

A
科技情报
专题调研文集

国外水平井钻井工艺技术

四川石油管理局钻采工艺研究所

一九八六年十一月

①

26341



200433735



00271561

前 言

本专题调研文集是四川石油管理局科技外事处 一九八五年下达我所的科技情报专题调研课题。现将其出版，供领导和广大科技人员参考。

恳切期望广大读者提出宝贵意见。

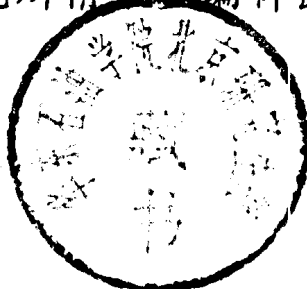
专题负责人：缪明富

参加调研人员：文楚雄 赵幼航 熊家伟

审 稿 人：骆觉民 徐祖炳

SV47/31

本专辑系委托天然气研究所情报室编辑出版，特此表示感谢。



四川石油管理局钻采工艺研究所

一九八六年十一月

目 次

1. 国外水平钻井技术简况·····	(1)
2. 分支水平钻井工艺再度流行·····	(15)
3. 苏联的分支水平井·····	(27)
4. 加拿大的水平井和大斜度井·····	(40)
5. 法国埃尔夫·阿奎坦公司的水平钻井技术·····	(52)
6. 美国大西洋里奇菲尔德公司完成四口分支水平井·····	(65)
7. 得克萨斯东部钻井方法有限责任公司发展水平钻井工艺·····	(77)
8. 用气动钻头钻水平井段的方法·····	(81)
9. 多次钻穿油气层的钻井技术·····	(85)
10. 减小钻杆与井壁间摩擦力的方法·····	(86)
11. 井下柔性驱动装置·····	(88)
12. 定向井完井方法及设备·····	(90)
13. 能减少大斜度井测井问题的新型测井工具·····	(93)
14. 大斜度定向井管柱入井方法·····	(98)
15. 大斜度定向钻井工艺·····	(100)
16. 美国普鲁德霍油田钻水平井提高产量·····	(107)

补白:

钻水平井提高泥盆纪泥质页岩层的天然气采收率·····	(26)
孟加拉共和国应用定向水平钻井技术铺设五条大型管线穿越河流·····	(63)
在西西伯利亚条件下丛式井组的最佳井数·····	(76)
Berkh ⁰⁰ pen2001水平井的钻井设计·····	(84)

国外水平钻井技术简况

——专题情报调研综合报告

缪明富 编写 骆觉民 审核

摘要 本文是对国外有关资料调研的结果，共分十三个部份，含水平钻井之目的意义、钻井工艺、测斜技术、电测和完井方法等主要内容，但诸方面只予以简单概述，详情见于所附译文。文中亦叙及国内情况并提出相应建议。

前 言

水平钻井乃属定向钻井之列而又独具特色的一种钻井技术。定向井可分为普通斜井、大斜度井、水平井、上翘井、双筒井、多底井和丛式井，而水平井实则是定向钻井技术发展的重大进步，具有更新意义和特殊的用途。

水平钻井技术并非新鲜事物，其发展由来已久，五十年代曾风行一时，后来由于多种因素而趋于冷落。然而，到了七十年代末期，人们又对此重感兴趣，使之再度流行，并受到越来越普遍的重视，短短几年内，已成了一大热门。近几年中，国外许多专家都在重新估价水平钻井的用途和经济效益，积极研究新的方法和发展新的技术装备，一些公司和油田更是热衷于利用水平井达到各种目的。特别突出的是法国埃尔夫·阿奎坦公司。该公司起步很晚，却是后来居上。自1980年6月打成西欧第一口水平井（西欧其他地区过去打的分支水平井除外）以来，其技术水平提高很快，在短短的四年时间内钻成了五口水平井，井深一口比一口大，钻井工艺逐步成熟，技术装备亦日趋完善。这一切使得该公司雄心勃勃，力图将其工艺技术推向世界各地投入工业性应用。目前，已与美国的索哈公司、英国的国家石油公司、西德的德意志德士古公司等七家公司签订了包打水平井的合同。并且，对意大利亚得里亚海罗斯波·梅尔油田提出了采用水平井合理开发其重油的新方案，即将付诸实施。

根据现有资料的不完全统计，全世界现有水平井三百余口，其中大部份是分支水平井。这些水平井有着各种用途，不仅反映出显著的经济效益（例如，使一些地区的油气产量成倍提高，救活一些濒于绝望的老矿，等等），亦表明此种钻井方法具有极为可观的发展前景。

我国从1955年开始打定向井，迄今已钻成一千多口，但其中只有三口大斜度井、一口水平井和一口上翘井（全部在四川）。三口大斜度井即青1-2-11井、阳26井和中54井，最大井斜分别为 $60^{\circ}30'$ 、 80° 和 64° 。磨-3水平井于1965年11月钻成，垂直井深1367.8米、斜深1685米，水平位移444.21米，在油层内延伸204.5米（相当于该油层垂直厚度13.7米的14.9倍）， $90^{\circ}\sim 92^{\circ}$ 的水平段长度为160米。该井摸索了一些用短涡轮钻具带弯接头造斜和用涡轮钻具钻水平井段的经验。上翘井即巴24井，于1967年元月完钻。该井原设计最大井斜 70° ，

由于钻至1560.35米深处无气显示,在 1315~1365米井段打水泥塞,然后从套管鞋底下侧钻第二井筒至斜深1705米处,井斜达到 $119^{\circ}15'$ 。全井水平位移533米, $90^{\circ}\sim 119^{\circ}15'$ 的上翘井段长68米。

尽管已取得上述成绩,但技术水平与国外相比尚有很大差距。因此,最近邀请了法国埃尔夫·阿奎坦公司来川合作,在丹凤场构造钻一口水平井,借机培训工程技术人员,并证实水平井在四川盆地二叠系的可行性和提高产量的能力、增进对气层的地质了解和证实地震解释给出的裂缝范围是否正确、了解钻井时间和成本及产量以便对类似气田的开发进行技术与经济研究。

