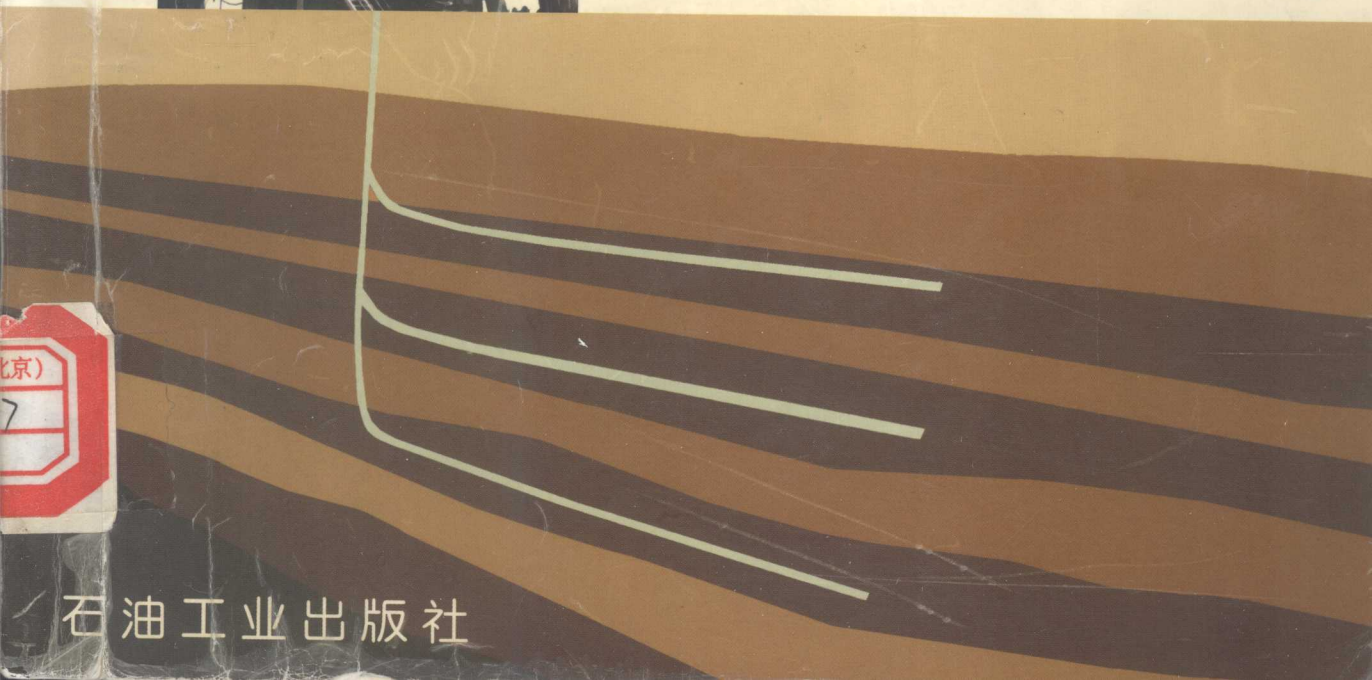
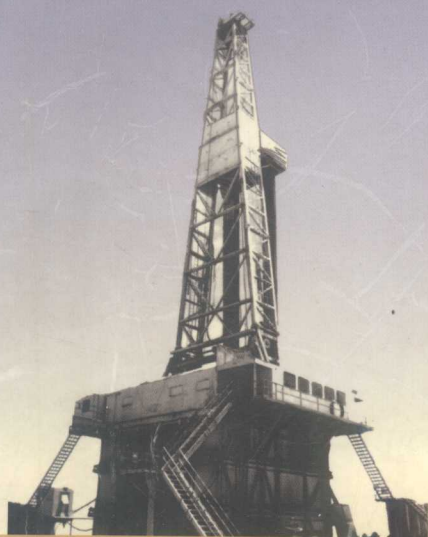


分支井 钻井完井技术

王亚伟 石德勤 王述德 主编



石油工业出版社

157412	157412
TE257	TE257
010	010

分支井钻井完井技术

王亚伟 石德勤 王述德 主编



石油大学 0160683

石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统地阐述了分支井石油工程技术。首先介绍了分支井的概念、类型和发展状况,然后介绍了分支井的设计、钻井工艺技术、钻井液技术、固井工艺技术、完井工艺技术、井控技术、测井与射孔技术、产能预测及分析,最后收录了九篇国外分支井的应用实例。

本书可供油田钻井、完井、井下作业和油田开发设计技术人员应用,也可供石油院校和石油工程技术研究单位参考应用。

图书在版编目(CIP)数据

分支井钻井完井技术/王亚伟等主编.

北京:石油工业出版社,2000.8

ISBN 7-5021-2811-5

I. 分...

II. 王...

III. ①油气钻井一定向钻井,多分支②完井

IV. TE257

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 62012 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

北京密云华都印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 13 印张 330 千字 印 1—1000

2000 年 6 月北京第 1 版 2000 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-2811-5/TE·2199

定价: 26.00 元

前 言

近年来,世界上分支井技术正在迅速发展,很重要的一个原因就是,油田开发的经济要求迫使石油公司必须努力提高每一口井的经济效益,以较低的成本开采更多的石油。分支井技术是适应当前油田开发经济需求的一项重要技术。分支井具有水平井的优点,但成本又比水平井低。分支井的主要优势是可以从一个主井筒中钻成多个相互独立的分支井筒,开采多个储层或多个断块,增大了一口井的泄油面积,同斜井或水平井钻井相比采用分支井来开发油田,可减少所需的井场、平台设施及钻井进尺,显著降低成本、大幅度提高产量、大大提高投资效益。

分支井钻井完井技术的发展过程与水平井很相似。分支井技术与水平井技术之间的主要区别在于,水平井的发展依赖于钻井工艺技术的进步,而分支井的发展主要依赖于完井技术的进步。

