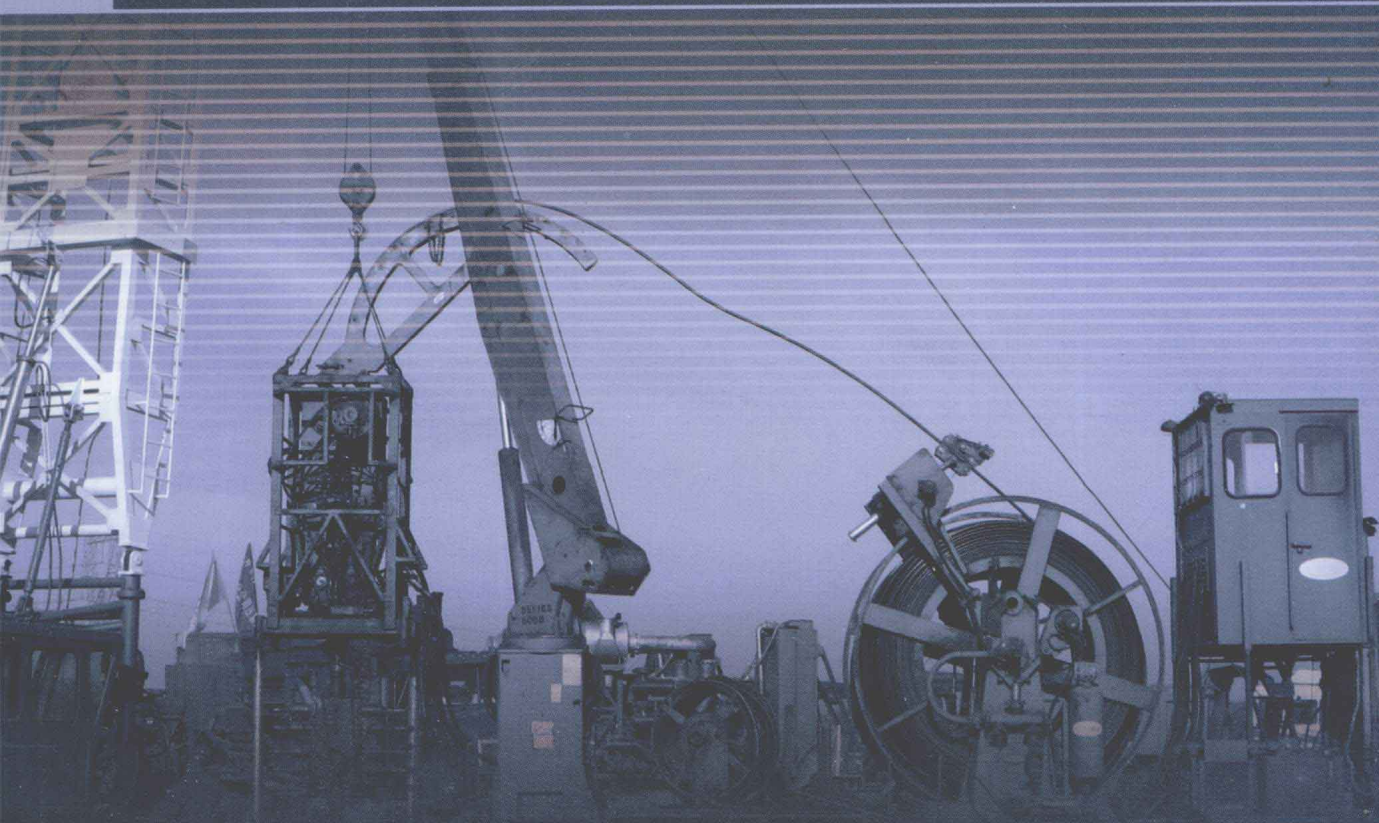




中国石油天然气股份有限公司

水平井分段改造技术论文集

中国石油天然气股份有限公司勘探与生产分公司 编



石油工业出版社

Petroleum Industry Press

中国石油天然气股份有限公司 水平井分段改造技术论文集

中国石油天然气股份有限公司勘探与生产分公司 编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书介绍了水平井压裂酸化基础理论研究, 配套工具研发, 实验室模拟及现场应用效果分析等内容。

本书适合从事水平井改造、压裂酸化和相关专业的技术人员、科研人员、院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

中国石油天然气股份有限公司水平井分段改造技术论文集/中国石油天然气股份有限公司勘探与生产分公司编.

北京: 石油工业出版社, 2010. 3

ISBN 978 - 7 - 5021 - 7540 - 5

I. 中…

II. 中…

III. 水平井 - 文集

IV. TE243 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 222552 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) 64523562 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 中国石油报社印刷厂

2010 年 3 月第 1 版 2010 年 3 月第 1 次印刷

787 × 1092 毫米 开本: 1/16 印张: 17

字数: 430 千字 印数: 1—1000 册

定价: 72.00 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

《中国石油天然气股份有限公司 水平井分段改造技术论文集》 编 委 会

主 编：吴 奇

副 主 编：刘玉章 王元基 周宗强 马新华

编 委：魏顶民 张守良 雷 群 刘 合 王 峰

朱天寿 丁云宏 徐永高 王凤山 杨能宇

张仲宏 郑兴范 胥 云 李良川 王振铎

张应安 马能平 熊春明 赵振峰 王文军

李凡华 段国彬 王志明 张 勇 秦世勇

执行编委：王晓泉 陈 作 李宪文

前言

2008年,中国石油低渗透储量占总探明储量的比例达到87%,且比例逐年增加。单井日产量由2000年的4.2t逐年降低到2008年的2.5t,多井低产形势严峻,为此,中国石油启动了水平井规模推广应用工程。为了攻克水平井在低渗透储层应用的关键技术,中国石油勘探与生产分公司根据蒋洁敏总经理的批示和胡文瑞、赵政璋两任副总裁的精心部署,组织“两院三公司”联合攻关(中国石油勘探开发研究院、廊坊分院、大庆油田有限责任公司、长庆油田分公司、吉林油田分公司),项目实施近三年来成果突出,技术攻关取得了重要进展,现场规模试验增产效果明显。