水平钻井发展史

水平钻井和大斜度钻井工艺在定向钻井方法刚一萌芽即已提出,并随定向钻井技术的发展而逐渐成熟。最早的水平钻井可追溯到1863年,当时瑞士工程师列晓在阿尔卑斯山修建铁路隧道时提出了钻水平井的建议。这一期间,俄国采矿工程师 C. Γ. 沃依斯拉夫已经在研究定向钻井和水平钻井的工艺技术问题。1870年,由他领导用顿钻方法在勃良斯克市的水上打成了世界上第一口井斜 60° 的斜向井。稍晚些时候,瑞典和美国率先研制出观测井眼空间位置的测量仪器。紧接着,俄国于1888年也设计出了测斜仪器。测斜仪器的出现无疑刺激了定向钻井技术的发展和推广应用。十九世纪末和二十世纪初,俄国在乌拉尔、哲兹卡兹干、阿尔泰和扎拜卡尔依等各采矿区已开始大量钻斜井和水平井探矿,并在其他一些地区用金刚石取心钻头或铁砂钻井法打成了一批 $62^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 的大斜度井⁽¹⁾。

1882年,美国加利福尼亚州在圣巴巴拉的萨尔费山朝油苗露头凿入一口竖井,然后在油层下面横向掘进一些坑道,再向上朝油层内钻井眼⁽²⁾。这大概算是最早的分支井雏形。1919年,出现了有关从主井筒侧钻出分支水平井眼的装置的第一个专利。1922~1931年间,又有四项专利分别提出了侧钻分支井的方法。1929年,加州用苏柏林式钻具(Zublin Tools)打成了几米长的完全水平的分支井筒。

1930年,苏联石油和天然气行业开钻第一批定向斜井,但由于缺乏经验和适当的定向手段,这些井未能完成。直至1934年,石油钻井行业才解决有关问题,并用转盘钻打成了一场两井的丛式定向斜井。

1935年,苏联在马尔丹尼亚油田首次采用涡轮钻具带弯钻杆打定向井,但鉴于涡轮钻具的缺点,这一方法未能完善。到1941年,才在巴库第一次用涡轮钻具钻成定向斜井。从此,定向钻井技术的发展揭开了新的一页。随着经验的积累、钻井技术和井下测量仪器的逐渐完善,涡轮钻打定向井开始在陆上和海上广泛采用,而且促进了多底井、丛式井和水平井的发展。1954年,苏联石油行业打成了第一口 90° 的分支水平井。这种钻井方法也就迅速推广开来。

在美国和其他发达国家的油气行业,定向钻井技术的发展稍早一些,但也是1933年才开始工业性应用。

五十年代,非磁性钻铤开始应用于定向钻井,而六十年代末,已经比较平常地使用液压传动定向弯接头、非磁性钻杆接头,并已应用计算机分析测斜数据⁽³⁾。七十年代开始采用随钻测量技术。这些都对水平钻井的发展起过不可低估的推动作用。

整个说来，五十年代中期至六十年代中期这十余年间曾是水平钻井普遍流行的时期，特别是分支水平井，作为一种提高产量的方法曾在苏联、美国、加拿大、意大利等国家的许多油田受到重视。遗憾的是，以当时的技术条件而言，这种钻井方法是不经济的，尤其是与低成本的压裂处理相比更是如此。因而，这一热潮未能持久，以后至七十年代中期这十余年间除苏联和美国少数油田坚持钻一些分支水平井以外，其他地区几乎没什么动静了。

随着最好的生产层枯竭和石油价格上涨，促使人们对水平钻井方法重新加以认识。且由于科学技术的发展，以及钻大斜度井的经验和有关工艺的改进，水平钻井变得比较容易实现，并显示出很大的经济效益。这样，就导致一个钻水平井的新的热潮开始。而且，最近几年中创造了惊人的世界纪录：69~72°、斜深5533米、水平位移4597米的大斜度井；水平段长达1016米的水平井；曲率半径3.7~12.2米的分支水平井；水平位移与垂直井深之比值达到2.28。

水 平 井 类 型

就钻井工艺而言，大斜度井、水平井和上翘井应属同一范畴（后文还将叙及）。这三种定向井的主要区别是在油层套管井段。大斜度井达到预定井斜后稳斜钻成斜直井段，水平井是井斜达到90°后横向延伸一定距离，而上翘井是井斜达到90°后逐渐上升钻进一定距离。若以井斜度区分，只能大致分为60°（有人认为是50°和65°）至85°、90°左右、90°以上到120°或更大（有些美国专利提出井筒可以上翘到地面）等三种情况，并无严格界限。鉴于诸种因素，国外一般在论及水平钻井工艺技术时往往包含钻大斜度井和上翘井的情况。

单就水平井来说，大体上可以分做两类：其一，像普通定向钻井一样，先钻一垂直井段，然后从选定的造斜点开始增斜，逐渐达到90°角，再稳斜钻进一段，最后完井；其二，主井筒为垂直井或大斜度井，再侧钻一些水平的分支井筒，这类井即所谓的分支水平井。

分支水平井又分四种情况：

1. 先钻成大斜度主井筒（个别情况下也钻成水平井），然后从适当位置（一般是以目的层来考虑，多选在大斜度或水平井段）侧钻分支井筒。侧钻的分支井筒可以有多个，其中有些不一定完全水平。

2. 先钻垂直主井筒至生产层底部，再从井底以上适当位置向四周钻一、两个或多个分支井筒（其中有些不一定达到水平）。或者，钻垂直井至生产层顶部或稍高处，然后分岔。亦可利用旧井侧钻分支水平井筒。国外为达到各种目的而利用旧井侧钻的情况相当普遍，在全部分支水平井中占有很大比例。

3. 钻深达2,500米的分支水平井，这是一种水平井段长达1,000米、有着众多的分支井筒的巨大工程，一口井就可以控制一大片油藏空间。而且，这种向四面八方钻分支井筒的方法可以在丛式钻井中应用。

4. 先钻一垂直中心井，然后由中心井向四周钻水平井段后再上翘钻出地面，或者，从四周钻水平井与中心井连通。也可以利用油田原有旧井作中心井，它专用来采油，而各种增产措施在四周水平井筒内进行。

水平钻井技术的用途

水平钻井除具有普通定向钻井的用途以外，还有一些特殊的用途：

1. 用在一般方法无法开采或不经济的条件下，例如，用于开采重油或广而薄的油藏，用于油页岩的地下处理。
2. 提高油气产量和地层采收率，例如，用以开发裂缝性油气藏或连通性差的致密低渗透性油气层。
3. 用在老矿区勘探新的可采储量，或用在枯竭油藏钻加密井。
4. 处理水锥问题，即在底水油藏的中、上部钻水平井，以改善底水锥进趋势，延缓见水期（见图1）。
5. 在气顶油藏，从边沿钻水平井绕过气顶，以防止顶气锥进。或者，当垂直井生产期内已发生气锥问题时，在该垂直井靠近油层下部的位置侧钻分支水平井筒，以减缓气锥问题。
6. 注蒸汽或实施其他强化采油的增产措施。
7. 地质勘探中的特殊用途，如用以减少勘探钻井量或减少取心进尺量等。
8. 固体矿物的特殊开采方法。例如，用以使煤炭在地下气化，即沿煤层钻斜井或水平井，并钻一垂直井，两个井筒各有用处，一井吹氧，另一井筒采出煤层气（见图2）。苏联已在七十年代后期建成五个地下气化站，年产煤层气15亿多 m^3 。美国正在实现的计划是到1990年建成25个地下气化站，每年处理1.5亿吨煤。其他许多发达国家也在积极进行这方面的工作。又譬如，用以使硫或地蜡在地下燃烧为气体（二氧化硫）或熔化为液体然后采出。

