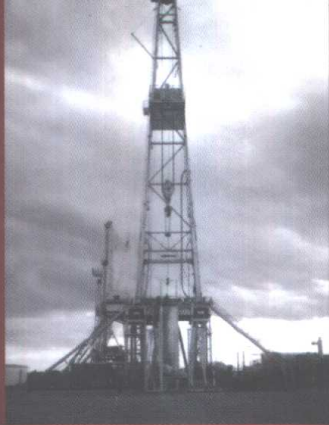
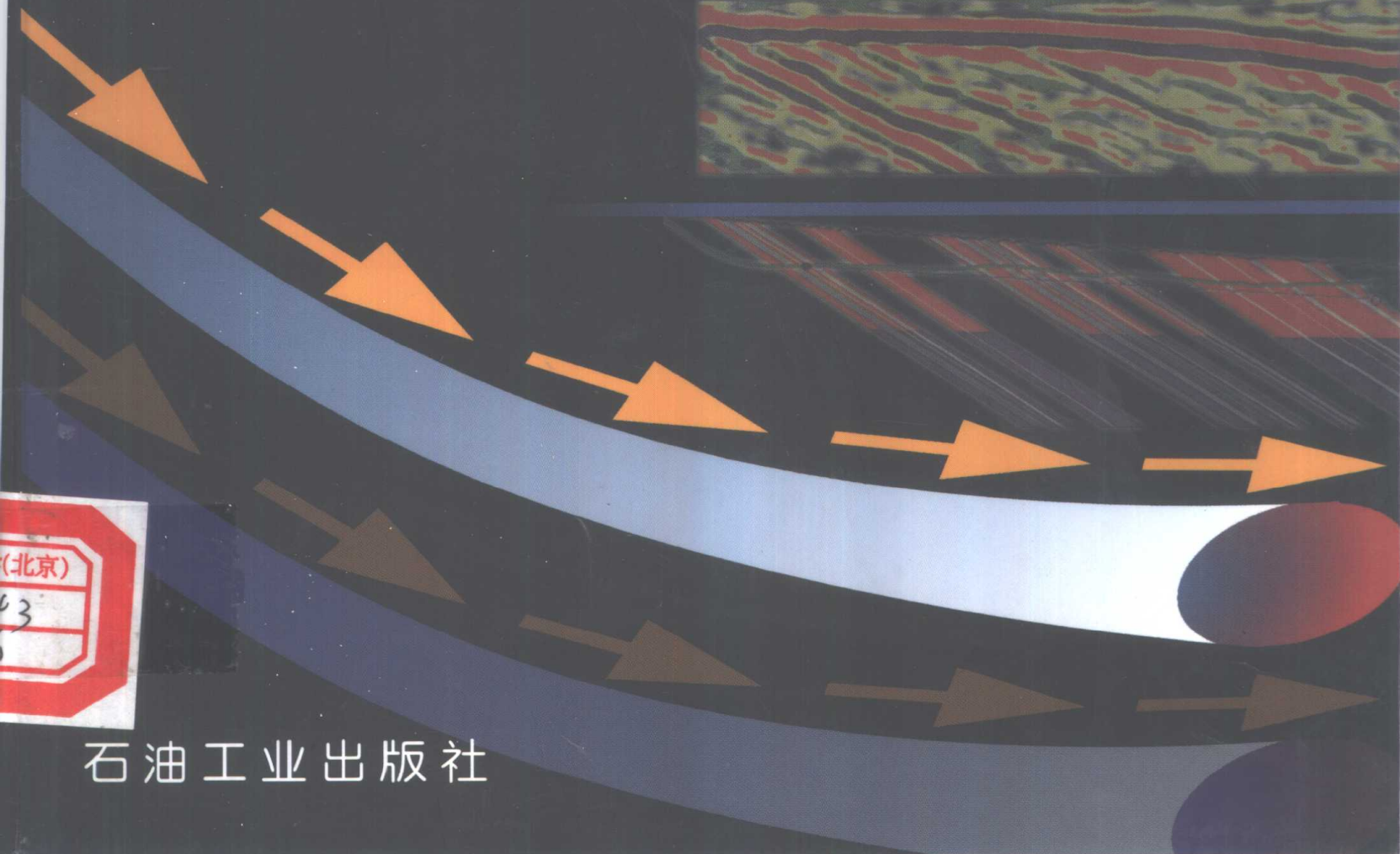




水平井井眼轨道控制

苏义脑 著



石油工业出版社

水平井井眼轨道控制

苏义脑 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是系统介绍水平井轨道控制理论与实用技术的专著,汇集了作者多年来在该方面的创新性研究成果。主要包括:水平井轨道设计基础和轨道控制的基本概念及性质;中、长半径水平井下部钻具组合的大挠度力学分析和组合设计;水平井轨道预测方法;常用的井下工具及其设计方法;中、长半径水平井轨道控制工艺及施工控制实例;短半径水平井的工具设计、力学分析和工艺要点等。

本书在写法上兼顾了理论性和实用性,可供水平井科研人员、现场工程师和机械设计人员、大专院校有关专业师生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

水平井井眼轨道控制/苏义脑著.

