

李宗田 主编

# 水平井 压裂技术与进展

——2009年水平井压裂技术研讨会论文集

中國石化出版社

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

# 水平井压裂技术与进展

——2009年水平井压裂技术研讨会论文集

李宗田 主编

中国石化出版社

## 内 容 提 要

为了加快水平井储层改造技术的发展和完善配套,推动水平井压裂技术进步,提高水平井开发技术水平,来自中国石化、中国石油、国内知名大学、国际服务公司的专家代表参加了会议。会议就水平井压裂技术的施工工艺、应用材料、配套技术等应用方面取得的最新成果进行了展示和交流。

这次会议为水平井压裂技术总结了经验、交流了技术、明确了目标、架起了桥梁,必将促进水平井压裂技术的进步。本论文集的编著是对本次水平井压裂技术会议的成果的总结,反映了当前水平井压裂方面的成熟技术与最新进展,为进一步提高水平井压裂技术的应用起到承前启后、引路出新的作用。

### 图书在版编目(CIP)数据

水平井压裂技术与进展:2009年水平井压裂技术研讨会论文集/李宗田主编. —北京:中国石化出版社, 2009. 1

ISBN 978 - 7 - 5114 - 0193 - 9

I. ①水… II. ①李… III. ①水平井 - 油层水力压裂 - 技术 - 学术会议 - 文集 IV. ①TE243 - 53  
②TE357. 1 - 53

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第229226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.cn

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10.25印张243千字

2010年1月第1版 2010年1月第1次印刷

定价:36.00元

# 编 委 会

主 任：李宗田

副主任：苏建政 薄启炜

成 员：李 萍 黄志文 史爱萍

王文刚 龙秋莲 孙良田

# 前 言

水平井技术是20世纪90年代迅速发展起来的一项新技术,已成功应用于各种类型的油气田,对改善油田开发效果,提高储量动用、增产稳产和提高经济效益等方面发挥了十分重要的作用,可以说是当前石油工业的一项技术革命。水平井压裂技术是提高水平井开发效果的关键技术,也是目前制约水平井开发效果的关键技术,从整体技术现状而言,水平井压裂技术的发展滞后于水平井在勘探开发中的发展。

为了加快水平井储层改造技术的发展和完善配套,2009年5月21日,国内首次水平井压裂技术研讨会在北京香山饭店召开,会议旨在推动水平井压裂技术进步,提高水平井开发技术水平。会议期间,来自中石化、中石油、国内知名大学、国际石油服务公司的专家代表共110人参加了会议。中国石化石油勘探开发研究院以及各油田、中国石油大学(北京)、中国地质大学(北京)、西南石油大学以及哈里伯顿、BJ、斯伦贝谢、贝克休斯等跨国公司分别介绍了在水平井压裂技术应用方面取得的成果,包括水平井完井工艺、碳酸盐岩水平井分段酸压技术、水平井分段压裂工艺技术、水平井连续油管射孔、分段压裂工艺的应用、新型压裂液、支撑剂的应用、水平井分段措施管柱、压裂水平井产能预测方法、水平井水力喷射分段压裂、裸眼水平井酸压裂缝形态及效果评价等各个方面。

会议在总结成果的同时也认识到了不足,更明确了水平井压裂技术进一步发展的目标,主要在以下四个方面:一是形成水平井压裂的主导技术,从开发方案、钻井完井、油藏特征、岩石力学等各个环节要协调一致,综合考虑后续的压裂增产改造,提高整体开发效果;二是当前水平井压裂产能预测方法比较落后,应进一步加大研究力度,通过引进、合作等途径尽快提高;三是做好钻井完井设计与后期压裂改造的结合,整体压裂与注采井网的优化;四是大胆开展裸眼完井,做好裸眼水平井分段压裂井下工具的配套工作。

这次会议为水平井压裂技术总结了经验、交流了技术、明确了目标、架起了桥梁,必将促进水平井压裂技术的进步。本论文集的编著是对本次水平井压裂技术会议的成果的总结,反映了当前水平井压裂方面的成熟技术与最新进展,为井一步提高水平井压裂技术的应用起到承前启后、引路出新的作用。

论文集的出版得到各相关单位及科研技术人员的大力支持,水平井压裂技术工作需要大家共同努力,群策群力,从而实现水平井技术的快速发展。在此向大家表示感谢!

# 目 录

水平井压裂技术现状与展望 .....	李宗田等( 1 )
胜利油田水平井分段压裂工艺技术 .....	张全胜等( 9 )
中原油田水平井储层保护钻井液技术研究 .....	张麒麟等( 15 )
塔河油田碎屑岩油藏水平井变密度分段射孔完井工艺应用 .....	朱勇等( 20 )
泌 304 区水平井压裂充填完井技术 .....	刘延坡等( 27 )
射孔完井的水平井压裂裂缝起裂压力研究 .....	沈飞等( 31 )
建南气田水平井增产工艺技术研究与应用 .....	廖如刚等( 38 )
川西气田水平井水力喷射压裂技术研究及应用 .....	任山等( 46 )
水平井分段压裂技术在大牛地气田的试验应用 .....	秦玉英等( 52 )
江汉油田水平井应用现状及效果 .....	逯建华等( 62 )
一种新型油、气、水井压裂改造用支撑剂的应用 .....	程百利等( 72 )
水平井压裂选井技术 .....	刘长印等( 80 )
塔河油田碎屑岩底水油藏水平井见水特征 .....	徐燕东等( 87 )
低渗透油藏压裂水平井地质优化设计技术 .....	牛祥玉等( 92 )
低渗油藏水平井低伤害压裂液技术 .....	扈殿奇等( 97 )
水平井连续油管射孔、分段压裂工艺在梁 8 - 平 1 井的应用 .....	王福勇等( 104 )
中原油田水平井压裂工艺技术应用探讨 .....	曾雨辰等( 114 )
浅层稠油水平井开采配套技术 .....	冯冲等( 122 )
江汉油田水平井分段措施管柱研究与应用 .....	罗君等( 130 )
塔河油田缝洞型碳酸盐岩油藏侧钻水平井酸压技术 .....	耿宇迪等( 138 )
水平井压裂技术在川西气田的应用 .....	王世泽等( 144 )
大牛地气田水平井钻井完井液储层保护技术 .....	袁立鹤等( 153 )

