



# 中国石化 油气开采技术论坛

论文集 (2014)

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(2014)

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. 2014 / 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, 2014. 12

ISBN 978-7-5114-3092-2

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 251929 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

### 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](mailto:press@sinopec.com)

北京富泰印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经销

\*

787×1092 毫米 16 开本 29.5 印张 744 千字

2014 年 12 月第 1 版 2014 年 12 月第 1 次印刷

定价: 120.00 元

## 编 委 会

主 任：李 阳

副主任：张永刚 张 勇

成 员：赵 磊 胡风涛 薄启炜

吉树鹏 王步娥 刘立宏

# 中国石化油气开采技术论坛第九次会议纪要 (代前言)

为加强低渗致密油气藏一体化开发技术交流,提高低渗致密油气藏一体化开发水平,2014年8月6日至7日由中国石化科技部和油田勘探开发事业部组织,东北油气分公司承办,在吉林召开了以“低渗致密油气藏一体化开发技术”为主题的中国石化油气开采技术论坛第九次会议。总部机关、直属院、各分公司、国勘及天然气工程项目部等18个单位的116人参加了会议。

会议共征集了论文117篇,22位来自油气田科研生产一线的专家和技术骨干围绕低渗致密油气藏开发和技术创新工作做了专家报告、综述报告和专题交流,提出了目前存在的问题和发展的方向。股份公司副总工程师李阳对大会进行了总结,指出油气开采技术论坛已经成为青年科技工作者快速成长、展示风采的平台,本次会议展示了近年来中石化在致密油气藏勘探开发工作中所取得的丰硕成果和技术进步,对推进下步工作,指导今后的科技攻关具有重要作用。现将有关事项纪要如下:

## 一、会议交流了近几年低渗致密油气藏开发技术成果

近年来,随着国家、中石化加大低渗油气藏开发技术的研究力度,以及国内外在致密油气藏、页岩油气藏开发方面所取得的成功经验,为我们营造了良好的学习、消化、引进和再创新的环境。通过几年的努力,低渗透油藏已成为中石化增储上产的主要领域,每年低渗透油气藏的探明储量和建产规模占到整个探明储量和建产规模的2/3,在原油稳产、天然气产量快速增长过程中的作用和地位日益显著,实现了低渗透油气藏开采技术的跨越式发展。具体表现在以下几个方面。

1. 分段压裂技术进步成为提高单井产量和低渗透油气藏动用的有效手段,解决了多个低渗透油气藏有效开采难题

水平井分段压裂技术进步大幅度提高了油气井单井产量,成为低渗透储量动用的有效手段。从常规的储层改造发展到“打碎”油气藏,从单一裂缝发展到复杂裂缝及网络裂缝模型,从常规瓜胶发展到滑溜水大型压裂,从常规射孔发展到簇射孔,从单井压裂发展到“井工厂”压裂模式,水平井压裂技术发展突飞猛进。胜利油田的樊154区块通过水平井分段压裂技术,有效动用该区块储量,15口水平井均取得良好效果。塔中顺9井,通过进行水平井多级压裂,增大泄油面积,累计增油11371t。

## 2. 工厂化的优快钻完井技术快速发展

工厂化是以密集的井口位置形成一个开发“工厂”，通过一体化设计、集约化建设、批量化施工提高效率，降低平均单井成本，最终实现规模化效益的开发模式。近年来，我们通过在胜利、大牛地、川西及涪陵等油气田探索性的开展了“井工厂”开发模式研究，缩短了钻井周期，节约了施工成本，有力促进了优快钻完井技术的快速发展。川西致密气田水平井实现了 1000m 水平段“一趟钻”钻成，一口井节约成本 300 多万元；胜利油田盐 227“井工厂”施工，平均单井节约 1800 多万元。

## 3. 大型压裂改造技术再造油气藏，促进了非常规油气快速发展

近年来，大型压裂改造技术取得了实质性的突破，自主研发了长水平段大型多段压裂配套技术，具备了 20 段以上压裂技术能力。大型多段压裂改造技术进步，使原来无法动用的油气藏获得有效开发。大牛地气藏、涪陵页岩气通过水平井多段压裂都取得了非常好的效果，促进了中石化非常规油气的快速发展。

## 4. 提高采收率技术取得好效果

低渗透油藏储量大，采收率低，提高低渗油藏开发效果是各油田实现产能接替的重要手段。中原油田胡 96 块，属特低渗油藏，埋藏深、注水困难、产量递减快、开发难度很大。2010 年 8 月对该区块胡 109 井井组进行 CO<sub>2</sub> 驱先导试验，截至 2014 年 4 月底，胡 109 井井组已累计注气 27719t，对应井胡 96-3 并于 2012 年 10 月开井生产，连续自喷生产，呈现明显混相驱特征，累计增油 5410t，增气 310×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>。华东分公司在低渗油田开采中，近年来采用注 CO<sub>2</sub>，也取得了非常好的效果，提高采收率幅度高达 17.5%。

