

水平钻井大规模勘探开发油气藏

中国石油天然气总公司情报研究所

一九九〇年十二月



51756

水平钻井大规模勘探开发油气藏

刘 长 生



200433423

TE 243
004

SY52/15



中国石油天然气总公司情报研究所

一九九〇年十二月

前 言

1984—1988的5年间,每年钻水平井数翻了约两番;1989年2季度—1990年1季度的4个季度内,美国平均月钻水平井数翻了两番多,加速增长趋势日益猛烈。预计不久美国每年钻水平井数即将达到占当年钻井总数1/3以上的规模。其根本原因在于可显著提高勘探开发的综合效益。据分析,美国剩余探明储量中有约970亿桶(占1987年底总探明储量19%)将主要靠水平井技术等开采出来,而且可将每桶储量平均发现成本由4美元降至1—2美元。世界各地水平井单井产量平均约为直井的6倍,美国巴肯破碎页岩油层的水平井生产利润更是直井的8.4倍。大规模钻水平井的时代已经开始。这是水平井技术系统发展的结果,不仅提高了水平钻井水平并降低其成本,更重要的是可保证显著提高综合经济效益。可以说,目前世界石油工业的重要发展战略转变之一,是由钻常规直井、定向斜井向钻水平井勘探开发油气田的战略转变。这一战略转变将使石油工业发生深远的和全面的变化。不仅会加速发展和应用包括各种(各专业)先进技术的和相互联系更加紧密的技术系统,而且会促使经营管理向更加适应这种技术转变和提高效率的方向转化。每一个油气田、区块和井的勘探开发的决策都将在更加深入和更加科学的技术经济评估与准确预测经济效益的基础上做出;各个技术、经营管理和经济部门将更加密切协同的开展工作和共同参与决策。现在已可看出这种发展的轮廓。

本次调研是在多年来石油情报研究所内外各有关调研和论证工作基础上进行的,并以水平钻井技术的重大新发展为重点。

目 录

前 言

一、进入大规模钻水平井的时代·····	(1)
二、水平钻井数迅速翻番的原因·····	(4)
三、水平井技术系统发展概况·····	(13)
四、水平井设计·····	(21)
五、井眼轨迹监控技术·····	(36)
六、清洗井眼的综合措施·····	(41)
七、完井技术的某些进展·····	(46)
八、短半径水平钻井新技术·····	(51)
九、特殊水平钻井技术发展动向·····	(58)
十、启示与建议·····	(61)

一、进入大规模钻水平井的时代

美国自30年代开始是老井中侧钻约10米长的水平井眼。苏联自50年代开始钻浅的新水平井，油层内井段长度超过百米。中国于1965—1966年钻了造斜率6—10度/30米的中半径水平井，油层井段长288米。至70年代末，全世界共约钻了50口水平井。80年代以来，西方加强水平井技术的科技攻关，并在多种类型油气藏的勘探开发中取得日益显著的经济效益，为大规模钻水平井奠定了良好技术基础。1984—1988年的5年期间，每年钻水平井数由约50口/年增至近200口/年，翻了近两番（见图1—1）^①。由于水平井技术系统的日益发展完善及取得越来越广泛和巨大的经济效果，钻水平井规模加速扩大趋势增强。1989年2季度至1990年1季度

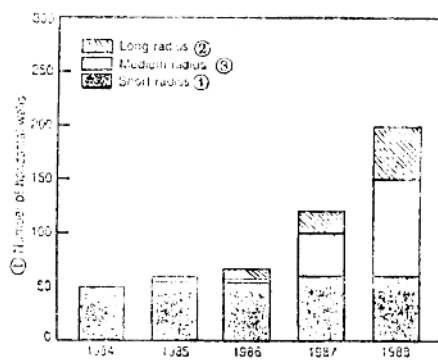


图1—1 自1984年以来，短曲率半径水平井数基本稳定，而中等曲率半径和长曲率半径水平井数增长很快，1988年水平井数为1984年的4倍

①水平井井数；②长曲率半径；③中等曲率半径；④短曲率半径

⑨ Horizontal drilling permits issued

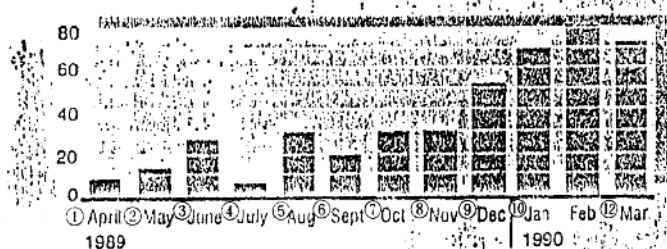
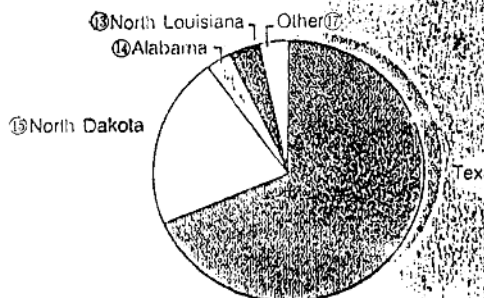


图1—2 美国水平钻井加速增长

①4月；②5月；③6月；
④7月；⑤8月；⑥9月；
⑦10月；⑧11月；⑨12月；
⑩1月；⑪2月；⑫3月；
⑬北路易斯安那州；⑭阿拉巴马州；⑮北达科他州；
⑯得克萨斯州；⑰其他州；
⑱1989.4—1990.3各州水平钻井许可；⑲水平钻井许可记录