为了及时总结近几年水平井改造技术的攻关成果,交流技术经验,推进水平井改造技术攻关进程,提高中国石油水平井分段改造技术整体水平,发挥水平井在油气田开发中技术优势,有效地提高油气井的单井产量,中国石油勘探与生产分公司于2009年7月组织召开了水平井改造技术交流会,会议交流了包括参与水平井改造重大技术攻关的两院三公司及冀东、西南、辽河、新疆、大港和塔里木油田等单位近三年来在水平井改造方面取得的最新进展和最新成果。为了更好地推广应用已取得的技术成果,推动水平井改造技术进一步发展,提高油气田开发增产效益,特将大会交流和研讨的论文编辑出版。

书中论文均来自油气田生产一线及科研院所,内容包括了水平井压裂酸化基础理论研究,配套工具研发,实验室模拟及现场应用效果分析等内容,技术先进,实用性强,对从事压裂酸化的同行具有很好的参考价值。在此,谨向会议组织者、承办单位和论文作者致以最衷心的感谢!

由于本书汇编的时间较紧,编者水平有限,其中的疏漏和错误之处,在所难免,恳请各位专家、学者批评与指正。

吴奇

二〇〇九年九月

目 录

水平井分段改造技术及发展方向	吴 奇 张守良 王晓泉	(1)
低渗透油藏水平井井网优化与能量补充研究	李凡华 郝明强 胡永乐等	(7)
大庆油田水平井增产改造技术现状及发展方向	刘 合 王凤山 王文军等	(13)
水平井双封单压分段压裂技术研究与应用	王凤山 张书进 王文军等	(21)
水平井不动管柱滑套多段压裂工艺技术研究与应用	王 峰 许建国 叶勤友	(26)
强化水平井分段压裂优化设计 进一步提高压后效果	王晓泉 张守良 吴 奇等	(33)
低渗透油藏水平井压裂多段裂缝优化设计与现场应用	雷 群 丁云宏 陈 作	(38)
长庆油田水平井水力喷砂参数优化	徐永高 卜向前 刘汉斌等	(44)
吉林油田低渗透油藏水平井压裂优化设计技术研究	张应安 林海霞 李边生等	(49)
水平井注采井网水力裂缝参数优化研究	丁云宏 王 欣 王晓泉等	(54)
水平井七点法注采井网压裂参数优化设计研究	郝明强 李凡华 胡永乐等	(66)
水平井压裂一次采油期水力裂缝优化图版研究	王 欣 王振铎 胥 云等	(71)
长庆低渗砂岩气田水平井水力喷砂压裂技术研究与应用	李宪文 张矿生 付钢旦等	(80)
M22 区块水平井整体压裂优化设计技术研究与应用	林海霞 李边生 李福文等	(86)
州 57 区块水平井开发效果分析	朱秀峰 张海军	(92)
长庆油田吴 420 区块水平井压裂效果分析	赵振峰 庞 鹏 王晓东等	(96)
敖南油田水平井开发实践与初步认识	曾志林 曹鼎洪 邓素玉等	(103)
新疆油田火山岩储层水平井分段压裂工艺研究与应用	王玉斌 张 涛 刘亚明	(110)
水力喷砂物模实验及设想	徐永高 付钢旦 王在强等	(117)
川中广安须家河组储层水平井分段压裂技术应用与效果	桑 宇 李朝林 余朝毅等	(123)
水力喷砂压裂流场与压力场研究	王振铎 陈 作 李 琪等	(132)
塔里木深层碳酸盐岩大位移水平井分段改造技术	朱绕云 张福祥 彭建新等	(139)
水力喷砂压裂设计与施工工艺技术	陈 作 王振铎 丁云宏等	(148)
辽河油田水平井开采技术	孙厚利 王智博 孙振宇等	(155)
水力喷砂压裂液优选技术	崔明月 邱晓惠 王振铎等	(159)
大港油田水平井开采技术	韩岐清 张 勇 宋友贵等	(164)
化学暂堵胶塞在水平井分段压裂改造中的应用	邱晓惠 崔明月 胥 云等	(170)
水平井老井分段压裂技术对策及实例分析	刘兆权 王 同 邱晓慧等	(175)
水平井压裂泵注过程中的异常问题分析	王文军 唐鹏飞 吴中胜等	(181)
吉林油田水平井补孔压裂技术探讨	余国锋 李边生 张超会	(185)
水力裂缝测斜仪测试方法与现场应用	胥 云 严玉忠 王晓泉等	(190)
吉林油田水平井水力裂缝诊断技术方法与现场应用	叶勤友 刘振东 胡 光等	(196)

