

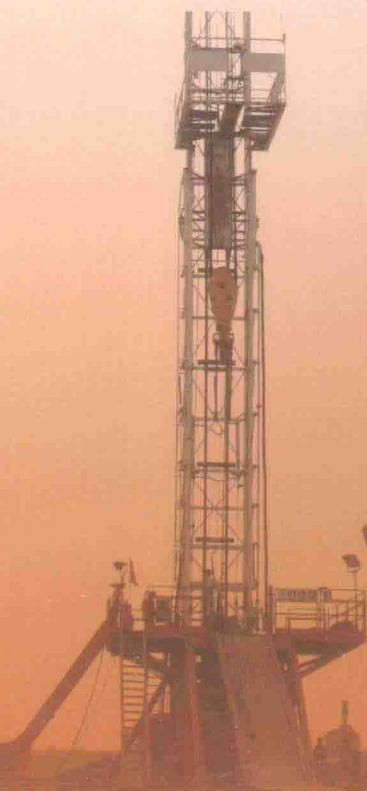
中国石化“十二五”重点科技图书出版规划项目

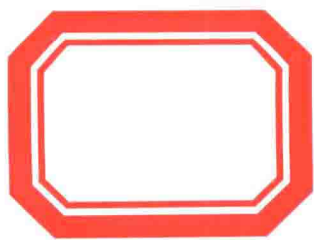
底水砂岩油藏水平井堵水 研究与实践

程晓军 李新勇 马洪涛 刘培亮 © 编著

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)





“十二五”重点科技图书出版规划项目

底水砂岩油藏水平井堵水 研究与实践

程晓军 李新勇 马洪涛 刘培亮 ◎ 编著

中国石化出版社

图书在版编目(CIP)数据

底水砂岩油藏水平井堵水研究与实践/程晓军编著.
—北京:中国石化出版社,2013.10
ISBN 978-7-5114-2426-6

I. ①底… II. ①程… III. ①底水油气藏-砂岩油气
藏-水平井-堵水-研究 IV. ①TE358

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第236363号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者
以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街58号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com

北京富泰印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092毫米16开本9.5印张154千字

2013年11月第1版 2013年11月第1次印刷

定价:38.00元

前言 / Preface

塔河底水砂岩油藏具有储层物性好、底水能量强、油层相对薄、储层非均质性强、以水平井开发为主的特点。随着开发时间变长，塔河油田底水砂岩油藏目前面临油井含水上升快、高含水井多等难题，因此水平井堵水是塔河油田碎屑岩油藏治水的主要手段。为了让广大油藏开发者了解底水砂岩油藏水平井治水思路及方法，在水平井产出特征研究成果的基础上，结合塔河油田水平井堵水发展历程以及各个阶段的成果认识，编写了本书。

本书分四章，第一章为水平井国内外开发现状，对水平井的发展历程及现状进行了说明。第二章为底水砂岩水平井产出特征研究，该部分主要是水平井产出特征方面的研究，同时结合生产实际中的认识，重点认识剩余油分布，为水平井堵水提供依据。第三章、第四章主要介绍了水平井堵水发展历程以及堵水手段，总结了各类手段的效果及认识。第一章由马海科、徐燕编写，第二章由程晓军、易斌、顾维力编写，第三章由马洪涛、刘培亮、李军编写，第四章由李新勇、刘洪发、杨松编写，全书由程晓军统稿。

在本书的编写过程中参阅了相关的书籍和资料，在此向这些作者致谢。由于编者的水平有限，本书定会存在不妥之处，恳请读者批评、指正。

目 录 / contents

第一章 水平井国内外开发现状	(1)
第一节 国内外水平井概况	(1)
第二节 中石化水平井开发现状	(4)
第三节 西北油田分公司水平井开发现状	(7)
第四节 底水砂岩油藏特点及塔河油田开发概况	(8)
第二章 底水砂岩水平井产出特征研究	(11)
第一节 大底水油藏油水运动规律研究	(11)
第二节 底水砂岩油藏水平井开发机理研究	(31)
第三节 底水砂岩油藏水平井监测技术应用及效果	(58)
第三章 底水砂岩水平井堵水技术研究	(71)
第一节 颗粒堵水技术	(71)
第二节 无机化学堵水	(88)
第三节 乳液类堵水	(93)
第四节 有机冻胶堵水	(116)
第五节 复合堵水实验	(132)
第四章 底水砂岩水平井机械堵水技术	(136)
第一节 机械堵水概况	(136)
第二节 水平井机械堵水技术	(138)
参考文献	(145)

