

低渗透油藏复杂结构井开采 技术与应用

——以鄂尔多斯盆地吴起薛岔区为例

张宁生 韩继勇 陈军斌 编著



石油工业出版社

低渗透油藏复杂结构井开采技术与应用

——以鄂尔多斯盆地吴起薛岔区为例

张宁生 韩继勇 陈军斌 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书从鄂尔多斯盆地吴起薛岔区的地质特性入手,详细介绍了复杂结构井的渗流机理和工程应用、钻井完井工艺技术、开采工艺和增产技术,以及在复杂结构井延长低渗透油田产业化示范的情况。

本书可供从事油气勘探、油气开发的科研和生产人员参考,亦可作为石油工程专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

低渗透油藏复杂结构井开采技术与应用:以鄂尔多斯盆地吴起薛岔区为例/张宁生,韩继勇,陈军斌编著. —北京:石油工业出版社,2012.4
ISBN 978-7-5021-8937-2

I. 低…

II. ①张…②韩…③陈…

III. 低渗透油气藏-油田开发-鄂尔多斯市

IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 021958 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www. petropub. com. cn

编辑部:(010)64523579 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2012 年 4 月第 1 版 2012 年 4 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:15.5 插页:6

字数:396 千字

定价:58.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

近年来,油气勘探开发对象日趋复杂,储量品位越来越低,低渗透油气资源在世界和中国油气资源中占的比例越来越大,低渗透油气田的有效开发已成为世界级技术难题。

复杂结构井技术是 20 世纪发展起来的技术,在世界各地迅速发展并推广,已经成为提高采收率和经济效益的主要技术手段,应用领域正在迅速扩大。复杂结构井可根据储层特征任意构造井眼形状,如水平井、多分支井、多底井、鱼刺式(羽状)分支井等,且能极大地增加泄油面积、降低采油强度,从而实现低渗透油藏的高效开发。

本书为“十一五”国家科技支撑计划项目《低(超低)渗油田高效增产改造和提高采收率技术与产业化示范》的部分研究成果。全书共分 7 章,其中第 1、2、6、7 章由韩继勇、王觉民撰写,第 3 章由陈军斌、张益撰写,第 4 章由李琪、倪维军撰写,第 5 章由胥元刚、蔡文斌撰写。全书由韩继勇统一修改、定稿,张宁生审定。

本书在撰写过程中得到延长石油集团研究院王书宝,吴起采油厂雷俊杰、齐宏鹏,川庆钻探工程公司长庆工程技术研究院陈炼军、王文斌、王兴建等人的热情支持和大力帮助。他们在现场施工、资料整理、书稿编排等方面做了大量的工作,在此谨向他们及所有关心和支持本书的领导、专家、朋友表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限,书中难免存在不足和错误,敬请广大读者批评指正。

编著者

2011 年 10 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究的目的与意义	1
1.2 研究内容	1
1.3 研究思路	2
1.4 研究方法与技术路线	2
1.5 完成的主要工作与成果	3
1.6 创新点	3
第 2 章 复杂结构井概述	4
2.1 复杂结构井基本理论	4
2.2 水平井技术	7
2.3 大位移井技术	9
2.4 多分支井、多底井技术	11
2.5 区域地质概况	13
2.6 延长油田概况	14
2.7 试验区概况	14
2.8 复杂结构井选井型原则	16
2.9 薛平 1 井地质研究及水平井设计	17
第 3 章 复杂结构井渗流机理研究及工程应用	25
3.1 水平井渗流理论研究	25
3.2 压裂水平井渗流理论	41
3.3 多分支井渗流理论	46
3.4 水平井井网优化设计	56
3.5 薛平 1 井区油藏数值模拟产能计算	65
第 4 章 复杂结构井钻完井工艺技术研究	81
4.1 延长油田已钻水平井的经验与认识	81
4.2 复杂结构井开发低渗油藏的关键问题	85
4.3 钻井工程设计	133
第 5 章 复杂结构井的开采工艺和增产技术	137
5.1 复杂结构井开采工艺	137
5.2 复杂结构井增产措施	160
第 6 章 复杂结构井开采工艺技术产业化示范	191
6.1 薛平 1 井钻井施工	191
6.2 薛平 1 井测录井施工	197
6.3 薛平 1 井固井施工	212

6.4 薛平 1 井压裂施工	217
6.5 薛平 1 井试油试采	227
6.6 示范性方案	232
第 7 章 结论与认识.....	236
参考文献.....	238

第 1 章 绪 论

1.1 研究的目的是与意义

通过复杂结构井井网结构优化设计、钻完井工艺技术、开采和增产改造工艺技术研究,开发出复杂结构井开采模式及配套技术,实现了复杂结构井在储层中的有效进尺 500m 以上、单井产量超过试验区块直井的 4 倍。

