



中国石化

油气开采技术论坛

论文集

2006

中国石化油气开采技术论坛秘书处 编

中国石化出版社

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

中国石化油气开采技术论坛 论文集(2006)

中国石化油气开采技术论坛秘书处 编

中国石化出版社

图书在版编目(CIP)数据

中国石化油气开采技术论坛论文集(2006)/中国石化油气
开采技术论坛秘书处编.

—北京:中国石化出版社,2006

ISBN 7-80229-102-X

I. 中… II. 中… III. ①石油开采-技术-学术
论坛-文集 ②天然气开采-技术-学术论坛-文集
IV. ①TE355-53 ②TE375-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 071483 号

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.cn

北京精美实华图文制作中心排版

北京大地印刷厂印刷

全国各地新华书店经销

◀

787×1092 毫米 16 开本 24 印张 608 千字

2006 年 12 月第 1 版 2006 年 12 月第 1 次印刷

定价:70.00 元

中国石化油气开采技术论坛第二次会议纪要

(代前言)

为交流近几年来中国石化低渗透油气田开采技术成果,探讨该领域技术问题,安排中国石化油气开采技术论坛(以下简称论坛)下步重点工作,2006年5月24日至5月25日在海口召开了论坛第二次会议。各油田分公司、勘探开发研究院及总部机关有关部门共140余人参加了会议。本次会议由科技开发部和油田勘探开发事业部主办,中原油田分公司采油工程技术研究院承办。何生厚、常子恒和吕连海同志分别主持了会议。吴信荣等15位上游板块生产科研一线的技术人员在大会上介绍了最新技术成果,张士诚等6位特邀专家围绕技术发展前沿作了报告。会上还举行了《油气开采工程师手册》首发仪式,中国石化出版社徐金波等领导出席并讲了话。会议期间还召开了论坛指导委员会和学术委员会会议,确定了下次论坛主题和承办单位,并调整了两个委员会组成。何生厚副总工程师对会议进行了总结。现将有关事项纪要如下。

一、会议展示了近几年来低渗透油气田开采技术主要进展,并对业内该领域关心的主要技术问题进行了交流

近几年来,低渗油气藏开发在基础研究、储层保护与改造、水质精细处理与细分开采等方面都有新的进展。

在对低渗储层深入研究的基础上,形成了以地应力及裂缝研究为核心、以随机建模为手段的低渗储层表征技术;渗流机理研究获得新进展,为低渗透油藏合理井距设计提供了依据,并网优化技术在开发实践中逐步得到应用。

压裂技术在低渗透油气藏开发中地位日升,技术进展迅速。压裂三维优化设计、清洁压裂液、低密支撑剂、重复压裂、分层压裂、泡沫压裂、薄互层压裂、多层新井完井压裂、控制缝高转向压裂、双重介质分步加砂、暂堵压裂、低压地层增能助排压裂等适合不同类型油藏的压裂工艺技术,在油气田开采中应用取得成功,正成为低渗油田开发重要手段。

降压增注、高压增注技术在低渗油藏注水开发中得到广泛应用,初步形成了化学降压增注、压裂降压增注、层内自生气降压增注等技术措施,降低了注水井启动压力。水质处理技术也取得了很大进步。

有杆泵深抽工艺技术进步较大。小排量电泵采油技术、气举采油技术等,基本能够满足不同能量井提液的需要。有杆泵检泵周期可以达到450天以上,无杆泵可以实现耐温180℃、3500m井深以下的深抽需要。正在开展的组合式深抽工艺取得重要进展。

二、会议分析了低渗油气田开发技术需求及面临的挑战,对今后如何提高低渗油气藏开发水平进行了探讨

会议认为,尽管我们取得了许多成绩,但低渗油气藏开发中的问题依然突出。主要表现在:

低渗特低渗是探明未动用石油储量的主体,且储量品位低、动用难度大。已探明未动用低渗储量中渗透率低于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的特低渗储量占 45%, 储量规模小于 $50 \times 10^4 \text{t}$ 的断块数占断块总数的 54%, 储量丰度小于 $55 \times 10^4 / \text{km}^2$ 的储量占 40%, 储量品位低, 高效动用难度大。中石化还有几千亿立方米探明天然气储量尚未动用, 急需形成配套的提高单井产能增产技术。

注采井网不适应低渗油藏开发的需要。已开发多数单元注采井距过大, 在 300~500m 之间, 平均 327m, 注采井数比低(1:3.4), 注采对应率低, 单井控制储量偏大(18.6 万吨/口井), 同时由于高压注水、大压差生产、压裂措施、粘土矿物膨胀等因素, 造成井筒损坏, 注采井网急需完善。

注水系统配套能力弱, 分注工艺仍需完善。由于投入等方面因素的影响, 水井分注合格率偏低, 部分井站注入水水质还比较差, 高压注水区的比例越来越高, 造成干线耐压等级不适应, 高压分层工艺、注采剖面调整技术、全过程油层保护等技术有待于进一步提高。

针对上述问题, 会议认为, 要解决低渗油气藏开发问题只有依靠科技进步, 要树立攻坚克难的思想, 正确理解效益第一的原则, 从现代油藏管理的角度出发, 以效益最大化为原则, 努力提高开发水平。为此, 会议建议:

加大基础研究和科技攻关力度。重点攻克储层分布预测、含油饱和度监测等技术, 解决低渗油气藏精细描述和老区剩余油潜力评价问题; 研究可控压裂技术, 实现缝高、缝宽、缝长的可控压裂; 攻克水平井储层改造技术, 尤其是分段压裂技术, 给低渗油气藏高效开发提供技术手段; 积极开展复杂结构井完井技术研究与应用, 通过提高完井技术等级, 完善复杂结构井技术, 提高低渗透油气田动用程度和采收率; 开展高压分注及分层测试技术研究, 通过提高分注有效期和层段合格率, 提高高压注水井层间动用程度, 同时要研究高压分注的界限问题, 使高压分注工作更有针对性。

积极引进先进技术, 大力推广应用实用的工程技术。积极引进连续油管压裂等先进技术, 提高施工效率和经济效益。大力推广水平井、分支井为主体的复杂结构井技术, 老井侧钻技术和膨胀管修井技术, 提高老井利用率, 降低井网调整的投资; 推广井网与工艺协调统一技术, 井距论证充分考虑储层改造的贡献, 依靠工艺技术减少钻井工作量, 解决经济极限井距与技术极限井距的差距; 推广低渗油藏调剖技术, 提高层间动用程度。

在现场先导试验方面, 继续抓好股份公司正在开展的中原文 88 块天然气驱开发先导试验、华东开展的 CO_2 驱两大开发先导试验, 各油田也要根据本油田特点, 开展相应的先导试验, 用以指导开发实践。如加密井网先导试验、薄差层挖潜先导试验、复杂结构井挖潜先导试验、水力喷射射孔增效技术、注水井短宽缝压裂增注试验等。

三、会议进一步强调了办好论坛的重要意义, 提出了论坛的组织人员调整意见, 并对下一步重点工作进行了安排

会议认为, 论坛的成立, 建立了中石化上游油气开采技术领域的交流协作新机制, 为广大油气开采工程技术人员提供了一个高水平、综合性、开放性的学术交流新平台, 具有促进技术发展、加强技术交流、发挥整体优势、实现优势互补的重要意义。论坛在指导委员会和学术委员会的领导下, 已成功地召开两次会议, 论坛运作逐步走向成熟和规范化。

根据人员变动情况, 会议提出论坛指导委员会、学术委员会组成人员调整意见。经股份

公司领导审批，新一届论坛组成人员如下：

指导委员会

主任：王志刚

副主任：何生厚、杨元一

委员：李阳、张永刚、刘汝山

顾问：牟书令、宋万超

学术委员会

主任：何生厚

副主任：张永刚、沈琛

委员(名单不分先后)：

何生厚	李阳	常子恒	吕连海	刘汝山	张永刚	石兴春	沈琛	张勇
曾庆坤	李宝同	李林新	薛承瑾	任玉林	李宗田	胡风涛	李江龙	张煜
孙焕泉	田仲强	王增林	王世虎	韩来聚	刘一江	刘三威	徐卫东	张强德
吴信荣	张毅	罗洪友	魏淋生	范喜群	李军营	李东海	王掌洪	杨海滨
刘炳官	景步宏	孙健	伍铁英	朱晓荣	李春梅	窦之林	朱建国	陈凯
林涛	杨克明	陈昭国	李刚	郝蜀民	陈卫佑	陈路原	尤欢增	俞凯
邵焕彬	麻建明	疏壮志	唐黎明	易积正	李上卿	路保平		

秘书处

秘书长：薛承瑾

秘书：胡风涛、王步娥、薄启炜

会议确定了论坛第三次会议的主题和承办单位。根据论坛章程，经过指导委员会和学术委员会会议讨论通过，论坛第三次会议主题是“油田注水工程技术”。根据轮流承办的原则和申办结果，会议决定由江汉油田采油工艺研究院具体承办下次年会。

会议号召油气田开发系统广大技术人员，积极支持论坛建设，有效利用论坛这一平台，充分展示自己的才华，使更多的成果得以交流和推广，为提高油气田开发水平和经济效益，为实现中国石化上游发展战略努力奋斗！