北京:石油工业出版社,2000.9

ISBN 7-5021-3077-2

I. 水…

II. 苏…

III. 水平井-控制,轨道

IV. TE243

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 47163 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)

北京施奈德自动化录入排版中心排版

石油工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 16.25 印张 412 千字 印 1—1200

2000 年 9 月北京第 1 版 2000 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3077-2/TE·2358

定价:35.00 元

前 言

被誉为世界石油工业中一项“重大突破”的水平井技术,从 20 世纪 80 年代末至 90 年代初进入了蓬勃发展并日臻完善的阶段。它所带来的巨大经济效益,证明了这一综合性配套技术的明显优势和难以准确估量的内在潜力。

在 1991~1995 五年间,中国石油天然气总公司主持并领导了国家“八五”重点科技攻关项目“石油水平井钻井成套技术研究”。通过参加攻关的 6 个油田、5 个院校共计 762 名科技人员的不懈努力,使我国的水平井钻井技术从近乎空白走入世界先进行列。截止 1996 年底,我国已钻成各种水平井 94 口,并在全国十多个油田以更大的规模推广和发展这项技术。

作者有幸参加了这一国家重大科技项目的攻关,和课题组的同事们一道,负责并从事“水平井井眼轨道控制理论与技术”专题的研究工作。该专题是“石油水平井钻井成套技术”中的关键环节之一。五年中,我们在有关水平井井眼轨道控制技术的理论分析、工具研制、工艺方法探讨和现场科学实验井施工等方面的研究成果,构成了本书的主要内容。从这个意义上讲,本书是该课题组乃至与我们精诚合作的大庆、华北两油田朋友们(包括领导、技术人员和工人同志)共同血汗的结晶。作者执笔把它总结提炼并奉献给钻井界的同行们,期待它能起到抛砖引玉之效,为进一步推广和发展我国的水平井钻井技术贡献绵薄之力。

本书共分七章。在章节的编排上出于以下考虑:由于水平井钻井技术是一个包含油藏工程与钻井工程设计、轨道控制、钻井液与完井液、测井、取心、完井与射孔等多项关键技术的系统工程,要想深刻地理解和掌握水平井井眼控制理论与技术,还必须对水平井的技术全貌以及与之有关的其他技术作必要的了解,特别是对水平井的设计技术,因为它是井眼轨道控制的前提和对象。因此,本书第一章“绪论”从总体上介绍水平井的分类、特征和当前国外、国内的技术现状。第二章“水平井设计基础与井眼轨道控制问题的性质”,简要介绍水平井的油藏描述和精细地质设计、完井方法、靶区参数和轨道剖面的选择与设计,并在总体上阐述水平井轨道控制的基本概念、控制指标、误差来源、控制特点和研究内容。第三章至第七章是本书的主干,涵盖了长、中、短三类半径的水平井,力求贯穿“理论分析、工具研制、工艺探讨、施工实例”这样一条线索。第三章“中、长半径水平井下部钻具组合的受力与变形分析”,着重介绍了钻柱组合大挠度分析的有限单元法(和张海同志合作成果)和纵横弯曲法(是在小挠度纵横弯曲法基础上加以改进的实用工程方法)。第四章“井眼轨道预测方法”重点介绍了“极限曲率法”。第五章“中、长半径水平井常用的井下控制工具及其设计”,则针对中、长半径水平井的特点,较系统地介绍了各种常用工具的分类、结构、工作理论、受力特征、选型原则和设计方法等,并在此基础上介绍了作者和同事们研制的两种新型控制工具。第六章“中、长半径水平井轨道控制工艺”则集中介绍了与现场施工密切相关的工艺问题,包括总体控制方案的设计与制订,下部钻具组合与钻柱,监控软件系统,着陆控制与水平控制过程以及两个控制井例,此外,还介绍了控制工程师应具备的其他相关知识,如测量仪器、钻头、钻井液、水力参数和操作注意事项。第七章“短半径水平井的井眼轨道控制”,则是针对短半径水平井的特点,介绍短、中短、超短半径钻井工具系统的种类和结构,重点讨论铰接肘链式短半径水平井马达系统的力学模型、特性分析、总体设计与造斜率预测方法,并讨论了短半径水平井区别于中、长半径水平井的井眼轨道控制工艺要点。

作者深知,由于水平井井眼轨道控制技术涉及到诸多方面的内容,更主要的是由于本人水

平和能力所限,要写好这样一本理论性、实践性都很强的专著,对我确非易事,错误、遗漏、不妥之处在所难免。我诚挚地希望同行专家不吝赐教,本人将虚心接受来自各方面的批评与指正。

在本书的写作过程中,作者曾在第二章中参考过大庆油田关于水平井优化设计方面的部分成果报告,也曾在第六章第七节中参考并选用了胜利油田水平 4 井的资料。这些报告和资料因系非正式出版物而无法在“参考文献”中引列,所以作者除在相应章节处予以指出外,特在此再次强调说明并深表谢意!

本书在写作过程中,一直受到石油勘探开发科学研究院钻井研究所领导及其控制工具研究室同事们的鼎力帮助。张润香、窦修荣同志承担了全书的文字和插图整理工作;唐雪平、葛云华、王珍应、张国红等同志为本书提供了部分算例数据。值此,作者向他们表示衷心的感谢!

