

# 水平井裸眼分段压裂完井技术在 苏里格气田的应用

张 恒<sup>1</sup>, 刘 洋<sup>1</sup>, 李 强<sup>2</sup>, 徐 鹏<sup>1</sup>, 王 玥<sup>1</sup>, 孙巍巍<sup>1</sup>

(1. 中国石油渤海钻探工程有限公司工程技术研究院, 天津 300280; 2. 中国石油测井有限公司技术中心, 陕西西安 710077)

**摘 要:**水平井裸眼分段压裂完井是改变低渗透油气田多井低产、转变发展方式、实现少井高产的重要手段。为了最大限度地提高苏里格气田低压、低渗透气藏的产量,苏里格气田采用了水平井裸眼分段压裂完井技术。截至目前,该气田已在 15 口水平井上应用了水平井裸眼分段压裂完井技术,完井后的产气量是周围常规酸化压裂邻井的 5~10 倍。介绍了水平井裸眼分段压裂完井管柱的结构、工作原理、技术特点以及配套工具的结构特征。以苏 20-13-21H 井为例,介绍了水平井裸眼分段压裂完井的设计原则、裂缝参数优化方法、压裂材料优选方法及分段压裂完井的工艺流程。

**关键词:**水平井完井 裸眼 分段压裂 悬挂式封隔器 苏里格气田 苏 20-13-21H 井

**中图分类号:**TE257<sup>+</sup>. 2 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2011)04-0077-04

## Application of Staged Fracturing Completion Technology in Horizontal Openhole Wells in Sulige Gas Field

Zhang Heng<sup>1</sup>, Liu Yang<sup>1</sup>, Li Qiang<sup>2</sup>, Xu Peng<sup>1</sup>, Wang Yue<sup>1</sup>, Sun Weiwei<sup>1</sup>

(1. Engineering Technology Research Institute, CNPC Bohai Drilling Engineering Limited Company, Tianjin, 300280, China; 2. CNPC Technology Center of Logging Company Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710077, China)

**Abstract:** Staged fracturing in horizontal openhole wells is an important method to reverse low production rate in low permeability reservoir, change development method, and achieve high production rate. At present, this technology has been used in 15 horizontal wells in Sulige Gas Field. The production rate increased by 5-10 times compared with offset wells using conventional acid fracturing. This paper introduced the structure, working principles, technical characteristics of completion string and its associated equipment structure. Using Well Su 20-13-21H as an example, the design principle, fracturing parameter optimization method, fracturing material selection and staged fracturing procedure was introduced.

**Key words:** horizontal well completion; open hole; staged fracturing; suspension packer; Sulige Gas Field; Well Su 20-13-2H

苏里格气田属岩性圈闭气藏,储层分布受砂体展布和物性控制,为低压、低孔、低渗、定容弹性驱动气藏。由于该气田具有压力下降快、砂体连通性差的特点,采用常规直井压裂开发效果不明显,而水平井裸眼分段压裂完井技术是将压裂改造管串与完井管串合并为一趟下入井中,不需要下套管固井、射孔等作业,完井成本低,可避免储层二次伤害且建井周期短,能实现选择性分段压裂,能扩大水平井水平段的渗流面积和沟通更多的含气砂体<sup>[1-3]</sup>。为此,苏里格气田多个区块的气井完井采用了水平井裸眼分段压裂完井技术。

## 1 水平井裸眼分段压裂完井管柱

### 1.1 管柱结构

水平井分段压裂完井管柱主要由筛管引鞋、浮鞋、球座、压差式滑套、裸眼封隔器、投球滑套、悬挂式

**收稿日期:**2010-06-19; **改回日期:**2011-07-18。

**作者简介:**张恒(1973—),男,天津人,1994年毕业于大港油田集团石油学校钻井工程专业,2005年获西南石油学院机械工程专业硕士学位,2010年获西南石油大学油气田材料与应用专业博士学位,高级工程师,主要从事油气井完井工程方面的研究工作。

