

剩余油饱和度的测量和注入监测技术

E.C.Thomas, J.E.Richardson, Shell Oil Co.

M.T.Shannon, Shell Development Co.

M.R.Williams, Shell Oil Co.

章兆洪 译

尚作源 校

前言

这是一个熟悉的题目。几位有相当丰富经验的作者 (Wyman, Bond和Elking⁽¹⁻³⁾) 详细地报道过这些问题。我们选这个题目不是重复他们的工作, 只不过以他们的工作为基础。尤其是较早的作者们⁽⁴⁻⁹⁾, 对专门技术作了充分的说明。因此为了大大缩短这篇文章, 我们只是广泛涉及各种方法而不是论述专门的方法。读者可以参考上述作者提出的要点来研究专门方法。但是我们希望与你分享关于方法论方面的不同观点, 并提供有用的结论和指导原则。

剩余油饱和度的测量

引言

三次采油方法的设计、评价和实施, 取决于在该方法应用之前和之后对于地层含油饱和度的了解。成功或失败由经济上小的变化所决定。在油价不稳定的现今趋势下, 准确测量油层中现有的含油量, 从来没有象现在这样关键。

当发现油层时, 通常认为饱和度的分布处于重力-毛细力的平衡状态, 即流体动力平衡状态。把油层发现时的含油饱和度定义为原始含油饱和度 ($S_{o,i}$)。这可用图1来表示, 它是含油、气、水岩石的典型毛细压力曲线。在油层递减期间的任何时候其含油饱和度定义为剩余油饱和度 (ROS), 它的变化范围从0到 $S_{o,i}$ 。残余油饱和度 ($S_{o,r}$), 定义为不可动油的饱和度, 即在油层条件下油的相对渗透率变为零处的饱和度。 $S_{o,r}$ 可以是强化采油即注水、化学驱或混相驱之后残留的。 $S_{o,r}$ 是ROS的一种特殊情况。

对于制订进一步的采油计划, 油层中剩余的油量是关键, 其空间分布(横向和纵向), 也是重要的。确定剩余油储量的数量及分布非常困难, 油层在地质上是复杂的, 产油机理是复杂的, 造成的流体分布也是复杂的。储量计算要求的精度是能够允许的风险的函数。对于一次开发井, 要证明一口井的完井是正确的, 知道有充足的油通常也就够了, 精度可能比较低。对于考虑进行三次采油的油层, 储量计算的精度有更加严格的要求, 因为最初的投资可能非常高, 确定ROS所用的各种技术的数目取决于对精度的要求。对要求高的精度, 现有技术比较少。而且这些技术通常要求的工程技艺较高, 费用较大。没有单一方法能够处理所有的情況, 我们必须从技术库中选择在成本上是可行的方法, 这些方法符合油层情况和精度的要求。

必须测量什么？

假设要求的是ROS数值。在大多数地层评价技术中，我们不能直接测量油层中现存油量的数值，应用间接方法，通过测量物理性质得到油的含量。

一单位体积地层至少包括岩石骨架、水，希望还有油，还可包括天然气和混合的矿物。岩性、孔隙度和含油饱和度或含水饱和度对于所有计算油层现存油量的方法都是重要的主要特性和参数。因为其中任何一种都不能在地层中进行独立和直接的测量，至少存在三个未知量，要求三个与这些被测特性参数有关的方程式。此外，各种地层组分的次要物理性质必须知道，几个用不等式表示的物理限制条件（ $0 \leq \phi \leq 1$ 等）必须满足。通常岩石的物理性质在更大程度上是取决于各组分的相对体积，由此引出的问题通常是不够明确的。因此我们常常采用该系统的物理响应模型，这个系统包含了由地层结构和组分所决定的次要参数。

例如阿尔奇公式⁽¹⁰⁾

$$S_w = (\phi^{-m} R_w / R_t)^{\frac{1}{n}}$$

它与含水饱和度 S_w 、孔隙度 ϕ 和测量的电阻率 R_t 有关，而且包含三个次要参数，要确定含水饱和度必须首先知道这三个参数。地层水电阻率 R_w 、岩性指数 m 和饱和度指数 n 是岩石/流体系统所必需的。地层水电阻率是一种流体特性参数， m 取决于孔隙的几何形状， n 决定于导电流体在孔隙空间的分布状况。其他公式也有类似的参数。这些表征流体性质、矿物含量和孔隙几何形状的参数称之为次要的地层特性参数。

次要特性参数的测量使含油饱和度的评价复杂化，变量的数目大大增加。主要参数和次要参数之间的许多关系是经验性的，而且关系的本身有限制性的假设。为了处理这些障碍必须：

1. 建立一个岩石/流体系统的概念。
2. 用数学方法建立该系统的模型。
3. 在测定ROS的时候测量次要特性参数。

何时测定 ROS ？

当制订经济计划或作业计划需要ROS数值时，通常测定该值。但是有这样的時候，即在油田开采期间，能够获得对将来确定ROS是很重要的数据。在开发初期和打加密井期间，打替换井、注水井或补充注入井的同时，或者当修井以便恢复生产的时候，我们应该考虑为将来评价油气含量获取数据。测量代表整个生产区域的数值同样是重要的，因此我们需要很好了解油田目的区域的地质、储层特性和岩石物理性质。

因为每一储集层有不同的地质特点和油层生产特性，最好是将油层开采早期收集的数据和接近经济限度时收集的数据结合起来。早期测定油层潜在产量，对于制订采油计划和取得对ROS的认识都是重要的。我们不应落入这样的陷阱，即节省短期内收集数据的款项。应该在油层开采早期就确定所需的长期数据，并制订一个随着工作进行获取这些数据的计划。

何处测量 ROS ？

测量ROS的井（或一些井）的几何位置很难决定。我们要使井数最少，又必须具有流体在油层中的分布图。第一步是收集现在的储层数据、地质数据和岩石物理数据，并估计流体

分布。当然数学模拟可能会有帮助。

请记住, 流体分布可以是动态的。在发现时油层也许接近于平衡状态, 但是产油期与油层达到平衡所需的时间相比是短的, 当我们决定测量ROS时, 油层中的流体可能处于动态状态。因此此时从一个位置的一口井得到的数据不足以代表油层。