## 5. 裂缝监测技术取得进展

压裂裂缝在储层空间的延伸状况，直接影响着压裂改造的效果和开发方案的设计。为提高水平井分段压裂增产效果，监测裂缝展布十分重要。胜利油田在对各种技术的适应性研究分析的基础上，结合不同的油藏特征配套了不同的裂缝监测技术，配套实施了裂缝监测 400 段次，形成适用于不同油藏特征的技术系列，指导水平井多级分段压裂的现场实施，有效提高压裂改造的效果，对指导非常规水平井完井方式优选、压裂工艺改进和压裂效果评价都起到了重要作用。

## 二、会议分析了致密油气藏开发面临的形势和存在问题

致密油气藏开采难度大，采不出、注不进、动用程度低。近年来虽然取得了一定的进展，但总体技术还有很大差距，基础研究比较薄弱，渗流机理、模型建立、软件开发等方面还不能适应我国特殊复杂油气藏开发需要，应用技术仅仅在局部或者单井获得成功，不能满足不同油气藏的开发需求，因此还需要持续做好致密油气藏开发理论及技术攻关研究。

### 1. 精细油气藏描述有待进一步提高

通常我们是对原始油气藏模型、开发机理、开发方式进行研究。油气藏改造后其特征有何改变，是否达到预期目标，能不能真正解决采不出、注不进的问题，需要开展深入细致的研究，同时，要采取一体化研究的思路，要根据油气藏特征对工程技术提出具体要求或改进方向。

## 2. 提高单井产能技术研究贯穿油气藏开发全过程

提高单井产能技术研究不仅是油气藏开发初期的课题，对于低渗类型的油气藏，整个油藏开发过程中都要开展提高单井产能技术研究。红河油田长8油藏水平井，第一年递减率55.0%，第二年递减率31.2%，初期单井产量虽然较高，但递减太快。因此需要持续开展研究，提高开发全过程单井产量，这样才能获得较好收益。

## 3. 探索能量补充方式，提高低渗油藏采收率

能量问题一直是制约开发效果的重要因素，要通过开展基础研究、室内模拟评价和矿场试验，明确低渗透油藏渗流特征、地层能量补充机理及相适应的工艺技术，为低渗油藏储量有效动用探索新途径。

## 4. 加强工程技术创新和适应性研究，降本增效

衡量工程技术的最终标准，是获得最大的经济效益。低渗透油气藏对工程技术的要求就是注得进、采得出、压得开、控得住、经济性强。目前，虽然钻井、压裂技术取得了突破，但成本还很高，说明我们在技术和管理上还有很大差距，还需要进一步加强工程技术创新和适应性研究，提高工程技术水平，降低成本。

## 5. 强化监测和控制技术的结合与推广应用

通过研究，裂缝、产液剖面、产气剖面监测技术逐步配套，今后要加大推广应用，不断提高其精度和符合率。同时要把监测和监控有机结合在一起，做好优化研究，优化压裂设计和施工，为合理部署井网提供指导。

## 6. 新型清洁环保入井液及井下工具研发

开拓思路，研发新型清洁环保压裂液、钻井液及入井材料，减少环境污染和储层伤害，实现绿色可持续发展。加强井下工具研发过程中的质量控制，优化设计、优质加工，满足复杂施工的工艺需求。

## 三、下一步研究要注重三个字“论、考、探”

“论”是指注重理论原理研究。物本有源，研究时一定要注重原理的研究，更好的遵循客观规律，要在扎实的理论基础上，推进技术创新，减少偏颇、减少盲目性。

“考”是指注重调研分析，多做考证。通过调查分析，不仅知道我们自己在做什么，也知道别人在做什么；不仅知道我们自己做的怎么样，也知道别人做的怎么样。这样才能建立好我们的起点和目标。

“探”是指不断的研发和实践。在实践中提升、完善、创新和工业化。

会议期间召开了中石化油气开采技术论坛指导委员会和学术委员会会议，对本次会议的成功举办给予了充分的肯定。建议下次的会议以一种更加开放的方式进行研讨，加大讨论力度，鼓励大家踊跃发言，加强理论探讨和现场技术交流，开拓思想，勇于创新，加快技术的进步。