**联系方式:**(022)25921424, liangliang3yx@126.com。

封隔器、回接装置、水力锚和油管组成,如图1所示。

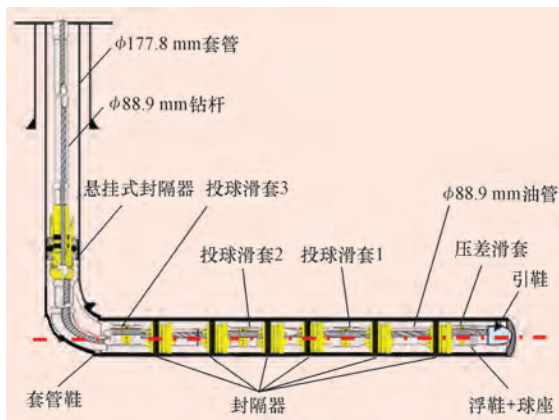


图1 水平井分段压裂完井管柱结构示意图

Fig.1 Structure of completion string in staged horizontal fracturing

## 1.2 工作原理

用钻杆将完井管柱送至预定位置,投球坐封悬挂式封隔器和裸眼封隔器,加压丢开悬挂式封隔器,起出送入管柱。下回接插头及生产油管,加压打开压差式滑套,放喷排液,进行第一层段压裂。第一层段压裂完成后,根据设计投入相应尺寸的球,待球落入球座后,加压打开喷砂滑套,进行相应层段的压裂施工。

## 1.3 技术特点

- 1) 实现水平井选择性分段压裂;
- 2) 工具一次入井可实现水平段多段压裂作业;
- 3) 缩短钻井周期,减少压裂作业时间;
- 4) 不进行固井作业,可避免固井质量差的问题;
- 5) 不需要射孔作业,可降低开发成本。

## 2 主要完井工具

水平井裸眼分段压裂完井工具主要包括压差式滑套、裸眼封隔器、投球滑套、悬挂式封隔器等。

### 2.1 压差式滑套

压差式滑套是水平井分段压裂的重要工具之一,是完井管柱与地层连通的通道。主要通过引鞋部分的球座憋压,利用内滑套上、下截面受力面积不一样产生压差,打开滑套,连通完井管柱与地层。压差式滑套的结构如图2所示。

### 2.2 裸眼封隔器

裸眼封隔器主要用于卡封水层/气层或分段开采,是实施分段增产措施的重要工具之一。该工具

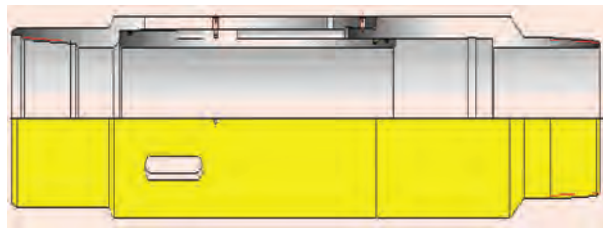


图2 压差式滑套结构示意图

Fig.2 Structure of differential pressure sleeve

随完井管柱下入井中,通过底座投球憋压,推动滑套移动,从而撑开胶筒,实现坐封。裸眼封隔器主要由密封胶筒、中心管和滑套组成,其结构如图3所示。

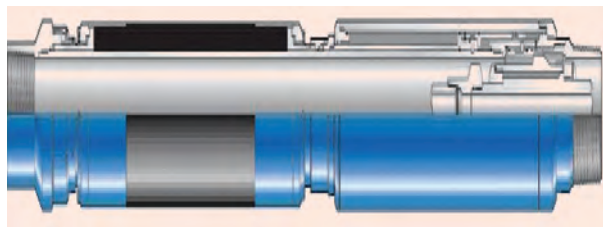


图3 裸眼封隔器结构示意图

Fig.3 Structure of open hole packer

### 2.3 投球滑套

投球滑套是水平井分段压裂的重要工具之一,与压差式滑套一样,是完井管柱与地层连通的通道。不同的是,它是通过投球憋压来打开滑套,实现完井管柱与地层的连通。投球滑套的结构如图4所示。