⑲ Horizontal permits by state April 1989-March 1990



的1年内,美国各季度内平均月批水平井数由15.3口、17.3口和36.3口;增至74.3口,1年内翻了两番多(详见图1—2)^[2]。这样高的加速发展势头,在油气钻井以致整个石油工业的专项技术发展应用中均是罕见的。

近年来,世界其他油气区也出现了水平钻井加速增长的势头。加拿大从1978年至1986年期间共钻了8口中半径和长半径的水平井,1987年钻了13口,1988年钻了16口,1989年钻了40口。从1987年起出现了加速扩大水平钻井的趋势。1990年已批准钻水平井121口,在上半年已完成了51口,加速扩大的势头更加猛烈(详见图1—3)^[3]。

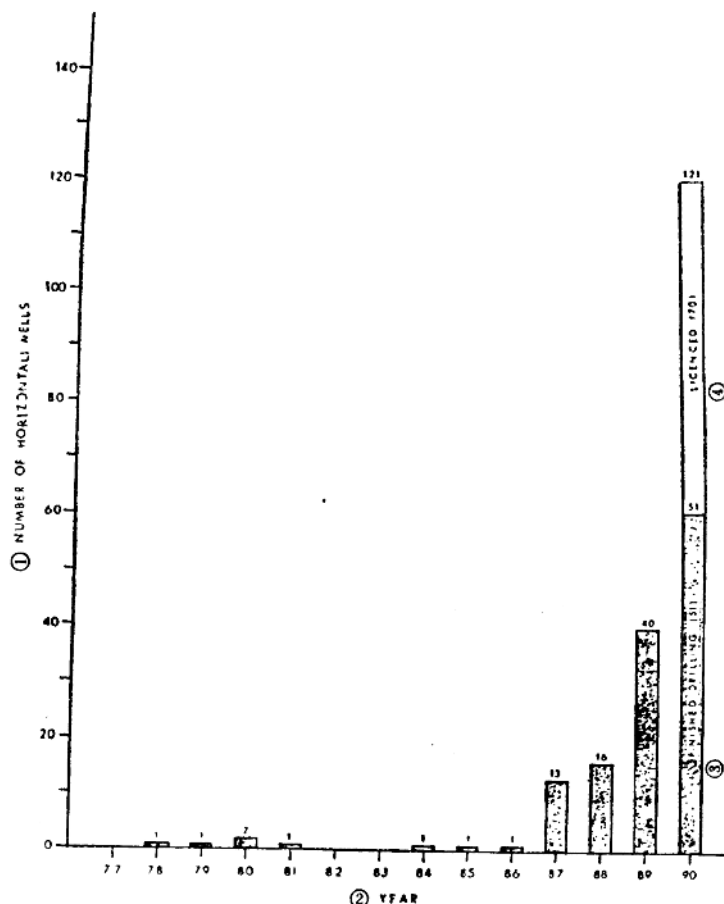


图1—3 加拿大中曲率半径和长曲率半径水平井钻井记录

①水平井井数; ②年份; ③完井数; ④批准钻井数

1989年及1990年初一些公司及专家预测^[4,5],90年代美国钻井总数的 $\frac{1}{3}$ 以上将是水平井。即使以大大低于1989年4月至1990年3月美国批准钻水平井加速发展的速度来预测,今年美国将钻水平井1200口左右(约占钻井总数5%左右),近几年内就将达到每年钻水平井数占钻井总数30—50%。据美国DB公司的《石油信息》1990年7月报导^[6],已有114家作业公

司实施水平钻井计划，而且实施水平钻井作业的公司总数每天都在增长。该公司还预测，至1995年，美国年钻井总数中有70%将是水平井。

上述的1984—1990年水平钻井加速增长势头是低国际油价（<20美元/桶）下出现的。在国际油价升高的形势下，新技术发展与应用的速度和范围将进一步增强，取得更大的经济效果。图1—4清楚地说明^[4]，在天然气价格由3美元/千立方英尺增至5美元/千立方英尺的时候，采用新技术可使美国天然气储量增至1430万亿/立方英尺，比采用已有技术所获得的储量多1倍。所以，可以预期，在国际油价升高的前景下，水平钻井加速增长的势头还可能持续一段时日。

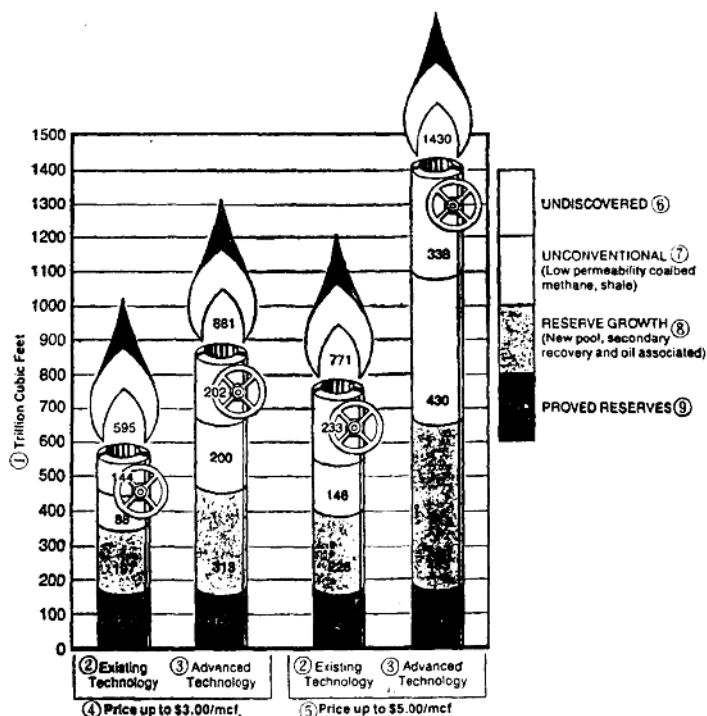


图1—4 美国天然气储量分析预测

①万亿立方英尺；②已有技术；③先进技术；④价格升至3美元/千立方英尺；⑤价格升至5美元/千立方英尺；⑥未发现的；⑦非常规的（低渗透煤层甲烷、页岩气）；⑧储量增长修正（新储层，二次开发和伴生气）；⑨证实储量

