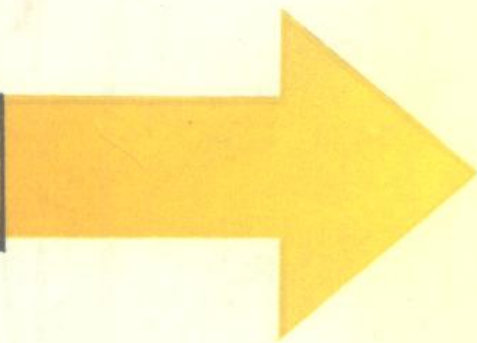


水平井 钻井完井 及增产技术



李介士 等 编译
石油工业出版社



TE 243/006

062602



水平井钻井完井及增产技术

李介士等 编译



200433646



5252/16



石油工业出版社

(京)新登字 082 号

内 容 提 要

本书详细叙述了水平井的设计、钻井液工艺、固井、完井方法、测井与射孔、压裂与酸化和钻井实例。还专门介绍了超短半径径向钻井系统这项水平井钻井的新技术。另外,本书也介绍了我国南海对外合作区块内所钻的大斜度井、水平井的钻井、完井及设计资料。

本书可供现场钻井工程师、技术员和技术干部使用,也可供从事钻井的科研人员及石油院校师生参考。

水平井钻井完井及增产技术

李 介 士 等 编 译

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版

北京科技印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 19 印张 472 千字 印 1—2,000

1992 年 6 月北京第 1 版 1992 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN7-5021-0671-5/TE·638

定价: 5.55 元

序

钻水平井来提高油、气田采收率的尝试早在 20 年代就开始了,但因当时受钻井设备和工具的限制,尤其是还没有定向钻井控制技术,极大地限制了水平井钻井的实际应用。把水平钻井列为独立的科研项目是在 50 年代,通过大量研究出现了钻短曲率半径水平井的“肘节”式钻铤和钻长、中曲率半径水平井的造斜装置。电测采用了“反拖鱼”法,射孔采用了“油管传送射孔器”,从而使水平井钻井技术有了较大的发展。水平井钻井技术的主要突破还是在 70 年代,80 年代间产生了用于定向钻井的井下涡轮弯接头组合钻具。随后迅速发展了导向钻井技术,引起了当今的水平井钻井技术革命。此时出现了多种井下导向钻井液马达、随钻测量、随钻测井、钻杆传送测井、人造金刚石复合片钻头、新型洗井液等新装备和新技术;地面装备上出现了顶部驱动、挠性油管装置和计算机技术等,使水平井钻井技术日趋成熟,发展到工业化应用阶段。水平井钻井口数在 80 年代中有突飞猛进的发展,如在 1980~1984 年,世界上每年钻水平井只有 1~2 口,到了 1988 年上升到 150 口,1989 年接近翻了一番,1990 年水平井口数突破千口,达到 1290 口,预计 1991 年还要再增长 45%。

水平井钻井带动了整个油田开发技术的发展。从油藏研究开始,井身轨迹设计、钻井、固井、完井、测井、射孔、生产测试、油藏评价到油气生产和增产措施等一系列围绕水平井的新技术得到发展和应用,呈现了新的面貌。可以说,80 年代的水平井钻井技术引起了一场巨大的石油工业技术变革。

本书以 1989 年前世界水平井技术资料为基础,补充了部分最新资料编译而成。力图反映现代水平井技术中有关井身轨迹设计方法、钻井措施、水平井完井及增产方法的技术成果,望对国内水平井技术的发展和实践有一定的参考价值。

王礼钦

1991 年 5 月 9 日

前 言

本书是以美国 CHEVRON 石油公司钻井技术中心在 1989 年 2 月中旬第一次举办的水平井钻井和完井研讨会所提供的资料为基础编译的。这次研讨会培训的对象是 CHEVRON 石油公司所属的钻井监督、定向井工程师及该中心的部分钻井工程师。这次研讨会被认为水平高、技术新、资料全、适用性强、组织紧凑。它充分反映了当前世界上水平井钻井、完井的技术水平和发展状况，受到与会者的好评。

李介士等同志回国后，以这次研讨会所学内容为主，编写了一份定向钻井技术转让总结汇报稿，简要地介绍了目前世界上水平钻井、完井的技术状况。为了配合国内开展水平井钻井的科研攻关实践，推广国外水平井钻井、完井技术的应用，我们重新组织专业技术人员在“总结汇报”资料的基础上编译了此书，并把我国南海对外合作区块内所钻的大斜度井、水平井的钻井、完井及设计资料以及最近收集的有关资料补充进去，以突出本书的实用特点。

全书共分八章。第一章由叶宜成、张军和李介士编译；第二章由李介士、胡桂珍和江文昌编译；第三章由李介士编译，贾利国和马津作了补充和修改；第四章由李介士、张祥洪和邓志云编译；第五章由张祥洪和章升森编译；第六章由张景烘编译；第七章由李介士、马津和黄长穆编写；第八章由李介士编译。

在本书的编译过程中，王礼钦和章升森对全书进行了审核。蒋其恺对编译和出版此书给予了极大的支持和鼓励，在此表示衷心的感谢。

由于时间紧，参加编译的人员缺乏编译经验，专业技术和英语水平有限，在编译过程中难免发生错误。另外，水平井的各项技术正处于蓬勃发展之中，新技术和新工具不断涌现，因此本书的某些内容有可能已经发生概念的更新。所有这些不足之处，我们热诚地欢迎同行专家、学者和工程技术人员批评指正。

