

文章编号:1673-5005(2010)04-0141-05

# 新型水平井不动管柱封隔器分段压裂技术

柴国兴, 刘松, 王慧莉, 李继志

(中国石油大学机电工程学院, 山东东营 257061)

**摘要:**通过分析水平井分段压裂技术现状,提出一种新型水平井不动管柱封隔器分段压裂工艺技术。介绍新型工艺技术的管柱结构、工艺原理及创新点,并利用 ABAQUS 有限元分析软件对工艺管柱进行力学分析。结果表明:新型分段压裂工艺管柱能达到力学设计要求;新技术的创新点在于能够实现一趟管柱完成 2~3 层段分段压裂,设计封隔器长胶筒摩擦锚定,降低安全事故的发生,设计工具挡砂传液机构,有效避免工具内腔进砂引起的事故,管柱无卡瓦锚定,可以反洗井,整个压裂施工可以在一天内完成,施工简单,可以有效节省作业时间和作业费用。

**关键词:**油井生产;采油设备;压裂;分段压裂;水平井;封隔器隔离;有限元分析

**中图分类号:**TE 355 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1673-5005.2010.04.028

## New single-trip staged fracturing technology with packer isolation in horizontal wells

CHAI Guo-xing, LIU Song, WANG Hui-li, LI Ji-zhi

(College of Electromechanical Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

**Abstract:** By analyzing the status of horizontal staged fracturing technology, a new type of single-trip staged fracturing technology with packer isolation in horizontal wells was proposed, and its string structure, process principle and innovation were given. The mechanical analysis for the string was carried out by using ABAQUS finite element analysis software. The results show that the new fracturing string can achieve fracturing process design requirements. The innovations of the new technology is to complete 2-3 layers staged fracturing in single-trip, design a packer with a long rubber to fix the string and reduce the occurrence of accidents, design anti-sand tool part to effectively prevent sand from going into tool and causing fracturing accident. With non-slip anchor tool, counter-washing wells can be realized, and the whole fracturing with simple construction can be completed in one day, which can effectively save time and operating costs.

**Key words:** oil well production; oil production equipment; fracturing; staged fracturing; horizontal well; packer isolation; finite element analysis

低渗透油气藏在世界范围内储量丰富,以胜利油田为例,至 2007 年底,低渗透油藏探明储量 7.31 亿 t,占全油区探明储量的 15.4%,年产量 338 万 t,占油田产量的 12.2%,平均采收率 18.6%。利用水平井开发低渗透油气藏已经成为油气勘探开发界的共识,20 世纪 80 年代,国内外开始研究水平井的压裂增产技术,在分段压裂施工工艺技术与井下配套工具等方面也取得了一定进展,但总体配套完善不足,与生产实际需求存在较大差距<sup>[1-14]</sup>。针对这种情况,笔者研究水平井不动管柱封隔器分段压裂

技术,以有效解决砂卡洗井、卡瓦式工具卡钻等问题。

### 1 水平井分段压裂工艺技术现状分析

国内外研究人员在水平井分段压裂方面都做了大量的研究和试验工作。国外研制出了许多相关的新技术,如 Halliburton(哈里伯顿)公司的水力喷射分段压裂技术<sup>[1-3]</sup>(国内李根生<sup>[13-14]</sup>等人也做过这方面的研究),BJ(必捷)公司的水力射孔与封隔器分段压裂技术<sup>[7]</sup>,斯伦贝谢公司的分段压裂技术

收稿日期:2010-03-20

作者简介:柴国兴(1968-),男(汉族),山东昌乐人,高级工程师,博士研究生,从事采油工程和井下工具的研究。

(其工具是美国 Packer Plus Energy Services 公司<sup>[4,6]</sup>的产品)等,这些新技术在中国地区也进行了现场试验。分析认为,这些技术也存在一些局限性和不足:斯伦贝谢公司的分段压裂技术一般只能用于裸眼井中,分段压裂完成后压裂管柱不能起出,一般只能用于气井,在油井中应用存在许多限制条件;水力喷射分段压裂技术摩擦阻力大,施工压力高,环空压裂对套管损伤大,深井应用受到一定限制。

