

现代水平井采油技术

周全兴 主编

现代水平井采油技术

周全兴 主编

ISBN 7-304-04242-2

3

42

天津大学出版社

登录号	126833
分类号	TE3
种次号	042

现代水平井采油技术

主 编: 周全兴

主要编者: 周全兴 王东海 税其达

张东生 孙希洪

初 审: 周全兴

审 定: 曹里民 廖润康 吕素如



石油0108822

天津大学出版社

内 容 提 要

本书全面系统地介绍了国外近年来在水平井完井和采油技术方面的基础理论、工艺技术、实用经验、发展状况和经济效益等。具体深入地论述了水平井完井方法、完井装置、完井工艺、测井和射孔、固井质量评价、常规和热力采油、坑道采油、增产技术、液流及压力特性和试井分析等内容。本书知识容量大、内容详尽、实用性强,基本上反映了国外80年代末水平,不仅可供广大采油工程技术人员、油藏工程技术人员、钻井工程技术人员使用,也可供有关管理人员和石油院校有关专业师生参考。

DP36/19

现代水平井采油技术

周全兴 主编

*

天津大学出版社出版

(天津大学内)

邮编:300072

天津市宝坻第二印刷厂印刷

新华书店天津发行所发行

*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:26.75 字数:661千

1997年4月第一版 1997年4月第一次印刷

印数:1—1000

ISBN 7-5618-0729-5

TE·6 定价:28.00元

前 言

编写《现代水平井采油技术》的目的在于向国内石油钻井和采油工程技术人员较为全面系统地介绍国外近几年来在水平井完井和采油技术方面的发展与应用情况,为辽河油田和国内水平井完井和采油技术的攻关研究与实际应用提供参考。

本书反映了国外 80 年代末在这方面的理论、工艺、成果与发展。它着力于介绍基础理论、具体工艺和实用现场经验。力求论述系统、全面、简明、深入、具体,形成自己的风格。

本书由周全兴主编,并负责组织、译校、编写和初审。参加编写的作者主要有:周全兴(第 1 章、第 2 章第 1、3 节、第 5、12、13 章)、王东海(第 7、8、9 章)、税其达(第 3 章)、张东生(第 11 章)、孙希洪(第 10 章)、李松滨(第 6 章)、汪友松(第 4 章第 3、4 节)、刘湘基(第 4 章第 1、2 节)、张洪林(第 2 章第 2 节)、樊晓婷(第 12 章)。初稿完成后由周全兴同志进行初审,最后由曹里民、廖润康、吕素如三同志审定。

本书编写工作长达两年,在此期间得到了有关领导和一些同志的大力支持和协作,这里谨表谢意。由于编写人员水平有限,缺点和错误难免,恳请读者不吝批评指正。

编 者

目 录

第一章 概述	(1)
第一节 水平井钻井完井发展回顾	(1)
一、水平井钻井技术发展简况	(1)
二、水平井完井技术发展简况	(2)
第二节 水平井应用简况	(2)
一、水平井用途分类	(2)
二、水平井应用情况	(3)
第三节 水平井采油工艺特点	(5)
一、水平井常规采油	(5)
二、水平井热力采油	(6)
第二章 水平井完井方法	(8)
第一节 水平井井眼稳定性研究	(8)
一、C·H Siao 关于水平井井眼破坏研究	(8)
二、M·R·Mclen 等人关于井眼稳定性的分析	(15)
三、G·F·Fuh 等人关于水平井裸眼完井井筒稳定性分析	(23)
第二节 水平井完井方法	(27)
一、概述	(27)
二、水平井完井方法分类及特点	(28)
三、水平井完井方法选择	(31)
第三节 水平井防砂	(35)
一、出砂原因及其机理	(35)
二、水平井早期防砂	(38)
三、出砂试验研究	(43)
四、防砂装置	(49)
第三章 水平井完井装置	(52)
第一节 安装接箍	(52)
一、“L”型安装接箍	(52)
二、“LG”型安装接箍	(52)
第二节 坐封工具	(52)
一、“R”型坐封工具	(52)
二、双活塞液压坐封工具	(53)
三、“SS”型机械坐封工具	(53)
第三节 悬挂器	(54)
一、TIW 公司悬挂器	(54)
二、A-Z 公司衬管悬挂器	(55)
三、Brown 公司衬管悬挂器	(56)
第四节 封隔器	(58)

