

水平井生产五年的回顾

L. H. Reiss
Elf Aquitaine

陈桂芳 译
王鸿勳 校

摘 要

1980年8月, Elf Aquitaine石油公司六年来所钻四口水平井中的第一口, 产出了第一桶石油。其余三口井相继在1981年和1983年出油。

现在, 已有足够长的采油史对下列问题作出结论:

- (1) 水平井是否已穿过大的垂直生产裂缝? 是。有时是出人意料的。
- (2) 水平井是否已提高油藏的扫油效率(和原油采收率)? 是。有一口井累计生产了比邻近直井还多200多万桶油之后, 仍在生产无水原油。
- (3) 理论计算的产能提高与现场实际结果是否一致? 是。在没有裂缝的井段, 水平井产能是直井的2—4倍。
- (4) 不稳定压力试井解释是否可行? 行。包括设计试井程序的方法。
- (5) 在水平井内进行测井是否可行? 行。因为几乎所有可行的测井方法, 已成功地录下水平井的资料。还成功地进行了两项生产测井, 测得裂缝的位置和出油、出水点的位置。
- (6) 产层地质情况怎么样? 真令人惊讶! 发现油藏一些意想不到的情况: 油藏顶部褶皱, 埋藏谷, 以及裂缝性刺穿油藏都发现了。
- (7) 有选择地完成这些长(约500米)的水平井行吗? 尽管试过两次, 还是不行。所有的水平井都是采用不注水泥的预割缝衬管完成的。
- (8) 什么是研究工作的主要目标? 有一项花费200万美元的研究计划, 主要是致力于用水平套管固井和/或外封隔器试验, 以及改进井底井径测量设备去掌握选择性完井。
- (9) 是否有任何工业化项目? 有。在意大利近海区的Rospo Mare油田, 将用水平井开发。

一、引 言

水平钻井不是一种真正新的概念, 因为早在五十和六十年代期间已作过很多工作, 主要是在苏联。但在那时, 若按油井产量高低来衡量, 结果是令人失望的。

自七十年代末开始, 现在在石油工业钻水平井, 是由于定向钻井技术的进步和新的石油需求两者综合作用的结果。^[1, 2, 3, 4]

钻水平井的独创性在于采用水平井去适应一定油藏的工程目标。这种不断的独创性至少导致 Elf ① 公司企图去获得一口高产油井。

在近期,从钻水平井的经验中(1979年至1983年间在欧洲打的水平井)获得的有关钻井^[1]、取心^[1]、测井设备^[5,6]和油藏工程技术^[3,8],在其他论文中已描述过。

但是,关于水平井的生产特性,发表的资料很少。现在已有足够长(2—5年)的采油史可供分析。

在分析前,必须记住:“在四口水平井中,第一批的两口井,Lacq 90和91井是着重掌握钻井、完井和测试技术的。当然也希望掌握采油技术,但把它看作是一种次要的收获。第四口井(Castere Lou 110井)的设计目的是掌握打深井及完井的技术,也希望此井的采油情况令人满意。第三口井(Rospo Mare 6 D井)是由 Elf 意大利的子公司负责钻井,AGIP 公司专门从事采油。

研究水平井采油是本文的主要目的。

二、水平井的生产特征

让我们察看油田的油藏工程资料及水平井的采油记录。记住,这些井都是抽油井并且不是选择性完井的。

1. Lacq Supérieur油田

Lacq Supérieur 油田是法国西南部的陆上油田。油层深600米。原始油柱高度为100米。在已打水平井的地区,岩石孔隙度和渗透率分别为20%和1毫达西。原油粘度为17厘泊。

25年来,油田产油的含水是不断增加的。因为它的平均含水已高达98%,所以油田几乎已全被水淹。

油藏是由两个不同但又连通的地层组成。一个是裂缝高度发育的白云岩,采油指数为100米³/天/大气压;另一个是几乎无裂缝的石灰岩透镜体,采油指数为1米³/天/大气压。