国内也有许多关于套管完井水平井封隔器分段压裂工艺的研究和试验,例如吐哈油田李军<sup>[11]</sup>等设计的水平井机械隔离分段压力技术利用封隔器+机械桥塞的分段进行分段,需要水力锚锚定和打捞桥塞等;大庆油田的双封单卡分段压裂管柱也需要卡瓦锚定,每段压裂结束后需要上提管柱再进行上段压裂,存在作业工序相对复杂、卡瓦工具易遇卡等问题和不足<sup>[12]</sup>。

总之,对于卡瓦锚定工具+封隔器的水平井分段压裂工艺,分段越多,压裂施工中发生事故的概率越高,如封隔器密封漏失、卡瓦锚定工具不能解卡、砂堵洗井困难等,甚至造成大修事故。总体来说我国该工艺技术不完善、不配套,现场试验应用中也出现了许多技术问题,特别在水平井分段压裂工艺和井下工具等方面,与我国实际生产需求还存在较大的差距<sup>[9]</sup>。

## 2 新型水平井不动管柱封隔器分段压裂工艺管柱设计

该水平井封隔器分段压裂管柱是针对套管完井的水平井而设计的,可满足常规 13.97 cm 套管和 17.78 cm 套管工艺要求,较好解决了卡瓦锚定工具压后不能解卡和砂堵不能洗井的问题,通过投低密度球方式实现 2~3 层逐层上返压裂的目的。该工艺不需要下入水力锚等卡瓦锚定工具,压裂施工中管柱的锚定力主要由扩张式长胶筒封隔器的摩擦力提供,施工中可以进行反洗井作业。

### 2.1 工艺管柱设计

为了解决卡瓦式锚定工具在压裂施工后不易解卡的问题,设计用密封件与套管之间的静摩擦力提供管柱的锚定。刘清友<sup>[10]</sup>曾经研究分析了压缩式长胶筒封隔器胶筒在水平井酸化中起到锚定功能。为保证管柱的锚定可靠,上部增加一级 SPK344 长胶筒扩张式封隔器增加摩擦锚定。整个压裂管柱可以实现砂堵时进行反洗井作业。滑套开关通过投低密度球液压打开,压裂施工结束返排时随液体带出,也可以反洗井带出球体。

工艺管柱主要由 SPK344 扩张式封隔器、系列滑套开关、SPY341 液压封隔器等工具组成,管柱示意图见图 1。

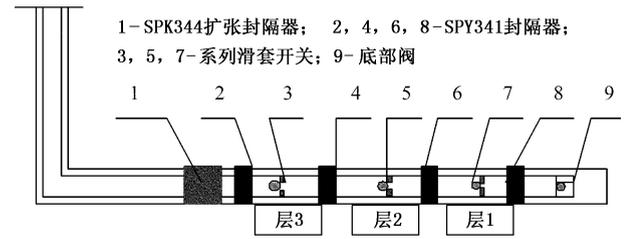


图 1 水平井封隔器分段压裂管柱

Fig. 1 Staged fracturing string with packer isolation in horizontal well

### 2.2 工艺原理

管柱下至设计位置后,装好压裂井口等装置,反洗井,正加液压使底部阀关闭。管内增压至 SPY341 封隔器坐封压力,使封隔器坐封。套管加液压,检验油套环空的密封性。

压裂施工时,开始压裂层 1。投一对应低密度球,泵送至相应滑套开关上,加液压打开滑套,即可进行层 1 段的压裂。相同步骤逐级上返直至完成全部井段。最后全井返排,带出所有球体,需要时可以反洗井。需要起出井内压裂管柱时,上提下放管柱解封封隔器,然后起出整个管柱。

## 3 新型水平井分段压裂管柱力学分析

### 3.1 压裂管柱动力学基本方程

#### 3.1.1 运动平衡方程

取杆微元受力(图 2 所示),运动状态如图 3 所示。其中  $F$  表示杆管柱的内力, $h$  表示单位长度上的外力, $M$  表示杆管柱的内力矩, $m$  表示单位长度杆管柱上的外力对杆管柱中心  $O_2$  的矩, $H$  表示单位长度杆管柱对井眼中心  $O_1$  的动量矩。通过受力分析,建立运动平衡方程