本书是论坛秘书处优选的本次会议优秀论文集，希望为广大油气开采工作者所借鉴。



# 目 录

胜利油田低渗致密油藏开采技术研究与应用 .....	王增林	张全胜	李爱山	等( 1 )		
涪陵页岩气田一体化开发技术 .....	吴雷泽	金燕波	李远照	等( 11 )		
深层高压特低渗油藏提高采收率技术 .....	邓瑞健	李中超	赵良金	等( 22 )		
缝洞型碳酸盐岩油藏体积改造技术研究 .....	罗攀登	王 雷	耿宇迪	等( 29 )		
安棚致密油气藏一体化开发技术实践与认识 .....			刘洪涛	( 36 )		
鄂尔多斯盆地致密油开发现状分析及对策 .....	陈召佑	周思宾	尹 超	等( 44 )		
江苏油田低渗致密砂岩储层有效开发技术 .....			刘桂玲	虞建业( 53 )		
川西侏罗系致密砂岩气藏降本增效工艺技术 .....			刘 林	( 64 )		
元坝陆相致密气藏降本增效钻井技术方案及应用 .....	丁世东	孙明光	陈小锋	( 73 )		
致密砂岩气田水平井整体开发关键技术研究 .....	史云清	郑荣臣	王树平	等( 83 )		
户部寨低孔低渗裂缝型砂岩气藏精细挖潜技术 .....	曹正安	霍 斌	王茂文	等( 93 )		
红河油田长 8 油藏能量补充技术探讨 .....			刘岳龙	(100)		
彰武地区压裂液体系研究与应用 .....			王娟娟	(108)		
顺 9 井区超深致密油藏整体压裂优化设计研究 .....	王 洋	耿宇迪	米强波	等(115)		
水平井裂缝监测技术在胜利油田应用研究 .....	郑彬涛	任占春	左家强	等(120)		
地面测斜仪在大牛地气田“井工厂”压裂裂缝监测中的应用 .....			周 健	张保平	张旭东	等(129)
胜利油田盐 227“井工厂”整体开发实践与认识 .....	左家强	张全胜	李爱山	等(136)		
川西凹陷浅层气藏千米水平段一趟钻关键技术 .....	李琳涛	徐文浩	赵洪山	(143)		
川西致密气藏产水特征及排水采气技术 .....	张云善	周兴付	刘 菁	(148)		
应用侧钻井技术改善低渗透底水油藏开发效果 .....	李 涛	梁杰锋	杨瑞莎	(156)		
火山岩气藏结垢机理及防治对策 .....	吉树鹏	郭显赋	肖在馨	(161)		
苏家屯复杂小断块油藏压裂技术研究与应用 .....	吉树鹏	刘清华	孙 昆	(166)		
致密砂岩储层体积压裂技术进展 .....	李凤霞	张汝生	刘长印	等(171)		
胜利油田特低渗透压裂完井技术进展 .....			肖春金	(180)		
深层低渗长井段油气藏多层压裂工艺技术 .....	王安培	兑爱玲	邓小伟	等(191)		
超浅层致密油藏整体压裂技术研究及应用 .....			胡艾国	(199)		
“井工厂”压裂地面设备配套技术的研究及应用 .....	王建军	卢云霄		(209)		
新沟致密油藏压裂改造工艺优化探索 .....			李之帆	(220)		
低渗稠油油藏高效降黏举升工艺技术研究 .....	赵德林	梁永森	李 雯	等(227)		
低渗透油藏仿水平井注水开发技术 .....	王 军	王 锋	吕广忠	等(233)		
非均质油藏分层注采工艺技术 .....	户贵华	李建雄	赵 杰	等(242)		

低渗透油藏 CO <sub>2</sub> 驱注采工艺配套技术研究 .....	杨昌华	周 迅	高海涛	等(247)
渭北油田长 3 油藏注水特征分析 .....	斯 容	卢瑜林	刘岳龙	等(253)
渭北长 3 致密油注水开发现状及开发对策研究 .....	吴永超	徐 婷	秦学杰	等(260)
低渗油藏经济举升技术研究与应用 .....	吴家松	张中慧	杜玮暄	等(265)
二氧化碳驱技术在胡 96 块的矿场实践 .....	张兵涛	戴 寅	杨 爽	等(281)
大牛地气田增压开采条件下合理配产研究 .....			杨文娟	(289)
东营凹陷滩坝砂低渗透储层增产潜力评价 .....		杨 成	孙 玉	(297)
元坝长兴组多级暂堵交替注入酸化工艺研究与应用 .....	丁 咚	任 山	钟 森	(305)
东北水平井压裂完井方式应用现状与适应性评价 .....	张振兴	张 冲		(312)
致密油气完井测试技术研究与实践 .....	何祖清	邱德家		(319)
致密砂岩油藏水平井不同完井方式适应性分析 .....	杨科峰	李凤霞	刘长印	等(334)
面 14 区沙四 6 砂组整体压裂技术现场应用 .....			刘晓清	(342)
塔中顺 9 区块超深低渗油气藏开发技术 .....	马 剌	何雪芹	易 斌	(348)
红河油田长 8 裂缝性致密砂岩油藏水平井钻完井技术 .....	张永清	邓红琳	牛似成	等(351)
渭北超浅层致密油藏丛式井钻完井技术 .....	陈晓华	王 翔	王锦昌	等(357)
胜利油田工厂化丛式井钻井模式评价方法研究 .....	牛洪波	马永乾	曹向峰	等(364)
梨树断陷长裸眼井段井壁稳定技术研究 .....	葛春梅	李继茂	张天笑	等(370)
电缆地层测试在低渗储层应用的挑战与对策 .....	邱德家	张同义	陶 果	(376)
层控分频技术在渤海地区沙四上滩坝储层描述中的应用 .....	刘升余	张营革	朱定蓉	(387)
普光地区须家河组致密砂岩优质储层预测技术 .....	余成林	陈 建	张纪喜	等(394)
储层预测技术在建南地区须六段致密砂岩识别中的应用 .....			刘勇江	(401)
水平井分段压裂缝间应力分布数值模拟研究 .....	贺甲元	黄志文	李凤霞	等(405)
基于扩展有限元法的砂泥岩互层裂缝延伸特征研究 .....	夏富国	刘清华	孙 昆	(414)
松辽盆地南部十屋油田营城组储层特征与影响因素研究 .....			许君玉	(421)
精细期次控制下砂砾岩体有效储层预测方法研究 .....	惠长松	李湘军	曲志鹏	等(428)
江汉盆地新沟嘴组泥质白云岩成藏特征研究 .....	苏 苇	张建荣	陈立欣	(434)
塔中志留系致密砂岩储层描述与评价——以顺 9 地区为例 .....	李喜莲	鲁新便	李 雪	等(440)
川西地区气田集输工艺优化与应用 .....			杨锦林	(446)
川西蓬莱镇组长水平井低成本钻井技术研究 .....	房 舟	朱化蜀	任 茂	等(455)