编译者

1991 年 3 月于广州

目 录

第一章 水平井钻井工艺

一、水平井的应用	(1)
二、水平井的分类及其特点	(4)
三、水平井的钻井技术	(20)
四、水平井的剖面设计	(29)
五、水平井钻具设计	(44)
附录	(51)

第二章 水平井的钻井液工艺

一、大斜度井的井眼稳定性	(58)
二、井眼净化	(60)
三、大斜度井和水平井的压差卡钻问题	(62)
四、关于水平井的堵漏问题	(63)
五、钻水平井的钻井液性能	(65)
六、水平井钻井液体系的分类和实例	(73)

第三章 水平井固井

一、倾斜井固井质量的研究	(80)
二、怎样提高大斜度井及水平井的固井质量	(86)
三、固井实例——流花 11—1—5 大斜度井固井情况	(99)

第四章 水平井完井方法

一、概述	(106)
二、衬管固井	(108)
三、水平井砾石充填完井法	(120)
四、水平井非固井完井法	(136)

第五章 水平井测井和射孔

一、水平井测井	(141)
二、水平井射孔	(159)

第六章 水平井压裂和酸化

一、水力压裂	(168)
二、岩石力学与水力压裂	(173)
三、水平井压裂和地层应力	(174)
四、测定地层应力大小的微压裂法	(179)
五、测定裂缝方向的应变松弛法	(183)
六、水平井压裂设计	(185)
七、水平井压裂施工	(203)
八、水平井酸化	(206)

第七章 水平井设计及钻井实例	
一、南海 A—3 井水平井设计	(210)
二、中半径水平井钻井实例	(223)
三、水平井技术在中国南海的成功应用 (长半径水平井实例)	(229)
第八章 超短半径径向钻井系统	
一、概述	(272)
二、几种特殊装置	(274)
三、特殊的完井工艺	(285)
四、完井工艺	(292)
参考文献	(294)
附录 本书所用常用许用单位和非许用单位换算表	(295)

第一章 水平井钻井工艺

在早期的水平井钻井实践中，主要是采用两种技术把井眼从垂直钻到水平。一种是现在称为“长半径”的水平井钻井技术；另一种是现在称为“短半径”的水平井钻井技术。这两种技术几乎是在同时发展起来的，在苏联用前一种技术成功地钻成水平井的时候，美国也用后一种技术成功地完成了水平井钻井。

在最近几年的研究与发展中，Eastman-Christensen 公司在 Arco 公司和 Norton Christensen 公司研究一项新的钻水平井方法的基础上，又产生了“中半径”水平井钻井技术。这样就填补了“短半径”和“长半径”之间的空白。同时，由 Petrolphycis 和 Beche 联合研制的“超短半径”水平井技术也处于试验应用阶段。目前，水平井钻井技术已经从高度专利性的科学研究发展成为世界规模的水平井钻井实践。

80 年代以来水平井钻井技术的不断成熟主要归功于整个定向钻井技术。例如，可以精确地确定井眼相对油藏边界位置和流体界面的随钻测量技术以及井下钻井液马达技术的迅速发展。随着随钻测量技术的突破，其他方面的技术，如井下导向钻井液动力钻具系统、录井、测试、固井和完井等也相继获得了发展。许多作者的实验结果越来越明显地表明，只有综合地或整体地应用这些技术，才能充分发挥这些新技术的优势，取得最佳效果。

一、水平井的应用

利用水平井提高产量的概念可以追溯到 30 年代。30 年代中期，用于钻引流井的钻井工具和技术专利在美国专利局注册。50 年代，美国为了提高低压地层的产量钻了许多小井段的水平井（通常小于 30m），同一期间中国和苏联也钻了水平井。过去十年，随着随钻测量技术，导向马达技术和新的录井及完井技术的发展，对水平井钻井技术的兴趣又重新恢复起来。水平钻井技术由于其具有显著提高过去曾经认为难以处理或边际经济油田的产能而获得了发展的动力。埃尔夫·阿奎坦公司在意大利 Rospo Mare 油田钻的水平井就是这样的例子。虽然水平井的产量达到邻近直井产量的 20 倍是个特例，但该油田平均增产达到 4 倍。

大斜度井、水平井和多井底井技术的应用都有一个共同的目的，这就是降低综合成本和提高油层的开采量。

在开采含有多孔隙储油岩石的油气过程中，井眼是产生压力梯度以控制油气流体的通道，也是把产出的油气流体运载到地面的载

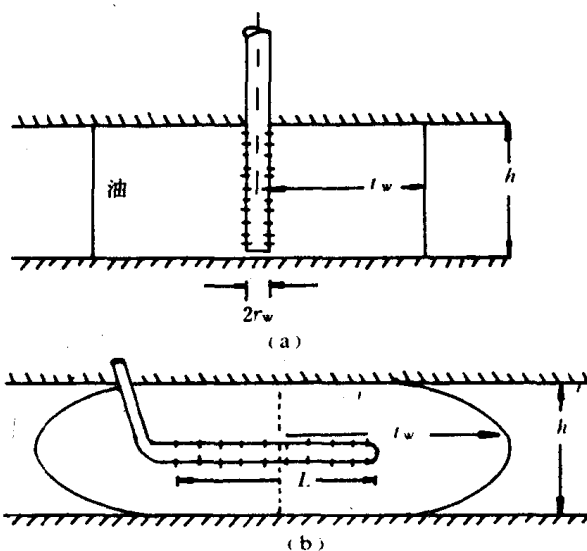


图 1-1 垂直井和水平井驱油体积

体。因此，油气流的流动形状是油气流活化效率的决定因素。对于同一尺寸的井眼，直井由于出油（气）面积比较小，其几何条件所提供的效率就比较低，而水平井几何条件所提供的效率达到最高，如图 1-1 和图 1-2 所示。

