



中国石化 油气开采技术论坛 论文集

2007

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 (2007)

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. 2007/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,
2007

ISBN 978-7-80229-383-0

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 108747 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

金圣才文化发展(北京)有限公司排版

北京瑞象今日印刷服务有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 29.75 印张 752 千字

2007 年 9 月第 1 版 2007 年 9 月第 1 次印刷

定价:90.00 元

编 委 会

主 任：王志刚

副主任：何生厚 张永刚

成 员：朱晓荣 曾庆坤 薛承瑾 胡风涛 宋开利
王步娥 薄启炜 程 滢 代理震 张诚东

中国石化油气开采技术论坛第三次会议会议纪要

(代前言)

为进一步提高油田注水开发技术水平,2007年5月10日至11日中国石化科技开发部和油田勘探开发事业部在南昌组织召开了油气开采技术论坛第三次会议。各油田分公司、勘探开发研究院及总部机关有关部门共160余人参加了会议。20位油气田开发生产科研一线的技术人员在大会上围绕油田注水工程技术介绍了最新研究成果和技术发展现状,5位特邀专家围绕注水工程技术有关方面的理论研究进行了学术交流。股份公司副总工程师何生厚出席会议并对大会进行了总结。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。现将有关事项纪要如下。

一、会议展示了近几年油田注水工程技术主要成果

在注水工作大调查的基础上,中石化东部老油田开展了注水井专项治理和注水水质专项治理工作,注水井开井率由78.8%提高到82.4%,分注率由45.4%提高到48.3%,层段合格率由64.3%提高到79.4%,水质改造工程完成后水质达标率可提高3.4个百分点,注水系统效率提高了3.2个百分点。

近年来通过组织重点项目攻关,油田注水工程技术取得了新的进展,对油田开发工作起到了支撑作用。近期重大技术突破主要有以下几个方面:

一是封隔器性能大幅提高。适应中深井的耐压42MPa、耐温150℃的封隔器得到推广,适应超深井的耐压60MPa、耐温180℃的封隔器研制取得成功。

二是套损井的修复和再利用技术基本配套。目前套损井套管补贴技术已推广应用。水井侧钻有所突破。在小井眼的完井技术方面取得了成效,现场得到了应用。针对套变小尺寸井,从管柱工具方面进行了研究配套。套管外窜槽封堵工艺也有创新性进展。

三是深井分层注水工艺配套技术趋于完善。完善了高压分层注水工艺管柱结构、工具及相应的应用软件。研制了测试、酸化、调配一体化工艺技术。

四是斜井分层注水工艺技术取得成功应用。研制了多套斜井注水工艺管柱。海上定向井注水工艺技术进一步提高,斜井注水井测试调配工艺技术攻关有新成果。大斜度井测试工具下不去问题也得到一定程度解决。

五是增注增效配套技术研究有新进展。重点是低渗注水井压裂酸化改造技术有新进展,细分酸化转向剂的研究有较大突破,缓速解堵剂有较大突破。酸

化压裂的针对性更强。

六是长寿注水井配套技术基本形成并得到了推广。

七是在碳酸盐岩油藏注水替油和注水驱油上进行了一些探索,取得了一些认识。

二、会议分析了注水工作中存在的主要问题

会议认为,随着油田开发挖潜对象越来越复杂、开发程度越来越高,油田生产系统进一步老化,新老矛盾给注水开发带来了一些难题。主要表现在:

一是对注水开发油藏的认识和投入工作量不足的矛盾还没有得到很好地解决,配套政策还不完全到位。注水投入和油藏经营的关系没有认真分析,认识不到位。

二是老区井下技术状况恶化依然十分严重。2006年,尽管开发系统加大了修复停产井的工作力度,当年待大修井数减少373口,但各类井下事故井数增加386口,各类井下事故井占油气水井总数的18.65%。老区油气水井井下技术状况恶化趋势依然严重。井下技术状况变差依然是制约股份公司老油气田稳产的重要因素之一。

三是油田注水水质状况有待进一步改善。近年来,股份公司逐步加大了注水水质改造力度,注水水质有了一定程度的提高。但是,对注水开发油藏来讲,短期的水质改善不能立即改变注水开发效果。只有通过长期不断投入,保持水质达标,才能改善注水开发油田稳产基础。

四是地面工程系统改造工作量大。近两年来,股份公司在地面工程系统改造方面取得一定进展,但由于老油田地面工程系统老化严重,问题的解决不可能一蹴而就。

三、会议对进一步抓好注水系统技术工作提出意见

从现实情况表看,中石化原油产量能否上升,关键看东部老油田是否稳定;而东部能不能稳定,关键还是看注水工作做得如何!搞好油田注水开发是实现集团公司战略目标的基础。实现“三年硬稳定,五年基本稳定”的目标是我们注水工作的大方向。为此,会议认为应抓好以下几个方面的工作:

一是从注采系统工程角度看问题,抓系统,系统抓。注水采油是一项大的系统工程。系统工程要求我们全面地看问题,不能够人为地分开看。采油和注水是矛盾的统一体,处理好注水和采油的匹配问题,是油田实现合理开发的根本要求。在具体工作中要做到“四个结合”:一是油藏与工程的结合,二是注与采的结合,三是地面与地下的结合,四是技术与经济的结合。这四个结合都是系统工程的问题,必须从系统上抓起,系统地处理矛盾,解决问题,使我们的油田走向可持续良性发展的道路。