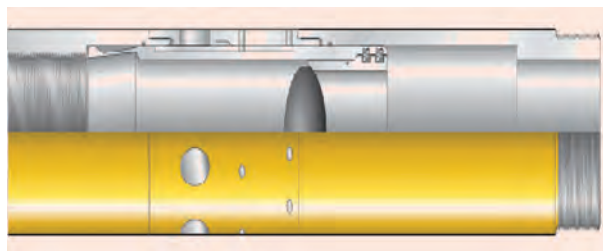


图4 投球滑套结构示意图

Fig.4 Structure of pitching ball sleeve

### 2.4 悬挂式封隔器

悬挂式封隔器是水平井分段压裂的重要工具,集密封与悬挂于一体,其作用是油管定位,尤其是在卡封水层的完井管柱中,与裸眼封隔器配套使用能够提高封隔器卡封的准确性,还起扶正油管的作用。悬挂式封隔器坐封时,首先憋压至17 MPa左右,然后带压(5 MPa)上提和下放管柱,上提时如果悬重比原悬重高20 kN,下放时如果悬重比原悬重低20 kN,表明成功坐封。丢手的操作方法:下放悬重比原悬重低10 kN,钻杆内加压至21 MPa,稳压3 min,

缓慢泄压,试提,如果没有丢开,将钻杆内的压力加至 23 MPa,缓慢泄压,试提;若加压方式不能丢开,则正转管柱 8~12 圈直至丢手成功。悬挂器上部有回接筒装置,在进行压裂时保证回接插头顺利插入。悬挂器和回接筒的结构示意图见图 5。

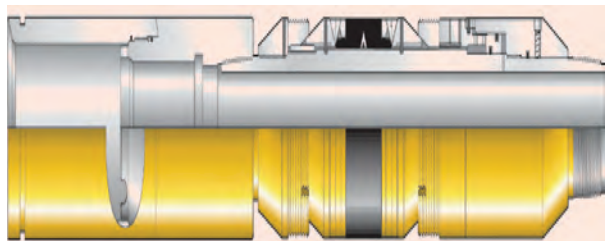


图 5 悬挂器和回接筒的结构示意

Fig. 5 Structure of hanger and tieback sleeve

### 3 现场应用

到目前为止,渤海钻探工程公司在苏里格气田 3 个区块的 15 口水平井完井作业中,应用了水平井裸眼分段压裂完井技术,应用效果良好,其产气量为常规酸化压裂邻井产量的 5~10 倍,已累计产气  $1.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。下面以苏 20-13-21H 井为例,介绍水平井裸眼分段压裂完井技术的现场施工情况。

#### 3.1 苏 20-13-21H 井井身结构

苏 20-13-21H 井完钻井深 4 399 m,为三开水平井,水平段长 811 m。其井身结构为:一开, $\phi 374.6 \text{ mm}$  钻头  $\times 508.00 \text{ m}$ , $\phi 273.1 \text{ mm}$  套管  $\times 506.64 \text{ m}$ ;二开, $\phi 215.9 \text{ mm}$  钻头  $\times 3 630.00 \text{ m}$ , $\phi 177.8 \text{ mm}$  套管  $\times 3 627 \text{ m}$ ;三开, $\phi 152.4 \text{ mm}$  钻头  $\times 4 399.00 \text{ m}$ 。

#### 3.2 完井设计

##### 3.2.1 分段完井设计原则

1) 封隔器要坐封在物性较差的泥质砂岩井段,电性较差的井段,井径变化较小、没有明显扩径的井段,或钻时较长的井段上;

- 2) 尽量增加压裂裂缝的泄流面积;
- 3) 最大限度地利用水平井段。

##### 3.2.2 悬挂器坐封的位置

- 1) 井斜角小于  $35^\circ$  的井段;
- 2) 在套管鞋以上,与套管鞋的距离大于 150 m;
- 3) 狗腿度小于  $10^\circ/30\text{m}$  的井段;
- 4) 避开套管接箍。

