



中国石化 油气开采技术论坛 论文集

(2008)

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（2008）

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. 2008/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,
2008

ISBN 978 - 7 - 80229 - 641 - 1

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(2008)第 091164 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

北京密云红光制版公司排版

北京科信印刷厂印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 16.75 印张 418 千字

2008 年 7 月第 1 版 2008 年 7 月第 1 次印刷

定价:60.00 元

编 委 会

主 任：王志刚

副主任：何生厚 张永刚 张 勇

成 员：薛承瑾 曾庆坤 丰全会 杨海滨 景步宏
苏建政 王步娥 薄启炜 薛 芸 姚 峰

前 言

为总结、交流近几年完井工程技术领域的技术成果,提高完井技术水平,2008年4月9日至4月10日在江苏扬州召开了中国石化油气开采技术论坛(以下简称论坛)第四次会议。会议由中国石化科技开发部和油田勘探开发事业部主办,江苏油田分公司石油工程技术研究院承办。张永刚、张勇及李东海同志分别主持了会议,何生厚同志参加会议并作了总结发言。景步宏等21位生产科研一线的技术人员在会上介绍了最新技术成果,斯伦贝谢、哈里伯顿、威得福等公司及万仁溥等8名行业内知名专家作了专题报告。来自中石化各油田、研究院及总部有关部门150余人参加了会议。会议期间,论坛召开了指导委员会和学术委员会会议,确定了论坛第五次会议主题和承办单位,并根据工作需要调整了论坛学术委员会的组成。

一、会议交流了近几年完井技术领域的主要成果

完井是石油工程技术领域关键技术之一。经过多年的努力,已初步形成相对配套的完井技术。常规水平井完井、疏松砂岩完井技术在油田得到了广泛应用,分段完井技术进步较快,适应不同类型油藏滤砂管和高压充填组合完井技术取得突破,具有自主知识产权的实体膨胀管完井技术得到应用,高温高压酸性气藏完井技术受到重视,低产油气田完井技术有新的进展。其中:

在常规水平井完井技术方面,发展了包括水平井完井优化技术、水平井及侧钻水平井完井技术、水平井完井防砂工艺技术、水平井射孔工艺技术和水平井分段开采工艺技术,实现了不同油藏采用不同完井方式开采,达到了水平井的储层保护与分段开采要求。

在开窗侧钻井完井技术方面,配套改进了相应的非标小抽油杆、抽油泵、扶正器等工具,发展与完善了小套管尾管完井及其配套的射孔试油生产工艺技术,实现了完善井网、老区挖潜开采剩余油的目的。

在超深井完井技术方面,形成了包括井身结构优化技术、完井方式优选技术、超深井完井管柱设计与施工技术在内的系列工艺技术,实现了包括塔河等油田的高效开发。

在疏松砂岩完井技术方面,研制了精密微孔滤砂管、液压分级箍和套管外封隔器等关键工具,实现了整装砂岩油藏、复杂断块油藏、稠油油藏的防砂管完井和砾石充填完井,取得较好的应用效果。

在小井眼修复二次完井技术方面,开发了斜向器开窗工具和专用射孔枪弹,优化了泥浆体系,形成了扶正、悬挂、固井、射孔等二次完井系列工艺。

在酸性气田完井技术方面,发展了地面安全控制技术、射孔-测试-酸化联作技术和完井管柱优化技术,实现了高温高压酸性介质气井井口压力和温度预测,降低了流程冲蚀,优化出可实现射孔、测试、储层改造、多次诱喷、压井作业的测试管柱,保证了气井的正常生产。

在膨胀套管完井技术方面,解决了材料、膨胀管连接、密封等技术难题,研制了强塑性、耐腐蚀不锈钢膨胀管,并应用于优化钻井井身结构、套管修补、尾管悬挂以及处理复杂

地层等领域，取得了较好效果。

二、会议提出了改善完井技术工作对策

会议分析了完井技术发展过程中存在的主要问题。主要包括：完井工程技术研究与应用还没有真正体现勘探开发一体化的要求；完井理论体系有待进一步发展；完井工程技术管理界限有待进一步分清。为此，会议希望在勘探开发一体化基础上，进一步加强完井技术工作。

一是要加快完善甲方完井工程管理体系，加快完井工程技术服务体系的建设；

二是要大力推广成熟配套的完井技术。主要包括：常规完井技术；水平井分段完井技术；防砂完井技术；开窗侧钻井完井技术；超深井完井技术；酸性气田完井技术；包括膨胀套管完井技术在内的二次完井工艺技术等。

三是要加强完井技术难题的攻关研究。会议认为，油藏工程、钻井工程、采油工程等跨学科、多部门联合攻关是搞好完井工程工作的关键；降低完井成本，提高完井技术的油藏适应性是完井技术的发展方向。目前尤其要深入开展油气藏水平井、分支井等复杂结构井完井及配套工艺的研究与攻关，引进或开发专用的完井生产管柱及工具，切实解决筛管完井水平井的分段开采、分段改造、控水堵水和水平井固井等技术难题，逐步实现完井技术的智能化。

会议希望油气田开发战线的广大技术人员，特别是青年科技人员，充分利用论坛这一平台，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”作出新的更大的贡献！