一、管外封隔器用途和种类	(58)
二、TIW 公司封隔器	(59)
三、A-Z 公司衬管封隔器	(62)
四、Lynes 公司管外封隔器	(62)
五、CTC 公司管外封隔器	(65)
六、Brown 封隔器	(67)
第五节 套管扶正器	(70)
一、套管扶正器结构与特点	(70)
二、扶正器布放要求	(71)
第六节 分级注水泥接箍	(71)
一、分级注水泥接箍种类	(71)
二、分级注水泥接箍选用及特点	(71)
第七节 浮箍浮鞋及胶塞	(72)
一、浮箍浮鞋	(72)
二、注水泥胶塞	(72)
三、TIW 型水平井衬管活动接头	(74)
四、“B”型可回收密封衬套	(74)
第四章 水平井完井工艺	(76)
第一节 水平井裸眼及衬管完井工艺	(76)
一、水平井裸眼完井工艺	(76)
二、水平井割缝衬管完井工艺	(77)
第二节 水平井固井完井工艺	(81)
一、水平井固井完井工艺技术	(81)
二、TIW 完井管柱示意图	(86)
第三节 水平井裸眼砾石充填完井理论研究	(90)
一、携砂液特性	(91)
二、砾石沉降理论	(94)
三、砾石充填试验	(100)
第四节 水平井砾石充填装置	(103)
一、Baker 公司砾石充填装置	(103)
二、Unipack 砾石充填装置	(106)
第五节 水平井砾石充填工艺	(108)
一、水平井砾石充填设计	(108)
二、水平井砾石充填操作技术	(110)
三、水平井砾石充填完井实例	(113)
第五章 水平井测井和射孔技术	(115)
第一节 水平井测井技术	(115)
一、概述	(115)
二、钻杆传送测井系统	(116)

三、泵送测井系统	(122)
四、挠性管传送测井系统	(124)
五、水平井测井系统比较及测井问题	(132)
第二节 水平井射孔技术	(134)
一、水平井射孔中的问题及特点	(134)
二、水平井射孔枪部件结构特点	(135)
三、射孔压差的选择与设计	(141)
四、水平井射孔系统	(145)
第六章 水平井固井质量评价技术	(148)
第一节 固井质量评价基础	(148)
一、概述	(148)
二、水力测试法	(148)
三、温度核噪声固井质量评价测井	(149)
四、声波测井评价固井质量	(151)
第二节 水泥胶结测井	(156)
一、水泥胶结测井发展简况	(156)
二、水泥胶结测井的声学理论	(157)
三、全声波显示的描述	(158)
四、CBL-VDL 定性解释	(159)
五、声波测井的定量数据	(160)
六、CBL 衰减速率	(161)
七、水泥胶结测井(CBL)定量解释	(163)
八、水泥胶结测井的表现形式	(164)
九、CBL-VDL 测井的质量控制	(164)
十、井眼等参数对水泥胶结测井的影响	(165)
十一、水泥胶结测井实例	(170)
第三节 超声波脉冲回声测井评价固井质量	(174)
一、概述	(174)
二、测量的声学原理	(175)
三、解释涉及的物理基础	(176)
四、影响水泥评价测井解释的诸因素	(177)
五、测井图的绘制	(179)
六、水泥评价测井图的质量控制	(181)
七、水泥评价测井解释实例	(183)
第四节 CBL/CET 测井综合解释	(185)
一、综合解释实例	(185)
二、改进解释的方向	(186)
三、结论与有关符号说明	(189)
第七章 水平井常规采油技术	(193)