1.2 研究 内 容

1.2.1 复杂结构井井网结构优化设计及开发设计研究

- (1)复杂结构井渗流机理研究;
- (2)直井、多种复杂结构井的井网优化及井眼结构优化组合研究;
- (3)复杂结构井产能预测及数值模拟等技术;
- (4)试验区复杂结构井(薛平 1 井)钻井地质设计。

1.2.2 复杂结构井钻完井工艺技术研究

- (1)复杂结构井钻井工程设计研究;
- (2)复杂结构井开窗、侧钻技术研究;
- (3)复杂结构井井眼轨迹监测与控制及导向钻井技术研究;
- (4)复杂结构井井眼稳定性和井眼再进入能力研究;
- (5)复杂结构井完井方式优化选择与完井工艺技术研究。

1.2.3 复杂结构井开采工艺技术研究

- (1)复杂结构井井下举升结构、井筒举升工艺及技术研究;
- (2)低(超低)渗透复杂储层和复杂结构井条件下的增产改造技术研究;
- (3)低(超低)渗透复杂储层和复杂结构井条件下的注采工艺技术研究。

1.2.4 低(超低)渗透油藏复杂结构井开采工艺技术产业化示范

- (1)复杂结构井钻完井工艺技术产业化示范;
- (2)复杂结构井开采工艺技术产业化示范;
- (3)复杂结构井增产改造技术产业化示范;
- (4)复杂结构井条件下的注采工艺技术产业化示范。

1.3 研究思路

研究区储层为低孔、低渗—超低渗油层,非均质性强、小层垂向分层多、横向展布多变、连通性差,根据这些特点,我们确定了如下研究思路:

(1)进行研究区精细地质描述,研究沉积微相及砂体发育情况,细分油层,加强横向地层对比,搞清储层内隔层、夹层分布情况及主力储层物性变化趋势,研究区内地应力及裂缝规律和特点;

(2)通过四选(选区、选层、选井位、选方位)确定出薛平 1 井井位及钻井地质设计;

(3)依据研究区油层的小层细分、产能动态变化特征,针对性地研究和分析有效开发小层层系的配置关系;

(4)依据低渗—超低渗油层的岩性、物性、含油性特征,设计出井眼结构和注采井井下生产工艺流程,通过油藏数值模拟和理论计算设计出合理井网优化及开发方案;

(5)用斜导眼技术准确确定目的层深度,在此基础上开展复杂结构井钻井工艺设计,研究复杂结构井轨迹监控、井眼稳定等工艺技术,保证水平井准确入靶;

(6)根据延长油田以往 3 口水平井的经验,设计可行且有保障的固井设计及施工保证。

1.4 研究方法与技术路线

(1)理论与工程实践相结合。通过理论建模、数值模拟优化井网结构和井眼结构,在完成复杂结构井各项设计的基础上,实施复杂结构井的实钻和开采工作,通过实践,进一步完善适合于低渗—超低渗油层的复杂结构井渗流理论,从而指导产业化工程应用。

(2)物理模拟和数学模型相结合。基于低渗—超低渗油层的地质情况,以钻柱力学、流体力学、油藏工程、最优化原理等理论为指导,对复杂结构井井身结构和井网进行优化设计,并优化选择和设计完井方式与完井工艺。

(3)科研院所与石油生产企业相结合。西安石油大学与延长石油集团密切合作,同时拟寻求在复杂结构井开发应用中已积累一定经验的辽河、长庆等油田的外协,加快课题研究的进度,提高课题研究的水平。

(4)技术工艺与现场条件相结合。针对低渗—超低渗油藏开发的具体需要和特点开展攻关研究,保证井眼的储层有效进尺和井眼结构合理、固井质量优良率高。

(5)自主攻关和技术引进相结合。针对延长低渗—超低渗油层埋藏浅、非均质性强、小层垂向分层多等复杂情况,对井壁稳定、增产改造等关键技术进行重点自主攻关,同时创造条件引进随钻测井(LWD)、地质导向等新技术和装备,更好地完成薛平 1 井的井眼轨迹控制。

(6)采用地质解释、岩石力学评估、油藏模拟等多学科相结合的方法,应用先进的钻井技术,对包括水平井设计、工艺、钻井液、固完井技术及压裂改造技术进行设计,并结合油藏地质因素和产能影响因素评价对复杂结构井进行优化。

(7)以单井为研究对象,从渗流力学基础理论出发,结合高等油藏工程、油层物理、现代数学和现代计算技术等理论方法,考虑复杂结构井水平井筒内流动产生的压降,将油藏渗流与水平井筒内管流相耦合建立复杂结构井产能计算模型,提供一种符合生产实际的复杂结构井产