# 胜利油田低渗致密油藏开采技术研究与应用

王增林 张全胜 李爱山 肖春金 郑彬涛

(中石化胜利油田分公司)

**摘 要:** 胜利油田特低渗油藏具有深埋、高温、层多、层薄、物性差的特点, 储层改造难度大, 增产效果差, 制约特低渗透油藏的效益开发。针对低渗致密油藏的开发特点, 加强基础理论研究和关键技术攻关, 形成了特低渗透油藏开发技术政策、特低渗透油藏长水平段优快钻井技术、特低渗透油藏压裂完井技术、特低渗透油藏能量补充技术四类关键技术系列。通过核心技术提升创新和配套技术集成, 在 70 个区块, 现场试验 640 余口井, 动用储量  $9343 \times 10^4 \text{t}$ , 新建产能  $143.49 \times 10^4 \text{t}$ , 为胜利油田的产量硬稳定提供了技术支撑。

**关键词:** 低渗透 开发技术政策 压裂完井 钻井 注水

## 1 前言

胜利油田低渗透油藏分布在 52 个油田的 516 个单元, 至 2013 年底探明地质储量  $11.6 \times 10^8 \text{t}$ , 动用  $8.1 \times 10^8 \text{t}$ 。其中, 特低渗透及致密油分布在 35 个油田的 185 单元, 至 2013 年底探明地质储量  $5.5 \times 10^8 \text{t}$ , 动用  $2.67 \times 10^8 \text{t}$ 。胜利油田“十一五”以来, 新增低渗储量中特低渗储量比例达 78.8%, 已成为胜利油田资源接替的主阵地(表 1)。

表 1 特低渗油藏储量分布状况

序号	分 类 (渗透率、沉积特征)	探明储量/ $10^8 \text{t}$	动用储量/ $10^8 \text{t}$	动用比例/%	主要类型
I	特低渗透油藏 ( $3 \leq K < 10$ )	2.77	2.49	89.9	浊积岩 滩坝砂 砂砾岩
II	致密砂岩油藏 ( $K < 3$ )	2.73	0.183	6.7	
合计		5.5	2.67	48.5	

胜利油田特低渗油藏具有深埋、高温、层多、层薄、物性差的特点, 储层改造难度大, 增产效果差, 制约特低渗透油藏的效益开发。主要表现为: 深(埋深  $> 3500 \text{m}$  储量占 51%)、细(喉道中值半径一般  $< 0.4 \mu\text{m}$ )、薄(薄互层油层平均单层厚度  $< 1.5 \text{m}$ )、贫(丰度  $< 50 \times 10^4 \text{t}/\text{km}^2$  储量占 55%)、散(含油井段跨度  $> 50 \text{m}$  储量占 86%)。

一般低渗透油藏得到有效开发, 薄互层、特低渗透及致密油油藏面临经济有效动用问题。开发过程中主要表现为以下难点:

① 常规开发政策和技术不适应。主要表现为: 低丰度油藏常规井网单井储量控制程度

低，开发效益差；致密油( $K < 3\text{mD}$ )直井压裂，即使加大规模，产量递减快，稳产效果差；多薄层、纵向跨度大，改造不均衡，纵向动用率低。

② 致密油水平井钻井周期长、成本高。主要表现为：储层埋藏深，可钻性级值高，牙轮钻头易磨损，PDC 钻头适应性差；储层岩性复杂、非均质性强，轨迹控制及钻井液技术区域适用性要求高；国产常规 LWD 仪器测量零长 22m，储层钻遇率低；长水平井段完井难度大，完井质量不能满足压裂要求。

③ 能量补充困难。主要表现为：特低渗油藏储层孔喉半径小，注水压力高，对注水水质要求高，精细处理难度大；低渗储层注水压力高，注水困难；纵向多层储层物性差异大，吸水均匀性差，分层注水技术要求高；致密油无法实现有效注水，需开展新型补充能量方式研究。

“十一五”以来，胜利油田依托国家重大专项，针对低渗致密油藏，加强基础理论研究和关键技术攻关，形成了 4 类关键技术系列：特低渗透油藏开发技术政策研究、特低渗透油藏长水平段优快钻井技术、特低渗透油藏压裂完井技术、特低渗透油藏能量补充技术。通过核心技术提升创新和配套技术集成，在 70 个区块，现场试验 640 余口井，形成四类关键技术，动用储量  $9343 \times 10^4 \text{t}$ ，新建产能  $143.49 \times 10^4 \text{t}$ ，为胜利油田的产量硬稳定提供了技术支撑。

## 2 开采技术进展

### 2.1 特低渗透油藏开发技术政策

根据特低渗透油藏渗透率和应力差异，制定相应开发技术政策。通过室内水驱油实验，绘制了启动压力梯度与渗透率关系图，以启动压力突变点确定注水开发渗透率下限，注水开发渗透率下限为  $3.0\text{mD}$ ，将薄互层低渗透油藏分为三类：