分支井钻井完井技术在世界不少国家和地区已广泛采用,主要包括墨西哥湾、美国西海岸、阿拉斯加北坡、拉丁美洲、北海、中东、东南亚、非洲、俄罗斯和意大利等等。尽管世界上已钻了1000多口分支井,但大多数是裸眼完井,目前分支井完井技术中,窗口的机械连接、封隔以及再进入等技术日益发展和完善,并逐渐将分支井技术与水平井技术有效地结合起来,可进一步提高效益。

目前,我国大部分油田已处于中后期开发,开发难度越来越大,又由于近年来海上钻井数量逐渐增多,技术发展迅速,因此分支井钻井完井技术具有广泛的应用前景。为了发展我国的分支井技术,我们综合了大量的国内外分支井钻井完井技术资料,编写成书,本书可供从事油田钻井、完井、井下作业和油田开发设计工作的技术人员应用,也可供石油院校和石油工程技术研究单位参考应用。

本书的编写是在大庆石油管理局王亚伟同志的主持下,由王述德、毕雪亮、赵俊平、孙超四位同志编写前九章的初稿,闫铁负责初审。实例部分由罗卓辉、张建伟,王晶玫、王燕华四位同志翻译提供,徐云英审校。全书经王亚伟、石德勤、王述德整理补充,由张显军校核完成。大庆石油管理局严世才同志、中国石油天然气集团公司信息研究所徐云英同志审阅了全书。本书在成稿过程中参考和引用了很多专家的文献资料,在此一并表示感谢。

由于我们的水平有限,在编写过程中难免还存在错漏或不妥之处,敬请读者批评指正。

编者

2000年6月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 分支井的定义	(1)
第二节 分支井的类型及应用范围	(1)
第三节 分支井的状况及发展趋势	(5)
第二章 分支井设计	(10)
第一节 分支井的设计原则	(10)
第二节 分支井的轨道设计	(12)
第三章 分支井钻井工艺技术	(19)
第一节 分支井的侧钻方法	(19)
第二节 分支井的造斜手段	(21)
第三节 分支井的钻井系统	(23)
第四节 用新型电磁测斜—测距法钻平行水平双井	(27)
第四章 分支井钻井液	(32)
第一节 分支井钻井对钻井液性能的要求	(32)
第二节 分支井钻井与钻井液相关的问题	(34)
第三节 井眼稳定性分析	(38)
第四节 钻井液体系	(41)
第五章 分支井固井技术	(47)
第一节 分支井固井的关键技术	(47)
第二节 衬管固井作业	(52)
第三节 乳胶水泥用于分支井固井	(58)
第六章 分支井完井技术	(62)
第一节 分支井的完井要求及完井类型	(62)
第二节 分支井完井系统及密封控制	(72)
第三节 含硫气井的双分支井完井设计	(79)
第七章 分支井井控技术	(83)
第一节 分支井井控的一般方法	(83)
第二节 欠平衡条件下微环空分支井钻井	(88)
第八章 分支井测井与射孔	(91)
第一节 分支水平井测井技术	(91)
第二节 分支水平井射孔技术	(103)
第三节 分支井测井与射孔	(109)
第九章 分支水平井产能预测及其分析	(113)
第一节 分支水平井产能公式	(113)
第二节 分支水平井产能分析	(116)
第三节 分支水平井的管理	(118)
实例一 德克萨斯州奥斯汀白垩岩钻双分支井的计划和作业	(120)

实例二	俄克拉荷马州钻双分支井的作业经验.....	(130)
实例三	Forties 油田多分支井的设计、计划、实施和管理	(135)
实例四	在致密砂岩气藏中钻分支井提高气田的采收率.....	(147)
实例五	东南亚地区第一口三分支水平井的规划设计.....	(160)
实例六	马来西亚用分支井技术加密钻井开发工程.....	(166)
实例七	卡塔尔北部的埃蒂萨吉油田采用多分支井钻井技术.....	(175)
实例八	委内瑞拉为重油开采设计最优的分支井结构.....	(186)
实例九	加利福尼亚东威明顿油田一口多分支井失败的原因.....	(194)
附录	单位换算表.....	(199)
参考文献	.....	(200)

(91)	.....	本章
(91)	.....	第一章
(19)	.....	第二章
(23)	.....	第三章
(25)	.....	第四章
(32)	.....	第四章
(33)	.....	第一章
(34)	.....	第二章
(38)	.....	第三章
(41)	.....	第四章
(44)	.....	第五章
(47)	.....	第一章
(52)	.....	第二章
(58)	.....	第三章
(62)	.....	第六章
(65)	.....	第一章
(75)	.....	第二章
(79)	.....	第三章
(83)	.....	第十章
(83)	.....	第一章
(88)	.....	第二章
(91)	.....	第八章
(91)	.....	第一章
(103)	.....	第二章
(109)	.....	第三章
(113)	.....	第六章
(113)	.....	第一章
(118)	.....	第二章
(118)	.....	第三章
(120)	.....	一章

第一章 绪 论

第一节 分支井的定义

所谓分支井，就是从一个主井筒中侧钻出两个或两个以上的分支井筒的井。

根据 Superry-Sun 公司的观点，对分支井的一种定义是：为了维持和提高产量侧钻出许多分支井进入油藏的钻井。然而，人们关心的只是分支钻井的一种特殊区域，即为提高泄油面积把水平井侧钻多次，而把分支井定义为“从单一水平井或近水平井筒中钻出多个水平分支井的钻井”。

对分支井的定义，我们认为应将其范围有所扩大。多年来，人们以多种方式钻了多口分支井。分支井可从直井开始分支或从近直井、定向井、水平井中开始分支；分支井可从新钻一口井开始，也可从老井中侧钻；分支井的分支数目可为两个，也可为多个。