第一章 水平井国内外开发现状

水平井，是指井斜角达到或接近 90° ，井身沿着水平方向钻进一定长度的井，井眼在油层中水平延伸相当一段长度(图 1-1)。有时为了某种特殊的需要，井斜角可以超过 90° ，“向上翘”。是通过扩大泄油面积提高油井产量和油田开发效益的一项开发技术。

水平井开采具有以下技术优势：

(1) 水平井增加了油藏的泄油面积，具有较高的采液指数；

(2) 能够抑制水、气的锥进，提供重力泄油的途径；

(3) 能够提高薄油气层的动用程度；

(4) 能够提高裂缝性油藏的裂缝钻遇率。

水平井技术已成为新油田开发、老油田挖潜以及提高采收率的重要手段，无论从油藏管理还是从经济效益的角度考虑，水平井都已成为石油工业中一项极富吸引力和竞争力的技术。

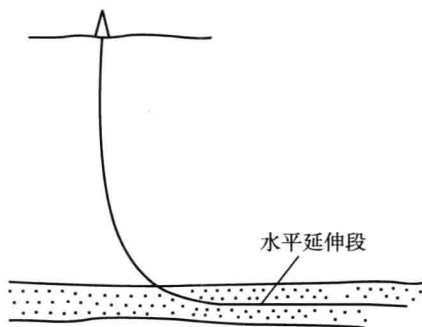


图 1-1 水平井轨迹示意图

第一节 国内外水平井概况

一、国外水平井概况

水平井最早出现在 1780 年的英国，在 1891 年水平井专利问世。水平井用于开发油气最早出现在美国，因钻井、完井等工艺技术不过关，加之油价较低而发展缓慢。直到 20 世纪 80 年代才开始大规模工业化推广应用，世界上水平井主要分布在美国、加拿大和前苏联等国家。

自 80 年代中期以来，随着全球对石油资源需求量的大幅增长以及随钻测量

技术、PDC 钻头(聚晶金刚石复合片钻头)、高效螺杆导向马达技术和新型录井及完井技术的发展,水平井开采技术由于其特有的优势而得到了迅猛发展。

统计表明,水平井建井预算成本是周围直井的 1.2~4 倍,平均为 3.2 倍,美国为 2 倍,加拿大为 2.2 倍,而其产量一般能达到直井的 3~5 倍,美国和加拿大的水平井比一般垂直井的累计产量多出 2~3 倍,而水平井第一年的产量则一般能达到垂直井的 3 倍以上,因此水平井技术具有相当的竞争力。

世界上水平井的数量迅猛增长:1989 年钻成水平井总数为 257 口,1990 年钻成水平井达到 1290 口,1995 年水平井钻成约 3000 口。截至 2000 年年底,世界上已有 69 个国家在各种油气藏中钻过水平井,总计达 23385 多口,其中,美国完钻水平井 10066 口、加拿大完钻 9665 口。以裂缝性油藏为主,约占 53%,其次是压制底水和气顶的水平井,约占 33%。

(1)中东:在沙特阿拉伯地区,水平井能够比直井累计产量增加约 125~250 亿桶,提高采收率 5%~10%。1993 年年底,阿联酋 ZAKUM 油田的 50 多口水平井增产原油约 2.6 亿桶,约占油田总产量的 25%。

(2)美国:美国利用水平井后,AUSTIN CHALK 油田的原油产量从 20 世纪 80 年代末的 7.5×10^4 桶/天增加到 1994 年 1 月的 27×10^4 桶/天;1993 年 12 月德州的 RATES 油田 1000 口井原油产量 5×10^4 桶/天,其中 46 口(总井数的 4.6%)短半径水平井产量达到该油田总产量的 14%。