二、水平钻井数迅速翻番的原因

水平钻井规模迅速翻番的根本原因是在于可大幅度提高勘探开发油气藏的综合经济效益，甚至根本改善石油工业的经营状况。

据Becfield公司引用的美国API协会等机构的统计分析资料^[7]，至1987年底美国总探明储量约为5130亿桶。已累计采出了约1720亿桶，占探明总储量33.5%以上。在剩余探明储量中，尚有约1000亿桶可采用新技术再开采出来。Becfield公司认为，主要将靠钻水平井采出970亿桶，约占总探明储量的约19%。这就是说，在已探明储量中，钻水平井可增加巨量可采储量，大幅度提高采收率；而且把每桶储量的平均发现成本，由4美元/桶降至1—2美元/桶。这无疑对石油工业，特别是对老油气区和成熟油田，具有十分重大和深远的意义。

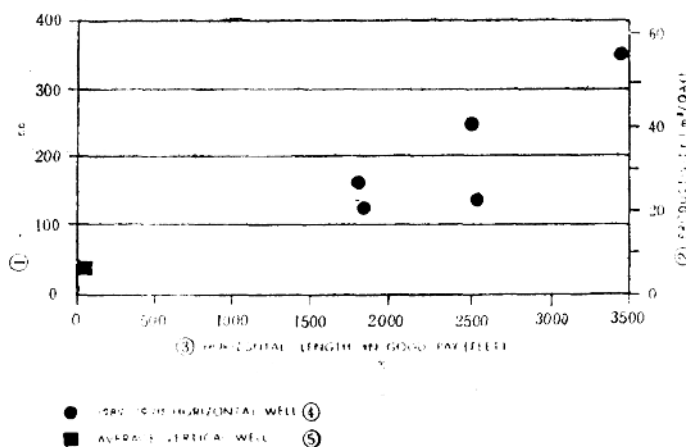


图2—1 优质油藏中直井与水平井产能对比统计

①产量(桶/日)；②产量(米³/日)；③钻进优质产层井段长度(英尺)；④1989/1990年水平井；⑤直井平均产量

据Elf石油公司介绍^[1]，依据1987年以前的数据统计，全世界各地不同类型油气藏钻水平井的单井产量平均约为相邻直井的6倍。水平井产量比直井大幅度增加，已在许多类型油气藏的勘探开发中体现出来。一般说来，水平横穿油气层的长度越大，或它与直井生产井段比值越大，增产比率越大。图2—1是CS资源有限公司提供的统计数据^[3]。不仅新钻水平井可取得显著增产效果，在老油田、枯竭的或废弃的老井中侧钻水平井眼(水平井二次完井)也可取得异常明显的增产效果。以美国得克萨斯州中南部的Gidding油田为例，主要生产层是奥斯汀白垩油层，受深部构造隆起作用等影响，形成典型的局部分布的破裂带。有些老井钻遇

了多个裂缝带，而另一些井则没有。进行水平井二次完井的老井是那些根本没有钻遇裂缝网络的枯竭直井。这样的枯竭井压裂后产量也只有30—35桶/天，且产量递减很快；但在5¹/₂英

寸套管内采用水平井二次完井作业后，单井产量猛增至150桶/天（详见图2—2）^{〔1〕}。这个实例充分说明对老井进行小井眼、中半径的水平井二次完成作业可挖掘巨量的可采储量及生产能力。这种老井中钻水平井二次完井技术已逐步扩大应用于陆上和海上油气田，成为许多老油气田改造挖潜的最主要的技术措施之一。

钻水平井的经济效益是十分显著的。钻一口水平井的投资一般为直井的2倍以上，每米进尺成本一般为相邻直井的1.5倍；但因产量为直井的几倍，所以综合经济效益十分显著。例如，美国威利斯頓盆地的巴肯页岩油层内钻了25口水平井。与相邻直井相比，水平井井距大1倍（320英亩：160英亩）；完成井总成本大1倍（170万美元：87.3万美元）；初始产能为5倍（油420桶/日：84桶/日；气21.4万英尺³：4.3万英尺³）；总可采储量1倍（33.6万桶油：16.8万桶油，1.71亿英尺³气：8600万英尺³气）；月生产费用相同。在以每桶油价18美元和每一千立方英尺天然气1美元为依据，并采用10%的贴现率的条件下，水平井的纯利润为直井的8.4倍（105万美元：12.5万美元），美国联邦税后报酬率由15.9%增至51.4%^{〔8〕}，详见表2—1及表2—2。