# 水平井压裂技术现状与展望

李宗田 孙良田 庄照锋

(中石化石油勘探开发研究院)

**摘要:** 水平井已成为提高油田勘探开发综合效益的重要途径,其开发技术已在国内石油工业中广泛应用。对于钻遇在低渗透油气藏的水平井和产量达不到经济开发要求的其他水平井,必然要面临增产改造的问题。水平井水平段压裂与直井压裂改造的工作重点有所不同。本文阐述了国内外水平井技术发展概况、水平井完井、水平井压裂设计、水平井分段压裂工艺技术、目前水平井压裂存在的主要问题及水平井压裂技术发展趋势。

**关键词:** 水平井 压裂 存在问题 展望

## 1. 前言

水平井技术于20世纪20年代提出,40年代付诸实施,80年代相继在美国、加拿大、法国等国家得到广泛工业化应用,并由此形成研究、应用水平井技术的高潮。

近年来,水平井钻完井总数几乎成指数增长,全世界的水平井井数为4.5万口左右,主要分布在美国、加拿大、俄罗斯等69个国家,其中美国和加拿大占88.4%。在国内,水平井钻井技术日益受到重视,在多个油田得以迅速发展,其油藏有低压低渗透砂岩油藏、稠油油藏、火山喷发岩油藏、不整合屋脊式砂岩油藏等多种类型。中石化从1991年开始发展水平井,2002年底共钻水平井325口,至2008年底,中国石化共完成水平井1711口。中石油从2002年加大力度发展水平井,2006年当年完钻522口,2007年完成水平井600口,2008年突破水平井1000口。中海油2000年以来每年水平井数量增长20%~30%,从最初2个油田扩大至目前的14个油田,共计126口,其中在生产水平井96口,分支水平井30口。

国内外于20世纪80年代开始研究水平井的压裂增产改造技术,在水力裂缝的起裂、延伸,水平井压后产量预测,水力裂缝条数和裂缝几何尺寸的优化,储层保护,分段压裂施工工艺技术与井下分隔工具等方面取得了一定进展,但总体来讲配套完善程度不足,特别是水平井分段压裂改造工艺技术和井下分隔工具方面与实际生产需求还存在较大的差距,有待进一步加大投入人力、物力攻关研究。

## 2. 水平井类型及完井技术

根据井眼轨迹和分支多少,水平井分为直水平井、大位移水平井、弯曲水平井、水平分支井、斜分支水平井、多井底分支井、鱼骨状分支水平井。根据井筒的造斜率和曲率半径,水平井可划分为三种类型:长曲率半径[ $R = 305 \sim 914\text{m}$ ,造斜率 =  $(7^\circ \sim 20^\circ)/100\text{m}$ ]水平

---

第一作者:李宗田(1952—),男,山东菏泽人,教授级高工,主要从事油气田开发技术研究。地址:北京市海淀区志新东路14号。

井, 中曲率半径 [ $R = 50 \sim 213\text{m}$ , 造斜率 =  $(26^\circ \sim 98^\circ)/100\text{m}$ ] 水平井, 短曲率半径 [ $R = 6 \sim 12\text{m}$ , 造斜率 =  $(5^\circ \sim 10^\circ)/\text{m}$ ] 及极短曲率半径 ( $R = 0.3 \sim 0.6\text{m}$ ) 水平井。只有在中曲率半径及长曲率半径水平井的情况下, 才具备选择各种完井方式的可能, 短曲率半径及极短曲率半径的水平井, 由于使用各种井下工具受限, 只能选择裸眼完井方式。这里重点介绍一般的 L 型水平井的完井工艺技术。

国内外最常见的水平井完井方法大致可以分为两类: 非选择性完井方法和选择性完井方法。选择性完井方法包括管外封隔器完井方法和尾管注水泥射孔完井方法等, 而非选择性完井方法则包括裸眼完井方法、割缝衬管完井方法和砾石充填或预充填砾石筛管完井方法。在进行完井设计时, 要根据井眼类型、地层特点、胶结程度和油气层特点等来确定该使用哪种完井方法。国内统计资料较全的 210 口水平井中, 射孔完井最多, 达 115 口, 尾管射孔完井 6 口, 其次是割缝衬管(筛管)完井 78 口, 裸眼完井 6 口, 砾石充填完井 4 口, 管外封隔器完井 1 口。

### 3. 水平井压裂优化设计

水平井压裂后一般形成多条裂缝, 在压裂过程中, 由于地应力在水平井长度方向上的差异以及压裂工艺技术的限制, 使得形成的多条裂缝在长度、导流能力等方面不尽相同, 而且在生产过程中各裂缝间相互干扰, 进一步增加了水平井压裂优化设计的复杂性。