二要切实抓好工程技术进步,提高开发水平。在油田开发中后期,工程技术正发挥着越来越重要的作用,油田开发对技术的要求也越来越高。具体要组

织好4个方面的攻关研究：一是加强研究以水处理为核心，提高地面注水工程系统效率，降低水质处理成本的注水水质处理技术；二是在井筒内重点开展井况治理技术、细分开采技术、长寿命管柱技术的攻关研究；三是立足地层，加强有效注水、深部调、堵、测和三采后进一步提高采收率等技术研究；四是立足注水系统，开展全节点的系统研究，包括注水系统节点分析新模式，有计划地组织注水单元提高系统效率的工程工艺改造等。

三是加大技术集成、技术引进和推广应用力度。科技管理部门要热心支持技术人员创新性集成项目的开题立项，加大技术集成和推广应用力度。如要进一步完善污水条件长寿注水管柱配套技术，加大长寿注水井技术推广力度，有计划地推广污水处理新技术等。

四、会议对论坛下步重点工作进行了安排

会议认为，中国石化油气开采技术论坛的成立，建立了中石化上游油气开采技术领域的交流协作新机制，为广大油气田开发开采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，在促进技术发展、加强技术交流、发挥整体优势、实现优势互补、锻炼培养新人等方面具有重要意义。论坛在指导委员会和学术委员会的领导下，已成功地召开三次会议，论坛运作逐步走向成熟和规范化。

学术委员会议上，委员们对本次会议的成功举办给予了充分肯定，对论坛的模式和发展方向进行了研讨，并就论坛第四次会议的主题内容和承办单位进行了讨论表决。会议决定论坛第四次会议的主题是“油气田完井工程技术”，由江苏油田工程技术研究院承办。

会议号召各油气田积极支持论坛建设，广大技术人员特别是青年科技人员有效利用论坛这一平台，积极参与，展示才华，充分交流和推广油气开采技术成果，为实现“东部硬稳定，西部快上产，天然气大发展”做出新的更大的贡献！

目 录

水平井注水新技术	吴晓东(1)
油田作业废水移动式物理—化学多功能快速深度处理技术与应用	蒲春生 张 更等(9)
JDJ 注水井解堵剂的研制及现场应用	赵 林 付美龙(16)
注入水水质对储层的适应性评价	唐 海 李晓平(19)
油田采出水处理关键技术研讨	王增林 祝 威(26)
优化注水工艺 提高运行效率	丰国斌(38)
强化工艺技术配套与管理 努力提高注水开发效果	朱晓荣 陈晓源等(43)
胜利油田注水工程技术进展	李希明 孙鑫宁等(58)
中深井高压分注技术	吴信荣 韩 进等(71)
立足油藏需求 加强集成配套 不断提高江苏油田注水开发工程技术水平	陈晓威 时维才等(80)
河南油田分层注入工艺技术研究及配套应用	石步乾 杨军虎等(93)
影响水质达标率因素分析及对策	党 伟(105)
小口径注水管线 PIG 清洗工艺研究与应用	周拾庆 张 霞等(112)
广利油田高盐水井腐蚀成因分析及对策	韩 霞 杨 勇等(120)
4in 套管井分层注水技术	韩 进 刘华杰等(131)
江汉油田分层注水工艺技术	姚永柏 徐兴权(139)
微生物+膜污水处理工艺技术研究及应用	程汉东(146)
井下油水分离技术的研究和应用	余梅卿 魏淋生等(154)
胜利油田分层注水技术集成应用及效果	丁晓芳 辛林涛等(162)
江汉油田注水井动态监测新技术	赵忠健 谢小辉(171)
合注井分层测试工艺技术	齐庆元 张庆生等(175)
胜利油田污水生化处理技术进展	李希明 徐 鹏等(182)
小断块油藏同井采注水工艺技术	李元如 岳 慧等(186)
镇泾特低渗透油田注水技术研究	曹 珍 马兴芹等(190)
江汉油田注入水水质与管理技术研究	胡雪滨(195)
水处理剂对油田采出水水质的影响	张 建(205)
油田含油污水生化处理技术研究及应用	张 毅(214)
胜利油田污水处理工艺中药剂的配伍性研究	韩 霞 杨 军(221)
鄯善油田注水系统防腐防垢技术室内研究	廖如刚(227)
撬装式含油污水处理装置的研制	王 军(234)
污水处理站自动控制技术应用	王小辉(238)
油田回注水物理防垢现场评价装置的研制及应用	周海刚 杜灿敏等(246)

