建议的操作步骤

广泛使用电缆多次压力测试器形成了一套专门的操作步骤和技术，以获得质量好的压力测量，这些步骤如下面所列。除了标准操作步骤，如压力计刻度或深度控制以外，它们是：

1. 在井温许可时，用石英压力计和应变压力计一起测量，两种压力测量分开报告。如果全部测量数据可用，在解释时把应变压力计和石英压力计的压力进行标准化。不要在测量时把应变压力计标准化到石英压力计压力。
2. 在电缆测试器测量过程中，缓慢地向井内注入钻井泥浆，使井眼保持一个微小的泥浆溢流。这样可以防止井内液面波动引起静水压力误差。
3. 应记录和提供液压密封情况，以保证下井仪的可靠性。
4. 应在仪器在井内下行时记录压力。这将为压力计和电子线路响应温度和压力的增加提供时间，就象压力计刻度时那样，并且将减小温度和压力滞后影响。
5. 从地面到总测量深度在不同深度处记录泥浆静水压力，以得到完整的静水压力剖面。
6. 用微井径曲线和密度测井曲线来选择最佳的测压深度位置。
7. 测量过程中在井场监视并绘制静水压力和地层压力图，以使测点的分布最佳，并可发现不正常的测量而加以重测。用大比例尺绘图以适应压力计的分辨力。
8. 有时在同样深度重复压力测量，以提供一致性检查。
9. 在同一井里为多次测量而在某些相同的深度重复压力测量，来帮助标准化多次测量的测量值。
10. 为了明确确定水相和油气井段的压力梯度，在含水段和油气段的足够的采样是必须的。
11. 解释数据时，以电缆测井曲线相同的深度比例尺绘制地层压力剖面 and 静水压力剖面。测井曲线和压力剖面的比较将有助于解释。

应变压力计的压力和温度滞后

同石英压力计一样，电缆测试器的应变压力计同时响应温度和压力的变化。做应变压力

计的静重测试器刻度时,记录温度和压力的响应,该记录将在以后用来校正井下的测量。服务公司一般是记录在一定温度下随压力增加的静重刻度,然后增加温度并记录新的压力响应(总是增加压力)。应变压力计有温度和压力两种滞后效应。在静重刻度时,通过在一定温度下增加和降低压力或在一定压力下增加和降低温度而看出来。这些滞后效应可以很大,在测量时应使它尽量减小,方法就是使温度和压力总是增加来进行测量(也就是仪器下行时进行测量)。为进行适当的深度控制所必须的深度方向上的小的升降,对压力记录不会有明显的影响;但是深度方向上(向上和向下)改变一个大的井段能引起测量误差。

电缆测试器压力标准化

从顺序多次电缆压力测量得到的压力数据很少能精确重合绘在一垂直压力剖面上,应变压力计和石英压力计的压力数据都是这样。但是,在原先采样深度进行复制压力测量值可以使多次压力测量在同一井或不同井标准化。

同井中的压力数据标准化

图5所示为在同一井中两次电缆测试器测量的压力-深度剖面。每次测量有一条最好拟合线,得到相同的水梯度,但拟合线之间有10磅/英寸²(68.95千帕)的偏移。这是在压力计的精度允许误差范围内(18磅/英寸²)(124.1千帕)。把第三次测量的压力向下移动10磅/英寸²(68.95千帕)就得到一条如图6所示的标准化的剖面。在6100—6300英尺(1859.3—1920.2米)范围复制压力读数帮助标准化这两次测量。标准化以后,一个水层和三个分离的油层看得很明显。

不同井的压力数据标准化

在对若干井的压力测量标准化之先,绘出每一次测量的单独的地层压力和静水压力的剖面并作检查。异常的和增压的压力数据应去掉。图7是一个两口井的例子。把2号井的压力数据减小10磅/英寸²(68.95千帕),结果两口井的水层重合如图8所示。标准化以后变得明显了,2号井的最高点(油水界面以上)具有同1号井同样的石油梯度,代表在两口井中共同的油柱。

要强调一个注意事项,由产油层的井得到的压力数据可能反映可变的动态压力条件,导致非线性的和不连续的压力剖面。用电缆测试器分析产层将在油藏管理那一节讨论。

泥浆静水压力用于检验和校正压力计的压力

把不稳定或异常读数从泥浆静水压力的原始测量值中去掉以后,这些读数就可对深度作图,并适于确定井下泥浆压力梯度。建议用回归技术如简化长轴(RMA)来估算采样深度测量值和压力读数的误差。井下泥浆比重是井的压力和温度的变化历程的复杂函数,但是,在许多井里这些历程的影响不是最重要的,由泥浆静水压力梯度估计的井下泥浆比重可以认为是可靠的。在通常情况下,井下泥浆比重一般大于在地面测量的泥浆比重,主要由于井内泥浆循环一旦停止以后的重力分异作用。在所有电缆测试器测量时,井内泥浆液面应保持稳定,方法是缓慢向井内注入泥浆足以保持一稳定的溢流。电缆测试器压力计有足够的灵敏度探测出小到4加仑的淡水流失。

把井下泥浆比重梯度从地面投影到有意义的储集层段,将确定一个预期泥浆压力的上限。把地面测量的泥浆比重梯度从地面投影到储集层将确定一个预期的泥浆压力的下限。在图9

中表示出这些界限。观察的泥浆压力测量值应落在上述界限内。图9表示一口井里的这种一致性检查,观察的泥浆压力是在预期的范围内,而图10表示观察的泥浆压力大于最上限100磅/英寸² (689.48千帕)。在40多口井里做了这种一致性检查,40%以上的泥浆压力在合理的范围以外。一般讲,观察的泥浆压力位于上限以上。

另外观察到泥浆静水压力的异常偏差对应于地层压力测量中的异常。怀疑这些异常是由于仪器故障或灵敏度误差造成的。图11上见到的垂直压力剖面说明这个问题和一种答案。泥浆静水压头梯度(HH),等效于9.0磅/加仑(1078公斤/米³)泥浆,同实际测量的泥浆密度很吻合。在3712英尺(1131.41米)处,测压点的压力低于确定的梯度28磅/英寸² (193.1千帕),把HH点和地层压力点(FP)偏移28磅/英寸² (193.1千帕)使它们同HH梯度和水层梯度相符合。用深度误差来说明这个压力异常则太大。那样就要对静水压力校正59.6英尺(28.17米),对地层压力校正64.5英尺(19.66米)。这不是一个孤立的例子。用应变压力计测量这类异常是比较普通的,但用石英压力计也已见到。怀疑是一种暂时的压力计故障引起这类压力异常,但是这一点未能证实。

