

# 五级分支井井眼连接总成设计及有限元分析

于文涛<sup>1,2</sup>, 张辉<sup>2</sup>, 孙振刚<sup>2</sup>, 聂云飞<sup>2</sup>

(1. 长江大学地球科学学院, 湖北荆州 434023; 2. 中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院, 山东东营 257017)

**摘要:**在不稳定地层中,分支井眼连接处易发生变形破坏,为此,设计了一个分支井眼连接总成,包括2个预制的部件,模板和连接器。它们通过一个梯形导轨啮合在一起后形成一个连续的整体机械结构,配合的间隙和公差满足连接器液力密封的要求。利用有限元数值模拟对该连接总成进行了3种地层压力下的位移和内部应力分析,结果表明其变形量非常小,内部所能达到的最大应力小于N80钢的屈服强度,表明该连接总成具有较强的抗地层挤压的能力。

**关键词:**五级分支井;井眼连接总成;结构设计;有限元分析

中图分类号:P634.7;TE243 文献标识码:A 文章编号:1672-7428(2015)02-0033-04

**Design of Connection Assembly of Level 5 Multilateral Wells and the Finite Element Analysis**/YU Wen-tao<sup>1,2</sup>, ZHANG Hui<sup>2</sup>, SUN Zhen-gang<sup>2</sup>, NIE Yun-fei<sup>2</sup> (1. School of Earth Sciences, Yangtze University, Jingzhou Hubei 434023, China; 2. Shengli Drilling Technology Research Institute of SINOPEC, Dongying Shandong 257017, China)

**Abstract:** Deformation failures occur easily at multilateral wells connector in unstable formations. Therefore, a multilateral connection assembly is designed with 2 main prefabricated units, a template and a connector. These parts form a whole continuous mechanical structure after being locked by a tongue-in-groove trapezoidal rail. The designed gap and tolerance of this match satisfy the requirement for hydraulic seal of the connector. The analysis is processed on displacement and internal stress of the connection assembly under 3 separate formation pressures by using finite element numerical simulation. The results show that the deformation is very small and the maximum internal stress is less than the yield stress of N80 steel, which indicates that the connection assembly has a strong resistance to geo-mechanical forces.

**Key words:** level 5 multilateral wells; wells connection assembly; structure design; finite element analysis

## 1 概述

五级分支井能够实现分支井眼与主井眼连接处的完整机械支撑和整体液力密封,并具备完井后分支井眼的选择性再进入功能<sup>[1-2]</sup>,因此具有广泛的适用范围和广阔的推广应用前景。针对胜利油田地层易出水、出砂的特点,中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院完成了五级分支井整体技术方案设计,其中设计的五级分支井井眼连接总成主要包括2个部件:模板和井眼连接器。模板被一个底座(锚定封隔器)支撑在窗口附近,一个井眼连接器和模板榫合在一起,它可以有效支撑轴向和径向的机械载荷,并建立起一个边界来阻止地层岩石的位移,同时具备液力密封和分支井眼再进入功能。对该井眼连接总成进行有限元分析的结果表明:研制的五级分支井井眼连接总成具有较高的抗地层挤压能力。

## 2 设计总体技术路线

考虑到在较大直径套管中开窗侧钻、进行后续

施工和处理复杂事故相对比较容易,因此在可能的情况下,应尽量钻较大尺寸的分支井眼<sup>[3-5]</sup>。基于这些考虑,设计的工具尺寸及试验井均采用了钻 $\varnothing 311$  mm主井眼,而后在 $\varnothing 244.5$  mm技术套管内定向开窗侧钻 $\varnothing 216$  mm分支井眼。

分支井井眼连接总成的井眼连通性是通过磨铣或预加工实现的。不稳定地层处分支井井眼连接总成存在着受地层挤压变形的危险。 $\varnothing 244.5$  mm套管磨铣窗口约4.27 m,针对 $\varnothing 215.9$  mm磨铣工具磨出的窗口进行了分支井眼连接总成的设计。预先在窗口中放置一个连接器,然后倾斜着和主井眼的模板紧密配合,最终连接器投影面积约 $6.45 \times 10^5$  mm<sup>2</sup>。

连通性是决定分支井眼连接的长期完整性的一个至关重要的特性。为了保证五级分支井眼连接总成能够实现其3项技术特性:机械支撑完整性、液力密封性、分支井眼选择性再进入功能,在进行设计时要遵循以下要求:

(1) 井眼连接总成能承受底层载荷的抗挤压能

收稿日期:2014-05-20; 修回日期:2014-12-08

作者简介:于文涛,男,汉族,1981年生,工程硕士在读,从事钻井工具研发及现场技术服务工作,山东省东营市北一路827号胜利石油工程公司钻井院,yuwentao623.slyt@sinopec.com。