目 录

低渗透复杂断块油藏整体压裂改造技术研究·····	张士诚 甘云雁等(1)
特低渗透储层主要伤害因素与对策·····	廖锐全(10)
低渗透油藏物理法强化采油理论与技术研究·····	蒲春生(16)
低渗油藏提高采收率若干问题的探索·····	岳湘安(22)
高含硫气藏流体相态特征研究·····	杜志敏 郭 肖等(27)
改善深层低渗凝析气藏气井产能的强化采气新技术、新方法的发展现状 (上篇)·····	孙 雷 李士伦等(44)
改善深层低渗凝析气藏气井产能的强化采气新技术、新方法的发展现状 (下篇)·····	孙 雷 李士伦等(55)
高含硫气藏流体渗流理论与气固耦合综合模型研究·····	杜志敏 郭 肖等(66)
高含硫气藏硫沉积机理研究·····	郭 肖 杜志敏等(76)
中原油田低渗油藏开采技术探讨·····	吴信荣(90)
“十五”期间胜利油田压裂酸化技术的进展及应用·····	马利成 唐汝众等(101)
坪北特低渗透裂缝性油藏注水开发实践与认识·····	朱绍军(112)
江苏油田低渗油藏酸化工艺技术的研究与应用·····	汤元春(119)
宝浪油田低孔低渗特殊油气藏增注技术 ·····	贾跃立 陶良军等(129)
川西中浅层气藏难动用储量压裂工艺新技术·····	任 山 林永茂(133)
大牛地气田低渗气藏压裂改造技术·····	廖玉英 李克智等(139)
用试井方法进行措施选井·····	罗 沛 张文昌等(153)
特低渗透油藏油层保护配套技术研究及应用·····	董学让 任占廖等(158)
复杂小断块中低渗油藏开发技术研究与应用·····	骆 瑛 孙东升(166)
低渗透油藏渗流流变性与改善开发效果研究·····	胡雪滨(176)
安棚低渗透油藏有效储层识别方法研究·····	李红茹 马培中等(188)
低渗、特低渗油藏注空气驱提高采收率技术·····	王世虎 李爱山等(194)
深层低渗凝析气藏有效开发技术·····	盛建明 李明志等(206)
中国石化低渗透油藏开发状况及前景·····	王光付 廖荣凤等(217)
大斜度井压裂工艺技术在中原油田的应用·····	李凤霞(224)
低压低渗气藏增产措施的适应性研究·····	靳宝军 郑锋辉等(226)
VES-SL 压裂液性能评价与应用研究·····	李爱山 马利成等(235)
射孔参数对斜井压裂裂缝起裂和延伸的影响研究·····	贾长贵 李明志等(244)
中原油田压裂配套技术及发展趋势·····	李明志 李凤霞(249)
实现快速排液的纤维增强压裂工艺应用研究·····	张绍彬 谭明文等(256)
安棚裂缝性储层压裂技术研究与应用·····	陶良军 刘洪涛等(260)
低渗透油水井改造工艺技术研究及应用·····	韩茂全(263)
建南低渗透气藏措施改造工艺技术·····	姜建平(269)

坪北特低渗透油田整体压裂工艺技术的研究·····	任 茂 张在田(277)
高温高压低渗井压裂工艺管柱·····	任厚毅(285)
坪北特低渗透油藏注水驱替模式探讨·····	朱绍军(290)
井下永久式压力监测技术·····	姚 强(294)
坪北油田特低渗储层的结垢机理及防治·····	江绍静 刘尧文(298)
安棚油田深层系注水伤害机理研究·····	周 晔 戚保良等(308)
改善宝浪油田低孔低渗油藏中含水期开发效果对策研究·····	戴达山 何 可等(313)
低渗非达西渗流油藏数值模拟方法研究·····	王新海 张冬丽(319)
深层低渗难动用油藏改善注水开发效果技术研究应用·····	刘亚勇 李同峰等(323)
低渗油藏高压分注技术·····	刘汝福 韩 进等(332)
白庙低渗透凝析气藏压裂裂缝参数优化·····	苗 宏(346)
深层低渗凝析气藏开发技术·····	张庆生 赵 莉等(350)
纳米堵水剂在河南油田疑难井简化管柱上的应用研究·····	陈 渊(356)
油田污水生化处理技术·····	陈 勇 徐 鹏等(361)
王场地区潜 4 ³ 油组低渗透油藏滚动勘探开发研究 ·····	孙 莉(370)

低渗透复杂断块油藏整体压裂改造技术研究

张士诚 甘云雁 王伯军

(中国石油大学 北京)

以往整体压裂改造技术都是针对常规低渗透油田规则井网下情况进行的,其裂缝方位仅处于有利和不利两种情况,因此能较容易的将带有裂缝的井网简化为注采单元进行建模求解。但对于低渗复杂断块油田来讲,一方面构造复杂、断裂发育、断块控制油气聚集造成不规则的井网形式;另一方面地应力场分布复杂,不容易实现裂缝与井网的优化配置。因此,采用常规整体压裂改造技术难以满足这类油田的压裂开发要求。

本文基于复杂地应力场情况下,对低渗复杂断块油田不规则井网,以及在不规则井网条件下的整体压裂优化设计方法进行了研究,形成了一套较系统、完善的低渗复杂断块油藏不规则整体压裂优化设计方法。

1 复杂断块油藏地应力场研究

复杂断块油藏断层众多、断块面积小且分布复杂,其地应力场分布必然不像大型整装油田那样具有很强的一致性。由于地应力的分布情况会直接影响到井网部署和后期的压裂设计,因此本文首先对复杂断块地应力场的分布进行了研究。其方法是:将现场测试方法和有限元数值模拟方法相结合,以此确定复杂断块的岩性、密度、弹性模量、泊松比等重要岩石力学参数,继而确定复杂断块地层地应力剖面 and 地应力方向,并通过建立流固耦合模型,使用有限元软件来模拟三维地应力场在各个开发阶段的动态分布情况,从而为后期的研究工作奠定基础。

1.1 岩石力学参数的确定

迄今为止,岩石弹性参数的测定方法包括动态法和静态法两种。在地应力计算和实际工程中较常用岩石的静态弹性参数。但由于静态参数测定所需代价和成本太高,加之岩石本身固有特性决定了地层岩石的弹性系数带有较强的波动性,因此,在工程上还必须结合动态法(主要是利用测井)进行动态参数的测定,以弥补静态参数的不连续性。本研究中利用了测井资料分析和岩石力学测试相结合的方法。