2. Lacq 90水平井(见图1,图2)

Lacq 90水平井井位见图1。

Lacq 90水平井采油曲线与邻近直井(包括位于油田西南透镜体外边界以内的干井)的平均采油曲线,见图2。

Lacq 90水平井的日产量为其典型的邻近直井的三倍多。这与后来用理论公式(1)计算的结果是一致的。

通过偶然机会发现,Lacq 90井与该区产油最好的 Lacq 44井存在严重的干扰。这说明,两者之间存在一条渗透性的通道,Lacq 90井可以从这个渗透性地区采出大部分石油。

3. Lacq 91水平井(见图3,图4)

Lacq 91井相继穿过白垩(井眼“头部”),白云岩,又穿过白垩(“尾部”)。白垩层

① 合股者是IFP或AGIP。

是预料中的，但没料到有裂缝很发育的白云岩。图3是Lacq 91井的井位图。

这些地层的产能分别为1米³/天/大气压；200米³/天/大气压和1米³/天/大气压。

正如后面提到的，曾对这口井进行了选择性完井试验。试验局部取得成功，井眼“头部”成功地注了水泥，裂缝白云岩地层由于充满水而被封隔开。这使得“尾部”可以在油田最低的含水（大约90%）条件下生产某些时间。后来，出现了意外，井眼“头部”的固井水泥和裂缝的封堵水泥都被破坏。

现今，该井主要从裂缝性白云岩出油，它的采油指数约为200米³/天/大气压，含水为99%。这样高的产能，可以在很高的产量和很低的压差下用离心泵生产。产油量为15米³/天，这是东北透镜体的总日产量，见图4。低压差有碍于低产能的井眼“头部”和“尾部”出油。这两层要求高压差，才能达到工业的采油速度。

4. Castera Lou（见图5、图6）

Castera Lou油田是法国西南部的陆上油田，水平井CLU 110钻遇的是裂缝不发育或无裂缝的“Breche de Garlin”白云岩油藏。油藏埋深在海平面以下2,900米，在含水层上有70米高的油柱。用三口直井开采油田已有四年。

油藏的岩石孔隙度为10%，渗透率为0.5毫达西，石油粘度为1.5厘泊。

水平井穿过油层330多米时（见图5）泥浆完全漏失，说明有张开的裂缝存在，随后进行了堵漏。

从图6的采油曲线可以看到，水平井的日产油量约为邻近典型直井的5倍以上，这与后来用公式计算的结果一致。

尽管生产压差很高（达60大气压），但CLU 110井在水窜之前已采油一年。此时累计产油约10,000吨。

在水平井段，必然有一些水平的致密透镜体地层保护这口井，否则早已发生“水锥”的垂直上升（或“水平锥进”）。

目前CLU 110井的产量看来是来自油层无裂缝（或少量裂缝）区。最近，计划该井继续出油，直到完全水淹。然后将已堵住的裂缝解堵，从中再采出一些油。

5. Rospo Mare油田（见图7、图8）

EIF-IFP公司曾在1977年计划专门进行水平井钻井的研究工作，以对付开采Rospo Mare近海油田重质油油藏的严重挑战。那时认为，用常规方法开采，该油藏是没有经济价值的。油藏深1,200米，是岩溶层（喀斯特），有洞穴、空洞，并有垂直裂缝与之相互交错。岩石本身是致密的。石油地质储量可能达2亿米³。

石油是重质油，比重达0.993，地层条件下的粘度为300厘泊，油水间的密度差仅为0.01克/厘米³，这说明重力造成的影响是很小的。

小比重差，大流度差和高的垂向渗透率，所有这些因素，至少对于直井来说，会面临严重的油水界面问题。曾设想，从离油水过渡带尽可能远的地方钻长的水平井，应能与很多裂缝和空洞相交，从而使产油量大大增加。这样反过来，还可以在很小的压差下采油，避免油水接触面急剧上升，这是提高扫油效率的一个关键。

在钻完两口Lacq水平试验井后，认为已有足够打水平井的能力。不久，就考虑在一个试

验区的三口采油井中有一口打成水平井。这三口井从 1982 年末开始采油。图 8 是生产记录，有一些重要特征。

三口井以最大的无水（临界的）采油速度采油，无水临界采油速度呈有规律地下降。这是油水界面连续地和地区性地上升的一种迹象。因此，扫油效率高。

水平井 RSM6 井，从产量观点看（为其他两口井的 20 倍以上），从临界采油速度看（为 7.4 倍），或用累计产油量作基准（为 4.6 倍），都大大超过其他两口井。试验区内的扫油效率，可以从这些井的累计产量中去估算：水平井是其他两口井平均值的 4.6 倍以上。