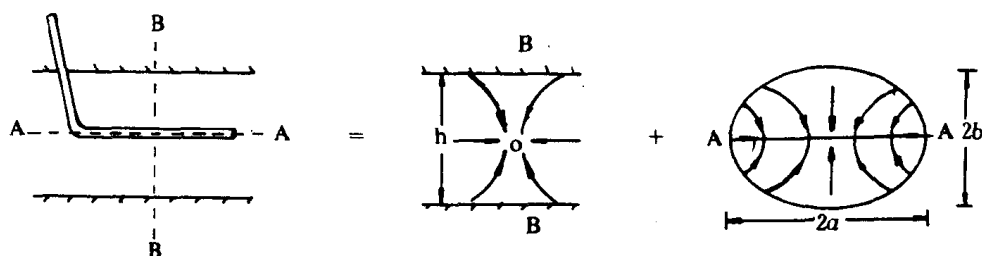


图 1-2 三维水平井驱油问题分解为两个二维问题

BB 和 AA 为参照截面

大斜度井（井斜角大于 60° 的井）主要适用于层状油藏。多井底井（在一个井眼内钻几口井）主要用于很厚的垂直渗透油层（具有低孔隙率和垂直裂缝的块状石灰岩），或者短半径横向引流类的井。

1. 天然垂直裂缝

同石灰岩一样，与天然垂直裂缝系相交错的油藏为水平井提供了理想的应用条件，这一类型的井身剖面可以使产量提高 4~20 倍。埃尔夫·阿奎坦石油公司的 Rospo Mare 油田是个很好的例子，其增产量最高的井比同一地区的垂直井提高了 20 倍。在垂直裂缝油藏中，油气完全处在裂缝中，裂缝之间的非生产底层一般为 6~60m 厚，所以垂直井可能只钻到一个产层，也可能一个产层也钻不到，而水平井可以与产层垂直相交，横向钻穿若干个产层裂缝，这样就比垂直井的开采量要高得多。

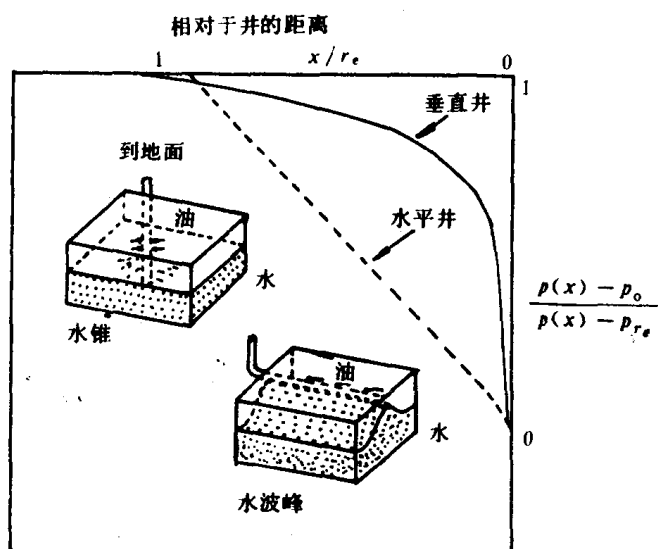


图 1-3 水平井和垂直井油层压力比较

2. 水锥和气锥

1) 水锥

如果产层为水驱动，尤其是当原油粘度比水高得多时，垂直井可能会遇到水锥的问题。发生这一问题时，会连油带水一同生产。水平井可以在油层的中上部造斜，然后在生产层中钻一定长度的水平井段。水平井不仅减少水锥的可能性，而且每单位长度的产油段的压力降比垂直井产油段低，出水、出砂也比垂直井少，如图 1-3 所示。

2) 气锥

因为天然气的粘度远低于原油，通常气锥比水锥更为严重。如果气锥问题不能被控制住，则油层必须以注

气的方法来维持产量，否则，油层压力必然过早地下降。水平井的井眼全部在油砂中，所以有助于避免气锥问题。并可以控制采收率，不致于使气锥的压力梯度过高。

水平井成功地减少了水锥、气锥等有害影响。因此，水平井可以显著提高产量。

3. 低渗透性地层

由于固井的影响，石灰岩油藏的孔隙度和渗透率即使在短距离内也可能有相当大的变化。与此相似，砂岩油藏中内部岩层构造倾角的变化也能造成孔隙度和渗透率的变化，这些油藏水平相交可以提高产量。在一些低渗透性的地层中钻一口水平井，穿入产层比压裂增产的效果要好。

4. 薄油层

对于薄油层，通过在油层的上下边界之间钻一个水平井段可以大大地增加井与油层的接触表面积。

水平井的开采指数反映了井眼与油层接触面积的增加，这是因为对于确定的产量水平来说，接近水平引流井段的局部径向流速与引流长度成正比。流速的降低又必然需要较低的压力降来驱动。代表性地讲，与同一地层的垂直井相比，水平井的开采指数可以提高4倍，而在一定条件下可以提高10倍。如果不考虑其他因素，产量的增加幅度随油层的厚度增厚而下降，因此对于厚的油层则可以优先选择成本较低的直井完井方法，或者考虑应用多底井的可能性（见图1-4）。