力;(2)从尾管传递到连接处的拉、压载荷在规定范围内不应影响井眼连接总成的几何形状和完整性;(3)井眼连接总成所能隔离的地层颗粒的尺寸;(4)在满足强度的前提下,通过主井眼和分支井眼进行后期采油、注水作业时,最大通径越大越好;(5)分支井眼连接总成的施工步骤应该是可逆的(即可回收的),以减少现场施工的风险;(6)要尽量减少分支井眼连接总成井下施工时的下钻次数,降低施工风险;(7)完井后,分支井眼连接总成能够实现主井眼和分支井眼的分采或合采,实现井下流体的测量和控制;(8)完井后,能够实现油管再进入侧向分支井眼;(9)从技术上能够实现一个主井眼里有多个或层叠的分支井眼连接。

### 3 分支井眼连接总成结构设计及特点

五级分支井眼连接总成结构(见图1)设计思路是在主套管窗口位置预先安装一层管柱,该管柱上与主套管窗口对应的一侧具有一个预加工好的通道即模板,它的径向开口与套管窗口是完全对齐的。模板是在上分支井眼完井后下入的,因此需要足够开口直径以满足最大外径完井管柱通过。

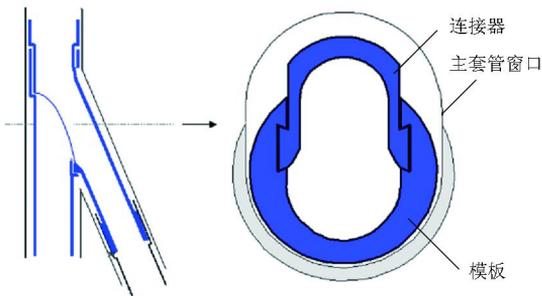


图1 井眼总成结构示意图

分支井眼连接总成由模板和连接器组成,通过突起-沟槽形式的导轨进行连接,连接器上带有密封圈能够实现窗口的液力封隔,导轨的连接也为窗口处提供了机械支撑,使窗口处能够承受较大的地层载荷。

分支井眼连接总成最后下入,在进入分支井眼时能够楔入模板,把分支井眼和主井眼以密封的方式连接起来。模板和连接器的互锁部件是一个突起-沟槽的榫合形式的梯形轨道,通过一个简单的轴向移动实现两者的啮合。一旦分支井眼连接总成在井下组装起来,模板和连接器作为一个连续的整体机械结构,有着较高的承受井下可能负荷的能力

(见图2)。此外,连接器的轨道和模板沟槽的配合作为一种机械结构是很容易实现的,且配合间隙和公差能够满足窗口连接处液力密封的要求。

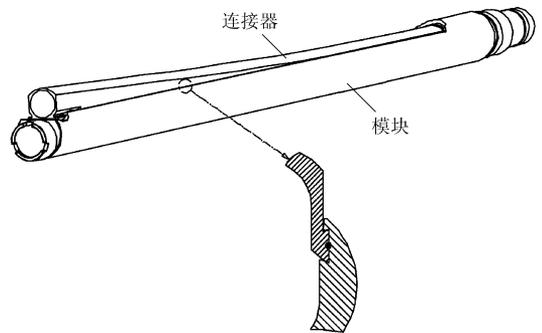


图2 模板与连接器及梯形轨道榫合的结构图

连接器下部与延伸短节相连接,延伸短节的末端有一个密封总成,能够插入分支井眼完井管柱的内抛光回接筒上端。保证了在主井眼套管周围地层产生大位移时,有一个轴向安装余量。

### 4 分支井眼连接总成安装步骤设计

从最大限度的减少现场施工风险的目的出发,分支井眼连接总成的下入模板和连接器的施工步骤是完全可逆的过程,即下入的工具是可回收的。在施工过程中万一出现任何问题,可以通过可逆的施工步骤来解决问题。井眼连接总成的安装步骤如下。

(1)用一个带有可以打通隔离装置的锚定悬挂封隔器将下部分支井眼或已经完井的主井眼下部与上部隔离开。

(2)用可回收的斜向器开窗系统在主井眼套管上磨铣窗口,或者下入一个预磨铣过的窗口,用常规钻井组合钻分支井眼,以主井眼套管的内径作为直径方面的限制。

(3)如果分支井眼采用水泥固井或者砾石填充来完井,则需要将侧钻开窗用的斜向器起出,换用更小直径的斜向器来替代。

(4)下入分支井完井管柱组合,并放置在相对竖直的井的底部,或推入大斜度井的裸眼段。分支井完井管柱的顶端装有一个回接主井眼用的内抛光回接筒,放置在靠近磨铣窗口的位置。这个完井管柱可能包含一个水泥胶结段,管外封隔器或者裸眼砾石充填段。