一个更复杂而不常见的用HH压力校正FP的例子示于图3(前面提到过)。一条最好的泥浆压力梯度线(实线)穿过浅的和深的HH点子,指示泥浆压力梯度为0.56磅/英寸²/英尺(0.0127千帕/米)(等效于10.8磅/加仑[1294.1公斤/米³])。这同地面测的10.5磅/加仑(1258.2公斤/米³)泥浆比重相当接近。从11900到13000英尺(3627.1—3962.4米)穿过数据点(虚线)的梯度等效于8.85磅/加仑(1060.5公斤/米³),是不正确的。把FP(第一次测量,圆圈)移动一个需要的量,校正HH值到最适合的泥浆静水压力梯度,从13646英尺到12270英尺(4159.2—3739.4米)显示一连续的0.16磅/英寸²/英尺(0.0036千帕/米)的天然气梯度。这条共同的天然气梯度线为第四次电缆测试器测量的三个地层压力所证实,它们确定了同样(未标准化)的压力梯度(点线)但高50磅/英寸² (344.74千帕)。钻杆测试的2、3B和4号的关闭压力也证实是一共同油藏。这大概是一个井下刻度“漂移”的例子。当仪器下行进行测量时,刻度从11700到12950英尺(3566.2—3947.2米)漂移,在12950英尺工程师重新刻度。本例说明,在测量过程中经常检查下井仪刻度的灵敏度的重要性。

鉴别多个油气压力系统

探井的电缆测井曲线数据常常指示出在一相当大的垂直距离上有几个饱和油气段,而当中无明显的水层。一个直接的问题就提出来了,这些油气段是单一还是多个油气柱。这个在经济上重要的问题,常常能用足够数量的电缆压力测量,建立每一层的可靠的压力梯度来回答。

前面提到的例子,图3,显示一系列含气砂层在很大一段剖面有一个公共的压力系统。但是,常见的情况是一系列短的相隔离的油气柱。图4(前面提到过)是一个例子,从11149到12720英尺(3390.1—3877.1米)碰到的所有砂层都是饱和气的。电缆测试器确定了五个分离的气层,压力范围很宽。从测井曲线分析只有一个气-水接触面是明显的。在这种超常态压力系统里其他四个气层,每一个明显有一个不同的气-水接触面。确定这些接触面将必须另打斜井。三个压力系统已为钻杆测试压力数据所证实。钻杆测试静止关闭压力也在图4表示出来。

在这口井里,当在11139英尺(3395.17米)钻进时,遇到气流,需要把泥浆比重加到9.6

磅/加仑 (1150.3 公斤/米^3), 后来在 11274 英尺 (3436.3 米) 加到 13.5 磅/加仑 (1617.66 公斤/米^3)。泥浆漏失到低压气层和井喷灾难的潜在危险在进行电缆测试器测量之前没有认识到。最高压和最低压气层的压差 2246 磅/英寸^2 (15485.6 千帕)。泥浆静水压力和气层压力间的最大压差在 11750 英尺 (3581.4 米) 是 2730 磅/英寸^2 (18822.7 千帕)。

图 3 和 4 显示出来的电缆测试器对油气柱的连续性和不连续性的分辨力, 目前用钻杆测试数据或其他方法是不可能有的。为建立可信的储集层流体的梯度所需的压力测量的深度采样频率, 用钻杆测试是不实际的。在前面讲的数例, 很好设计和解释电缆测试器测量可以提供油气-水接触面深度的基本细节, 并解答在体积储量计算中要涉及的是单一还是多个储集层的问题。

确定地下流体密度

许多垂直压力剖面精确地测量在油气层中的流体密度梯度, 在油气被产出以前。图 12 是图 6 垂直压力剖面最上部含油砂层的放大, 显示在确定地下流体密度时可能达到的精度。 $0.363 \text{ 磅/英寸}^2/\text{英尺}$ (0.0082 千帕/米) 的石油梯度是由 8 个压力数据点决定的, 与此相比较, 在储集层条件下实验室 PVT 分析导出的压力梯度是 $0.38 \text{ 磅/英寸}^2/\text{英尺}$ (0.0086 千帕/米)。下伏地层水压力梯度为 $0.425 \text{ 磅/英寸}^2/\text{英尺}$ (0.0096 千帕/米) 同计算的储集层条件下的淡水密度很一致。两条流体梯度线的交叉确定了在 5470 英尺 (1667.26 米) 的自由水面 (FWL)。在梯度线控制如此好的情况下, 认为地下流体密度比重新组合的样品的 PVT 测量更精确。很好确定的流体梯度对测井曲线分析也是有用的。导出的油气密度为密度测井分析提供了基本的数据, 特别在估计天然气饱和度时。

区分生产层

当用盐水泥浆钻井时, 在淡水储集层中油的探测是容易的, 在受盐水滤液侵入的侵入带把微电阻率测井响应同深电阻率测井的响应相比较。两种响应的差别在水层比在油气层大。这点可以从图 6 看到 (前面提到过)。但是, 这种方法并不总能区分可动油和不可动油。电缆压力测试器从一有连续水相的层里确定一个可能的产层能起很好的作用。

图 13 中 6618 到 6638 英尺这段, 测井曲线和岩心分析都指示有油, 电缆测试器数据指示这层产水。这一段的钻杆测试只采到地层水。

油藏管理

垂直压力剖面为油田开发和生产安排的最优化提供了宝贵的资料。在最初的生产开始以前或在注水工程开始以前取得一条储层条件的参考压力剖面是一种很好的油藏管理的做法。随后在新开发井中的多次压力测试器测量 (在下套管前测或在裸眼观察井中测) 可以同参考压力剖面进行比较。垂直压力剖面的差别反映油气生产造成的油藏压力的变化。这个资料对油藏模拟研究的油藏模型的设计是有用的。