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial s} + h = \frac{\partial^2(A\rho r)}{\partial t^2}, \\ A = \pi(R_0^2 - R_i^2), \\ \frac{\partial M}{\partial s} + e_i \times F + m = \frac{\partial H}{\partial t}, \\ H = A\rho(r-r_0) \times [\Omega \times (r-r_0) + I_0 \cdot \omega], \\ I_0 = \frac{A\rho}{2}(R_0^2 + R_i^2). \end{cases}$$

式中, $A$  为管柱的截面积,  $m^2$ ;  $\rho$  为管柱材料密度,  $kg/m^3$ ;  $t$  为时间,  $s$ ;  $\Omega$  为管柱绕井眼中心公转角速度矢量,  $rad/s$ ;  $\omega$  为管柱自转角速度矢量,  $rad/s$ ;  $I_0$

为单位长度管柱绕自身轴线的转动惯量,  $(\text{kg} \cdot \text{m}^2)/\text{m}$ ;  $R_0$  为管柱外半径,  $\text{m}$ ;  $R_i$  为管柱内半径,  $\text{m}$ ;  $e_t$  为管柱变形线切线方向的单位向量;  $r_0$  为井眼中心的矢径,  $\text{m}$ 。

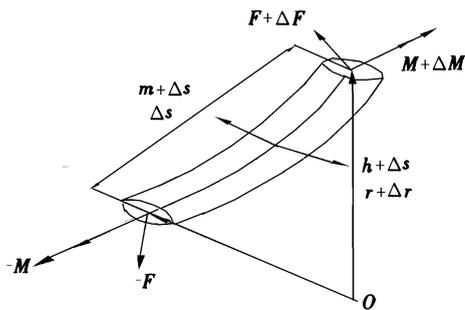


图 2 微元受力分析图

Fig. 2 Stress analysis of string infinitesimal

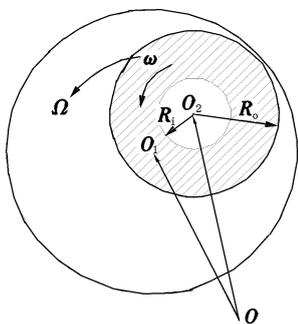


图 3 自转和公转图

Fig. 3 Schematic drawing of string moving status

### 3.1.2 本构方程

设杆管柱的抗弯刚度为  $EI$ , 抗扭刚度为  $GJ$ , 忽略剪力的影响, 则本构方程为

$$\begin{cases} \mathbf{M} = EI \left( \mathbf{e}_t \times \frac{\partial \mathbf{e}_t}{\partial s} \right) + GJ \frac{\partial \gamma}{\partial s} \mathbf{e}_t, \\ F_t = EA \left( \frac{\partial s}{\partial l} - 1 - T\varepsilon \right), \\ \mathbf{M}_t = GJ \frac{\partial \gamma}{\partial s}. \end{cases}$$

式中,  $E$  为弹性模量,  $\text{Pa}$ ;  $I$  为截面惯矩,  $\text{m}^4$ ;  $G$  为剪切弹性模量,  $\text{Pa}$ ;  $J$  为截面极惯矩,  $\text{m}^4$ ;  $\gamma$  为杆管柱的扭转角,  $\text{rad}$ ;  $F_t$  为杆管柱的轴向拉力,  $\text{N}$ ;  $T$  为温度的增量,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\varepsilon$  为线膨胀系数,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  $\mathbf{M}_t$  为杆管柱的扭矩,  $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

### 3.2 受力分析

油管柱有效轴向力主要是油管自重产生的拉力、浮力、摩擦力、摩擦阻力、弯矩和完井后井内温度、压力变化产生的附加轴向力以及封隔器引起的压缩力等的综合轴向力。

图 4 所示为水平井井眼轨迹垂直剖面图。  $H_k$  为造斜点深,  $H_v$  为垂深, 入靶点 ( $D$ ) 处水平位移为  $L_1$ ,

靶体  $DE$  段长度为  $L_2$ , 整个油气井 (井眼) 斜深为  $L$ 。

$$W = Lq_s, T_h = W_s.$$

式中,  $W$  为整个油管在空气中的自重,  $\text{N}$ ;  $T_h$  为井口拉力,  $\text{N}$ ;  $q_s$  为油管线重,  $\text{N}/\text{m}$ ;  $W_s$  为整个管柱在井内的重力,  $\text{N}$ 。