I 类薄互层：渗透率  $\geq 10\text{mD}$ ，启动压力梯度  $< 3\text{MPa}/100\text{m}$ ，采用常规注水开发。

II 类薄互层：渗透率  $3.0 \sim 10\text{mD}$ ，启动压力梯度  $3 \sim 10\text{MPa}/100\text{m}$ ，依靠人工裂缝缩小排距可注水开发。

III 类薄互层：渗透率  $< 3.0\text{mD}$ ，启动压力梯度  $> 10\text{MPa}/100\text{m}$ ，采用天然能量开发。

根据不同油藏地质特征及应力差异，优选开发井型：对于集中型(跨度  $< 50\text{m}$ )的浊积岩，采用长井段水平井多级分段压裂；对分散型(跨度  $\geq 50\text{m}$ )的浊积岩，采用直井分段压裂；对于薄互层滩坝砂，采用直井分段压裂方式；对于砂砾岩，结合选用直井分段和长水平井多级分段两种方式。

#### (1) 直井长缝压裂完井注水开发

针对渗透率  $3.0 \sim 10\text{mD}$ 、隔层与油层应力差  $\geq 5\text{MPa}$  的油藏，应用数模手段和低渗透油藏极限泄油半径公式确定了直井长缝压裂完井注水开发的合理技术政策。

根据低渗透油藏极限泄油半径公式计算出目标油藏的极限泄油半径，排距取 2 倍极限泄油半径即可形成有效注采，合理井距为半缝长和极限泄油半径的 2 倍，可确定出交错排状井网的经济合理井距。

#### (2) 水平井分段压裂完井注水开发

针对渗透率  $3.0 \sim 10\text{mD}$ 、隔层与油层的应力差  $< 5\text{MPa}$  的油藏，建立了水平井分段压裂

产能预测模型，确定了水平井分段压裂完井注水开发的技术政策。

设计了裂缝交错和裂缝正对 2 种井网形式，截取一个计算单元模拟，合理井网形式为裂缝交错井网，最终采出程度 19.8%，比裂缝正对井网高 3.3% (图 1)。同直井长缝压裂完井注水开发类似，水平井分段压裂完井注水也是将井点对井点的注采关系转化成了裂缝对裂缝的注采关系，因此，裂缝间距为能够建立有效驱动的最大距离，即 2 倍的极限泄油半径。

研究表明压裂水平井产能与无因次缝长 (缝半长/裂缝间距) 成正相关，合理无因次缝长在 0.6~0.9 (图 2)。为最大范围提高储量控制程度，油水井合理井距为裂缝半长和极限控制半径之和。因此，井网参数均与极限泄油半径有关，由此建立油水井距、裂缝半长与无因次缝长间的关系式：裂缝间距 = 2 × 极限泄油半径；裂缝半长 = 无因次缝长 × 裂缝间距；油水井距 = 裂缝半长 + 极限泄油半径。

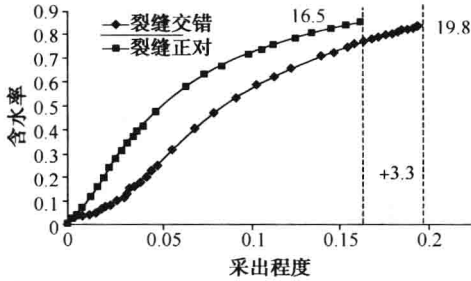


图 1 不同井网采出程度对比曲线

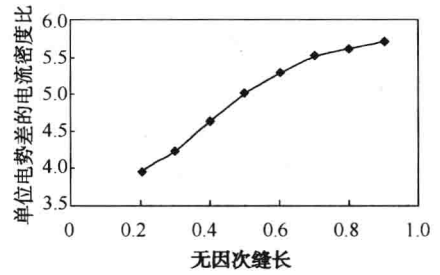


图 2 压裂水平井产能预测电模拟实验

### (3) 长水平井多级压裂完井天然能量开发

针对渗透率 <math> < 3.0\text{mD}</math> 的油藏，建立了致密油藏径向渗流模式，根据渗流特性划分了易流区、缓流区 (图 3)。易流区内流体容易流动，区域产量贡献率在 95% 左右，引入“有效泄油半径”概念，定义易流区泄油半径值约为极限泄油半径的 70%~80%；缓流区内流体难以流动，区域产量贡献率一般小于 5%。由于采用天然能量开发，应尽可能提高单井控制储量，确定合理井距，井网形式参考长水平井多级压裂注水开发确定为裂缝交错排状井网 (图 4)，水平井合理井距大于半缝长和有效半径之和的 2 倍，小于半缝长和极限半径之和的 2 倍。