下面是一个复杂但并非典型的饱和度分布的例子。最初是饱和油的地层, 由于综合衰竭、重力泄油和水侵, 经生产使压力低于原始泡点压力。如果我们假定在油层中只有一种岩石类型 (非常不可能), 饱和度沿油层纵向剖面的分布可用图2a和2b中的毛细压力曲线来代表。图2a表示原始饱和状态, 图2b表示生产一些油之后的情况 (如果油层在地质上只是稍微复杂些, 那么水侵将不均匀, 重力泄油不规则, 毛细压力曲线差别相当大。这就造成油层中含油饱和度在空间的分布比图2b更为复杂。两口邻近井可能遇见不同的沉积环境和不同的岩石类型, 造成的ROS分布可能非常不同。即使是均匀岩石, 井距将影响水侵的均匀性以及生产率, 因而影响ROS)。

还是让我们回到图2b所示的简单情况。饱和度的分布有四个范围, 用①至④加以识别。①和②区是气顶膨胀带, ③和④区表示水侵带, 可动流体相显示在右边。因为油层压力低于原始泡点压力, 在气-油接触面以下的油相中可能充满不动的气体。让我们更详细地讨论每一个带。

①带是次生气顶, 当油采出和压力降至泡点压力之下时形成的。横向和纵向渗透率、气-油毛细压力、油层压力、油的P-V-T特性、层理和地层倾角是控制地层和次生气顶位置的特性参数。在高渗透率的均匀地层, 气-油接触面基本上是水平的。但是在生产井周围压力降低, 可能使气体从气-油接触面向下锥进, 产生局部异常。在低渗透率或成层的油层, 可以存在很多局部的气-油接触面。测定ROS的设计应包括气顶附近可能存在的可动气和不动气饱和的状态。

②带表示在重力作用下, 由于薄膜状油渗流可能减小次生气顶中的含油饱和度。这是一个缓慢的过程, 只有在含有低粘度石油的高渗透率储集层这才是重要的。但是一个重要特征就是含油饱和度是连续变化的。

③带是由于水的驱替作用使含油饱和度降低的区域, 造成渗吸或毛细捕集残余油, 我们称残余油为 S_{or} 。这是“典型的三次采油目标”, 我们通常承担测量任务的对象。应该记住, 因为是低于泡点压力, 事实上这个非润湿相可由 S_{or} 和捕集的气相组成, 在典型的情况下, 气相有5—10%孔隙体积^[11]。在这个带, 任何测定ROS的设计都必须考虑这个含气饱和度和。

④带表示在高度亲水的岩石, 油层注水的残余油饱和度低于毛细捕集特性预测的数值。由于捕集气相, 含油饱和度部分降低^[12]。然而当岩石有混合的或中性的润湿性时, 最大的影响来自油层中的粘滞力, 主要是毛细管力^[13, 14]。混合润湿或油湿润的岩石, 在重力作用下排油也会引起这种含油饱和度的降低^[15]。

上述流体分布的讨论说明, 甚至在地质上简单的情况下, 我们也不应指望ROS的测量是简单的。我们不能随意挑选一口井并确定一个ROS值来代表整个油层。地质的复杂性、地层的不均匀性、动态储层条件加上采油机理, 选择测定ROS的井显而易见是困难的。显然应该了解从最上界面到最下界面的流体分布情况。因为油层厚度常常小于油气柱的净高度, 为了研究整个油气柱需要在一口以上的井进行测量。从区域来看, 出现断层、相变、不整合、岩

盐或其他蒸发岩、大的含水层或者注水驱扫不均匀都会影响饱和度的分布。显然在何处对油层采样的问题是三维的问题。

测量ROS的井可能有与它们位置有关的其他问题。生产井和注入井周围的压力梯度会干扰流体的流速，并可能产生非代表性的饱和度。在一个溶解气驱油藏的生产井，不应选作ROS的测定，因为即使关井一段时间，在井眼附近仍然可存在异常高的气相饱和度。生产井附近的流体运动会影响测量ROS的井下专门技术，ROS的测量有赖于专门的注入方法。在理论上，精确的ROS测量必须在ROS稳定的情况下进行。实际上这可能需要钻加密井或是应用没有目的层完井的井，或者关闭邻近的井。其中没有一个能保证静态的ROS条件。

在何处测定有意义的ROS值和流体分布是一个非常困难的选择。最佳计划应包括下列步骤：

1. 综合地质、岩石物理和储层的数据，加上合理的预测技术以估计岩石性质、流体分布和流体运动。
2. 应用这些数据，在油层中选择会得到最多信息的ROS测量位置。
3. 如果需要，修正流体分布的设想。
4. 选择另外的数据采集点，填补结果中的空白部分。

如何测量ROS？

有许多测定ROS的方法。这些方法提供的结果都有误差范围，对于一个特定情况，可能符合要求或者不符合要求。在这节将简要讨论可采用的测量ROS的方法，每种方法在别处都已详细描述了^[2]。我们还要讨论在这些方法中的随机误差和系统误差，最后推荐适合特定条件的一些方法。

表1列出了在油层的各种饱和状态下各类基本方法的可应用性。无疑还有其他的方法。任何一种方法的应用都会因油层流体性质、岩石性质或井眼机械条件而受限制。当孔隙空间中存在三相（二种液体，一种气体）时，出现了最困难的情况。事实上用于三相的组合测井方法只限于在套管井应用。甚至在依靠两相技术的时候，也必须保证孔隙空间没有气体。最后，当应用包含流体注入地层的任何技术时，必须敏锐觉察到流体会吸收所捕集的气体，或者吸收所捕集的残余油中的轻质油气，使残余油在地层中的含量变少。如果需要注入大量的流体（几十个孔隙体积）这种作用是明显的。

如果我们用所有可利用的技术测定每一油层的ROS，显然将浪费许多技术力量。从理想上来说，我们希望对每一油层情况使用一种方法，而且有满足现在和将来所需的精度。但是这个目标大概达不到，有三个主要问题：

1. 测定ROS之前我们从来不知道饱和情况。可以把一些方法组合起来保证良好的测定结果。
2. 如果我们从来未在一个特定油层进行测定ROS的试验，那么我们不知道流体和岩石性质对工作是否适合。
3. 可能有不能确定数值的系统误差。

鉴于这些问题，一个特定油层的ROS测定起初是复杂的，随着经验的增加而简化。

除其他问题之外，我们必须考虑每一技术存在的系统误差和随机误差的大小。两类误差都取决于流体和岩石的性质以及进行测量时的机械条件。因此为了准确地测定ROS，我们对

油层必须有相当多的了解。

系统误差：系统误差在大小上是单方向的，它是由不利的试验条件产生的。虽然随机误差分析为我们提供了在最好的测定中能有多大的可靠性，然而系统误差使最好的测定不准确。我们希望能选择一个系统误差最小的ROS技术，但是更重要的是应该在实际测量期间收集数据，以便证明没有系统误差。为了便于讨论，我们将系统误差分成如下的范围：