能分析理论,在此基础上对复杂结构井参数进行优化。

(8)以延长油田井资料为背景,完成1口低渗—超低渗油藏复杂结构井钻井、完井工艺、开采工艺及配套措施实施,并应用产能模型对井参数进行优化,根据实际结果对设计过程进行检验和修正,提出建设性结论和建议,形成低渗—超低渗透油藏复杂结构井开采工艺技术产业化示范。

1.5 完成的主要工作与成果

(1)通过油田实地调研分析,结合水平井及压裂技术的优化设计,完成了具有可操作性的钻井地质设计、钻井工程设计和分段水力压裂设计。

(2)在吴起油田薛岔区钻成了薛平1井,井身质量达到设计要求,水平段在油层中进尺619m,实钻水平井轨迹与设计符合率达到90%以上。

(3)薛平1井的固井质量优良率90%以上,水平段达97%,试采产量超过区块直井产量4倍以上。

(4)完成了薛平1井与周边6口注水井的“注采方案设计”及开采工艺技术措施和长达10年的预测方案。

(5)利用“长位移水平井+分段水力压裂”井型的精细油藏描述,钻井、完井工艺,增产改造等研究形成了适应延长低渗—超低渗油田开发的产业化示范配套技术。

(6)总结出水平井钻井地质设计必须遵循“四选”原则。

(7)复杂结构井的成功条件必须是地质—钻井—固井—增产措施的技术集成,相互配合,环环相扣。

1.6 创 新 点

(1)利用“长位移水平井+分段水力压裂”配套技术对延长低渗—超低渗油藏进行高效开发是可行的,该技术是提高单井产量和采收率的行之有效的技术措施。

(2)复杂结构井的选型应遵循以下三个原则:

①适宜的地质条件(陕北属低渗透油藏,不压裂不出油,所以只打水平井不行,必须水平井与压裂配合进行);

②当前技术水平(因侧钻,目前不适合;打分支井,陕北低渗油层非均质性强,不合适);

③经济安全。

(3)复杂结构井的成功条件:技术集成、紧密协作、环环相扣。

地质认识是基础——资料可靠,分层准确;

钻井工程是保证——方位准,深度准;

固井质量是关键——封得牢,不窜槽;

射孔压裂是核心——出油见效。

(4)现场施工中,坚持采用井眼轨迹控制技术(随钻地质导向技术——“MWD+自然伽马”),严格按设计施工,采取“监测—控制—调整—修改”手段,确保质量。

第 2 章 复杂结构井概述

复杂结构井是指在油藏开发目的层中完井段以水平或分支为主要井眼轨迹特征的井,主要表现在钻井技术、完井技术的复杂性和井身结构对油层渗流特征的影响,使得复杂结构井的产能关系与常规直井和定向井存在较大差异。也可以说,复杂结构井是用钻井手段提高油井产量和采收率的有效措施,特别是在薄油层以及剩余油和死油区的开发中尤为有效,从而可望对油气藏实行高效的立体式开发。

2.1 复杂结构井基本理论

2.1.1 复杂结构井的分类

复杂结构井按形态主要分为水平井、水平分支井、侧钻分支井等形式(图 2-1)。

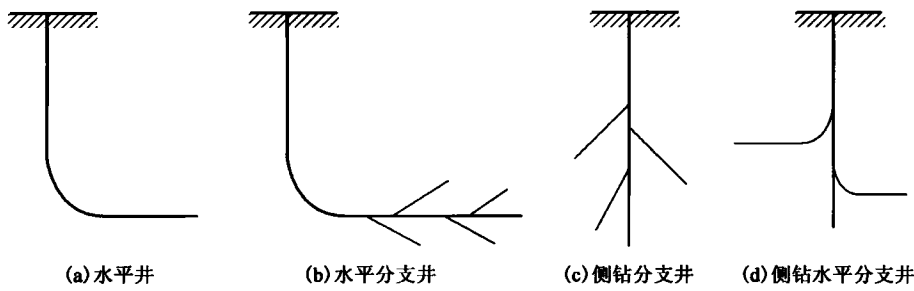


图 2-1 复杂结构井主要类型

2.1.2 复杂结构井的适用范围和优点

2.1.2.1 复杂结构井的适用范围

国际上一致认为复杂结构井是当今石油工业上游领域的重大成就和关键技术之一,并已在许多国家和地区实现了产业化,占总进尺的 10%~15%。复杂结构井的适用范围和主要作用见表 2-1。