图 14 为一口加密开发井的典型压力剖面, 储集层为厚的白垩油层, 压力剖面上有明显的

压力衰竭。主要产油层B1的当前地层压力(FP)大大低于原始地层压力。测试器用于没有确定的流体梯度的生产层时,应考虑电缆测试器的绝对压力测量的误差和生产过程的动力学特点。换句话说,对B1层的压力衰竭,不能具体到一个准确的磅/英寸²(千帕)单位,由于压力计的误差和没有线性压力梯度来评价单个的压力测量点。现在的视压力梯度(虚线)反映油层垂直渗透率和水平渗透率的分布。低渗透的A-2燧石质白垩层起部分遮挡作用把渗透产层B-1同A-1分开。在解释的测井曲线上,A-2段表现为低孔隙度-高水饱和度层。A-1层看到的衰竭可能部分由于在构造较高部位的井产气所致。B-2和下面地层的明显的高压力梯度说明垂直渗透率低,底水的压力支持有限。象图14所示那样的多口加密井的垂直压力剖面可以提供一個油田的三维的油藏压力分布。

结 论

1. 专门的操作步骤和解释方法更好地保证高质量的电缆多次测试器数据,以改进油藏压力分布的解释。
2. 电缆测试器分辨力的允许误差一般是在服务公司的仪器技术特性范围内,而精度允许误差常常被超过。
3. 电缆测试器的泥浆压力梯度可以用来标准化异常的下井仪器读数和下井仪灵敏度的漂移。
4. 以投影地面测量泥浆比重梯度和投影井下泥浆比重梯度为界限,由电缆测试器泥浆压力测量所确定的一个压力范围,可以用来检验测试器的观察压力。
5. 电缆测试器能有把握地测定地下流体密度。
6. 电缆测试比钻杆测试能提供更好的压力数据。但是,钻杆测试把流体取到地面,能更好反映其他储集层特性。
7. 电缆测试器垂直压力剖面能有效地确定淡水环境下的油气层,在长的连续油气剖面上把单一储集层同多个储集层分开,区分生产层和处于残余饱和度的油层,以及监视产油层的衰竭情况。

参 考 文 献

1. Drake, L. P.: "Application of the Repeat Formation Tests in Vertical and Horizontal Pulse Testing in the Middle Jurassic Brent Sands", paper EUR 270 presented in Europec, London, October, 1982.
2. Stewart, G. and Wittmann, M.: "Interpretation of the Repeat Formation Tester", paper SPE 8362 presented at the 54th Annual Fall Technical Conference and Exhibition, Las Vegas, September 23-26, 1979.
3. Cooke-Yarborough, P.: "Reservoir Analysis by Wireline Formation Tests: Pressures, Permeabilities, Gradients and Net Pay", The Log Analyst, vol. XXV, No. 6, pp. 36-46, November-December, 1984.
4. Stewart, G. and Wittmann, M. J.: "The Application of the Repeat Formation Tests to the Analysis of Naturally Fractured Reservoirs", paper SPE 10181 presented at the 56th Annual Fall Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, October 5-7, 1981.
5. Sethi, D. K., Forte, Vercellino, and Farli: "The Formation Multitester - Its Basic Principles and Practical Field Applications", paper CC presented at 21st Annual Logging Symposium of SPWLA, Lafayette, LA, July 8-11, 1980.
6. Meunier, D., Wittmann, M. J., Stewart, G.: "Interpretation of Pressure Build-up Using In-Situ Measurement of Afterflow", SPE Conference, Bahrain, 1983.
7. Raymer, L. L. and Freeman, P. M.: "In-Situ Determination of Capillary Pressure, Pore Throat Size and Distribution, and Permeability from Wireline Data", paper presented at SPWLA 25th Annual Logging Symposium, New Orleans, LA, June 10-13, 1984.
8. Schlumberger: "RFT Essentials of Pressure Test Interpretation", 1981.
9. Smolen, J.: "RFT Pressure Interpretation", Schlumberger Well Services, May 1977.
10. Wellex: "Multiset Testing", Brochure No. MS4002, 1979.
11. Gearhart, "Selective Formation Tester", Brochure No. WS253, Sept. 1978.
12. Stewart, G. and Ayestaran, L.: "The Interpretation of Vertical Pressure Gradients Measured at Observation Wells in Development Reservoirs", paper SPE 11132 presented at 57th Annual Fall Technical Conference and Exhibition, New Orleans, LA, September 26-29, 1982.
13. Sorelle, R. R., Jardioli, and Buckley: "Mathematical Field Model Predicts Down Hole Density Changes in Static Drilling Fluids", paper SPE 11118 presented at 57th Annual Fall Technical Conference and Exhibition, New Orleans, LA, September 26-29, 1982.
14. Mc Mordie, W. C., Bland, and Hauser: "Effect of Temperature and Pressure on the Density of Drilling Fluids", paper SPE 11114 presented at 57th Annual Fall Technical Conference and Exhibition, New Orleans, LA, September 26-29, 1982.
15. Bishlaivi, M., Moore, R. L.: "Montrose Field Reservoir Management", EUR 166 presented at Europec, London, October 1980.
16. Bath, P. G., Fowles, W. N. and Russel, M. P.: "The Brent Field, A Reservoir Engineering Review", EUR 164, presented at Europec, London, October, 1980.
17. Stewart, L.: "Piper Field: Reservoir Engineering", EUR 152, presented at Europec, London, October, 1980.
18. Nadir, F. T.: "Thistle Field Development", EUR 165, presented at Europec, London, October, 1980.
19. Steward, G. and Wittmann, M. J.: "Well Performance Analysis: A Synergetic Approach to Dynamic Reservoir Description", paper SPE 10209 presented at the 56th Technical Conference and Exhibition, San Antonio, October 5-7, 1981.
20. Smolen, J. and Litsey, L.: "Formation Evaluation Using Wireline Formation Tester", SPE paper 6822 presented at 52nd Annual Fall Technical Conference and Exhibition, Denver, CO, Oct. 9-12, 1977.
21. Stewart G., and Wittmann, M. J.: "The Interpretation of Distributed Pressure and Flow Measurements in Produced Reservoirs", paper EUR272 presented at Europec, London, 1982.
22. Pelissier-Combeacure, Pollock, J., and Wittmann, M. J.: "Applications of the Repeat Formation Tester in the Middle East", 1979 at Middle East Oil Technical Conference, Bahrain.