污染

重现

刻度不准确

井眼影响

不均匀性

代表性

污染：由于钻井活动或从井里生产流体，改变了油层流体分布，出现污染。这就将非原有的流体引入这个系统，该流体的数量通常不知道。大规模污染意味着必须用容积法来计算水侵或者油气损失、或者越过断层的水。小规模污染的出现是由于钻井流体的侵入，或者由于压力梯度使气或水锥进，进入井眼区域。

在井内或从井眼测量的每一个结果几乎都受污染。钻井流体进入岩石的不同程度取决于泥浆和岩石的性质。这种侵入会改变油、气和水的饱和度，改变润湿性，与岩石或地层流体起化学反应，并会使悬浮的泥浆固体颗粒沉积，很难准确计算这种影响。这个事实限制了测定的精度。如果侵入作用能够避免，很多ROS测定技术能够得到改善。

重现：在实验室模拟地层中的过程是困难的，因为油层状态不可能在实验室重现。我们只有部分了解油层的特性，因此对受污染样品进行测量并试图推断未受污染的油层特性，这样会陷入恶性循环。但是为了进行这些测量，我们必须进行复原，因此假设实际上要测定的某些性质。在实验室重现流体压力、岩石应力状态、温度、润湿状态、油层的流体、相的关系、流体饱和度和流体的流量等常常是完全不可能的，因为我们不知道地层的条件。错误地假设油层条件，在将实验室测量结果应用到地下的地层时会产生系统误差。

不准确刻度：刻度不准确意味着在工程评价中有误差，或者是一种无法控制的情况。将模型和仪器刻度到标准条件和数值应该是经常做的。不正确选择模型会得出错误结果。例如对一个泥质砂岩含油层，应用阿尔奇电阻率模型而不是用韦克斯曼-斯米茨模型⁽¹⁾会使计算的石油储量相当低。另外，作假设时必须知道限制条件，避免错误地外推。忽视不一致的数据或者将经验数据的趋势外推，会造成刻度误差。

井眼影响：井眼、套管、水泥或被损害地层会影响测井数值。甚至井眼补偿装置也会受不利的井眼条件的影响。所有测井仪器的测量结果都必须进行井眼影响的校正。这是困难的，因为校正系数通常是以经验或简单的理论模型为依据，结果可能与具体条件不相符合。仔细设计ROS测定技术，能够把井眼影响减到最小程度。

不均匀性：不均匀性引起几个潜在问题。

1. 注入过程的置换效率是未知的。
2. 测井响应受周围地层的影响。
3. 采样位置可能出现偏移。
4. 适用于复杂的各向异性储层的模型非常少而且复杂。

5. 很重要的是岩石和流体的性质必须进行平均,但是平均方法的选择不是简单易做的。

代表性:常常争论ROS结果的代表性。即使每一口井都测试,井之间未测试的油层体积还是很大。必须考虑小量采样的统计问题。例如由方法“1”得到的体积平均饱和度与方法“2”测定的30个岩样的算术平均饱和度进行比较吗?这是正确的比较吗?当一些方法得到不同答案时哪一个比较好?为什么?所有不一致的数据都必须加以解释。

通常对地层应用的方法比实验室的方法有更多的潜在系统误差,但是潜在误差的数目可能不像每一种误差的大小那样重要。就此而论,实验室测定可能在精度上出现较大的绝对误差,因为重现地层条件时有大的误差。必须在特定的油层条件下考虑每一方法,以便估计潜在的系统误差的大小。

随机误差:随机误差是偏离最好测定结果(代表测量重复性)的正、负偏差。用来描述随机误差的频率分布能够以数量表示一个特定结果的置信度。随机误差是数据中的概率误差,它的传播与概率误差在结果中的传播相同。随机误差的原因包括:

1. 有效数字后面的舍入误差。
2. 为导出一般关系式将一定范围的经验数据平均。
3. 计算时将原始数据平均。
4. 测量的重复性。

普遍应用两种用数量表示误差的方法:误差公式和蒙特卡罗分析。误差公式有一个优点,因为该方法明确地表示每一个参数的误差对结果的影响,因此能作为选择最好的ROS技术的手段。当然,我们应该记住,在结果中的误差即传播误差受到输入参数的误差和结果本身的数值的影响^[17]。为了说明这点可以看图3。即使输入项的误差是恒定的,在ROS数值的整个范围,ROS的误差也是变化的。当ROS数值高时,电阻率测井的计算结果是很准确的,但是当ROS数值低时,人们很容易看到应该选择替换的方法。

误差公式很快表明,随着参数数目的增加,随机误差的数值趋于增大。一个推论就是:引入一个经验关系式(如岩石特性参数-测井响应关系式),当所有其他参数仍然一样时,造成的随机误差也将比较高。任何能减少参数数目的技术将减少潜在的随机误差源,这就是为什么测一注一测方法能有如此低的误差的原因。相反,在三相(一种气体,二种液体)的情况下,确定ROS所需的复杂测井方法牺牲了精度,因为包括了大量的参数,其中的大部分不可能直接测定。

一些技术独立测定ROS和孔隙度,而另一些技术直接测定乘积($ROS \times \phi$)。因为乘积($ROS \times \phi$)可用于体积法计算储量,直接测量该乘积是有利的。

总的看法:有一个测定任何井或任何油层剩余油饱和度的技术库。然而对于许多油层的情况,在确定ROS时仍然不能有足够的把握,因此如何测定ROS的问题必须仔细考虑。我们按照Wyman和Elkins的方式制定了表2,在应用方法考虑其精度时作为一种指南。进行方法选择的另外指导原则如下:

1. 为作出决定,确定要求的精度。
2. 确定岩石性质、机械条件和预计的流体性质及流体分布。
3. 选择一口井的位置,其ROS值对油田来说是有代表性的。
4. 为了最好地估计油层条件,确定预计的ROS技术的随机误差。
5. 考虑随机误差最小的技术,去掉过高系统误差的技术。

6. 决定是否只依靠一种技术。如果使用证实的一些方法, 如何使它们在油田中协调一致。

7. 考虑要求的精度和可靠性来估计费用。

需要多少数据?