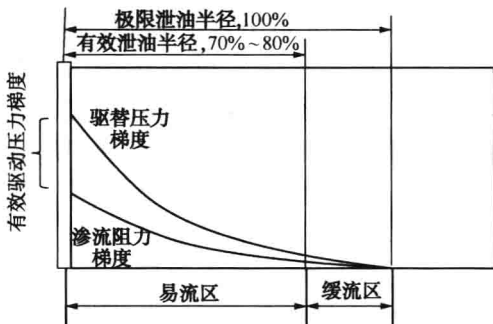


图 3 致密油藏非线性径向渗流模式

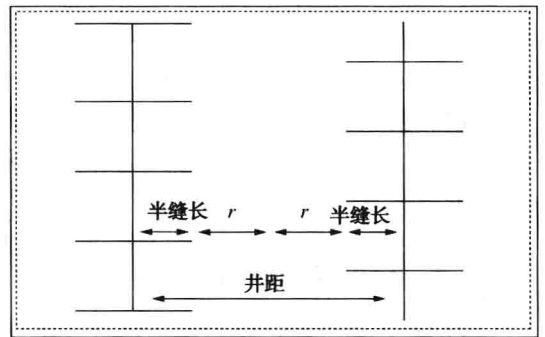


图 4 多级压裂水平井井距示意图

## 2.2 低渗透油藏水平井优快钻井技术

低渗致密油藏压裂对井身质量要求高，由于泥岩井壁稳定性差、固井质量差，导致钻井

周期长、成本高，通过开展提高钻井效率、固井质量及丛式井工厂化钻井模式研究，形成了长水平段水平井优快钻井技术。

#### (1) 低渗致密油藏 PDC 系列钻头

以“具有良好的导向性和稳定性为前提，尽可能提高机械钻速和井眼质量”为目标，形成了基于三维切削力学分析的导向 PDC 钻头优化设计理论与方法，开发了适应不同井段、岩性的 17 种型号的个性化 PDC 钻头。

在樊家区块取得了较好的效果，直井段一只 PDC 钻头“一趟钻”完成 2000m 左右直井段，直井段周期缩短 30%；定向段平均进尺提高 72%，机械钻速提高 35% 以上；水平段平均进尺提高 44.8%，机械钻速提高 113%，单只钻头进尺最高达 2251m。

#### (2) 近钻头地质导向系统

自主研发了近钻头地质导向系统，将井斜、伽马等测量集成到离钻头 0.6m 处，测量参数通过短程技术、MWD 系统实时上传到地面系统。

#### (3) 长水平段井眼轨迹高效控制技术

通过建立平衡趋势法对底部钻具组合进行造斜率量化分析，指导钻具组合优选，提高复合钻井比例；进行井下摩阻监测分析方法研究，通过摩阻监测分析，及时判断井下工况。

水平段复合钻进进尺比例由初期的 85% 提高到 95% 左右，行程进尺提高 3 倍以上，最高进尺 1153m，有效提高了井眼轨迹控制效率。

#### (4) 低渗致密油藏钻井液技术

针对浊积岩、滩坝砂油藏研发高效润滑水基钻井液体系，兼具油基钻井液的强抑制性、良好润滑性和水基钻井液低成本、环境污染小的特点；针对砂砾岩油藏泡沫钻水平井研发了抗油泡沫钻井液体系，泡沫抗温能力达到 150℃，能够抗 30% 原油污染。

高效润滑水基钻井液在浊积岩油藏义 123-173 区块应用 9 井次，成功穿越砂泥岩互层；在滩坝砂油藏滨 435 区块应用 1 井次，无井壁失稳情况发生，替代了油基钻井液；抗油泡沫钻井液体系在盐 227-1HF 井三开钻进井段 1021m，平均机械钻速 6.21m/h，是邻井的 3~4 倍。

#### (5) 低渗致密油藏水平井长效固井技术

针对致密油藏水平段固井差的问题，研究形成套管居中液压扶正器配合塑性水泥浆体系的长效固井技术。现场应用 16 井次：同类井型相比，使用液压扶正器下套管摩阻比使用刚性扶正器减小 8~20t，固井质量合格率 100%。

通过技术集成，共在胜利油田低渗致密油藏完成 55 口水平井推广应用；平均储层钻遇率 >90%，固井质量合格率 100%；钻井周期樊家区块平均缩短 41.15%，盐 227 区块平均缩短 28.83%。

## 2.3 特低渗透油藏压裂完井技术

胜利油田根据特低渗透油藏特点，树立体积压裂理念，通过系统研究，形成三类体积压裂模式，研发两种实时混配压裂液体系，配套裂缝监测技术，形成特低渗透油藏压裂完井技术体系。

### 2.3.1 三类体积压裂模式

#### (1) 长井段水平井多级分段压裂完井技术

针对低丰度、储层发育集中的特低渗油藏，围绕单井产能最大化的目标，攻关形成了以

多级分段压裂优化设计技术及四类分段压裂完井方式为核心的长井段水平井多级分段压裂完井技术体系。

### ① 分段压裂优化设计技术。

水平井轨道位置优化。开展了水平段与最大水平主应力夹角对裂缝扩展形态影响的物模实验研究，在此基础上进行了水平段与最大水平主应力夹角对压裂后单井控制储量影响研究，结果表明两者之间的夹角大于 $60^\circ$ 时单井控制储量可达到理想状态的85%以上，考虑到油藏实际地应力场的分布和井网整体部署等具体因素，要求水平段与最大水平主应力夹角应大于 $60^\circ$ 。