第一节 大斜度井水平井气举采油技术	(193)
一、研究概况	(193)
二、计算斜井中气举设计的简便方法	(194)
三、井斜增加气举井合理产量降低	(197)
四、斜井气举施工设计步骤	(197)
第二节 水平井机械采油方法的选择	(197)
一、水平井中流体的流动特性	(198)
二、水平井机械采油方法选择的影响和原则	(198)
三、水平井电潜泵采油技术	(200)
四、水平井水力泵采油技术	(203)
五、水平井有杆泵采油技术	(207)
第三节 水平井采油井下工具	(209)
一、水平井对采油工具选择的影响因素	(209)
二、水平井采油的主要井下工具	(210)
第八章 水平井注汽热采技术	(214)
第一节 面积蒸汽驱	(214)
一、基本井例模型	(214)
二、加密井网	(214)
三、布井方式	(215)
第二节 重质油和沥青的开采	(216)
一、重质油和沥青开采原理	(216)
二、蒸汽辅助重力泄油	(217)
三、采矿法开采试验	(222)
四、直井注汽水平井采油	(224)
五、加热环空蒸汽驱	(225)
第三节 水平井热采模拟	(225)
一、方案	(225)
二、开采动态	(226)
三、模拟研究	(228)
四、经济性	(229)
五、最优化研究	(231)
第四节 水平井最佳采油速度	(236)
一、概述	(236)
二、最佳流体开采速度	(237)
三、结论	(238)
四、实例	(238)
第五节 水平井热采实例	(239)
一、冷湖油田	(239)
二、布雷珠河油田	(239)

三、佩里坎湖油田	(241)
四、北卡克图斯湖油田	(242)
第九章 坑道水平井采油技术	(247)
第一节 坑道水平井采油的发展与特点	(247)
一、坑道水平井采油的发展概况	(247)
二、坑道水平井采油优点	(248)
三、坑道水平井采油特点	(250)
第二节 坑道采油的 UTF 工程技术	(251)
一、UTF 项目的背景	(252)
二、UTF 项目地质概述	(252)
三、UTF 项目设计摘要	(253)
四、挖掘竖井和坑道	(255)
五、钻水平井	(258)
第三节 坑道采油的 UTF 油藏动态	(260)
一、UTF 油藏动态预测	(260)
二、坑道水平井采油经济评价	(263)
第十章 水平井基质酸化及压裂理论	(266)
第一节 水平井基质酸化技术	(266)
一、水平井基质酸化研究与应用概况	(266)
二、基质酸化最大注入速度	(269)
三、连续油管的上提速度	(271)
四、增产处理的设计和选择	(271)
五、水平井基质酸化实例	(272)
第二节 水平井压裂概念和理论	(273)
一、水平井压裂控制方程	(273)
二、直井与水平井压裂比较	(280)
三、水平井压裂应力与裂缝方向	(282)
四、裂缝偏转和裂缝重新定向	(285)
五、多裂缝压裂	(287)
六、裂缝导流能力与水平井位优选	(289)
第三节 压裂液的传输	(297)
一、概述	(297)
二、传输理论	(298)
三、试验设备及方法	(299)
四、试验结果与讨论	(301)
第十一章 水平井水力压裂工艺	(309)
第一节 水平井水力压裂施工	(309)
一、水平井水力压裂现场试验综述	(309)
二、水平井水力压裂设计	(313)

三、水平井压裂工具	(322)
第二节 水平井水力压裂实例	(327)
一、压裂前后的试井分析	(328)
二、压裂概况	(330)
三、产能提高情况	(333)
第十二章 水平井液流及压力特性	(337)
第一节 水平井渗流理论模型	(337)
一、均质油藏水平井理论模型	(337)
二、双重介质油藏水平井模型	(351)
第二节 水平井液流特性分析	(355)
一、水平井试井早期垂直径向流特性	(355)
二、水平井试井早期垂直半圆柱径向流特性	(359)
三、水平井试井中期线性流特性	(360)
四、水平井试井中后期径向流特性	(361)
五、水平井试井晚期线性流特性	(364)
六、Kuchuk 稳定流动期特性	(365)
第三节 水平井表皮系数	(366)
一、水平井试井早期径向流表皮系数	(366)
二、水平井试井早期垂向圆柱径向流表皮系数	(367)
三、水平井试井中期线性流表皮系数	(368)
四、水平井试井中后期径向流表皮系数	(369)
五、水平井试井晚期线性流表皮系数	(371)
第四节 影响水平井压力响应的因素	(373)
一、测压位置影响	(374)
二、水平井段长度影响	(374)
三、水平井段在油藏中的位置影响	(374)
四、井眼半径影响	(375)
五、井筒储存系数及表皮系数影响	(376)
六、油藏边界影响	(376)
第十三章 水平井试井分析	(378)
第一节 水平井试井分析方法	(378)
一、压力导数分析法	(378)
二、重整压力分析法	(383)
三、典型曲线拟合法	(386)
四、矩形双曲线法	(394)
五、流动期分析法	(395)
第二节 水平井试井实例摘要	(399)
一、水平井压力降落试井分析实例	(399)
二、水平井压力恢复试井分析实例	(405)