表 1 电缆多次测试器标准压力计的技术特性

压力计类型	精 度	分 辨 力
应变压力计	0.18% 满刻度	< 1 磅/英寸 ²
石英压力计	0.025% 满刻度	0.01 磅/英寸 ²
Amerada 压力计	0.2% 满刻度	0.5% 满刻度

① ELECTRONIC NO. : 70559
 PANEL NO. : 70458
 TRANSDUCER NO. : 93387
 TOOL HIGH : 7453
 TOOL LOW : -0048
 TESTED BY : WALKER
 BASE : WNAB
 DATE : 26.6.85

② TEMPERATURE °F

PSI	50	100	150	200	250	300
0000	-0002	-0003	-0005	-0011	-0019	
1000	1000	0998	0997	0992	0986	
2000	2006	2005	2003	1999	1993	
3000	3008	3008	3006	3003	2997	
4000	4008	4008	4006	4002	3997	
5000	5005	5005	5003	5000	4995	
6000	6000	6001	6000	5996	5993	
7000	6996	6997	6995	6992	6990	
8000	7992	7992	7991	7988	7986	
9000	8987	8987	8986	8984	8983	
10000	9982	9983	9982	9980	9980	

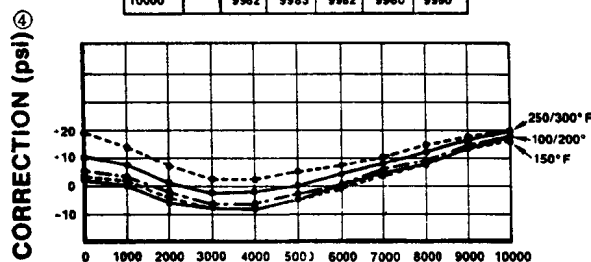


图 1 电缆测试器的静重刻度记录和温度校正图版

① 电子线路筒号码: 70559
 面板号码: 70458
 换能器号码: 93387
 下井仪高: 7453
 下井仪低: -0048
 测试人: Walker
 基地: WNAB
 日期: 85.6.26

② 温度 °F; ③ 压力 (磅/英寸²); ④ 校正量 (磅/英寸²)

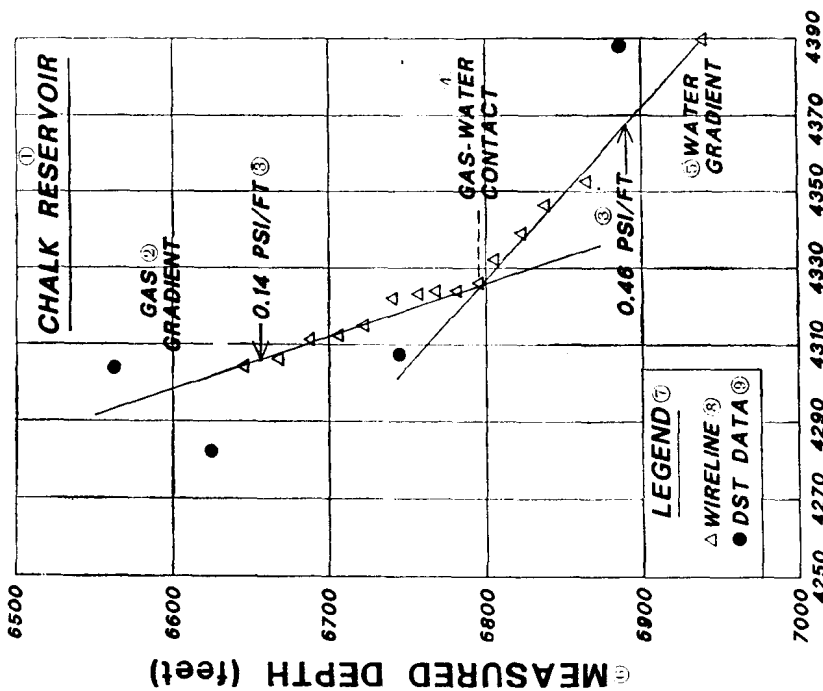


图 2 比较电缆测试和钻杆测试的压力
(QUARTZ GAUGE)

① 白垩储集层；② 天然气梯度；③ 磅/英寸²/英尺；④ 气-水接触面；⑤ 水梯度；⑥ 测量深度（英尺）；⑦ 图例；⑧ 电缆测试器；⑨ 钻杆测试数据；⑩ 储集层压力（磅/英寸²）（石英压力计）

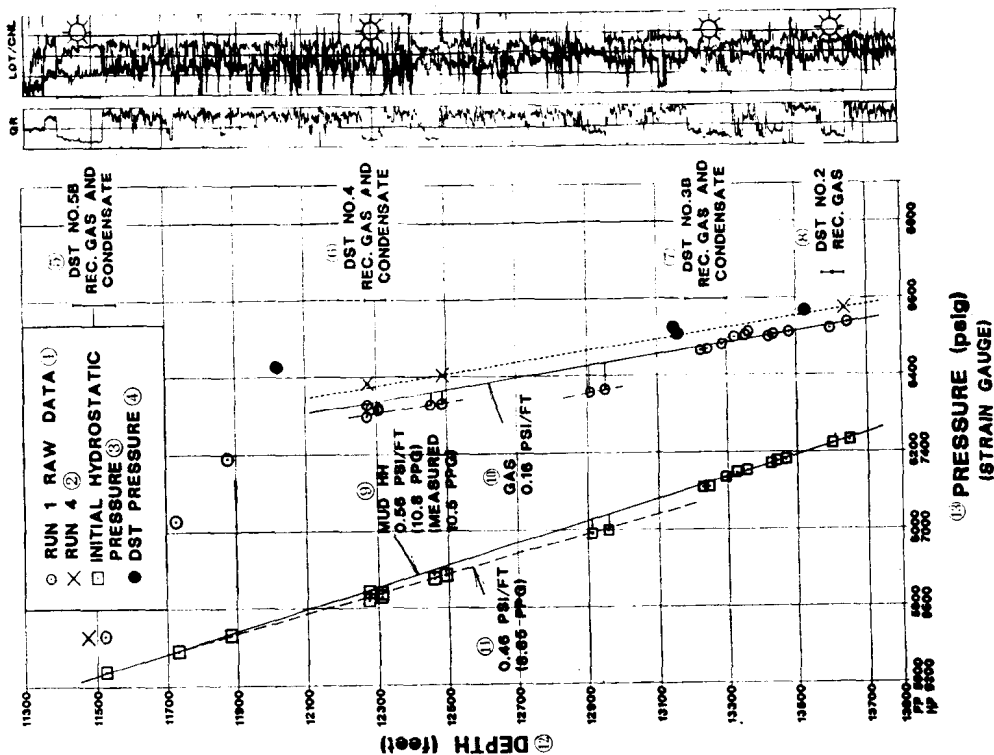


图 3 用泥浆压力梯度校正刻度漂移，显示出长的连续天然气柱

① 第一次测量的原始数据；② 第四次测量；③ 原始静水压力；④ 钻杆测试的压力；⑤ 钻杆测试器（5 B）记录的天然气和凝析油；⑥ 钻杆测试（4）记录的天然气和凝析油；⑦ 钻杆测试（3 B）记录的天然气和凝析油；⑧ 钻杆测试（2）记录的天然气；⑨ 泥浆的静水压力头 0.56 磅/英寸²/英尺（10.8 磅/英寸²/英尺）；⑩ 天然气的测量值为 10.5 磅/加仑；⑪ 天然气的测量值为 0.16 磅/英寸²/英尺；⑫ 0.46 磅/英寸²/英尺（8.85 磅/加仑）；⑬ 深度；⑭ 压力（磅/英寸²）（应变压力计）