我们需要为足够清楚地了解现在流体分布和生产机理以提出一个合适建议所必需的最少数据, 这个建议对于潜在的利润应具有最大的允许风险。这可能是困难的或者是昂贵的, 在ROS数据的费用与风险及潜在利润之间的折衷处理通常可以办到。

如果我们要了解“现在流体分布”, 那么必须了解地质的复杂性、流体运动和采油机理。知道所有的这些内容将是理想的, 会导至最经济的油田开发。对于每一类的投资决定, 存在一个收益递减的点, 超出这一点, 补充收集的ROS数据对估计工程盈利性的作用微不足道。由于将收集ROS数据的费用算作工程的成本, 在ROS数据收集期间的目标就是使工程的潜在利润最大。

为了查明仔细考虑的工程将是盈利的, 常常只需知道ROS超过某一数值, 因而只需最少量的数据。ROS的分布提供了关于油层连续性或纵向驱扫效率的线索, 因此可以帮助估计一个复杂开采方法的采油效率。油层的复杂性和ROS本身的数值决定了必须收集多少数据。通常当ROS大时要求的精度较低, 但是在ROS小时要求较高的精度, 以便保证计划的工程在经济上是可行的。

要考虑的其他因素是:

1. 有多少油藏开发史的数据可利用?
2. 可利用数据的质量和精度如何?
3. 除ROS外, 哪些主要参数和次要参数不知道?
4. 在油层中存在多少性质不同的地层单元?
5. 在响应中允许多大的误差?

在以前测定ROS的试验中, 普遍出现在ROS试验的设计期间没有考虑到的一些新现象。因为费用有限, 我们不能为每一个不测事件都作设计, 因此人们必须认识到可能出现某些预料之外的事, 使某试验结果无效, 这时可以要求重复测试, 达到允许的误差。

对结果进行平均可以提供比任何单一测量更好的精度。可利用的单个测量数目越多, 代表油层的概率就越大。对两个不同方法的结果进行平均时, 请记住两种方法探测的岩石或体积可能是不可比较的。对一个具体层段的结果进行平均, 可以提高各个方法的响应的可靠性, 但是不同的方法可以有不同的响应。然而响应的变化范围帮助我们确定结果的可靠程度, 间接地确定要求多少数据。

要点、结论和指导原则

我们已经假定读者知道“为什么”要准确测定ROS, 所以本文集中在“测什么、何时测、何处测、如何测和测多少”上面。我们能够得出结论: 将岩石性质、流体性质、井眼特性、完井设计标准和测井仪器响应都组合起来可以提供控制各种ROS方法应用范围的条件。其中很多条件只影响测量的重复性, 其他条件产生系统误差, 使结果造成误解或错误。在一个给定的油层, 确定哪一个ROS方法工作最好的唯一途径就是具体地考虑油层的多种特性, 不可能有

二个完全相同的油层。

我们简要地提供几个结论：

1. 对于任何油层，测定 ROS 的问题的多少与要求的精度直接有关。较高的精度要求更复杂的方法、更多的工程项目和更大的费用。

2. 随机误差和系统误差在每一次测量中普遍存在，在为合适应用而筛选 ROS 方法时，它们是最好的指示参数。

3. 测定 ROS 要同时测定体积参数和油层其他主要特性参数。

另外，我们还提供下列指导原则：

1. 事先制订收集油层数据的计划。接着进行对油层潜力和开采的评价。着手测量油层现在含油量的最好计划，就是把系统收集数据的方案与直到作出决定的时刻才进行收集数据作业的方案结合起来。

2. 预先考虑在测定 ROS 中的问题。为油层条件是动态而不是静态以及剩余油饱和度的变化范围很大作好准备。

3. 不要留下未解决的较大问题，各种方法所得结果的不一致之处都加以解决。

4. 认为将很多井中用成本和精度较低的方法测定的结果进行平均，可以代替在单个井中进行非常准确的测量。这个问题是三维的问题。

5. 把在一个给定的油层中的第一次 ROS 测试作为一个完整的实验。制订计划以便在必要时用改进的方法重新进行测定。

注入监测技术

引言

注入监测技术为评价注入效果提供关键性的观测。它能提供注入期间的动态特性图。在最近几年，由于三次采油的注入典型试验数目增多，提高了注入监测技术的重要性，并加速了发展。1979年第一次发表 Shell 公司的报道：在三次采油化学剂注入期间测井方法在监测整个典型试验中的应用^[18]。此后这种技术至少用于12个主要的典型试验，包括 CO₂注入，聚合物注入和表面活性剂注入^[9,19-24]。

评价二次和三次采油技术要求：

1. 在注入过程开始前知道含油饱和度的数值及其分布。
2. 在油层的一处或多处地方测定被注入的驱油流体状态的数据。
3. 注入过程完成后知道含油饱和度的数值及其分布。

上面的第1项和第3项在本文第一部分已谈到，第2项可用注入监测来确定。

最经常的设计就是为监测补充开采典型试验的动态编制注入监测程序。这种试验包括一口注入井和一口或多口观测井。观测井可以是裸眼的或者是下套管的，可以为流体取样或者为测井监测设计观测井。我们的讨论只限于套管井测井监测，与流体取样相比它有几个优点：

1. 层位封隔
2. 没有压力扰动
3. 纵向作用范围大

流体取样井通常是与测井的观测井群合在一起的,以便测定所产流体的类型和组分并观测油层压力。

注入监测的目的如下:

1. 测定注入前沿的形状。
2. 测定移动油带的到达时间、含油饱和度和持续时间。
3. 测定注入期间和注入区内流体饱和度的变化。
4. 测定在注入区内注入前和注入后的流体饱和度。

第4项包括测井对岩心的“刻度”。有几种监测技术可以使用,但是没有单一的方法能够在各种注入条件下提供全部必要的的数据。因此重要的是要了解每一种方法的原理及局限性。

应该测量什么?

一个测井监测程序需要二类的测量:

1. 不同注入前沿的到达时间和持续时间以及观测井的测量。
2. 在注入期间的关键时间不同流体的饱和度的测量。

第1项是定量测量,第2项可以是或者不是定量的,取决于环境。在制订几乎任何一个典型试验的计划时,人们对设计的试验都可有某种控制,以便使精度最佳。这可以通过选择技术种类、测井装置、注入液性质或井距来达到。预先制订计划是非常重要的。

正如测量ROS那样,用注入监测技术测量饱和度是通过测量次要参数来推断目的层的主要参数,因此处于不利地位。所以人们必须了解岩石/流体系统,以便选择模型和用于岩石/流体系统的技术。表3列出了可采用的测井方法,它们可以在不同注入类型的情况下监测流体分布或饱和度。让我们依次讨论每一方法。