三、水平井试井典型曲线拟合分析实例	(407)
四、水平井矩形双曲线试井分析实例	(410)
附:本书所用非 SI 单位与 SI 单位换算表	(413)

第一章 概 述

本章着重概述水平井钻井完井的特点,水平井的应用情况和水平井采油工艺的研究与发展。其目的在于了解水平井钻井完井的方法和意义,了解水平井的应用及发展水平井的重要性和经济性,为推广应用水平井提供认识基础。

水平井完井和开采技术虽然滞后于水平井钻井技术的研究和发展,但水平井完井和开采技术的研究速度很快,尤其近几年来得到了迅速发展。水平井完井和开采技术的发展,又促进了水平井钻井技术向更高层次发展和完善,使水平井综合经济效益得到显著提高,使水平井技术显示更为强大的生命力。

第一节 水平井钻井完井发展回顾

一、水平井钻井技术发展简况

早在 1863 年瑞士工程师列晓在阿尔斯山修建铁路隧道时就提出了水平井钻井的建议。在这一时期,俄国采矿工程师 C. P. 沃依斯拉夫也在研究定向钻井和水平钻井的技术。1882 年,美国在加利福尼亚州圣巴巴拉的 1 口直井中侧钻了一斜向井眼,这也许是最早的定向井。

钻水平井来提高油气井的产量和油气田采收率的试验早在 20 年代就已经开始了。当时是在直井中侧钻短半径短位移水平排液井,的确提高了产量,获得了良好经济效益。但是,由于受钻井设备、工具和工艺技术的限制,极大地限制了水平钻井的发展应用。50 年代,由于出现了肘节式钻具,即柔性钻具,使短半径水平井朝着实用方向前进了一大步。1954 年,前苏联钻成了第 1 口 90° 的分支水平井。50 年代,前苏联共钻了 43 口水平井,并做了大量研究。由于当时仅着重研究钻水平井的工艺技术问题,忽视了水平井油藏工程和完井及开采技术的研究,从而得出了水平井技术上可行、经济上不可取的结论,致使水平井的研究与发展停滞了近 20 年。

60 年代,中国和世界上一一些国家也进行了水平井钻井技术的研究并钻成了水平井,但都因钻井投资大,施工工具和监测仪器落后,加之大多开采效益不佳而使其搁浅。因此,60 年代后期至 70 年代中期世界上水平井钻井急剧减少。

70 年代末期,随着许多油气藏的枯竭,石油价格上涨,人们对水平井钻井重新产生了浓厚兴趣。在此期间,人们对过去水平井效益低下的原因进行了系统分析。开始重视水平井油藏工程的研究和水平井工具及监测仪器的研制,钻成了一批有价值的水平试验井。具有代表性的为加拿大冷湖油田的冷湖 1 和冷湖 2 两口水平井,以及法国在 Rospo Mare 油田的拉克 90、91 水平井。

80 年代以来,随着科学技术的发展,在水平井油藏工程研究中采用了计算机数值模拟方法;在水平井专用工具方面研制了导向钻井马达、单双弯壳体马达、铰接式马达及金刚石钻头;在水平井专用监测仪器方面,先后研制了单多点照相测斜仪, SST、DOT 等有线随钻