表 2-1 复杂结构井的适用范围和主要作用

应用范围	主要作用
多层油藏	使单独开采没有价值的油层合起来开采
尺寸受限的油藏	用有限的水平段长度获得高的产量
多种泄油体形状	扩大水平扫油面积
分层油藏	扩大垂向扫油面积
对老井的多层侧钻	提高产量和采收率

续表

应用范围	主要作用
利用地质因素	提高产量
水、气问题严重	避水、避气,减小费用
多分支井注水	提高注水效率,增加水平和垂向的波及系数

2.1.2.2 复杂结构井的优点

(1)水平井和水平多分支井用于开发薄油藏油田和低渗透油藏,提高单井产量,提高采收率;

(2)开发以垂直裂缝为主的油藏,复杂结构井钻遇垂直裂缝的机会较常规直井和定向井大得多;

(3)开发重油、稠油油藏,用复杂结构井进行热采时,除扩大泄油面积之外,如进行热采,还有利于热线的均匀推进,减少或防止注入蒸汽超覆气窜,减少热损失,提高油气比和油水比;

(4)开发底水和气顶油藏,水平井和水平分支井可以减少水锥、气锥的推进速度,延长油井寿命;

(5)用复杂结构井作为探井,可钻穿多层陡峭的产层,相当于多口直井的勘探效果;

(6)在油田开发后期用复杂结构井可钻达死油区和剩余油区,提高产量;

(7)复杂结构井能够降低油气生产成本,主要表现在与常规直井和定向井的产量比高于成本比;

(8)一口复杂结构井可以替代几口直井,可减少钻井过程中的排污量。

2.1.3 复杂结构井的开发效果

国内大庆、胜利和辽河等油田低渗区块采用复杂结构井(主要是水平井及部分分支井),已取得了较好开发效果和经济效益。

大庆低渗透油田水平井开采实践表明,水平井的生产能力是同类地区压裂直井的3~6倍。如茂平1井于1994年10月射开4段2.0m后,采用限流法压裂投产,在近1a的时间里累积产油已达到7350t,平均日产油为20.14t。垂直井初期平均日产油只有3~4t(投产初期水平井的增产幅度达到了10倍),由于该井采用了早期注水,稳产时间长,递减幅度小,至1995年12月垂直井稳定日产量为1.8t,而茂平1井日产油为15t左右,仍然是直井的8倍。

胜利纯梁油田分布着几层以至几十层超薄特低渗油层,储量动用能力差。为了改善纯62区开发效果,在纯70-平1井钻井过程中应用了欠平衡水平井技术一次开发多层超薄油层,采用裸眼完井。投产后日产原油24t,是该区块邻井产量的6~8倍,增产效果非常明显。

中原文东油田2002年钻文92-平1井,水平段位移374.02m,钻遇油层段232.3m,投产初期日产液82.3t,日产油62.5t,含水24%,截至2003年6月31日,累计产油12518.5t,取得良好经济效益。

新疆焉耆盆地宝浪油田宝北区块某开发层为低孔、低渗油藏,平均孔隙度13.5%,平均渗透率 $30.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,该生产层直井初期日产油量平均为40t左右,而水平井(H3)初期产量是直井的3倍以上,H3井最高达130t以上。

辽河油田静17块属于低孔隙度、低渗透率油层。静17块共钻3口 $\phi 177.8\text{mm}$ 套管开窗侧钻水平井,静33侧平71日产油6t,静29侧平59日产油8t,静31侧平59日产油9t,比直井

高 4 倍以上,且水平井效益指数为 7 以上(远大于直井指数 2),经济效益非常明显。

长庆油田根据水平分支井主要适应于泥质含量高、渗透率低、油质稠等低产能的油层,在长 6 主力油层部署了 1 口水平多分支井——杏平 1 井(7 分支),分支长度 300~500m。通过该井区已开发井实施效果看,长 6 主力油层厚度在 8m 左右,油层稳定,渗透率 $(0.6\sim0.8)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,压力系数 0.7~0.8。杏平 1 井未进行任何增产措施直接试采,经过 2 个多月的抽吸,产量稳定在 8.0t/d 左右,较同一区块常规水平井单井产量提高了 2~4 倍,增产效果明显。

胜利油田 2006 年以埕北 26B-支平 1 井(4 分支)为试验井,尝试利用鱼骨状水平分支井技术开发馆陶组油藏。日产油达 100t,为周围油井的 3.3 倍,目前产量维持在 103t 左右。2007 年在适合区块进行了鱼骨状水平分支井推广应用,相继施工了垦东 34C-支平 1 井(4 分支)、垦东 34C-支平 2 井(2 分支)、桩 129-支平 1 井(3 分支)及营 451-支平 1 井(2 分支)等 4 口井,取得了显著经济效益。