沿着水平井段，液源是不连续的，因为油层是岩溶层（在非常致密的无渗透性的岩石内依靠分散的各条天然裂缝与溶洞相交）。关于油源位置的这种不确定性，使得无法进行油藏生产动态分析，而又准备用钻水平井进一步挖潜开发 Rospo Mare 油田。

为了克服这一困难，在 1984 年（在 Lacq 91 井第一次试验后）对 RSM 6 井进行了生产测井^①。考虑到油源的不连续性及石油粘度高，生产测井应能记录到一些大的出油点。

测井获得的主要结果如下：井的后半部（“尾部”）没有任何出油象征，而在前半部（井眼“头部”）则有三个液体流入段。产油能力高的井段多数是紧挨钻井时穿过的洞穴处。液源（喀斯特溶洞、大裂缝）之间的距离大约 100 米。

因此，希望对“尾部”进行局部的增产措施，能沟通这些液源，并至少在一段时期内重新使井恢复产油能力。

三、结 论

现在，从上述描述中可以就某些问题得出结论：

1. 水平井与高产能的垂直裂缝相交了吗？

是。上述四口井都与垂直裂缝相交了。其中仅有一口井（Lacq 90 井）是可疑的；有两口井是意外的（Lacq 91 井、Castera Lou 110 井）；Rospo Mare 6 井则是有目的的（随机的）。

水平井与垂直裂缝相交不算奇迹，因为从岩石力学的定律看，在大多数烃类储层中占优势的应力，将导致直的或倾斜角大的裂缝。这是用水平井开发油田很有潜力的依据。

2. 水平井是否已经提高油层的扫油效率（和提高了采收率）？

是。让我们比较 Rospo Mare 油田试验区三口几乎同时投产油井的采油资料。前面介绍过，RSM 6 水平井的扫油效率为其他井平均值的 4.6 倍。这应当是最低限，因为 RSM 4 井如按照法律准则生产，它的的经济日产量仅为 25 米³/天。

Castera Lou 油田也可以这样来考虑。

在这个油田，生产预测是用单井完成的。水平井的累计产量是邻近一口典型直井的 2.5 倍。这可能是最小的比例，因为还没有考虑通过“尾部”的垂直裂缝组产油的可能性。

3. 理论计算的产能增加与现场的实际增加一致吗？

是。水平井比直井增加的产能，可用下面的简易公式进行比较：

① RSM 6 井曾用两条油管完井，一条油管采油，另一条用抽汲技术测试。

$$\frac{PI_H}{PI_v} = \frac{\ln\left(\frac{r_{ev}}{r_{wv}}\right)}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{L}{2r_{eH}}\right)^2}} \cdot \frac{\ln\left(\frac{L}{2r_{eH}}\right) + \frac{h}{L} \ln\left(\frac{h}{2r_{wH}}\right)}{\frac{L}{2r_{eH}}} \quad (1)$$

上述公式可以延伸用于各向异性油藏、多层油藏,象Dupuy^[9]所介绍的,成层作用可转化为各向异性。公式亦可用于天然垂直裂缝油藏,为此要用 k_f/k_m 乘第二项,并用 r_{ev}, k_f 代替 r_{ev}, k_f ,通常可以从试井中获得^[10]。当垂直井部分钻入地层时,用 $h_p R_e$ 代替 h , R_e 是一口井的减产参数。当井的钻开程度减小时, $h_p/h = 1$ 就变为 $h_p/h < 1$ 。

进行了两组计算,一组为裂缝不发育区(Lacq 90井, Castera Lou 110井)的计算;另一组为裂缝区的计算。

计算结果说明,与现场测试的产能比较一致:即对无裂缝地层来讲,产能增加2倍;而对裂缝发育的地层来讲,倘若直井不与裂缝区相交,产能可增加约10倍甚或100倍。

直到现在,应该承认,沿水平井段液流的供油状况几乎是不清楚的。从计算的目出发,想象液流总是沿井身连续供油的。

4. 不稳定压力试井解释是否可行?