电阻率测井:电阻率对孔隙空间中存在的盐水的数量和电导率是敏感的。如果注入引起的电阻率差别足够大,电阻率能用来监测注入物到达观测井不同井段的时间和顺序。在某些时候,人们不能控制这种差别,而在其他时候,人们能在试验设计中使差别达到最佳。饱和度的定量测量要求已知含盐量的地层水均匀分布,最经常的做法是三次采油典型试验从预注入盐水开始,以便建立这种条件。无论这样或那样,人们都能模拟每一种可能的情况,事先推论方法的适用性。电阻率不能区分油和甲烷或 CO_2 ,它是间接测量全部非导电相,而且可能需要包括第二种测井方法。另外,在某些过程中包含的复杂化学反应会改变盐水的导电性,使它变成一个未知参数而不是已知参数。地层的电学性质也会因润湿性变化而改变。最后,电阻率方法的实践要求监测井采用玻璃钢套管,而且地层电阻率的范围应适合感应测井仪器,即在0.3和100欧姆米之间。

如果用时间推移技术,即在注入前沿通过观测井之前、通过期间和通过之后都进行测井,那么观测饱和度变化的精度会有很大提高(还用很多其他方法)。测井响应的适当组合消除了一些没有变化的变量,如孔隙度和骨架性质。采用时间推移技术,使最初的或基准的测井对最初的岩心分析结果进行标准化或刻度,可以做到在注入期间和注入后进行定量测量。电阻率测井简单,成本低而且测速比其他仪器快,还有较大的探测深度。其缺点就是:

1. 在玻璃钢套管中,这类方法通常只限于感应测井。
2. 纵向分辨率比较差(3到4英尺)。

普通中子测井：它的一大优点就是能在钢和玻璃钢的套管井使用。这就开辟了利用老井或者不能用玻璃钢套管的新深井的可能性。然而对非定性资料，利用老井会有风险。我们很少能够安排一口有足够岩石数据和孔隙度资料的老井。如果在注入层段完井，靠近井眼区域的孔隙度、润湿性和饱和度可能不代表油层的情况。水泥的完善程度（因此层段的封隔程度）也可能有问题。中子测井主要响应于氢由于油和盐水在一般情况下有类似的含氢量，中子测井不能区分油和水，因此在注水或注化学剂的监测中很少应用，或者没有应用。但是气（甲烷或 CO_2 ）和水的含氢量有相当大的不同，中子测井响应对含气饱和度是敏感的，为了得到定量结果，必须采用 Schlumberger 公司的挖掘效应模型^[25]，因为测井是在孔隙充满淡水的情况下刻度的。因此与电阻率测井组合解释三相饱和度时中子测井是有用的。电阻率装置响应整个非导电的饱和度，中子响应非气体的饱和度。两种装置组合应用可以确定三相饱和度。对中子响应的主要校正这是由于温度变化（氢的密度变化和热中子扩散效应）和挖掘效应。如果采用时间推移的方式，解释的精度同样可以提高。当然，为了使时间推移方式是准确的，必须特别小心，避免刻度的系统误差。进行多次测量提高计数率的统计精度。中子测井在操作上比电阻率测井更复杂，要求更加细心，以保证准确测量。为了统计精度，要求测量几次和/或低的测速。中子装置的探测深度浅，受井眼邻近区域的影响大，因此求含气饱和度的定量测量（使用被未射孔井段证实的测量结果）需要下套管的井眼。

脉冲中子俘获测井：这些装置在孔隙度大和地层水含盐量高的地层可以很好工作。甚至在那时候，要定量计算地层水饱和度也需要准确地知道5个输入参数（或者6个，如果有气体的话）。在最好的情况下，很少能超过半定量（知道含油饱和度在哪一个四分位数之中）精度。只有用时间推移的方式才能得到定量的结果。当注水过程使矿化度改变时，这种仪器可作为识别响应井段的一个很好备选择的手段。但是测井响应对于热中子俘获截面很大的微量元素非常敏感，如果没有对水进行微量离子分析，潜伏着大的系统误差。

与电阻率相比，脉冲中子俘获（PNC）测井有一个优点，它能用于玻璃钢套管和钢套管的井。对于含水饱和度变化的灵敏度通常比电阻率测井要低，因为受到氢（天然气）和氯（水）的含量的影响。当天然气和氯的含量都发生变化时，解释工作变得困难，解释结果也许是模棱两可的。此外，必须考虑热中子的空间扩散效应。

PNC 测井比前述的方法更加复杂，成本更高。要求低的测速和/或测量几次。这种测井最好是用于监测气或水的饱和度变化。但是当二者都变化时，解释结果就难以确定。这种测井响应对一些参数敏感，应用 PNC 之前对油层条件应很好了解。

脉冲中子能谱测井：这种测井通常称作碳-氧测井或C/O测井。但是它们能够测定除碳和氧之外的一些元素的含量：硅、钙、氢、氯、铁和硫。标准的应用是比较碳和氧数值求含油饱和度，比较硅和钙数值确定岩性。当注入前和注入后地层的电阻率或热中子俘获截面相差很小或没有差别时，或者在地层盐水浓度有变化和不知道时，这种测井特别有用。在现在的监测技术中，C/O测井的纵向分辨率即薄层分辨率最好。它的探测深度最浅，主要的响应来自井眼及其附近区域。因此对于裸眼井或已射孔井段，C/O测井可能不是很有作用的。在套管井中应用，测井响应对井内液体、套管类型和尺寸、水泥环的类型和厚度都敏感^[26,27]。采用时间推移方式，用这种仪器测定注入前沿的变化，能够大大消除套管和水泥的影响所产生的系统误差。就在那时也应该非常细心地将最初测井或基准测井对岩心分析结果进行刻度，同时对于井眼尺寸、套管和水泥的任何差别要进行校正^[9]。含油饱和度较大变化造成的C/O比

值变化较小，因此计数率统计精度必须非常高，这就要求测速非常低或者甚至是点测。计数统计精度不高是一种妨碍，虽然使用观测井不必负担占用钻机时间的费用。

总之，脉冲中子能谱（或C/O）测井有好的纵向（薄层）分辨率，不受含盐量或含盐量变化的影响，也不受岩石电学性质的影响。但是要求计数率统计方面误差小，测速慢，测量费用较高。C/O测井需要仔细地用岩心结果来刻度，测井期间需要有高度的质量控制。

井温测井：在热采应用中，监测蒸汽前沿的位置很困难。蒸汽的冷凝是蒸馏水，因而有高的电阻率，仅仅根据电阻率常常不能将它与油相区别。如果原始地层盐水是淡的因而电阻率高，在蒸汽前沿通过之前或之后，电阻率或热中子俘获截面的差别很小或者没有差别，因此电阻率和PNC测井可能不能应用。蒸汽带到达时可用井温测井来观测。当然在蒸汽带的前面由于热的蒸汽冷凝液的作用，饱和度会发生相当大变化，因此在蒸汽前沿通过之前实际上饱和度会有大的变化。另外，一旦蒸汽前沿通过或者正在通过，就会出现被捕集石油的蒸馏现象，因此蒸汽前沿通过之后会出现饱和度变化。这样的整个过程造成了沿着蒸汽前沿的路径，含油饱和度随时间变化，这取决于与蒸汽注入井的距离。所以井温测井不可能用来推测流体饱和度。实际上要断定蒸汽前沿是否几乎到达、正好到达或通过了井的位置是困难的，仅仅时间推移测井不可能解决这种测不准的问题。