#### 3.3 裂缝参数优化

图 6 为裂缝半长 130 m,间距 150 m 的 3 条裂

缝的压力动态曲线。从图 6 可以看出,当裂缝间距为 150 m 时,裂缝间容易产生相互压力干扰,从而影响流态,影响生产效果。

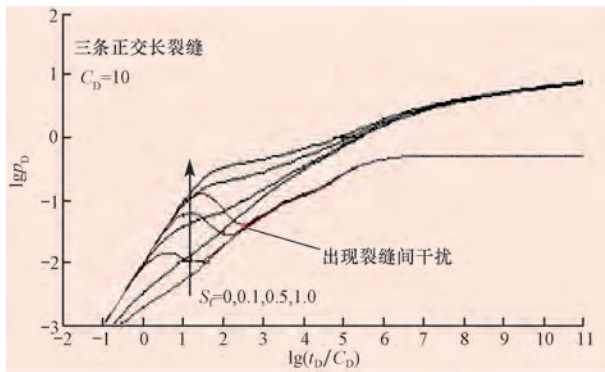


图 6 裂缝压力动态典型曲线

Fig. 6 Typical fracturing pressure curve

苏 20-13-21H 井的裂缝与井轴的夹角为  $78^\circ \sim 90^\circ$ ,大致呈垂直状态。利用水平井气藏优化软件计算可知,该井裂缝间距为 200 m 左右时,既能实现较高的初期产量,也能减少裂缝间的压力干扰,有利于长期稳产。结合该井的测井、录井曲线,确定该井分 4 段进行压裂:第一段 4 340.00~4 399.00 m,第二段 4 130.00~4 170.00 m,第三段 3 880.00~3 920.00 m,第四段 3 607.00~3 670.00 m。

#### 3.4 压裂材料的优选

由于该井水平段封隔器间隔大,且为裸眼,液体滤失严重,为降低液体滤失,在前置液中加入 100 目粉陶以降低液体滤失。另外,通过提高压裂液黏度来提高液体造缝效率。

苏里格气田的地层温度梯度为  $3.06^\circ\text{C}/100\text{m}$ ,折算地层温度  $104^\circ\text{C}$ ,为降低压裂液对地层的二次伤害,采用超级胶乳低伤害压裂液体系。

支撑剂选用中密度高强度陶粒,其性能指标须达到标准 SY/T5108—2006 规定的要求。

加砂规模参考邻井直井压裂施工情况,同时借鉴苏 20 区块水平井压裂的成功经验,设计逐渐加大加砂量。

为了实现快速排液,采取全程伴注液氮方式,根据已压裂水平井的返排情况,设计液氮排量为  $220 \text{ L}/\text{min}$ 。

压裂液基液配方为 0.55% 超级胶乳 + 0.30% 防膨剂 + 0.60% 助排剂 + 0.50% 发泡剂 + 1.00% 氯化钾 + 0.10% pH 值调节剂 + 0.24% 分散剂 + 0.10% 杀菌剂 + 0.15% 温度稳定剂 + 清水。要求基液黏度不小于  $60 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。清水和交联剂按 1:1 的体积比配制成交联液,压裂施工中交联液按压裂



液基液与交联液 100.0 : 0.6 的体积比加入到压裂液基液中。胶囊破胶剂在前置液及加砂早、中期使用,过硫酸铵在加砂后期使用;胶囊破胶剂按 0.005%—0.008%—0.010%—0.030%—0.050%—0.070%—0.090% 在混砂车上由小到大楔型加入。

### 3.5 分段完井、压裂施工工艺流程

第一步,使用刮管器刮套管,悬挂器位置刮 3 遍,刮管过程中分段循环,直至出口钻井液和设计钻井液性能相同。

第二步,使用通井规通套管(严禁通井规超出套管末端),用原钻井液循环 1 周。

第三步,使用钻头通水平段,如遇阻,用原钻井液循环,并在遇阻位置上下划眼,直至上下通畅,通至人工井底,用原钻井液循环,直至进出口钻井液性能一致,然后起出管柱,进行井径测井。

第四步,用“钻头+单磨鞋”模拟管串通水平段。

第五步,用“钻头+双磨鞋”通水平段,起出后立即下入完井管柱。

第六步,用钻杆把完井管柱送至预定位置,投球坐封,丢手悬挂式封隔器,起出送入管柱。

第七步,下入“油管+回接插头”。

第八步,压裂施工:1)连接地面管线,试压合格,低排量循环正常后,进行压裂;2)按照设计加砂程序压裂第一层;3)压完第一层后,从井口旋塞阀投入  $\phi 38.1$  mm 球,以  $1.0 \text{ m}^3/\text{min}$  排量送球,待球落入球座后,压裂第二层;4)压完第二层后,从井口旋塞阀投入  $\phi 44.5$  mm 球,以  $1.0 \text{ m}^3/\text{min}$  排量送球,待球落入球座后,压裂第三层;5)压完第三层后,从井口旋塞阀投入  $\phi 50.8$  mm 球,以  $1.0 \text{ m}^3/\text{min}$  排量送球,待球落入球座后,压裂第四层。