1.2 地应力方向和地应力剖面的确定

本研究中主要采用了水力压裂试验法来得到地应力的方向。并运用了地应力计算中常采用的计算模式对测井曲线进行了地应力解释。计算出泊松比、杨氏模量、密度和最小主应力,得到地应力剖面。

1.3 流固耦合地应力计算模型的建立和求解

初始应力的回归与三维拟合理论已经相当成熟,但是油气田的开发活动如注水、注气或

汽、火烧油层、大型压裂等将会引起地层孔隙压力等的显著改变,进而影响其地应力状态(包括其大小和方向),并大大增强地应力场的非均质性和各向异性,从而对油气生产产生较大影响。本文以流固耦合理论为基础,利用有限单元法研究开发过程中地应力场的动态变化为最优开采提供可靠依据。

(1) 数学模型的建立

在建立模型方程时,作如下的假设^{[1][2]}:

- ① 孔隙介质为线性或遵循 Drucker - Prager 屈服准则的弹塑性材料;
- ② 两相流体不混溶;
- ③ 孔隙介质中的两相流体运动符合 Darcy 定律;
- ④ 两相流体的 PVT 特性符合常温微可压规律;
- ⑤ 不考虑孔隙介质与两相流体的物理吸附及化学作用。

油水两相的渗流方程如下:

油相:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho_o S_o) - \nabla \cdot (k_o \rho_o (\nabla P_o + \rho_o \bar{g})) + \nabla (\phi \rho_o S_o \bar{v}_s) = q_o \quad (1)$$

水相:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho_w S_w) - \nabla \cdot (k_w \rho_w (\nabla P_w + \rho_w \bar{g})) + \nabla (\phi \rho_w S_w \bar{v}_s) = q_w \quad (2)$$

饱和度方程:

$$S_o + S_w = 1 \quad (3)$$

毛管压力方程:

$$P_c = P_o + (\rho_o - \rho_w) \bar{g} h - P_w = P_c(S_w) \quad (4)$$

式中 t ——时间;

ϕ ——岩层孔隙度;

ρ_o ——油密度;

S_o ——油相饱和度;

k_o ——油相渗透率;

P_o ——油相压力;

$\bar{g}$ ——重力加速度;

$\bar{v}_s$ ——岩层变形率;

q_o ——油相源;

ρ_w ——水密度;

S_w ——水相饱和度;

k_w ——水相渗透率;

P_w ——水相压力;

q_w ——水相源;

P_c ——毛管力;

h ——岩层深度。

(1)、(2)两式左端的第三项均为固体变形对流体的影响。

其孔隙介质的变形场如下:

平衡方程:

$$\sigma'_{ij,j} + f_i - \alpha P_{ij} \delta_{ij} = 0 \quad (5)$$

其中(5)式左端的第三项为流体渗流压力对固体变形的影响。

式中 σ_{ij} ——孔隙介质内应力;

f_i ——孔隙介质体力;

α ——流固耦合系数;

$\bar{P}$ ——孔隙流体压力;

δ_{ij} ——Cronecker 记号。

(2) 模型的求解

由于井的尺寸和断层厚度很小,而计算区域在几百米甚至上千米的范围,剖分网格数将十分巨大,这是目前软件无法计算的。本文采用组合网格法来解决这一问题。将整体地层区域与井、断层分别独立剖分网格,几套网格以一定的关系来进行总体计算。

通过对低渗透复杂断块油藏地应力的研究,可得到油藏中任意时刻任意点的最大水平主应力的方向,进而受最大水平主应力方向控制的垂直裂缝的延伸方向就可以得到。

2 复杂断块不规则井网优化模型

井网研究是一个比较复杂的问题,特别是对于众多断层发育的低渗透复杂断块油藏来讲,一方面要求确定适应构造特征、油藏流体性质及压裂方案部署的井网,另一方面也要考虑低渗透油田的特点。其确定依据在于保证较好的经济效益的同时,又能获得较高的水驱控制程度、储量动用程度及最终采收率,从而使油田达到较高的开发水平。

在以往复杂断块油田的开发中,大都采用滚动勘探开发的方式进行。对于复杂断块油藏地应力分布较常规油藏有很大差别,其地层中各点的最大主应力方向不一致。因此受水平最大主应力方向控制的水力裂缝的延伸方向也就随之不一致。如果在滚动勘探开发的过程中进行水力压裂增产,由于在初期布井时未曾考虑到裂缝方位的影响,压裂后就很难形成有效的注采系统,从而使得增产效果不佳,甚至由于注入水沿裂缝水窜使得已有生产井发生暴性水淹,造成不可挽回的经济损失。

国内外众多断块油藏勘探开发的经验指出,对复杂断块油藏大都采用不规则井网、不规则注采方式进行开采^[3-5]。本文试图结合低渗透油藏整体压裂改造,对不规则井网裂缝方位与井网匹配关系进行一些探索性的研究,为低渗透复杂断块油藏不规则井网的部署提供了一定的参考。

2.1 复杂断块油藏的分类

复杂断块油田是指含油面积小于 1km^2 的断块油藏的地质储量占油田总储量一半以上的断块油田^[6]。因此,本文研究的重点是面积小于 1km^2 的断块油藏。首先将此类油藏细分为如下两类:①区块内已布有井(如对老区块的调整或是区块中已存在探井);②区块中未布任何井(全新区块)。由于裂缝的延伸方向主要受水平最大主应力方向的影响,所以又可根据地应力分布规律将上述两种类型进一步细分。