目前压裂设计的优化主要考虑压裂参数带来的经济效益不同来优化, 主要包括压裂水平井的渗流特点、压后产能预测、裂缝条数优化、裂缝导流能力优化、裂缝几何尺寸优化、裂缝间距优化、裂缝位置、裂缝布局优化等。

目前, 水平井压裂设计软件还都是国外常规压裂设计软件, 国内还没有自己的知识产权的商业化软件。目前常用的是 Gohfer、FracproPT2007、Meyer2008、FracCADE5.1、E-StimPlan5.5、TerraFrac 六套国外的先进软件, 可进行各种压裂设计的优化及预测。只有美国天然气研究所(GRI)授权 Pinnacle Technolgoeis 开发的全三维压裂设计软件 FracporPT 正在改进, 在设计的时候考虑了井筒的弯曲对压裂设计的影响, 而且可以通过调整弯曲半径来模拟水平井的单裂缝延伸、温度场、支撑剂运移和施工压力预测等施工参数。

### 4. 水平井分段压裂工艺技术

针对水平井压裂的特点, 目前水平井压裂工艺主要有分级压裂和限流压裂两种。具体主要有以下几种:

#### 4.1 液体胶塞隔离分段压裂技术(化学隔离技术)

国内外在 20 世纪 90 年代初采用该技术, 主要用于套管井。其基本做法是: ①射开第一段, 油管压裂; ②用液体胶塞和砂子隔离已压裂井段; ③射开第二段, 通过油管压裂该段, 再用液体胶塞和砂子隔离; ④采用这种办法, 依次压开所需改造的井段; ⑤施工结束后冲砂冲胶塞合层排液求产。液体胶塞和填砂分隔分段压裂方法施工安全性高, 但所使用的液体胶塞浓度高, 对所隔离的层段伤害大, 同时压后排液之前要冲开胶塞和砂子, 冲砂过程中对上下储层均会造成伤害, 而且施工工序繁杂, 作业周期长, 使得综合成本高, 因此, 该技术方法 20 世纪 90 年代初发展起来后没有得到进一步发展与推广应用。



#### 4.2 水平井双卡上提压裂多段技术

可以一次性射开所有待改造层段，压裂时利用导压喷砂封隔器的节流压差压裂管柱，采用上提的方式，一趟管柱完成各层的压裂(见图1)。双封隔器单卡分段压裂技术虽然分层改造目的性强，提高了井筒隔离效果，但容易砂卡封隔器，造成井下事故，有待进一步攻关。

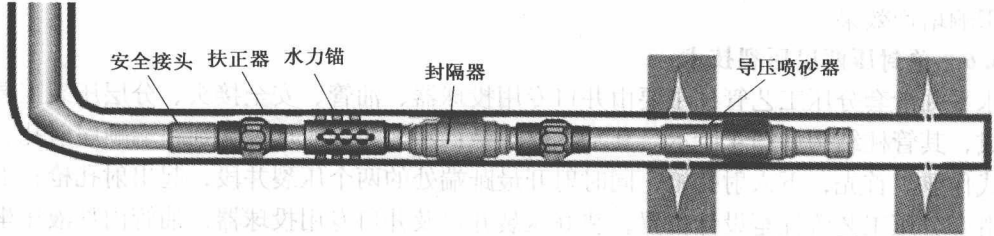


图1 双封分层压裂管柱示意图

#### 4.3 封隔器 + 机械桥塞分段压裂技术

射开第一段，油管压裂，机械桥塞坐封封堵；再射开第二段，油管压裂，机械桥塞坐封封堵，按照该方法依次压开所需改造的井段，打捞桥塞，合层排液求产。封隔器 + 机械桥塞分段压裂技术虽然在具备双封分压的优点，而且一旦砂卡，处理事故比双封管柱容易，但是作业周期比较长，砂卡风险还是比较大(见图2)。

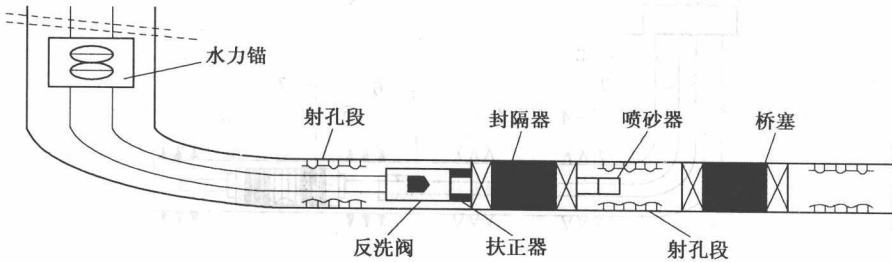


图2 水平井封隔器 + 桥塞机械隔离分压管柱示意图

#### 4.4 环空封隔器分段压裂技术

环空封隔器分段压裂，首先把封隔器下到设计位置，从油管内加一定压力坐封环空压裂封隔器，从油套环空完成压裂施工，解封时从油管加压至一定压力剪断解封销钉，同时打开洗井通道阀，洗井正常后起出压裂管柱，重复作业过程，实现分射分压(见图3)。