水平井压裂裂缝扩展与测试评价分析	刘长宇	叶勤友	许建国等	(202)
长庆超低渗油藏水平井人工裂缝监测评价	赵振峰	王文雄	赵 文等	(208)
砂岩储层水平井酸化酸液体系研究与应用	石 阳	周福建	杨贤友等	(214)
大庆油田水平井机械分段酸化工艺技术研究与应用	李清忠	吴恩成	李 琳等	(221)
碳酸盐岩水平井清洁自转向酸化酸压技术研究与应用	周福建	刘雄飞	杨贤友等	(225)
碳酸盐岩储层水平井均匀布酸高压酸化技术研究及试验	李宪文	杨立君	赵 文等	(232)
水平井机械分层找堵水工艺技术探讨	王庆莲	张宝忠	朱秀峰等	(239)
水平井调流控水筛管完井技术	姜增所	强晓光	宋颖智	(243)
冀东油田水平井控水与分采技术	肖国华	王金忠	王 芳等	(250)
水平井化学控水技术研究与应用	李宜坤	魏发林	刘玉章等	(257)

水平井分段改造技术及发展方向

吴 奇 张守良 王晓泉

(中国石油勘探与生产分公司)

摘要 水平井低渗透改造重大技术攻关是扭转低渗透油气藏多井低产、转变增长方式、实现少井高产的重要抓手。近年来组织有关单位集中力量加强技术攻关,推进现场规模试验,取得了较大的技术突破和较明显的增产效果。本文较为全面阐述了中国石油天然气股份有限公司近年来水平井分段压裂技术的最新进展,并提出了下步发展方向,为进一步完善水平井分段改造技术,促进低渗透油气藏效益开发提供技术保障。

关键词 水平井;分段压裂;低渗透;油藏;发展方向;研究

近几年,中国石油新增储量有 70% 属于低渗透储量,单井产量连续下降,每年新钻井数持续增加。如何在占 70% 的低渗储层推动水平井应用,大幅度减少直井的数量,水平井水平段改造是必须攻克的一大难题。然而,水平井水平段分段压裂改造是世界级难题,也是制约水平井在低渗储层应用的技术瓶颈,其关键技术在于:研究水平井油藏工程以解决水平井布井难题,研究就地应力场以解决水力裂缝起裂及形态问题,研究水平段分段压裂优化设计以解决多段裂缝设置问题,研究分段压裂工艺和工具以解决水平井分段压裂的实施问题,研究裂缝监测以解决多段裂缝评估问题,上述 5 个环节密切相连,环环相扣。

近年来,通过集中力量强化水平井压裂酸化理论、分段压裂工艺、配套工具技术等方面较为系统的攻关,扩大现场试验规模,形成了 6 套可推广应用的配套技术,在低渗透油藏分段压裂实施近 300 口井,压后稳定日产油量是直井压裂的 3 倍以上,见到了较好的增产效果,在一定程度上促进了大庆、吉林、长庆等油田应用水平井开发理念的转变,提高了油田应用水平井的积极性,有利于转变多井低产的开发方式。

一、发展形成了 7 套水平井分段改造技术系列

1. 水平井分段压裂多段裂缝优化技术

利用 ECLIPSE 油藏数值模拟软件,在油藏—水力裂缝网格划分和裂缝网格块的处理研究基础上,综合水平井油藏数值模拟、裂缝模拟和经济评价方法,建立了水平井多段裂缝优化方法(见图 1),可以优化包括裂缝条数、布放方式以及几何尺寸等关键参数,指导油田水平井分段压裂优化设计。

图 2 是当有效渗透率为 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时的裂缝参数优化图版,裂缝参数优化结果如下:当水平段长度 300 ~ 500m 时,优化裂缝条数 3 ~ 4 条,裂缝长度 150 ~ 200m;当水平段长度 500 ~ 1000m,优化裂缝条数 5 ~ 7 条,裂缝长度 100 ~ 150m。其趋势是在渗透率一定的条件下,