下面以地应力方向成无规律分布的全新区块,考虑裂缝方向影响条件下的基础井网部署问题为例进行建模求解,其他三类可以类似的方法求解。

2.2 不规则井网整体压裂优化模型的建立和求解

(1) 基本假设

- ① 油藏形状为任意平面三角形;
- ② 油藏内各点地应力方向已知; 地应力数据构成 (x, y, α) 的离散数据点格式; 其中 x, y 分别代表地层中任意点的横、纵坐标; α 代表该点最大主应力的方向, 它可充分体现地应力分布规则与否, 对于复杂断块油藏, 其值各不相等, 对于常规油藏, 其值相等;
- ③ 区域内需布置井均为生产井, 且各井均压裂;
- ④ 裂缝方向完全沿地层最大主应力方向延伸, 不存在偏转;
- ⑤ 各井压裂后所形成的裂缝长度相同;
- ⑥ 裂缝井的泄油边界为规则椭圆。

(2) 模型的建立

假设三角形复杂断块油藏中存在 N 个点(N 的理论值趋于无穷, 但在该模型的建立中 N 值等于有限元地应力建模分析时的节点数)。根据假设裂缝井形成的泄油边界为简化椭圆, 其大小和形状可根据油藏数模的方法确定。由于裂缝方位完全沿地层水平最大主应力方向延伸, 所以椭圆的长轴与水平方向的夹角也就随水平最大主应力方向而确定。又因为油藏中各点地应力方向可由有限元方法对地层进行三维地应力场反演分析得到, 所以只要油藏中的点选定了, 以该点为中心的椭圆就唯一确定(如图1所示)。

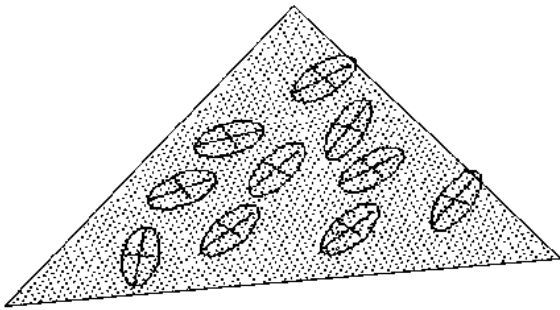


图1 井网优化模型示意图

目标函数: 通过优化区域内点的位置和个数(即井位和井数), 使得在所有椭圆都不相交的前提下, 椭圆面对给定区域的覆盖面积最大(即油井对整个区块的驱油面积最大、死油区最小)。

(3) 井网优化模型的求解

要求解复杂断块油藏井网优化模型是一个极其复杂的问题。因为模型中要求所有椭圆都不相交, 而且要求所有椭圆对给定区域的覆盖面积最大。

模型的两个要求:

- ① 椭圆不相交即椭圆1上的点到椭圆2的两个焦点的距离之和大于等于长轴。
- ② 覆盖面积最大即在给定区域内布置最多的不相交的椭圆也即选点最多。

删除相交椭圆:

① 椭圆与边界相交情况: 保留与边界相交且落在区域内椭圆面积大于落在区域外椭圆面积的椭圆。

② 区域内椭圆的相交情况: 运用矩阵来表示两个椭圆的相交关系, 相交的记为1, 不相交的记为0, 通过对矩阵的处理来删除相交椭圆, 最终得到所有不相交的椭圆(图2)。

通过以上方法对不规则井网模型的求解, 可确定椭圆的位置, 进而初步确定不规则井网的井点位置。该方法的求解结果从数学角度得到的是问题的最优解, 但采用不同的处理方法得到的结果是不一致的, 而实际布置的井点位置却是唯一的, 所以要借助油藏数模模拟方法, 以采出程度、采油速度等为目标优选出最佳井网方案。

(4) 压裂井泄油边界椭圆的确定^[8~9]

压裂井泄油边界的椭圆形形状,用现代渗流力学解析方法还难以确定。本文采用油藏数模模拟方法来求取。对水力压裂井泄油面积(椭圆)的大小、形状主要受裂缝长度、裂缝导流能力、生产时间、生产压差、地层渗透率等多因素控制,其中椭圆的形状用其长短轴的比值来表示,大小在长短轴之比确定的前提下可用椭圆长轴长度来近似表示。

模拟的条件为:油水两相渗流,矩形封闭边界均质油藏,中心一口采油井压裂,地面水和原油密度分别为 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $870\text{kg}/\text{m}^3$,地下水和原油黏度分别为 $0.5\text{mPa}\cdot\text{s}$ 、 $1.7\text{mPa}\cdot\text{s}$,岩石压缩系数 $5.648 \times 10^{-6}\text{MPa}^{-1}$,原始油藏压力 16.18MPa ,井筒半径 0.14m 。

计算结果及分析如下:

① 生产时间及缝长的影响

假设生产压差 10MPa ,地层渗透率 $0.51 \times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,裂缝导流能力 $40\mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$ 。计算发现:在相同的时间下,缝长越长长轴越长,长短轴之比越大,也即缝长越长,椭圆越大,单井卸油面积就越大。随时间增加,椭圆长轴长增加,长短轴之比却逐渐减小且逐渐接近 1。这是因为随时间增加,单井作用边界虽然逐渐扩大,但在边界上受裂缝的影响却越来越小,所以边界上的椭圆就越接近圆,其长短轴之比也就接近 1。当时间为 1 年以后椭圆的大小和形状的变化范围均较小,说明此时压裂生产达到拟稳定状态。