提高油田注水系统效率的实践	孙海萍(251)
优化分层注水技术 提高注水有效率	邵宝林(257)
胜利埕岛油田分层注水工艺技术现状及改进措施	刘玉国 李常友等(260)
中原油田深层低渗油藏高压分注技术	刘汝福 邓小伟等(266)
变形井分层注水工艺技术	刘斌 林羽等(274)
水井带压作业技术	高广启 罗文莉等(279)
套管变形井分层挤注工艺技术	马宏伟 刘海玲等(283)
超高压注水工艺及现场应用	孔萍 石玉民等(288)
注水井防返吐分注技术研究	马宏伟 杨军虎等(295)
细分层注水工艺技术	王晖 石玉民等(299)
提高分层注水管柱工作可靠性研究与应用	范春宇 李世文等(303)
濮城油田卫42-43块特低渗高压砂岩油藏注水配套技术研究	史长平 杨永超(309)
荆沙油田注水工艺的发展与认识	卢瑜林(323)
低渗透油田增注技术的应用	孙治国(328)
江汉油田调剖堵水技术研究及发展方向	吴笃俊(333)
非均质油藏分层增注工艺技术研究与应用	魏明军 林伟民等(342)
江苏油田砂岩酸压增注技术研究与应用	唐海军 杲春(349)
层内自生气弱酸解堵技术注水井降压增注现场试验	曾庆辉 韩炜等(353)
江汉油田难注井层增注技术研究及应用	洪伟 胡云鹏(359)
双河油田上倾尖灭区西南部整体增注技术研究及应用	贾跃立 许惠林等(366)
聚硅纳米增注新技术	韦良霞 张春栋(370)
暂堵酸化技术在低渗透油藏的应用	范志毅 吕清河等(380)
多级分层酸化技术的研究与应用	范志毅 吕清河等(384)
多级连续分层酸化为主的技术集成改善剖面技术	张学锋 吕清河(388)
疏松砂岩油藏聚驱后分层注水技术	姜忠(396)
油田注入水配制聚合物技术研究	张秀君 马涛(408)
复合处理剂(FYS-1)在油田注聚采出液中的应用研究	赵永庆 赵玉鹏等(413)
低可生化性采油废水达标外排处理技术研究	孙正贵 祝威等(418)
常见注水伤害预防与控制研究	罗智(422)
分层测试技术在胡庆油田的应用	安海玲 王松艳等(425)
多级分注井验封技术在河南油田稀油区中的应用	谷亚贞 李红青等(429)
井下无线通讯技术在油水井动态监测中的应用	李仁忠 姚强(434)
注水井多级封隔器逐级验封技术研究与应用	王晗 赵玉坤等(440)
二氧化氯在油田注水系统中的应用	杨文新 何建华(444)
生物除硫杀菌技术在魏岗油田的试验及探讨	赵玉鹏 李景全(449)
示踪剂技术在塔河缝洞型油藏注水过程中的应用	林涛 王雷等(452)
醇类示踪剂技术在青海油田的应用研究	张龙胜(462)

水平井注水新技术

吴晓东

(中国石油大学(北京)石油天然气工程学院)

1 水平井注水简介

1.1 水平井注水的发展

目前水平井已经成为开发油气田、提高采收率的一项先进的重要技术。20 世纪 80 年代以来,在世界 20 多个产油国形成了用水平井开采油田较大的工业规模,截至 2000 年底,世界上的水平井井数已超过 20000 口,而其中以美国和加拿大钻水平井数最多。可以这样说,水平井已成为新油田开发、老油田挖潜以及提高采收率的重要技术。

水平井开发的油田,随着地层压力的衰竭,产量的降低以及含水率的上升,使得水平生产井必然要转换为注水井,从而增大地层能量,驱替产层中的残留的大量原油。目前,美国已有 9% 的水平井用于水驱采油项目;加拿大的水平井水驱开发项目占 5%。

水平井注水技术最初由 Taber 提出,并成功地经过了多个油田项目的论证。随着钻井成本的降低,水平井注水成为可能。另外,随着水平采油井地层能量的衰竭,必然会转化为水平注水井。

1.2 水平井注水的优点

通过科技工作者对水平井注水的研究发现,一般来说,相对直井注水水平井注水具有多方面的优势。

① 水平井注水时的压力降不会集中在某一点,而是分散在较长的泄油井段上,压力降和油水界面变形较小;

② 水平井各井之间泄油较均匀,前缘均匀推进,当多相同时流动时,流度比条件越不利,水平井优势越明显;

③ 在低渗透层钻水平井,可以提高注水及产油能力,减少油藏注入水的补充时间,注水见效早;

④ 在薄层油藏中,水平井注入速度近似线性注水速度。当地层 3m 厚时,水平井流体流动速度是直井的 8~10 倍。这一优势随地层厚度的增加而逐渐削弱,当地层厚度超出 90m,水平井的波及效率将低于直井;

⑤ 水平井可以使径向流转为直线流,可降低油水运移过程中的压力损耗。

水平井注水采油可分为水平井注水直井采油和水平井注水水平井采油,细分下去,又可以分为不同的井网布局情况。并非所有的水平井注水效果都优于直井注水。水平井注水效果与油藏特性、井网分布、水平井长度、流度比等因素都有密切的关系。

2 水平井注水与直井注水对比分析

2.1 水平井注水直井采油

2005 年, M. Algharaih 和 R. B. C. Gharbi 等人通过数值模拟方法, 考虑压力在水平井筒中的降低, 研究了水平井注水及分支井注水直井采油情况下的注水效果与直井注水直井采油的注水效果对比。井网分布考虑了四种情况: 水平井直井交错分布线性注水、双分支井直井交错分布线性注水、直井水平井法线分布线性注水及双分支井九点法注水, 其中考虑到形状因子、水平井段长以及流度比对注水效果的影响。四种井网分布示意图如图 1 所示。