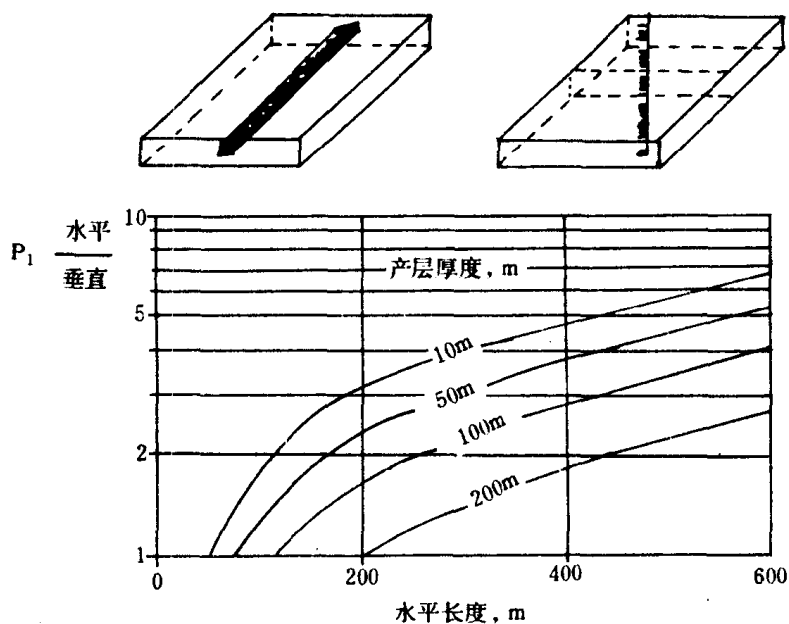


图 1-4 水平井和垂直井开采速率的比较

5. 不规则地层

水平钻井已经成功地应用于开发不规则油藏。这种含油地层互不关联，孤立存在，地震测量也难以指定其准确位置，所以钻直井或常规定向井很难钻到这类油藏。然而短半径水平井可以从现有直井中接近油藏的位置进行造斜，并且可以避免可能的水锥和气锥问题。

6. 溶解采矿

很多矿藏当今采用溶解采矿法进行开采，水平井可以提高这些矿藏开采的经济效益。

7. 边际构造、丛式井和加密井

水平井可能适用于边际构造, 为了在短期内增加总的开采量可以钻丛式水平井组 (见图 1-5)。在海上, 这样可以减少所需的井数和平台建造成本; 在陆地, 可以降低井场准备和其他方面的成本。

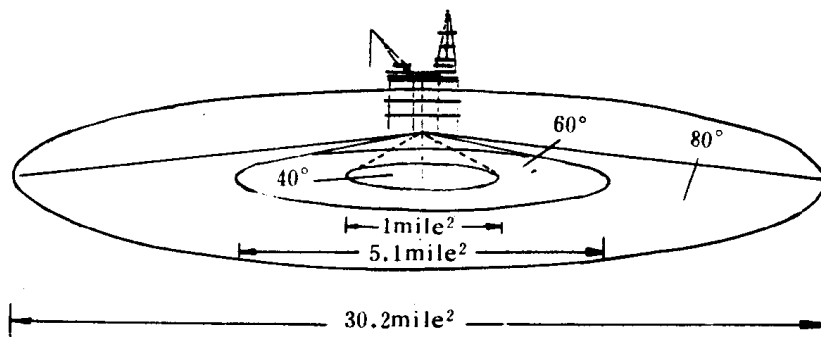


图 1-5 海上平台钻丛式井

8. 层状油层

水平井采油获得的产量增量取决于油层垂直渗透率的值。在垂直与水平渗透率之比值较低的情况下, 如水平纹理的油层, 大斜度井的效率要远高于水平井的效率。

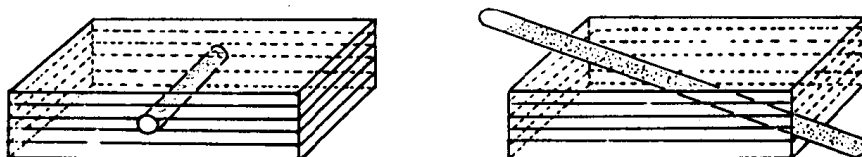


图 1-6 层状油层

由于垂直渗透率为零, 对于层状油层水平井效率极差。斜井与各层的接触面积都比较大, 因此效果比直井好

9. 重油产层

在重油产层中, 水平钻井技术具有提高产量的能力。横穿油藏的水平井既可以作为生产井也可以作为注水井。

二、水平井的分类及其特点

目前, 根据造斜井段的曲率半径, 水平井可以分为四种类型: 长半径 (常规)、中半径、短半径水平井 (见图 1-7) 和超短半径水平井 (关于超短半径水平井请参阅第八章介绍)。