② 缝长及地层渗透率的影响

假设生产时间 1 年,计算发现:在相同缝长下,地层渗透率越高,椭圆长轴越长,但长短轴之比却越小。随缝长的增加,椭圆长轴和长短轴之比都随之增加。

③ 生产压差及缝长、生产时间的影响

计算结果表明在相同的缝长和生产时间下,生产压差几乎对椭圆大小、形状不产生影响。

④ 缝内导流能力的影响

在裂缝长度 100m 的条件下,对于给定的低渗油藏,当裂缝内导流能力大于 $25\mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$,椭圆的大小和形状几乎不再受导流能力的影响。

综合上述研究结果可以发现:压裂井泄油面积(椭圆)的大小、形状虽受裂缝长度、导流能力、生产时间、地层渗透率、生产压差等多个因素的影响,但生产压差和导流能力对其影响甚小,缝长和生产时间对其影响较大,地层渗透率次之。对于确定的油藏,地层渗透率已知,当该油藏地应力不是太复杂的情况下,缝长也可大致确定。

3 现场应用

为了验证上述复杂断块不规则井网优化设计技术的正确性和可行性,本文选定中原油田卫 42 断块卫 350 井区进行了现场试验。

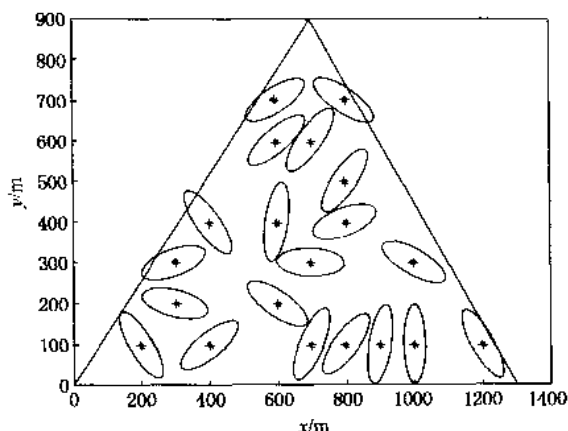


图2 删选后结果图

卫 42 断块区油藏位于濮卫次洼西翼，断块平面上呈 NNE - SSW 向延伸的长条状，南北长约 6.5km，东西宽约 2.5km，构造面积约 10.5km²。其位于卫东断层下降盘，构造受卫东断层和卫 69 断层控制，构造特征主要表现为由卫东断层及其伴生的西倾断层构成反“Y”字型结构而形成的若干反向屋脊。构造走向 NNE，沙三中地层东倾，倾角 20°~25°(图 3)。

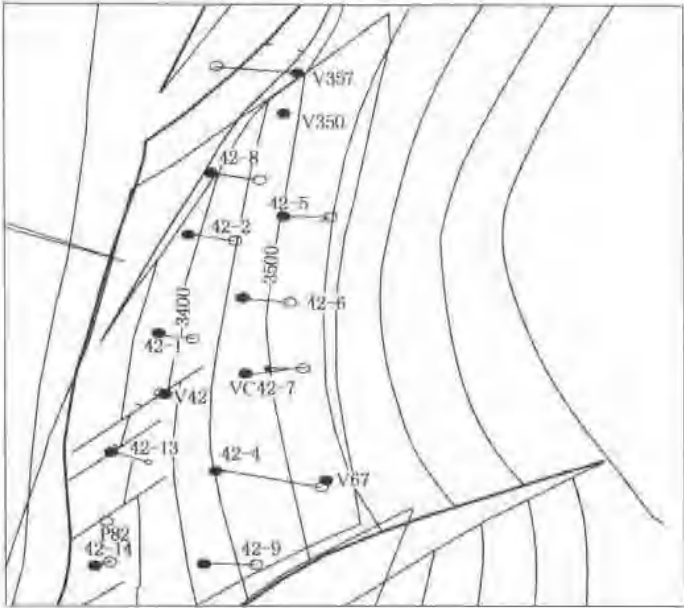


图 3 卫 42 断块(2003.12)井位图

3.1 地应力场模拟研究

(1) 流体压力场分布(图 4、图 5)



图 4 地层中流体的压力场分布(初始步)

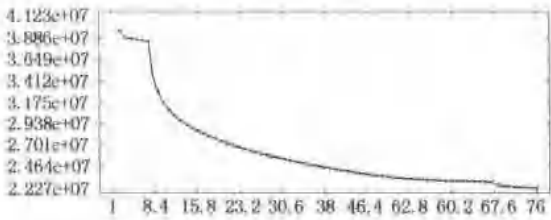


图 5 流体压力随时间的变化曲线

(2) 主应力的矢量分布(图 6)

整个区域的应力分布特征为：最大水平主应力的方向为北东 42°~77°之间，断层附近最大水平主应力方向垂直于断层基线，由于开采期间对其主应力的方向影响不算太大，基本上没有大的改变，而大小随注采变化而改变较大。