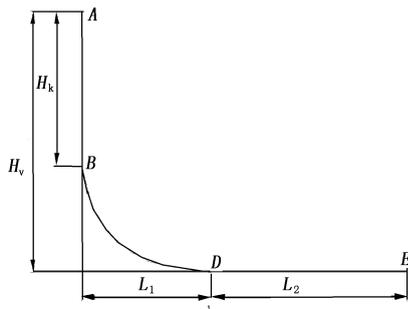


图 4 水平井井眼轨迹垂直剖面图

Fig. 4 Well track vertical section of horizontal well

水平井中, 油管柱在水平段产生的垂向拉力为零, 造斜段产生的垂向拉力也小于造斜段油管的总重力。在造斜段  $BDE$  曲线上任意取一微小段  $\Delta L_i$ , 其重力为  $W_i$ , 则沿轨迹线的轴向拉力为  $T_i$ , 与井壁法向正压力为  $N_i$ , 井斜角为  $\alpha_i$ 。图 5 是其力学模型, 有

$$T_i = W_i \cos \alpha_i, N_i = W_i \sin \alpha_i.$$

则

$$T_B = \sum_{i=1}^n W_i \cos \alpha_i = \int_{BED} q_s \cos \alpha_i dl,$$

$$T_A = q_s \left( H_k + \int_{BDE} \cos \alpha_i dl \right).$$

式中,  $T_B$  为  $B$  点油管的轴向拉力,  $\text{N}$ ;  $T_A$  为井口  $A$  点油管在空气中的实际拉力,  $\text{N}$ 。

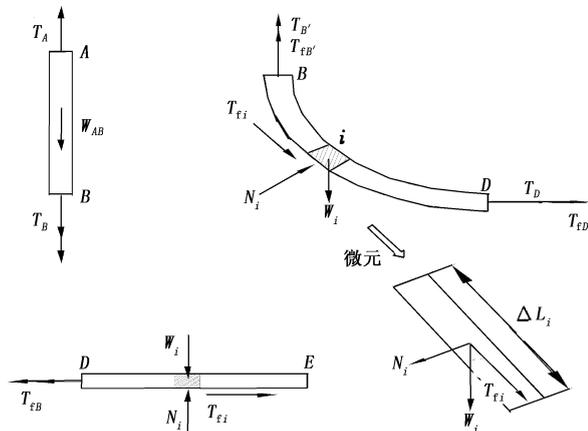


图 5 水平井压裂管柱力学模型

Fig. 5 Mechanical model of horizontal well fracturing string

### 3.3 水平井分段压裂管柱有限元力学分析

利用有限元软件 ABAQUS 对管柱力学模型进行

有限元分析,采用轴对称模型对其简化,建立的管柱模型及网格划分如图6所示。胶筒材料为橡胶,材料常数  $C_{10}=1.87\text{ MPa}$ ,  $C_{01}=0.47\text{ MPa}$ ;其余材料定义为钢,其弹性模量  $E=206\text{ GPa}$ ,泊松比  $\mu=0.3$ ;网格划分中心管、套管和护套采用 CAX4R 单元,胶筒采用 CAX4RH 单元划分;定义中心管与压缩式封隔器的护套摩擦系数为 0.1,其他接触摩擦系数定义为 0.3;扩张式封隔器的护套与中心管定义为绑定约束,护套与长胶筒的顶部和底部也定义为绑定约束。

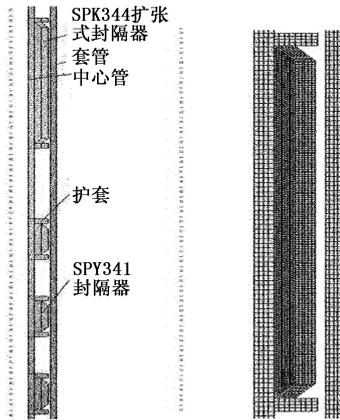


图6 模型装配图(左)及网格划分(右)