和 MWD 无线随钻等先进的监测仪器;在钻井液方面先后研制并推广应用了油基泥浆、生物聚合物泥浆、油包水泥浆等。另外,在井眼控制技术、井眼净化、测井和完井方面也进行了系统研究。因此,80 年代以来,不仅水平井口数急剧增加,水平井效益也显著提高。水平井增产幅度为直井的 4~20 倍,水平井钻井成本下降到直井的 1.5~2 倍。

进入 90 年代后,水平井钻井在世界范围内展开,水平井变得比较容易实施,水平井成为对勘探、开发具有革命性的一项技术,并进入工业应用的发展阶段。

可以预料,随着水平井的广泛应用,水平井钻井将带动整个油田开发技术的发展,水平井将成为提高原油产量和最终采收率的重要手段,水平井口数将以惊人的速度迅速增加,90 年代将是水平井高速发展的时代。

二、水平井完井技术发展简况

水平井完井技术包含着大斜度段固井技术、水平段固井技术、水平段各类筛管完井技术、测井和射孔技术等。

水平井完井大多采用裸眼和筛管完井。水平井固井近几年通过大量室内研究之后才开始现场应用。至于水平井段裸眼砾石充填完井的商业性服务还只有少数几口井。

由于研制了有效的降失水剂和降析水剂,完善了固井工艺,80 年代末在大斜度井段和水平井段已能成功地进行固井作业,这为选择性完井和生产创造了条件。

到目前为止,许多水平井,尤其是裂缝性碳酸盐层中的水平井仍然采用裸眼方式完井,这种完井方式最简单、最经济,但不能进行选择作业和生产,油井生产控制程度低。

割缝筛管(割缝衬管)完井,目前仍普遍使用,约占 40%左右,这对于较为松散,有一定程度出砂的水平井的完井是一种较为经济有效的方法。但是,生产中地层坍塌造成筛缝被堵降低渗透率而严重影响产量是这种完井方法的最大弊端。

预充填筛管完井优于割缝筛管,具有较好的防砂性能,但是生产管柱尺寸受到限制。

管外裸眼砾石充填完井,是较为完善的水平井防砂方法,但对于特别松散的地层有可能因为井眼巩固问题而无法完成填砂作业。

另外,普遍使用了各种类型的管外封隔器。这对于提高固井质量,增加管外的封隔程度都将具有重要作用。国外在完井管柱中较为普遍地使用了各种类型管外封隔器,这对于分层作业和分段生产具有重要意义。

目前,水平井完井技术的研究与发展已提高到了相当的程度,已基本能满足水平井采油工艺的要求,为水平井的进一步发展起到了重要的推动作用。

水平井测井和射孔也是水平井完井的另一项重要内容。通过近 10 年的研究和发展,目前已形成了钻杆、油管和挠性管传送的几大类测井与射孔系统。目前,已能全面完成大斜度井段和水平井段的测井与射孔作业,为水平井的资料录取、固井技术和油藏评价的发展起到重要促进作用。

总的来讲,水平井完井技术是近几年才发展和完善起来的。尽管发展较晚,但现代科学的发展较大地促进了这类技术的发展速度,使其成为现代水平井技术的重要组成部分。

第二节 水平井应用简况

一、水平井用途分类

就水平井的应用范围而言,其用途主要有:

采油井 以开采油气为目的,采用水平井可提高单井产量和采收率。

注入井 提高注水或注汽量以增加地层能量和热量,提高石油和天然气的采出程度。

采水井 主要用于提高地下水的产量和注汽冷凝水的排出量。当注汽热采井井下积水过多时可采用水平井加大排水量,达到排水采油的目的。

工程井 即过江管线水平井、煤矿排出瓦斯气体水平井和地下煤碳气化水平井等。

二、水平井应用情况

用于采油的水平井的总目的是提高单井产量和最终采收率,具体应用中可分为地层需要的水平井和采油工艺需要的水平井。

(一)适合钻水平井的地层

1. 开发低渗透油气藏

低渗透油气藏一般系指石灰岩、白云岩、页岩、致密砂岩等孔隙度小、渗透性差的油气藏。过去,提高这种产能很低的低渗透油气藏的油气渗流能力的行之有效的方法是进行水力压裂。而水力压裂作用范围和有效程度仍受到诸多因素限制,并且产量稳定期较短。长期研究和实践表明,在这类油藏中钻水平井是更好的办法。其优点为:

1)增加泄油长度

一般地讲,水平井钻 500~1000m 的水平段是比较容易的,然而要压裂这么长的裂缝几乎是不可能的。

2)增大传导率

水力压裂的裂缝无论长度多长,流动阻力都相当大,然而水平井中流动阻力却非常小。

3)有利于改善油气供油通道

水平井眼可以与储层中天然裂缝连通,从而增加供油通道,提高单井产量。

4)有利于提高水力压裂效果

在水平井眼中进行压裂比在直井中进行压裂容易形成垂直裂缝,而且裂缝的长度可以进行适当控制。

4)减少开发井数量

由于储层段渗透率低,直井开发时,井距较小才能进行有效地开发,但投资高,效益差。采用水平井开发时,由于水平井段较长,作用面积较大,可大幅度减少钻井口数,从而可以获得显著经济效益和社会效益。

采用水平井开发低渗透油气藏的地区主要有美国东部的阿巴拉契亚盆地、科罗拉多、新墨西哥和宾夕法尼亚等地区,以及中东和丹麦等地。

美国东部阿巴拉契亚盆地泥盆系页岩中,4口未经增产处理的水平段长 610m 的水平井气产量相当于 16 口直井产量的 1.6 倍,相当于 23 口直井总产量的 95%。经过增产处理的水平井 10 年的产量可比未经增产处理的水平井多产 34%~47% 的天然气。

1986 年,Meridiar 公司在蒙大拿州钻了水平段长度分别为 475m、493m 和 438m 的 3 口水平井,成功地开发了厚度为 1.2~3.7m,渗透率为 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的石灰岩气藏,分别获日产原油 18.31m³、35.4m³ 和 28.3m³,日产天然气 1840m³、3115m³ 和 2520m³。

虽然,目前在渗透率 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的石灰岩油气藏中采用水平井获得高产,但是更多的实践证明,渗透率低于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时采用水平井开发没有经济价值。因此,采用水平井开发的油藏的渗透率应在 $5 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上为宜。

2. 开发天然裂缝性油气藏

采用水平井开发天然裂缝性油气藏是目前水平井的主要用途。因为大多数天然裂缝的方向基本垂直或近似垂直,当裂缝数量较少间隙较大时,直井钻遇裂缝的几率较低,甚至根本碰不到裂缝。然而,与裂缝方向垂直或夹角较大的水平井则可钻遇多条裂缝,故而产量剧增。

采用水平井开发天然裂缝性油气藏的实例很多,世界上的水平井大多用于开发天然裂缝性储层。例如:美国的水平井主要用于开发得克萨斯州的 Austin 白垩地层、威利斯顿盆地的 Baker 页岩储层、东部的泥盆系页岩层、密歇根州的 Niagaran 岩礁储层及非均质的 Artrim 页岩储层等。其中,得克萨斯州的 Pearsall 油田的实践表明,应用水平井开发裂缝性低渗透油气藏可以获得比直井高 4~20 倍的产量,并增加了最终可采储量。法国在意大利亚德里亚海上的 Rospo Mare 油田为一洞穴、孔洞与垂直裂缝交错的岩溶层油藏,次生孔隙度低,渗透率很高。采用水平井开发产量平均增加 4.6 倍,最高的达到 20 倍。世界其他地方也采用水平井开发天然裂缝储层,例如澳大利亚、前苏联等。

3. 开发薄层油气藏

在薄层均质油气藏的开发中,由于水平井的采油长度远远大于直井,因此水平井的产量远远高于直井。对于垂向渗透率相对较高(即 k_v/k_h 很大)的薄层油气藏,用水平井开发则效益更加显著。Joshi 分析表明,对于 30m 厚度的油气藏,只要 $k_v/k_h \geq 0.1$,水平井的产量则高于直井。

水平井之所以能有效地开发薄层油气藏,是由于水平井与油层接触面积增加,流速降低,故而驱动液流的压降也较低,因此水平井的采油指数可增加 4 倍以上,有的可高达 10 倍。水平井产量的增加幅度随着油层厚度的减少而增加。