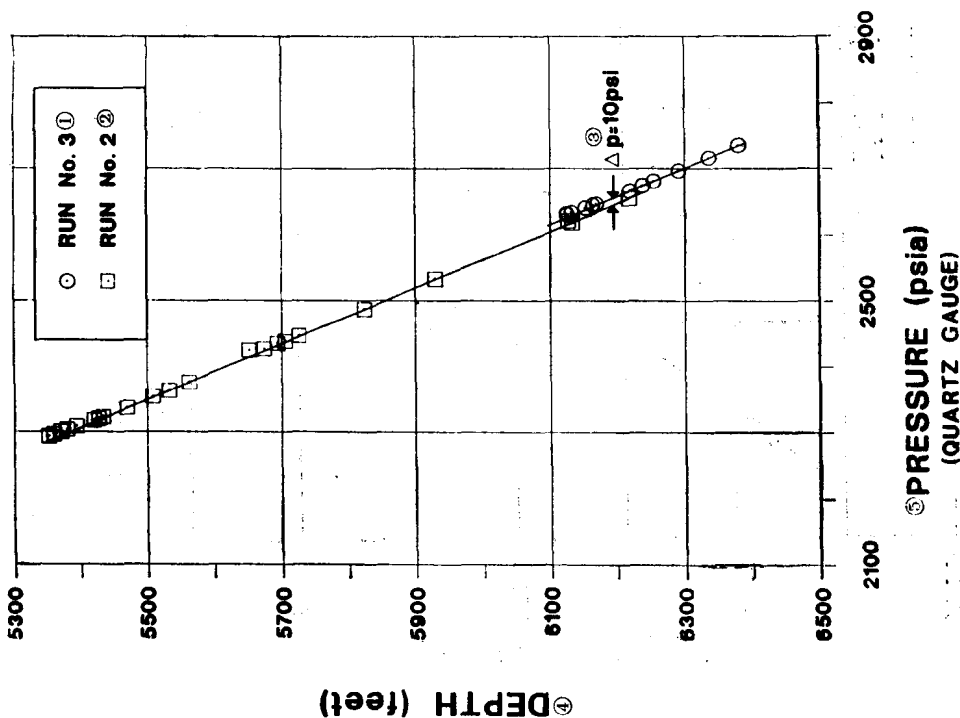


图 5 在相同井中测试器测量的未标准化的压力剖面
①第三次测量；②第二次测量；③ $\Delta p=10$ 磅/英寸²；④深度（英尺）；
⑤压力（磅/英寸²）（石英压力计）

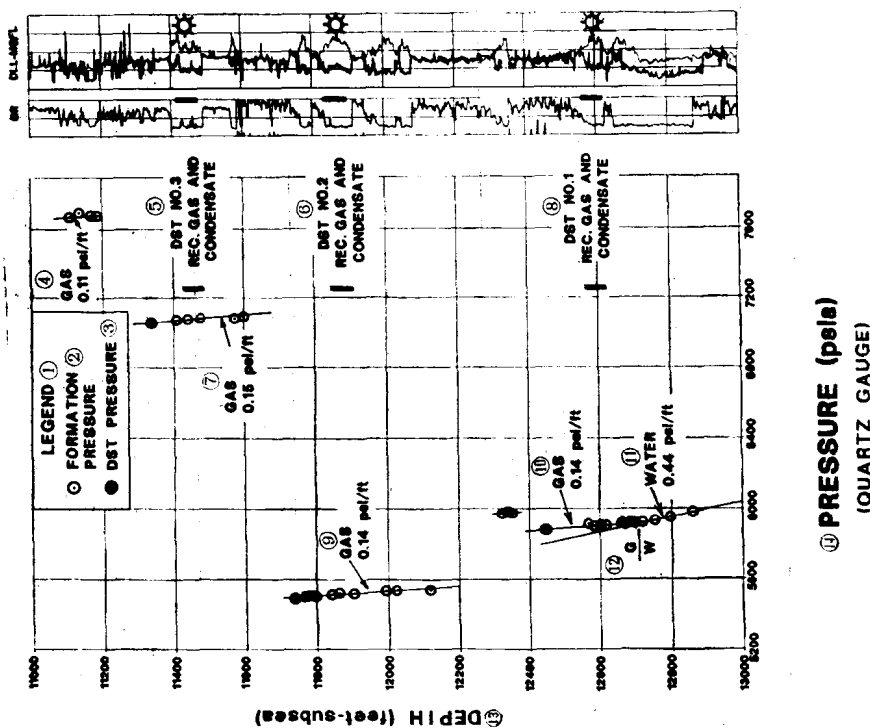


图 4 压力剖面鉴别五个分离的气层

①图例；②地层压力；③钻杆测试压力；④天然气 0.11 磅/英寸²/英尺；⑤钻杆测试（3）记录的天然气和凝析油；⑥钻杆测试（2）记录的天然气和凝析油；⑦天然气 0.15 磅/英寸²/英尺；⑧钻杆测试（1）记录的天然气和凝析油；⑨天然气 0.14 磅/英寸²/英尺；⑩天然气 0.14 磅/英寸²/英尺；⑪水 0.44 磅/英寸²/英尺；⑫天然气 0.14 磅/英寸²/英尺；⑬深度（英尺-海底）；⑭压力（磅/英寸²）（石英压力计）