监测井何时测井？

应该设计监测程序，以使用最少的费用提供足够的成果。应用油藏模拟预测观测井的最初响应可以降低测井费用。这些预测可用来确定最初的测井次数。当然必须对误差确定允许限额。最好从比预测要高的测井次数开始，在第一个读数之前记录几次测井结果，建立一个准确的基准测井记录。在最初的响应之后，可以改变观测的速率，安排以后进行测井的最佳时间。应该绘制测井读数与注入桶数或时间的关系曲线，以便推测变化的速率，为以后的测井制订计划。在图4所示的是典型CO₂注入试验的最后的一次试验结果，每进行45次监测测井之后，对曲线进行修订。如果在试验的3年期间注入量保持稳定，那么横坐标可用时间表示。两次测井之间的实际时间开始是一星期，最后大约是三个月。

如何进行测井？

即使是用时间推移方式进行作业以消除某些系统误差，把误差保持在最小状态也是绝对必要的。在测井承包商的地区办事处和井场进行严格和准确的刻度是重要的。例如，考虑在井场安装一个木结构，配备玻璃钢滑轮和尼龙绳，为感应测井在空气中的刻度提供零电导率的区域。有一位经过训练的工程师亲自观察每一次井场刻度和测井。而且对于新的或者很困难的技术，在整个测井方案中坚持使用相同的仪器或相同的一些仪器（以及备用的成套仪器）。用这种方式，甚至小的系统误差（如果稳定）都将趋于抵销。这样来设计观测井，使测井的工作范围不局限于目的层井段，包括注入响应不大可能出现的上下井段。这样不仅提供在井下的检查，而且可以发现所有测井必须在这些非响应井段进行标准化。在测井车拆除作业装置之前，在井场或通过传真复制的测井图检查每一次测井的质量，如果发现不合格的测井图，在拆除之前容易进行重测。而且每天的测井时间应该标准化，以便建立一个例行程序，减少在协作中出现误差的机会。

何处安排观测井？

观测井位置的几何排列是一件很难决定的事。我们要使井数保持最少，还必须有一张完整的注入区域流体分布图。为了区分圆形和椭圆形需要的最少井数是三口。某些能力很差的工程师，他们“知道”注入图形是圆形的，只设置一口观测井，当注入前沿沿着与观测井-注入井中心线成直角的裂缝系统前进时，还在没完没了地等待。如果排除了裂缝的资料（正如这些工程师所设想的图形，把裂缝排除在外），高级的模拟装置也预测不出更好的结果。这时系统误差可能是大的和破坏性的。

注入井到生产井的距离也要非常小心地选择。我们要保持小的距离使试验的响应时间很短，但是距离足够大可以得到油层的有代表性的采样。准备好处理意外的事件，如监测测井表明注入井段是要求井段的2到3倍，结果增加段塞的体积以便按设计进行注入。如果注入井-观测井的距离太大，在任何人认识到注入层段大于计划层段之前，段塞注入已经结束，结果表明这是一个夭折的试验或者错误的试验。

要点、结论和指导原则

我们相信读者知道“为什么”要监测注入，所以我们选定只讨论“测什么、何时、何地 and 如何”监测注入或典型试验注入。而且对于一个给定油层，决定那种方法工作最好的唯一途径就是具体地讨论那个油层的性质，我们把这个练习留给读者。