近十余年来，水平井技术得到了很大发展，并日趋成熟，广泛地应用于提高油气开采量。今天，人们已经认识到，从单个井筒中钻多个井筒，特别是水平井筒，能够大幅度提高油气开采效率和最大限度地降低费用，使得分支井技术得到了应用和发展。而主井筒可以是直井、定向井，也可以是水平井。主井筒是直井的分支井，在相同或不同深度上放射状分布，相当于多口定向井或水平井，可有效开采单层或多层段的油气藏；而主井筒是水平井的分支井，在同一水平井筒内侧钻出若干井斜在 $90^{\circ}\sim 150^{\circ}$ 的逆斜分支井筒，呈梳齿状分布，则更大程度地提高了油藏的裸露程度，增加了油藏的泄油面积，能进一步提高原油产量和采收率。

第二节 分支井的类型及应用范围

一、分支井的类型

分支井按造斜半径划分为四类：

- ①长半径分支井；
- ②中半径分支井；
- ③短半径分支井；
- ④超短半径分支井。

以上四类分支井，短半径分支井应用最广泛。

分支井按井眼轨迹划分为四类：

- ①主井筒为直井的双分支井；
- ②主井筒为直井的三分支井；
- ③主井筒为水平井的三分支井；
- ④主井筒为水平井的梳齿状分支井。

主井筒为直井的双分支井有两个分支，分别开发两个不同的产层，两个井筒分别是直井和定向井。主井筒为直井的三分支井，主井筒以下又有两个分支。主井筒为水平井的三分支

井，三个分支在主井筒同侧，分别开发三个层位。主井筒为水平井的梳齿状分支井，主井筒为水平井，各分支呈梳齿状或逆斜分布。

二、分支井的应用范围及特点

1. 分支井与水平井

近几年来，世界油井作业面临着在降低成本的同时如何生产更多油气的挑战，水平井技术的出现为达到这些目的提供了一种手段，它使一些用其他方法开采很不经济的油田可以进一步开发。事实上在许多情况下，对现有油田应用水平井技术已大大提高了投资回报率。当然，水平井的应用不仅限于直接增加产量，而且还与油藏管理和减少水气锥的形成相关。

从发展过程看，水平井并不是一项新概念，只是在近十年才得到广泛的认同。当今，水平井的发展趋势是采用长、中半径剖面相结合的方法来更好地开采油藏，特别在北海地区更是如此。造斜率高的短半径技术也有其使用场合，特别是美国、加拿大和远东的一些陆地浅油田。最近英国陆上钻井经验也表明高造斜率短半径技术有经济吸引力，超短半径水射流系统一开始在美国有成功的报道，但直到最近才得到承认。因此，很明显，在考虑采用水平井开发油藏时，油井作业者现已有许多方案，采用分支井技术，则把这些方案更推进一步以提高单井的泄油面积。

水平井的成功应用和发展获得了极大的收益，井眼与大规模的油藏面积相接触，显著提高了泄油能力。但是水平井的地理适用性并不象最初想象的那样通用。地层的特征如各层的孔隙度、页岩屏障等限制了垂向渗透率，在简单的水平井中不能顺利地渗流液体。

同时，另一个严重的问题是在长的水平井中存在水位降低现象，这会制约长的水平井的液体渗流。生产测井表明：仅有40%~60%的长水平井能持续生产，因此，较大位移水平井不能持续地提高油层的渗透率，也不能提供持续的高生产率。

分支钻井与完井的发展与演化过程，在石油技术史上与水平井技术发展过程非常类似。作业商与服务公司一同促进了水平井技术的发展，采用同样的方法，随着分支井技术的发展，会优化产量，在油藏寿命期内降低每桶原油的成本。对于分支井完井技术中余下的主要难题，就是把钻井与完井技术结合起来，从而使作业者在维持对单口井控制的同时，能够采取一些干预措施。水平井与分支井之间的主要区别，在于水平井是由钻井技术驱使，而分支井除考虑钻井技术外则由完井技术驱使。

目前，分支井钻井完井技术的进步允许选择最佳的油井剖面 and 地层的几何钻入点。选择这些经济的技术可以使渗透性大幅度提高，并可以改善自然裂缝的方位，降低产水率。

所应用的技术需要预先周密的计划，目前多数油田开发方案中在计划中提供了高度的灵活性。分支井技术为开发油田提供了全新的途径。

尽管世界范围内已钻了许多分支井，但是，它首要的适用性只限于裸眼完井及数量极少的勘探井。这是由于套管系统和复杂的完井系统的限制。随着技术的进步，出现了可供选择的定向钻井、侧向下套管及完井系统，在油藏管理方面也可提供极大的灵活性。

2. 分支井的应用范围

分支井的根本特性就是钻井过程中风险增加，并要求更多的投资。增加风险包括可能由于钻井问题而造成井眼丢失或损坏，分支井筒不产油也是非常可能的，由此在设计预期的时间内不能收回成本，这种情况特别发生在需增产措施才能达到最佳生产水平的油藏，然而应当记住的是，井眼的大部分成本都花费在钻到生产套管鞋之前，其增加额外水平井段而引起

的成本增量并不象起先想象的那么大。尽管这种方法初始成本较高，然而钻分支井的主要原因就是通过改善油藏的泄油特性来提高投资利用率。经验表明，如果设计周密，其风险性并不比在同一油藏中钻常规水平井风险性高。

分支井的目的是：强化采油、提高钻井效率、提高采收率（尤其是枯竭层）、转移开采层位。

分支井可应用于多种油藏条件。

(1) 小厚度（薄层）的产层、油藏面积小或分隔性油藏。如果对油藏的认识比较充分，就可从一个主井筒中采割多个油块，这比对各个油藏块分别钻垂直井更经济。

(2) 低渗透率非均质地层。

(3) 开发裂缝性油藏以及在形成强烈的水锥、气锥条件下的底水储油藏和海上油田；比如，分支井可应用于有效开发“阁楼油”。

(4) 可以应用于高粘度油藏和水淹层、自然沥青油藏。

(5) 尤其对于多层油藏，夹层为致密岩层，垂直渗透率极低，且各小层非常薄，可采用分支井的方式，侧钻出一系列的泄油井筒，各分支井筒相互平行，形成一簇井筒，可大幅度提高采油速度。