目 录

江苏油田完井工艺技术现状	景步宏 陈 岩等 (1)
胜利油田水平井完井采油技术	王增林 张全胜等 (12)
塔河油田深井完井工艺技术研究与应用	张志宏 曾文广 (18)
中原油田小井眼深井完井及配套技术	吴信荣 (26)
河南油田完井工程技术	丁连民 姚奕明 (37)
江汉油田完井工程技术现状及进展	陈建达 鲁 进等 (48)
四川气田完井技术现状及展望	王世泽 戚 斌等 (64)
射流深穿透射孔技术在江苏油田的应用	洪光明 徐苏欣等 (70)
水平井筛管完井多段塞完井液技术	肖驰俊 杨胜利等 (76)
塔河油田超深双分支井—TK908DH 井完井技术	赵志国 李玉民 (83)
普光气田高含硫气井完井工艺技术探讨	田常青 史晓贞等 (90)
河南油田稠油井优化射孔技术应用	周 晔 杨 琪等 (95)
建南酸性气藏完井生产技术探讨	姜建平 陈爱平等 (100)
非均质油藏射孔完井工艺技术研究与应用	蔡国华 马欣本等 (107)
胜利新型无固相完井液技术	薛玉志 李公让等 (111)
塔河油田碳酸盐岩油藏完井工艺技术	朱 勇 张茂斌等 (116)
“三高”超深气井射孔酸压测试联作优化技术	许小强 刘啸峰等 (123)
大牛地气田水平井、分支井完井工艺技术	邢景宝 靳宝军等 (127)
腰英台高温、高压酸性气藏完井与试油测试工艺技术	张亚文 于学信等 (134)
江苏油田水平井完井技术研究与应用	陈黎祥 徐贵春 (139)
塔河油田超深井钻完井技术	李双贵 周 伟 (146)
高温、高压酸性气藏完井技术	于学信 王景瑞等 (152)
川东北地区中、高渗碳酸盐岩气藏钻井完井液技术	张麒麟 王学英等 (158)
复杂断块油田二次完井与配套技术	李凡磊 刘建国等 (164)
胜利油田水平井完井技术	彭志刚 王绍先等 (171)
不同完井方式下水平井产能分析	刘青山 李冬梅等 (177)
四川高压气井完井生产管柱优化设计	胡顺渠 蒋龙军等 (188)
纳米材料在油田二次固井上的研究与应用	陈 渊 张文玉等 (193)
水淹层固井技术研究	李泽林 万曦超等 (197)
大牛地气田易漏窜井固井工艺技术	巢贵业 高春华 (205)

实体膨胀管补贴套管技术研究	王木乐	孟令祥等 (210)
膨胀管二次固井技术在河南油田的应用	肖武锋	邓新华等 (217)
侧钻井完井技术在河南油田老区开发中的应用与发展	刘春晓	童 琥等 (220)
水平井逆向挤压充填防砂完井工艺技术	岳 慧	郭晶晶等 (225)
水平井裸眼砾石挤压充填防砂完井技术研究与应用	刘延坡	刘晓军等 (229)
河南油田稀油水平井完井技术的应用与发展	童 琥	刘春晓等 (232)
复合射孔器效能监测及优选	赵开良	吴永清等 (237)
高负压射孔技术及其应用	王明贵	吕世杰等 (244)
斜井再射孔深度校正方法探讨	刁林涛	吴 锋等 (248)
预弯曲动力学防斜打快技术在胜利油田的应用研究	胥思平	狄勤丰等 (254)

江苏油田完井工艺技术现状

景步宏 陈 岩 李汉周 徐苏欣 睢文云

(中石化江苏油田分公司工程技术研究院)

摘 要 完井是油田开发工程中的重要环节,是衔接钻井和采油工程而又相对独立的工程,是从钻开油层开始,到下套管注水泥固井、射孔直至投产的一项系统工程。完井设计水平的高低和完井施工质量的优劣直接影响着油气田的发现和勘探开发的经济效益。本文详细阐述了江苏油田常规套管射孔完井射孔参数、工艺优化、水平井完井、小井眼侧钻井完井、保护油气层完井液及完井配套工艺等新完井新技术新工艺的研究和应用进展,表明江苏油田的完井技术已逐步成熟,形成了适应不同油气藏和不同井型井况要求的完井技术与配套技术系列,基本满足了江苏油田复杂小断块油藏开发的需要。

主题词 完井工艺 现状 江苏油田

1 概述

江苏油田产油区主要分布在高邮、金湖、海安三个凹陷,至2007年底,江苏油田分公司已累计探明油田35个,投入开发油田33个,共有采油井1530口,其中常规直井和定向井1373口,侧钻井133口,水平井34口,开井1304口,日产油水平4539t,平均单井日产油3.4t;注水井502口,开井385口,日注水平13392.2m³,平均单井日注水34.6m³,天然气井5口,开井4口,日产气水平8.74×10⁴m³,平均单井日产气2.19×10⁴m³。

其油气藏地质及开发技术具有如下特征:

油藏埋深中等,在980~3450m之间。油藏几何形态以断块油藏为主,断裂十分发育,构造被切割成许多大小不等的断块,有些断块面积都小于0.5km²,纵向上有多套含油层系,含油井段长,从30~1515m不等,每个断块甚至同一断块内,不同油组不但有不同的油水界面,而且油气的富集程度、油层的物理性质、天然驱动能量的大小差异都较大。

油藏的油气储集空间和油气流动通道以孔隙型和孔隙裂缝型为主。储层岩性以碎屑岩为主,有少量的碳酸盐岩和火成岩,储层物性以中低孔中低渗为主,中低渗储量占全油田80%以上,层间渗透率差异较大,油层压力为正常到低压,层间压力差异中等。