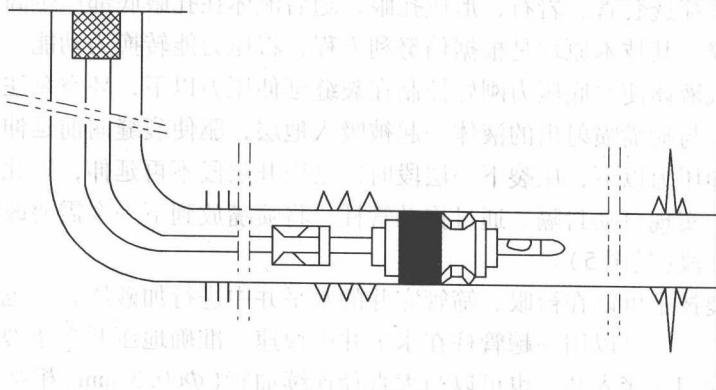


图3 环空分层压裂管柱示意图

#### 4.5 限流分层压裂技术

限流法分层压裂是一种完井压裂技术，它主要用于未射孔的新井。限流压裂技术机理是在压裂过程中，当压裂液高速通过射孔孔眼进入储层时会产生孔眼摩阻且随泵注排量的增加而增大，带动井底压力的上升，当井底压力一旦超过多个压裂层段的破裂压力，即在每一个层段上压开裂缝。如果层多、层薄，物性差异大时，那么就会导致各裂缝启裂和延伸不均衡，影响增产效果。

#### 4.6 单封压两层压裂技术

水平井滑套分压工艺管柱主要由井口专用投球器、油管、安全接头、分层压裂工具总成等组成，其管柱结构如图4所示。其基本原理是：水平井采取从趾端到跟端顺序射孔、压裂的方式作业。首先，下入射孔枪，同时射开最趾端处的两个压裂井段，起出射孔枪；下入水平井滑套分压工艺管柱至设计位置，装好压裂井口及井口专用投球器，油管内加液压坐封滑套分压封隔器，并打开第一射孔段的压裂通道，从油管完成第一段压裂施工；利用专用投球器，投入上层通道球棒，打开第二段压裂通道，并从油管完成第二段压裂施工；利用专用投球器，投入解封球棒，解封封隔器，起出压裂管柱；后续压裂井段按照环空分压施工工序进行。

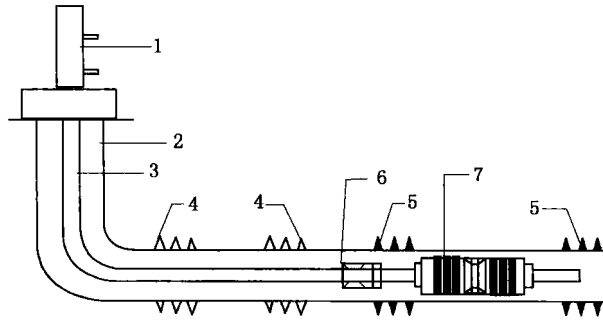


图4 单封压两层的压裂管柱示意图

1—井口专用投球器；2—套管；3—油管；4—拟射孔层段；  
5—已射孔待压裂层段；6—安全接头；7—分层压裂工具总成

#### 4.7 水力喷射加砂分段压裂技术

水力喷射分层压裂(HJF)是集射孔、压裂、隔离一体化的新型增产措施，利用专用喷射工具产生高速流体穿透套管、岩石，形成孔眼，随后流体在孔眼底部产生高于破裂压力的压力，造出单一裂缝。其技术原理是根据伯努利方程，将压力能转换为动能，在地层中射流成缝，通过环空注入液体使井底压力刚好控制在裂缝延伸压力以下，环空泵注的液体在压差作用下进入射流区，与喷嘴喷射出的液体一起被吸入地层，驱使裂缝向前延伸，因井底压力刚好控制在裂缝延伸压力以下，压裂下一层段时，已压开层段不再延伸，因此，不用封隔器与桥塞等隔离工具，实现自动封隔。通过拖动管柱，将喷嘴放到下一个需要改造的层段，可依次压开所需改造井段(见图5)。

水力喷射压裂技术可以在裸眼、筛管完井的水平井中进行加砂压裂，也可以在套管井上进行，施工安全性高，可以用一趟管柱在水平井中快速、准确地压开多条裂缝，水力喷射工具可以与常规油管相连接入井，也可以与大直径连续油管( $\Phi 60.3\text{ mm}$ )相结合，使施工更快捷，国内外已有数百口井用此技术进行过酸压或加砂压裂处理。

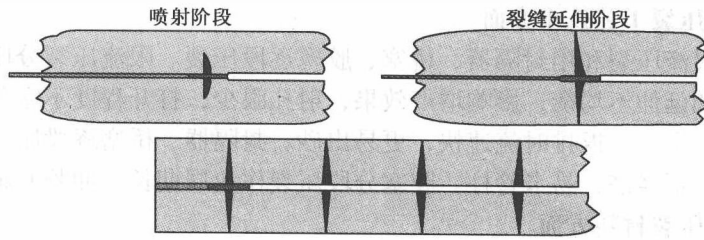


图5 水力喷射拖动分段压裂示意图

## 5. 目前水平井压裂技术存在的主要问题

### 5.1 水平井完井方式和压裂改造匹配问题

在低渗透油气藏，储层非均质性比较严重和自然产能低，大多数水平井都需要进行分段压裂改造。但是由于很多完井没有考虑后期压裂改造，造成完井管柱和压裂管柱不匹配，给后期的压裂改造带来很大的困难，甚至无法进行压裂改造。

### 5.2 水平井压裂裂缝起裂和延伸的机理研究不够

由于直井和水平井井筒轨迹不同，其井筒应力分布也不同，并且水平井钻遇地层与直井相比较为复杂，因此水平井压裂裂缝起裂和裂缝延伸的规律与直井也有很大不同。目前对水平井压裂裂缝的起裂及延伸研究还不够，从而无法合理地控制水平井压裂施工参数。