渤海绥中 36-1 油田的 C 平台钻的 5 口水平分支井:SZ36-1-CF1 井,4 个分支,每个分支长 150m;SZ36-1-C25hf 井,2 个分支,每个分支长 150m;SZ36-1-C26hf 井,1 个分支,分支长 150m;SZ36-1-C27m 井,2 个分支,分支长度分别为 100m 和 150m;SZ36-1-C28m,2 个分支,每个分支长 150m。渤海绥中 36-1 油田的 5 口多分支水平井,每口井平均 2.2 个分支,分支长度平均 145m,平均产量为周围普通井的 4.6 倍。

2.1.4 复杂结构井的开发成本分析

研究分析结果表明,美国 Austin Chalk 地区和欧洲北海地区用直井、水平井、分支井开发,得到如下的“吨油成本”比值(图 2-2)。

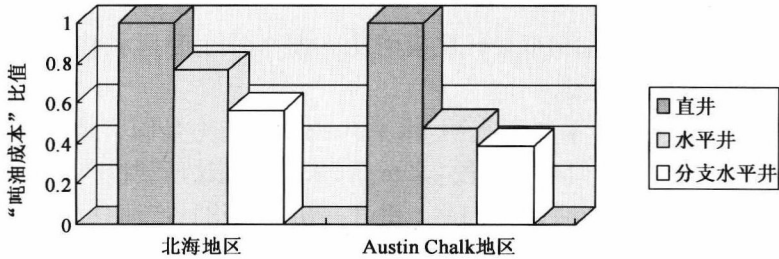


图 2-2 直井、水平井和多分支井“吨油成本”比值

从图 2-2 可以看出,用直井、水平井、分支井开发,得到的平均“吨油成本”比值为 1 : 0.67 : 0.48,水平井和分支井取得了很好的效益。

前苏联在 20 世纪 60 年代于乌克兰多林那油田钻成的 8 口多目标水平井,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,水平井的投入由早期相当于直井的 6~8 倍下降为 2~3 倍,甚至 1 倍多,而产量一般在直井的 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。

根据我国对“八五”期间科研攻关过程的 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;50 口水平井的总投资为 1.4421 亿元,截至 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。

应当指出,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,第一口水平井的成本比第2口高得多(第一口水平井往往比邻近直井高出2~4倍)。但随着后续的水平井数量增加,其成本可降至邻近直井的2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。这些数据说明:不能简单地根据在某一地区所钻的第一口水平井就对水平井钻井技术进行经济评价。另外,为了获得更高的经济效益,最好选择在一个地区钻多口水平井而不是单口水平井的方案。

2.2 水平井技术

2.2.1 水平井技术的特点

水平井技术产生于20世纪50年代,发展于80年代,特别是进入90年代以来,深入的研究及广泛的实际应用,使其日臻完善和系统化,成为前沿技术之一。

水平井是通过扩大油层泄油面积来提高油井产量、提高油田开发效益的一项开发技术。水平井开发技术适用于油田开发的全过程,对开发初期的油田而言,水平井具有产能高、建产能快、投资少、回收快的优势。而在油田进入开发中、后期直井挖潜效益差的情况下,利用水平井泄油面积大、生产压差小的特点,发挥水平井能够抑制含水上升、提高油井产能、提高采收率、节约钻井投资等优势,为已开发油田提供一种经济有效的挖潜途径和手段。在裂缝性油藏中钻水平井可以提高天然裂缝的钻遇率,获得比常规直井高数倍的产能;在有底水和气顶的油藏中应用水平井,可以降低水和气的锥进速度,延长无水采油期,合理利用油层的能量,提高油井的产量和采收率;在注水注气混相驱和聚合物驱中将水平井作为注入井,提高波及体积和驱油效率;在稠油开采中应用水平井提高蒸汽吞吐的周期产量和蒸汽驱的注气效率。