(6) 分支井可有效地驱替一个单独的油层和多个油层，在单独油层中能极大地增加地层的裸露程度及驱油面积，在裂缝性油藏中能增加切割和驱排不同裂缝系统的概率。

(7) 分支井可以横切透镜体油藏。产层呈透镜体形状，单口直井或水平井可穿过多个透镜体，利用分支井技术，可从一个主井筒开发很多个透镜体油层。

(8) 经仔细计划的侧向分支井可以在具有很强的导向的油藏中提高勘探搜索服务（即探寻单一方向上的天然裂缝和高渗透层），在这种条件下，经过认真设计，可提高采收率。

(9) 可用于水驱的注入井，完善压力控制。可将原先已完成的井作为注入井，新钻的分支井作为生产井，或者采用相反的方式。如果将分支井作为注入井，可以优化压力控制，并提高波及效率。

对油藏进行水驱时，低产层被波及前高产层见水。可以在每个注入区钻一个分支，并根据每一层的地层性质调整分支的长度。这样，通过水平注入井对水平生产井驱油，可产生直线驱动，而不是径向驱油模式。

(10) 油藏具有两种天然裂缝形式，一口水平井只能与其中一个方向正交。采用相互交叉的分支井筒，这种正交方式可提高驱替效率。

(11) 进行海上钻井时，一个海上平台被设计成钻一定数目的井，但在起初的完井方式条件下，还有其它油块未被有效驱替。如果在已钻井上设计分支井，则可以开发其它油块而不需占用新的平台。

以下介绍分支井技术的典型应用。

分支井主要应用于老井侧钻，以开发因水锥等原因造成的死油区和最上部射孔段以上油层中的“阁楼油”。这类分支井井眼较短，大部分是尾管和裸眼完井，一般为砂岩油藏。前苏联的哈得仁地区和近几年我国东部油田侧钻的大量分支井都属于这种类型。在前苏联的哈得仁地区已侧钻 781 个井眼。钻到死油区的新井眼井底距老井眼 80~150m。这些新侧钻的分支井产量较高，甚至能自喷生产。该地区钻一口新井的成本是 16~18 万卢布，而侧钻一口井的成本仅为 4 万卢布。

分支井在坚固的灰岩地层中的应用最多，80 年代中后期，美国在德克萨斯州 Austin 灰岩

层开始钻分支井,其目的是使分支井眼与天然裂缝交叉,以便尽可能增加油气层裸露面积,提高油气产量。这类分支井一般是短半径分支水平井,裸眼或筛管完井。Texaco 公司在东得克萨斯州奥斯汀白垩岩层钻了一口创当时纪录的双分支水平井,两个水平分支总长 2875m。90 年代初, Torch 能源公司在该地区试图钻一口水平段长 1585m 的水平井,因考虑到井眼垮塌等问题,决定钻 2 个水平段长 792.5m、夹角 180° 的双分支水平井眼,下衬管完井。由此开始了该地区钻分支井的高潮。

为了减少海上钻井井口设备及隔水管的数量,减小钻井和采油平台的面积,降低昂贵的平台费用,提高油气产量,分支井在海上油气田勘探开发中被迅速推广应用。Unocal 公司在加利福尼亚海上钻成的 B34 三分支水平井,耗资 200 万美元,而钻三口常规水平井需耗资 300 万美元。该公司认为,如果三分支技术早点研制出来,只要两座钻井平台而不是四座钻井平台就可以开发 Dos Cuadras 海上油田。Unocal 公司在加利福尼亚海上所钻的 4 口三分支井平均产油量是 123m³/d,而 35 口直井平均产油量为 7.9m³/d。

分支井技术对于开发多个小块状或透镜体油气层、薄油气层、低压低渗透以及高粘度稠油具有特别重要的意义,使许多在经济开采限以下的储量得以开发。俄罗斯应用分支井技术开发稠油藏时,将水平主井筒钻到产层下部,再向上钻出分支井筒,进行重力驱油。

1996 年, Ehlig Economides 等提出一种分支井技术革新方案,即从水平井筒中钻多个垂直分支井筒并用水力压裂这些井眼。水平主井筒可钻在上部的坚硬地层,以解决井眼稳定问题。这类水平井可用于水平横向裂缝构造的非坚固低渗透产层。

从近几年发展的情况看,随着分支井技术的不断完善及井下工具的不断开发,分支井适用范围更趋广泛,几乎可用于开发所有的油气藏。

3. 分支井的优点

分支井的主要目的就是以较少的投资改善井的生产能力和采收率,优点如下:

- ①具有接触更大油藏面积的能力,因而能由单一井眼控制更大的采油面积;
- ②具有一个以上水平段采油的能力或有效开发多层油藏的能力;
- ③可以防止锥进效应;
- ④使用较少的垂直井眼开发不规则形状油田,占地面积较小;
- ⑤降低接触油藏井眼单位长度的钻井成本;
- ⑥分支井可通过多个分支长度的总和达到指定的水平段长度;
- ⑦可减少诸如举升等井下设备的投资;
- ⑧减少地面油池的数量,因而也就减少了对环境的污染;
- ⑨具有多分支方向找到油藏边界极限的能力;
- ⑩直井的开采系数不超过 50%,而分支水平井可达 60%~80%。

从工程方面讲,分支井可以节省井场占地、钻机搬迁安装、主井筒的重复钻进和下套管、废弃钻井液及岩屑处理等费用,还可以降低地面采油和集输设备、海上钻井平台、隔水管、井口等材料成本及减少钻井和采油平台的费用等。