### 5.3 水平井应力剖面方面

水平井应力剖面目前研究得比较少，尤其是水平井油气层纵向应力剖面，水平井应力剖面对水平井分段压裂设计优化却非常重要。水平井油气层纵向上应力剖面：井筒在垂向上的位置的选择将优化穿过油气层垂向剖面的裂缝高度，这跟油气层的应力剖面、油气层厚度和计划的施工规模有关。如何优化水平井压裂裂缝高度是水平井压裂的一个主要问题。

水平井井筒横向应力剖面：低渗油气层非均质性比较强，如何选择水平井压裂层段？采取哪种隔离工艺技术进行分压？水平井分段压裂需要井筒应力剖面提供技术依据。

### 5.4 水平井压后产能预测

水平井的压后产能预测计算有解析解和数值解，解析解由于假设条件多，得出的只是单相稳定流动时的水平井压后产能，与实际生产情况相差太大。数值解一种是通过复位势理论和叠加原理求解，这种方法是基于每条裂缝流量相等的假设，与实际相差太大；另一种方法是基于黑油模型，这种方法不能模拟裂缝本身，不能进行裂缝几何尺寸和裂缝导流能力变化对产能影响的模拟，无法进行压裂方案的优化。

### 5.5 水平井压裂优化设计方面

目前压裂设计的优化主要考虑压裂参数带来的经济效果不同，而没有对整个系统来优化。对整个系统存在一个最优的油管尺寸、裂缝条数、裂缝导流能力、裂缝长度、裂缝位置、裂缝间距和裂缝布局的组合，必须把地层和压裂水平井井筒作为一个整体系统来考虑。

目前，国内外在直井的单裂缝延伸模型的研究基础上，形成了众多的压裂设计软件，这些软件并不能专门针对水平井分级压裂进行设计。美国天然气研究所(GRI)授权 Pinnacle-Technolgoeis 开发的全三维压裂设计软件 FracporPT 在设计的时候也只是考虑的井筒弯曲对压裂设计的影响，而且可以通过调整弯曲半径来模拟水平井的单裂缝延伸、温度场、支撑剂运移和施工压力预测等施工参数。

## 5.6 水平井压裂工艺技术方面

目前主要是限流压裂和用封隔器、桥塞、胶塞逐段压裂。限流压裂分段的针对性相对较差，各裂缝启裂和延伸不均衡，影响增产效果，射孔眼少，打开程度不完善，产量较大时一定程度上影响后期生产，返排时流速快，更易出砂。封隔器、桥塞逐段压裂只能用在套管完井，施工周期长，不经济，易卡管柱。胶塞分段压裂作业周期长、冲胶塞施工易造成伤害。

## 5.7 水平井压裂材料方面

水平井分段压裂作业周期长，压裂液返排不及时，因此易造成伤害。受作业工具的限制，水平井压裂更应防止砂堵和欠顶替。要求压裂液具有更好的携砂和降滤性能。水平井筒和裂缝的相对关系要求支撑剂充填层需要具有更高的稳定性和更高的导流能力。当前的压裂材料需要进一步提高性能，降低成本。

# 6. 水平井压裂技术发展趋势

## 6.1 水平井分段压裂优化设计

目前压裂设计的优化主要考虑压裂参数带来的经济效果不同，而没有从整个系统来优化。对整个系统存在一个最优的油管尺寸、裂缝条数、裂缝导流能力、裂缝长度、裂缝位置、裂缝间距和裂缝布局的组合以及多裂缝间的相互干扰，必须把地层和压裂水平井井筒作为一个整体系统来考虑。开发研制针对水平井压裂设计用的软件。

## 6.2 不动管柱多次水力喷射分段压裂技术

既可以用于裸眼井和筛管完井，也可以用于水泥完井。在水力喷射辅助压裂的基础上，对工具和管柱结构进行改进，对水平井进行一趟管柱压裂施工多段的压裂工艺技术。管柱主要由喷枪和滑套组成。比如压裂三层，就在一趟管柱上把三层所需要的喷枪和滑套连接下到位，第一层采用普通水力喷射压裂，后两层采用滑套水力喷射压裂(见图6)，压完第一层后打开上一层的滑套喷枪压上层，这样也能实现分层压裂。

## 6.3 新型低伤害化学暂堵胶塞分段压裂技术

新型伤害化学胶塞应采用低浓度成胶剂，成胶后强度高，封堵已压层段不用填砂，成胶与破胶时间可控，压后可彻底破胶水化，施工结束后无需冲砂或钻塞等作业，直接排液求产，对地层伤害小。

## 6.4 定点分段多级封隔器分段改造完井技术

既可以用于裸眼井，也可以用于水泥完井。封隔器是遇烃膨胀封隔器。喷砂器使用的是滑套喷砂器。比如压裂四层，就在一趟管柱上把四层所需要的封隔器(8套)连接下到位，第一层采用普通喷砂器，后三层采用滑套喷砂器，压完第一层后打开上一层的滑套喷砂器压上层，这样也能实现分层压裂。最多可以对10个层进行不动管柱的分压处理。示意图见图7。

## 6.5 高性能压裂液与支撑剂技术

由于水平井压裂排液周期较长，要求压裂液低伤害或无伤害。当前清洁压裂液虽然低伤害，但价格较高。为适应长期关井降低伤害的要求，水平井压裂液应加强以下添加剂的研究：超低表界面张力技术、无滤饼或滤饼可降解滤饼技术、超稳定长效破胶剂技术，智能层内增能助排技术等