作者还要特别感谢中国石油天然气总公司有关部门、石油勘探开发科学研究院和大庆、胜利、华北以及其他油田的领导、同行专家和朋友们,正是由于他们的热情关心和大力支持,才使作者能够利用繁忙工作之外的业余时间,坚持不懈地完成了这本书稿。

作 者
1997 年 5 月
于北京

谨 以 此 书

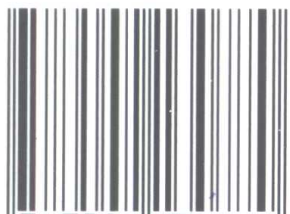
**献给为发展我国石油水平井钻
井技术而辛勤工作的同志们！**

责任编辑：何 莉 郭建强

封面设计：赛维玉

责任校对：王 蕾

ISBN 7-5021-3077-2



9 787502 130770 >

ISBN 7-5021-3077-2/TE · 2356

定价：35.00 元



目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 水平井的分类及特点	(1)
第二节 水平井在油气勘探开发中的应用和效益	(3)
第三节 国外水平井的发展概况和技术现状	(4)
第四节 水平井钻井技术在我国的发展和展望	(8)
参考文献	(11)
第二章 水平井设计基础与井眼轨道控制问题的性质	(12)
第一节 水平井设计中的几个问题	(12)
第二节 水平井井眼轨道控制问题的性质	(21)
参考文献	(26)
第三章 中、长半径水平井下部钻具组合的受力变形分析	(27)
第一节 中曲率井眼与钻柱的大挠度分析	(27)
第二节 BHA 大挠度分析的有限元法	(33)
第三节 BHA 大挠度分析的纵横弯曲法	(41)
第四节 中曲率井眼内下部钻具组合的理论特性和参数敏感性分析	(65)
参考文献	(87)
第四章 井眼轨道预测方法	(88)
第一节 概述	(88)
第二节 预测井眼轨道的力—位移模型法	(89)
第三节 预测工具造斜能力的三点定圆法	(97)
第四节 预测工具造斜能力的极限曲率法	(99)
参考文献	(105)
第五章 中、长半径水平井常用的井下控制工具及其设计	(106)
第一节 水平井各种常用动力钻具的分类与结构特征	(106)
第二节 螺杆钻具的工作特性	(111)
第三节 水平井螺杆钻具的受力特征	(115)
第四节 万向轴的运动和受力分析及弯壳体内孔偏移量计算	(131)
第五节 油基钻井液及其油品种类对定子橡胶体积膨胀的影响	(139)
第六节 导向钻具选型与总体设计的原则和方法	(140)
第七节 地面可调弯外壳导向螺杆钻具及其应用	(151)
第八节 中空转子螺杆钻具的外特性及其改进	(159)
参考文献	(169)
第六章 中、长半径水平井轨道控制工艺	(170)
第一节 水平井轨道控制软件系统的基本功能与结构	(170)
第二节 总体控制方案的设计与计算	(172)
第三节 水平井下部钻具组合与钻柱设计	(179)

第四节	着陆控制·····	(182)
第五节	水平控制·····	(189)
第六节	井眼轨道控制应注意的一些问题·····	(196)
第七节	水平井井眼轨道控制实例·····	(207)
	参考文献·····	(218)
第七章	短半径水平井的井眼轨道控制·····	(219)
第一节	短半径水平井的几种常用工具·····	(219)
第二节	短半径水平井铰接肘链式马达的受力变形分析与总体设计要点·····	(225)
第三节	短半径水平井井眼轨道控制工艺要点·····	(238)
	参考文献·····	(243)
附录	·····	(245)
附录 I	BHA 大挠度分析有限元法大位移矩阵计算有关积分式 ·····	(245)
附录 II	对中曲率井眼内曲率分解公式 $K_p = K \cos \theta$ 、 $K_Q = K \sin \theta$ 近似程度分析 ···	(247)
附录 III	单位换算表·····	(250)

第一章 绪 论

水平井钻井技术是 20 世纪 80 年代国际石油界迅速发展并日臻完善的一项综合性配套技术,它包括水平井油藏工程和优化设计技术,水平井井眼轨道控制技术,水平井钻井液与油层保护技术,水平井测井技术和水平井完井技术等一系列重要技术环节,综合了多种学科的一些先进技术成果。由于水平钻井主要是以提高油气产量或提高油气采收率为根本目标,已经投产的水平井绝大多数带来了十分巨大的经济效益,因此水平井技术被誉为石油工业发展过程中的一项重大突破。