油藏原油性质以常规油为主,地层原油黏度3.7~20mPa·s,凝固点为28~43℃,含蜡量23%~37%,地层水多为NaHCO₃型,矿化度(2~4)×10⁴mg/L。

油井单井产液量较低,一般在几立方米到几十立方米之间,平均单井日产液12m³左右,注水井单井注水量较低,平均单井日注水35m³,气井单井产气量较低,平均单井日产气2.2×10⁴m³。

油气水井以定向丛式井为主。

由于油气藏特定的地质和工艺特征,江苏油田的完井方式以φ139.7mm套管注水泥固井射孔完井为绝对多数。围绕射孔完井,工程技术人员不断深化射孔完井参数优化和射孔工艺进行研究,结合油藏特点引进推广应用了射孔参数优化设计软件;针对低孔、低渗、低压的

“三低油藏”，推广应用 102 枪及配套的 102 弹、127 弹、1 米弹深穿透射孔技术，有效改善了地层的渗流条件，提高了油井的产能；针对部分地层胶结弱疏松砂岩油藏，为有效防止地层出砂，研究应用了高孔密射孔技术；针对油水井油层多、层间非均质严重的情况，为平衡非均质油层层间的流动阻力，调整油井的产出和注水井的吸水剖面，研究应用了变密度射孔技术；为提高油水井的完善程度，解除近井筒附近的堵塞，研究应用了射流深穿透射孔技术；针对纵向上含油层系多、油层井段长、油水井井斜大的情况，研究推广应用了油管输送射孔技术、TCP 与开孔装置联作工艺、大夹层，多级自动起爆联作工艺；针对层数多、层薄、跨度大、井段长、层间物性差异不大而又需要进行压裂改造的油井，研究应用了限流压裂射孔技术；针对一些油层距底水很近、油水层之间无可靠的泥岩阻挡层、需要进行水力压裂改造、压裂后水窜的油井，研究应用了压裂后水窜注水泥封堵二次完井技术。

“九五”以来，随着各类特殊结构井开发技术的兴起，江苏油田特殊结构井完井技术也得到了很大发展。侧钻井方面，根据油田 $\phi 139.7\text{mm}$ 套管井侧钻，研究应用了 $\phi 89\text{mm}$ 、 $\phi 95\text{mm}$ 小套管尾管完井及其配套的射孔试油生产工艺技术；水平井完井方面，对于高含水 and 低渗透油藏，研究应用了套管射孔完井及其配套的分段射孔和参数优化技术，对于疏松砂岩油藏，研究应用了套管射孔和精密微孔防砂筛管复合完井及其配套酸洗替浆技术。

围绕完井保护油气层，研究应用了系列保护油气层完井液技术，针对黏土矿物含量高、水敏性强的中低渗特低渗储层，为降低液相侵入、减少水敏和水锁造成的储层伤害，研究应用了聚合醇完井液、环境无害化保护油气层完井液、新型杂聚糖苷完井液、超低渗透完井液技术；针对易遭受固相侵害的中孔中渗、中高孔中高渗储层，研究应用了聚合物屏蔽暂堵完井液、理想充填完井液技术。

2 定向井射孔完井工艺

2.1 射孔参数优化

(1) 射孔优化设计技术

引进西南石油学院软件系统《油井射孔优化设计》，针对对不同储层和不同的射孔目的，对射孔器、射孔条件(负压值和压井液)、射孔方法进行优选。通过对渗透率、孔隙度、地层压力、供油半径等地层参数和地层污染情况的分析，确定合理的射孔方案，选择适当的弹型和施工工艺，从而达到低投入、高产出的结果。该软件已成为油田射孔参数设计的主要工具和手段，它具有以下特点：

① 采用先进的有限元数学分析方法和电模拟实验手段，结合现场试油生产实际，获得了影响射孔井产能规律的再认识，修正了产能的回归方程，提高了预测精度，为射孔参数优选提供了可靠的理论依据；

② 基于负压清洗孔眼的机理，考虑射孔参数、储层和流体特性的影响，利用有限元模型、流体非达西渗流规律建立了预测保证孔眼清洁最小负压的新方法；建立了射后孔眼的岩石应力应变模型与渗流的耦合模型以求解保证孔眼稳定防止地层出砂的最大负压新方法。

该软件技术已在江苏油田 30 个区块约 300 多口井的射孔优化设计中得到了应用，为油田增产上产提供了技术支持。

(2) 非均质油藏调整注采剖面射孔参数优化技术

江苏油田多数油田已投入注水开发，由于油藏非均质较强，特别是纵向上层间、层内的物性差异，使得许多油田都出现主力砂体水窜严重，非主力砂体动用程度低的现象，特别对

于薄互层油层，矛盾更为突出。针对这一难题，通过优选射孔参数来调整孔眼流动阻力与注水层内渗流阻力，来调节注水层位的纵向吸水矛盾。通过在沙 19 断块、高 6 断块注和韦 5 块等区块的应用研究，采用变密度射孔优化注水井的吸水剖面，渗透率较高的层为 8 ~ 10 孔/米，渗透率较低的注水层为 16 孔/米，实施后均取得了较好的效果。