近年来，国外支撑剂回流控制技术不断完善，包胶支撑剂的适应能力、应用范围和性能指标也在不断提高。国内虽然已有树脂预包砂工艺用于防砂，仁创覆膜砂也已工业化生产，然而，我国针对裂缝稳定技术的研究还不能满足水平井压裂的需要。在技术全球化的大趋势

下，应积极开展该技术的研发或引用，填补技术空白并为油气勘探开发队伍走向国际市场创造条件。

根据国外支撑剂稳定技术的最新进展，建议开展以下研究：

(1) 纤维与热塑膜覆膜等技术综合运用，减少近井支撑剂回流，防止微粒运移，提高近井裂缝导流能力稳定时间。

(2) 优化尾追支撑剂粒径组合，对细粒运移实现有效阻挡。

(3) 开发超高性能的支撑剂，保证近井筒导流能力尽可能提高。

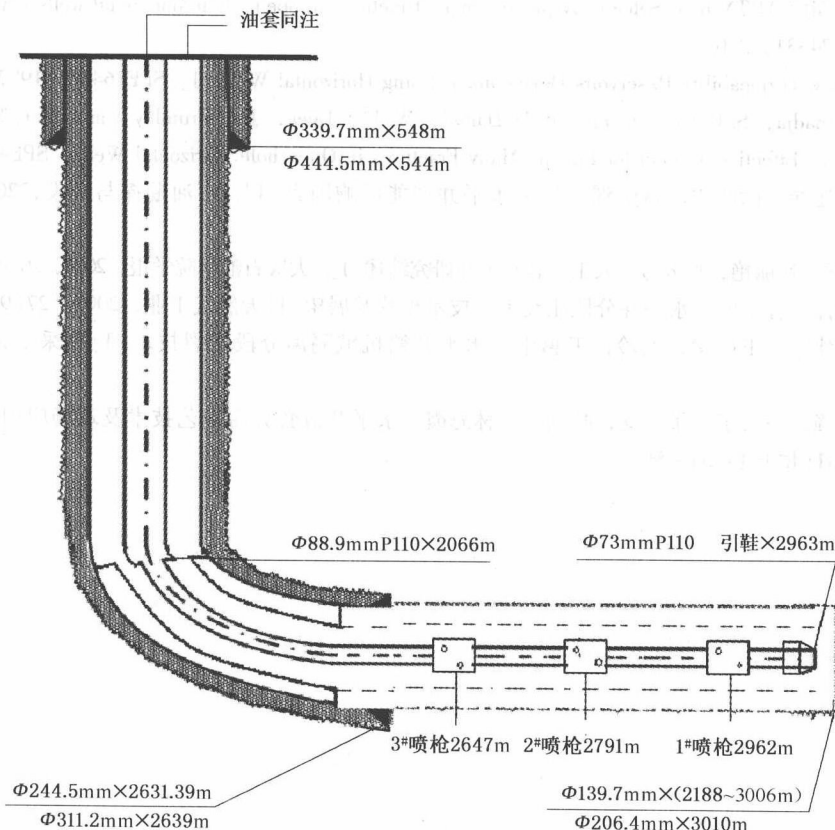


图6 水平井滑套水力喷射压裂管柱示意图

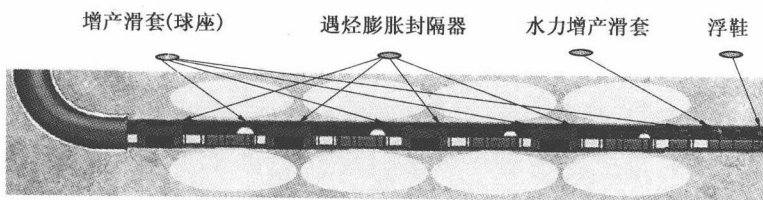


图7 定点分段多级封隔器分段改造管柱示意图

## 7. 结论

(1) 水平井的增产措施是低渗透水平井长期高效开发的重要手段，应加大水平井的分段压裂措施的现场实施研究力度。

(2) 结合水平井压后裂缝形态和裂缝条数的优化，为分段压裂提供了一定的理论基础。

(3) 水平井分段压裂改造获得较好效果, 其工艺技术难点在于分段压裂工艺方式选择和井下封堵工具。

(4) 水平井开发经过十余年的科技攻关, 取得了很多成果, 但在水平井分层压裂工艺配套等许多方面有待于进一步提高。

(5) 水平井压裂的特殊性要求压裂液和支撑剂及其配套技术进一步提高。

### 参 考 文 献

- 1 LOVE T G, MCCARTY R A. Selectively placing many fractures in open hole horizontal wells improves production[J]. SPE74331, 2001
- 2 Giger F M. Low Permeability Reservoirs Development Using Horizontal Wells[J]. SPE16406, 1987
- 3 J. B. Surjaatmadja, S. R. Grundmann, B. McDaniel, W. F. J. Deeg, J. L. Brumley, and L. C. Swor. Hydrjet Fracturing: An Effective Method for Placing Many Fractures in Open hole Horizontal Wells, SPE48856, 1998
- 4 曾凡辉, 郭建春, 徐严波, 赵金洲. 压裂水平井产能影响因素[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(4): 474 ~ 477
- 5 刘振宇, 刘洋, 贺丽艳, 翟云芳. 人工压裂水平井研究综述[J]. 大庆石油学院学报, 2002, 26(4): 96 ~ 99
- 6 陈作, 王振铎, 曾华国. 水平井分段压裂工艺技术现状及展望[J]. 天然气工业, 2007, 27(9): 78 ~ 80
- 7 宋振云, 陈建刚, 王兴建, 王玲, 王惠生. 水平井筒机械隔离分段压裂技术[J]. 钻采工艺, 2007, 30(4): 75 ~ 77
- 8 许建国, 王峰, 刘长宇, 张应安, 叶勤友, 林海霞. 水平井滑套分压工艺技术及现场应用[J]. 钻采工艺, 2008, 31(增刊): 54 ~ 56