不同水平段长度对应不同的裂缝条数,随着水平段长度的增加,裂缝条数增加,裂缝长度也相应变短。

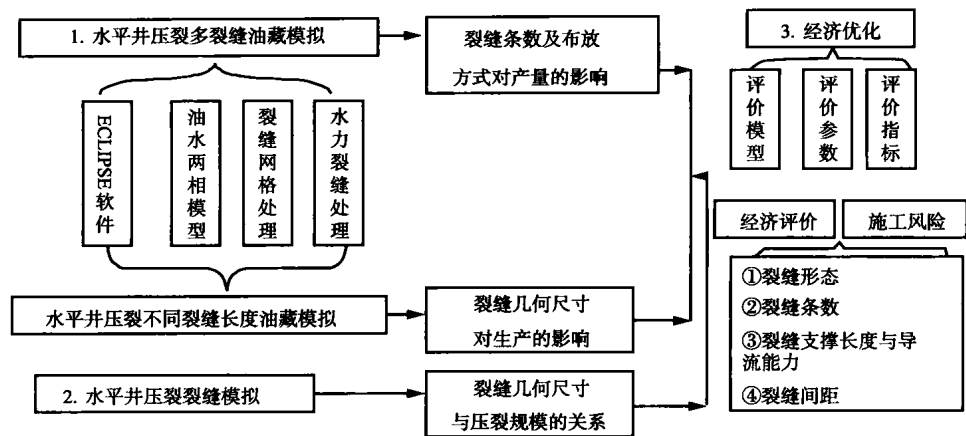


图1 水平井水力裂缝优化方法图

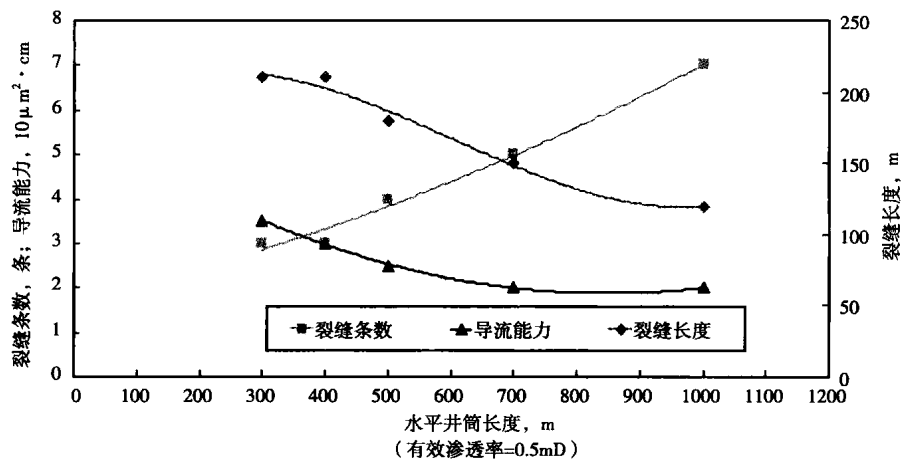


图2 水平井裂缝参数优化曲线

2. 水平井双封单压技术

一次性射孔所有目的层段,下入双封单压工艺管柱,通过拖动逐层压裂所有目的层。其工艺管柱结构(图3):油管+安全接头+扶正器+水力锚+封隔器+导压喷砂器+封隔器+丝堵。封隔器及配套工具耐温90℃、耐压差50MPa,通过上提一趟管柱可完成8个层段的分段压裂施工,单趟管柱最大加砂能力达到140m³,管柱设计有防卡、解卡措施,并优化设计了反洗井通道,降低了管柱砂卡几率,具有效率高、施工安全的特点。

如Z70—平40井,采用水平井双封单压技术,一天时间利用一趟管柱拖动完成5段压裂施工,共加陶粒85 m³,2008年12月底投产,压后稳定日产油15.6t,半年后日产油11.6t,是周围直井压裂的5倍左右。

3. 水平井滑套分压技术

一次性射开3个层段,按照设计连接管柱下入预定深度,通过逐层投球棒打滑套依次压裂目的层段完成整个施工。工艺管柱结构(图4):油管+上封隔器工具总成+下封隔器工具总

成。工具耐温 120℃, 耐压差 70MPa, 单趟管柱加砂量 90m³, 可满足了一趟管柱分压 3 段的要求。

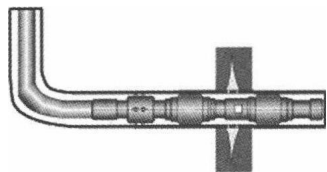


图3 水平井双封单压分段压裂管柱图

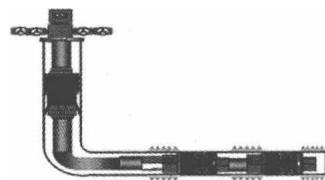


图4 水平井滑套分段压裂管柱图

如 MP11 井, 采用水平井滑套分压技术, 不动管柱一趟投球完成 3 段压裂施工, 共加陶粒 60 m³, 2008 年 5 月投产, 压后稳定日产油 5.5t, 半年后日产油 3.7t, 一年后日产油 2.4t, 是周围直井压裂的 2.5~3 倍。

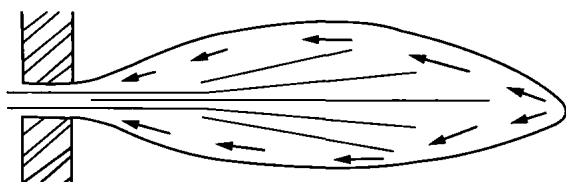
4. 水平井水力喷砂分压技术

喷射器和喷嘴是水力喷砂工艺技术中的核心部件, 其作用是产生高速射流, 射开套管和地层, 压开地层, 实现射孔、压裂施工一体化; 工艺管柱结构: 上接头 + 万向节 + 短节 + 万向节 + 偏心定位器 + 喷射器 + 单流阀 + 筛管 + 堵头 (图 5)。一趟管柱可分压 3 段, 单段最大加砂量 40m³, 单趟管柱加砂量 110m³。该工艺技术不需要封隔器及桥塞等隔离工具, 可实现自动封隔, 施工风险小; 可用于裸眼、套管完成等多种完井方式; 一趟管柱进行多层压裂, 可缩短施工周期, 有利于降低储层伤害。



图5 水平井水力喷砂分段压裂管柱图

通过地面 1:1 大物模水力喷砂射孔地面模拟试验, 采用现场实际喷砂施工参数, 对水泥和岩样靶件进行试验, 靶件喷孔内壁光滑, 轮廓与理论认识差距较大, 入口处更宽更大, 深化了喷孔形态及裂缝起裂的认识 (图 6)。



(a) 理论喷嘴形态



(b) 实际喷嘴形态

图6 水力喷砂物模试验喷嘴形态图

如 WP12 井, 采用水平井水力喷砂分压技术, 两趟管柱拖动分射分压完成 4 段压裂施工, 共加陶粒 130 m³, 2008 年 5 月投产, 压后稳定日产油 6.6t, 半年后日产油 5.9t, 一年后日产油 4.4t, 是周围直井压裂的 1.5~2 倍。

5. 气藏水平井裸眼封隔器滑套分段压裂技术

通过裸眼封隔器, 配合滑套单井投球可分压 4~6 段, 总加砂量可达到 180m³, 在西南、新

疆、大庆等油气田气藏裸眼水平井分段压裂 12 井 44 段,部分井效果明显。

如 DXHW181 井,采用裸眼封隔器分 5 段压裂,共加陶粒 78.6m^3 ,压后试采日产气 $35 \times 10^4\text{m}^3$,是周围直井压裂的 3 倍左右。