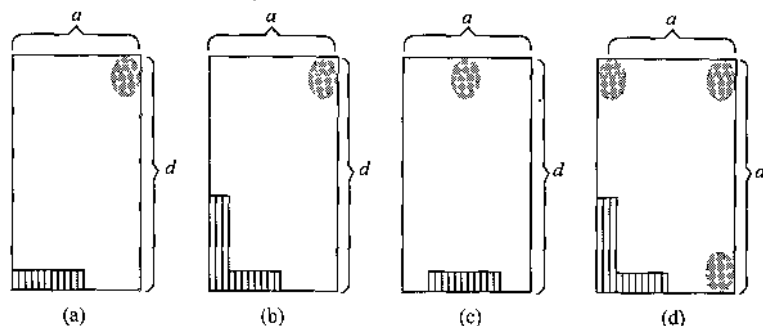


图 1 水平井注水直井采油井网分布图

(1) 水平井直井交错分布线性注水

数值模拟研究发现, 水平井直井交错分布线性注水系统(如图 1(a)), 在所有考虑到的形状因子, 水平井长度及流度比情况下, 其注水效果均远差于直井注水直井采油。并且, 随着水平井段的增大, 效果变得更差。随着形状因子的增大, 注水效果也愈差(图 2)。

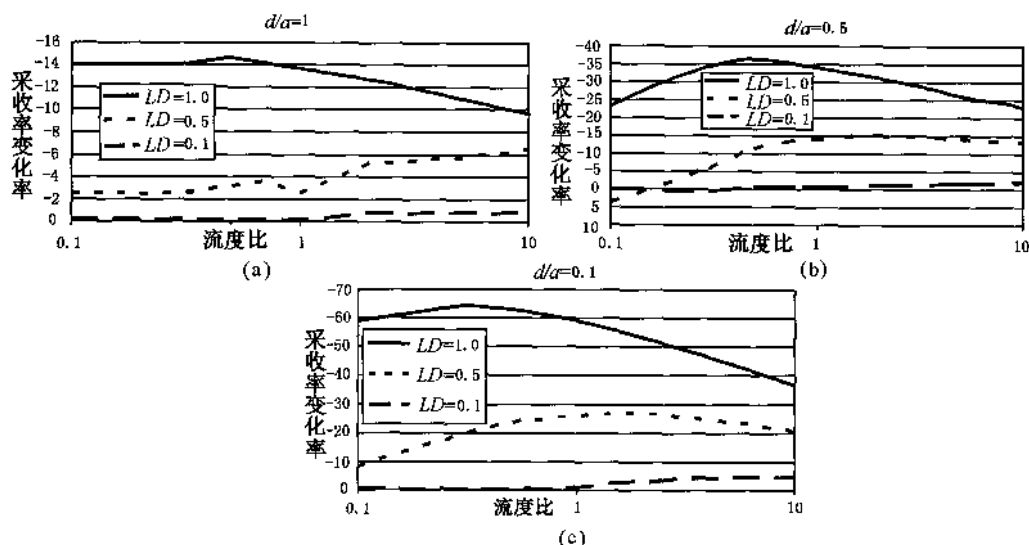


图 2 水平井直井交错分布井网下的注水效果图

(2) 双分支井直井交错分布线性注水

一口双分支井注水, 一口直井生产, 如图 1(h) 所示。在大形状因子, 低流度比情况下, 使用长水平分支井注水, 其效果优于直井注水。当流度比大于 0.8 时, 即使长分支井其效果

也不及直井注水。

随着形状因子的减小，由于注水水平井和生产井距离减小，双分支井注水效果在任何流度比和分支井段长度上都不及直井注水(图3)。

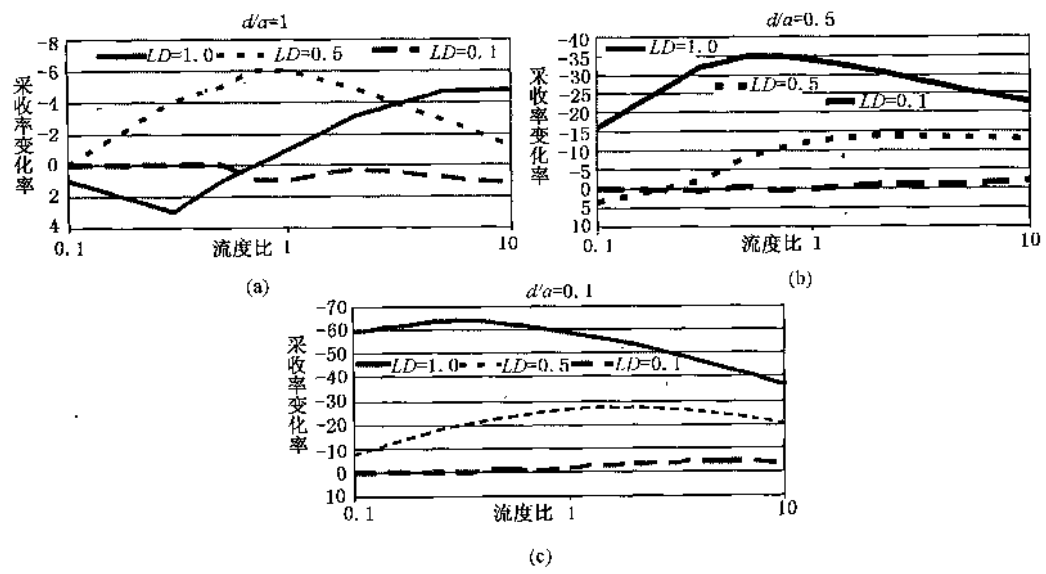


图3 双分支井直井交错分布井网下的注水效果图

(3) 直井水平井法线分布线性注水

该注水布局是，水平井注水，法线正对的方向上直井生产(如图1(c))。该注水布局方式下，所有的形状因子，流度比及水平井长度下，注水效果都优于直井注水。但是，当形状因子减小时，随着流度比的增大，长水平井注水的优势逐渐降低，趋近于直井注水(图4)。