# 胜利油田水平井分段压裂工艺技术

张全胜 董社霞 杨同玉 李文波

(中石化胜利油田分公司采油工艺研究院)

**摘要:** 文中介绍了胜利油区低渗透油藏水平井分段压裂的研究和实施情况。通过分段裂缝配置优化技术和分段压裂工艺研究,分析了分段压裂裂缝参数对水平井产能的影响,论述了水平井分段压裂技术的原理和特点,设计了封隔器分段压裂工艺管柱,研制了关键工具,大大提高了封隔器分段压裂技术的可靠性和安全性。现场实施封隔器分段压裂、连续油管环空压裂和限流压裂工艺6口井,取得了工艺上的成功和较好的应用效果,文章最后提出了几点认识和建议。

**主题词:** 水平井 分段压裂工艺 裂缝参数 压裂管柱 现场应用

## 1. 前言

由于水平井分段压裂可以压穿多套储层,增加单井控制储量、提高单井产能,因此水平井分段压裂逐步成为低渗透油藏开发的关键技术。从1992年至2008年,胜利油田共在低渗透油藏钻了22口水平井。未压裂的低渗透水平井多数井产能不够理想,与邻近压裂直井相比没有明显的产能优势。近些年,随着水平井分段压裂技术的发展,对6口井实施了压裂改造,取得了一定效果。

## 2. 水平井分段裂缝配置优化技术

### 2.1 水平井压裂造缝机理与井身轨迹的优化配置

根据水平井压裂裂缝造缝机理研究成果,水平井压裂裂缝有三种形态:横向缝、纵向缝、斜交缝。对于一口水平井,实际压裂后将产生哪一种形态的缝,要取决于地应力和井筒井眼轨迹的情况。储层中的地层处于三种相互垂直的主应力状态中:垂直压裂 $\sigma_v$ 、最大水平应力 $\sigma_H$ 和最小水平应力 $\sigma_h$ 。裂缝总是沿垂直于最小水平应力方向的平面延伸。为取得好的压裂效果,水平井水平段的轨迹部署必须与最小水平应力 $\sigma_h$ 基本一致。胜利油田在多口低渗透水平井的部署中采用了以上原则,即水平段的轨迹必须与最小水平应力基本一致。如在史127-1块,滨248块、商75块部署的井身轨迹方向确保压裂时形成横向裂缝。

### 2.2 水平井分段压裂裂缝配置优化技术研究

水平井压裂分段裂缝优化配置的内容包括:分段数或裂缝条数、裂缝位置或间距、半缝长度、缝宽、裂缝导流能力、单裂缝水加砂规模等。根据所建立的水平井分段压裂模型,利用编制的分段压裂优化设计软件,对影响水平井分段压裂改造的主要因素进行了应用计算分析。

---

第一作者:张全胜(1964—),教授级高工,1985年毕业于中国石油大学,从事复杂结构井的生产,修井和完井研究工作。地址:山东省东营市(257000)。电话:0546-8557289。E-mail: zhangqs@slof.com。

### 2.2.1 分段裂缝数、裂缝位置

水平井压裂改造一般比不压裂相比增加2倍以上,随着裂缝分段越多,产能增加,但是产能增加较好的分段条数在3~6段左右,当裂缝条数增加超过6条后,产能增加速度变缓,增加分段数目的意义不大。

### 2.2.2 裂缝长度

压裂裂缝长度与压后产量在一定范围内成比例增加。例如在5条裂缝的情况下,裂缝半长在50m时压后产能约35t/d,如果裂缝半长在100m时,产能可以达到42.5t/d。

### 2.2.3 裂缝导流能力

对于不同的储层渗透率、产层有效厚度存在最佳的裂缝导流能力范围。对于 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的地层,裂缝铺砂浓度在 $3 \sim 5 \text{kg}/\text{m}^2$ 就可以,相应的支撑裂缝的渗透率可以达到 $100 \mu\text{m}^2$ ,导流能力在 $0.5 \sim 1.0 \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$ 。

## 3. 水平井压裂液研究

水平井压裂液必须具有流变性好、携砂能力强、损害低、抗温能力强等特点。研究优选了两类压裂液体系作为水平井的压裂液,高温 HPG 水基压裂液和高温 VES 清洁压裂液,尤其是 VES 压裂液体系,由于其良好的携砂性能,具有很好的应用前景。

### 3.1 高温 HPG 水基压裂液

在目前水基压裂液体系的基础上,开发了新型的有机硼钛交联 HPG 压裂液体系,该体系在 $90^\circ\text{C}$ 的条件下黏度保持在 $400 \text{mPa} \cdot \text{s}$ 以上, $120^\circ\text{C}$ 的条件下黏度保持在 $200 \sim 300 \text{mPa} \cdot \text{s}$ 以上, $140 \sim 150^\circ\text{C}$ 的条件下黏度保持在 $100 \text{mPa} \cdot \text{s}$ 以上,经过60min后黏度 $>60 \text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