Successful Austin^① chalk recompletion

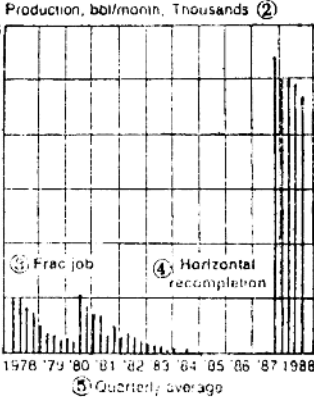


图2—2 最初钻成直井，完井乃至压裂后的产量仅为30—35桶/天，且产量递减很快，采用水平井二次完井后，单井产量猛增至150桶/天

- ①奥斯汀白垩地层成功的二次完井；
- ②产油量，千桶/日；③压裂处理；
- ④水平井二次完井；⑤季度平均值

表2—1 巴肯页岩生产经济效益对比

项 目	直井（160英亩间距）	水平井（320英亩间距）
月生产费用	4000美元	4000美元
完成井总成本	87.3万美元	170万美元
初始产能试验	84桶/日，4.3万立方英尺/日	420桶/日，21.4万立方英尺/日
可开采总储量	16.8万桶，8600万立方英尺	33.6万桶，1.71亿立方英尺
联邦税后报酬率	15.9%	51.4%
纯 利 润	12.5万美元	105万美元
支 出	6.3年	2年
每1美元投资报酬率	1.15美元	1.65美元

注：表中以每桶油18美元和每千立方英尺天然气1美元的价格为依据，这两种情况都是无风险的，价格及作业成本保持常数，并采用10%贴现率。

随着钻井技术水平提高和经验积累，水平井的钻井和完井费用大幅度下降。80年代前期水平井每米钻井和完井费用一般为相邻直井的3—5倍，甚至高达10倍。80年代后期这一比值

表2—2

巴肯水平井与默里迪恩公司平均单井经济效益对比

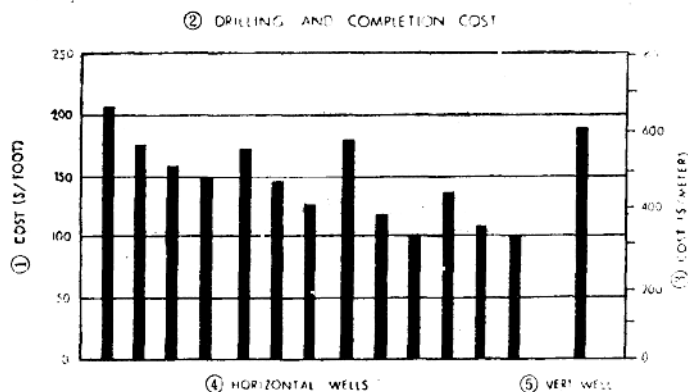
(美元/油当量桶)

项 目	1988年全公司平均值	10口巴肯水平井平均值
租借的矿区作业费用	4.43	0.51
折耗、折旧和摊销	3.46	6.40
生 产 税	1.94	0.75
总务和管理费用	2.09	1.68
勘探费用(地震、租地购买)	1.90	0.44
总 计	13.82	9.78
自定的现金成本	8.46	2.94

注：表中的自定的现金成本指租借矿区作业费用，总务和管理费用及生产税的合计。

从上述对比情况可看出，钻水平井开采的经济效益是相当显著的。

降为1.5，先进的达到1.2。法国Elf石油公司在Rospo Mare海上油田平台钻丛式水平井，曾使这一比值降为1或小于1。加拿大一个开发区内有一作业公司也取得类似的降低水平井钻井和完井费用成果，钻井和完井费用的对比见图2—3^[3]。图中出现个别偏离发展趋势的情况，是由于意外的钻井事故造成的。美国Oryx能源公司，Arco石油公司，Amoco公司等也取得类似成果。水平井钻井和完井费用普遍的降低趋势将进一步提高水平井的综合经济效益。



中，水平井的巨大优越性终于为全世界石油工业所认识和接受；而且观察敏锐，刻求进取和经营精明的石油公司率先大力开展了水平井综合技术系统的研究与发展工作，优先取得巨大经济效益及国际市场激烈竞争中的强有力地位。美国《世界石油》杂志主编认为苏联是世界上第一个发展水平井的国家，中国是只迟于苏联的第二个发展水平井的国家。1978年10月法国石油科学研究院与有关石油公司计划于1979—1980年开始钻水平井科技攻关试验，它的技术发展部门负责人戴斯布朗德博士利用在京参加展览的机会，曾5—6次正式的或私下的迫切请求我国提供60年代钻成几口造斜率高的中半径水平井技术资料。它们于1980—1981年相继在法国拉克油田等地钻成3口水平井，引起世界石油工业界瞩目。至今，法国Elf公司已成为世界著名的钻水平井勘探开发油气田的公司之一；它已在80年代中期开始用水平井整体开发亚得里亚海上的Rospo Mare碳酸盐岩稠油油田，使该油田由在低油价无开发经济效益变成十分有利可图的。我国1988年、1989年分别在新疆和四川钻成两口水平井，某些技术指标超过了我国60年代的水平井；特别是新疆石油管理局的1620-A水平井的产量为相邻直井的2—10倍，首次取得实际的增产效果。虽然，我国上述地区在80年代发展水平井中有重大进展，但我国水平井技术在总体水平上与当前世界先进水平的迅速发展相比，差距扩大趋势刚出现扭转的可能性。

世界石油工业界已开始实施以钻水平井勘探开发油气藏的重要战略，或者说已开始了一个钻水平井发展石油工业的新时代。这将是石油工业技术和生产发展史的重大战略转变。80年代水平井技术系统的科技攻关和科学试验成效显著，促使一些石油公司做出这种战略转变的决策；并且为实施这种战略转变奠定了坚实的技术经济基础。这种战略转变不仅将引起油气钻井的深刻变化，而且将引起石油工业各个生产管理部门和行业的深刻变化。实施这种钻水平井勘探开发油气藏战略的各个专业将采用更多和更先进的工艺技术装置，而且各专业部门的联系将更加密切；将需增加某些方面的投入，而且可能冒更大的风险。所以，只有有关部门协同进行科学的技术经济综合研究分析工作才能做出工程项目的正确决策；因此，经营管理体制需要适应这种发展的要求。