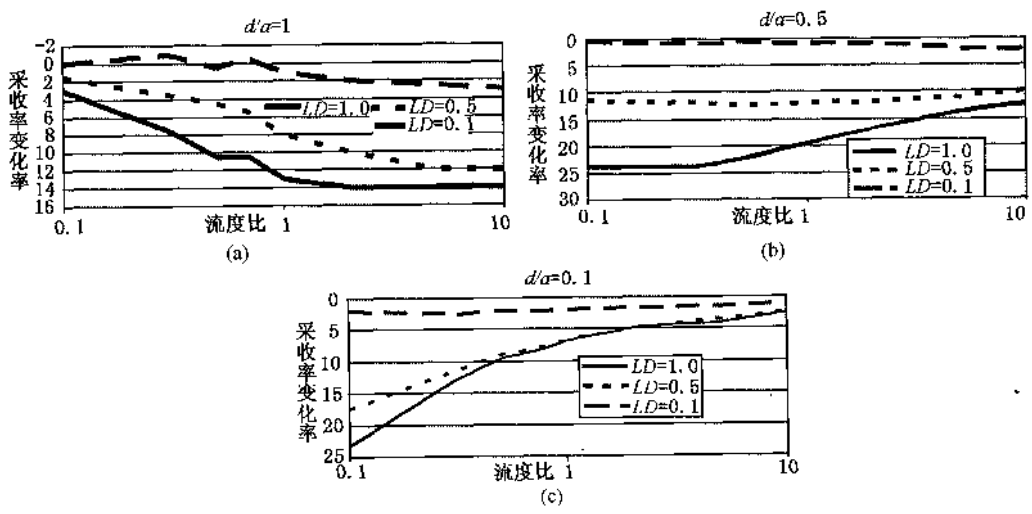


图4 直井水平井法线分布井网下的注水效果图

(4) 双分支井九点法注水

双分支井九点法注水如图1(d)所示，一口双分支井注水，三口直井生产。该注水方式

下, 当形状因子较大时, 所有研究的水平井长度及流度比范围内, 多分支井注水效果均不如直井注水。但随着形状因子的减小, 多分支井九点法注水效果越来越好, 对于短分支井, 当形状因子较小时, 其注水效果优于直井注水。因此, 九点法驱油对形状因子敏感性强, 高形状因子时, 直井驱油效果较好(图 5)。另外, 长水平井并不能保证较好的驱油效果。

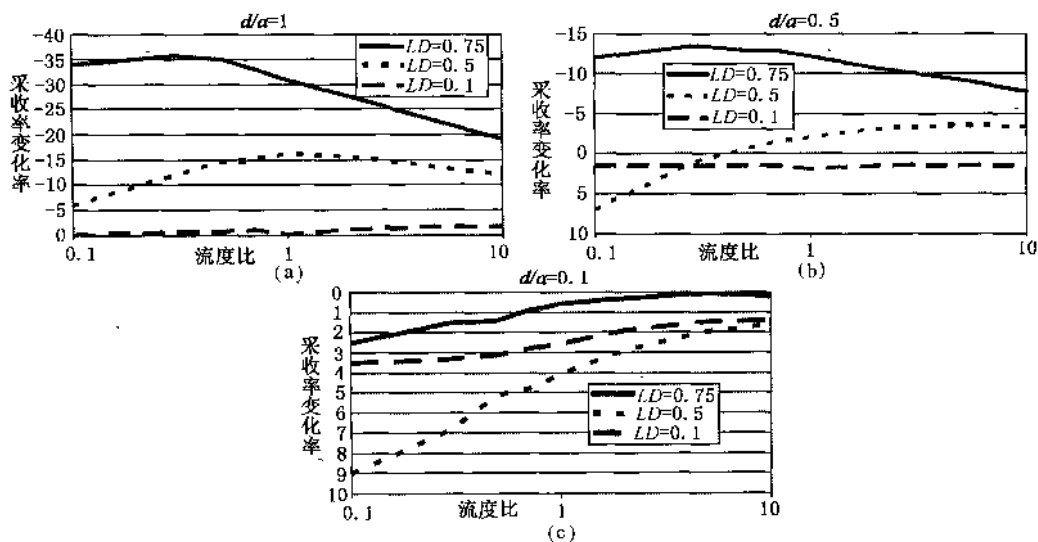


图 5 双分支井九点法井网下的注水效果图

2.2 水平井注水平井采油

1992 年, J. J. Taber 和 R. S. Seright 第一次通过理论推导, 阐明水平井注采系统相对于直井注采系统在注入速度和扫油效率上的优势。

以五点法注采井网为基础, Taber 推导薄油层中水平井注水的流速为:

$$q_{hw} = q_{L(s)} \left[\frac{\pi L}{\pi L + 4.6h \log\left(\frac{1/2h}{r_w}\right)} \right]$$