行。这个问题在另一篇论文^[9]中已描述过。其目的是:

“为了满足水平井设计和试井解释的要求,需建立以下问题的解析解:

- (1) 有不渗透或定压边界的无限或有限的储层。
- (2) 有井筒储存和表皮效应的水平井。
- (3) 有均匀流量或无限导流能力的水平井。

压力图上指出了水平井特有的双重现象:初期压力的变化,是由于在垂直于井的平面上,以圆形径向流的方式流入井内,后期的压力状态则相当于水平拟径向流动。

为了实际应用,介绍一口井的试井设计和解释方法,包括:

- (1) 半对数分析求已定义的假表皮效应值。
- (2) 双对数分析(用台式计算机划出样板曲线)。

还提供了时间准则,以确定特别是拟径向流的初至时间。”

这样,就求证了某些特殊的“水平”不稳定流动的特性。

但还有另一个水平井的特性:即沿水平井段 $1/3$ 或 $1/2$ 英里井段,地层可能是很不均质的。Daviau等人介绍的适用于一条裂缝的解释方法,是以油藏均质性的假设为依据的,并且适用于所有的实际地质情况,即使操作者将来能够选择性完成他们的水平井(实际尚不是如此)也同样适用。

5. 在水平井内测试行吗?

行。这属于油井测井。

按时间顺序,已录下Elf公司四口井的测井资料。

在Lacq 90井,在钻杆内进行了伽马测井。

在Lacq91井,已进行伽马、感应、声波和变密度测井。

在Rospo Mare 6井,进行了井眼补偿感应声波测井、变密度测井、伽马测井、井径测井以及双侧向测井。

还泵入小直径测井仪,通过钻杆下到裸眼层段,进行了密度中子伽马测井。

在Castera Lou 110井,进行了随钻伽马测井。

大家可能注意到,从Lacq到Rospo水平井,测井项目越来越多,但到Castera Lou水平井则减少了。这是因为在钻开油层阶段出现了流体控制问题。

曾使用过两种裸眼井测井技术,即:

(1) SIMPHOR水平测井系统:大直径测井工具接在钻杆出口处,电缆悬在油井垂直井段的钻杆外面,然后通过一个侧引鞋进入钻杆,最后泵过钻杆,并使其末端卡接在测井工具上。

(2) 排出测井技术:已用于大角度井并引用到水平井。

这些测井方法的优点是,不管所使用的测井步骤如何,它们的测井质量好,重复性好。对揭示地层中某些重大非均质性很有用,如Lacq 91井中的大裂缝带或Rospo Mare 6井中的埋藏谷(见图7)等。

目前,尚缺少一个至少有四个独立臂、可以沿井眼测量井身剖面形状的精确的井径仪。在进行选择性完井时需要这种资料。

另一个不足是,还不了解钻井后期穿过的储层不同井段的产油能力变化。测井温可能是解决这个问题的常规办法。关于生产测井,像前面提到的两个方法,已成功地使用过。从技术观点看,在500米长的水平井段进行携带复杂工具的排出作业,对生产测井来说是可行的。

目前,可以说,在水平井内进行测井是可能的,但相当费钱(费时间)。就结果而言,预期今后将从两个方面进行改进,即选择生产区段和测量井底井眼横截间的非圆情况。

6. 生产地质情况怎么样?

四口井出现四种出人意料的地质情况。

Lacq 90井(见图1): Lacq Supérieur油田井距^①很密,并有25年的采油史,认为油田情况已很清楚。在钻井中,岩心显示出水平井已横穿过油藏顶部,钻到油藏外面,被迫停钻。这完全是意外。