2.2.2 国外水平井技术的应用范围

(1)底水油藏。水平井可控制水锥,与直井相比有较高的临界产量和采收率。

(2)气顶油藏。水平井可控制气锥,与直井相比有较高的产量和采收率。

(3)底水气顶油藏。水平井开采兼具上述优点。

(4)断层遮挡油藏。被断层切割的高角度多有油藏,可利用水平井横穿多个油层。

(5)地层遮挡油藏。不整合面遮挡的直交多油藏,可利用水平井横穿多个油层。

(6)砂岩裂缝油藏。利用水平井横穿油层中的多条垂直裂缝,可大幅度提高产量,对基质低渗透油藏特别有用。

(7)夹层裂缝油藏。砂岩油藏中的泥岩夹层若有裂缝可形成夹层裂缝油藏,利用水平井可横穿这些裂缝,提高产量和采收率。

(8)不连续不规则岩性油藏。利用水平井有利于搜索这些油藏,或横穿多个含油单元,提高储量动用程度。

(9)地台型油田油水过渡带。相当于水平井开发底水油藏的作用。

(10)注水油藏未波及区。对于富含油的注水未波及区,采用水平井开发可扩大波及系数。

(11)需要提高采收率的油藏。采用点状垂直井与水平井相结合的方法,可提高注化学剂

等的波及程度。

(12) 水下或城市无法接近的油藏及因地面条件无法接近的油藏。可采用水平井开采。

2.2.3 国外总结的适宜水平井采油的油藏特征参数

(1) 油藏深度 500~5000m。国外一般认为浅油层(深度小于 1000m)打水平井不合算,因为对这类油层采用浅垂直井花费很低。

(2) 油层厚度大于 3m。根据国外的经验,油层厚度小于 3m 不宜钻水平井,原因是钻水平井准确定向困难且花费太大,特别是存在底水和气顶的薄油层。

(3) 水平渗透率与垂直渗透率比值 K_h/K_v 。根据美国标准,参数 $h(K_h/K_v)^{1/2} > 100\text{m}$;根据加拿大经验, $h(K_h/K_v)^{1/2} > 50\text{m}$,水平井生产不理想。为了扩大水平井适用的油藏范围,取较大的油藏参数 $h(K_h/K_v)^{1/2} > 100\text{m}$ 为适宜钻水平井的油藏参数标准。

(4) 地层系数大于 $20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$ 。致密厚层砂岩油藏不是水平井理想的对象。

(5) 原油粘度小于 $50\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。地下原油粘度大于 $50\text{mPa} \cdot \text{s}$ 的油藏,列入需热采的稠油油藏。

全世界的水平井井数为 45000 口左右,主要分布在美国、加拿大、俄罗斯等 69 个国家,其中美国和加拿大占 88.4%。水平井钻井技术已日趋完善,并以此为基础发展了水平井各项配套技术。目前,国外水平井技术的发展主要有以下两大特点:一是水平井技术由单个水平井向整体井组、多底井、多分支水平井的转变;二是应用欠平衡钻井技术减少钻井液对油层的浸泡和损害,加快机械钻速,简化井下矛盾,使水平井、多底井、多分支井在较简化的完井技术下就可以达到高产。

2.2.4 国内水平井技术

中国是发展水平井钻井技术最早的几个国家之一。20 世纪 60 年代中期在四川打成了磨 3 井和巴 24 井两口水平井,但限于当时的技术,未取得应有的效益,直到 1988 年,水平井开发技术才又重新兴起。我国在“八五”和“九五”期间开展了对水平井各项技术的研究和应用,并在不同类型油藏中开展了先导实验或推广应用,取得了很多成果。1965 年到 2000 年底,中国石油天然气集团公司和中国海洋石油总公司总计完钻水平井 900 余口。绝大部分水平井较直井显示了巨大的优越性,并形成了一整套综合性配套技术,目前已作为常规钻井技术应用于几乎所有类型的油藏,钻井成功率为 94%,项目成功率为 71.9%,都取得了良好的开发效果和经济效益。水平井与同期调整井或周围直井相比,钻井费用约为直井的 1.5 倍,产量约为直井的 2~5 倍,单井增加可采储量约为直井的 2~3 倍。

目前已经形成了水平探井、三维绕障水平井、长裸眼水平井、巷道式水平井、多目标水平井、台阶式水平井、连通式水平井、开窗侧钻水平井和分支井等水平井、分支井钻井成套技术,也都取得了显著效果。

但是应该清楚地看到水平井技术的发展还有很多不完善的地方,突出的一点表现在目前水平井、分支井、多层多底井地下渗流机理研究落后于钻井技术,许多传统的开发原理和开采工艺技术已经不再适用,有些设计计算方法不精确,这些问题严重影响了水平井技术的推广与应用。为了适应水平井技术的发展和应用,必须对水平井、分支井、多层多底井的渗流机理、整体和单井优化设计、物理模型和数值模拟,以及作业工艺设备和配套工具等进行重点攻关、系统研究,逐步形成和建立一套完整的水平井、分支井、多层多底井的开发理论。

需要特别指出的是,用水平井开发低渗油藏目前已取得较好的经济效益,在全国陆上动用的石油地质储量中,低渗透(渗透率 $<50\times10^{-3}\mu\text{m}^2$)油藏储量占 11%左右;在探明未动用的石油地质储量中,低渗透油层储量占 50%以上;而在近期探明的石油地质储量中,低渗透油层储量占 60%以上。因此,低渗透储层在当前及今后相当长的一段时间内,将会成为我国石油开发的主战场,加强对低渗油藏的认识,掌握快速、高效开发低渗油藏的方法,具有重要的理论和实际意义。