我国钻水平井勘探开发油气藏的事业自60年代中期以来长期停顿或发展缓慢。其原因和教训是明显的和深刻的。在世界石油工业已开始实施这种战略转变的关头，我国石油工业面临严峻的挑战，也有极好的机会。只有进行战略性的研讨和评估，才能不失时机地做出适当战略决策，扭转落后的状态。

现已开始的世界90年代加速扩大钻水平井规模的汹涌潮流，一些老油气区、成熟油田重又焕发新春和喷发活力的令人目眩的变化，这些都是80年代在几十年缓慢发展之后大力开展的水平井研究与发展工作的结果。看来，80年代发展水平井的主要成果有：

1. 证实了水平井勘探开发油气藏的优势：

钻水平井勘探开发油气藏可能具有的某些重大优势，在概念上早已为石油工业界不全面的和粗浅地意识到了；因而，在50年代以来，全世界范围内不间断地进行了水平井科技攻关试验。80年代在不同类型油气藏中钻水平井取得了显著经济效益，实际证实了发展水平井可极大改善石油工业经营效果的巨大潜力。

首先，钻水平井可提高油气藏描述的水平，使人们的认识更接近于客观实际。钻直井或井斜角不大的定向斜井，只能提供井眼钻穿的纵向柱状剖面的直接依据；而井与井之间含油

气层的长距离范围内横向物性变化只能在生产过程用多种间接手段测得有关数据，进行不精确的分析推断。但是水平井可以提供重要的油气层横向物性的直观依据；与直井取得的垂向剖面数据及其他间接手段取得的数据相结合，可使油气藏描述提高到一个新的高度。法国拉克油田是个小油田，已经钻了约百口直井，认为油田已经枯竭了，对油藏的认识已经充分了。但是，钻2口水平井时，都各自钻遇了大型破裂带；这些大型破裂带是以往钻的直井都未发现的。地层的天然裂缝往往是垂直的，钻直井钻遇裂缝的机遇很小，钻水平井钻遇垂直裂缝网络的机遇很大，而且可以较准确判断裂缝网络的形态（走向等）及发育程度。法国Castera Lou油田以往钻直井曾钻遇了裂缝。钻了两口水平井之后，发现实际走向与依据直井资料判断的走向并不一致，而且裂缝网络更为复杂；这使专家对油藏的描述与评价又有明显深化。美国西弗吉尼亚州等地的泥盆系微裂缝页岩气层，分布面积很大，储量也很大；钻了上万口直井，产量都很低。1987年钻了一口水平科学试验井，在气层内延伸了600米；采用空气和雾钻这口水平井，利用井下摄影机技术直接观测和记录了各井段的天然裂缝的位置和发育情况；掌握了准确的气层横向物性的情况，为优化设计这口井的可选择性分段测试及压裂的完井管柱提供了依据。这口水平井的初产量为相邻直井的9.2倍，分段压裂后产量又增加了4—24倍，效果很好。最近以来，在法国拉克油田进行了在水平井井眼内垂直地震的试验研究，可以探测到远离水平井眼的部位存在套管或水泥充满及粘结情况不好等异常情况。所以，钻水平井不仅可以提供井眼穿过的“一孔”或“一线”的目的层的横向物性变化的直接依据，而且可能和其他手段（包括直井）配合，提供范围更广和精确度更高的目的层的横向物性变化的间接依据。

在老油气区成熟油田内仍有增大储量的巨大潜力。据统计^[8]，Exxon、Shell等16家大跨国石油公司于1980—1986年期间，累计新增储量共346.09亿油当量桶；其中修正储量和提高采收率所增加的储量共约121.77亿油当量桶（约占替补储量的35.2%），详见图2—4。由此可见，加强和深化投入开发的油气田的地质调查研究和采用新技术仍可增加巨量替补（可采）储量，对成熟油田挖潜稳产具有十分重大的意义。

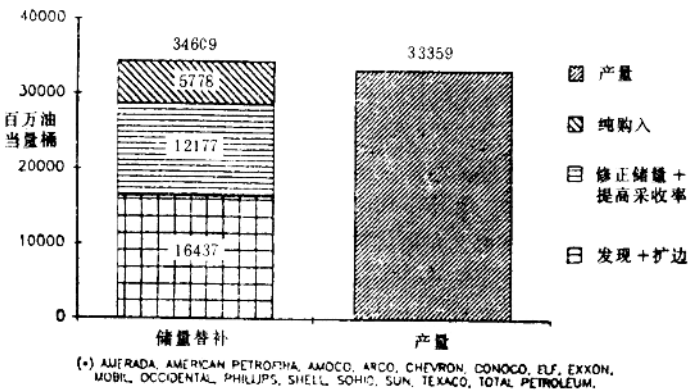


图2—4 16家（•）跨国石油公司（1980—1986）储量替补

石油公司对于接近于客观实际地、精细地确定油气田的原始储量十分重视。为此,持续进行一些花费昂贵和技术复杂的作业;其中包括钻评价井、检查井和原始状态取芯等,以确定油气层原始含水饱和度等等参数。但是,已如上述,钻直井(或常规定向斜井)和在直井中进行有关确定油田原始储量及其动态变化的作业都有很大局限性。只能得到井眼所在部位上油气藏厚度上的全部资料。而水平井可以提供更多的储层横向上的物性的直接依据及更为精确地间接的分析资料。所以,钻水平井已是精细确定油气田的原始储量及其动态变化的最有效手段之一。美国Oryx能源公司计划在1990年在得克萨斯州奥斯汀白垩油层等钻105水平井,其中约有35口为探井;这明确反映出,水平井在勘探中的优势已为石油公司所重视。