分支井技术是一项很有前途的钻井完井新技术,它的应用和发展必将给油气田的开发带来显著的经济效益和社会效益。分支井体系可通过以下途径降低油田开发成本:

- ①每口井有多个油层暴露进行开发,从而提高了每口井的产量;
- ②减少钻达一定数目的目的层所需要的场地,减小了平台面积、重量、成本和地面固定点;

③降低了每钻开单位长度油层所需的总进尺，从而降低了钻进时间和成本；
④由于所钻的多个侧向井眼共用一个母井眼，所以降低了钻屑和钻井液处理成本以及表层和中间套管的成本。

由于以上几方面可显著降低成本，所以含油边缘区、油层尖灭区或孤立油藏、透镜体油藏、垂向被隔离的薄砂层及阁楼油聚集带等处的可开采油藏的经济可行性大大提高，也反映了油藏条件、钻井技术和经济效益的统一性。

4. 分支井的缺点

(1) 分支井的缺点主要是方法本身的复杂性，不论井如何设计，它的分支井段越多，其复杂程度也就越高。

(2) 由于已有的套管结构的内径限制了工具的尺寸，就增加了作业的难度。

(3) 在钻出套管处存在裸眼井段。虽然可以通过在出套管处安放一个套管外封隔器来减少这段裸眼井段的长度，但总有一小段井段成为剩余裸眼井段。

(4) 虽然分支井的大部分驱动力是创设连接技术，但分支井筒的优化布置和保持也是十分重要的。钻井技术的发展，应使之在计划适当、选择合适和施工合理下，保证分支井筒的布置与油层保护不出问题。

(5) 分支井的一个最具有吸引力的地方就是它可以开采薄油层。因此，保证井底钻具组合在油藏区域内极为关键。把随钻测量系统的传感器与导向泥浆马达结合起来，以便使这些工具能够进行地质导向定位，并使它尽可能靠近钻头，这是完成这一目标的关键。在水平井中，钻进时常使用地层评估传感器和定向数据，以便保持钻具组合的地质位置，并导向进入目标区，指示油藏边界，且能够预测钻具组合何时从油藏中出来。

(6) 分支井能否成功，由油井产量和所获得的经济效益来评价。钻进分支井筒时保护油藏不受损害是一个很重要的问题。因为油藏暴露时间是在增加的，钻进时使用的钻井液有可能使油藏不受损坏，这可以通过开发一个易于除掉泥饼的钻井液体系，从而达到保护产层的目的。

保证分支井不断成功的关键，就是能够让所有参与分析、全面质量管理、与工程设计的有关人员联合攻关、共同合作。例如，计划和施工就应由多学科组人员协调执行。这些多学科包括作业工程师、地质学家、石油物理学家，以及服务公司的专家等。分支井的设计必须在了解地质、油藏、钻井和完井信息的基础上进行，而最终决定在什么地方钻分支井、什么时候钻分支井、为什么钻分支井，以及如何钻分支井等，则必须尽可能认真地研究，以期获得最大可能的成功。

在分支井开发的每一阶段，对于每一项新的工作，作业商和服务合同商都应该吸取经验，并应用于改进这一技术中去，并为下次作业进行培训。这一思路就是作业商们在分支井作业中接受的一个有利办法，即从简单的井身剖面开始。这样做可能开始时风险大一些，等到慢慢过渡到更为复杂的完井作业时，风险反而会变小。

第三节 分支井的状况及发展趋势

一、分支井的发展状况

分支井的理论早在 20 世纪初就出现了，第一批分支井是本世纪 40 年代后期或 50 年代初

期钻成的，但在一开始，这项技术发展缓慢。自1992年以来，由于定向井和水平井钻井技术的进展，使这种油藏开发方法具有更强的可行性。人们对分支井完井技术越来越感兴趣，它能大大提高油田开发的经济效益。很多采油公司和服务公司开始试验分支井，其技术才得以迅速发展。

1. 前苏联的分支井技术

在50年代初，前苏联就开始分支井专业技术和工艺的研究。1952年，在巴什基里亚·卡尔塔什夫油田成功地进行了第一批试验。在65/45井，一些井段的井底之间的距离达300m，几乎是直接穿透产油层的80%。曾用涡轮钻具钻成一口十翼分支井，其典型做法是先将垂直井打到产层之上，而后使用涡轮钻或电动钻钻5个或6个倾斜成水平的分支井，使之在油层中延伸60~300m。每口分支井的钻井成本是一口直井成本的1.3~1.8倍，油气产量最高增加17倍。

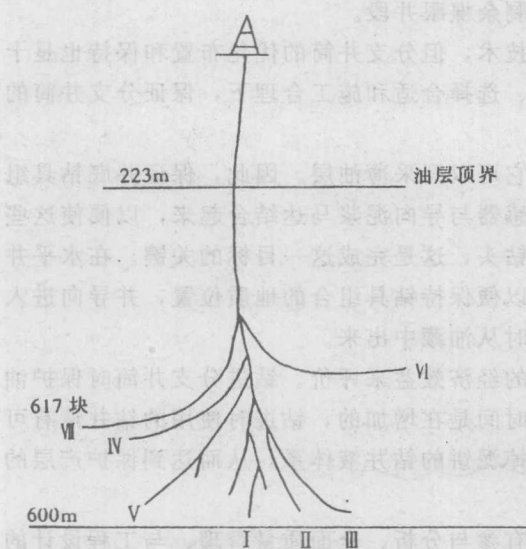


图 1-1 伊申拜 66/77 井井身剖面图

前苏联的国立西伯利亚大学打了第一口侧钻井。1953年在伊申拜地区成功地完成了一口有10个分支井筒的分支井——伊申拜66/77井。该井的主井筒井深605m，以后逐渐上提侧了9个分支井筒，总延伸1993m，其中有1760m穿过生产层，井底之间最大距离是322m，最大水平位移是168m。有4个分支为水平井，其中一个水平分支井筒在10m厚的油层中穿过60m，最大井斜104°。该井的剖面曾在第四届国际石油会议上公开发表，如图1-1所示。