### 3.2 VES 压裂液

研制开发的新型 SL-VES 压裂液,由增稠用表面活性剂、稳定助剂、交联助剂组成。VES 压裂液滤失速率基本不随时间变化,其黏弹性使得压裂液很难进入孔隙喉道;清洁压裂液的黏度不到瓜胶压裂液的黏度 $1/3$ , $60^\circ\text{C}$ 清洁压裂液黏度 $100 \text{mPa} \cdot \text{s}$ ,聚合物压裂液黏度 $360 \text{mPa} \cdot \text{s}$ ,但是其静态悬砂能力比瓜胶压裂液强得多。

VES 压裂液主要技术指标如下:

- (1) 在温度 $100^\circ\text{C}$ 时,以 $170 \text{s}^{-1}$ 的剪切速率,剪切1h后,黏度 $\geq 130 \text{mPa} \cdot \text{s}$ ;在温度 $120^\circ\text{C}$ 时,以 $170 \text{s}^{-1}$ 的剪切速率,剪切1h后,黏度 $\geq 50 \text{mPa} \cdot \text{s}$ ;
- (2) 破胶化水液通过支撑裂缝的导流能力的保留率 $>92\%$ ;
- (3) 室温( $30^\circ\text{C}$ )时的滤失系数 $9.4 \times 10^{-4} \text{m}/\text{min}^{0.5}$ 。

SL-VES 压裂液具有较强的抗温抗剪切性能,在高温高剪切的作用下,其降黏作用是可逆的,现场应用表明,作为水平井压裂液它具有很强的携砂稳定性。

## 4. 水平井压裂工艺研究与应用

国外对于水平井压裂裂缝的实际测量表明,在水平井压裂过程中如果多个层段合压,不同层段起裂、改造规模存在着差异,影响压裂效果,而采用水平井分段压裂在纵向上压穿多套储层,可以形成多条裂缝,大大增加单井控制储量、提高单井产能。

### 4.1 限流压裂

#### 4.1.1 工艺原理

套管限流压裂是通过限制射孔数目与射孔直径,在井筒内形成一定的净压力,使不同的射开段同时压开,在较理想的条件下通过不同层段的射孔数目与孔径的优化实现不同层段预



期的改造规模。在各段起缝压力相差较小情况下，该工艺在一次施工中可压开多条裂缝，施工简单，效率高。采用该技术在胜利油田共实施了3口井：史127-平1、商75-平1和高89-平1。

#### 4.1.2 优化设计

根据实际水平井的相关参数，利用编制的分段压裂优化设计软件，进行了缝长、缝宽、缝间距等参数设计。例如，史127-1平1井裂缝优化设计：①裂缝方向史127-平井水平段为近南北向，史深100地区的最大主应力方向为东西向，因此该井进行压裂施工时可形成正交缝；②射孔数目和压力优化3488.5~3489.0m，射6孔，51.96MPa；3578.0~3578.8m射9孔，54.39MPa；3646.0~3646.5m，53.05MPa，射7孔；③设计缝长140m，缝宽4~5m，裂缝数目为6条。

#### 4.1.3 施工工艺

考虑到水平井排量大、压力高的特点，为确保施工高限压及安全，压裂管柱采用在压裂层段以上下入高压封隔器保护套管，施工工艺采用前置段塞+分级暂堵工艺。史127-平1、商75-平1和高89-平1三口井的压裂施工情况见表1。

表1 限流压裂三口井施工情况表

井号	压裂方式	施工泵压/MPa	排量/(m <sup>3</sup> /h)	加砂量/m <sup>3</sup>	压裂液/m <sup>3</sup>
高89-平1	限流压裂	46~65	5.1~8.8	123.7	610
史127-平1	限流压裂	68.5~81	6.3~7.1	72	712
商75-平1	限流压裂	51.24~58.4	7.0~8.0	68	636

压裂后对史127-平1井的裂缝监测表明实际形成了三条人工裂缝，平均有效缝长247m，平均有效缝高29.3m，实现了分段压裂的目的。一般情况下，受储层认识的影响，尤其是在地应力方向不够精确的情况下，对于长水平井段实施限流压裂很难保证多个层段同时压开，无法实现不同层段不同的改造要求。

## 4.2 连续油管环空压裂

### 4.2.1 工艺原理

连续油管环空压裂是在连续油管上连接喷砂射孔枪，从连续油管内进入液体进行喷砂射孔，射孔完成后，从油套环空进行加砂压裂，其分段方法是完成一段压裂后进行填砂隔离，然后继续下一层段压裂。

### 4.2.2 优化设计

根据声波测井资料和密度测井资料进行了地应力分析和裂缝分析，总结出滩坝砂薄互层沿井壁最大主应力和最小主应力分布规律，从而进行了水平井井身轨迹垂向位置和长度优化，同时利用软件对加砂量、施工排量、压裂液、裂缝半长、缝高、平均铺砂浓度进行了优化设计。例如梁8-平1井设计水平井段长650m，分三段射孔，三段的位置是3760m、3500m、3180m，每一层射孔数目10个，总共射孔数目30个。

### 4.2.3 施工工艺

胜利油田采用连续油管喷砂射孔压裂技术完成了梁8-平1井、樊147-平2和樊147-平1三口井的水平井压裂施工。其施工工艺如下：①下入喷砂射孔压裂管柱；②反循环清洗井筒；③以小排量油管加砂喷砂射孔10min；④反洗井一周冲出射孔砂；⑤以大排量从套管注入压裂液进行压裂；⑥脱砂填砂塞；⑦测试砂塞高度；⑧进行下段射孔和压裂。三口井施工参数见表2。