钻水平井开发许多类型油气藏可大幅度提高产量和综合经济效益,早已不是理论分析,已为世界各地大量开发试验所证实。目前,用水平井开发的油气藏的类型及其效果,归纳起来有:

- 钻穿裂缝性油气藏的多裂缝:

油气藏中的裂缝基本上是垂直的,直井钻遇天然裂缝的机遇很小;当裂缝间隔很大时,直井几乎不可能与裂缝网络直接相交。水平井可能与大量基本上垂直的裂缝系统相交,特别是当裂缝网络呈锥形时,水平井更易与其相交。意大利Rospo Mare油田是裂缝性多孔石灰岩稠油油田,钻的几口水平井的水平井段长490—600米,其产量是相邻直井的7—10倍。上述的西弗吉尼亚泥盆系裂缝性页岩气层也是因水平井钻穿许多裂缝才取得产量比相邻直井多8.2倍的优异效果。

- 使低渗透油气藏变为高产的:

低渗透油气藏通常用压裂来改造,以增加产量。但是,更有效的方法是钻水平井。人工水力压裂难以压出一条直径百多毫米和长达几百米的裂缝;而且人工压出的裂缝方位只受储层内的各种应力控制,不受人为控制。水平井的直径大和长几百米的储层内井段,导流能力很大,流动阻力几乎可以忽略不计;而且水平井的储层内井段的方位和空间位置可以人为控制,随着技术的发展,控制精度可以很高。美国Trendwell石油公司开发尼亚加拉礁岩油层,水平井的储层井段长约80米,使干井成为日产84吨油和1.72万方天然气的生产井。水平井不仅可与压裂增产方法竞争,而且水平井内再压裂的效果更好。美国BDM公司在西弗吉尼亚州泥盆系页岩气层钻水平井(水平井段长约610米)的初产量为直井的9.2倍,经分段压裂后,测试产量又增3—24倍。

- 减缓水、气锥进:

在有底水和(或)气顶的油(气)藏中,水(或)气的锥进是直井产量和寿命受到限制的重要原因,即使油(气)柱高度较大,射孔井段长度也较小或很小。水平井的泄油井眼,距油水界面和(或)油气界面的距离大,而且泄油面积因储层井段长而比直井大几倍、几十倍。因此,当开采速度与直井相同时,水平井诱发的压力降比直井小得多;从而使底水和(或)顶部天然气推进速度大大减缓,并可在无严重水锥进和(或)气锥进的情况下大幅度提高产量。美国阿拉斯加北坡的普鲁德霍湾油田中部,油柱高60米,有气顶和底水。该区域直井的射孔段长度只有约7米,平均产量为3000—4000桶/日;水平井的储层内井段,在靠近储层中部的部位横穿油层,在15米的范围内上下波动,长度为305—490米;这些水平井的初期采油指数为常规井的3.5倍,产量为9000—10000桶/日。澳大利亚以西印度洋上的North

Herald油田和South Pepper油田,油柱高度分别为11.9米和10米,分别有气顶和底水,油层水平渗透率为17达西和垂直渗透率为3达西,储量很少(约600万桶)。80年代初发现这两个小油田,钻的直井出水,认为无开发的经济效益而搁置起来;1987年1月和12月,分别钻了1口和2口水平井,合计平均日产9500桶(只有缓慢推进现象),使得这两个小油田变成了有开发经济价值的。

• 提高薄的或层状油气藏的开发效益:

由于油气层薄,直井的泄油井段很短,产量有限,甚至无开采价值。水平井已可横穿薄油层数百米,泄油面积增大几十倍;因而,产量可大大增加。Meridian石油公司,1987—1988年在美国北达科他州的Elkhorn Ranch油田钻了3口水平井,油层为白垩层,厚度为1.2—3.7米,水平井段长度在398—821米范围内,单井日产油95—332桶,日产天然气5.0—36.7万立方英尺。Conoco石油公司在该油田同一产层内也钻了一口水平井,产层厚度仅2.44米;产层内井段长537米,日产油35桶,日产天然气1.8万立方英尺。水平井可钻穿多个薄油层。苏联多林那油田钻了8口水平多目标井,油层井段长250—650米,而相邻直井的油层井段长度只有5—80米。这些水平多目标井的单井产量为直井的5.3倍。

• 经济有效地开采重稠油:

Sceptre资源公司在加拿大萨斯喀彻温省Tanglelegs N水平井。原油粘度为1.3万厘泊,油层温度18.9℃;油层为未胶结砂岩,厚度为8.23米。这口水平井垂直深度为476.2米,油层内水平延伸长421米;日产油600桶和水3000桶,采用杆式泵抽油。Esso加拿大资源有限公司在Norman Wells油田钻水平井开采重油,使该油田原油产量由3000桶/日增至28300桶/日;其中一口水平井初产量为1250桶/日,稳定产量为800桶/日。意大利亚得里亚海上Rospo Mare油田也是稠油油藏,由于水平井产量大(多数日产数千桶),井筒内油温度比直井内高,这使原油粘度降低和流动阻力减小,使水平井由人工升举变为自喷。