总之具体的结论是：

1. 在没有孔隙度控制的老井和生产过程可能使井眼附近区域发生变化的地方，测井仪器不能对一个试验进行令人满意的监测。

2. 恰当地评价一个采油过程包括在注入前和注入后测定 ROS，以及在注入期间注入流体分布的几何形状和特性的评价。

3. 评价注入的问题的多少直接与采用的工艺的复杂性有关。

4. 专门打的观测井以及将评价井作为观测井，预计结果最好。

也提出一些指导原则：

1. 制订一个详尽的工程计划，将了解“为什么”要注入监测都包括在内。

2. 坚持在注入期间一直使用同一测井仪器，但是如果需要，有备用仪器可利用。

3. 预先考虑与下井仪器稳定性有关的问题以及与注入限制条件有关的问题。

4. 准备在井场对测井读数进行计算，以便将接收坏数据和成造系统误差的可能性减至最小程度。

参 考 文 献

1. Wyman, R.E. (1979) "How Should We Measure Residual Oil Saturation?", Bull. Canad. Pet. Geo., v. 24, No. 2, p 233-78, May.
2. Bond, D.C. Ed., (1978) Determination of Residual Oil Saturation, Interstate Oil Compact Commission, Oklahoma City, Okla. June.
3. Elkins, L.F. (1978) Determination of Residual Oil Saturation, Chapter VIII "Evaluation", Chapter IX "Results-Recommendations", Interstate Oil Compact Commission, Oklahoma City, Okla., June.
4. Richardson, J.E., Wyman, R.E., Jordan, J.R., and Mitchell, F.R. (1973) "Methods for Determining Residual Oil Saturation with Pulsed Neutron Capture Logs", J. Pet. Tech., p 593-606, May.
5. Murphy, R.P., and Owens, W.W. (1973) "The Use of Special Coring and Logging Procedures for Defining Residual Oil Saturation", J. Pet. Tech., p 841-50, July.
6. Robinson, J.D., Loren, J.D., Vajnar, E.A., and Hartman, D.E. (1974) "Determination of Residual Oil Using the Nuclear Magnetism Log", J. Pet. Tech., p 226-36, Feb.
7. Murphy, R.P., Foster, G.T., and Owens, W.W. (1977) "Evaluation of Waterflood Residual Oil Saturation Using Log-Inject-Log Procedures", J. Pet. Tech., p 178-86, Feb.
8. Thomas, E.C., and Ausburn, B.E. (1977) "Determination of Swept-Zone Residual Oil Saturation in a Slightly Consolidated Sandstone Reservoir of the Gulf Coast", J. Pet. Tech., p 513, April.
9. Felder, R.D. and Hoyer, W.A. (1984) "The Use of Well Logs to Monitor a Surfactant Flood Pilot Test", J. Pet. Tech., p 1379-92, Aug.
10. Archie, G.E. (1942) "The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics", Tech. Paper 1422, Pet. Tech., Jan.
11. Arps, J.J. and Roberts, T.G. (1955) "The Effect of the Relative Permeability Ratio, the Oil Gravity, and the Solution Gas Ratio on the Primary Recovery from a Depletion Type Reservoir", Trans. AIME, v 204, p 120-27.
12. Holmgren, C.W. and Morse, R.A. (1951) "Effect of Free Gas Saturation on Oil Recovery By Water Flooding", Trans. AIME, v 192, p 135.
13. Rathmell, J.J., Braun, P.H., and Perkins, T.K. (1973) "Reservoir Waterflood Residual Oil Saturation from Laboratory Tests", J. Pet. Tech., Feb.
14. Abrams, A. (1975) "The Influence of Fluid Viscosity, Interfacial Tension, and Flow Velocity on Residual Oil Saturation Left by Waterflood", SPE 5050, Presented at 49th Annual Fall Mtg., SPE of AIME, Houston, Texas, Oct. 6-9.
15. Salathiel, R.A. (1973) Oil Recovery by Surface Film Drainage in Mixed-Wettability Rocks", J. Pet. Tech., p 1216.
16. Waxman, M.H. and Smits, L.J.M. (1968) "Electrical Conductivities in Oil-Bearing Shaly Sands", Trans. AIME, v 243, p 107-22.
17. Freedman, R. and Ausburn, B.E. (1985) "The Waxman-Smits Equation for Shaly Sands: I. Simple Methods of Solution; II. Error Analysis", The Log Anal., v. XXVI, No. 2, p 11-24, March-April.
18. Richardson, J.E. (1979) "Monitoring Flood Profiles with Induction Logs", J. Pet. Tech., p 19-24, Jan.
19. "Coalinga Polymer Demonstration Project, First Annual Report, July 1975-July 1976, "ERDA Report SAN/1004-76-1, Shell Oil Co., Houston, Dec.
20. Noran, D. "Sophisticated Logging Program Monitors California Polymer Flood", Oil and Gas J., April 4, p. 100-30.
21. Charlson, G.S., Bilhartz, H.L., and Stalkup, F.I. (1978) "Use of Time Lapse Logging Techniques in Evaluating the Willard Unit CO₂ Flood Mini-Test", SPE 7049 presented at SPE Symposium on Improved Methods of Oil Recovery, Tulsa, Okla., April 16-19.
22. Henry, R.L., Feather, G.L., Smith, L.R., and Fussell, D.D. (1981) "Utilization of Composition Observation Wells in a West Texas CO₂ Pilot Flood", SPE/DGE 9786 presented at the SPE/DGE Second Joint Symposium on Enhanced Oil Recovery, Tulsa, April 5-8.

23. Svor, T.R. and Globe, M.P. (1982) "A Three Phase Quantitative Monitoring Method for CO₂ Floods", SPE/DOE 10684 presented at the Third Joint Symposium on Enhanced Oil Recovery, Tulsa, April 4-7.
24. Pittaway, K.R., Hoover, J.W. and Deckert, L.B. (1985) "Development and Status of the Maljamar CO₂ Pilot", J. Pet. Tech., p 537-544, March.
25. Segesman, F. and Liu, O. (1971) "The Excavation Effect", SPWLA 12 Annual Logging Symposium Transactions, May 2-5.
26. Culver, R.B., Hopkinson, E.C. and Youmans, A.H. (1974) "Carbon/Oxygen (C/O) Logging Instrumentation", Soc. Pet. Eng. J., p 463-79, October.
27. Hertzog, R.C. (1978) "Laboratory and Field Evaluation of an Inelastic Neutron-Scattering and Capture Gamma Ray Spectroscopy Tool", SPE 7430 presented at the 53rd Annual Fall Technical Conference and Exhibition, Houston, October 1-3.

表 1 可应用于各相饱和度状态的ROS方法

技 术	饱和度状态	S_{oi}	S_{om}	S_{or}	S_{iw}	S_{wm}	S_{gm}	S_{gr}
		←三						相→
		←二						相→
电阻率测井		能	能	能	能	能	否	否
脉冲中子俘获测井		能	能	能	能	能	否	否
脉冲中子能谱测井		能	能	能	能	能	否	否
组合测井方法		能	能	能	能	能	能	能
核磁测井		能	否	能	能	能	否	否
介电测井		能	否	能	能	能	否	否
井间示踪剂		否	否	能	能	能	否	否
单井示踪剂		否	否	能	能	否	否	能
压力取心		否	否	能	能 ¹	否	否	否
海绵取心		否	否	能	否	否	否	否
普通取心		否	否	能 ²	能 ¹	否	否	否
岩心试验		能	能	能	能	能	能 ³	能 ³
油层动态分析		能	能	能	能	能	否	否

1. 在油基泥浆中取心。 2. 只用于固结的和高渗透率的岩石。 3. 三相相对渗透率实验完全是非常规的。

S_{oi} = 原始含油饱和度 S_{om} = 可动油饱和度 S_{or} = 不可动的残余油饱和度 S_{iw} = 束缚水饱和度

S_{wm} = 可动水饱和度 S_{gm} = 可动气饱和度 S_{gr} = 不可动的残余气饱和度

表 2 ROS方法的预计精度*

方 法	能在套管井进行	预计精度
电阻率——常规	否 ²	差
测—注—测	否 ²	好
脉冲中子		
俘获——常规	能	差
测—注—测	能	好到极好
能谱——常规	能	差
核磁		
测—注—测	否 ²	极好
介电测井——常规	否	差
组合测井方法	否 ²	差
压力取心	否	极好
海绵取心	否	极好
普通取心	否	差到极好 ³
岩心试验	否	差到极好 ⁴
油层动态分析	能	差
井间示踪剂	能	未知 ⁵
单井示踪剂	能	未知 ⁶

*按照Wyman和Elkins的方式

1. 对于 $\phi > 25\%$ 的岩石, 并假定 ϕ 没有误差, 极好 $< 2\%$, 好 $2-4\%$, 尚好 $4-6\%$, 差 $> 6\%$ (误差是百分孔隙体积)

的一个标准偏差)。

2. 能用于玻璃钢套管。
3. 取决于取心条件、岩心渗透率以及岩心提拔技术及处理技术。
4. 取决于重现地层状态的能力。
5. 井之间必须靠得非常近, 例如小于50英尺。
6. K因子的作用随着与地质复杂性相连系的天然条件而变化, 使这个数难以确定。

表 3 在下套管的观测井中可应用的油层注入监测技术^(1, 2)