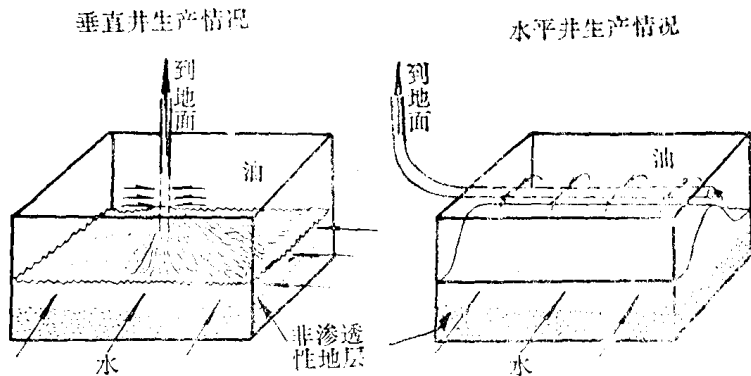


图1 垂直井与水平井生产时底水推进形状

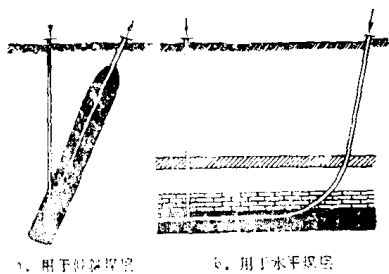


图2 煤层气化示意图

9. 用于建设工程，譬如，横穿水运繁忙的河流铺设管道（输气管线等）。

10. 水平钻井还有一项有益的用途即修井。例如，五十年代加利福尼亚州长滩地区许多井在426.7~609.6米深处因塌陷造成滑移而将套管挤扁，应用水平钻井工具从挤扁和弯曲的套管开窗侧钻新眼，然后重下一段套管柱。

水平井的效果评价

从前述水平井的用途不难看出，其经济效益在许多方面是不能简单地以数字来计算的。仅就提高单井原油产量而言，有一些评价水平井增产额的数学模式可供参考。

苏联巴什基里亚石油科研设计院的Γ.X.加勃巴索夫等人认为,垂直井中重力排泄油流等于:

$$Q_v = \frac{\pi k \rho}{\mu} \cdot (h^2 - h_c^2) / \ln \frac{R_k}{r_c} \dots\dots\dots (1)$$

式中: k ——地层渗透率; ρ 、 μ ——分别为原油的比重和粘度; h ——饱和含油层厚度; h_c ——井内液柱高度; R_k 、 r_c ——分别为泄油区域半径和井眼半径。

假设半径为 r_c 和长度为 L 的水平井筒位于圈闭油藏底部,则进入井内的重力排泄油流由下式确定:

$$Q_H = \frac{2\pi k L}{\mu} \rho (h - h_c) / \ln \frac{R_k}{r_c} \dots\dots\dots (2)$$

在 $h_c = 0$ 的条件下, Q_H 和 Q_v 的极限值关系为:

$$\bar{q} = 2L/h \dots\dots\dots (3)$$

(3) 式表明,当 $L = h$ 时,水平井的极限产量为垂直井极限产量的二倍。此外,水平井与垂直井相比的产量相对增加值 $\bar{q}$ 和油层中水平井段的长度成正比。

油层中液面将随着开采而下降,所以需要确定水平井产量的平均工艺效果。为此,可利用平均值理论:

$$\bar{q}_{cp} = \int_{h_c}^h \frac{2L}{h} dh / (h - h_c) = 2L \ln \frac{h}{h_c} / (h - h_c) \dots\dots\dots (4)$$

在 $L = h = 100$ 米和 $h_c = 1$ 米而其他条件相同的情况下, $\bar{q}_{cp} = 9.3$, 也就是说,水平井在整个重力泄油开采期间的平均产量是为垂直井同一时期平均产量的9.3倍(4)

法国埃尔夫·阿奎坦公司在模拟分析的基础上也得出了大致相同的结论。该公司提出垂直井和水平井产量公式分别如下:

垂直井产量公式:

$$IP_v = \frac{2\pi k}{\mu} \cdot \frac{H}{\log \frac{r_e}{r_w}} \dots\dots\dots (5)$$

水平井产量公式:

$$IP_H = n\pi \frac{k}{\mu} \left[\frac{1}{H} \log \frac{1 + \sqrt{1 + (L/2r_e)^2}}{L/2r_e} + \frac{1}{L} \log \frac{H}{2\pi r_w} \right] \dots\dots\dots (6)$$

式中: k ——渗透率; μ ——粘度; r_w ——井眼半径; r_e ——采油半径; H ——油层厚度; L ——水平泄油段长度; n ——从一口垂直井所钻水平井眼数量。

他们认为,水平井的产量增值与储层内的水平段长度成对数函数关系,即 $G = f(\log L)$, 与油层厚度亦成对数函数关系。与垂直井相比,可增产4倍以上。水平井在储层内的延伸长度与油层厚度、水平方向渗透率和垂直方向渗透率之比有关,所以应根据这些参数合理地确定水平段的长度(5)。

加拿大埃索资源有限公司对水平井开采沥青和重油通过注蒸汽帮助重力排油的过程进行

了实验室研究。实验采用按比例缩小的低压直观模型，后来又发展为预示现场作业的三维高压模型。蒸汽辅助重力排油的过程是通过垂直井连续注入蒸汽，在低温的水平生产井上方形成一个“蒸汽包”，注蒸汽的速度根据维持“汽包”内压力的需要而定；蒸汽流到“汽包”边缘冷凝；加热的原油和冷凝的蒸汽水由于重力而沿“汽包”的隙壁排泄到下方的水平生产井内。

该项研究是基于1978年在冷湖油田所钻水平井对蒸汽辅助重力排油过程的现场试验。试验中，80%以上的原油都可驱出，只是在接近“蒸汽包”顶部的边界地带蒸汽驱油效果不明显⁽⁶⁾。