6. 水平井均匀酸化技术

研究出适合低、中、高温储层 VES 自转向酸液体系,形成了小直井封隔器机械分段酸化工艺和连续油管拖动均匀布酸工艺,可以实现水平气井长水平井段均匀酸化的目的。

7. 水平井裂缝监测技术

由于水平井压裂裂缝形态的复杂性、液体流动方式的改变,导致净压力拟合、压后压力恢复试井、产量拟合等在直井上常用的诊断评估手段,难以直接在水平井中应用。目前国外对于水平井裂缝特性的认识主要采用微地震波测试、水力裂缝测斜仪测试等远场测试方法,通过技术引进和水平井压后裂缝监测,深化了压后裂缝形态的认识,掌握了水力裂缝测斜仪测试和解释分析方法,为水平井水力裂缝诊断提供了新的工具与方法。

图 7 是分别采用测斜仪和微地震波测试得到的水力裂缝形态,监测表明,多段裂缝之间分隔得比较清楚,表明按照优化设计实施的水平井水平段多段裂缝分段有效,说明多段裂缝优化目标与监测解释结果的裂缝条数吻合程度较高,达到水平井分段改造的目的。

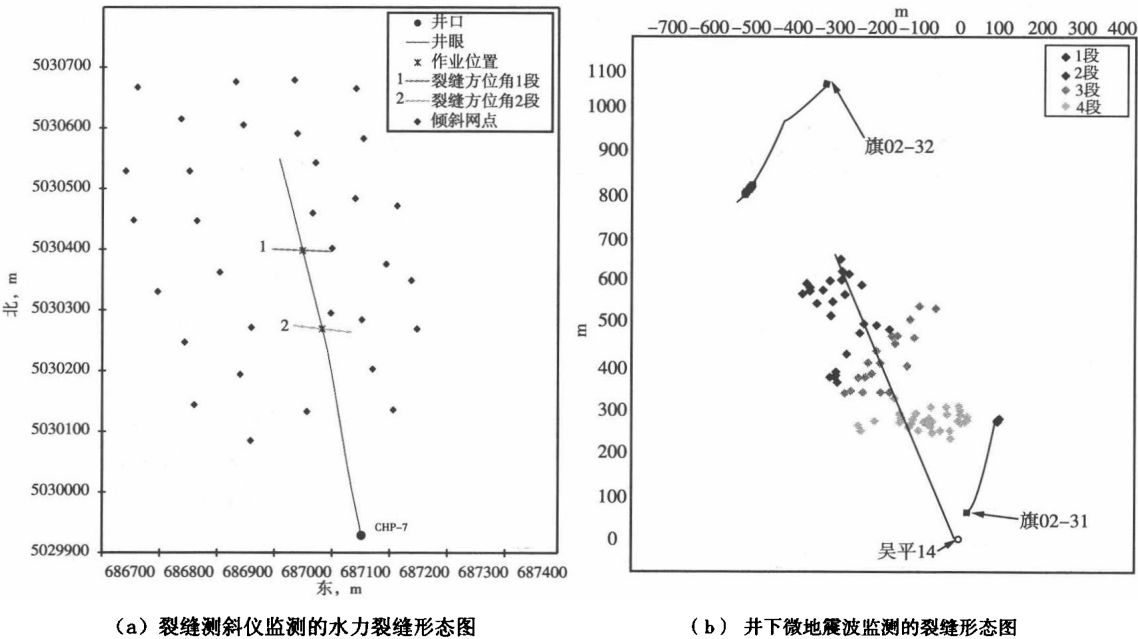


图 7 水平井水力裂缝监测形态图

二、现场试验效果

上述技术近年来在大庆、吉林、长庆等低渗透油藏水平井分段压裂改造现场试验了 300 多口井,压后第一个月平均产油量 8.2t/d ,是直井压裂的 4.2 倍,压后稳定产油量(第四个月) 6.7t/d ,是直井压裂的 3 倍以上。如水平井双封单压技术在大庆肇州葡萄花油层实施的 45 口水平井分段压裂,压后稳定日产油 12.2t ,是直井压裂的 4.7 倍;在大庆敖南葡萄花油层实施的

34 口水平井分段压裂,压后稳定日产油 4.9t,是直井压裂的 4.2 倍。水平井滑套分压技术在吉林扶余油田实施的 51 口水平井分段压裂,压后稳定日产油 4.9t,是直井压裂的 4.1 倍。水平井水力喷砂分压技术在长庆油田实施的 36 口水平井分段压裂,压后稳定日产油 2.9t,是直井压裂的 2.3 倍。

水平井分段改造技术在低渗透油藏的规模应用及区块现场试验,既检验和完善了技术,又解决了低渗透油藏开发中提高单井产量的实际需求,在技术上推动了水平井在低渗透油藏的整体开发力度,有利于转变多井低产的局面,大幅度减少新钻直井数量,促进占 70% 以上低渗透储层的效益开发。

三、下步发展方向

在取得以上技术进步的同时,我们认识到部分技术还需要进一步攻关完善,如油藏工程井网优化和能量补充问题制约了低渗透油藏水平井开发的应用,研发的工艺技术和配套工具还不能完全满足各类油气藏开发的需求,分段压裂的作业效率还需要进一步提高,部分技术与国外差距较大需引进消化吸收等。下一步工作,一方面要扩大已形成技术的推广应用规模,以进一步验证和完善技术;另一方面要加大未成熟技术的攻关力度,促使技术早日成熟并推广应用。

1. 扩大已形成配套技术的推广应用规模

大庆油田水平井封隔器双封单压技术、吉林油田滑套分压技术、长庆油田水力喷砂分段压裂技术是基本成熟的技术,可以扩大推广应用规模,并在推广应用中进一步攻关完善。水平(气)井裸眼封隔器分段压裂技术需引进学习,在加大试验规模的过程中加快国产化进程,为下步推广应用创造条件。