(3) 疏松砂岩防砂射孔参数优化技术

江苏油田有少数几个断块属于疏松砂岩油藏，如闵 20 断块、许浅 1 断块，为中孔中低渗油藏，在试油和测试过程中出砂现象明显。对这类储层的射孔，是不以深穿透为根本目的的，而是既要保证在地层与井筒之间建立有效流动，又要满足试油及后续生产过程中不出砂或尽可能少出砂。因此我们除了在射孔压差（采用近平衡压差或小负压差射孔）、排液工艺（采用温和抽汲排液工艺）等方面开展了优化设计，射孔参数优化方面主要是通过提高射孔密度及孔径，减小炮眼压降，降低孔内液体流速，减小流体对地层的拖拽力，从而有效地抑制地层出砂。同时高孔密也相应地增加液体通过的面积，即增加了液体的产出量，达到提高产能的目的。对于聚能弹射孔，高孔密是牺牲了穿深达到增加渗流面积的效果的，所以对应枪型配的射孔弹比常规射孔弹略小，目前我们主要引进了 102 枪系列，能够实现：89 弹最大孔密 25 孔/米；102 弹可以达到 32 孔/米。

油井应用：许浅 1 块地层，优化射孔参数采用了 102 枪，89 弹，孔密为 25 孔/米，相位角 60°；有效地抑制了油井出砂。闵桥油田阜三段油藏油井优选了 102 枪、102 弹，90°相位角，孔密 16 ~ 20 孔/米，试油测试和生产过程中未出现出砂。

水井应用：闵 20 断块注水井应用优化射孔后，改变了初期投注井注水压力超高，注水层段砂埋而注不进水的情况，注水压力明显较低，基本满足了配注要求。

2.2 射孔工艺技术

江苏油田的射孔工艺技术经过 30 余年的发展，射孔枪弹从最初的 57 - 103 型弹、60 弹、73 弹、到现在的通用的 89、102、127、1 米弹，越来越向深穿透方向发展；射孔方式也由单一的电缆传输发展到油管传输，应用了油管传输射孔、射孔测试联作等技术。近些年来又推广应用了管输多级起爆、小井眼深穿透、射流深穿透射孔、带压射孔作业等多项射孔新工艺。

(1) 油管输送射孔技术

江苏油田地质结构复杂，定向井占 90% 以上，加之油藏多为中低渗多层油藏，因此油管输送射孔技术应用广泛，与电缆射孔方式相比，凸显了以下优势：

- a. 可采用高性能射孔器，以实现高孔密、深穿透、大孔径、多相位射孔的需要，从而获得最佳的油气井产能状态。
- b. 可以实现较高的负压值射孔，保护油气层提高产能。
- c. 一次下井可以同时射开较长井段或多个层段的地层。
- d. 可以进行电缆输送射孔难以施工的大斜度井、水平井、稠油井及复杂井的射孔作业。
- e. 对于高压油气井射孔，安全可靠，可防止井喷。
- f. 可与地层测试联作，以缩短试油周期，准确录取地层资料，有良好的经济效益。

江苏油田油管输送射孔技术经过数年的发展，目前已经日趋成熟，并逐渐向更深发展，在起爆方式上有投棒起爆和压力起爆两种方式，在工艺上先后发展了投棒开孔起爆技术、压力开孔起爆技术、复合压力开孔起爆技术，大跨度夹层多级起爆技术等。

① TCP 与开孔装置联作工艺：

普通的油管传输射孔有压控和投棒两种起爆方式。压控起爆相对于投棒起爆对施工中各项技术的要求较高，特别是对油管、枪身以及起爆器等各部分的密封和耐压要求较高，但是投棒方式由于受到井斜、井下落物以及死油等条件的限制，不能采用。而 TCP 与压力开孔装置联作工艺就是针对井下复杂条件的施工井设计的特殊起爆射孔技术。

压力开孔起爆技术有以下几项技术特点：

- a. 下井过程中环空与油管内隔离开，射孔后环空与油管内相通。
- b. TCP 射孔作业，可以掏空环空液面实现负压射孔，保护油气层。
- c. 性能可靠，射孔的同时实现开孔。
- d. 可以用于水平井的负压射孔。

从 2005 年至今我局采用复合压力开孔起爆技术每年约完成 100 井次的油管输送射孔施工，并且每年呈上升趋势，平均以 10% 的比例在递增。

② 大夹层，多级自动起爆联作工艺：

针对部分区块层系多、夹层跨度大的难题，研究应用了大夹层多级起爆工艺技术，在大跨度夹层处，采用筛管、油管、压力起爆器来代替常规油管传输射孔的夹层枪，在实际施工过程中取得了较好的应用效果。

目前我局的大跨度多级起爆技术已应用成熟，每年约 10 口井使用该工艺。2001 年 1 月 4 日，该技术在真 177 井油管传输射孔施工中进行了应用，并与投棒开孔装置进行了联合，射孔总长度为 88.8m，最大夹层为 66.4m，引爆一次成功。近年来改进采用增压装置，2006 年在真 168 井运用两次增压 3 个起爆器起爆获得成功。2007 年，真 133 井经套管补贴后采用 73 枪射孔，其最大的夹层达到 207.7m，且无法通过环空加压起爆，通过在上层起爆枪身的尾部配接 60 型增压装置、设定 9 个次级起爆器的起爆销钉等增压起爆技术的应用，取得了一次起爆的成功，不仅创造了 207.7m 夹层的增压起爆纪录，而且切实解决了管输中大跨度夹层的射孔难题。