1959~1961年，前苏联利用分支井进行了油田开发的水力学研究，建立了这种井的渗透和开采可能性评估的理论基础。当时确认，水平井和分支井可大大增加采油量和在各种开采条件下注入井的可用性，而在采用这种方式的条件下，可真正减少井的数量。

当时的研究表明，稳定的水平井和分支井的初始产量超过竖直井初始产量的1.5~15.5倍，后期产量超过直井的1.2~6.8倍。在弱胶结和松散储层油藏，分支井的最终产量相当于或甚至低于竖直井的水平。

当时，水平井和分支井效率低的主要原因是：

- ① 钻井时，油层井底附近堵塞；
- ② 水平井和分支井井段对油层命中的不准确；
- ③ 在钻井和开采过程中缩短了井段；
- ④ 由于缺乏命中产油层的可靠方法，井段控制不好；
- ⑤ 缺乏交叉区域的严密性和为选择有效油层而划分井段的可靠性；
- ⑥ 缺乏水淹区绝缘的方法和手段；
- ⑦ 各种深井抽水设备的免修期短；
- ⑧ 缺乏大修工艺。

同时，这方面的主要不足是缺乏用水平井和分支井开发油田的专门系统。

为了加速建设这样的系统,前苏联制订并批准了“利用水平井和分支井开发油田新原理开发系统及其广泛应用”的综合大纲。1990~1995年在11个试验区和油田推广新的工艺系统,认为最有效地利用水平井和分支井的条件是:

- ①厚度小的产油层;
- ②低渗透和非均质油层;
- ③垂向裂缝系统发达的油层;
- ④有底水的油气藏;
- ⑤大陆架区域的油藏(减少海上平台的必要数量);
- ⑥粘性和高粘性油藏和天然沥青矿藏。

截止到1990年,前苏联共钻111口分支井(其中开发井57口、探井36口、救险井8口、注入井10口),在这些井中,共有329个倾斜成水平的分支,它们在油层中总长度为175260m。分支井主要分布在巴什基尔、克拉斯诺达尔边部、乌克兰、古比雪夫、鞑靼、斯达夫洛波兰斯克和乌兹别克斯坦。

1992年,在科米共和国,科米石油生产联合体与柏朝拉石油设计院、北方天然气公司、全苏油气工业经济管理研究所等单位共同合作,确定了钻多底井开发油田的方案。在亚列格油田拉也尔区块,有两个生产层。按上方案,每层布置3口分支井,每口这样的井可代替13口直井。

在亚列格1号分支井的钻井过程中,试验了导向钻井工艺和13种钻具组合,其中包括带螺杆造斜器的钻具组合、马达传动轴之间带有弯角的钻具组合、铰接的转盘钻具组合、带柔性件的钻具组合等,平均造斜率达 $7^{\circ}/10\text{m}$,局部井眼造斜率达 $18.2^{\circ}/10\text{m}$,曲率半径为33m。一口这样的井可代替13口直井。

此外,前苏联已从事侧钻分支井开发油田的液体动力学研究几十年,建立了分支井的渗透性理论和产能评价理论,还研究了多底井的井壁稳定问题。

2. 美国的分支井技术

美国马拉松石油公司和贝克·休斯公司联合开发了一种用于分支井的注水泥尾管完井的井下系统。该系统利用一个定向短节将钻井工具引入适当井眼。第一个分支井筒钻成后测井,下尾管固井。然后将定向短节旋转 180° 朝相反方向钻第二个分支井筒,完钻测井后下尾管固井。两个分支井筒作为独立的井眼,用一个带分流心轴悬挂器的专用井口装置分别通过一个生产管柱。1993年在美国怀俄明州的Garland油田两口井上成功地试用了该系统。这种双分流系统能使海上钻井费用减少 $10\%\sim 20\%$,而且还不包括因减小钻井平台而节省的费用。

Bechtel公司采用超短半径分支水平井技术取得了显著的经济效益,该技术采用高压水力射流破岩形成水平井眼。到1987年已在加利福尼亚和洛杉矶油田钻成径向分支井600余口,井眼直径 $\Phi 101.6\text{mm}$,水平段长 $30\sim 60\text{m}$,能在一口直井的同一深度向四周钻出24个辐射状分支井,在未胶结的浅地层钻4个分支井筒一般不超过60h。

超短半径分支水平井钻井设备和工具包括:地面设备主要有一台输出功率为1176kW、额定压力为84.4MPa的压裂泵,一台常规修井机,一台盘管车和地面测量仪器;井下工具主要有水力破岩钻头、ERW钻管、扩眼器、斜向器及高压导引和控制机构等,并配有专门的测斜仪和射孔器等。

目前,在美国德克萨斯州南部,分支井已较普及,这项技术已使奥斯汀白垩层等产层的经济效益得到提高。1994年,加利福尼亚州联合石油公司在近海Dos Cuadras油田钻了五口三