菲利普斯石油公司也对水平井用热法辅助重力排油的机理进行过实验室研究。结果表明，用蒸汽辅助重力排油是一种有效的热法采油手段。与普通的垂直井蒸汽驱油或周期性注蒸汽的增产处理措施相比，水平井配合以注蒸汽会有更大的原油产量、更高的采收率和更大的油水比。而且，后者比前两种生产方式的原油-蒸汽比值大得多，大约在1以上。特别是在有纵裂缝的地段，油气比值和油水比值都比均质渗透性油层更高。

加拿大石油勘探有限公司自1978年开始，也对水平井注蒸汽开采沥青进行了三口井的现场试验，结果很好，没出现大的作业问题。产量为850m³沥青。由于蒸汽温度低（170℃）和第一口井预热时间长，汽-油比稳定在16:1。

此外，AOSTRA、Husky 石油经营者有限公司、加拿大埃索资源有限公司等还对水平井火烧油层的热采方法进行过实验室研究和现场试验，各自得出了令人满意的结论。

造斜方法

钻水平井的造斜方法跟普通定向钻井没有很大差别，转盘钻和井底动力钻具（涡轮钻具、电动钻具和螺杆钻具）均可采用。苏联约百分之九十是采用涡轮钻具造斜，近十年来亦用电动钻具，只有极少部份是采用转盘钻和螺杆钻具造斜或侧钻。美国、加拿大，以及其他国家的情况正相反，最普遍的造斜方法是转盘钻，其次是螺杆钻具（如戴纳钻具、纳维钻具），再次是涡轮钻具，而电动钻具尚处于试验阶段。但是，定向钻井用转盘钻与用井底动力钻具相比，后者更为优越，尤其是钻大斜度井和水平井更是如此。这是不容争辩的事实。欧美各国也都逐渐认识到了这一点，近来应用井底动力钻具造斜或侧钻的比例逐年增大，据说已由百分之零点几增长到百分之五以上。不过，在钻水平井的作业中，则大部份是采用井底动力钻具。

苏联钻各种定向斜井多采用涡轮钻井法并不单是因其涡轮钻具的技术优越性，还因为全苏石油钻井技术科研所曾进行大量的理论研究和现场对比试验，从而提供了偏重于涡轮钻的科学依据。同时，该所的试验研究还表明，在某些条件下，采用电动钻具打定向斜井更为有效，特别是在复杂地质条件下用比重高达2.3的重泥浆、用空气吹洗井底和用高含气充气泥浆洗井、地层急倾斜和井眼自然弯曲极其严重等情况下，采用电动钻具打定向井更显出其优越性。近十余年中，也采用电动钻具打了一些大斜度井和水平井。

水平井的造斜与普通斜井不同之处主要是增斜率大，有时要求达5~10°/30m以上。侧钻分支水平井筒则要求增斜率更大。因此，水力造斜法（利用喷射式钻头造斜）和自然造斜法（利用一定的地层力与一定的钻具下部组合相结合造斜）都不便采用，唯有采用机械造斜

法,即利用一些井下工具组成某种钻具下部组合强行造斜。除了可以用弯接头(普通单弯接头、双弯接头,遥控变角弯接头,带磁标的弯接头),弯钻杆或钻铤,偏心短节,短涡轮和复式弯涡轮(或弯壳体螺杆钻具)等造斜器以外,在增斜很急速的情况下还要采用肘节、万向铰接头或柔性钻铤等特殊工具。而对于侧钻分支水平井筒来说,楔形斜向器是必不可少的造斜工具。此外,近年来还发展了一些新型的造斜工具⁽⁷⁾,如可在井下自动定向的造斜器等。

为能在小尺寸套管或裸眼内侧钻,国外还研究发展了直径小(54~88毫米)、寿命长的螺杆钻具。例如苏联的Д-85型和Д1-54型螺杆钻具,试用于套管开窗侧钻性能良好,其平均寿命以最容易磨损的铰接头计算分别达到47.5小时和150小时。

造斜钻具下部组合是钻成90°井眼的关键因素之一。无论转盘钻组合还是井底动力钻具组合都应通过计算正确组配,以保证达到所要求的增斜速率。

法国埃尔夫·阿奎坦公司在几口水平井所用的造斜钻具组合实用性较强,有一定的代表性,现摘录如下。

从造斜点起用17¹/₂-in钻头+11³/₄-in(或9¹/₂-in)涡轮+2.5°弯接头+9¹/₂-in非磁性钻铤1~2根+9¹/₂-in和7-in钻铤+5-in加重钻杆的钻具组合,以大约1.5°/10m的速率增斜至28°~30°。下表层套管后,可用12¹/₄-in钻头+12¹/₄-in扶正器+8-in非磁性钻铤2根+钻铤(数量按转盘钻加压所需而定),12¹/₄-in钻头+12⁵/₃₂-in扶正器+8-in或7³/₄-in涡轮(其定子下端卡有12³/₁₆-in扶正器)+6¹/₈-in或6¹/₂-in非磁钻铤+5-in加重钻杆,12¹/₄钻头+8-in或7³/₄-in涡轮+1.5°或2°弯接头+7-in非磁钻铤+5-in加重钻杆等三种形式的组合,以1.5°~2°/10m的速率增斜至80°左右。下技术套管后,可采用两种增斜组合:其一,8¹/₂-in钻头+8¹/₂-in扶正器+涡轮(其定子下端卡有8¹/₂-in扶正器)+7³/₄-in(或7¹/₂-in,8¹/₈-in)扶正器,该组合增斜速率约0.2°/10m,可通过调整第三只扶正器外径来加以控制,若取消第三只扶正器,增斜率可达0.5°/10m;其二,8¹/₂-in钻头+8¹/₂-in扶正器+4³/₄-in非磁钻铤1根+6¹/₂-in非磁钻铤1根+5-in加重钻杆,这种在钻头扶正器与大钻铤之间加一根小钻铤的转盘钻增斜组合系套用美国人的经验,用途是在井斜角大的条件下强行急增斜,当钻压78.5~98kN(8~10吨)时,其增斜率在软地层为1°/10m,在硬地层可达3°/10m。