用水平井开发低渗透油田不仅能够实现提高单井产量,而且能够提高油藏最终采收率。低渗透油藏的地质条件越接近下列条件,开发效果越好:

- (1)单层含油砂岩要有一定的厚度,最好能够大于 6m;
- (2)储层的渗透率一般要大于 $0.8\times10^{-3}\mu\text{m}^2$;
- (3)含油层的流度应大于 $0.5\times10^{-3}\mu\text{m}^2/\text{mPa}\cdot\text{s}$;
- (4)储层中具有比较发育的天然裂缝,或能通过后期压裂形成较好的人工裂缝系统;
- (5)如果要部署完善的注采系统,目的层的分布面积应大于 0.5km^2 ;
- (6)目的层分布稳定,均质性好,具有一定的可采储量;
- (7)直井具有产能,且能维持正常生产;
- (8)油层内部应没有泥岩夹层,或仅有较薄的具有渗透能力的夹层;
- (9)层状油藏应有良好隔层,以防气、水过早进入油藏。

在垂向渗透率较低或者地层伤害较大时,许多低渗透地层区的水平井没有达到预期的产量,需要有效的增产措施。而水平井压裂可以在垂直渗透率低的地层中压开垂直裂缝,增加垂向渗透率,从而提高水平井的生产能力。在层状油藏中,沿着井筒产生垂直裂缝,可以将不同深度的不同产油层连接起来,达到消除地层伤害、油气增产的目的。通常需要压开多条裂缝来增加油气渗流通道,提高水平井的单井产能。水平井压裂作为水平井的一项新技术,在开发低渗透油气田方面将有很大发展潜力。压裂水平井增产技术在中高渗油藏的应用中已经取得了很好的效果,但在低渗油藏此项增产技术还不太成熟。通过调研国内低渗油藏压裂水平井的开发实例,对比分析了压裂水平井与直井的开发效果,结果见表 2-2。

表 2-2 低渗油藏压裂水平井与直井开发效果对比

油 田	大庆油田 外围油藏	胜利纯梁油田 纯 62 断块	长庆安塞油田	辽河油田静 17 块	中原文东油田
渗透率($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	3~12	<10	0.3~2.8	59.7	18
同区块压裂水平井与 直井产量之比	3~6 倍	6~8 倍	2.5~3 倍	>4 倍	明显增产

2.3 大位移井技术

2.3.1 大位移井概述

20 世纪 80 年代末,随着水平井钻井高潮的到来,也促进了大位移井技术的发展。在 1994 年第 69 届钻井会议上,大位移井成为讨论的主题之一。钻大位移井的主要原因是基于经济上的考虑,在海洋及滩海油气勘探和开发中,可节省近三分之一以上的费用,并能大幅度提高油

气采收率。

大位移井目前有两种定义:一种是指测深等于或大于垂深 2 倍的定向井或水平井(第 14 届世界石油大会上提出),另一种是指水平位移等于或大于垂深 2 倍的定向井或水平井(来源于英国的 BP 公司和美国的 ARCO 公司)。大位移井具有很长的大斜度稳斜段,大斜度稳斜角称稳航角,一般大于 60° ,大位移井中,当井斜等于或大于 86° 延长段的井称为大位移水平井,当测深大于垂深 3 倍时,则称为特大位移井。为了适用于多种类型油气藏,从方位角不变的大位移井又发展出了变方位角的大位移井,这种井称为多目标三维大位移井。大位移钻井技术实际上也是目前世界上石油勘探与开发领域最先进的钻井技术。

2.3.2 大位移井适用范围

(1)海上油气田。目前国内外开发海上油气田,多采用常规定向井、丛式井钻井,这种打井方式需要的钻井平台数量多,投资大。如果采用在人工岛或固定平台上钻大位移井,可以节约大量投资。

(2)对于靠近海岸的极浅海油田。过去开发这类油气田需要建造人工岛、固定钻井平台,或用活动钻井平台打井。现在,国外凡距海岸 10km 左右的近海油田均可从陆上向海上钻大位移井进行勘探开发,代替复杂的海底井口,节省海底设备,节约作业投资,实现海油陆探和海油陆采。

(3)若对几个不相连的小断块油气田钻一口或两口大位移井开发,可节省投资,便于管理。对于几个油气田,油气层不在同一深度,方位也不一样,可钻多目标三维大位移井,以节省成本。

(4)埋藏于环保要求高的地区的油气藏,该类油气藏钻井施工困难,利用大位移井可在环保要求不太高的地区钻井。

(5)地面障碍油气田。对位于城市与乡镇所在地、大型水库等地面设施以下的油气藏,应用大位移井远距离打井,不仅可以使这些油气藏得到开发,而且还可避免地面障碍及噪声和环境污染。