1. 长半径水平井系统

水平井钻井技术已经进入了新的历史时期, 但是长曲率半径系统仍然有着它的应用领

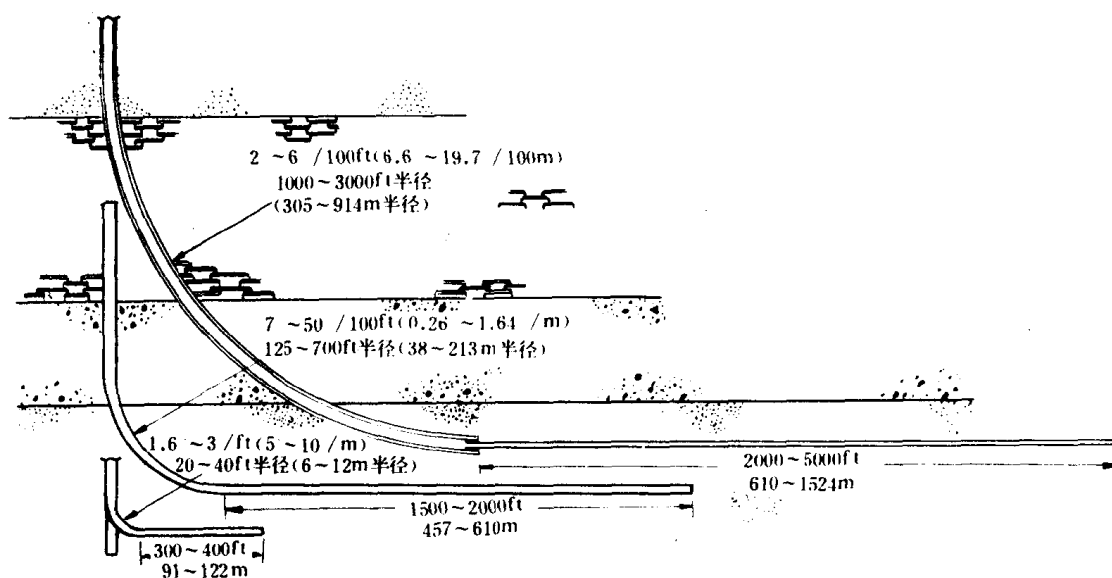


图 1-7 水平井类型

域，在勘探和探明油田面积方面利用长半径系统成功地钻出了许多井。对于海上钻井平台，大跨度或综合考虑地面障碍的井口位置和在城市下面的油田等，最好是使用长半径系统。图 1-8 为长半径水平井在四个方面的应用。

通常来说，长曲率半径水平井是采用常规的井下工具，钻出的弯曲段的增斜率为 $1^{\circ} \sim 6^{\circ} / 100\text{ft}$ 的水平井。这一类型的水平井的造斜点比较靠近井口，这样便于在正确的垂直井深上钻达目的层。由于增斜井段比较长，所以在进入水平段或接近水平之前，可能要进行几次开钻且有几层套管。同时，比较大的增斜段水平位移，从某种程度上讲，缩短了能够钻进的水平井段。例如，一口造斜率为 $4^{\circ} / 100\text{ft}$ 的水平井在钻达水平段前就有了 1400ft 的水平位移。不管怎么说，一口井的曲率半径增大，它所钻遇的地层就越多。在一口长半径水平井中，可能需要增大井眼尺寸，使之能够在井眼的增斜段也能顺利地入套管柱。曲率半径大，当然要钻达给定的井斜角所需的测量井深就大。就上面所提到的 $4^{\circ} / 100\text{ft}$ 的造斜率

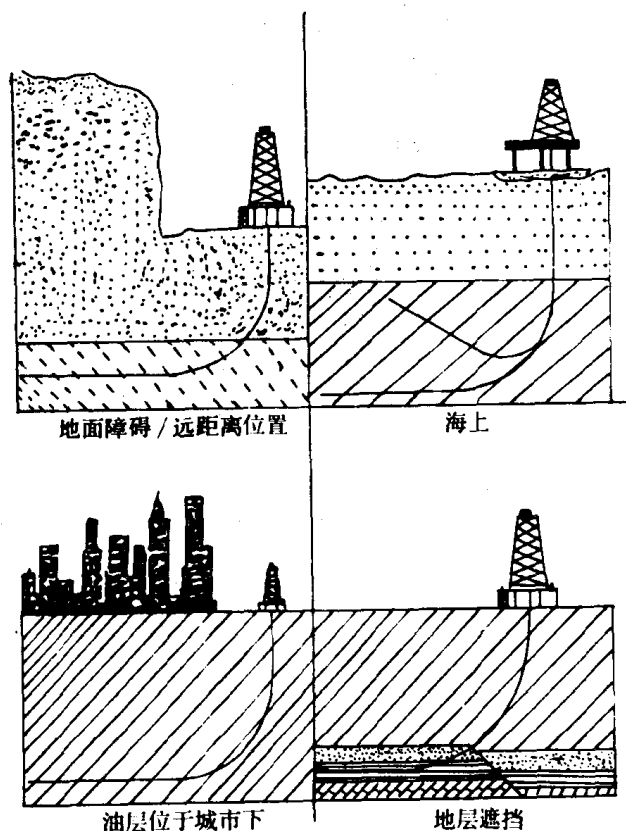


图 1-8 长半径水平井的应用

而言，就需要有大于 2250ft 长的弯曲井段。如果造斜率降低，其长度还将进一步增大，钻进中要解决的问题就越多。图 1-9 表示了各类水平井的造斜率与垂直深度和水平位移的相关数值。