苏联、美国、加拿大等一些国家油气田现场亦都有一些专用于大斜度井和水平井的常用造斜钻具组合。

此外,一些专利文献还介绍了不少独特的造斜方法⁽⁸⁾。例如,美国4,431,068号专利介绍了莫比尔石油公司提出的一种钻60°以上大斜度井的方法,其造斜钻具组合这样组配(参见图3):钻头上接外径3¹/₂-in至5-in的钻杆;钻杆柱上端接外径4¹/₂-in至10-in的钻铤,钻铤长度取决于期望的钻压;加深井眼时,钻柱用钻铤接长,以维持钻压在期待的水平上;钻进持续到钻铤柱下端到达造斜点为止,然后起钻加接下段钻杆(必要时换钻头),钻杆柱长度等于斜井段长度加下一行程的计划进尺;钻杆柱上端再接钻铤开始钻进,直至钻铤下端到达造斜点,再次起钻加接钻杆。如此反复数次,直至达到所要求的井斜度。若是所要求的井斜过大,以致施加钻压困难,可采用水力钻铤建立钻压。大斜度井筒第一段一般长度为2000英尺(610米),其上部为垂直的或井斜不超过40°的缓倾斜井段,下部是造斜点和急拐弯井段。第二段井筒一般设计长度为10,000英尺(3048米),此段井斜逐渐增到60°以

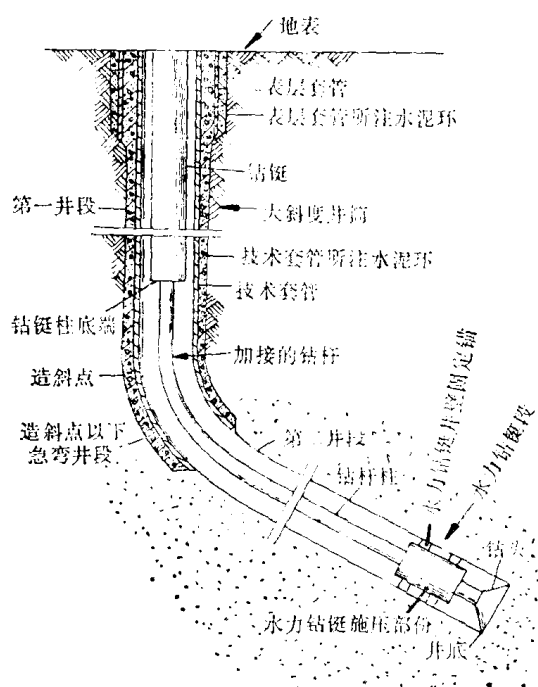


图3 大斜度钻井方法示意图

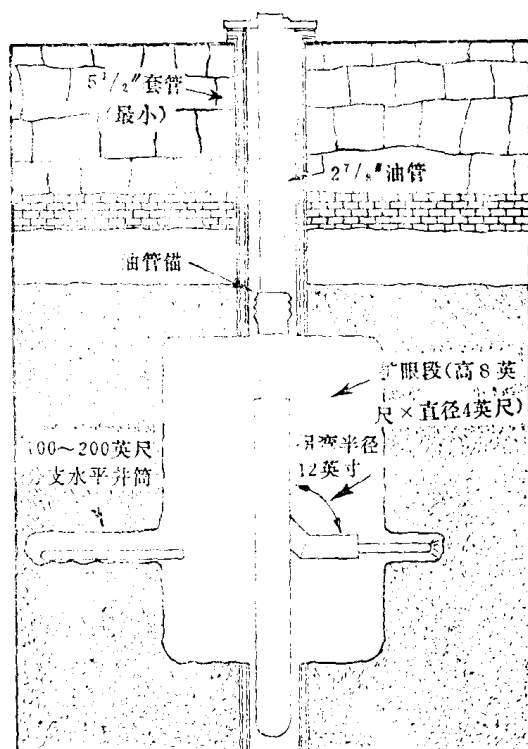


图4 Bechtel水平钻井方法示意图

上并稳斜钻至设计井深。

美国 Bechtel 投资公司发明的水平钻井方法不同寻常，系应用水力喷射钻井原理在垂直井内侧钻出分支水平井筒。侧钻处的垂直井筒需要用液压式扩眼器钻一段直径4英尺、长8英尺（1.22×2.44米）的扩眼部份（参见图4）。采用特殊的斜向器使井筒由垂直方向转到水平方向的拐弯半径只有12英寸。此种井下工具在非工作状态下用油管下入井内，到达扩眼井段后由液体压力促动进入工作状态，如有必要，可用陀螺仪定向。斜向器结构使钻柱可以由垂直井筒内斜出，绕过90°的急弯，水平地进入地层。钻柱为外径1.25英寸、内径1.09英寸的挠性油管，其下端接一只专门设计的特殊钻头。钻头上有一圈喷嘴，可钻出直径约4~6英寸（视地层类型和深度而定）的井眼。要求井口压力达6,000~10,000psi（约41.4~68.9bar），以便清水喷射钻井。钻头不旋转，可以传递1,000马力以上的功率给地层面。钻柱靠其内的液体压力推动前移。平均钻速在10~100ft/min范围内。

为能在钻进中调整钻柱向前移动的速度，从地面将一限动器用钢丝绳锁定装置固定到钻柱上，使钻柱张紧，以保证其始终处于地面的控制之下。由于钻柱通过斜向器的过程中处于张紧状态，随着钻柱穿出斜向器水平进入地层，可自然维持钻头初始面向方位，因而大大有利于定向控制。作业期间，还要监测压力、流量和速度，以达到控制钻井过程(9)。

此法具有如下特点：水平井眼是从垂直井侧钻出去的，其拐弯半径只有12英寸，可在一口井的500~3000英尺（152~914米）深度范围内提供多个水平半径为100~200英尺（30~61米）的非胶结性稠油藏；在某一水平面内可钻成多达24口水平井眼；钻井方法为喷射钻井，因而钻速快，经济效益比普通水平钻井方法高，能迅速钻成深100~200英尺的水平井眼，在较浅的非胶结性地层中钻成4口水平井所需时间一般不超过60小时。

此法自4年前开始研究以来,经受了大量的现场试验,已在各种地层钻了大约350口水平井眼。目前,此法已在加利福尼亚州正式用于提高蒸汽开采稠油的产量。

稳斜井段钻进技术

普通定向斜井的稳斜钻进主要是利用适当的钻具下部组合控制井眼方位和倾斜度。因此,其根本的问题是如何利用扶正器控制钻头侧向力。只要把握住扶正器直径和安放位置这两个至关重要的因素,即可达到目的。但是,钻大斜度井的稳斜段和水平井的水平段时,情况却要复杂得多,不仅仅是要稳定井斜角和井眼方位,还由于重力作用、摩阻力、钻屑沉降等诸因素而涉及到其他一系列问题,从而使稳斜井段的钻进比较困难。

在大斜度井段和水平井段钻进困难的主要问题是:

- ▲ 在井内移动钻柱、套管和测井工具困难。
- ▲ 容易造成压差卡钻和键槽卡钻,下套管时也容易粘卡。
- ▲ 钻水平井段时易使井斜自然下降。
- ▲ 井眼净化能力降低。
- ▲ 控制钻压和钻头前进方向的效果减弱。

苏联一些学者进行的理论研究证明,当井斜角达到一定限度时,钻具将停止向前运动。根据岩石的物理机械性质,这一临界井斜角可在 $50^{\circ}\sim 87^{\circ}$ 范围内变化(正因为这一理论,苏联把井斜大于 50° 的井定为大斜度井)。凡在井斜角超过临界值的井眼内钻进时,既要用到普通的方法,也要采用特殊的技术手段。

近年来,国外提出了许多解决大斜度井段和水平井段钻进困难的具体办法,其中大部份经过实践检验证明是可行的。例如,采用特殊的泥浆减小摩擦系数,以及起下钻过程中转动钻柱和维持循环,以解决钻柱移动困难的问题;采用柔性钻铤使钻具易于通过弯曲井段;采用铝合金钻杆和偏心钻杆接头改善井眼净化情况及减少粘附卡钻;钻大斜度井段的钻具组合中带近钻头扩眼-稳定器,并特别注重修整井眼的工作(以埃尔夫·阿奎坦公司的意见,修整井眼所用时间应占全部钻井时间的35~40%),以防止卡钻,保障水平井段的顺利钻进;在钻柱上段加接钻铤或采用水力钻铤施加钻压;钻柱中安放一、两只随钻震击器,以防万一;采用随钻测量仪监控井眼空间位置;采用新的测井方法获取水平井段完整的电测资料,等等。

就大斜度井段及水平井段维持井斜角和方位角稳定的问题来说,钻具下部组合仍然是关键因素。最早采用的水平井段稳斜钻具组合仅仅是简单的带一只短扶正器。由于短扶正器叶片切削井壁很严重,随着各种条件的变化,这种稳斜组合就可能变为造斜或降斜组合,从而导致水平井段起伏不平,甚至造成严重的方位偏差。

从六十年代起,国外许多学者加强了对钻具下部组合的研究,但那时由于技术商业化过甚,人们相互保密,使研究工作受到很大限制。直至七十年代中期,人们才集中力量研究多扶正器钻具下部组合的基本特性,开辟了用电子计算机程序分析钻具下部组合力学性能及其使用效果的途径。这样,水平井稳斜钻具组合也就得到了相应的发展。目前,国外在水平钻井实践中常用多扶刚性钻具下部组合稳斜,但组合中往往不是像常规钻井那样采用钻铤,而是采用加重钻杆,钻铤只接在上段钻柱中。美国在钻分支水平井时还采用了含柔性钻铤或铰

接式扶正器的钻具组合。这里所谓的铰接式扶正器与苏联应用于防斜打直钻具组合的铰接式扶正器在结构上有很大的区别，实质上是把数个短扶正套用四叶式万向接头连接在钻具下部组合中。前两个扶正套与钻头等直径，起划眼和防止横向切削井壁的作用，后面可连接两个或更多的扶正套（其直径逐一减小），起扶正支撑作用。这样，不仅使钻具组合容易通过弯曲井段，也可以减小侧向切削力。为了消除或减小扶正器对井壁的切削，以稳定井斜角和方位角，还可将扶正器设计成套环式，即扶正套外表没有扶正块，而前后两端切有粗齿，能在起下钻时扩大键槽。此外，还可选用低钻压下较为有效的钻头。

埃尔夫·阿奎坦公司所用水平井段钻具下部组合一般是 $8\frac{1}{2}$ -in 钻头 + $8\frac{15}{32}$ -in 扶正器 + 1 米钻铤短节 + 8-in 扶正器 + 涡轮（其定子下端卡有 $8\frac{15}{32}$ -in 扶正器） + $8\frac{7}{16}$ -in 扶正器 + 9 米非磁性钻铤 + 8-in 扶正器 + 加重钻杆。实践证明，取消上部两个扶正器效果也很好。

井 斜 的 测 量 和 控 制

水平井的定向方法同于常规定向钻井，也就是磁性定向法、机械定向法和随钻测量定向法等几种。但是，在大斜度井段和水平井段测斜时，以一般方法下入测量仪器是行不通的，特别是在水平井段，主要还是靠泵冲法推送测斜仪到井底进行测量。

一些测量范围大的常规仪器均可用于水平井测斜和监控井眼方向，比如单点和多点照相测斜仪以及其他一些常规测斜仪，目前在国外水平钻井中就应用较多。不过，普通定向钻井中应用很广的陀螺仪不适用于水平井及大斜度井，因为在井斜大于 70° 时其测量精度会严重下降。

国外近几年已开始更多地采用随钻测量仪监测水平井的井身轨迹。毫无疑问，这是目前和将来若干年内的一个发展方向。随钻测量技术经过五十多年的发展，业已取得重大成就。好几个国家都已有了定型产品，其中有的早在七十年代中期即已投入工业性应用。不过，这一技术远未达到完美的程度，国外现在仍不懈地深入研究，其热情之高，自这一技术出现 50 多年来可算是空前的。据统计，不包括苏联、罗马尼亚和澳大利亚等国家在内，仅欧美就有四十多家公司致力于这一研究工作。

除参考文献〔10〕介绍的一些随钻测量系统以外，本文简略地补充几种可用于水平钻井的随钻测量仪。

苏联已获得工业性应用的随钻测量仪有 CTΘ 型和 CTT 型。专为电动钻具钻井设计的 CTΘ 系统如图 5 所示，其井下电子发送器 1 包括传感器 2 和将测量数据变为电信号的电子模块，电信号通过电动钻具 3 的电源线传输到地面。其地面装置包括滤波器 4 和带自动记录器的接收台 5。

CTT 系统（见图 6）用于涡轮钻井。该系统的电子部件（井下部件、地面部件、滤波器）和主要结构件均与 CTΘ 系统相应部件是统一的，只是附加了电源部份和单独的讯号通道。

法国石油研究院研制的阿桑塔克（Azintac）定向参数仪也是一种电缆式随钻测量系统（见图 7）。钻进中，井下传感器位于非磁性钻铤内，可连续测量井斜角、方位角、造斜工具装置角以及涡轮钻具转速和井底温度等多种数据。经电缆传输到地面的信号由计算机处理后