第九步,压裂施工完成,合层排液,既要防止地层出砂,又要尽快排出压裂液,排液期间避免套管放压及中途关井,投产。

### 3.6 压裂施工曲线分析

通过 3 次投球,对苏 20-13-21H 井的水平段分 4 段进行了压裂施工。图 7 为该井的压裂施工曲线。从图 7 可以看出,每次投球后,油管压力都有一定程度的下降,说明压开了新裂缝。压裂液以  $4 \text{ m}^3/\text{min}$  的排量压入地层,表明需压裂的地层均正常压开。

该井共注入  $1\ 161.5 \text{ m}^3$  压裂液,100 目粉陶  $4.0 \text{ m}^3$ ,中密度高强度陶粒  $106.0 \text{ m}^3$ ,与设计参数基本吻合。4 段的破裂压力分别为 73.0,49.6,51.3 和

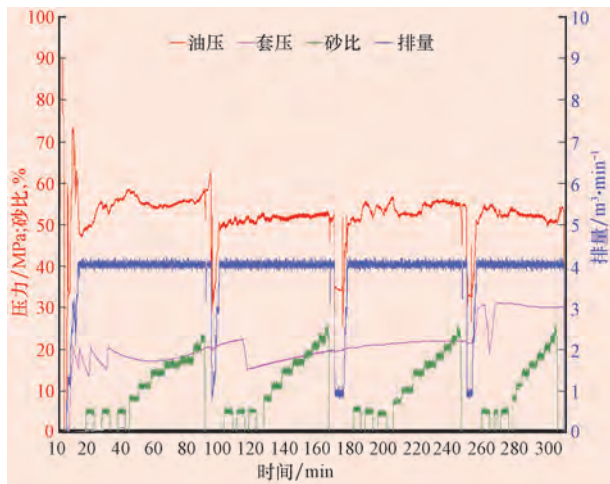


图 7 苏 20-13-21H 井的压裂施工曲线

Fig. 7 Fracturing pressure curve of Well Su 20-13-21H

51.2 MPa。该井分段压裂完井后,初期日均产气量达  $10.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,为常规酸化压裂邻井产量的 5 倍以上。

## 4 结论与建议

1) 采用水平井裸眼分段压裂完井技术开发苏里格气田低压、低孔、低渗、定容弹性驱动气藏,开发效果较好,为高效开发苏里格气田提供了一种可行的方案。

2) 在苏 20-13-21H 井施工过程中,成功完成了悬挂式封隔器的坐挂与丢手、裸眼封隔器的胀封,投球滑套和压差式滑套打开顺利,说明这些工具具有结构简单、操作方便、性能可靠等优点。

3) 水平井裸眼分段压裂完井技术是一项复杂的系统工程,涉及众多学科,应在实践中不断提高认识,进一步改进水平井裸眼分段压裂完井工具,从而提高水平井裸眼分段压裂的成功率及其效果。

## 参 考 文 献

- [1] 李胜利,周万富,李清忠. 水平井酸化工艺现状及探讨[J]. 采油工程, 2005(1): 40-42.  
Li Shengli, Zhou Wanfu, Li Qingzhong. Present situation and discussion of horizontal well acding process[J]. Oil Production Engineering, 2005(1): 40-42.
- [2] 詹鸿运,刘志斌,程智远,等. 水平井分段压裂裸眼封隔器的研究与应用[J]. 石油钻采工艺, 2011, 33(1): 123-125.  
Zhan Hongyun, Liu Zhibin, Cheng Zhiyuan, et al. Research on open hole packer of staged fracturing technique in horizontal wells and its application[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2011, 33(1): 123-125.
- [3] 王建军,于志强. 水平井裸眼选择性分段压裂完井技术及工具[J]. 石油机械, 2011, 39(3): 59-62.  
Wang Jianjun, Yu Zhiqiang. The completion technology and tool for open-hole preferential staged fracturing of the horizontal well[J]. China Petroleum Machinery, 2011, 39(3): 59-62.