翼分支井，井都已投产，每口井的平均钻井完井成本是同地区一口水平井的两倍，其日产量也相应提高至少 1~1.5 倍。

3. 法国的分支井技术

法国 ELF Aquitaine 公司开发出一种井下分支装置，主要部件是一个三孔分眼器（根据需要可以是双孔或多孔），每个孔眼直径为 63.5mm。该分眼器随 $\Phi 244.5$ mm 技术套管一起下入到油层上方某一深度，注水泥时技术套管与其一起封固。再将一种专用连通工具下到分眼器上，对准分支孔眼后，用 $\Phi 139.7$ mm 立管柱将分眼器与地面连通，钻具通过 $\Phi 139.7$ mm 立管柱下入，钻成 $\Phi 63.5$ mm 井眼。然后通过分眼器上方的引导键将连通工具和立管柱转到其它孔眼上，钻成第二和第三个分支井筒，其钻井方法及轨迹控制与常规小井眼类似。钻完分支井筒后，将连通工具和立管柱起出，下入 $\Phi 50.8$ mm 割缝尾管完井，尾管悬挂在 $\Phi 224.5$ mm 技术套管内的分眼器上。最后在 $\Phi 224.5$ mm 技术套管内下入 $\Phi 73$ mm 油管和井下泵，使用一套采油装置同时开采三个分支井眼。1994 年，该装置已成功地在 Alsace 地区的 Eschau 油田钻成一口三分支井（包括一支垂直井和两支近水平井），钻达“大鲕状岩”地层的 792m 处，其成本为周围其它井的 2 倍，每天产油 24m^3 ，其产量却比普通井增加了 5 倍。

4. 加拿大分支井技术

加拿大 Tool Master 公司、壳牌加拿大分公司和 Frac Master 公司合作开发出分支井系统全尺寸样品。1994 年 3 月，壳牌加拿大分公司在 Midale 油田首次用该系统钻成一口对称双分支井（10W2 井），裸眼完井。该系统由永久安装在井内的坐放段、窗口段（带衬管）、定向注水泥段和可回收式斜向器及起下工具组成。

Superry-Sun 钻井服务公司、CS 资源有限公司和 Cardium 工具服务公司联合开发了分支井回接钻井完井系统（LTBS）。该系统由四个相互作用的部分组成：具有可动门和内承压套筒的套管开窗接头、可回收式斜向器、分支井段悬挂器、下送工具安装管柱和关门工具。该系统已成功地钻了 20 多口分支井，是目前较成熟的分支井钻井完井新技术。

5. 英国分支井技术

据 1996 年 11 月《石油与天然气杂志》(OGJ) 报道，英国石油公司已开发出一套用于分支井的井控技术。该公司提出了一套计算最大允许井涌量和井口最大允许压力等井控参数的计算公式，编制出分支井井控设计树，指出了分支井井控与常规直井、定向井和水平井的不同及应该特别注意的问题，给出了分支井井涌控制、井涌检测的方法步骤及关井和压井程序，并进行了一口双分支井井控实例演示。结论认为，分支井井控的主要难点有：应该用所有井眼中最薄弱地层计算井口最大允许压力；应该判断井涌是发生在正在钻进分支井筒中还是在已钻分支井筒中；长井段、小直径、大角度的分支井筒通过产层时，潜在的井涌既剧烈又危险；在分支井中起钻时，抽汲压力要比常规井眼高；当钻柱在正在钻进井筒中而已钻分支井筒中发生井涌时，因为不能很快循环钻井液压井而使井控作业复杂化；在使用预留窗口分支系统时，预留窗口往往是井控的最薄弱点。

我国四川石油管理局川东钻探公司采用液压式和机械式坐挂斜向器完成了多口套管开窗侧钻分支井。胜利油田在 GB21-1 分支井中，应用了 $\Phi 203.2$ mm 可收式接箍触发型斜向器成功地进行了现场实践。

到 1996 年，已经有几百口分支井，其中有 3~4 个侧钻井眼的分支井最为普遍。经过不断推广完善，应用于分支井的钻井技术已经成熟起来，已创造出了水平位移 1676m 和 1829m 直径为 120mm 的双侧钻井眼的记录。在北海钻的双侧钻井眼的水平位移为 1829m，井眼直径

为 152mm。另外,“加长钻进”钻井技术已使 $\Phi 215.9\text{mm}$ 的井眼水平位移达到 5000m,并且记录还在不断刷新。定向组合的造斜能力已从长曲率半径达到 10m 转向 90° 的小曲率半径 ($281^\circ/30\text{m}$)。

截止到 1996 年年中, Halliburton 公司在全世界共钻 122 口分支井, 包括 282 个分支井眼。其中有 4 口四分支井、18 口三分支井和 100 口双分支井, 见表 1-1。

表 1-1 Halliburton 公司分支井分布

阿拉斯加	双分支井	3 口
加利福尼亚	三分支井	5 口
加拿大	三分支井	3 口
	双分支井	4 口
挪威	双分支井	3 口
米里	双分支井	3 口
得克萨斯	四分支井	1 口
	三分支井	9 口
	双分支井	85 口
中东	四分支井	3 口
	三分支井	1 口
	双分支井	2 口

二、分支井的发展趋势

根据分支井目前的应用情况, 石油工作者指出了分支井未来发展的一些特点:

- ①完善的分支井筒的连通性;
- ②主井筒与分支井筒的接点受到的限制以及分支井对水泥封隔的需求;
- ③考虑分支井重钻时钻头的进入;
- ④分支井系统可适应新的对油井通道完井和修井的要求;
- ⑤分支井系统应与钻井液作业保持一致性;
- ⑥必须能对分支井筒全部或部分隔离, 以控制生产流量;
- ⑦系统使用常规的被证实的技术。

第二章 分支井设计

分支井比普通井的工艺更加复杂,其方案设计是否合理关系到各工艺的成败。同时,分支井技术是一项综合性的技术,涉及地质、钻井、完井、采油、修井等,分支井设计的内容也是非常广泛的。

第一节 分支井的设计原则

一、不同油藏的分支方式设计原则

1. 适合开采单一油藏的分支井

对于单一油层,如果钻反向双分支井,一般先钻上倾方向分支。不过如果下倾方向生产潜能较高,则先钻下倾方向分支,这样可以在因为某种原因而无法钻上倾方向分支井时,将产量损失降至最低。