2. 加大未成熟技术的攻关力度,完善、提升已有成果的技术能力和水平

(1)加强油藏工程研究,特别是加强注采井网与水平井压裂缝网的优化,形成有效的开发模式,提高区块整体开发效果。

(2)强化能量补充研究,低渗透油藏水平井,跟直井一样只有注好水形成有效的能量补充,才能达到理想的开发效果,因此要强化能量补充研究,并将分段压裂和能量补充有机结合,才能有效提高低渗透油藏水平井开发效益。

(3)进一步提升双封单压、滑套分压工具性能指标,提升工具承压能力,同时延长使用寿命,满足深层油气田水平井和大规模分段改造的技术需求。

(4)将水力喷砂技术与滑套结合应用,增加不动管柱分压的段数,减少单井压裂起下管柱趟数,缩短作业时间,进一步提高分压施工效率和效果。

(5)加快裸眼封隔器滑套分段压裂技术国产化进程,并与连续油管开关滑套结合使用,提高气藏水平井改造施工效率。

(6)加强裂缝监测评估分析以完善多段裂缝优化设计模型,开展水力喷射物理模拟和参数优化,为技术发展完善提供坚实理论基础。

(7)充分利用引进的大尺寸连续油管作业机,开展水平井连续油管分段压裂配套工具研发,使连续油管与双封单压、水力喷砂分压技术有机组合,进一步提高水平井分段压裂施工效率和压后效果。

参 考 文 献

- [1] 王晓泉, 张守良, 吴奇等. 水平井分段压裂多段裂缝产能影响因素分析. 石油钻采工艺, 2009, 31(1): 73 ~ 76.
- [2] M. Y. Soliman, Loyd East, David Adams. Geo – Mechanics Aspects of Multiple Fracturing of Horizontal and Vertical Wells. SPE86992, 2004. 3.
- [3] Ronaldo, Cem Sarica, Turgay Ertekin. Horizontal Well Design Optimization: A Study of the Parameters Affecting the Productivity and Flux Distribution of a Horizontal Well. SPE84197, 2003. 10.
- [4] A. A. Ketter, J. L. Daniels, J. R. Heinze, et al. A Field Study Optimizing Completion Strategies for Fracture Initiation in Barnett Shale Horizontal Wells. SPE 103232, 2006. 9.

低渗透油藏水平井井网优化与能量补充研究

李凡华 郝明强 胡永乐 田昌炳 刘玉章

(中国石油勘探开发研究院)

摘要 合理的注采井网是利用水平井经济高效开采低渗透油田的基础保证。本文以长庆姬塬油田罗1井区地质特征为背景,利用油藏数值模拟方法对16种基础井网进行了对比筛选,并对全水平井井网、直井注水—水平井采油的混合井网、全直井井网等3类5种优选井网形式进行了适应性论证。研究表明,油藏渗透率较低时,水平段垂直于最大主应力方向,压裂横向裂缝具有明显的初产和累产优势;油藏均质性较好、渗透率相对较高时,全水平井井网开发效果好,油藏非均质性强、渗透率相对较低时,直井注水—水平井采油混合井网灵活宜调整,开发效果好;渗透率越低,裂缝越发育,七点井网比五点井网补充能量的优势越明显。

关键词 低渗透;水平井;井网优化;能量补充

油藏渗透率越低,井网对开发效果的影响越大,井网的优化部署在整个方案设计中也越关键。低渗透油藏由于储层物性差、天然裂缝发育、非均质性强等特征,而且往往又需要压裂改造后才能进行投产,在注水开发过程中常常出现注水见效慢、或者方向性见水快等难题,并且当采用水平井开发低渗透油藏时,这一矛盾更为突出。

经过近30年的探索和实践,对于低渗透油藏直井的井网型式和合理井排距的选择基本有了明确认识,而对于水平井井网形式,目前仍处于理论研究和开发试验阶段,尽管国内外学者曾通过物理模拟、油藏工程方法和数值模拟等手段对此进行了大量的研究,但尚未形成统一的认识。

一、基础参数准备

1. 油藏地质特征

由于每一种井网都具有自己的特点、优势和生命力,只是针对不同的油藏类型有着不同的适应性而已。因此,需要针对某一具体油田或区块进行井网优化设计和对比,方有意义。本文采用罗1井区的实际地质模型进行计算。

该油藏位于姬塬油田马家山区,主要含油层系为三叠系延长组长8₁油层,平均油层厚度10.5m,平均孔隙度10.6%,平均渗透率 $0.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,地层原油黏度 $5.96 \text{mPa} \cdot \text{s}$,原油压缩系数 $14.2 \times 10^{-4} / \text{MPa}^{-1}$,地层原油密度 $0.73 \text{g}/\text{cm}^3$,体积系数1.32。