Fig.6 Assembly drawing of model and grid map of seal rubber

管柱力学分析分两步进行,加载方式为先在长胶筒的内部逐渐施加 30 ~ 50 MPa 的内压力,使扩张式长胶筒与套管接触密封,管柱锚定套管不动。胶筒与套管的接触应力值如图7所示,最大接触压力为 33.3 MPa。然后对管柱进行加载,包括管柱的内部压力和管外压力,以及封隔器对管柱的摩擦力,封隔器附近中心管的应力值如图8所示。

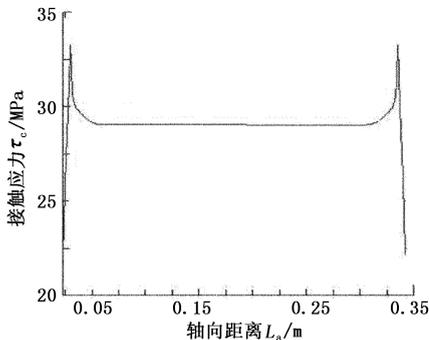


图7 长胶筒接触应力曲线

Fig.7 Contact stress curve of long rubber

从图8 应力曲线可以看出,中心管在与封隔器接触处的应力值最大,中心管的最大应力值为 168.2 MPa,发生在封隔器与中心管的结合处。压裂施工时该部位最容易被拉断,因此在工具设计时对

该类部件选取高强度材料(选用 35CrMo 材料),增加抗拉强度。

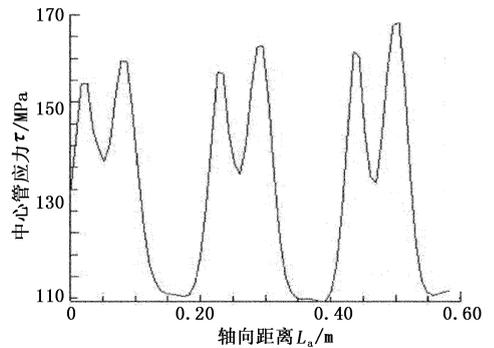


图8 中心管处应力曲线

Fig.8 Stress curve of central tube

## 4 创新点与优点

### 4.1 创新点

(1)工艺管柱的无卡瓦锚定设计,设计封隔器长胶筒摩擦锚定,降低了安全事故的发生,可有效避免卡瓦式锚定工具卡钻的问题。

(2)密封胶筒内加入了特殊材料,增强密封耐压性能和抗疲劳破坏性能。

(3)设计工具挡砂传液机构,有效避免了工具内腔进砂引起的事故。

(4)综合应用不动管柱+分段压裂+可洗井等技术。

### 4.2 技术优点

(1)可以在不动管柱的情况下,实现水平井 2 ~ 3 段的分段压裂;可以对水平井的长井段进行均匀布酸和有效的措施改造,大大提高水平井的压裂措施效益。

(2)一般情况,整个压裂施工可以在 1 d 内完成,节省了泵注时间和费用,加快了返排时间,降低了残酸或压裂液对油层的污染伤害,有利于保护油气层。

(3)管柱具有反洗井功能,砂卡时可以进行反洗井作业。

## 5 结束语

力学分析证明该新型水平井封隔器分段压裂工艺管柱达到设计要求,其中心管在与封隔器接触处的应力值最大,是应力破坏薄弱处,设计时进行了充分考虑。该技术提高了我国套管完井水平井分段压裂的工艺技术水平 and 配套工具水平,具有良好的推广应用前景。