(3)委内瑞拉:委内瑞拉的一个石油公司采用 101 口水平井日产原油增加了 61×10^4 桶。

(4)北欧:挪威地区石油产量的 30% 归因于使用了水平井钻井技术;在丹麦的海上油田,水平井综合技术的运用可望将最终采油量增加到 3 倍。

(5)俄罗斯:共对 58 个油田、19 个采油区进行了水平井开采,其水平井运用现状分析表明,俄罗斯与美国和加拿大等先进水平井技术存在一定的差距。1990 年至 1996 年 4 月共钻 311 口水平井。

(6)水平井技术的拓展应用:西德克萨斯油田,对水平井采用了混相驱技术;在加拿大的生物礁油藏中,也利用水平井进行了混相驱试验,上部有混相溶剂和下部有水垫的薄油层普遍增加了采收率;在加拿大还实施了一些使用单井或多侧向井进行蒸汽辅助重力驱的热采项目。

二、国内水平井概况

20 世纪 50 年代,继美国和前苏联之后,我国是世界上第三个开展水平井

钻井的国家。我国最早的工业水平井——磨-3井于1965年在四川钻成。限于当时的技术条件，这口水平井未取得应有的效果。20世纪70年代末至80年代，我国发现的大多数油气地质储量基本都是边缘油区的低压、低渗透油藏和稠油油藏，采用常规方法已经变得不经济；处于油田开发后期的东部老油田含水上升、水气锥进问题严重，水平井技术已经成为解决这些问题的重要技术途径。

1988年，Amoco东方石油公司在中国南海珠江口盆地29/04合同区块的流花11-1构造上钻成了海上第一口水平井——流花11-1-6井。截至1989年1月，在该构造上共钻井7口。经过试油证明，该油田是一个深水、油层浅、面积大、油稠、底水锥进快的礁块状油藏。该井采用当时世界上先进的导向钻井系统、顶部驱动钻井装置、MWD随钻工具以及低毒性矿物油基泥浆等工艺技术，仅用20天时间就完钻。经过180天的EDST(延长钻杆试油)测试发现，与直井相比，其底水锥进慢、产量高，含水也只有垂直井的一半。

1991年，在中国石油天然气集团公司的组织领导下，“石油水平井钻井成套技术研究”全面展开，并于1995年6月通过国家验收。这标志着我国的水平井技术开始了迅猛发展。1995年年底，陆上11个油田共钻成62口水平井，覆盖了6种油藏类型，且多数为中半径水平井。1996年至今，我国的钻井工作者陆续进行了开窗侧钻水平井技术、短半径侧钻水平井技术、欠平衡钻井技术、分支井钻井技术等方面的研究，初步形成了一套适合我国油田特点的水平井开采技术，对油田采收率的提高起到了至关重要的作用。

胜利油田是我国应用水平井技术最早的油田之一，截至“十一五”末期，胜利油田共投产1784口水平井，截至2010年已经累产原油 $1574 \times 10^4 \text{t}$ ，年产量超过 $290 \times 10^4 \text{t}$ 。胜利油田开发研制了适用于长、中、短半径水平井的六大钻井配套技术，成功地打出了水平探井、阶梯式多目标水平井、海油陆采水平井、开窗侧钻式水平井、双井连通、短半径和拱形式等10多种类型的水平井，应用效果显著，初期日产油量可以达到直井的2~5倍，最高可达10倍。

大庆油田水平井技术集成了油藏工程优化设计技术、井眼轨迹控制技术、钻井液与油层保护技术和采油工程等多学科先进技术，创造了油层段进尺最长、水平位移最大、钻遇储层最薄、单井产量最高等多项中石油水平井纪录。大庆南219-平320井，油层厚度0.5m，油藏钻遇率63.36%。大庆油田形成了一整套阶梯水平井的钻井完井技术，在外围“三低”油藏配套技术攻关上，油藏工程、采油工艺、地面工艺技术都取得明显进展，特别是特低丰度葡萄花油层水

平井开采技术的突破,为经济有效地开发油层厚度在 2m 以下的特低丰度储量带来了新的希望。

塔里木哈得油田属于“双层、超深、超薄”的海相薄层砂岩油藏,油层埋深超过 5000m,只有两个主要油层,厚度为 0.5~3m。采用双台阶水平井钻井技术,在薄砂层油藏布置的 20 多口油水井均获得了成功,平均单井日产量 60t。水平井产量占总产量的 30%。通过采用深层超薄油层双台阶水平井钻井技术、油藏精细描述技术、水平井注水开发等先进工艺技术,实现了边际油田的高效开发,特别是采用地质导向关键技术,从而使薄砂层油藏的开发成为现实。