(2) 射流深穿透射孔技术

射流深穿透射孔技术是以高压水射流理论为基础，采用先进的液压控制技术，以高压水为动力，利用冲头对套管开窗，再以高压水通过高压软管对地层不断射流切割成孔，致使该软管不断深入，在地层中切割出径向距离长、孔径大、清洁无污染的通道。与常规射孔弹射孔相比，具有孔眼长而大（深达 2~3m，孔径 20~35mm）、孔眼无污染、套管强度受损小、可有选择的定向射孔等优势。适用于提高井筒周围地层导流能力的各种油井的增产作业。

该工艺在我局韦庄油田 w5-17 和 w5-19 井应用，取得了较好的实施效果。w5-17 井共射孔 6 个，5 孔达到设计要求，w5-19 井共射孔 5 孔，4 孔达到设计要求。w5-17 井作业前没有产量，作业后日产油 1.8t/d，最高达 2.3m³/d；w5-19 井作业前日产油 1.1t/d，作业后日产原油 2.1t/d，最高达 2.7m³/d。

(3) 限流压裂射孔技术

对于油井层数多、层薄、跨度大、井段长、层间物性差异不大的油藏，采用常规射孔设计，压裂无法保证每个层都能同时得到改造。因此针对这类储层开展了限流压裂工艺技术研究，根据限流压裂工艺要求，通过严格控制射孔炮眼数量，一般不超过 30 孔，孔密一般为 2~8 孔/米，以超过常规压裂排量 1~1.5m³/min 进行施工，利用炮眼摩阻提高井底压力迫使压裂液分流，使破裂压力相近的地层依次压开。

限流压裂工艺研究在金 4-3 井、马 35-2 井、天 79-4A 的应用均取得了较好效果。金

4-3 井压后日增油 6.5t, 马 35-2 井压后日增油 6.0t, 天 79-4A 压后日增油 4.0t。金 4-3 井射孔方案优化为 3、6-8 号层 4 孔/米, 12 号层 8 孔/米。通过压裂前后井温曲线对比可以得出: 3、6-8、12 号层都得到了压裂改造。压后获得了很好的增产效果, 与同区块其他井压裂效果相比, 增产效果非常明显。

(4) 油井压裂水窜二次固井技术

存在底水的油藏实施水力压裂措施改造时, 压窜风险是始终存在的; 同时压裂油井距一线注水井距离较近时, 注入水从注水井沿裂缝加速突进, 形成舌进水淹也是客观存在的。尤其对我局韦 5 块等这样具有底水, 油水层之间又无可靠的泥岩阻挡层的油藏进行水力压裂时, 虽然在压裂选井、压裂工艺方面都作了充分考虑, 采取小排量小规模控制缝高缝长, 施工中前置一定量的暂堵剂, 后期钻井过程中, 在油水层之间增加管外封隔器, 提高固井质量等措施, 仍有部分油井水力压裂后层间水窜, 致使油井 100% 产水而关井。自 2000~2003 年, 仅试采二厂所辖油区内共有 10 口井因水力压裂措施造成水窜而关井。

针对常规挤水泥封窜工艺存在的不足, 结合油井压裂水窜的特点, 开展了如何确保水泥浆有效封堵裂缝, 减少油层污染, 小修队可以施工, 安全可靠的裂缝封堵工艺研究。我们通过对光管柱和封隔器挤灰封窜工艺在现场应用井例的仔细研究, 结合 1997 年宋 1 井试油时插管挤灰封窜的施工实践, 对井下裂缝状态、水泥浆流变性、胶结强度、施工参数、水泥浆进入炮眼后的流动方向等进行认真研究, 形成了一套较完善的压裂水窜封堵工艺和后期配套工艺, 实践表明这项工艺已成为解决油井水力压裂后层间水窜问题的有效手段。经矿场应用, 已使 7 口濒临报废的死井复活, 工艺成功率 100%, 措施有效率 87.5%。

3 侧钻井完井工艺

油田进入开发中后期, 利用老井眼进行套管开窗侧钻, 已成为开采老油田剩余油的重要手段。1999 年江苏油田开始引进应用老井侧钻工艺技术, 由于老井全部为 $\phi 139.7\text{mm}$ 套管, 鉴于当时的技术水平, 侧钻井眼选用 $\phi 102\text{mm}$ 尾管完井, (1999~2000 年) 但这些井投产后很快就暴露出含水上升快的问题, 如侧富 100, 侧纪 4, 侧真 21, 侧联 25-1A, 侧真 32 等井, 生产不到 5 个月含水全部上升至 100% 而关井。分析原因, $\phi 118\text{mm}$ 井眼下 $\phi 102\text{mm}$ 尾管, 环空间隙小, 固井质量差, 管外窜槽。因此 2001 年开始, 技术人员从采油工艺可能承受的极限井眼入手, 开展了 $\phi 139.7\text{mm}$ 套管井侧钻, 采用 $\phi 89\text{mm}$ 尾管完井的研究与应用, 获得成功并推广应用。

3.1 $\phi 102\text{mm}$ 尾管完井固井质量问题原因分析

在 $\phi 139.7\text{mm}$ 套管内侧钻, 只能选用 $\phi 118\text{mm}$ 钻头钻进, 井眼尺寸为 $\phi 118\text{mm}$, $\phi 102\text{mm}$ 尾管完井, 套管本体外径为 102mm, 接箍外径为 $\phi 110\text{mm}$, 套管与井眼之间的环空间隙, 本体处为 8mm, 接箍处为 4mm。一方面环空间隙小, 水泥浆流动阻力大, 固井施工困难, 水泥环厚度薄强度低, 另一方面环空间隙小, 尾管难以居中, 固井水泥环厚薄不均, 同时循环阻力大, 顶替效率差, 井壁虚泥饼难以清除, 都直接影响固井的质量。