第一节 水平井的分类及特点

水平井是最大井斜角保持在 90° 左右,并在目的层中维持一定长度的水平井段的特殊井。水平井钻井技术是常规定向井钻井技术的延伸和发展。

目前,水平井已形成 3 种基本类型,如图 1-1 所示。

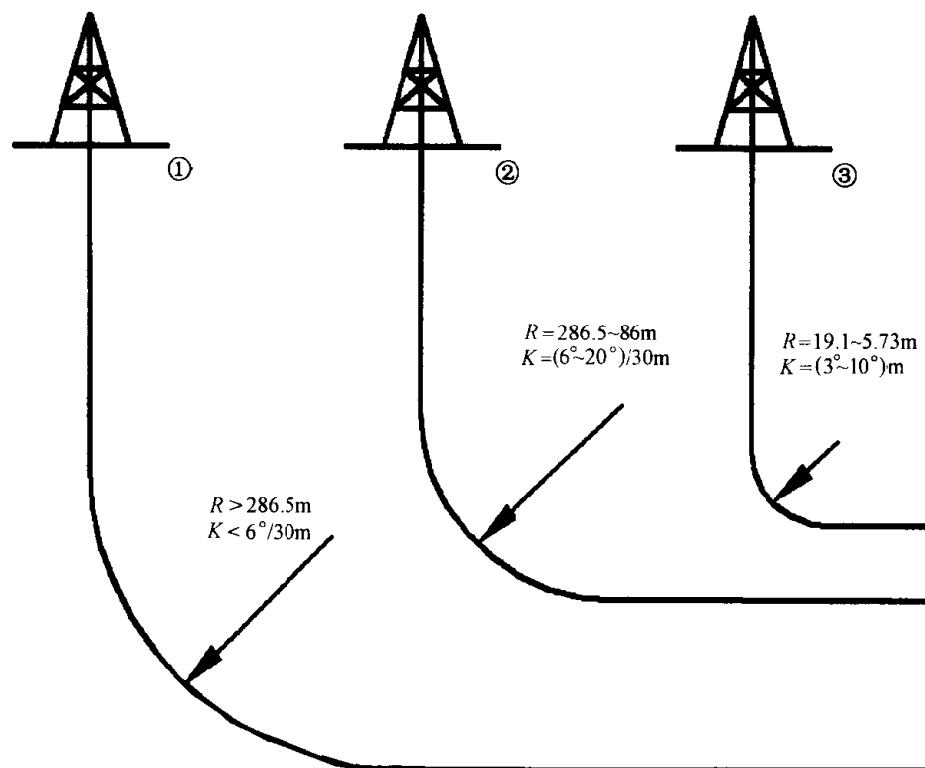


图 1-1 3 类水平井剖面示意图

①长半径水平井;②中半径水平井;③短半径水平井

(1)长半径水平井(又称小曲率水平井):其造斜井段的设计造斜率 $K < 6^\circ/30\text{m}$,相应的曲率半径 $R > 286.5\text{m}$ 。

(2)中半径水平井(又称中曲率水平井):其造斜井段的设计造斜率 $K = (6^\circ \sim 20^\circ)/30\text{m}$,相应的曲率半径 $R = 286.5 \sim 86\text{m}$ 。

(3)短半径水平井(又称大曲率水平井):其造斜井段的设计造斜率 $K = (3^\circ \sim 10^\circ)/\text{m}$,相

应的曲率半径 $R = 19.1 \sim 5.73\text{m}$ 。

应当说明以下几点:其一,上述3种基本类型的水平井的造斜率范围是不完全衔接的(如中半径和短半径造斜率之间有空白区),造成这种现象的主要原因是受钻井工具类型的限制;其二,对于这3种造斜率范围的界定并不是绝对的(有些公司及某些文献中把中、长半径的分界点定为 $8^\circ/30\text{m}$),会随着技术的发展而有所修正,例如最近国外某些公司研制了造斜率在 $K = (20^\circ \sim 71^\circ)/30\text{m}$ 范围的特种钻井工具(大角度同向双弯和同向三弯螺杆马达),在一定程度上填补了中半径和短半径间的空白区,提出了“中短半径”(intermediate radius)的概念。有关中短半径造斜率马达及其在侧钻水平井中的应用将在本书第七章详加介绍;其三,实际钻成的一口水平井,往往是不同造斜率井段的组合(如中、长半径),而且由于地面、地下的具体条件和特殊要求,在上述3种基本类型水平井的基础上,又繁衍形成多种应用类型,如大位移水平井、丛式水平井、分支水平井、浅水平井、侧钻水平井、小井眼水平井等。

上述3种基本类型水平井的工艺特点和各自的主要优缺点分别列于表1-1和表1-2。

表 1-1 长、中、短半径水平井的工艺特点

类 型 工 艺	长 半 径	中 半 径	短 半 径
造斜率	$<8^\circ/30\text{m}$	$(8^\circ \sim 30^\circ)/30\text{m}$	$(90^\circ \sim 300^\circ)/30\text{m}$
曲率半径	$>286.5\text{m}$	$286.5 \sim 86\text{m}$	$19.1 \sim 5.73\text{m}$
井眼尺寸	无限制	无限制	$6\frac{1}{4}\text{in}, 4\frac{3}{4}\text{in}$
钻井方式	转盘钻井或导向钻井系统	造斜段:弯外壳马达或 Gilligan 钻具组合; 水平段:转盘钻井或导向钻井	铰接马达方式 转盘钻柔性组合
钻杆	常规钻杆	常规钻杆及加重钻杆	$2\frac{7}{8}\text{in}$ 钻杆
测斜工具	无限制	有线随钻测斜仪;电子多点测斜仪;MWD	柔性有线测斜仪或柔性 MWD
取心工具	常规工具	常规工具	岩心筒长 1m
地面设备	可用常规钻机	可用常规钻机	配备动力水龙头或顶部驱动系统
完井方式	无限制	无限制	只限于裸眼及割缝管

表 1-2 3种基本类型水平井的主要优缺点一览表

类 型	优 点	缺 点
长 半 径	1. 穿透油层段长($>1000\text{m}$); 2. 使用标准的钻具及套管; 3. 使用常规钻井设备; 4. “狗腿严重度”较小; 5. 可使用选择性完井方法; 6. 可用各种人工举升采油工艺; 7. 测井及取心方便; 8. 井眼及工具尺寸不受限制	1. 井眼轨道控制段最长; 2. 全井斜深增加; 3. 钻井费用增加; 4. 不适用于薄油层及浅油层; 5. 钻杆扭矩较大; 6. 套管用量最大

续表

类 型	优 点	缺 点
中 半 径	1. 进入油层前的无效井段较短; 2. 使用的井下工具接近于常规工具; 3. 造斜段多用井下动力钻具及导向系统 钻井,可控性好; 4. 离构造控制点较近; 5. 可用常规的套管及完井方法; 6. 井下扭矩及阻力较小; 7. 较高及较稳定的造斜率; 8. 井眼控制井段较短; 9. 穿透油层段长(可达 1000m); 10. 井眼尺寸不受限制; 11. 可以测井及取心; 12. 可实现选择性完井方法	1. 要求使用 MWD; 2. 要求使用加重钻杆
短 半 径	1. 井眼曲线段最短; 2. 容易侧钻; 3. 中靶准确度相对较高; 4. 从一口直井中可以钻多口水平分支井; 5. 造斜点与油层距离最小; 6. 可用于浅油层; 7. 全井斜深最小; 8. 不受地表条件的影响	1. 非常规的井下工具; 2. 非常规的完井方法; 3. 穿透油层段短; 4. 井眼尺寸受到限制; 5. 起下钻次数较多; 6. 要求使用顶部驱动系统或动力水龙头; 7. 井眼方位控制受到限制