综上所述,水平井技术是一项先进的开发、挖潜和提高采收率的重要技术,水平井及在水平井基础上发展起来的分支井、多层多底井技术必将成为未来石油工业发展的必然趋势。

第二节 中石化水平井开发现状

胜利油田于 1990 年引进水平井技术,在埕东凸起东北坡的地层不整合油藏完成第一口水平井——埕科 1 井。该井的成功完钻标志着中石化水平井从室内研究阶段走向现场试施阶段。经过多年的研究及应用,呈现出四大特点。

一、水平井井数逐年增加,年产油量大幅度提升

自 20 世纪 90 年代初引进水平井,经过 20 余年的发展。中石化年投产水平井占投产新井比例已升至近 20%,见图 1-2。水平井年产油量占当年总产量比例也由当年的不足 1% 升至 10%,水平井累产油量已超过 $2000 \times 10^4 \text{t}$,见图 1-3。

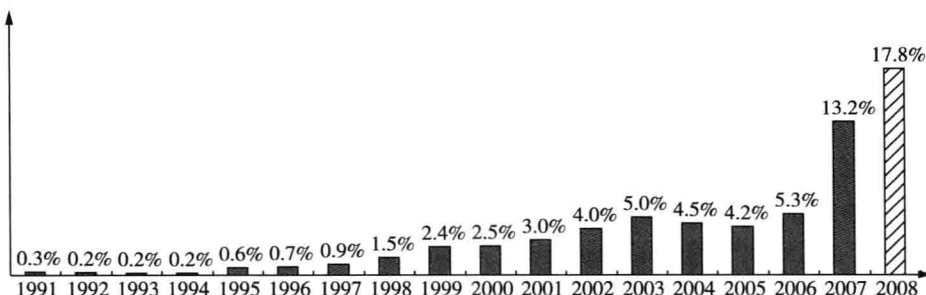


图 1-2 中石化年投产水平井占当年投产新井总数的百分比

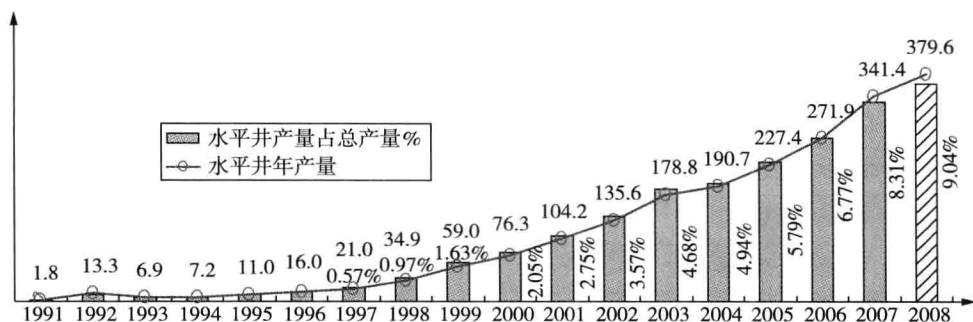


图 1-3 中石化水平井年产量占当年总产量的百分比

二、水平井应用井型向多样化发展

随着钻井配套技术的发展，水平井井型逐渐多样化，成功实现了水平探井、阶梯式多目标水平井、海油陆采水平井、开窗侧钻式水平井、双井连通、短半径和拱形式等 10 多种类型水平井的钻井，见图 1-4，应用效果显著。