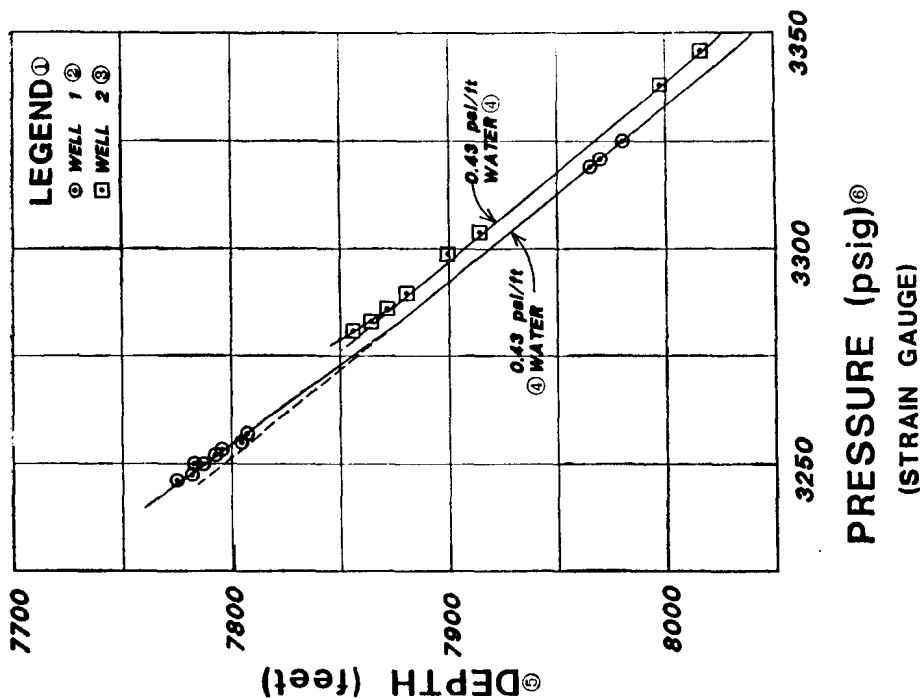


图 7 两口井的未标准化的压力剖面
 ①图例；②1号井；③2号井；④0.43磅/英寸²/英尺，水；⑤深度（英尺）；⑥压力（磅/英寸²）（应变压力计）

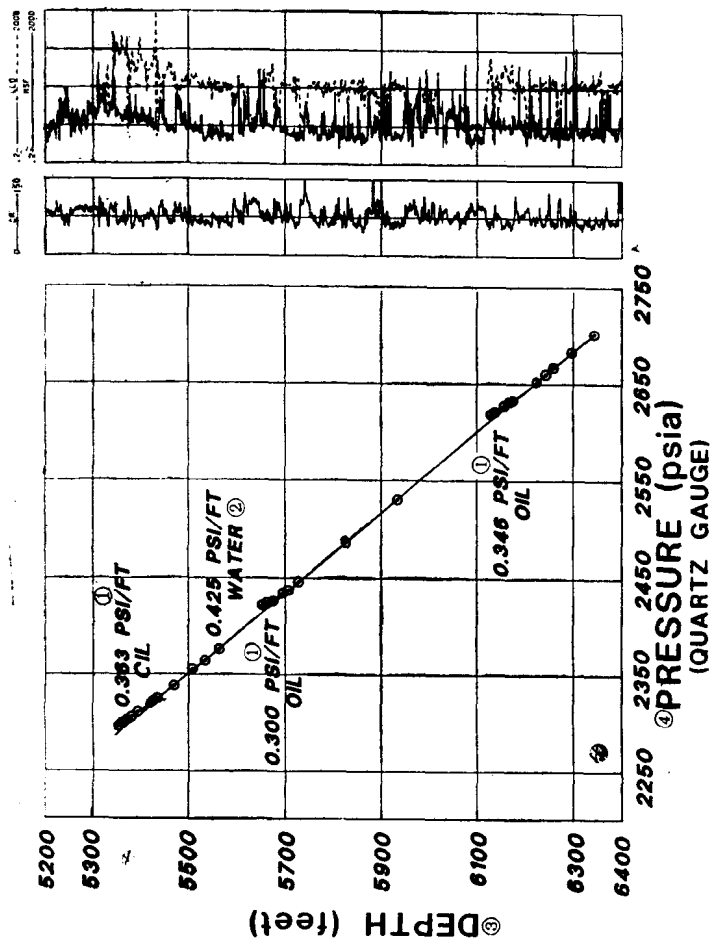
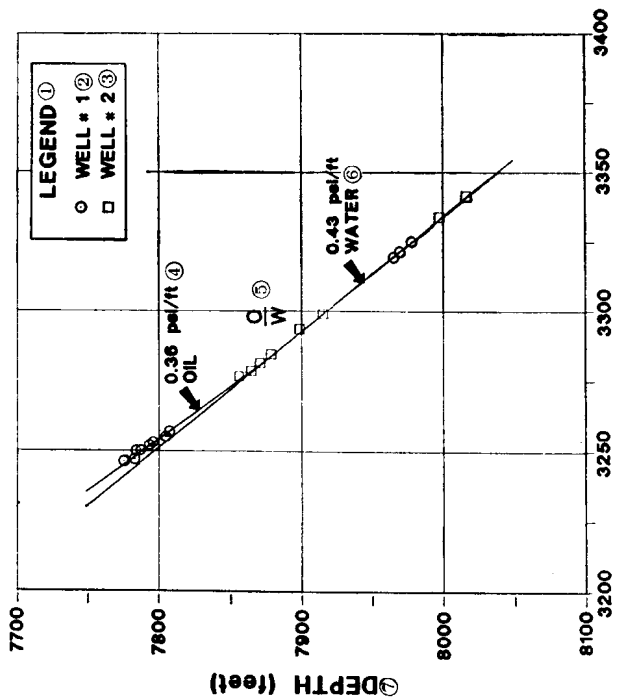