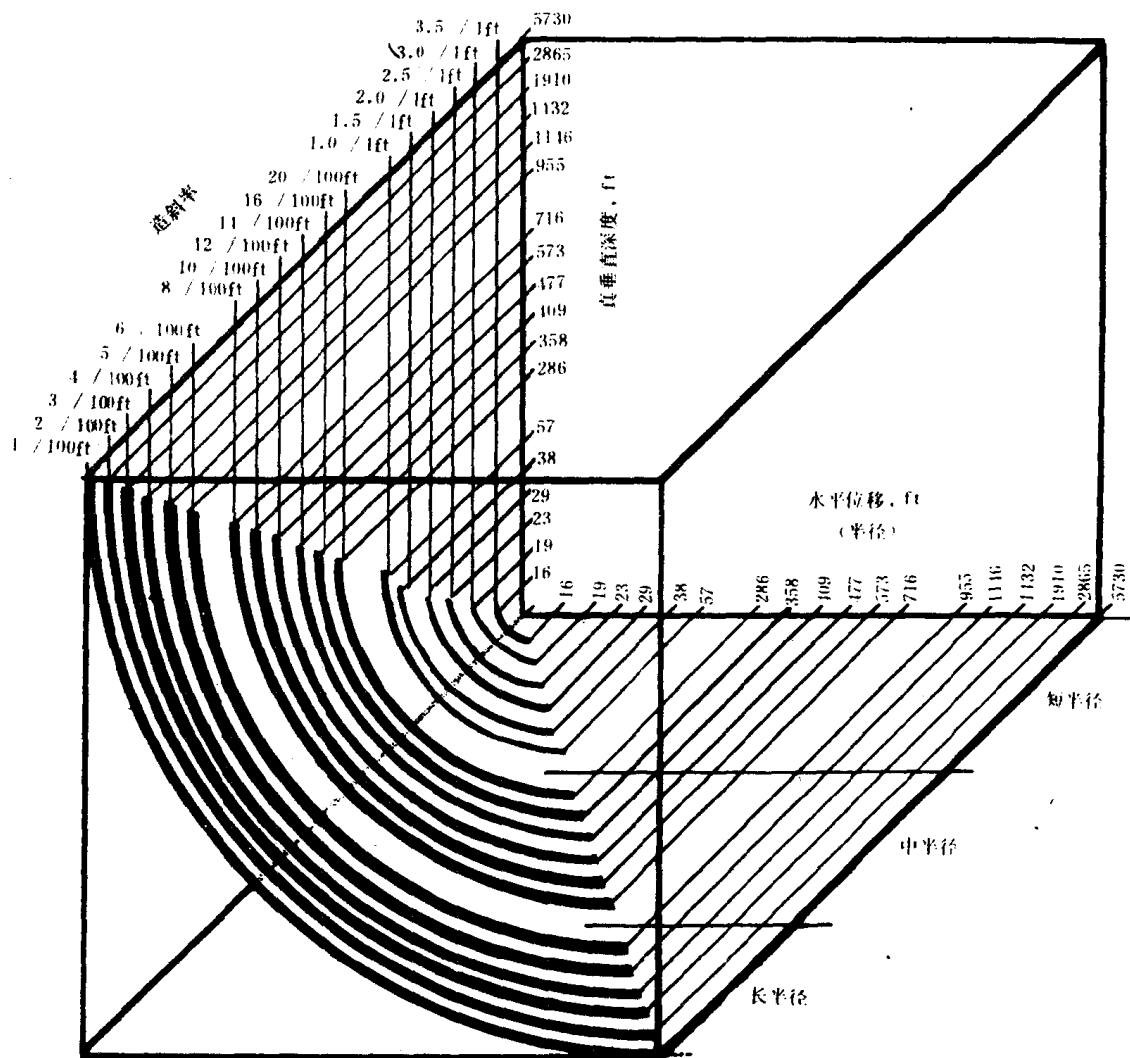


图 1-9 造斜曲率

在那些需要人工举采油的长半径水平井中，如果把抽油杆和完井工具安装在高倾角井段，则要兼顾考虑它们的寿命。相反，把举升和完井工具放在低倾角井段，如果有限的地层压力可以使产出的油上移到举升设备的话，则应综合考虑产量。

总之，长半径系统所能钻达的水平段长度要比其他方法都大。而且技术要求比较低，这一技术最先得到应用。目前仍然有着它的地位，苏联最早使用这一技术。图 1-10 是目前钻长半径水平井普遍采用的方法。

长半径水平井经济方面的分析：长半径水平井可以采用常规的定向钻井工具进行作业，这样可以让钻井承包商提供较多的简单工具，当然不是所有的井下工具。在低造斜率的井中，不完全需要井下马达，大多数钻机常常能使用一般工具有效地进行造斜。此外，油公司和平台人员用有限的水平井培训知识能够在接近水平段之前进行施工，而无需花钱去雇用定向钻井监督。

下面的一些数字近似地对一口垂直井和一口水平井在费用上进行了比较。虽然所使用的数字是虚构的，但是它仍然能够在某种意义上表现其价值，这是 Eastman-Christensen 公司所使用的比较方法。

假设一个目的层的垂直深度为 8000ft，从表层套管以后至完井井深是一个井眼尺寸，造斜率为 $4^\circ / 100\text{ft}$ ，造斜点深度为 6570ft，水平段长度为 3000ft。

先设：

CF ——垂直井 6570~8000ft 井段的每英尺费用系数；

X ——井位设备和表层套管的费用（两类井一样），\$；

Y ——每口井钻至 6570ft 水平井的造斜点的费用，\$；

Z_v ——垂直井从造斜点深度至完钻井深（即井段长 1430ft）的费用，\$；

TV ——垂直井的费用，\$；

$CHCF$ ——在水平井造斜点以后井段的每英尺费用系数；

Z_h ——从造斜点到弯曲段终点的费用，\$；

BUR ——造斜率 $= 4^\circ / 100\text{ft}$ ；

THV ——水平井钻达跟垂直井同样的垂深时的费用（造斜完毕），\$；

$CREOB$ ——水平井造斜完毕的费用与垂直井总费用的比率；

I_c ——从造斜点到目的层垂直井深费用增值，\$；

CLS ——水平井段的费用，\$；

TH ——整口水平井的费用，\$；

CR ——两口井之间总费用的比率。

根据经验假定： $CF = \$ 30 / \text{ft}$ ， $CHCF = \$ 56 / \text{ft}$ ， $X = \$ 80000$ ， $Y = \$ 182000$ 。