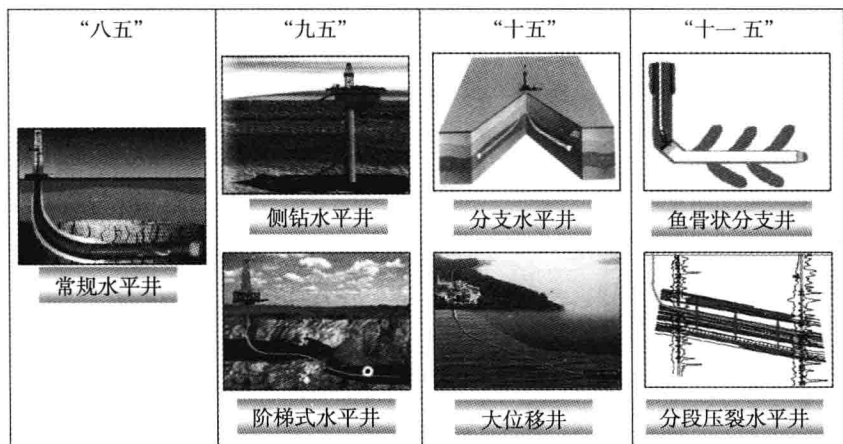


图 1-4 中石化水平井发展简史

三、水平井适用范围不断拓宽

水平井最初在地层不整合砂岩油藏试用，随着配套的钻井技术、完井技术、射孔技术及控水措施的不断改进与创新，实现了在各类油藏中的推广及应用。

目前中石化有 7 个油藏类型，共计 329 个油藏单元，水平井在各类油藏类型中均有广泛的应用，见表 1-1。

表 1-1 中石化水平井在各类油藏应用简表

油藏类型	单元数	水平井/口
中高渗透砂岩断块油藏	159	528
热采稠油-超稠油油藏	31	214
裂缝-缝洞型碳酸盐岩油藏	18	131
厚层正韵律砂岩整装油藏	56	172
低渗透-特低渗透砂岩油藏	60	108
地层不整合砂岩油藏	3	19
火成岩油藏	2	3

四、大力推广水平井，实现了飞跃与突破

自“八五”引入水平井以来，水平井投产井数及年产油量均有大幅提高。2007 年中石化水平井单井初期平均产量是直井的 2.7 倍，投资是直井 1.5~1.7 倍，见图 1-5，大幅提高了经济效益。

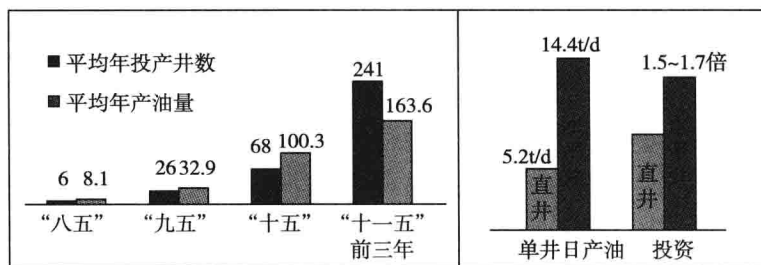


图 1-5 中石化水平井贡献产能逐年提高

在经历了“八五”的攻关研究、“九五”的快速发展、“十五”的扩大应用及“十一五”的创新发展后，水平井已逐步向深层及超深层油藏发展，向非常规及复杂油藏发展，成为了油气田高效开发的生力军。

第三节 西北油田分公司水平井开发现状

西北油田分公司(以下简称分公司)于1998年开始,首先在塔河油田采用水平井开发碎屑岩油藏,2000年又采用水平井开发奥陶系碳酸盐岩油藏。之后不断进行试验、发展、完善,水平井开发技术成为了油气田均衡、高效、持续开发的保障。