3.2 $\phi 89\text{mm}$ 尾管完井提高固井质量可行性分析

$\phi 139.7\text{mm}$ 套管内侧钻, $\phi 118\text{mm}$ 钻头钻进, 井眼尺寸 118mm, $\phi 89\text{mm}$ 尾管完井, 本体外径 89mm, 接箍外径为 107mm, 本体与井眼之间的环空间隙为 14.5mm 接箍与井眼之间的环空间隙为 5.5mm, 环空面积接近 $\phi 102\text{mm}$ 尾管的 2 倍。具体计算参数见表 1。

表 1 不同尾管与井眼组合环空面积表

尾管 \ 井眼	φ177.8mm 套管内 侧钻井眼 φ152mm		φ139.7mm 套管内 侧钻井眼 φ118mm	
	尾管规格/mm	127	114	102
环空面积/cm ²	54.75	79.35	27.63	47.12
水泥环壁厚/mm	12.5	19	8	14.5

从尾管扶正工艺来分析,尾管与井眼间隙从 8mm 增至 14.5mm,为下入合适的尾管扶正装创造了条件,有利于固井质量的提高。

3.3 φ89mm 尾管完井工艺技术

采用尾管悬挂法固井完井,即:使用 φ139.7 × φ89mm 的悬挂器,尾管结构:尾管悬挂器 + φ89 尾管串 + 定位套管 + φ89 尾管串 + φ89 双回压凡尔 + φ89 旋流短节 + 套管鞋。使用具有减阻作用的弹性套管扶正器,确保封固井段的套管串在小间隙井眼中的居中扶正,油层上下 50m 井段每根套管加 1 只扶正器,其他部位每 2 根套管加 1 只扶正器。尾管悬挂在井筒内而不是座于井底,有利于保证固井质量。尾管与原井套管重叠段不小于 50m。固井前对井眼进行充分清洗。运用流变学对注水泥设计相关参数进行修正。严格控制注替返速。在固井水泥浆中添加 WO-1 降失水剂、分散剂、减阻剂,使水泥浆在全过程低失水、减少窄环空间隙的流动阻力,使薄水泥环坚韧优质。

2001 ~ 2005 年,共实施 φ139.7mm 套管侧钻井 60 余口,全部下入 φ89mm 尾管固井完井,固井质量有了大幅度的提高,同时又节约了尾管成本。

2005 年以后,引进胜利油田生产的 φ95mm 套管进行侧钻井尾管固井完井,共实施 87 口,施工成功率 90% 以上。既保证了固井质量,又为小套管井采油和后期作业带来更大的空间。

3.4 配套射孔试油工艺技术

(1) 射孔试油管柱结构

侧钻井完井井身结构为 φ139.7mm + φ89mm,φ89mm 尾管内径为 76mm,如果选用 φ60mm 油管,其接箍外径为 73mm,和 φ89mm 套管内径的间隙只有 1.5mm,不能满足作业需要,只有比 φ60mm 油管低一个等级的 φ48mm 油管才能满足起下作业要求,但如果全部采用 φ48mm 油管,其强度又不能满足要求,因此只能采用 φ73mm + φ48mm 复合结构。试油排液管柱结构至下而上为:φ48mm 丝堵 + φ48mm 油管 + φ48mm × φ73mm 异径接头 + φ73mm 油管。

(2) 小尺寸射孔器的选择

大量的试验证明:射孔侵入深度和入口孔径可随空隙的变化而大大地变化,但在空隙较小的情况下,通常可获得较好的侵入深度和套管上的入口孔径。考虑到射孔枪井下爆炸后枪体会发生膨胀变形,射孔弹发射后孔眼留下不规则的金属毛刺,根据现场测试统计:外径 φ89mm、φ102mm 的射孔枪爆炸后枪体的膨胀范围为 2 ~ 5mm,孔眼的毛刺高度为 3 ~ 6mm。因此射孔器与套管之间必须留有 8 ~ 11mm 间隙。否则会发生卡枪而影响正常施工。因此低渗油田侧钻井 φ89mm 小套管射孔弹选用 60 枪、60 增效弹,φ95mm 小套管井选用 73 枪、89 弹。

(3) 射孔弹传输方式

$\phi 89\text{mm}$ 尾管完井, 其井筒内径仅为 75.8mm , 由于侧钻小套管井存在一定的斜度, 特别是射孔井段也呈较大角度, 采用电缆传输的射孔方式比一般的大斜度井更难实现, 因此, 保证井筒的清洁、畅通是电缆传输射孔方式得以实现的关键。另一种则采用油管传输射孔方式。小尺寸油管既是射孔枪的传送工具, 也是试采作业中排液的通道。

江苏油田侧钻小套管井全部采用射孔完井方式。对 $\phi 89\text{mm}$ 尾管完井的侧钻井全部采用 60 枪、60 弹射孔, 对 2005 年后引进的 $\phi 95\text{mm}$ 尾管完井的侧钻井部分井采用了 73 枪、89 弹射孔, 孔密 $12 \sim 16$ 孔/米, 电缆传输或油管传输, 常压或负压射孔。