以上五种类型油气藏钻水平井使产量大幅度提高的实例,证实了用水平井开发采油的优异效果。随着应用范围日益扩大和经济效益日益显著,石油工业界原有的对水平井勘探开发是否有疑的疑虑迅速解除,导致以更快的加速度扩大钻水平井的规模。80年代发展水平井重大成果之一是开始整体开发Rospo Mare油田。在低国际原油价格下用其他任何方法开发该油田均无利可图。而用水平井开发该油田可使每桶技术成本降至5.7美元/桶,所以Elf石油公司确定用水平井整体开发该油田,并预期在低国际原油价格下也可获得可观利润。

1989年国外有些专家认为某些油气藏,例如油柱高度大于100米的和垂直渗透率与水平渗透率比值太小的等等类型油气藏中钻水平井并不能取得良好的经济效益。但是,适用水平井勘探开发的油气藏类型近几年来已明显增多。据Oryx能源公司分析,美国有10个至20个地质层组适于钻水平井勘探开发。澳大利亚有关人士概括地说,现在已不存在打不打水平井的问题了。

2. 老井用水平井二次完井效果很好。

国外把老井中侧钻水平井眼称为用水平井二次完成。

随着油气田开发的发展扩大,已钻成的油气井数越来越多;其中一些井由于累积油、气采出量逐渐增大而枯竭或产量降得很低。这些井多已废弃,或者生产过程不再能够带来经济效益。而且这种井的数量逐渐增多。用水平井二次完成的办法可使老井复活或显著增产。这

是80年代发展水平井的又一十分重大的成果。

本报告前面已简要介绍了美国Gidding油田老井用水平井二次完成办法复活和增产的情况。已把这种用水平井二次完成老井的办法作为该油田今后开发的方针。在老井中侧钻1个水平井眼，经过一段时间产量降至某一最低限度以后，再在相反的或近90°相位差的方位再侧钻一个水平井眼。这样，一口老井可多次用侧钻水平井眼的办法恢复生产能力。也研究了在一口老井中侧钻多个水平井眼之后再投产的方案。

Oryx能源公司在南得克萨斯州Pearsall油田也在老井中侧钻水平井眼（二次完成），取得优异的增产效果^[9]（详见表2—3）。

表2—3 Oryx能源公司5口水平再完成井的效果

井 号	水平再完成 前日产量 (油) 桶	水平再完成 前累积产量 (油) 千桶	水平再完成 日 期 年 . 月	水平段长 度 英尺	水平再完成 后日产量 (油) 桶	当前日产 量 (油) 桶	水平再完成 后累积产量 (油) 千桶	水平再完 成的费用• 千美元
Baggett No.7	5	126	1985.12	240	107	45	37	
Baggett No.11	7	65	1986.12	140	36	38	16	
Baggett No.9	15	175	1987.9	950	338	215	54	685
Panther Hollow No.11	12	70	1989.7	1715	507	507	5	700

注：• 典型直井成本约为45万美元。

资料来源：美国《油气杂志》1990年2月26日。

从表2—3可看出，这4口老井在水平井二次完成后的初产量为其以前的5—40倍；在分别生产7—50个月，稳定产量仍为水平井二次完成前的5—40倍。这证明用老井侧钻水平井眼的办法可获得巨大的增产效果，可短期内回收水平井再完成作业费用。

上述两个油田都是裂缝性白垩油层。在欧洲北海的海尔德油田，1986—1988年 Unocal 荷兰公司在常规定向井中侧钻水平井眼（水平井二次完成），大大降低了产出流体的含水率。这个油田的油层为砂岩，已投产的常规定向井的产出流体的平均含水率已增至94%左右，已无开采的经济效益。这个油田典型的常规定向井开窗侧钻中半径水平井眼的垂直剖面见示意图2—4，开窗侧钻的水平井眼进入油层的部位已避开老井产层井段水淹区。为防砂，在水平井眼的产层段下了预砾石充填的筛管。这几口常规定向井经水平井二次完成后，大多把产出流体的含水率降至10—20%，油产量增加若干倍^[10]（详见表2—5）。这几口常规定向井开窗侧钻水平井眼再完成的费用仅为钻新井费用的50—60%。由于大幅度增加产量，水平井二次完成的费用可在40天后收回。

上述几个油田中老井侧钻水平井眼（水平井二次完成）取得增产效果的实例很有说服力。上述的有关经济效益的测算都是以1986年至这次海湾危机前的低国际原油价格为依据；如国际原油价格上涨，其经济效益将更加显著。以Oryx公司在Pearsall油田对Panther Hollow No.11老井进行水平井二次完成作业的情况来看，作业只花费了70万美元，但日产量增加490桶。如以每桶30美元价格折算，日产值增加14700美元；只以此一项增收额测算，投