由于中半径水平井具有如表 1-2 所示的突出优点,中半径水平井钻井技术发展迅速,数量增加幅度远大于长、短半径水平井,在每年世界上所钻水平井的总数中,中半径水平井占 60%左右(1989 年和 1990 年该值分别为 60%和 60.3%)。

第二节 水平井在油气勘探开发中的应用和效益

除了少量的非石油方面的应用(如用水平井作为引排煤层中甲烷的通道;对埋藏很深而用常规方法无法开采的煤层,可采用就地气化方法,用水平井作为注入空气、氧气以及产出煤气的通道等)以外,水平井主要用于石油和天然气的勘探与开发,可大幅度地提高油气产量,具有显著的综合效益。根据国内外水平钻井的生产实践,水平井具有如下的优点和应用^[1]:

(1)开发薄油藏油田,提高单井产量。水平井可较直井和常规定向井大大增加泄油面积,从而提高薄油层中的油产量,使薄油层具有开采价值。

(2)开发低渗透油藏,提高采收率。

(3)开发重油稠油油藏。水平井除扩大泄油面积外,如进行热采,还有利于热线的均匀推进。

(4)开发以垂直裂缝为主的油藏。水平井钻遇垂直裂缝的机遇较直井大得多。

(5)开发底水和气顶活跃的油藏。水平井可以减缓水锥、气锥的推进速度,延长油井寿命。

(6)利用老井采出残余油。在停产老井中侧钻水平井较钻调整井(加密井)要节约费用。

(7)用丛式水平井扩大控制面积,减少丛式井的平台数量。

(8)用水平井注水注汽有利于水线汽线的均匀推进。

(9)用水平探井可钻穿多层陡峭的产层,往往相当于多口直井的勘探效果。

(10)有利于更好地了解目的层的性质。水平井在目的层中的井段较直井长得多,可以更多、更好地收集目的层的各种特性资料。

(11)有利于环境保护。一口水平井可以替代一口到几口直井,大量减少钻井过程中的排污量。

究其根本,水平井最主要的特征在于它可以大大增加井眼在产层中的长度和产层的泄油面积,用略高于1口直井的成本投入得到数口直井的产量。国内外有很多井例足以证明水平井的显著效益。例如:前苏联在20世纪50年代于依圣拜油区曾钻丛式水平井11口(作为加热井或注蒸汽井),其结果使位于中心的生产井产量增加8.2倍;前苏联在20世纪60年代于乌克兰多林那油田钻成8口多目标水平井,每口井的油层内段长范围为250~650m,而邻近直井的油层内段长仅为50~80m,这些水平井与邻近直井的产量比为5.3,而每米进尺成本比仅为1.6,水平井每吨产能的钻井投入仅为直井的30%左右。20世纪80年代以来,随着水平井技术在世界范围内的推广、发展和完善,使水平井的投入由早期相当于直井的6~8倍下降为直井的2~3倍,甚至1倍多,而产量一般均在直井的4倍以上。据国外13个石油公司在世界多个地区的统计资料,水平井对直井的日产量增长比率平均为5倍,在东方为6倍,在北海曾达6~20倍。法国的ELF公司曾指出在意大利罗斯帕梅尔油田,水平井的采油指数增长高达数十倍,水平井与直井的产量比达7倍。

根据国际与国内的水平井钻井资料表明,几乎所有类型的油气藏都可以进行水平钻进。在国外,钻过水平井并取得显著经济效益的油气藏如:

- (1)薄砂岩油藏。
- (2)有底水、气顶的砂岩油层。
- (3)裂缝性或喀斯特洞穴型碳酸盐岩油气藏。
- (4)有垂直裂缝带的页岩油藏。
- (5)浅层未胶结砂岩沥青型稠油油藏。
- (6)浅层岩礁型稠油油藏。
- (7)储量很少的海上油藏。

在国内,截止1995年底,已有11个油田(胜利、大庆、新疆、辽河、大港、华北、四川、长庆、中原、塔里木、吉林)钻成60余口水平井,其油藏有低压低渗透砂岩油藏、稠油油藏、火山喷发岩油藏、不整合屋脊式砂岩油藏、裂缝性碳酸盐岩底水油藏等多种不同类型。根据对“八五”期间所钻的50口水平井的统计数据表明,其单井日产量高于同区块相邻直井的3~6倍;在科研攻关过程中这50口水平井的总投资为1.4421亿元,截止1995年5月底,其中已经投产的水平井为35口,比邻近直井增产原油 $35.7 \times 10^4 \text{t}$,共计人民币4.29亿元,效益非常显著^[2]。

第三节 国外水平井的发展概况和技术现状

水平钻井的历史可以追溯到19世纪末期。20世纪50年代以前的水平井,基本上都是通过坑道钻成的,只有少部分水平井是在垂直井的基础上钻成的。在20世纪50年代,由于John Eastman和其他一些人的努力,才使水平井技术有了较大进展。但这一时期的水平井,主要都是在老井基础上进行侧钻的短半径径向泄油孔,水平进尺短。前苏联在水平钻井技术发展中的开拓性工作是使用涡轮钻具钻成长半径水平井,其水平段长达1600ft。