(6)裂缝性油气藏。在精细地质研究查清裂缝发育方向及分布范围的基础上,采用大位移井水平段垂直或大角度钻遇尽可能多的裂缝,使所穿过的裂缝沟通,从而增加储集空间的连通性和储集层渗透率,提高产量,获得可观的经济效益。

(7)“上气下油”有底水的油气藏。该类油气藏储量动用困难,开采难度较大,可采用大位移井技术,使水平段在气油界面和油水界面之间钻进,增加泄油面积,提高采收率。

(8)互不连通的多个储集砂体。该类油藏如若分别钻井投入资金大,经济效益差。在精细地质研究查清砂体延伸范围及分布规律的基础上,采用大位移水平井或采用多目标三维大位移井技术钻穿不同砂体且在油气富集段射孔,可节省投资。

2.3.3 大位移井技术现状

目前,大位移井在国外已有了广泛的发展。我国大位移井钻井起步较晚,在技术和装备上与国际先进水平仍存在很大的差距。但近年来已有长足发展。

埕北 21-平 1 大位移水平井是我国第一口水平位移突破 3000m 的陆上水平井,也是胜利油田第一口采用悬链线剖面设计的大位移水平井,该井水平位移 3167.34m。2002 年 6 月在冀东滩海完钻的北堡西 3X1 井水平位移超过 3000m,完钻井深 4189m,完钻垂深 2452.16m,

水平位移 3049.79m,最大井斜角 67.18°。

2008 年大港油田陆上水平井位移最大、水垂比最大的大位移井——庄海 8Nm-H3 井,第一井眼完钻井深 5338m,垂深 1579.86m,水平位移 4639.62m,水垂比 2.94;第二井眼水平位移 4196.35m,垂深 1071.06m,水垂比 3.92。

2.3.4 大位移井技术特点

大位移井的技术关键是井眼轨道设计、钻柱设计、扭矩和摩阻、井眼稳定技术及井眼清洗技术、完井技术等 6 方面内容。

大位移井不同于水平井的一个显著特征是斜井段长,特别是大斜度井段,往往在 3000m 以上。因而,大位移井的钻井难度及影响井下安全的各种因素主要处于大斜度长裸眼稳斜段。

大位移井的水平位移越大,所需的特殊技术越多。世界上创纪录的大位移井基本上使用了随钻测斜工具 MWD、随钻测井工具 LWD、地质导向工具 GST 和导向钻具(如 PowerDrive、软扭矩系统)等。这充分表明,大位移井技术是目前国内外钻井技术水平的综合体现。

2.4 多分支井、多底井技术

2.4.1 多分支井、多底井技术概述

分支井技术是随着水平井、大位移井、老井开窗侧钻等技术发展的综合技术。

多分支井是指在一口主井眼的底部钻出两个或多个进入油气藏的分支井眼(二级井眼),甚至再从二级井眼中钻出三级子井眼。主井眼可以是直井、定向斜井,也可以是水平井。分支井眼可以是定向斜井、水平井或波浪式分支井眼。多分支井可以在一个主井筒内开采多个油气层,实现一井多靶和立体开采。多底井是指从一个直井眼中定向侧钻出多个分支井眼的油气井。

2.4.2 多底井、多分支井的类型

目前,Baker Hughes 公司已经完善了一套多底井、多分支井钻井完井系统,主要有以下 6 种类型:

(1)主井眼和分支井眼均为裸眼,进入分支井眼和后期采油受到限制,主要适用于胶结性好、不易坍塌的油藏;

(2)主井眼为套管,分支井眼为裸眼中丢入筛管,不固井,结合部位自由,无机械性连接,具有一定的重新进入分支井眼的能力,主要适用于胶结性好、不易坍塌的油藏;

(3)主井眼为套管,分支井眼为裸眼中丢入筛管,不固井,结合部位有机械性连接,具有重新进入分支井眼的能力,主要适用于胶结性好、不易坍塌的油藏;

(4)主井眼为套管,分支井眼中筛管顶部注水泥固井,结合部位具有水力完整性但不具有水力密封性,可以重新进入分支井眼,对油藏的胶结性无限制;

(5)主井眼为套管,分支井眼中筛管顶部注水泥固井,结合部位具有水力完整性和水力密封性,能一井分采,可以重新进入分支井眼,对油藏的胶结性无限制;

(6)主井眼为套管,使用井下分离头钻出分支井眼,分支井眼为筛管顶部注水泥固井,结合部位具有水力完整性,对油藏的胶结性无限制。