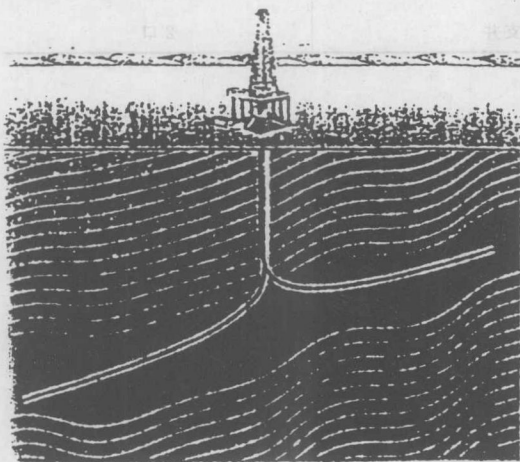


图 2-1 上倾分支和下倾分支

世界上总水平段长度最长的反向双分支井是由 Texaco 公司于 1993 年在 Brookeland 油田钻成的,总水平段长度达 3404m,其中上倾分支长 1636m,下倾方向分支长 1768m。

在德克萨斯州南部,由于租赁区地势复杂,地面井位受到限制,钻上、下倾分支井是开采这一地区最经济、最有效的方法。目的层为裂缝性白垩岩,井眼的直井段钻到目的层的上方,然后下套管,先以大于 90° 井斜沿地层上倾方向钻上倾分支,接着使用与之相同的井底钻具组合裸眼侧钻下倾分支,如图 2-1 所示。

2. 适合于多产层油藏开采的分支井

对于多个油藏的开采,可采用上、中、下分布的多个分支的水平井组,也可采用反向多层分布的分支方式,或在同一直井中把成排的分支钻至不同的生产层,这取决于完井的要求。一般先钻上层分支井,这样可沿井筒低边进行侧钻,工艺较简便。进行侧钻时,可裸眼侧钻出分支,也可套管开窗或通过分支回接窗钻出分支井。若要钻井筒上方的分支井,在要求的套管鞋处下入可回收的套管斜向器,磨铣出窗口,在下一个造斜点重新座放斜向器之前钻该分支,如图 2-2 和图 2-3 所示。

3. 适合于块状油藏的分支井

在杂乱无章地分布着高产层的块状油藏、在纵向裂缝发育的油气藏或在复杂的地质条件下,能否提高原油产量和采收率的决定因素是分支井筒的数量,最好的办法是以众多的分支井筒密集地(相互间隔 30~80m)贯穿生产层整个厚度,如图 2-4。

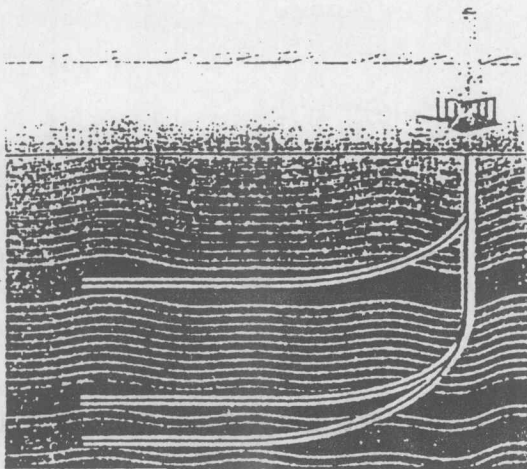


图 2-2 多个油层的开采

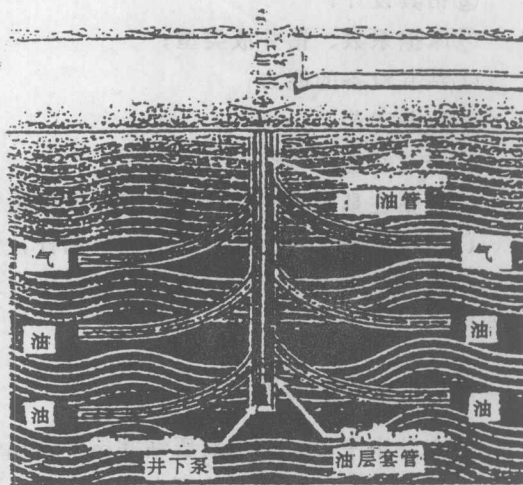


图 2-3 使用分支回接系统开采多个油藏

4. 工程巨大的分支井

随着分支井钻井工艺和技术的完善,分支数量及水平段长度不断增加,一口这样的分支井可以控制大片油藏空间,如图 2-5 所示。

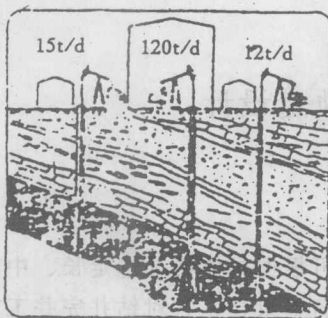


图 2-4 块状油藏内分支井

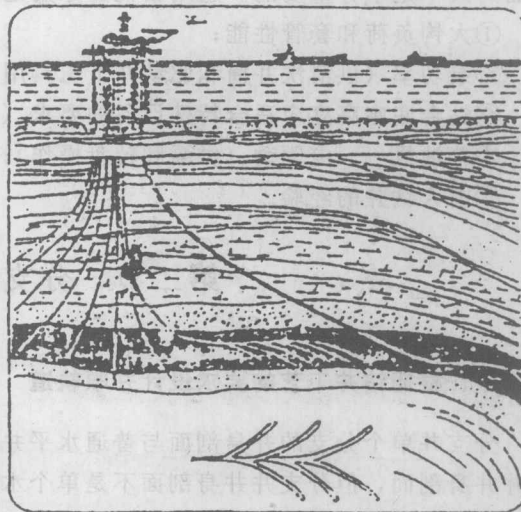


图 2-5 工程巨大的分支井

(图下部所示为分支井筒部分的平面图)

二、钻柱设计原则

(1) 最大限度地降低扭矩和摩阻。

结合普通水平井钻具设计,影响扭矩和阻力限制的因素有以下几点:

①水平段的长度;