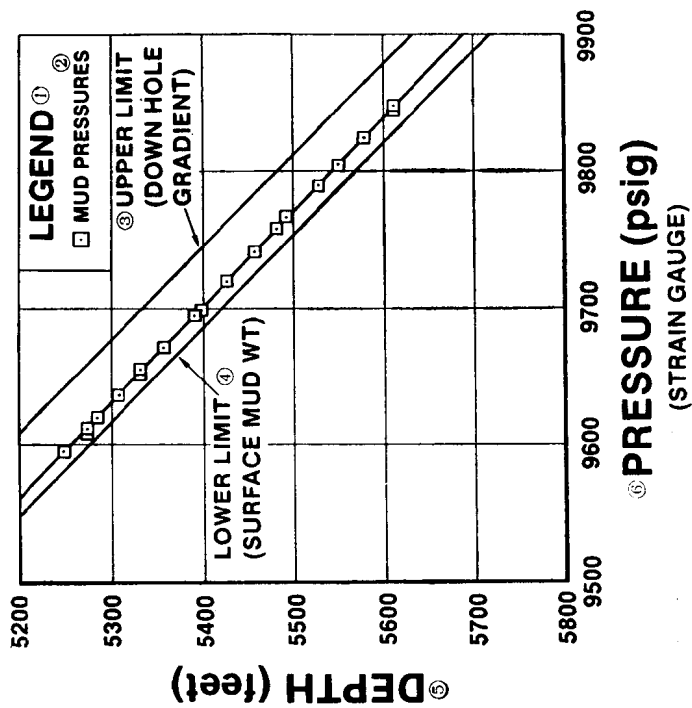
图 8 在相同井中测试器测量的标准化的压力剖面
 ①磅/英寸²/英尺，油；②0.425磅/英寸²/英尺，水；③深度（英尺）；④压力（磅/英寸²）（石英压力计）



⑤ PRESSURE (psig)
(STRAIN GAUGE)

图 8 两口井的标准化压力剖面

①图例；②1号井；③2号井；④0.36 磅/英寸²/英尺，油；⑤油/水；
⑥0.43 磅/英寸²/英尺，水；⑦深度（英尺）；⑧压力（磅/英寸²）（应变压力计）



⑤ PRESSURE (psig)
(STRAIN GAUGE)

图 9 一致性检查表明绝对压力是合理的

①图例；②泥浆压力；③上限（井下梯度）；④下限（地面泥浆比
重）；⑤深度（英尺）；⑥压力（磅/英寸²）（应变压力计）

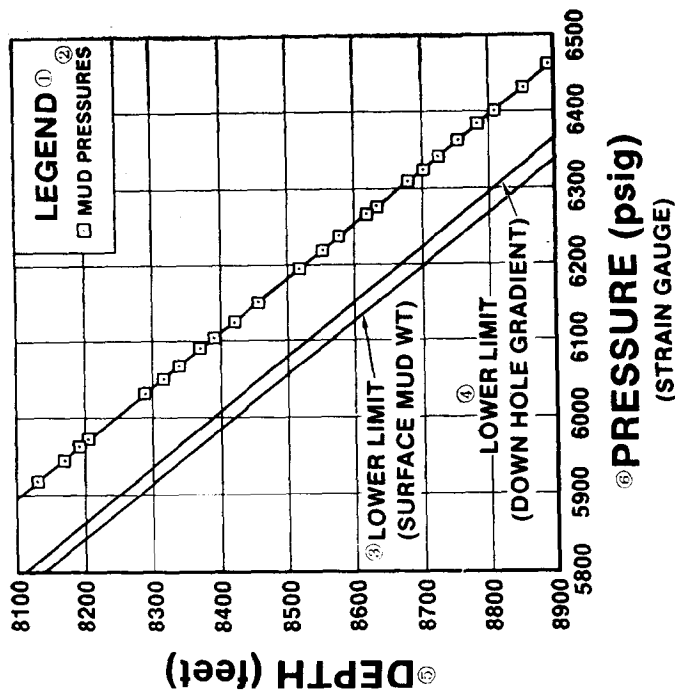


图 10 一致性检查表明绝对压力至少高100磅/英寸²
 ①图例；②泥浆压力；③下限（地面泥浆比重）；④下限（应为上限——译注）（井下梯度）；⑤深度（英尺）；⑥压力（磅/英寸²）（应变压力计）

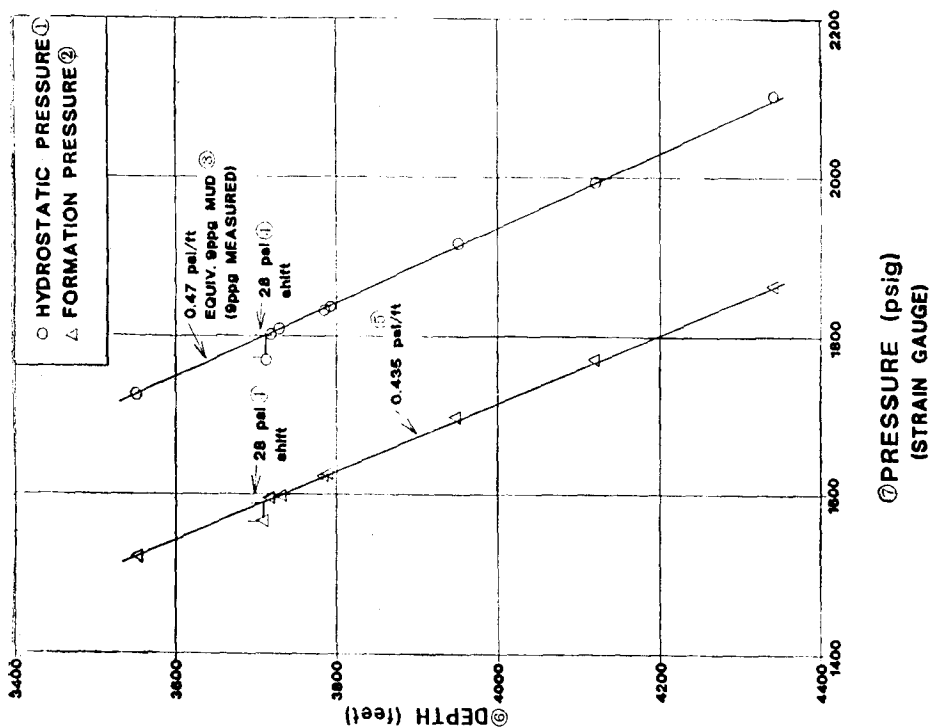
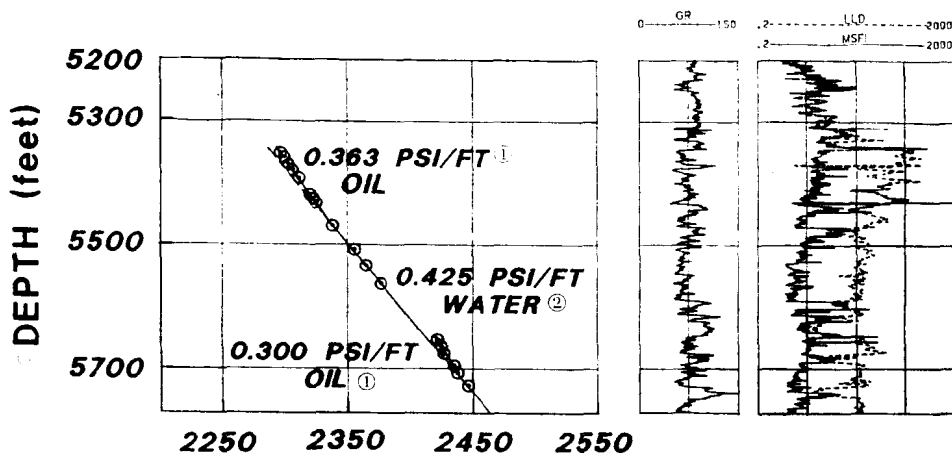