2. 基础井网形式设计与参数优化

共设计了16种基础井网型式,见图1。

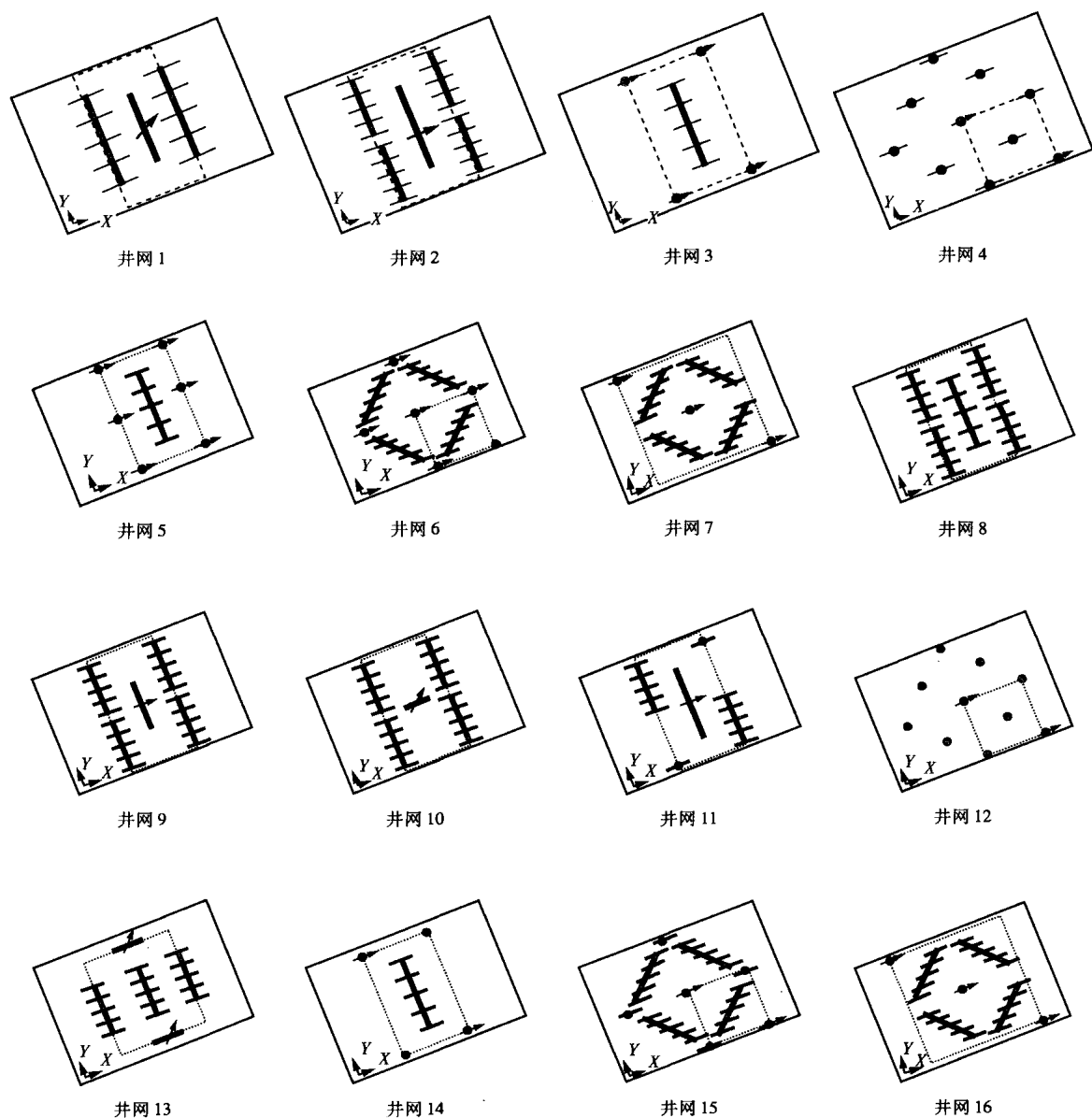


图1 基础井网型式

利用正交优化设计方法,确定水平井长度 300m,排距 200m,井间距 80m,压裂 4 条裂缝,导流能力 $30D \cdot \text{cm}$,注水井不压裂。

3. 评价指标

对于水平井井网,一般都具有比较高的初期产能,因此,应该重点论证以下 4 个方面:

- (1) 能量补充好,压力保持水平高,注水见效早,产量递减缓慢;
- (2) 初期含水低,无水采油期长,含水上升速度慢,最终采收率较高;
- (3) 井网后期调整余地大,灵活性好;
- (4) 井网密度小,经济效益好。

为了消除成本因素,进行有效对比,这里引入单井有效采出程度的概念,即

$$\eta_e = \eta / N \quad (1)$$

式中 η ——井组采出程度;
 N ——井网密度, n/A ;
 A ——井组控制面积;
 n ——井数。

二、数值模拟计算与井网适应性分析

1. 水平段方向确定与基础井网优选

不同方向 16 种井网 20 年采出程度和单井有效采出程度计算结果对比表

水平段垂直于最大主应力方向																
井网	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
η	17.75	16.00	11.15	13.85	15.69	15.50	14.35	15.85	14.10	12.70	15.00	13.15	18.25	9.25	14.50	12.50
η_e	0.84	0.85	0.81	0.78	0.80	0.62	0.48	0.83	0.75	0.68	0.80	0.59	0.61	0.49	0.58	0.44
水平段平行于最大主应力方向																
井网	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
η	13.70	15.45	13.50	13.85	13.69	15.50	14.35	15.00	14.20	13.05	5.75	13.15	18.25	11.70	14.50	12.50
η_e	0.50	0.73	0.72	0.78	0.69	0.62	0.48	0.71	0.68	0.62	0.33	0.59	0.61	0.62	0.58	0.44

从上表的计算结果可以看出:

(1) 当油藏渗透率较低时,水平段与最大主应力方向或者高渗透方向垂直,可以进行多段压裂,产生多条裂缝,采油速度和采出程度较高,开发效果比较好;

(2) 行列式排列的几种井网由于水线推进比较均匀,开发效果比较好。

因此,这里优选全水平井井网 1 和 2、直井注水—水平井采油的混合井网 3 和 5、以及全直井井网 4 进行详细对比论证。保持水平段方向与压裂缝方向或高渗透方向垂直。