4 水平井完井工艺

2002 年, 江苏油田实施了自行设计自行施工的第一口水平井—安丰平 1 井, 获得成功, 从而真正揭开了水平井开发的序幕。五年来, 陆续有 35 口水平井投产, 截至 2007 年底, 35 口水平井日产油水平 380t , 产量占全油田产量的 8.29% 。

目前江苏油田水平井采用的完井方式有两种: 固井射孔完井和筛管复合完井。对于陈堡、永安等渗透性强的边底水油藏和高含水油藏, 为便于分段开采、避免局部水平段水锥难以控制和今后的各项其他工艺措施的实施, 完井选择以套管射孔完井为主, 射孔参数依据软件初算, 结合地质特点、钻井实钻轨迹、测井资料和区块经验等综合因素优化设计; 工艺上一般水平井设计采用负压射孔, 对于地层疏松、胶结差的油藏采用近平衡压力射孔, 高压地层和地层压力情况不明的情况下采用正压射孔。水平井射孔传送方式采用油管传送射孔枪, 液压引爆。对于防砂井、油水同层的井、井身轨迹不在油层中间的井采用定向射孔; 对于井身轨迹在油层中间, 且非出砂井, 采用非定向射孔, 全相位螺旋布孔。水平井射孔大多选用大孔径深穿透射孔弹, 如 89 枪、89 弹, 102 枪、102 弹或 127 弹, 孔径 $10 \sim 12\text{mm}$, 孔密 $10 \sim 16$ 孔/米; 对于非均质性较严重和长井段射孔的水平井, 采取分段射孔、分段开采。对于疏松砂岩油藏, 如周 43 块, 优化采用了精密防砂筛管复合完井, 筛管以上固水泥, 配套酸洗替浆工艺, 这种完井方式除能有效防砂, 还具有油层段不固井、防砂筛管口径大、不污染油层, 节约射孔费用、利用管外封隔器可实现油层的分段开采等优势; 对油层条件比较稳定不出砂的中低渗砂岩油藏也采用精密冲缝筛管完井(即将精密微孔滤砂管换用冲缝筛管, 其他工艺相同), 相应的节约完井成本, 如韦 2 平 1 井。

截至 2007 年底, 江苏油田共钻完井 34 口水平井, 其中 29 口采用了射孔完井方式, 5 口采用筛管复合完井方式。

4.1 精密微孔复合防砂管防砂筛管完井工艺

周庄油田周 43 块是我局典型疏松砂岩油藏, 目的层 K_2T_1 段储层为大孔、粗喉、高渗透性储层, 其岩石胶结类型为颗粒间点-面式接触, 地层岩石胶物含量少, 胶结差。区块原油性质也较为特殊, 具有高密度、高黏度、低凝固点等特点, 原油在地层流动时对地层颗粒的推曳力大。周 43-2 井, 防砂前平均每月在井底沉积 7 米高的沙柱。周 43 块属边底水油藏, K_2t_1 共有 10 口井生产, 7 口井有出砂现象, 砂粒粒径中值 0.117mm 。对于出砂严重的周 43-2 井、周 43-3、周 43-5 几口井先后进行了化学防砂和机械-化学综合防砂, 但每次检泵作业时, 砂埋管柱都在 30m 以上, 防砂效果不理想。同时, 周 43 块定向井的防砂实践表明, 由于该区块油稠, 使用金属毡滤砂管时, 细砂、胶质、沥青质易包裹在金属毡上, 造

成堵塞，防砂效果不好。因此，在该类油藏水平井开发的完井方式选择上，研究优选了精密微孔筛管复合完井，即筛管以上采用 5½in 套管水泥固井 + 裸眼 + FP140W150 精密微孔复合防砂管的复合完井方式。

(1) 完井管柱结构(由下而上)

多功能洗井阀 + 套管 + FP140W150 精密微孔复合防砂管 + 5½in 短套管 + FP140W150 精密微孔复合防砂管 + 5½in 套管 + 盲板 + 管外封隔器 + 分节箍 + 5½in 套管至井口。管外封隔器以上水泥固井。防砂管柱结构设计满足完井后替浆洗井要求，确保了泥浆酸液能建立液流的正反流动循环通道，为解除裸眼与筛管环空的泥浆滞留污染提供了重要保证。

(2) 应用情况

周 43 平 1 井采用裸眼精密微孔复合防砂管完井方式(图 1)，配套裸眼水平段的筛管段替浆、固井钻塞和酸洗工艺技术，2004 年 11 月 22 日投产，初期自喷投产，控制生产(3mm、4mm 油嘴)，日产量 18t，生产过程中一直无出砂现象。2005 年 3 月、4 月我们在该区块采用同样完井方式投产了周 43 平 3 井和周 43 平 2 井，均实施成功，达到预期的效果，截至 2007 年底，三口井已累计产油 20466t。