所以垂直井的费用为：

$$TV = X + Y + Z_v = X + Y + (1430 \times CF)$$

$$= 80000 + 182000 + 1430 \times 30$$

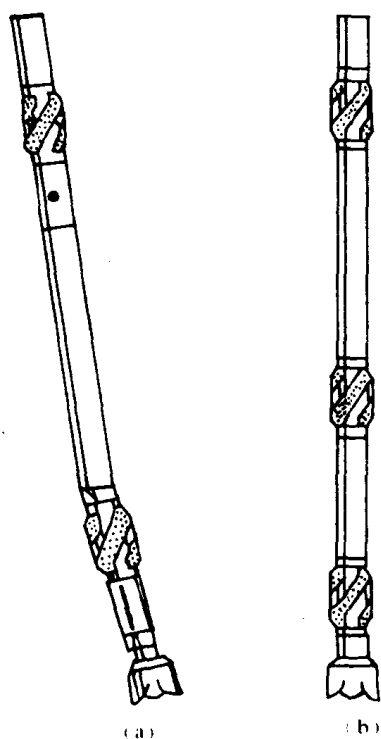


图 1-10 长半径造斜方法
(a) 典型马达外型；(b) 造斜旋转系统

$$= \$ 304900$$

$$Z_h = CHCF \times \frac{1}{2} \pi \times \text{曲率半径}$$

$$= \frac{\pi}{2} \times \frac{180 \times 100}{BUR \times \pi} \times CHCF$$

$$= \frac{9000 \times CHCF}{4} = 2250 \times CHCF = 2250 \times 56$$

$$= \$ 126000$$

$$THV = X + Y + Z_h = 80000 + 182000 + 126000 = \$ 388000$$

$$T_c = Z_h - Z_v = 2250 \times 56 - 1430 \times 30 = \$ 83100$$

$$CREOB = \frac{THV}{TV} = \frac{388000}{304900} = 1.27$$

这就是说水平井到增斜终了时，其费用比垂直井高 27%。

水平井水平段的费用 $CLS = 3000 \times 56 = \$ 168000$

则水平井的总费用为： $TH = THV + CLS = 388000 + 168000 = \$ 556000$

两口井的总费用比为： $CR = \frac{556000}{304700} = 1.27$

也就是说，这一口水平井的总费用比垂直井高出 82%。

从另一方面讲，如果在垂直井中所钻穿的油层厚度为 20ft，那么其每英尺的油层费用为： $304900 \div 20 = \$ 15245 / \text{ft}$ 。

同样，假设水平井的 3000ft 长的水平段都在产油层，那么，其每英尺产油层费用为 $556000 \div 3000 = \$ 185 / \text{ft}$ 。

两种费用相差悬殊，这就是水平井的优越之所在，两种井的简单费用比较见图 1-11。

2. 中半径水平钻井系统

从广义上讲，这一钻井系统的水平井眼是根据 API 对钻柱的弯曲和扭转的复合应力所给出的极限值，进行有效钻井作业的。经实践，最大的实际狗腿严重度在旋转钻方式中为 $20^\circ / 100\text{ft}$ ，在定向钻方式中可达 $30^\circ / 100\text{ft}$ 。井眼与工具之间的间隙以及下套管等因素也可能影响这些极限。

中半径水平井系统的适用范围很大，而且已经在北海、墨西哥湾、洛杉矶和阿拉斯加的北部的作业中取得了巨大的成功。图 1-12 是中半径水平井应用图示。

虽然油层的自然性质对于中半径水平井系统的适用性有着某些影响，但是比长半径系统少多了。尽管钻井液的漏失使得作业复杂化，但钻裂缝性油层的最经济方法在目前来说还是首推中半径水平井。