式中, $q_{L(s)}$ 为五点法注采系统中最大理论线性流速 $q_{L(s)} = 2.93q_5 \left(\log \frac{W}{r_w} - 0.420 \right)$, q_5 为五

点法直井注水系统的流速 $q_5 = \frac{1.54kh\Delta p}{\mu \left(\log_{10} \frac{W}{r_w} - 0.420 \right)}$

在薄油层中, 五点法水平井注水速度与线性流速相接近。在 10ft 厚的油层, 水平井注水速度是直井的 8~10 倍。即使在 1000ft 厚的油层, 水平井注水的速度也是直井的 2 倍。

对于水平井的扫油效率, 与油层厚度具有很大的关系。

$$E_h = 1 - \frac{0.441h}{2L}$$

对于 100ft 厚的油层, 水平井注水的扫油效率超过 90%, 但是随着油层厚度的增大, 水平井注水的扫油效率优势下降, 当油藏厚度 300ft 时, 水平井注水扫油效率低于直井扫油效率。

指出水平井注水相对直井注水可以提高面积扫油效率 25%~40%, 水平井注水对薄地层、大井距具有较大的优势, 随着油层厚度的增大和井距的减小, 水平井注水的优势减弱。

水平井注采系统的扫油效率与水平井注采井的布局具有很大的关系。

本文讨论四种水平井注采系统的井网布局方式：平行对应正向井网、平行对应反向井网、水平交错分布井网、L型井网布局。

(1) 平行对应正向井网

如图6所示，水平对应正向井网为注入井和生产井相同方向水平井，注水流向与采油流向相反。

G. Popa 等人应用数值模拟方法，考虑到水平段压力损失的情况下，以水平井长 300m，注入速度 $300\text{m}^3/\text{d}$ 为例进行模拟。结果注入水在第 1050 天，从生产井的根部突破，此时驱油效率 64.81%，采收率 32.32%。

(2) 平行对应反向井网

如图7所示，水平对应反向井网，注入井采油井为两相对平行水平井，注入流向与采油流向相同。

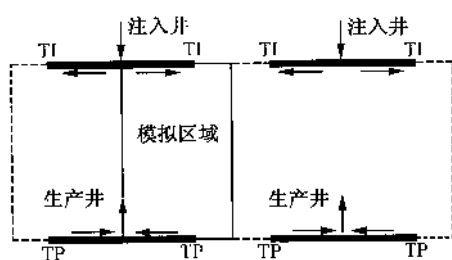


图6 平行对应正向井网

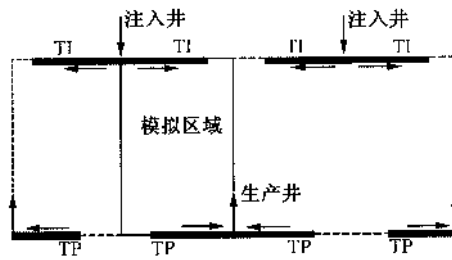


图7 平行对应反向井网

考虑到水平段压力损失的情况下，以水平井长 300m，注入速度 $300\text{m}^3/\text{d}$ 为例，注入水在第 1560 天，从生产井根部突破，此时驱油效率 97.84%，采收率 48.02%。可以看出仅仅因为方向的改变，驱替数率和采收率都大大增加。

通过比较发现，平行对应反向井网推迟了注入水突破时间，提高了突破时的采出程度。因此平行对应反向井网注采效果好于平行对应正向井网(图8)。

(3) 水平交错分布井网

水平交错分布井网可以分为正向趾趾、正向根趾、反向根趾和反向趾趾四种情况。

G. Popa 等人对反向趾趾水平交错井网进行了研究(图9)。

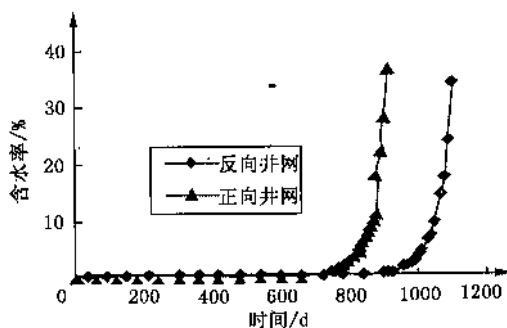


图8 平行对应正向、反向井网水突破时间对比

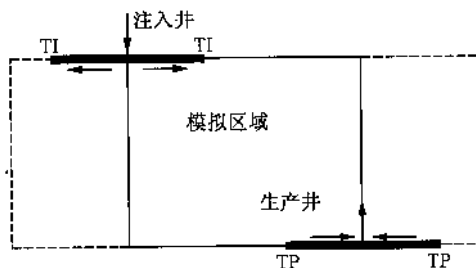


图9 平行交错反向趾趾井网

考虑到水平段压力损失的情况下，水平井长 250m，注入速度 $300\text{m}^3/\text{d}$ 时，第 2250 天，水在根部突破，驱油效率 95.09%，采收率 48%。