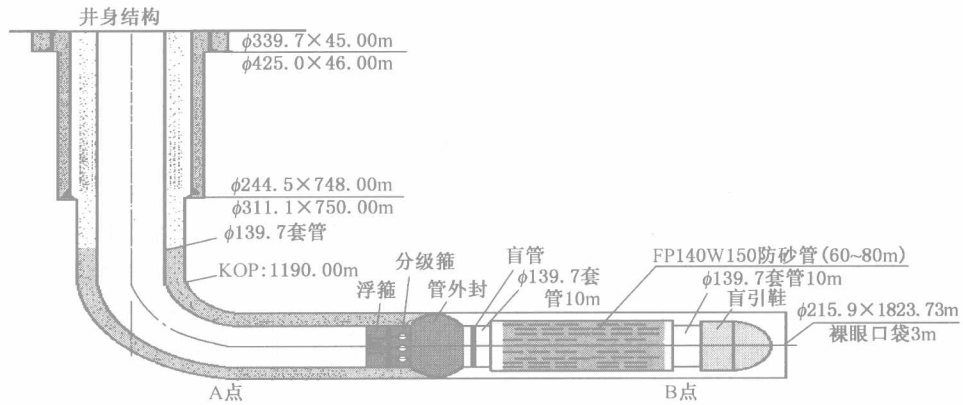


图 1 周 43 平 1 井结构示意图

4.2 水平井射孔工艺

江苏油田油藏类型相对单一，基本以砂岩油藏为主，而且具有油水关系复杂，非均质性较强的特点，近九成的水平井选择采用固井射孔完井方式。

(1) 射孔参数的优化

对于常规砂岩油藏以最佳产能比为目标优化射孔参数。根据油藏地质资料实体建模，采用有限元数值模拟方法研究不同射孔参数下的产能比，将模拟结果用多变量非线性回归的方法拟合出方便现场使用的曲线图版，再根据得出的曲线图版进行对比分析和验证，结合完钻后的实际井身轨迹、测井资料、同层位开发井的经验等实际情况加以综合调整，优化出射孔参数(孔深、孔密、相位等)。

对边、底水能量充足的油藏，射孔参数设计必须兼顾产能和控制底水脊进的双重要求。考虑避开射筒低边以进一步提高避水高度，射孔控水的孔密通常调控在 20 孔以内。射孔控水主要通过分段打开和变射孔参数的方法来实现，通过优化分段打开方案和打开单元的射孔参数，来改善水平井筒的流率分布，在满足水平井产能的同时又能延缓底水的锥进。如瓦 6 平 1 井 2006 年 5 月采用分段、变孔密射孔后，初期产量达到 27t/d，与同断块同层位先后投

产的2口井定向井对比,产量为定向井的3~7倍,目前仍保持日产油量20t,含水仅8%,经济效益显著,充分显现出定向井无法比拟的优势。

(2) 射孔方式优选

对于水平井,传统的电缆射孔方式在水平井段和大斜度井段中无法进行,因此只能选用油管传输射孔,或是采用连续油管输送。为此,我们在没有连续油管装备的情况下,设计和优化了射孔管柱结构,实现了水平井长跨距井段一次性射孔,在现场多次施工并取得了成功。2005年,针对个别水平井射孔施工中,曾经出现过因各种原因造成的误射孔事故而改进了水平井传输射孔管柱,将缓冲器下在压力开孔器以上,结构为:(自上而下)油管+校深短节+油管+缓冲器+油管+压力开孔器+引爆器+射孔枪,有效的避免了误射孔。如在富18平1井进行试油施工时,下油管传输射孔管柱时,油管通径规落入管柱内的缓冲器上,避免了误射孔事故。

(3) 水平井射孔分级延时引爆射孔技术

目前的油管传输射孔起爆方式有投棒起爆和油管或套管加压起爆两种,而将起爆棒投送至水平井段难度很大,因此水平井射孔多采用油管或套管加压起爆方式。套管加压起爆适用于正压射孔;油管加压起爆适用于负压射孔、近平衡射孔或是已射过孔的、套管无法加压的井。水平井射孔井段普遍较长,若一次引爆可能会出现不完全引爆,或引爆时会产生强烈振动和冲击,易造成发射率低、炸枪、严重时可能造成枪卡在套管里以及伤害套管等事故。施工现场也出现了这些情况,如Sh26P1井,射孔长度211m,射孔发射率仅为51%,起出的枪身变形严重。针对这一问题,我们开发设计了分级延时引爆射孔技术,即射孔枪被分为几级,每一级的引爆时间比上一级滞后一定的时间。其优点是发射率高、安全可靠。现场应用6口井,发射率均大于95%。

5 保护油气层完井液技术

江苏油田自20世纪90年代开始开展系统保护油气层技术的钻井液和完井液进行研究,研究和形成了一系列储层保护完井液技术。

(1) 聚合物屏蔽暂堵完井液

20世纪90年代初期、中期江苏油田分别开展两性离子、复合金属离子聚合物钻井液完井液的应用研究,并分别在富100-1、高6-15井首次现场试验,取得成功。并先后实施26口井。随后将屏蔽暂堵技术与聚合物钻井液进行有机结合,对聚合物钻井液进行改性进行储层保护。该技术在1995年码头庄油田会战中推广应用32井次,使单井产量提高15%~30%,钻井过程中的各项指标明显改善,复杂时间由3.05%降至0.64%,平均井径扩大率由14%降至5%,油层井径小于5%,完井电测成功率由60%提至72%,钻井周期和储层浸泡时间得以缩短,取得较好的经济效益,减少了油层污染。

作为江苏油田系统保护油气层专项技术在油田真武、黄珏、沙埕等其他区块全面推广,到目前为止已累计应用几百口井,对降低储层伤害,提高钻井技术指标等方面都作出了重要贡献。

(2) 聚合醇完井液

江苏油田1996年开始开展聚合醇钻井液研究和现场应用,该钻井液具有稳定井壁、润滑防卡、减少井下复杂情况、保护油气层及对环境污染小等特点。在内陆湖高集油田高6-6井、真武地区的真164井、盐城地区的盘X1井三口井试验、推广并获得成功。该体系的