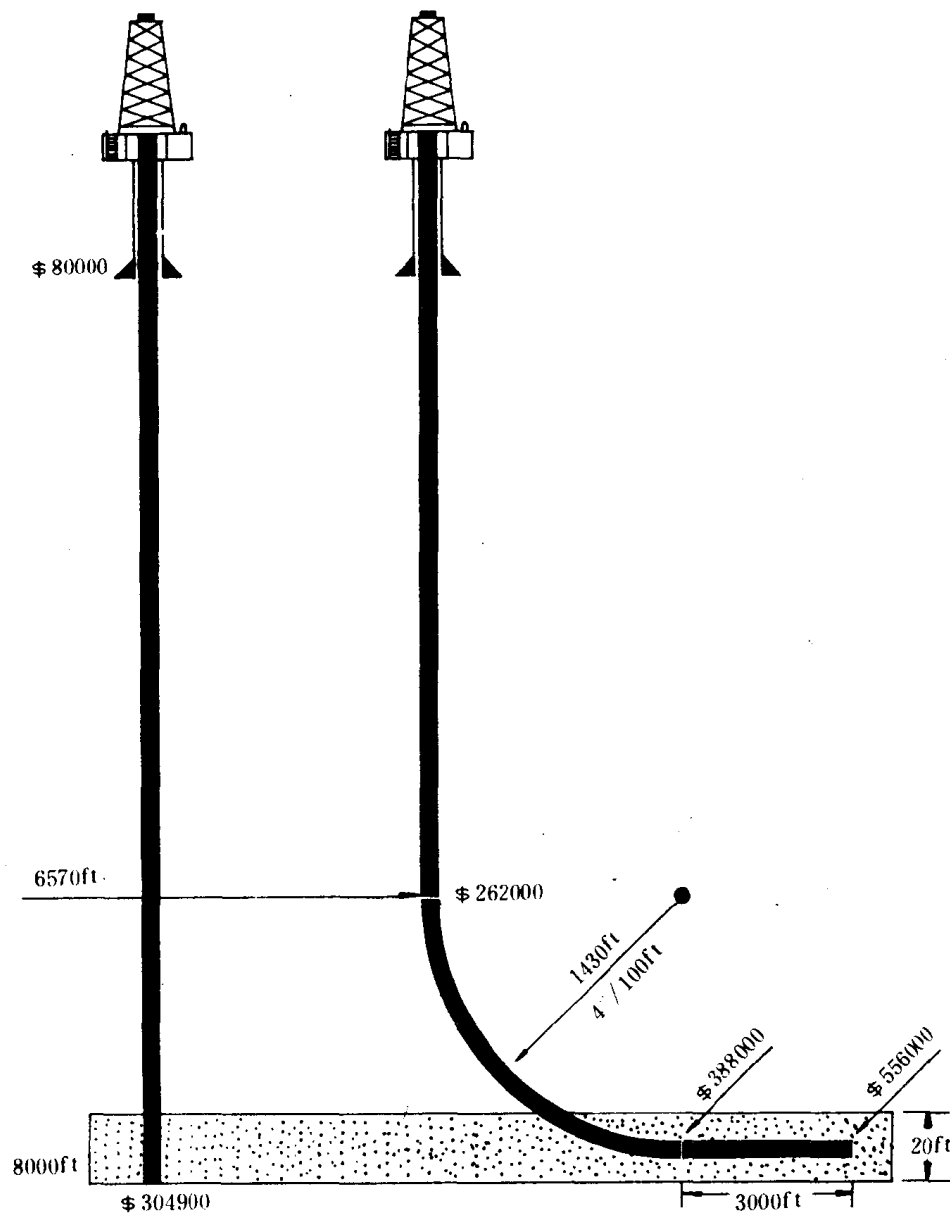


图 1-11 垂直井与长半径水平井的费用比较小结

垂直井钻开产层长度为 20ft，每英尺产层费用为 \$ 15245.0；长曲率半径水平井钻开产层长度为 3000ft，每英尺产层费用为 \$ 185.0

中半径弯曲井段所需要的垂直深度比长半径系统的深度要小得多，这也是该系统的最显著优点。中半径水平井剖面表明其所需租用面积要比长曲率半径水平井小。普通中半径水平井的弯曲井段的水平位移小于 500ft，而普通的长半径水平井却需要 1400ft 以上。换句话说，正常面积的租用区将能够给中半径水平井提供接近 1200ft 长的水平段。可是同样的区域在任何侧向都很难完成长半径水平井的弯曲段，至于水平段那就更管不着了，如图 1-13 所示。

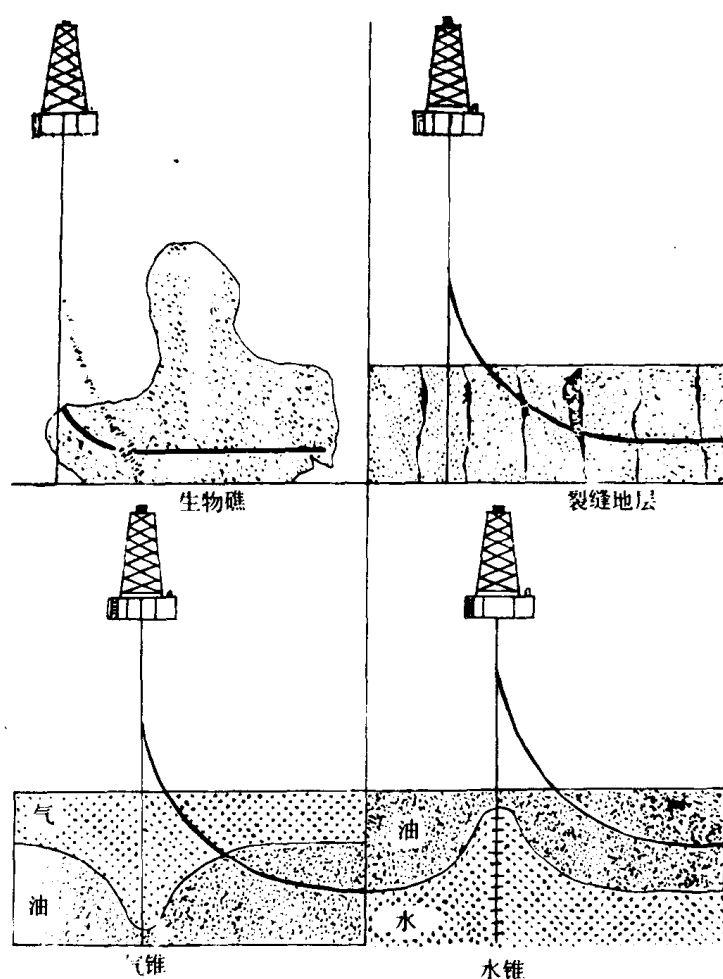


图 1-12 中半径水平井的应用图

许多复杂的井段能够在中曲率半径水平井的直井段顺利通过，并且能在钻弯曲井段和水平井段之前下入套管将其封固，这势必增加下套管井深而多花费用。但是在比较短的弯曲井眼中钻进能够节省时间和减少潜在的井眼复杂情况。

上述分析见图 1-14。

不稳定或复杂的地层使造斜率和垂直目的层的精度产生了不可预测的变化。这一点是决定使用哪种水平钻井技术最关键的影响因素之一。

除此之外，在大多数情况下，造斜点比较靠近目的层，将会降低实际目的层深度的不确定度。在中曲率半径水平井的设计中，针对目的层深度的不确定度，在增斜的弯曲段中加入一段井深调节段，这一段被称为“斜直段”。这一段通常被放在井斜角达 $45^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 之间，其位置安排在钻达靶区总垂直井深的 70~85% 以下。在设计的目的层深度中应该根据地层、油层或其它所要求的因素来改变切线的位置和长度，如图 1-15 所示。

中半径水平钻井的缺点相对地少。但是，由于造斜率比较大，所以接头的弯曲力矩、管串本体的材料应力必须引起工程作业的重视。在比较松软的地层中钻进，中半径水平井的大曲率所造成的侧向力在井壁上产生键槽和可能钻出新眼。无论如何，中半径水平钻井已经得