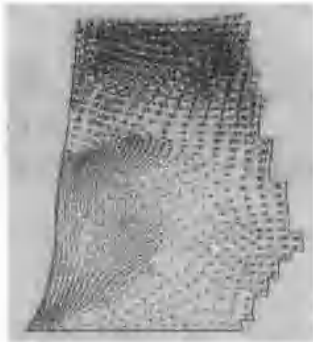


图 6 主应力分布矢量图

3.2 不规则井网整体压裂优化设计研究

(1) 裂缝井边界椭圆大小、形状的确定

根据现场数据计算得到压裂油、水井边界椭圆的大小和形状。压裂油井泄油边界椭圆长轴为 230m、短轴为 170m，压裂水井注水边界椭圆长轴为 190m、短轴为 150m。

(2) 初步调整方案

运用井网优化模型, 由模型中的两种改进方法得到该井区的两种不同最优方案(图 7、图 8)。

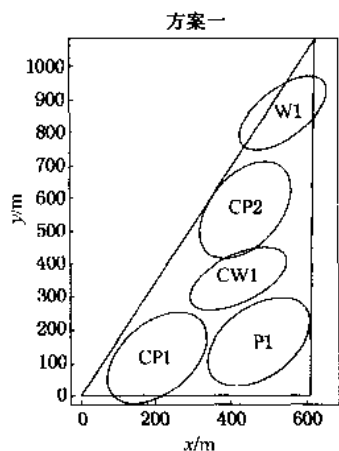


图 7 方法 1 完善方案

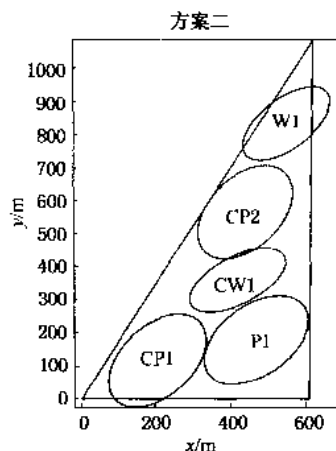


图 8 方法 2 完善方案

虽然用不同数学方法优选出了问题的两个最优解, 但对于实际油藏只能采用一套井网调整方案, 因此对两种方案筛选可以通过建立实际油藏模型进行生产预测, 优选出生产指标高的方案为最终该井区的井网调整方案。

(3) 裂缝长度的优化

通过改变裂缝长度, 得到不同大小、形状的油水井边界椭圆(表 1), 运用这样的椭圆分别去覆盖选定的重点研究区域, 得到卫 350 井区不同的井网调整方案, 然后数值模拟方法, 优选出生产指标(采油速度和采出程度)均较高的方案, 从而达到优化压裂井缝长的目的。其计算结果如表 2 和表 3 所示。

表 1 不同缝长条件下裂缝油井边界椭圆的大小和形状

缝长/m	80	85	91	97	103	110
长轴长/m	230	230	250	250	270	280
短轴长/m	170	170	180	190	190	190
长短轴之比	1.353	1.353	1.389	1.316	1.421	1.474

表 2 各方案采油速度结果表

年 份	80m		85m		91m		97m		103m		110m	
	方案一	方案二	方案一	方案二	方案一	方案二	方案一	方案二	方案一	方案二	方案一	方案二
1995	0.386777	0.386777	0.386778	0.386778	0.386778	0.386778	0.386777	0.386778	0.386778	0.386778	0.386778	0.386778
1996	0.213111	0.213111	0.213111	0.213111	0.213111	0.213111	0.213111	0.213111	0.213111	0.213111	0.213111	0.213111
1997	0.261056	0.261056	0.261056	0.261056	0.261056	0.261056	0.261056	0.261056	0.261056	0.261056	0.261056	0.261056
1998	0.915389	0.915389	0.915389	0.915389	0.915389	0.915389	0.915389	0.915389	0.915389	0.915389	0.915389	0.915389
1999	3.140666	3.140666	3.140667	3.140667	3.140667	3.140667	3.140666	3.140667	3.140667	3.140667	3.140667	3.140667
2000	2.173334	2.173334	2.173334	2.173334	2.173334	2.173334	2.173334	2.173334	2.173334	2.173334	2.173334	2.173334
2001	1.729834	1.729834	1.729834	1.729834	1.729834	1.729834	1.729834	1.729834	1.729834	1.729834	1.729834	1.729834
2002	2.410327	2.410327	2.410328	2.410329	2.410328	2.410328	2.410327	2.410329	2.410328	2.410329	2.410329	2.410329

续表

年 份	80m		85m		91m		97m		103m		110m	
	方案一	方案二	方案一	方案二	方案一	方案二	方案一	方案二	方案一	方案二	方案一	方案二
2003	2.11526	2.11525	2.115181	2.115202	2.115178	2.11518	2.11518	2.115177	2.115174	2.115172	2.115179	2.115177
2004	2.77424	2.77422	2.774136	2.774314	2.774119	2.774128	2.77412	2.774128	2.774107	2.774115	2.774102	2.774119
2005	2.39111	2.39132	2.391227	2.391446	2.391271	2.391167	2.39147	2.39141	2.391387	2.391143	2.391434	2.391314
2006	3.01425	3.01429	3.014227	3.014453	3.014208	3.014398	3.01437	3.01421	3.014214	3.014362	3.01431	3.014369