4. 开发稠油油藏

直井注蒸汽吞吐和蒸汽驱开采稠油主要是靠热力降粘作用和储层与井或注采井之间的压差驱动流体的作用。直井蒸汽吞吐因注入量有限和热效的限制,受热的油藏范围小。促产效果随吞吐次数的增加而降低。改为蒸汽驱后,由于蒸汽与稠油的流度比很大,导致注采井之间汽窜而影响热力波及效率。再加上蒸汽与稠油的重力分离作用,注入蒸汽上抬从稠油顶部跨越,而出现越顶现象,造成早期汽窜,使蒸汽驱的波及效率与采收率进一步降低。

水平井稠油蒸汽驱可以克服或减弱蒸汽越顶问题。水平井靠注蒸汽增加重力排替作用的采油方法对于超级重质稠油油藏尤其适用。如将水平井与直井适当地结合起来,还可广泛地、因地制宜地用于各种类型的热采。

加拿大是最先采用水平井开采稠油的国家。加拿大和美国在水平井热采方面进行了系统研究和实验,提出了稠油热采数值模拟方法,从而得出了水平井可以比直井产量高 4~10 倍的结论。

5. 开发不规则油藏

有的油气藏孤立存在,地震探测很难指出准确位置,直井和常规定向井也很难钻到这类油藏。然而,采用短半径水平井可以从现有直井中侧钻进入油层,并可避免可能的水气锥进问题。

6. 开发边际油田

许多处于构造边际的油田和死油区,采用直井开发效益较低。采用水平丛式井的方式开

发则可降低钻前费用、管理费用,提高产量,获得较好的经济效益和社会效益。

7. 层状油藏

有些油藏属于层状,储油层之间有较薄的泥质隔层,为了提高油井的生产效率,水平井应尽可能多地穿透油层。此类水平井在油层段有一近 90° 的水平段,其井斜角一般在 $86^\circ \sim 90^\circ$ 之间。

(二) 适合钻水平井的采油工艺

1. 减缓气水锥进

采用直井开发底水油气藏或气顶油藏时,很容易发生水锥或气锥。在这类油气藏的上或下部钻水平井开发时,由于流体压力降较低,因而在一定采油速度条件下能防止或减少水或气的锥进,延长开采期。因此,水平井开发具有水锥或气锥进问题的油藏是最佳选择。

美国新墨西哥州的 Empire Abo 地区,在白云岩溶洞油藏中钻了几口泄油井以减小气锥影响。6 年来,泄油井产量是直井的 1.6 倍以上,而气油比却比直井低得多。这说明径向泄油井在减小气锥方面是成功的。

美国普鲁德霍湾油田,1986 年钻了 1 口水平段 426m 的水平井,目的在于减小气水锥进。该井投产后,气油比下降,产量 $1970\text{m}^3/\text{天}$,比该油田垂直井多 4 倍。采用常规井开发时,预计有 18 亿吨原油采不出,然而由于水平井可以提高初始采收率,因而水平井是控制锥进问题的有效方法之一。

挪威大陆架的 Troll 油田,常规井生产 2~3 天就会见到水或气的锥进。钻了 1 口水平段长 457m 的水平井后,该井能生产出两口直井的产量。1 口 610m 长的水平井的产量比 3 口直井还高。1989 年完钻的 31-2-16T 水平井产油 $411\text{t}/\text{d}$,为邻近垂直井产量的 10 倍以上。

2. 提高聚合物驱油效率

由于水平井能较大地提高注入能力和区域扫油效率,因此对于 2 次采油和 3 次采油,特别是对于聚合物和活性剂的注入十分有效。

法国巴黎盆地的 Chateaufrenard 油田,1986 年钻了 1 口水平井 CR163H 井,该井在生产过程中是唯一由于遇到注聚合物形成的油带而出现含水明显下降的井。在两年的 5700t 产油量中有 3100t 来自注入水尚未驱扫的油带或者第三次采油量。而且,这口井仍是全油田 120 口井中产量最高的井。这表明水平井是提高聚合物驱油效果的有效手段。