总的来看,20世纪70年代以前的水平井钻井技术处于缓慢的发展阶段。尽管很多水平

井都钻进成功,但由于技术方面的不成熟、不配套,从而导致事故多与高成本,这在原油价格低廉的时期却显得不合时宜。经济上的低效益使这项技术基本上处于停滞状态^[3]。

20 世纪 70 年代后期,原油价格的上涨,驱使世界上许多油公司再度关注水平井技术。在石油资源日益匮乏和勘探开发难度不断增大的条件下,一些油公司希望通过水平井来开发低压、低渗、薄油藏、稠油油藏及用常规技术难以取得经济效益的油田,以提高采收率和提高原油产量。于是 20 世纪 80 年代水平井钻井技术进入了一个新的发展时期,而长半径、中半径水平井钻井技术的发展则是这一时期的重要标志。

20 世纪 80 年代初至 20 世纪 80 年代中期,世界上的水平井仍以短半径水平井为主(数量维持在每年 50 口左右),长半径水平井和中半径水平井钻井技术处于攻关时期。1980~1984 年期间,钻成的具有 300m 以上水平段长度的水平井数量不足 20 口(文献[4]表 1-2 统计数字为 16 口),这些水平井主要是长半径水平井。随着被誉为国际钻井 3 大新技术的 MWD(随钻测量仪)、PDC 钻头(聚晶金刚石复合片钻头)和高效导向螺杆钻具的应用,大大促进了水平井钻井技术的进步,使每年新钻成的水平井数量成倍增加,1989 年一年钻成的中长半径水平井的总数为 257 口(参见图 1-2)。由于中半径水平井较之长半径水平井的诸多技术优点,使中半径水平井数量迅速增长而远远超过长半径水平井,占据绝对优势。

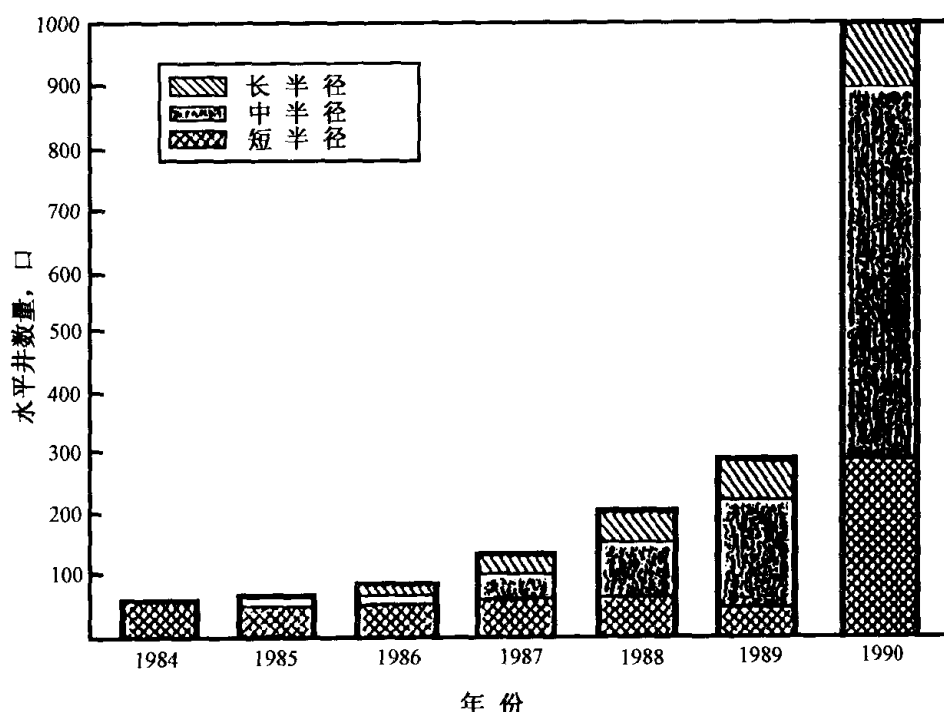


图 1-2 1984~1990 年间世界水平井发展情况

进入 20 世纪 90 年代以来,世界水平井钻井技术以更快的速度推广和普及,成为提高油田勘探开发综合效益的重要途径。1990 年国外钻成水平井 1290 口,是 1989 年的 5.2 倍;1995 年钻成水平井 2590 口,又比 1990 年增加 1 倍以上。在 1990~1995 年的 6 年中,世界上共钻成水平井 12590 口,是 1984~1989 的 6 年中所钻水平井总数的近 15 倍。表 1-3 给出了 1989~1995 年美国 and 世界上每年所钻的水平井口数以及这些水平井在世界各地区的分布状况(该表中未包括我国在此期间所钻水平井的数据)。据国外某公司介绍,截止 1994 年美国所钻的 7000 余口水平井中,中半径、长半径和短半径水平井各占总数 70%,23% 和 7%;在加拿大所钻的 3000 余口水平井中,中半径、长半径、短半径水平井的比例各占 88%,9% 和 3%。

表 1-3 1989~1995 世界水平井数量及其分布

地 区	1989 年	1990 年	1991 年	1992 年	1993 年	1994 年	1995 年
美国本土	134	1040	1865	2015	1280	1455	1730
国际	123	250	345	455	585	715	860
世界范围	257	1290	2210	2470	1865	2170	2590
美国本土							
ROCKIES	47	150	200	225	250	275	300
MIDSTATES	6	850	1600	1700	900	1000	1200
EASTERN U.S.	6	20	40	60	90	120	150
WESTERN U.S.	15	20	25	30	40	60	80
国际							
MIDDLE EAST	8	25	30	35	40	45	50
AFRICA	3	15	25	40	50	60	70
LATIN AMERICA	15	25	40	60	80	90	100
FAR EAST	22	25	30	40	55	70	80
EUROPE	34	60	70	80	90	100	110
CANADA	41	100	150	200	270	350	450