表 3 各方案采出程度结果表

年 份	80m		85m		91m		97m		103m		110m	
	方案一	方案二	方案一	方案二	方案一	方案二	方案一	方案二	方案一	方案二	方案一	方案二
1995	0.792333	0.792333	0.7923333	0.7923333	0.7923333	0.7923333	0.792333	0.7923333	0.7923333	0.7923333	0.7923333	0.7923333
1996	1.005444	1.005444	1.0054444	1.0054444	1.0054444	1.0054444	1.005444	1.0054444	1.0054444	1.0054444	1.0054444	1.0054444
1997	1.266500	1.266500	1.2665000	1.2665000	1.2665000	1.2665000	1.2665000	1.2665000	1.2665000	1.2665000	1.2665000	1.2665000
1998	2.181889	2.181889	2.1818888	2.1818888	2.1818888	2.1818888	2.181889	2.1818888	2.1818888	2.1818888	2.1818888	2.1818888
1999	5.322555	5.322555	5.3225553	5.3225553	5.3225553	5.3225553	5.322555	5.3225553	5.3225553	5.3225553	5.3225553	5.3225553
2000	7.495889	7.495889	7.4958889	7.4958889	7.4958889	7.4958889	7.495889	7.4958889	7.4958889	7.4958889	7.4958889	7.4958889
2001	9.225723	9.225723	9.2257228	9.2257228	9.2257228	9.2257228	9.225723	9.2257228	9.2257228	9.2257228	9.2257228	9.2257228
2002	11.63605	11.63605	11.636051	11.636052	11.636051	11.636051	11.63605	11.636052	11.636051	11.636052	11.636052	11.636052
2003	13.75131	13.7513	13.751232	13.751254	13.751229	13.751231	13.75123	13.751229	13.751225	13.751224	13.751231	13.751229
2004	16.52555	16.52552	16.525568	16.525568	16.525548	16.525539	16.52535	16.525357	16.525332	16.525339	16.525333	16.525348
2005	18.91666	18.91684	18.916595	18.917014	18.916619	18.916526	18.91682	18.916767	18.916719	18.916482	18.916767	18.916662
2006	21.93091	21.93113	21.930822	21.931467	21.930827	21.930924	21.93119	21.930977	21.930933	21.930844	21.931077	21.931031

结果表明：缝长为 85m 时的方案二其采油速度和采出程度均为 12 个方案之首，因此设计调整油井压裂最优缝长为 85m，并且采用缝长为 85m 时的方案二的布井法对卫 350 井区进行井网调整。

4 结论

① 应用饱和两相渗流与孔隙介质变形耦合理论，建立了低渗复杂断块油藏流固耦合模型，研究了注采过程中岩体与油、水的耦合作用机理。通过运用有限元软件生成四维三场流固耦合计算程序，模拟了三维地应力场在各个开发阶段的动态分布情况。并计算得到地下压力场、饱和度场、变形场与应力场的历史变化过程，进而分析整个注采过程中地应力场的变化情况，为后期压裂施工提供依据。

② 建立了低渗复杂断块油藏复杂地应力条件下不规则井网优化模型，以驱油面积和采出程度为目标函数，充分考虑了任意裂缝方位与井网的匹配关系，为低渗复杂断块油藏不规则井网的部署提供了一种新思路。

③ 将压裂井的作用边界简化处理为椭圆，用椭圆面去覆盖给定油藏区域。采用不同数学方法，得到该模型数学问题的不同最优解，通过建立实际油藏模型，以采出程度、采油速度最高为目标优选出最佳井网方案。

④ 通过优选不同缝长条件下生产指标较高的布井方案，达到优选缝长的目的。

⑤ 将该模型运用于现场实践，取得了较好的生产效果，值得推广应用。

参 考 文 献

- 1 薛世峰, 宋惠珍. 非混溶饱和两相渗流与孔隙介质耦合作用的理论研究 I 数学模型. 地震地质, 1999, 21(3): 243 ~ 252
- 2 薛世峰, 宋惠珍. 非混溶饱和两相渗流与孔隙介质耦合作用的理论研究 II 方程解耦与有限元公式. 地震地质, 1999, 21(3): 253 ~ 260
- 3 程世铭, 张福仁. 东辛复杂断块油藏[M]. 北京: 石油工业出版社. 1997: 98 ~ 101
- 4 李幼琼, 文明寨. 复杂断块油藏[M]. 北京: 石油工业出版社. 1997: 71
- 5 李宗信, 李幼琼, 彭鹏商. 复杂断块油田滚动开发技术研究[J]. 断块油气藏. 1995, 第 2 卷, 第 3 期 24 ~ 28
- 6 余守德. 复杂断块砂岩油藏开发模式[M]. 北京: 石油工业出版社. 1998: 1 ~ 2
- 7 尹泽明, 丁春利. 精通 Matlab 6[M]. 北京: 清华大学出版社. 2002: 111 ~ 210
- 8 张义堂, 刘慈群. 垂直裂缝井椭圆流模型近似解的进一步研究[J]. 石油学报. 1996, 第 17 卷, 第 4 期 71 ~ 77
- 9 邓英尔, 刘慈群. 两相流体椭圆渗流数学模拟与开发计算方法[J]. 石油学报. 1999, 第 20 卷, 第 5 期 48 ~ 53
- 10 杨能宇, 张士诚, 王鸿勋. 整体压裂水力裂缝参数对采收率的影响[J]. 石油学报. 1995, 第 16 卷, 第 3 期 70 ~ 76