Lacq 91井(见图3):水平井与未料到的高发育裂缝区相交,这表明,在白垩岩与白云岩间的边界是不知道的。

Rospo Mare 6井(见图5):以前在Rospo Mare构造上打的9口直井,没有一口与产能高、产量下降慢的大溶洞或裂缝相交。

第七口井,即水平井,穿到了溶洞和裂缝。

这口井也提供了重要的地质资料。如,在油层顶部存在泥质充填的埋藏谷;至于该区有关岩溶(喀斯特)系统的理论就更不用说了;还有喀斯特洞穴大概的位置及规模,以及能够

^① 所打的井不仅是浅的油井,而且还有深部气井。

保护水平井防止底水上升的可能存在的不渗透层等。

这些资料与最近地震调查的结果一起，有助于以后准确地确定 Rospo Mare 油田打水平井的位置。

Castera Lou (见图 5)：在水平井段，油藏顶部的显示，与原来预测的基本相同。但从该井收集到的两种重要资料，可以改善对油藏地质的了解。

首先是确定了与水平井“尾部”裂缝高度发育段有联系的断层位置，在此处发生了泥浆漏失；第二，可能有不渗透层存在，它在一年内防止了地层底水突进到井眼。

因为能够记录各种测井资料并且钻长达1,000米的水平段，所以，用钻水平井来提高对油层横向的了解是很有好处的。

7. 选择性地完成这些长（约500米或更长）的水平井段是否能行？

还不行。这项工作刚开始就认识到，在油藏内钻0.5公里（或更长）的水平井眼，必须设法控制所钻遇的不同生产区段。

尽管如此，Lacq 90井（第一口试验井）并没有选择性完井，而是采用当时可供水平井使用的设备，即一种预制的、不注水泥的割缝衬管完成。该井在油藏内的部分，原准备为裸眼，但是为了防止油藏岩石可能的塌陷，堵塞井眼，仍决定下入衬管。

1981年初，Lacq 91井（第二口试验井）进行一次复杂的选择性完井，这是考虑到有一个白垩“头部”，一个裂缝高度发育带，以及一个白垩“尾部”的存在。

曾设想用两个封隔器隔开裂缝带，固井及射开“头部”，而使“尾部”通过一个不注水泥的割缝衬管出油。

这样，三种有潜力的完井作业原理都试验过，即：外封隔器，注水泥和不注水泥的割缝衬管。

在实施过程中，封隔器不起作用，其中一个不张开，另一个密封不好。“头部”水平固井作业基本是成功的。测井表明，很多层段被水泥固结很好。接着，用SIMPHOR水平射孔装置，很顺利地“头部”20多米进行了水平射孔。很遗憾，以后的酸化作业，破坏了固井水泥。

事实上，这口井几乎完全通过一个不注水泥的部分射孔的衬管，从裂缝发育区生产原油。

Rospo Mare 6井于1982年钻成，是一口工业油井，最后实际上是不得不用可行的设备，即预制的、不注水泥的割缝衬管完成。如果当时有一种选择性完井技术可用，也就不需要用昂贵的生产测井去了解油源的位置了。

Castera Lou是在1983年钻成的，完全适合作第二口选择性完井的候选对象。因为它是一口试验井，水平井段由一条长300米没有明显裂缝的井段和30米裂缝发育井段组成。两个外封隔器坐在两个层带的交界处。胶皮筒正常地张开。但后来在测压期间，发现封隔器座封不严。CLU110水平井，像Elf其他三口井一样，是通过一个不注水泥的衬管来采油。

因此，虽然用水泥水平地固井易脆，但还是可能的。但直到现在，用外封隔器在水平井内密封不同井段，事实证明并未成功。为了改进两种完井作业，关键的一点是要了解井眼的形状，通过两种因素，即岩石应力和钻杆沿井的水平段井底外轮廓线的机械磨蚀，人们可以推测，水平井的水平段井眼可能是椭圆的。

8. 什么是研究项目的主目标?

目前,至少在某些特定情况下,已能合理掌握钻井、取心和水平测井技术,至少还可以估价和预测水平井的动态。

当前尚不能解决的主要问题是:根据预期油藏的非均质性,对长水平井进行选择性地完井。

为此,Elf 和 IFP 已决定继续它们的研究工作,并以最大的努力去掌握水平井的选择性完井技术。

所谓的“PRODHOR”项目,批准预算为200万美元,为期两年。

项目最核心的部分是着重研究和开发水平井眼的固井技术。这项工艺在模型上进行试验,模型尽可能模拟井下条件。通过试验将对水平井固井提出详细建议和作业程序。

其他方面的工作是:

(1) 对水峰或气峰(“水平”锥进)进行理论研究。

(2) 井底几何形状的测量技术(基本上指前面提到的井底断面形状)和井底生产参数的测试技术。

(3) 评价套管外封隔器坐封椭圆井眼的状态。

(4) 根据选择性采油设计要求,调整水平井的采油管柱。

项目的研究成果,将尽快在现场试验。这意味着下一口水平试验井(仍在决定之中),很可能是选择性完井。

9. 有任何工业化计划吗?