技 术	注 入 类 型			
	注 水	CO ₂	蒸 汽	化 学 剂
电阻率 ³	能	能	能	能
中子	否	能	能 ⁴	否
脉冲中子俘获	能	能	能 ⁴	能
脉冲中子能谱	能	能	能	能
井温	否	否	能	否

1. 我们假定这些监测技术只能是定性的(取决于条件), 而且注入后的ROS方法用来“刻度”测井。
2. 我们假定在此介绍的每一技术在注入前已经做了模型试验, 保证储层性质有合适的差别, 可以用谈到的仪器观测。有套管存在使很多技术不能应用。
3. 要求玻璃钢套管。
4. 温度对测井响应的影响应该仔细地进行模型试验。

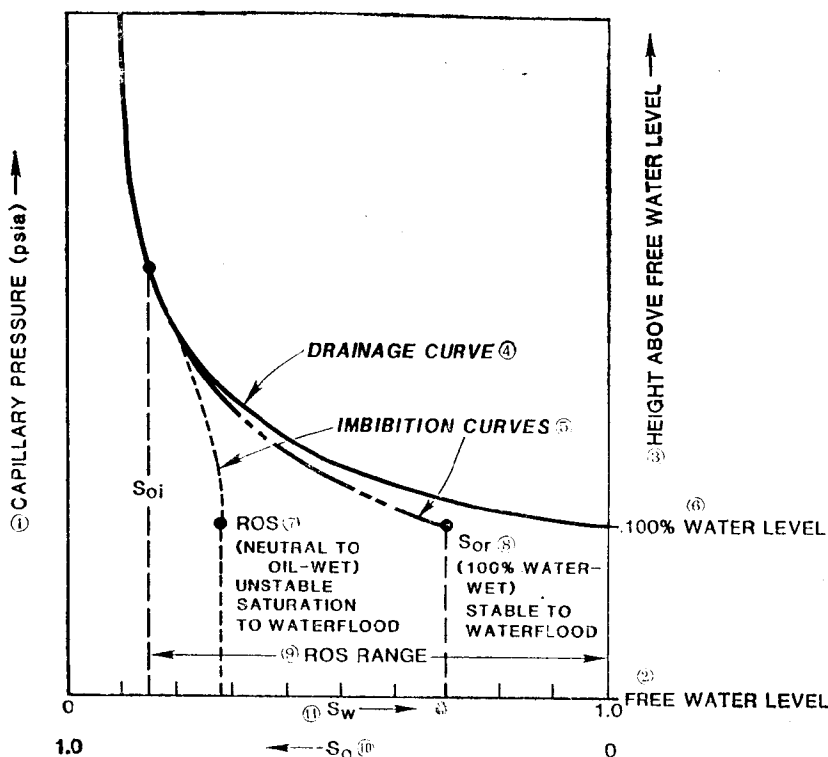


图 1 典型的毛细压力曲线

- ①毛细压力(磅/英寸², 绝对压力); ②自由水的水位; ③在自由水水位之上的高度; ④排油曲线; ⑤吸渗曲线; ⑥100%含水的水位; ⑦剩余油饱和度(中性到油湿润), 对于注水, 饱和度不稳定; ⑧残余油饱和度(100%水湿润)对于注水, 饱和度稳定; ⑨剩余油饱和度的范围; ⑩S₀—含油饱和度, ⑪S_w—含水饱和度

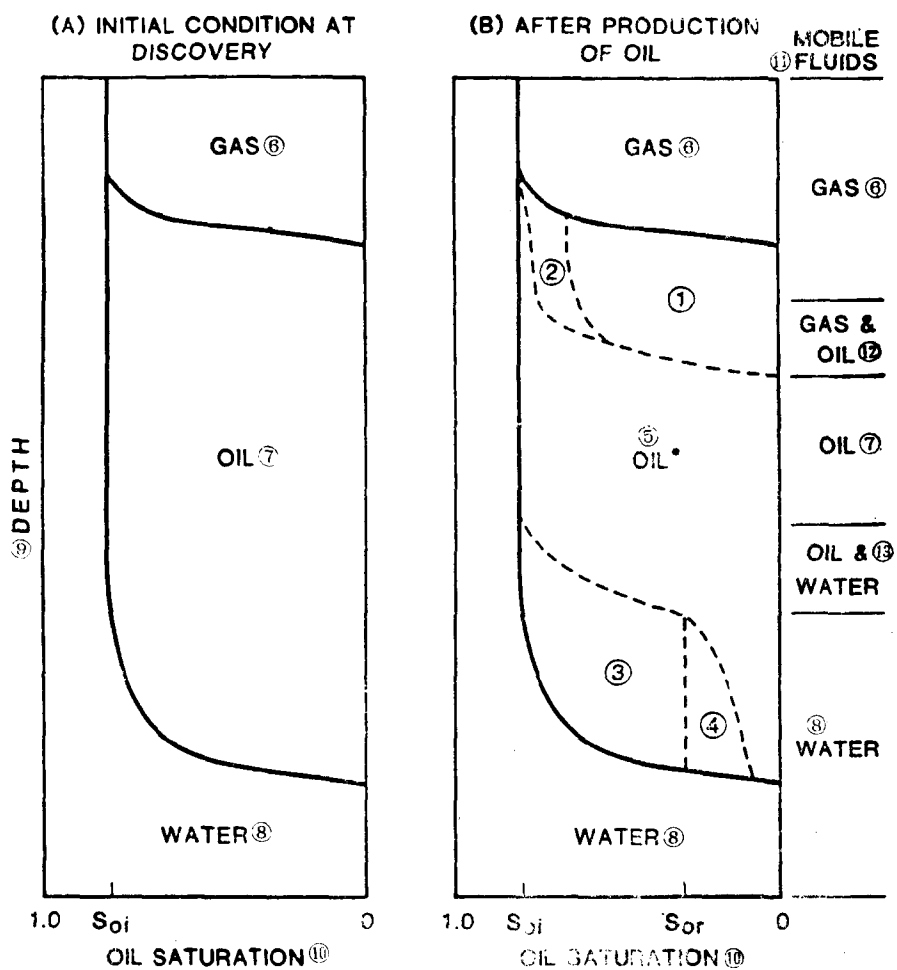


图 2 毛细压力曲线的例子

(A)发现时的原始状态；(B)产油之后；①气顶膨胀；②在膨胀的气顶内部，薄膜状油渗流；③水驱到吸渗残余油；④在小于100%水湿润时，再降到吸渗残余油饱和度以下；⑤*在整个油柱里可能存在5—10%孔隙体积的不动气体饱和度；⑥气；⑦油；⑧水；⑨深度；⑩含油饱和度；⑪可动流体；⑫气和油；⑬油和水