一、应用领域不断拓展

目前水平井应用领域已涵盖分公司所有油藏类型:底水砂岩油藏、弱能量边水油藏、岩性油藏、碳酸盐岩油藏和凝析气藏,实现了勘探开发和滚动评价并举。

二、应用规模不断扩大

近些年来,分公司每年投产水平井井数不断增加,在投产新井总数中所占的比重也逐渐增大。截至2009年年底,共有水平井389口,占总井数的41.34%,见图1-6。

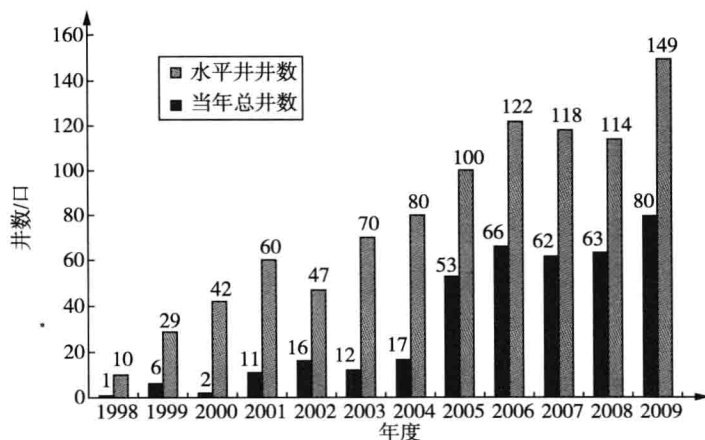


图1-6 西北油田分公司1998~2009年水平井与总井数对比

三、应用类型不断创新

水平井井型向多样化发展,由常规水平井逐渐发展为侧钻井、双分支水平井、双台阶水平井等,目前正向注入井方向转移。

四、应用水平不断提高

随着水平井开发效果优势日益显著，一系列水平井配套技术日趋成熟，结合多种钻井、完井、射孔技术，形成了不同类型油藏水平井多元化完井技术体系。

水平井已成为塔河油田持续有效发展的重要支撑技术。目前已开发的碎屑岩油藏有 12 个，多属于低幅度背斜(边)底水油藏，见图 1-7。针对塔河油田三叠系油藏油层薄、底水大的特点，形成了以水平井为主的开发模式。

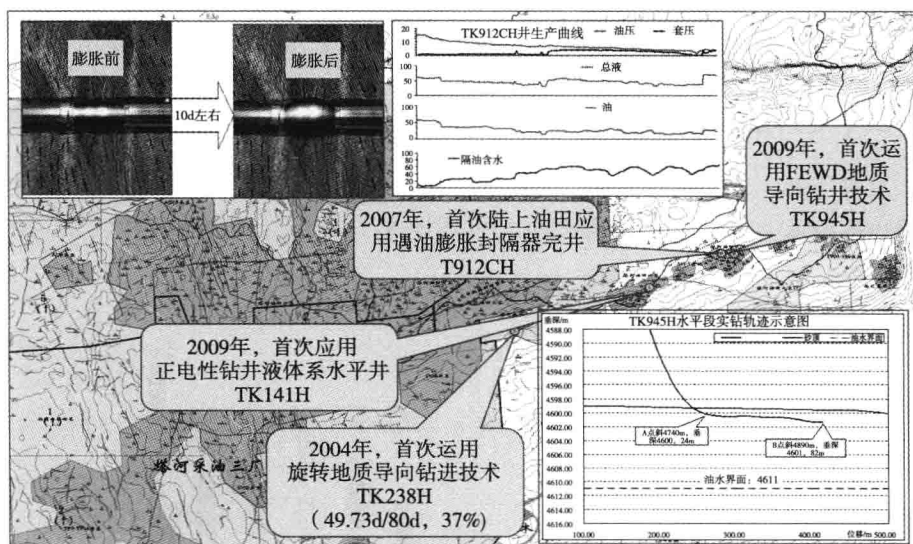


图 1-7 西北油田分公司水平井技术发展历程

第四节 底水砂岩油藏特点及塔河油田开发概况

一、底水砂岩油藏特点

底水砂岩油藏是指在油(气)藏中，整个含油(气)边界(缘)范围内的油(气)层底部都有托着油(气)的水的砂岩油藏。

底水油藏具有含油面积完全与底水接触的特点，这既是底水油藏在开发方面优于其他油藏的地方，同时也是底水油藏开发的困难所在。一方面，油藏与

底水接触面积大,使得底水侵入油藏的能力大大增强,开采原油所消耗的地层能量能够及时从底水中得到补充,大多数底水油藏的开发都表现出能量充足的特征;另一方面,底水的存在又给油井生产带来严重的产水问题,在其生产过程中,常常表现出见水早、无水采油期短、见水后含水率上升快甚至暴性水淹的现象,从而导致油藏的采收率降低,油田开采风险增大。

底水油藏的开发具有 4 个最显著的特征:

(1)存在底水的锥进或脊进。在井点周围形成水锥,在水平井周围则形成水脊,当水锥或水脊在井底突破后,油井即产水,见图 1-8。

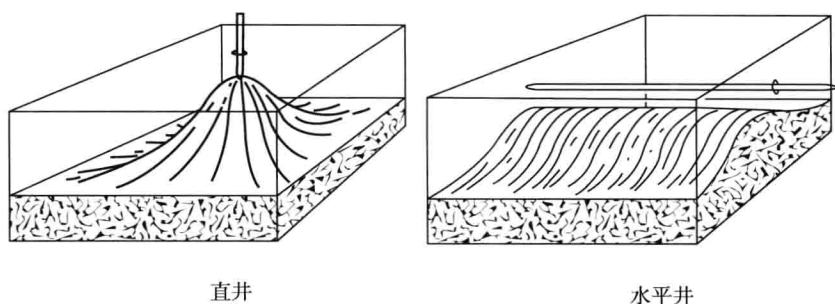


图 1-8 底水锥进或脊进示意图

(2)见水早,无水采油期短。由于射孔井段离底水的距离较近,因此,与边水油藏相比,开采底水油藏的油井往往见水较早,见图 1-9。

(3)见水后,含水率快速上升。油井见水之后,含水率快速上升,而日产油量则快速下降。

(4)高含水期长。底水油藏的可采储量一半以上都是在中-高含水阶段采出的,采油成本通常相对较高;而边水油藏的可采储量一半以上是在中-低含水阶段采出的,采油成本通常相对较低。

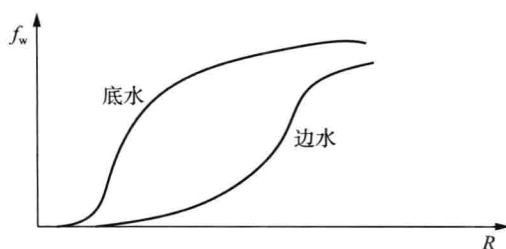


图 1-9 边、底水油藏含水变化规律示意图

以上特点都是底水油藏开发过程中的困难所在和不利因素,这些特点往往使得底水油藏的开采成本较高、开发效益低下,努力改变这些不利因素是底水油藏经营管理工作中提高开发效益的主要方向和工作内容。

二、塔河油田底水砂岩油藏开发概况

塔河油田底水砂岩油藏共有 8 个区块, 探明地质储量达到 $4000 \times 10^4 \text{t}$ 以上, 主要采用水平井开发, 标定采收率在 32% ~ 43%。从 1998 年正式开发以来, 经历了 2 次井网加密调整, 井网密度达到 3 ~ 4 口/km²。

塔河一区最具代表性, 为中孔、中 - 高渗孔隙型块状底水断背斜型砂岩未饱和油藏。储层为典型的辫状河三角洲沉积, 为单一砂体, 平均厚度达 200 m, 孔隙度为 17% ~ 23%, 平均为 21.1%; 渗透率为 $(32 \sim 2048) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $733 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 韵律层间平均渗透率级差大于 7, 层内渗透率变异系数大于 0.7, 层内非均质严重; 夹层不发育, 呈零星展布, 在局部具有遮挡底水作用, 属于中孔、中高渗的非均质型储层; 油藏埋深 4300m, 具有统一油水界面, 油水厚度比为 1:6 以上, 能量充足; 原油为中质油, 密度为 0.90g/cm^3 , 原始气油比为 $125 \text{m}^3/\text{t}$; 地层水矿化度高达 208g/L; 原始地层压力为 49.8 MPa, 饱和压力为 33MPa, 地层温度为 110 ℃, 属于常温常压系统。

随着油气田的开发, 水平井含水率持续上升。为实现油田的大幅提液, 造成底水锥进, 水平井水淹严重, 高含水水平井井数不断增多, 表现出低采出与高含水率的开发矛盾。

为了保证油气田高效、持续、均衡开发, 针对底水砂岩油藏的主要矛盾, 立足油藏精细化研究, 对目标油藏储层地质特征进行再认识, 分析水平井产能主控因素、产量及水淹规律; 开展底水油藏水平井开采数值模拟研究, 建立机理模型, 研制数值模拟软件, 预测油水产量及含水率变化, 分析剩余油分布及开采潜力; 不断完善底水砂岩油藏水平井综合治理技术研究, 对各类措施机理、现场运用效果进行总结, 形成一套具有塔河油田特色的底水砂岩油藏水平井堵水系列技术, 并进行推广应用。