通过水平段轨迹在多薄层不同纵向位置对裂缝扩展影响模拟研究表明，轨迹在集中段中部，裂缝纵向沟通程度最大，开发效果最好。因此纵向上选择砂体横向展布稳定、油层分布相对集中的层段，优选集中段中部位置(隔层间应力差小于5MPa、泥岩夹层厚度小于10m的层段)。

裂缝位置及裂缝间距优化。根据樊154块极限供油半径为54.5m，确定段间距80~100m。滑套位置：选择储层物性好的部位；封隔器位置：井径扩大率 $<5\%$ 、连续稳定井段10m以上。

压裂裂缝参数优化。首先建立非达西条件下整体压裂开发水平井两相(油水)渗流模型，考虑了非线性渗流和井筒-裂缝-基质间应力耦合，实现了基质径向流区、人工裂缝外部渗流区、裂缝内部线性渗流区三区动态耦合分析，使产能预测更合理。利用上述模型，以实现产能最大化为目标，优化裂缝参数。通过优化计算，渗透率 $<3\text{mD}$ ，支撑半缝长140~180m，导流能力 $15\sim 20\text{D}\cdot\text{cm}$ 可获最佳产能；渗透率 $3\sim 10\text{mD}$ ，支撑半缝长在110~130m，导流能力 $20\sim 30\text{D}\cdot\text{cm}$ 可获最佳产能。

### ② 分段压裂完井方式。

立足自主，配套4种长井段水平井多级分段压裂完井方式，实现多段改造。

裸眼封隔器分段压裂完井管柱。针对渗透率小于 $3\text{mD}$ 的薄互层特低渗油藏天然能量开发的需求，研制了裸眼封隔器多级分段压裂完井管柱，采用双胶筒压缩式封隔器提高承压能力，投球滑套同时满足耐冲蚀及可钻要求，高强度低密度球( $1.56\text{g}/\text{cm}^3$ )，该管柱具有不污染储层、施工连续、分段级数多等技术优势，可实现分15段多级分段压裂。自主工具已成功现场应用7口井，水平段长度800~1494m，分段级数10~12级，单段最大加砂 $50\text{m}^3$ ，最大排量 $5.7\text{m}^3/\text{min}$ 。

套管内封隔器分段压裂完井管柱。针对套管固井特低渗油藏长井段水平井多级分段压裂研制，成本低、施工时间短，可实现定点压裂。主要技术特点：滑套封隔器采用一体化设计，满足大排量、高砂比压裂；缩短封隔器胶筒长度，并采用多重防砂保护，减少管柱下入和施工风险；具有反洗井功能，有助于解除施工中的砂卡；设计安全接头，管柱起出遇阻时可丢手分，已成功进行了现场试验。

泵送桥塞射孔分段压裂管柱。针对套管固井注水开发的特低渗油藏发展，具有施工段数、排量和加砂规模不受限制，钻塞后全通径的优势，可实现定点压裂，便于注水井网的规划。自主攻关六项关键技术，实现全自主施工；已成功现场应用14口井，水平段长度600~1100m，分段级数4~14级，单段最大加砂 $100\text{m}^3$ ，最大排量 $8.0\text{m}^3/\text{min}$ 。

连续油管喷砂射孔拖动封隔器分段压裂管柱。适用于套管固井长井段多级分段压裂，具有施工段数不受限制、压后全通径的优势，已成功应用水平井3井次，分段级数6~8级，

单段最大加砂 80m<sup>3</sup>。

### (2) 直井长缝压裂完井技术

针对低丰度、储层集中、层间应力差较小的特低渗油藏，攻关直井长缝压裂完井技术，增加泄油面积，大幅度提高单井产能和稳产期。

重点针对压裂缝长控制、压裂缝高控制、压裂规模优化、压裂定向控制四项关键技术开展攻关研究，通过技术突破提升，初步形成薄互层低渗透油藏直井长缝压裂完井技术，半缝长由 100m 提高到 200m，单井控制储量提高 60%。

压裂规模优化。根据“缝长比-产量-采出程度”数模研究，确定最优半缝长，结合最优半缝长，通过全三维压裂数模确定最优压裂规模，确保长缝压裂的改造规模要求，从而实现长缝压裂的目的。

压裂定向控制。根据最大与最小水平应力差值来确定射孔相位，有效抑制多裂缝的产生。水平主应力差>10MPa，采用 60°相位射孔；水平主应力差<10MPa，沿水平最大主应力方位定向射孔。

压裂缝高控制。通过综合考虑纵向上应力差、物性、厚度等因素优化射孔井段：对层间应力差>5MPa 的储层，采用优化射孔井段和变排量技术控制缝高，提高裂缝穿透深度；对层间应力差≤5MPa 的储层，除优化射孔外，采用预置双转向剂增加人工遮挡应力 3~5MPa，抑制裂缝纵向延展，避免缝高失控。

压裂缝长控制。通过采用高粘压裂液、低密度高强度支撑剂和变排量，提高携砂距离，增加有效支撑缝长；采用高效降滤技术，暂堵率 95%，延伸动态缝长。

通过上述 4 项关键技术的研究攻关，初步形成了直井长缝压裂完井技术，并在樊 142、车 142-6 等区块现场实施 152 井次，平均单井产能达到常规压裂的 2 倍。