随着水平井钻井技术和完井技术的不断发展和完善,水平井的钻井成本大幅度下降,因而能获得更大的经济效益,这就是为什么水平井会在 20 世纪 90 年代以后迅速增长的重要原因之一。据国外统计资料表明,虽然水平井的产量一般比邻近直井提高 3~5 倍,甚至更多,而 20 世纪 80 年代初期以前,水平井成本比邻近直井高出 6~8 倍;到 20 世纪 80 年代中、后期,水平井成本明显下降,一般为直井的 2~3 倍;进入 20 世纪 90 年代以后,这一成本比值继续降低,一般是直井成本的 1.2~1.4 倍。图 1-3 示出了 1986~1990 年期间阿拉斯加普鲁德霍湾的水平井与垂直井成本对比曲线。图 1-4 是美国得克萨斯 Austin Chalk 油层的水平井钻井成本的“学习曲线”。

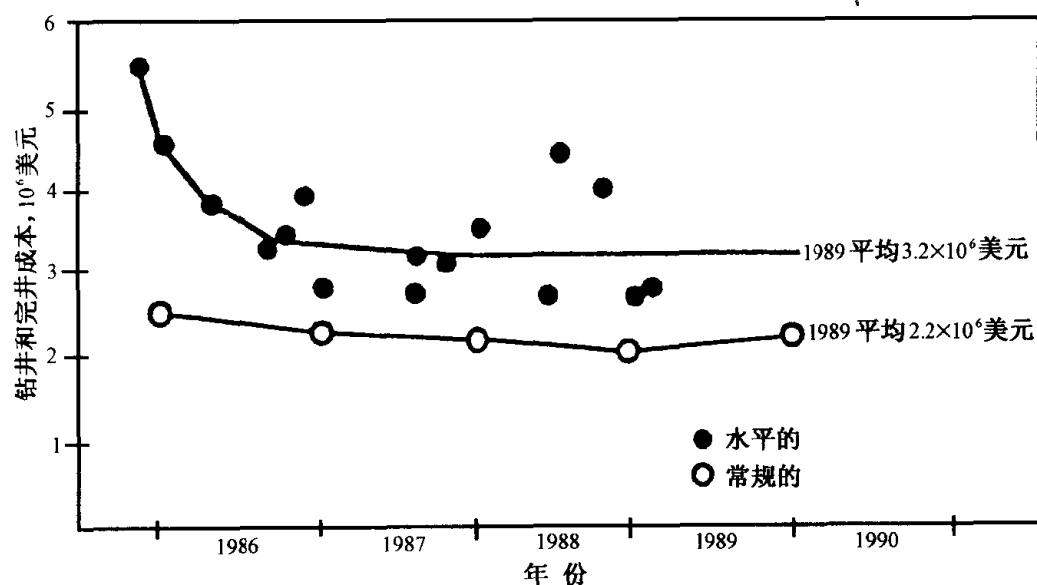


图 1-3 阿拉斯加普鲁德霍湾的水平井与垂直井的成本对比

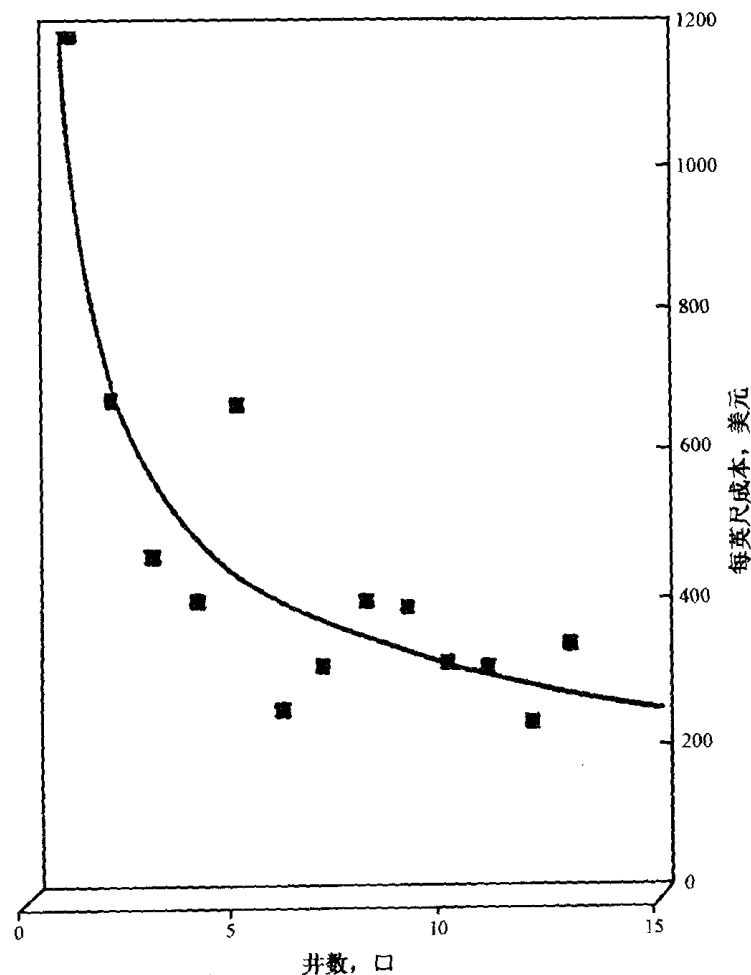


图 1-4 得克萨斯 Austin Chalk 层的水平井钻井成本
(据石油工程师, P22, April, 1990)