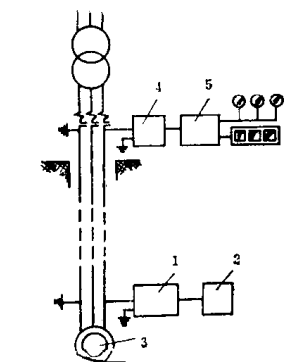


图5 CT3遥测系统

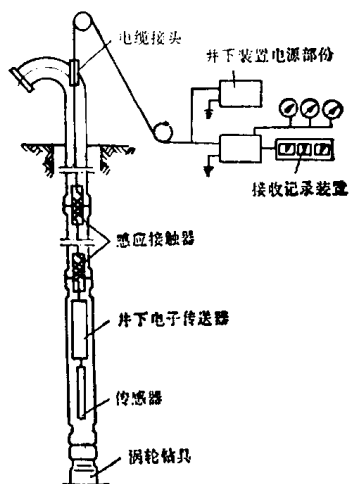


图6 CTT遥测系统

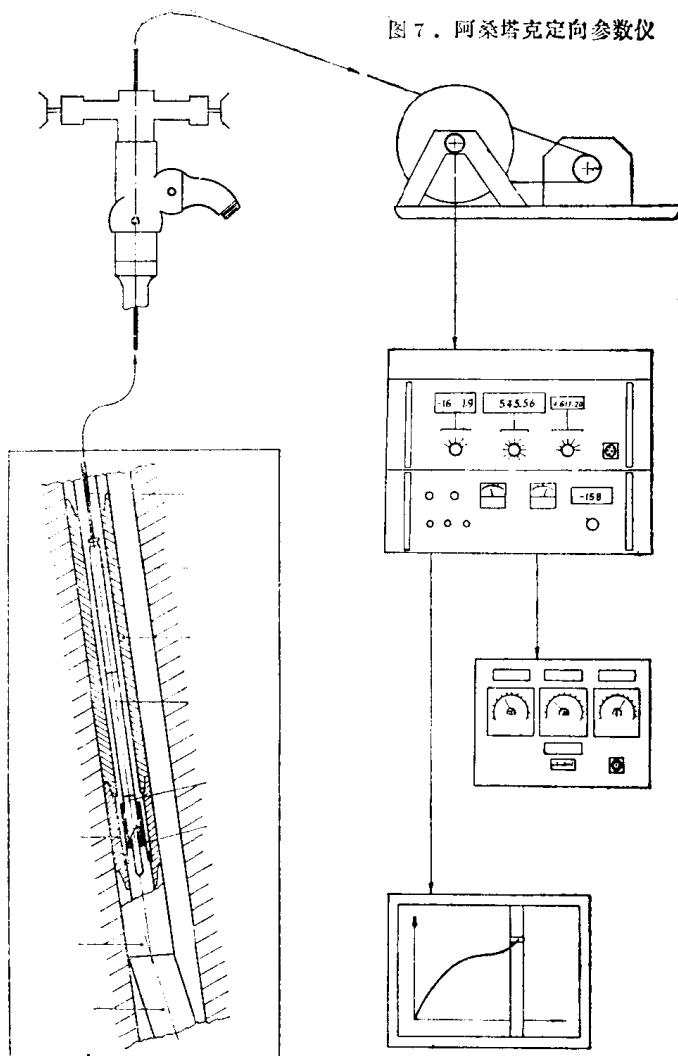


图7. 阿桑塔克定向参数仪

可在钻台上的数字式仪表板上持久地显示（井斜角、方位角及造斜工具装置角），输入井深数据即可计算和显示出井眼的实际空间位置。需要时，一按电钮即可显示出涡轮转速和井底温度。该系统技术规范如下：

井下传感器

长2.2米 外径44毫米 重15公斤

计算机

外形尺寸50×40×63厘米 重42公斤

特性

能承受的最大压力……………480巴
能承受的最大温度……………150℃
能承受的最大振动力……………588m/s² (60g)
测斜范围……………0～90°
电缆最大长度……………7,000米

美国伊斯特曼公司（亦即东方人公司）的 DOT 电缆式随钻测量仪有三个加速度计（也有两个的），三个磁通门。测量范围 0～90度，可用于打丛式井、救险井、水平井和套管开

窗侧钻。

斯佩里森 (Sperry-Sun) 公司的 SST 电缆式随钻测量仪也是有三个加速度计, 三个磁通门, 另外还有一个温度传感器。其测量范围是 $0 \sim 115^\circ$, 用途同上述 DOT 系统。

除上述已获得工业性应用的各种随钻测量系统以外, 参考文献〔7〕还介绍有一些苏联近年来研制成功但尚未普及应用的泥浆脉冲遥测系统、声波遥测系统和其他遥测系统。并且, 还介绍了一些比较新颖的测斜、定向仪器, 读者如有兴趣可参阅原文。

钻 井 泥 浆

钻大斜度井和水平井时, 钻井泥浆非常重要, 它不只是必须有效地携带钻屑, 还必须对井筒和钻柱起到高效的润滑作用, 以减小摩擦系数, 即减小扭转阻力和轴向阻力。因此, 对泥浆类型和性能都应认真加以考虑。一般说来, 水基泥浆和油基泥浆均可采用。若是采用水基胶质泥浆, 必须加入足够的润滑剂以及其他各种添加剂, 必要时加入一定量的柴油。采用油基泥浆亦应加入各种添加剂。泥浆密度可在 1.2g/cm^3 以下优选, 塑性粘度可在 $25 \times 10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{s}$ (25厘泊) 以下优选, 固相含量控制在 5% 以下。如果钻具组合中含有柔性钻铤, 由于柔性钻铤内的橡胶软管承压能力低和内径小, 还应考虑到水力参数是否适当。

完 井 电 测

在大斜度井段和水平井段进行电测时, 不能用常规方法靠重力下放测井仪器。一般是采用泵冲法把仪器送至井底。所谓泵冲法, 其原理与玩具枪相似, 即把测井仪器从不带钻头的钻柱底端泵送出去。这种方法测井的段长有限。如要测的裸眼段很长, 接钻杆前需把仪器提出, 待接钻杆后再下入。因此, 往往需要多次起下测井仪器和电缆, 既费时间又不安全。

为改进水平井的电测工作, 国外一些公司都在研究新的方法和仪器系统。法国 Forhor 公司研究出了一种称为 Simphor 的测井新方法, 并在埃尔夫·阿奎坦公司所钻的几口水平井上获得了成功的应用。此法是把测井仪器装在特制保护套内并连接到钻杆柱底端下至待测井段顶部, 然后在井口把电缆穿过旁通接头连接在加重杆顶端, 泵送加重杆到井下接通测井仪器电路, 再接钻杆下放测井。起钻时可重复录取测井曲线。