2. 优选井网适应性分析

5 种优选井网的采出程度、单井有效采出程度、含水率、地层压力保持水平等开发指标随时间的变化关系曲线对比见图 2 ~ 图 7。

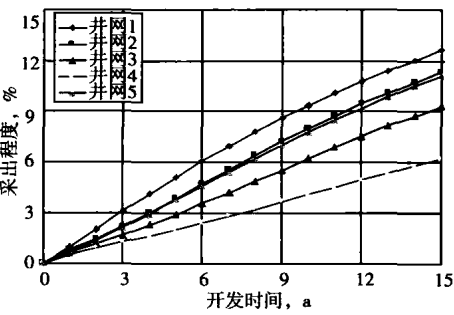


图 2 采出程度与开发时间关系曲线

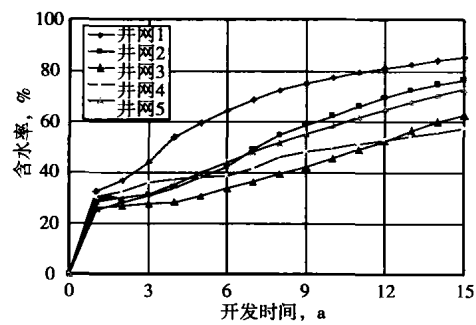


图 3 含水率与开发时间关系曲线

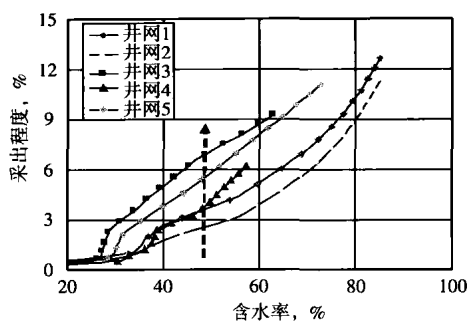


图4 含水率与采出程度关系曲线

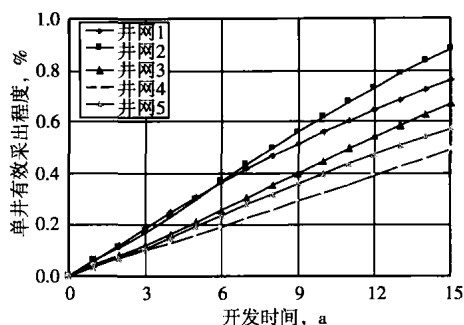


图5(a) 单井有效采出程度与开发时间关系曲线(1.5倍)

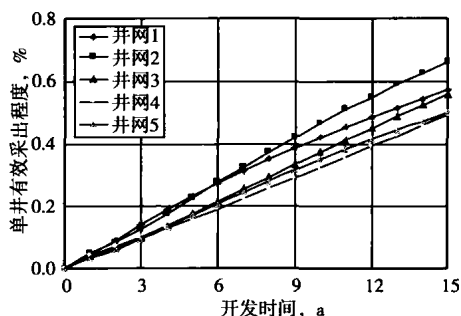


图5(b) 单井有效采出程度与开发时间关系曲线(2倍)

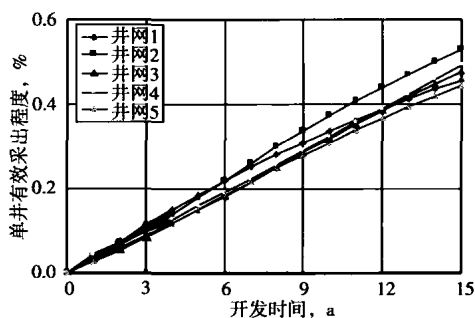


图5(c) 单井有效采出程度与开发时间关系曲线(2.5倍)

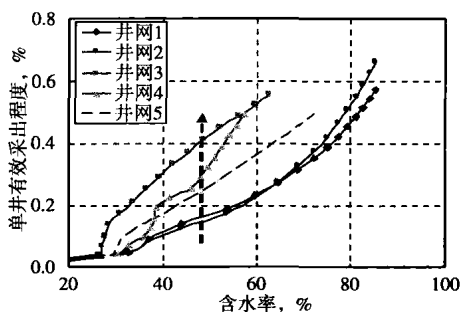


图6 含水率与单井有效采出程度关系曲线

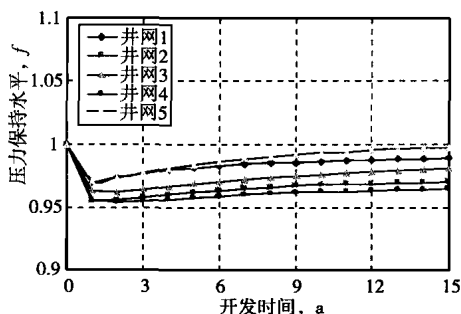


图7 地层压力保持水平与开发时间关系曲线

由图2和图3可以看出,在相同时间内,井网1采出程度最大,井网2次之,井网4最小。但同时也伴随着高含水的劣势,井网1含水率最大,井网2次之,井网4最小。因此,对于全水平井网,总体上普遍含水较高,直井以及水平井一直井混合井网总体上含水较低。

从图4含水率与采出程度的关系曲线来看,在相同含水率下,井网3采出程度最大,井网5次之,井网2最小。

从图5单井有效采出程度与开发时间的关系曲线可以看出:不管水平井成本折算为直井成本的1.5倍、2倍还是2.5倍,井网2单井有效采出程度最大,井网1次之,井网4最小,井网3居中,这也说明水平井网具有很大的优势,但也伴随着高的含水。对于低渗透油藏,水平井高的含水给后期调整带来风险,甚至造成全井报废;另外,如果储层变化快或者非均质性较强,