有。根据这一批研究成果,其中最重要的是 Rospo Mare 6水平井的极好的采油状况,决定用水平井开发 Rospo Mare 油田。

开发计划考虑到地质上的不确定性,将采用逐步进行的方法,即:详细的地震作业,打直的估价井,从一个专造的平台打4或8口水平井,从现有试验区平台,打3口水平井。然后,就可以决定用水平井更全面地开发 Rospo Mare 油田。

油田计划在1987年开始采油。其他油田尚在研究中。

四、结束语

最后,作者愿提醒读者注意某些重要问题。钻水平井的成功,意味着油井的高产弥补了过高的开支。

研究这个课题,意味着要选择合适的、有潜力的油田,以提高“水平井”的产油量,并减少过高开支^①。

选择合适油田是关键,必须彻底做好。看来,最适合应用水平井开发的油气田,是不了解垂向渗透率非均质性(裂缝、喀斯特)间距的油田,带某些裂缝的致密气田,以及油水或油气界面严重不规则的油田。

“水平井”产量的提高,取决于地层的横向非均质性。为此,要充分了解非均质性,然

^① 减少过高开支不是本文讨论范围。

后通过水平井的选择性完井从中获得收益。

符 号 说 明

- a——两条垂直裂缝间的平均距离；
h——厚度；
k——渗透率；
L——水平井在油藏中的长度；
PI——采油指数。
下角注
e——外部的；
f——裂缝；
H——水平的；
m——基质岩（岩石）；
p——带眼的；
v——直的，
w——井。

参 考 文 献

- 1 - Reiss, L.H., Jourdan, A.P.L., Giger, F.M., Armessen, P.A. "Offshore and Onshore European Horizontal Wells". Off Shore Technology Conference, Houston, Texas, May 7-9, 1984 - OTC 4791
- 2 - Yager, D., "Esso Drills World's Longest Horizontal Well" The Roughneck, January 1985
- 3 - Steenbock, A. Horizontalbohrung gelungen - Preussag erprobte neue Methode in der Berkhopen 2001. Erdseil Informationsdienst January 25, 1985 ; In german.
- 4 - Jourdan, A.P. ., Reiss, L.H., Joly, E., "Horizontal Wells : the Worldwide State-of-the-Art, as of 1986". To be presented at the SPE International Meetin. on Petroleum Engineering, Beijing, China, 17-20 March, 1986. SPE 14067.
- 5 - Bleakley, W.B., "IFP and ELF Aquitaine Solve Horizontal Well Logging Problem". Petroleum Engineer International (Nov, 15, 1983).
- 6 - Joly, E., Dormigny, A., Catala, G., Pinson, F. "A New Production Logging Technique for Horizontal Wells". SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Las Vegas, Nevada, September 22-25, 1985, SPE 14463.
- 7 - Giger, F.M., Reiss, L.H., Jourdan, A.P.L. "The Reservoir Engineering Aspects of Horizontal Drilling" - SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, September 16-19, 1984. SPE 13024.
- 8 - Daviau, F., Bourdarot, G., Mouronval, G., Curutchet, P., "Pressure Analysis for Horizontal Wells". SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Las Vegas, Nevada, September 22-25, 1985. SPE 14251.
- 9 - Dupuy, M. Lefebvre du Prev, E. "L'anisotropie d'écoulement en milieu poreux présentant des intercalations horizontales discontinues". IIIe Colloque de l'A.R.T.P., Pau, France, September 23-26, 1968. Paper n° 33. In french.
- 10 - Reiss, L.H. "The Reservoir Engineering Aspects of Fissured Formations". GULF Publishing, 1980.
- 11 - Odah, A.S. "Steady - State Flow Capacity of Wells With Limited Entry to Flow". Trans A.I.M.E. 1968. vol. 243, n.p. 43651.