美国埃克森公司和 Gearhart 公司亦研究出了同上述完全相似的测井方法, 其测井系统商品名称为 Tool-Pusher。目前已在 $65^\circ \sim 90^\circ$ 的井眼内多次使用成功, 测过长达 2012 米的井段, 最大应用井深为 3252 米 (并非极限)。

Simphor 测井方法和 Tool-Pusher 测井方法均可录取较为完整的一套电测资料, 具有许多优点。但是, 也需要继续研究改进, 以解决旁通接头下入深度有限的问题。

Bechtel 公司为解决在拐弯半径仅 12 英寸的条件下测井的问题, 根据该种分支水平井的井下几何条件专门设计了一种新型的定向测井工具。其全套电子仪器组装在一个容有半液态塑料的柔性保护套内。该测井系统目前可测得精度为 $\pm 1^\circ$ 的井斜角数据, 而其测方位的仪器尚在试验。

完 井 与 修 井 作 业

水平井既可裸眼完成，也可下入套管或塑料管（注水泥或不注水泥）然后射孔完成，还可下入衬管完井。具体完井方法应视油层井段的实际情况（主要是地层稳定性）而定。一般说来，分支水平井筒裸眼完成的居多，但近几年在分支水平井筒也逐渐趋于下衬管完井。至于正规水平井，通常水平井段都较长，油层井段上侧容易坍塌，所以下衬管或套管完井的占多数。

前述Bechtel公司的水平钻井方法有两种完井方式：其一，如不需要进行砾石充填作业防砂，只将钻柱割断留在4-in分支水平井眼中并射孔；其二，如需防砂，先进行砾石充填作业，然后射孔，在侧钻点用电化学方法将钻柱割断，侧钻点以上垂直井内一般是下入普通筛管。

有时，水平井下衬管或套管射孔完井生产一段时期以后才发现需要采取增产措施或进行堵水作业，这就需要修井。以埃尔夫·阿奎坦公司所钻前两口水平井为例，拉克90井和拉克91井都曾在下衬管完井数月后进行过增产处理和修井作业，其具体做法请参见参考文献〔5〕。

钻 井 成 本

一般说来，钻水平井的成本当然会比钻垂直井高一些，这与地质条件、操作人员技术水平、设备状况等诸因素都有密切的联系。埃尔夫·阿奎坦公司钻第一口水平井时，由于各方面的原因，使成本达到同一地区普通井的4.3倍。以后逐步改进钻井工艺技术，成本也随之降到2.1倍以下。美国大西洋里奇菲尔德油气公司在新墨西哥州钻一口分支水平井的成本约50万美元，其中一半用于钻直井段，一半用于钻分支井筒。苏联水平井的成本约高过垂直井30~80%，甚至相差无几。例如，在东西伯利亚的一口井，垂深2250米，水平段长630米，钻井速度与直井相同，而成本只高出23%。又如在多林油田的351号分支水平井，总进尺为3133米（其中直井筒2308米，第一分支水平井筒414米，第二分支水平井筒411米），经济钻速为每钻机月425米，建井成本平均为每米进尺158.3卢布。

结 束 语

总而言之，国外水平钻井工艺技术已有了很大的发展和进步，主要的钻井问题已基本得到克服或正在有效地解决。许多成功的经验值得我们参考和借鉴。当然，国外也还有许多工作要做，如进一步改进钻井工艺以降低钻井成本，进一步试验各种完井方法和增产措施，等等。但是，可以断言，水平钻井作为一项独特的先进技术，必将以其无与伦比的优越性得到更大重视和广泛采用。目前兴起的钻水平井的二次热潮将会持续下去，今后几年内在全世界更多的油气田上必定会出现一批数量可观的水平井。

我国亦普遍分布着裂缝性油气藏，而且有不少重油产区和处于开采晚期的老油气田。特别是西南地区，缝洞性油气藏占主要地位。目前钻直井开发不仅出现干眼的概率较高，还因每

井必建井场、修筑公路、铺设管线等多种因素而使钻探投资巨大。研究和利用丛式钻井与水平钻井技术已属势在必行。就四川地区来说，也有这方面的优越条件：定向钻井技术在全国居于领先地位，井斜度、水平位移等项重要指标创全国纪录；曾有过钻水平井的成功经验，目前正引进埃尔夫·阿奎坦公司的全套水平钻井技术，并合作钻一口斜深3960米、垂深3073米、水平位移1254米、水平段长410米的水平井，这将是一个很好的推动力。

因此，建议：

第一，以引进工程为契机，在人员培训和技术装备等各方面打下基础，以便继该项工程之后开展更深入的研究和更广泛的试验，力争在短时间内使水平钻井技术为四川油气储量和产量翻番出力，即尽快利用这一工艺技术在重点探区和开发区减小钻干眼的可能性、提高单井产量、降低总的勘探开发投资，或者，在老矿区探得新的可采储量。

第二，应当开展侧钻分支水平井的试验研究。四川地区长期来钻过的干眼是很多的，根据对缝洞性油气藏的新的认识，并非凡是钻干井的地块都毫无希望。因此，可以协同有关部门和单位对一些构造的地质情况再作分析，选择一、两口有条件的干井侧钻分支水平井筒，以证实其可行性。另外，在已经水淹或者已经枯竭的气田，也可以选择两、叁口旧井侧钻分支水平井筒，以试验减缓水锥、稳定和提高产量甚至“死井复活”的可能性。若是这两项试验成功，将对四川盆地的油气勘探和开发起到极其重要的促进作用，其意义恐怕远远超出经济统计数字的评价。

主 要 参 考 文 献

1. 《Направленное бурение разведочных скважин》，М., “Недра”，1978，с.6~10、191~200
2. 《Oil and Gas J.》，1980，78 (37)，P.139~142、147、148
3. 《Journal of Petroleum Technology》，1981，33 (2)，P.283~285
4. 《Нефт. х-во》，1981 (8)，с.43~45
5. 邹承德，“水平井的钻井工艺技术”，《石油钻采工艺》，1983 (5)，p21~31
6. 《Oil Week》，July 2. 1984，p.11~12
7. О.И.серия: Бурение, Нефт. пром—сть, 1984，(9)
8. U. S. P. 2804926 (1957) 3285350 (1966) 3398804 (1968)
4003440 (1977) 4007788 (1977) 4431068 (1984) 4445574 (1984)
9. Larry E. Pendleton, A.Behrooz Ramesh, “Bechtel develops innovative method for horizontal drilling”, OGJ, May27. 1985, p.95~99
10. 徐云英，“随钻测量技术”，石油钻采工艺科技情报协作组《石油钻采情报调研文集》1984年第1册1~17页。