## 参考文献:

- [1] SURJAATMADJA J B, GRUNDMANN S R, MCDANIEL B, et al. Hydrjet fracturing: an effective method for placing many fractures in openhole horizontal wells [R]. SPE 48856,1998.
- [2] EAST Loyd, WILLETT Ron, SURJAATMADJA Jim, et al. Application of new fracturing technique improves stimulation success for openhole horizontal completions [R]. SPE 86480,2004.
- [3] MCDANIEL B W, SURJAATMADJA JimB. Hydrjetting applications in horizontal completions to improve hydraulic fracturing stimulations and improve ROI [R]. SPE 125944,2009.
- [4] SEALE R, ATHANS J, THEMIG D. An effective horizontal well completion and stimulation system [R]. SPE 101230,2006.
- [5] LOHOEFER D, ATHANS J, SEALE R. New barneff shale horizontal completion lower's cost and improve's efficiency [R]. SPE 103046,2006.
- [6] CASERO Alberto, PACE Giamberardino, MALONE Brad, et al. Continuous pumping, multistage, hydraulic fracturing in Kitina Field Offshore Congo, West Africa [R]. SPE 112442,2008.
- [7] HARIS Rob, LAUN Lyle. Improvements in multistage fracturing of horizontal wells using a newly Introduced single trip coiled tubing conveyed annular perforating and fracturing tool-benefits, savings and case histories [R]. SPE 127738, 2010.
- [8] SMITH Don, STARR Phillip. Method to pump bridge/frac plugs at reduced fluid rate [R]. SPE 112377,2008.
- [9] 李宗田. 水平井压裂技术与进展 [M]. 北京: 中国石化出版社,2010:1-138.
- [10] 刘清友,代娟,韩传军,等. 长胶筒在水平井酸化管柱中的可行性分析 [J]. 石油机械,2008,36(6):65-68. LIU Qing-you, DAI Juan, HAN Chuan-jun, et al. Feasibility analysis of long rubber band in the horizontal well acidizing string [J]. China Petroleum Machinery, 2008,36(6):65-68.
- [11] 李军,崔彦立,巩小雄,等. 水平井机械隔离分段压裂技术研究与实践 [J]. 吐哈油气,2008,13(1):45-48. LI Jun, CUI Yan-li, GONG Xiao-xiong, et al. Mechanical isolation sub-horizontal fracturing technology research and practice [J]. Tuha Petroleum, 2008,13(1):45-48.
- [12] 王凤山,张书进,王文军,等. 大庆油田低渗透水平井压裂改造技术新进展 [J]. 大庆石油地质与开发,2009,28(5):234-238. WANG Feng-shan, ZHANG Shu-jin, WANG Wen-jun, et al. New development of horizontal well fracturing stimulation technologies for low-permeability reservoirs in Daqing [J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2009,28(5):234-238.
- [13] 李根生,刘丽,黄中伟,等. 水力射孔对地层破裂压力的影响研究 [J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2006,30(5):42-45. LI Gen-sheng, LIU Li, HUANG Zhong-wei, et al. Study of effect of hydraulic perforating on formation fracturing pressure [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006,30(5):42-45.
- [14] 张毅,李根生,熊伟,等. 高压水射流深穿透射孔增产机理研究 [J]. 石油大学学报:自然科学版,2004,28(2):38-41. ZHANG Yi, LI Gen-sheng, XIONG Wei, et al. Stimulation mechanism of oil well using high-pressure water jet deep-penetrating perforation technique [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2004,28(2):38-41.
- [15] 万邦烈. 采油机械的设计计算 [M]. 北京:石油工业出版社,1988. (编辑 修荣荣)

(上接第140页)

- [3] 牛贵锋,艾志久,刘春全,等. 油水旋流分离器流动机理和分离性能研究 [J]. 石油矿场机械,2007,36(9):13-17. NIU Gui-feng, AI Zhi-jiu, LIU Chun-quan, et al. Study on flow mechanism and separation performance of oil-water separation hydrocyclone [J]. Oil Field Equipment, 2007,36(9):13-17.
- [4] 王福军. 计算流体动力学分析 [M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [5] 王瑞金,张凯,王刚. Fluent 技术基础与应用实例 [M]. 北京:清华大学出版社,2007.
- [6] SLACK M, COKLJAT D, VASQUEZ S A. Reynolds—stress model for Eulerian multiphase: Proc 4th Int Symp on Turbulence Heat and Mass Transfer [C]. Begell House Inc, 2003:1047-1054.
- [7] 贺杰,蒋明虎,宋华. 新型油水分离装置——水力旋流器试验 [J]. 石油机械,1993,21(12):26-29. HE Jie, JIANG Ming-hu, SONG Hua. Experiments of a new type of oil-water separation device—hydrocyclone [J]. China Petroleum Machinery, 1993,21(12):26-29. (编辑 沈玉英)