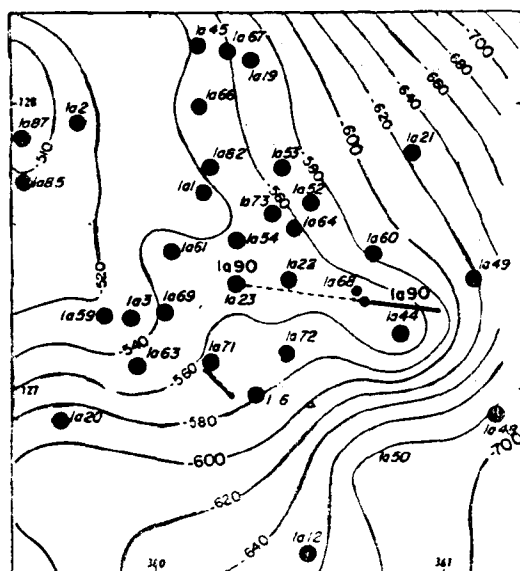


图 1 Lacq 90水平井的井位图 (油田西南部)

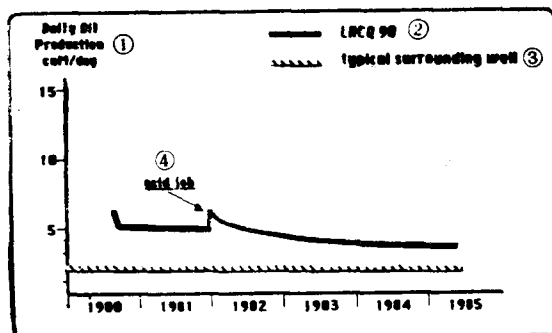


图 2 Lacq 90水平井的采油曲线。曲线开始下降很快,可能是部分孔眼坍塌,含水98%

①日产油量,米³/天; ②Lacq 90井的产量; ③典型的邻近井的产量; ④酸化作业

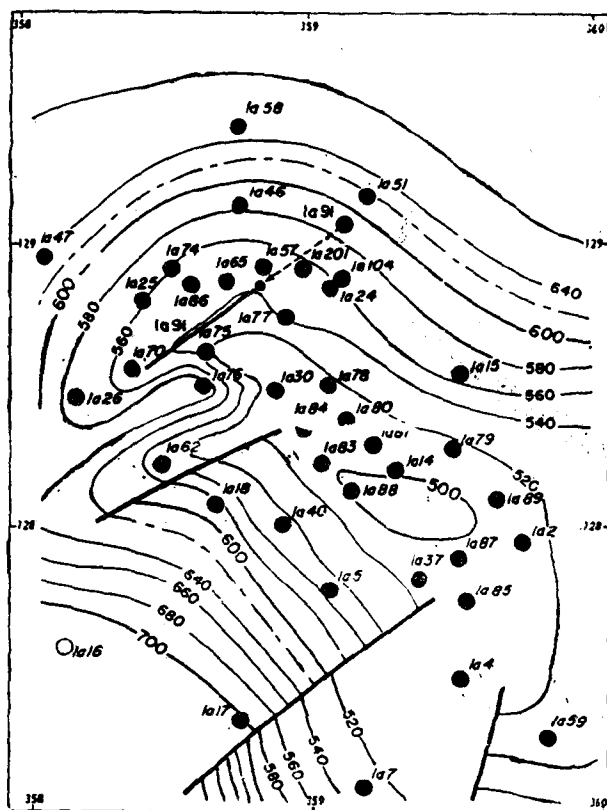


图 3 Lacq 91水平井的井位图 (油田东北部)