3. 改善水驱或注水

目前,世界大部分油田都是靠活跃的天然水层或人工注水进行开发的。采用直井开发时,每口井周围压力降明显,油水界面变形,水进入油井。如果采用水平井开发,压力降不像垂直井那样集中于某一点上,而是分布在很长的泄油井段上,压力降较小,从而有利于推迟水的突破和增加油井产量。

另外,水平井的泄油较为均匀,可使前缘比较均匀地排泄,因此更能显示出水平井的优越性。

第三节 水平井采油工艺特点

一、水平井常规采油

目前,世界上大多数水平井仍然采用常规技术进行采油。这里的常规水平井采油技术是

指自喷采油、注水采油和机械采油等。这些类型的采油,基本上可采用直井常用的采油技术。换句话说,是指除热采以外的一般采油技术。

水平井常规采油技术主要适用于除稠油油藏以外油藏的开采。一般地讲,常规采油不需要特殊的设备和措施,采油成本低。

水平井常规采油实际上是直井采油技术在水平井中的应用。直井所用工具有的直接可以利用,有的略加改进就可用于水平井。

最常见的水平井常规采油技术主要是自喷采油和机械采油两大类。

二、水平井热力采油

大多数稠油油藏需要借助于注入高温蒸汽对稠油加热降粘后才能进行开采。注蒸汽开采方式有:周期性蒸汽吞吐、连续性蒸汽驱和蒸汽辅助重力驱油几种。

稠油热采可在直井和水平井中进行,长期研究和实践表明,用水平井进行稠油热采比直井更有效。

(一)蒸汽吞吐

1984年,Coats描述了一个用于研究水平井注蒸汽的物理模型。同年,Cussis采用数值分析法对原油重度为 12°API ,油藏厚度 $h=30.5\text{m}$ 的油藏中的1口直井与1口水平井(水平井段长度为 256m)的蒸汽吞吐生产动态进行了研究。结果表明,水平井的累计采油量大约比直井高5倍。随着蒸汽吞吐周期增加,这种比值逐渐减小。

1985年,Cussis采用数值分析方法将3套不同的水平井网进行了比较。原油重度 12°API ,每套井网泄油面积 $3.2\times 10^5\text{m}^2$,油层厚度 30.5m 。其井网方案为:

(1)在油藏底部钻4对水平段 610m 的水平井,井距 66.4m 。目的是在两口井间形成线性驱动。1993年内可采出原始储量的27%。

(2)在油藏顶部和底部分别钻4口水平段长 610m 的水平井。其中两口相邻的线性驱动井之间的距离为 610m 。9年内可采出原始储量的26.5%。

(3)从 $3.2\times 10^5\text{m}^2$ 正方形区域的中心向外钻8口水平井。正方形对角线上的水平井比正方形中心线上的水平井长。9年内可采出原始储量的20.8%。

从上面分析来看,第1方案是最佳选择。

(二)蒸汽驱

1984年,Rial模拟了Kern River油田2口直井之间的蒸汽驱。油藏面积 $1.0\times 10^4\text{m}^2$,油藏厚度 $h=24.3\text{m}$ 。垂直注入井和生产井分别布置于立方泄油区相对两个面的中心,模拟了1口水平段 100m 的水平注入井和1口垂直生产井之间的蒸汽驱。水平井沿油藏底边注入,垂直井位于相对面的中心。5年内可采出原始储量的64%,与其相比的直井井网则仅可采出原始储量的51%。15年内水平井模拟采出量为原始储量的71%,而直井井网仅能采出58%。

1985年,Huang和Hight对几组水平—直井结合井网进行了数值研究。他们发现,7年内最好的井网可采出原始储量的72.2%。这种井网是:4口水平生产井和5口垂直注入井的组合。这4口水平井位于正方形四角处并向中心钻进,1口直井位于井网中心,其余4口分别布置在正方形四条边的中心。

Knosla和Cordell以及Jair等人的数值模拟结果表明,利用蒸汽驱来开采高粘油,特别是在两口相互平行的水平井之间进行蒸汽驱,其效果很差。