### (3) 直井分层压裂完井技术

针对多层油藏纵向非均质性强，均衡改造难度大的问题，开展直井分层压裂技术研究，制定分层压裂技术政策，形成 4 类分层压裂工艺：机械分层压裂、不动管柱水力喷射分段压裂、连续油管拖动封隔器分段压裂、桥塞分段压裂。结合油层特点，形成满足跨度 100m 以内多薄层和跨度 100m 以上多层的直井分层压裂技术系列，实现小跨度分 4 段，大跨度分段数不限的分层压裂改造技术。

#### ① 分层压裂技术政策。

根据油层跨度、应力、兼顾隔层厚度、油井斜度，开展基础研究和参数优化，形成分层压裂技术政策。针对分层压裂中的每个层段开展射孔及工艺参数，确保每个层段油藏实现均匀改造。根据前期研究结果，考虑不同分层压裂工艺特点，最终形成分层压裂技术政策(表 2)。

表 2 分层压裂技术政策

跨度：分段数	隔层厚度：应力差	主要技术	适用范围	特点	费用
跨度 100m 以内：分段数 ≤3	隔层厚度 10m 以上或应力差 ≥5MPa	管内机械分层压裂	多薄层滩坝砂、油积岩储层	施工简单、经济；3 层以内安全性高；排量、规模受限	3 段：工具费 15 万元
	隔层厚度 10m 以内或应力差 ≤5MPa 或井斜超过 40°	不动管柱喷射射孔分层压裂	大斜度；对缝高控制要求高的油井	缝高控制较好；3 层以内可靠性高；射孔、压裂一体；排量、规模、深度受限	3 段：射孔 + 工具费 30 万元



跨度:分段数	隔层厚度:应力差	主要技术	适用范围	特点	费用
跨度 100m 以上;分段数 ≥3		桥塞射孔连 作分层压裂	纵向多层	分段数、排量、规模不 受限可实现多薄层多层精 确射孔	3段:射孔 +工具费 60 万元
	油层及隔层厚 度≥5m	连续油管拖 动封隔器喷砂 射孔分层压裂	多层砂砾岩; 定位精度 1~ 2m,多薄层不 适用	全通径:处理砂堵方便 排量受限,射孔不完善; 价格较高	3段:射孔 +工具费 100 万元

## ② 分层压裂工艺。

机械分层压裂。主要通过改进管柱结构:改善变径部位防冲蚀结构;新型滑套喷砂器,实现单层最大加砂 $92\text{m}^3$ ;采用氯化丁腈胶筒:最高使用温度达 $172^\circ\text{C}$ 。其次通过管柱及工艺优化:简化井下工具数量,减少或者去掉水力锚;增加伸缩短节,实现分级解封;优化加砂规模和施工排量,控制放喷;机械分层压裂工艺多个技术指标实现突破。

不动管柱水力喷射环空补液分段压裂。针对大斜度井或对缝高控制要求高的层位压裂,已研发3层分层压裂管柱。技术特点:集射孔、压裂、隔离一体化;不需要机械封隔工具,减少作业风险;裂缝缝高控制较好。

桥塞分段压裂。针对大跨度、多层、油层厚,层间应力差大的油井,实现不限段数压裂改造。桩23块北区先后进行直井大规模笼统压裂,直井机械分层压裂、桥塞分段压裂3种工艺。效果对比分析,笼统压裂:机械分层:桥塞分段压裂=1:1.4:3.1。

连续油管拖动封隔器分段压裂。针对跨度大,分层多,层间应力差小的油藏;已经成功实施3口井,分段数5~8段,加砂量 $190\sim 354\text{m}^3$ 。

### 2.3.2 两种压裂液体系

#### (1) 速溶瓜胶压裂液体系

针对非常规压裂过程中使用压裂液量大、现场配液质量要求高,开展了实时混配压裂液技术研究。

对瓜胶片的预处理,降低瓜胶分子间引力,提高溶解速度,1min溶解百分数达到86%,水不溶物7.1%,0.6%水溶液表观黏度为 $137\text{mPa}\cdot\text{s}$ ,实现在线混配。该体系在 $140^\circ\text{C}$ 加热剪切2h后冻胶黏度 $100\text{mPa}\cdot\text{s}$ 以上,现场共进行施工10井次,其中水平井4井次,共压裂施工36段,施工成功率大于96%。

#### (2) 乳液缔合压裂液体系

引入刚性单体和两性基团共聚,合成油包水乳液缔合压裂液。与常规瓜胶压裂液相比,耐温高( $230^\circ\text{C}$ )、价格低(每方降低100~150元),可实现地表水或污水在线连续混配,已成功现场试验20余井次,其中水平井应用9井次98段。

设计配套了现场实时连续混配装置,实现在线加入。在盐227“井工厂”成功实现与池塘水实时混配。混配装置可24小时不间断运转,满足 $3\sim 12\text{m}^3/\text{min}$ 排量(表3)。

表3 盐227“井工厂”不同压裂液应用对比

液体类型	配制液体	配制设备
常规瓜胶压裂液	清水	立式罐120个、卧式罐30个、2600台次运清水罐车、4台配液车
乳液缔合型压裂液	地表水	实时混配设备,立式罐50个