凌宗发等人在土哈油田建立研究区，对平行对应反向井网以及平行交错趾趾井网的效果

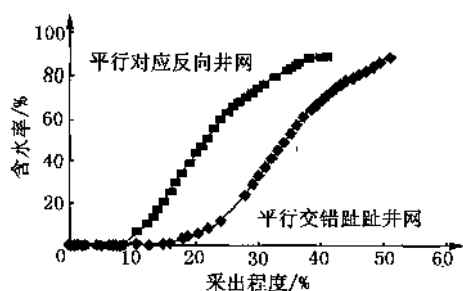


图 10 平行对应反向、交错趾趾水突破时间对比

进行了研究。

平行交错趾趾井网开发效果优于平行对应反向井网，其注入水突破时间晚，油井含水率低，油藏最终采出程度高(图 10)。

(4) L 型井网布局

L 型布局，就是注水井与生产井垂直呈 L 型垂直分布，注水井的趾部与生产井的趾部接近。

G. Popa 等人以注采井水平段长均为 700m 进行模拟，注水一年后，水饱和度及压力分布如图 11。其压力分布与五点法直井注水相似。可以预测注入水仍会从生产井的根部处突破。

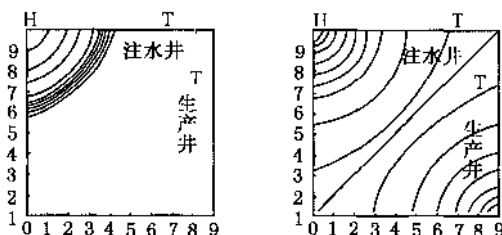


图 11 正方形 L 型布局注水饱和度及压力图

为了获得更大的采收率，需要注入水在趾部突破。采用短注水井，长生产井组合。注水井 200m，生产井 850m，水突破发生在生产井趾部。水突破后，水锥进没有加剧，随着注水的进行，水前沿垂直于生产井。