图 11 泥浆压力梯度用来校正异常压力读数
 ①静水压力；②地层压力；③0.47磅/英寸²/英尺等效于9磅/加仑泥浆（测量值9磅/加仑）；④偏移28磅/英寸²；⑤0.435磅/英寸²/英尺；⑥深度（英尺）；⑦压力（磅/英寸²）（应变压力计）



④ PRESSURE (psia) (QUARTZ GAUGE)

图 12 压力剖面确定地下流体密度

①磅/英寸²/英尺，油；②磅/英寸²/英尺，水；③深度（英尺）；④压力（磅/英寸²）（石英压力计）

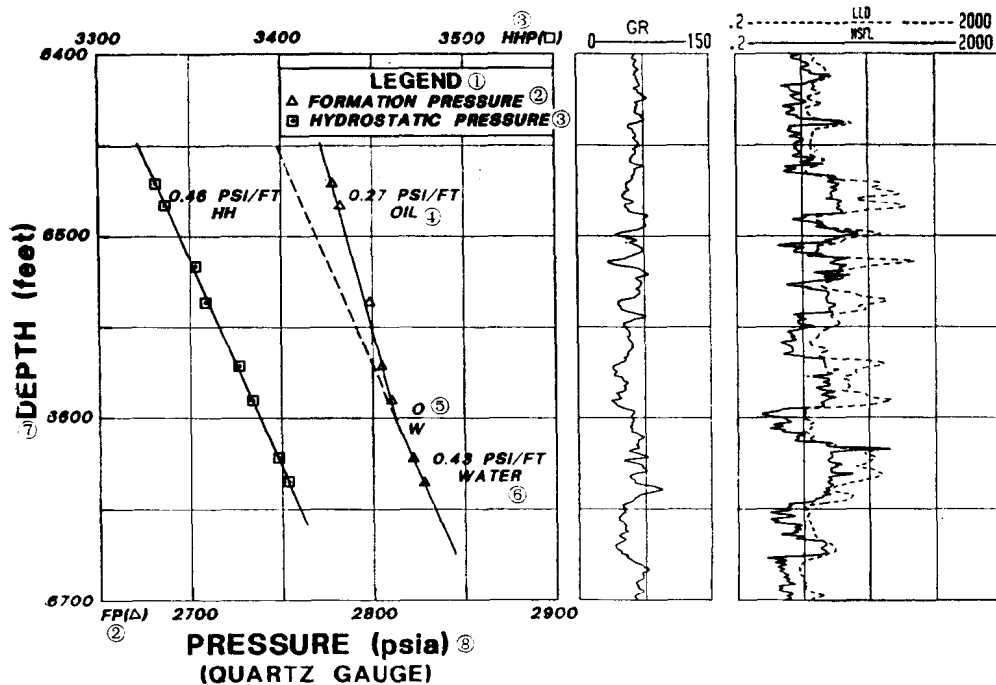


图 13 当产水时压力剖面识别可能的产油井段

①图例；②地层压力；③静水压力；④磅/英寸²/英尺油；⑤油/水；⑥磅/英寸²/英尺水；
⑦深度（英尺）；⑧压力（磅/英寸²）（石英压力计）

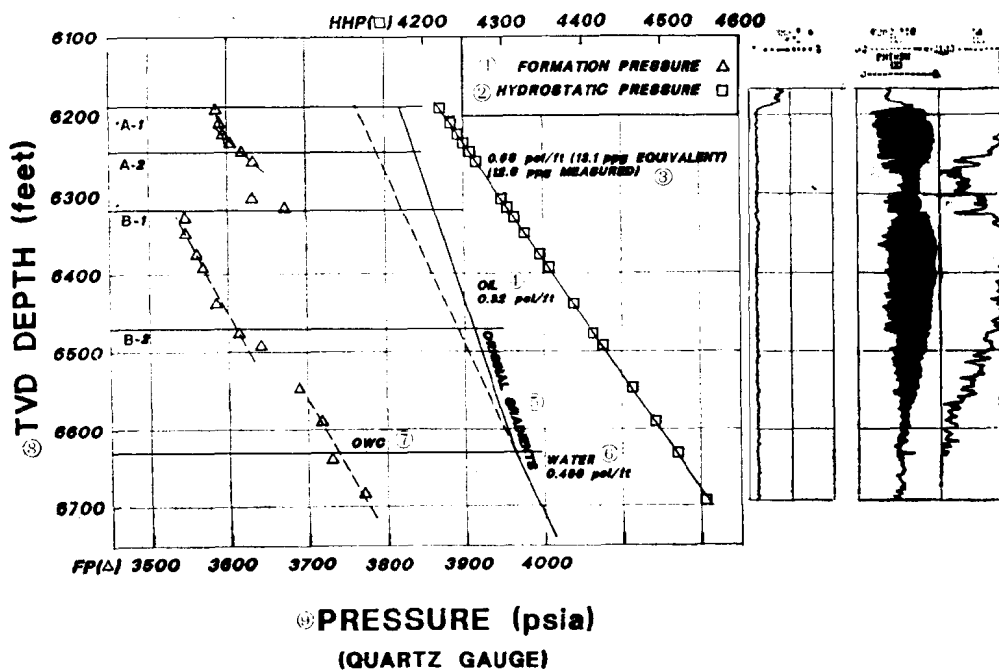


图 14 北海白垩产层的压力剖面显示出渗透率的分布

①地层压力；②静水压力；③0.68磅/英寸²/英尺（等效13.1磅/加仑）（实测12.9磅/加仑）；④油，0.32磅/英寸²/英尺；⑤原始梯度；⑥水，0.466磅/英寸²/英尺；⑦油/水接触面；⑧垂直真深度（英尺）；⑨压力（磅/英寸²）（石英压力计）