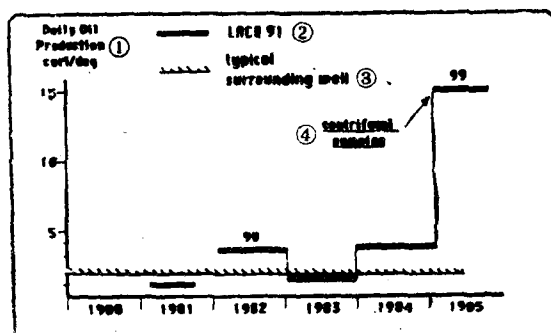


图 4 Lacq 91井采油曲线。反常的生产状态，反映有很多应掌握的完井问题。

曲线上的数字是含水百分数

①日产油量,米³/天; ②I.aq 91井; ③典型的邻近井; ④用离心泵采油

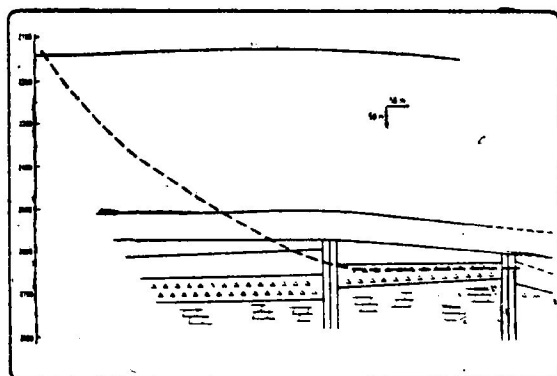


图 5 Castera Lou 110水平井钻遇的油层截面

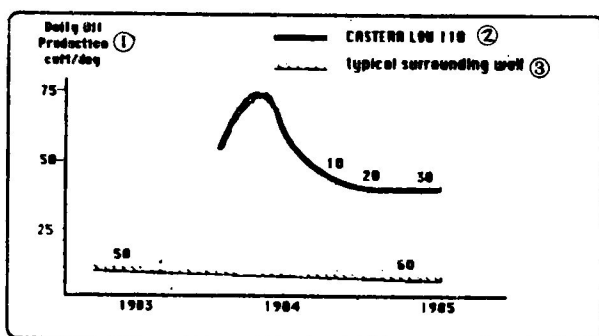


图 6 Castera Lou 110井采油曲线, 该井的采油指数大约为 $0.5 \text{ 米}^3/\text{天}/\text{巴}$ ($0.23 \text{ 桶}/\text{天}/\text{磅}/\text{英寸}^2$)。生产压差达150巴。油井无水采油一年。曲线上的数字是含水百分数

①日产油量, $\text{米}^3/\text{天}$; ②Castera Lou 110井; ③典型邻近井

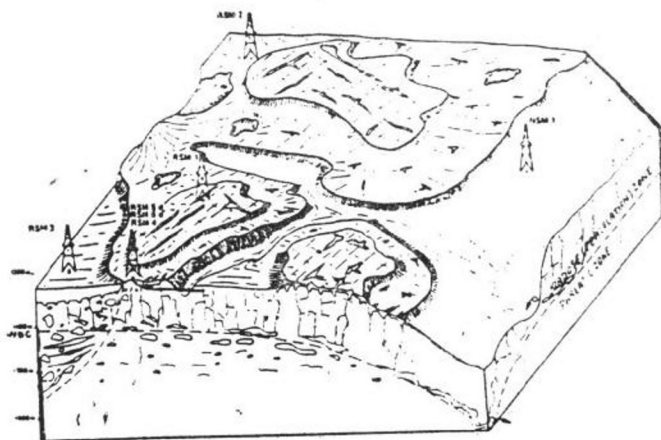


图 7 Rospo Mare 岩溶油藏简图。埋藏谷被 Rospo Mare 6 水平井穿过

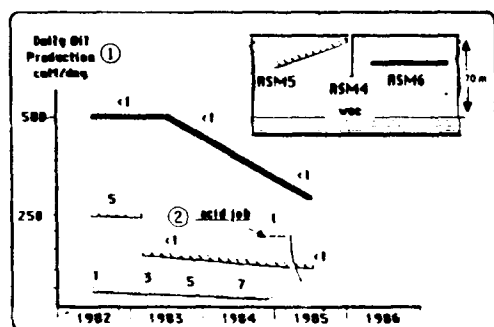


图 8 Rospo Mare 试采曲线。尽量用临界速度采油（不含水）。临界速度下降反映油水界面出现区域性上升。在RSM4井上进行酸化作业（产量急剧上升），可能已连通附近的一个喀斯特洞穴。

曲线上的数字表示含水百分数

①日产油量,米³/天; ②酸化作业