“学习曲线”表明,在某一地区所钻水平井的口数和积累的钻井经验对水平井的钻井成本影响很大。一般情况下,第 1 口水平井的成本比第 2 口高得多(第 1 口水平井往往比邻近直井成本高出 2~4 倍)。但随着后续的水平井数量增加,其成本可下降至邻近直井的 1.4 倍甚至更低。美国的 7000 余口水平井统计资料表明,每口井成本相当于邻近直井的 1.2 倍左右,也有的水平井成本接近甚至低于直井成本^[4]。这些数据可给出两点重要启示:其一是不能简单地根据在某一地区所钻的第 1 口水平井就对水平井钻井技术进行经济评价;其二是为了获得更高的经济效益,最好选择在一个地区钻多口而不是单口水平井的钻井方案。

目前国际上水平井钻井技术已日臻成熟和完善。随着不同的地面条件、地下油层状况与勘探开发要求,已钻成了多种花样的水平井。例如美国普鲁德霍湾油田、英国北海油田的大位移水平井;加拿大、印度尼西亚等地的丛式水平井;前苏联(多林纳油田)及美国的水平多目标井和水平分支井;加拿大的用斜井钻机由地表沿 45°井斜角开钻造斜的浅层水平井,以及在很多国家和地区钻成的开窗侧钻水平井和小井眼水平井。再如,美国某钻井公司曾在北海钻成一口特殊工艺水平井,该井总垂深为 6710m,水平位移达 8714m(28592ft),在水平段内钻进一段距离之后,又继续增斜至 130°的最大井斜角,共探明 5 个目标层,表明具有很高的钻井技术水平。随着钻井技术的进步,钻成水平位移达到或超过 10km 的大位移水平井,也将是指日可待的。

第四节 水平井钻井技术在我国的发展和展望

我国是继美国和前苏联之后,第3个钻水平井的国家。1965~1966年,我国的钻井工作者曾在四川地区钻成了2口水平井即巴-24和磨-3水平井。以磨-3井为例,其目的层的地质特征是四川磨溪构造,大安寨微裂缝性灰岩油层(垂深约1300m),油层中有页岩夹层。磨-3水平井完钻总测深为1685m,垂深1368m,水平位移444m,油层内井段长288m,水平井段长160m。经完井测试,其产量为邻近直井的10倍,经济效益显著。

同国外水平井的发展情况类似,此后水平井钻井在我国一直处于停顿状态,直至20世纪80年代末期。但在此期间,我国的石油科技工作者却一直在密切关注着国外水平井技术的发展动向。为了提高我国油气勘探开发的综合效益,提高油气采收率和产量,在严密的科学技术论证基础上,“石油水平井钻井成套技术”于1990年被列入国家“八五”重大科技攻关项目。在国家计委和中国石油天然气总公司的组织领导下,有6个油田和5所院校的762名科技人员参加攻关,历经4年,全面和超额完成了攻关计划任务:在我国10个油田先后钻成长、中、短半径科学实验水平井和推广应用水平井50余口,并在水平井优化设计技术,水平井井眼轨道控制技术,水平井钻井液与完井液技术,水平井完井与固井射孔技术,水平井电测技术与水平井取心技术等6个方面,取得16项重大技术成果,建成5个实验室和11套实验装置,研制新型仪器18台套,编制各种计算机软件53套,制定行业标准14项,获国家专利8项,推广新工艺、新技术12项,44项成果填补了国内空白。在4年攻关中,研制的新产品、新装备、新工具42种,取代进口,实现了水平钻井装备和仪器的全部国产化。

从整体经济效益上看,4年攻关中其投入产出比约为1:3;随着时间的推移,这一比值将继续增加。有35口水平井与邻近直井或定向井的原油产量比值为3~6。钻井与建井周期的明显缩短标志着水平井技术的进步与成熟。从某油田的统计数据表明,其第4口水平井与第1口水平井相比,所需的钻具组合减少40%,钻井周期缩短50%,成本降低1倍。某油田用水平井开发稠油砾石油藏,建井周期由初期的57d降低到后来的平均22d,最快为17d;相应的钻井周期由初期的44d,降低到后来的平均17d,最短为12d;该油田在某区块的10个平台采用丛式井技术,进行水平井、定向井和直井的统一联合开发,先后完成了11口长裸眼水平井、29口定向井和2口直井,其中水平井平均钻井周期为15d,建井周期为22d。

在4年攻关过程中,在10个油田钻成的50余口水平井,涉及到8种以上不同油气藏。按井身结构类型划分,这些水平井有长半径、中半径、短半径水平井,其中以中半径水平井为主;按钻井目的划分,这些水平井有探井和开发井(包括稠油热采井);按钻井设计和工艺来划分,这些井中有水平多目标井(一井双探)和水平巷道开发井、老井侧钻水平井、丛式水平井;按完井方式划分,这些水平井有裸眼完井、砾石充填完井、套管固井射孔完井、割缝筛管完井、金属棉筛管完井、割缝尾管加管外封隔器完井、不下技术套管而仅用油层套管完井等多种方式。

以下举出一些井例,由此可粗略反映出目前我国水平井钻井技术的概貌。

【井例1】 任平1井。该井是攻关过程中第1口中半径水平井,斜深3180m,垂深2699m,水平段长300m;平均日产原油14.3t,是邻近直井的1.8倍;该井自1991年4月投产至1995年止,共产原油 29653×10^4 t,产值计3617.7万元,是该井投入成本的2.8倍。

【井例2】 埕斜1井。该井是我国第1口水平勘探井,完钻斜深2650.13m,水平段长505m,钻穿不整合砂岩19层共211.5m,取得了相当于12口直探井的勘探效果。该井初产原