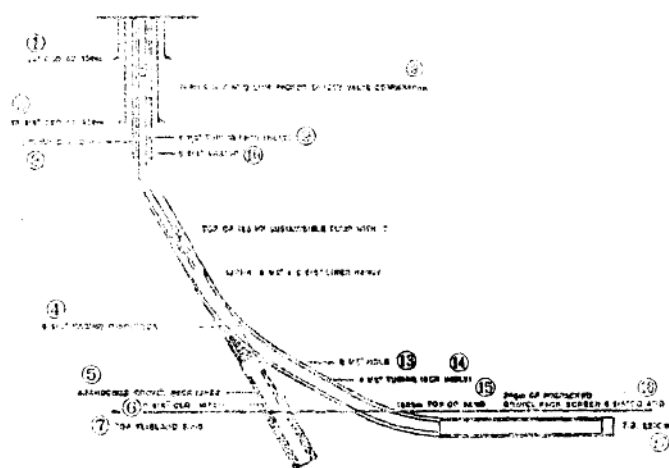


图2—4 海尔德油田典型水平井二次完井

①20英寸套管130米；②13 $\frac{3}{4}$ 英寸套管380米；③动力电缆；④9 $\frac{5}{8}$ 英寸套管斜向器；⑤废弃砾石充填尾管；⑥9 $\frac{5}{8}$ 英寸套管1570米；⑦Vlieland砂岩层顶；⑧100米9 $\frac{5}{8}$ 英寸泥线封隔器，安全阀组合；⑨4 $\frac{1}{2}$ 英寸油管（9铬1制）；⑩9 $\frac{5}{8}$ 英寸套管；⑪带“y”型工具的125马力的潜油泵顶；⑫1370米4 $\frac{1}{2}$ 英寸×9 $\frac{5}{8}$ 英寸尾管悬挂器；⑬8 $\frac{1}{2}$ 英寸井眼；⑭4 $\frac{1}{2}$ 英寸油管（9铬1制）；⑮1660米砂岩层顶；⑯砾石充填节段6 $\frac{1}{2}$ 英寸外径，4英寸内径；⑰总井深2030米

表2—4

海尔德油田常规定向井开窗侧钻水平井眼再完成的效果

井 号	再完成前产量		再完成后产量	
	吨/日（油）	含水率 %	吨/日（油）	含水率 %
A-2	58	96.7	80	70.5
A-3	60	95.7	173	18.0
A-4	—	—	286	1.4
A-5	80	94.2	279	1.0
A-7	75	95.0	184	5.3
A-8	50	95.8	251	47.4
A-10	95	93.8	258	2.9
A-11	112	91.3	242	9.8
A-12	75	96.1	350	10.7
B-1	78	84.0	175	14.0
P19-6	47*	—	603	—

产47天就可全部收回投资，表2—4中列出常规定向井在水平井二次完成之后产量翻番或翻几番的情况。如果不计算产出水量大幅度减少所带来的好处，只以油的增产数额测算，大多数井改造后日增收几万美元。

各石油公司在低油价下在老井中进行水平二次完成取得了经济效益，1987年美国有关专家欣喜地指出它的巨大发展潜力。当年估计美国约有9万口低产井、枯竭井，他预言其中的6—7万口井进行水平井二次完成会有好的经济效益。今后国际油价可能略高于1987年油价，老井进行水平二次完成的经济效益将进一步增大。所以，仅仅老井进行水平井二次完成的改造这一类水平井技术的应用，就可能对石油工业的面貌产生巨大的影响。

三、水平井技术系统发展概况

自30年代美国开始是老井中侧钻短的水平井眼，苏联1952年钻成水平多底井。此后，60年代和70年代中国、苏联及西方一些国家继续进行水平新井及老井中水平二次完成的科技攻关试验。80年代以前世界范围内的水平井科技攻关虽然也曾取得某些增产效果及经济效益，但与80年代的成果相比都大为逊色。80年代以前的水平井技术系统尚不成熟、不配套，尚不具备在勘探开发中大规模应用的基础。进入80年代以后，水平井技术发展产生“飞跃”，逐步完善配套，可以适应多种类型勘探开发的基本需要，这才揭开了大规模应用的序幕。

钻水平井的目的依然是为了取得油气资源勘探开发的综合经济效益。国外石油公司曾明确说明，没有增产增收的把握，就不要钻水平井。换句话说，美国等地水平钻井突飞猛进地扩大规模，其根本原因是有了取得增产效果和综合经济效益的可靠保障。实质上，是水平井技术系统的发展与完善配套提供了增产增收的保证。

国外某些文献经常提到水平钻井技术或水平钻井技术系统，宜理解为包括相关学科技术的和扩大了的水平钻井技术系统。国外有的文献也提出了水平井技术的术语，在概念上也是包括了保证水平井并能增产增收的各种专业技术在内的。现仅概述水平井技术与开发的新进展与主要标志。

1. 水平钻井技术新指标

水平钻井技术发展日益加快，主要指标不断刷新：横穿油气层长度、总水平位移、钻入油气层厚度、垂直井深及总井深等方面指标都大幅度提高。据今年文献报导，Unocal石油公司在加利福尼亚海上钻的A-16水平井，油层内井段长达创纪录的1751米（最大井斜 87.5° ）；这口水平井的总水平位移最大达3884米（垂直井深1347.6米），井斜角大于 80° 的井段长度为3048.8米。这家石油公司在北海的荷兰所属L-13区块钻的FD-103水平井，垂直井深达（1990年2月）创纪录的3501.2米；该井最大井斜 83° ，横向延伸井段长达871.3米。Oryx能源公司在美国Pearsall白垩油田钻了中半径水平井，其中总水平位移最大的长达1269.5米，油层内井段长达1253米。近来一些石油公司以造斜率大于 $50^\circ/30$ 米左右为标准划分短半径水平井（其优点下面另作专题探讨），Montedison集团公司钻的短半径水平井，造斜率为 $51.5^\circ/30$ 米，水平横向井眼长达321米。据报导，已在厚度小于2.4米的油层内和厚度为2.2米的油层内钻了近30口水平井。

上述水平井井重要技术指标远远超出不久以前的世界纪录，可以更好地适应钻水平井勘探开发多种类型油气藏的要求。长、中和短半径水平井的水平（横向）延伸井段长度迅速增大，可以基本满足勘探开发增储上产的需要；特别是在1.2—3.7米厚的薄油层内横向延伸398—821米，大大扩大了水平井在薄油层中的应用前景。最大垂直井深超过3500米，也使水平井在深部油气层中应用范围又向前迈进了一步。水平井的总水平位移迅速增至3884米，也有重大意义；在极浅海、海上和沙漠及沼泽湖泊等地区的勘探开发作业，增加丛式井组的井