自开展水平井堵水试验以来, 通过对不同堵水方式、堵剂进行试验, 逐渐实现了堵剂单一化向多样化发展、井筒向深部发展、死堵向活堵发展的转变, 以水平井堵水为手段, 稳油控水, 减缓产量递减速率, 提高采收率, 有效地改善了开发效果。2008 ~ 2012 年实施各类堵水 130 井次, 共计增油 $18.3 \times 10^4 \text{t}$ 。

第二章 底水砂岩水平井产出特征研究

对于底水砂岩油藏,分析水平井的脊进机理,进而确定其水淹规律是底水油藏水平井合理开发的理论基础。在对底水油藏水平井的水脊机理、生产规律及影响因素分析基础上,采用物模实验、数值模拟以及水平井测试相结合来分析水平井见水特征,以指导后期的水平井控水措施。

第一节 大底水油藏油水运动规律研究

塔河1区和KZ1区是塔河油田碎屑岩大底水油藏的典型区块,通过研究两个区块揭示大底水油藏油水运动规律。两个区块表现特征包括开发过程中油井的压力下降幅度较小、油藏的驱动能量充足,1区和KZ1区都不存在能量衰竭的问题。而影响油井产量递减的主要原因是水体锥进或脊进。

一、单井动态分析研究

(一) 水平井产能分析

自20世纪40年代起,国内外对水平井产能作了大量的研究,提出了一系列的产能公式。苏联学者Merkulov首次提出了计算水平井产能的解析公式,Joshi公司是一个拟三维公式,适用于拟径向流(泄油半径内不存在油藏边界)和平行流(井附近无液流边界)。目前应用最广的公式是Joshi(美国)于1986年建立的Joshi公式。

$$Q = \frac{2\pi k_h h}{\mu_o B} \left[\frac{\Delta P}{\ln \frac{a + \sqrt{a^2 - \left(\frac{l}{2}\right)^2}}{\frac{l}{2}} + \frac{h}{l} \ln \frac{h}{2r_w}} \right] \quad (2-1)$$

随后,很多人在Joshi研究的基础上提出了新的改进。其中吕劲公式基于三维推导得出,相比Joshi公式具备更加严格的理论基础。

根据产能公式,可以分析得出:与直井相比,在相同油层条件下,水平井的产能随着水平井水平段长度增加,油井与油藏接触面积增加,产量倍数亦有

所增加。在实际油藏条件下,水平井增产倍数受油层岩性变化、地层污染、水平井井筒内的压力降限制。在水平段长度相同情况下,低渗油藏的增产倍数高于高渗油藏。此外,增产倍数还受到偏心距、油层在纵向和垂向的渗透性差异、井筒半径等因素的影响。

由于水平井的产能高,生产相同流量的流体需要的生产压差小,从而可减弱边底水的锥进速度。因此水平井的无水产油期长于直井,这些因素正是促进油藏采用水平井开发的原因。

(二) 水平井递减规律分析

在分析油田动态形势过程中,通常引用两个概念,将产量递减划分为自然递减和综合递减。自然递减指上年老井无措施条件下的产量递减;综合递减指上年老井措施后的产量递减。即:

$$D_n = \frac{Q_{i-1} - (Q_i - Q_{xj} - Q_{cs})}{Q_{i-1}} \quad D_R = \frac{Q_{i-1} - (Q_i - Q_{xj})}{Q_{i-1}} \quad (2-2)$$

通过上述定义,拟合塔河1区的大多油井发现递减率超过15%(表2-1)。

表2-1 典型井的递减规律分析

井名	递减情况	评价
TK123H	拟合范围: 2008-03 ~ 2009-11	递减速度快
	月递减率: 6.62%	
	年递减率: 56.07%	
TK126H	拟合范围: 2008-03 ~ 2009-12	比较稳定
	月递减率: 3.11%	
	年递减率: 31.55%	
S41	拟合范围: 2007-01 ~ 2009-12	基本稳产
	月递减率: 7.72%	
	年递减率: 61.85%	
TK101H	拟合范围: 1998-12 ~ 2004-10	递减速度慢, 提高 产能后油井递减率 增加
	月递减率: 1.47%	
	年递减率: 16.31%	
	拟合范围: 2006-06 ~ 2009-12	
	月递减率: 3.22%	
	年递减率: 32.51%	