短注入，长生产 L 型布局，为二次采油中，趾部泄油能力不足提供了能量。

3 水平井注水敏感性因素分析

M. Algharaih 通过数值模拟研究，对流度比、油藏非均质性、垂向渗透率、井距和水平注采井在油层高度上的分布位置对水平井注水效果的进行了分析。

3.1 流度比对水平井注水组合的影响

以直井注采系统为基础，对水平井注水平井采、直井注水平井采及水平井注直井采在不同流度比下的增产效果进行研究图 12。

可以看出流度比越高，水平井注水增产峰值降低，但是随着流度比的增大，水平井注水稳定增产期变长。另外可以看出水平井注水水平井采油效果相对较好。

3.2 油藏非均质性影响

以直井注采系统为基础，假设 X 方向渗透率是 Y 方向渗透率的两倍，研究图 13 中八种不同组合相对直井注采的增产效果。

可以看出在非均质油藏，水平注水井和生产井在同一个方向上效果最好。在不同的方向上效果最差。

3.3 垂向渗透率影响

以直井注采系统为基础，分别分析三个垂向渗透率 1.0, 20.0, 100.0md ($1\text{md} = 10^{-3}$

μm^2) 情况下水平井注采系统相对直井注采系统的增产效果(图 14)。

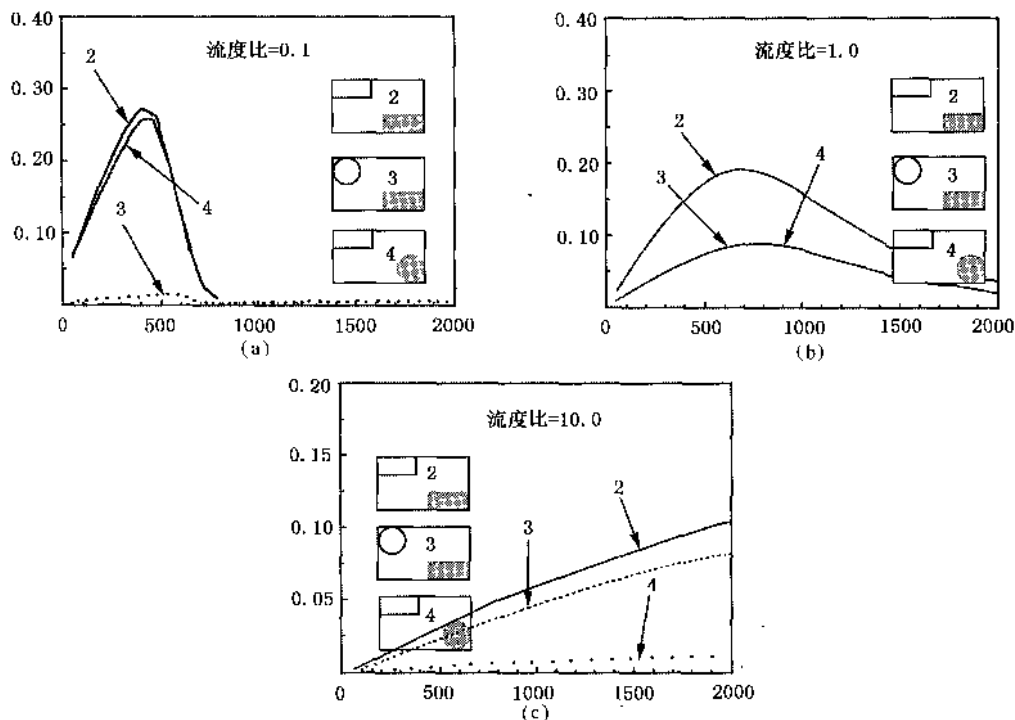


图 12 不同流度比及井网组合下的注水效果

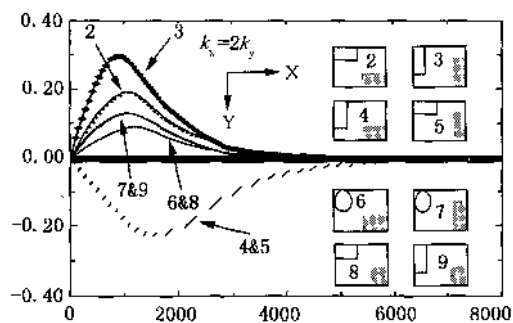


图 13 非均质性影响下的不同井网注水效果

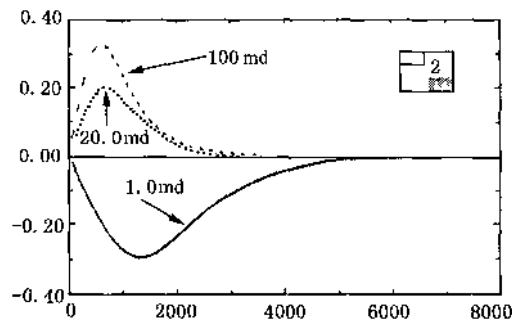


图 14 不同垂向渗透率下的注水效果图

从图中可以看出水平井注采系统随垂向渗透率的增大, 效果变好。在低垂向渗透率下, 直井注采效果较好, 而高垂向渗透率下, 水平井注采组合效果更好。

3.4 井距的影响

以直井注采系统为基础, 对三种井网控制面积(100, 200, 300 acres)(1 acres = 0.405ha)下的增产效果进行了分析(图 15)。

可以看出在所有井网控制面积情况下, 水平井注采系统均比直井注采系统要好。水平井注采组合的增油峰值随井网控制面积的变化不大, 但是随着井网控制面积的增大, 增油高峰期向后推迟, 使得采收率增加更多。

3.5 水平井在油层高度分布上的影响

为了分析水平生产井和注入井在油层高度上的分布对注水效果的影响, 凌宗发等人设计

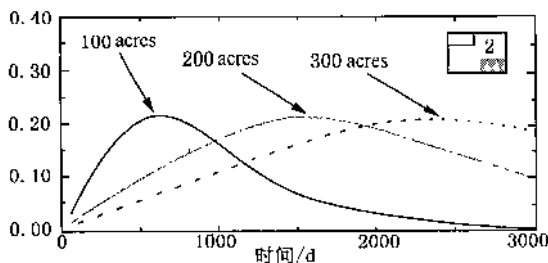


图 15 不同井距下的注水效果图

6 种方案, 用数值模拟方法进行研究分析。研究发现, 水平井在油层中位置的变化对开发效果的影响不是很明显。

4 水平井注水完井技术

很多有关水平井注水的文献都分析了非均质性以及摩擦压力损失而带来的水平井注水剖面不均匀的问题。美国和加拿大水平井注水现场也反映了该问题对注水效果的影响。

较长的水平井段很有可能穿过几个不同性质的油层, 由于非均质性的影响水平井段各处的渗透率等参数并不相同。另外, 由于摩擦压力损失, 水平井注水井从根部到趾部, 沿着水平井段压力逐渐降低。这些都会导致压力剖面的不均匀推进。但目前尚未有文献报道对这方面的解决方法。

作者注意到, 限流射孔技术在分层压裂以及 SAGD 水平井注水蒸气方面有着广泛的应用。它通过限制不同目的层的射孔数目和孔径来控制各层实际吸入排量, 保证各层同时得到有效处理。其中 SAGD 水平井注汽过程与水平井注水方式及原理较为相似, 可以把限流射孔技术(LEP—Limited Entry Perforation)引入到对水平井注水剖面调整中来。

5 水平井注水的研究方向

① 用数值模拟方法, 研究水平井井网(包括纯水平井井网与水平井和直井联合井网)渗流场的压力分布、流线分布及产量。

② 研究不同油藏参数、流体参数、井网参数对水平井井网注水波及系数、见水时间和采出程度的影响, 分析各种影响因素及其之间的关系。

③ 研究注水时机、注水强度对水平井注水开发效果的影响, 优化水平井注水策略。

④ 从经济角度对各种水平井井网进行评价、优选。

⑤ 研究非均质性油藏, 水平井注水剖面检测方法。

⑥ 研究非均质油藏, 水平井段注水剖面调整方法。

6 结 论

① 并非所有的水平井注水都比直井注水有效。它与注采井型、井网分布及油藏参数有很大的关系。

② 水平井注直井采系统中, 以法线注水方式最为有效。

③ 水平井注采系统中 L 型短注水井长生产井组合效果最优; 水平交错分布井网优于平行对应反向井网, 而平行对应反向井网又优于平行对应正向井网。

④ 随流度比的增大, 所有注水系统的注水效果都下降。高流度比时, 水平井注水系统效果最好。

⑤ 在非均质油藏, 水平井注采井在同一方向上取得较好的效果。

⑥ 水平井注采系统适合大井距采油; 水平井在油层高度分布上的影响不大。