(5)回收用过的斜向器,然后进行分支井的完井施工。下入模板与主井眼锚定封隔器连接,在这

个施工过程中,模板开口必须在轴向和径向上与磨铣的套管窗口对齐。

(6)在完成模板与连接器的轨道榫合之前,需要将下部的连接器延伸短节和回接密封总成插入已经丢在分支井井眼里的内抛光回接筒内。

(7)模板与连接器的轨道榫合是否成功是通过对两个部件之间的一个剪切释放销钉进行冲击和施加拉力来检验的。

(8)下入上部完井密封总成,使之插入与连接器上部的内抛光回接筒内。

(9)导通在第一步中主井眼套管中下入的封隔装置。

(10)接下来,可以在分支井眼回接延伸短节中下入堵塞器,或者通过安装隔离套封隔分支井眼连接处的上部和下部来实现分支井眼流道的通或断控制。

(11)在分支井眼处安装连续管导向器,以便经过油管再进入分支井眼。当导向器安装后,大部分电缆和连续管组件可以进入完井的分支井眼中。导向器必须能够回收,以便再次打开主井眼来生产或者注水。

## 5 分支井眼连接总成载荷有限元分析

对于五级分支井完井技术,压力等级被作为衡量分支井眼连接总成性能的重要指标<sup>[6-7]</sup>。首先,作用在分支井眼连接处的地层载荷一般被归类为地层岩石的塑性破坏,地层载荷是均匀加载于分支井眼连接装置投影在坍塌岩石上的区域。这种载荷与分支井眼连接处密封时的所产生的载荷非常相似。其次,压力分析是对分支井眼连接装置的结构性能进行测试和分析建模的最有意义的方法。

分析中假设:在有分支井油井的区域内,地层具有较低的抗剪和抗挤压强度,或者地层应力相对较高,从而能够导致分支井眼连接处的地层不稳定。

五级分支井连接总成形状较为复杂,建立模型时进行了简化处理,取窗口位置的部分模板作为有限元模型进行计算。五级分支井连接总成模型加载过程如图 3 所示,箭头表示地层载荷。模型基本参数:公板外圆弧直径 170 mm,上端内径 126 mm,下端内径 101 mm。

五级分支井连接总成是一个对称结构,模型选用 solid45 实体单元。采用 ANSYS 进行有限元数值模拟,网格划分模型如图 4 所示。

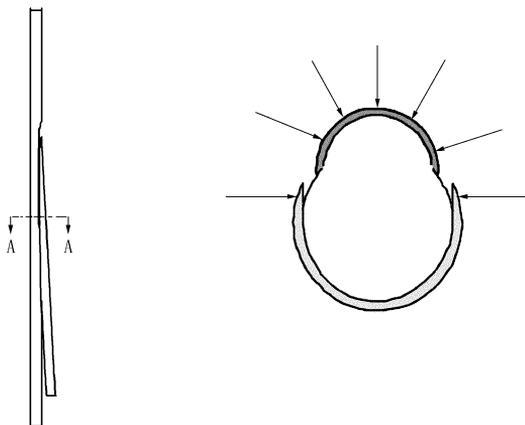


图 3 地层压力加载示意图

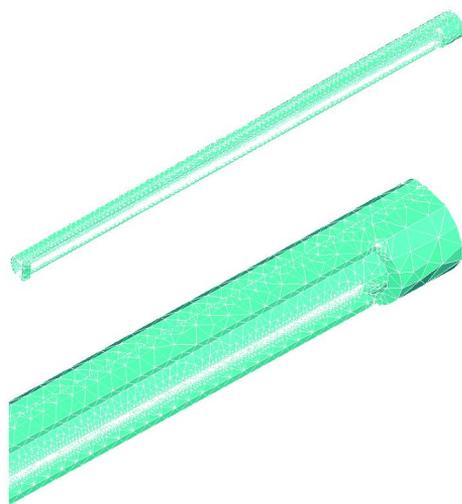


图 4 五级分支井连接总成有限元模型网格划分

钢被作为一种弹塑性材料,符合范式准则,屈服强度是 552 ~ 758 MPa,弹性模量为  $2 \times 10^{11}$  Pa,泊松比为 0.3,钢级为 N80,应力 - 应变曲线如图 5 所示。

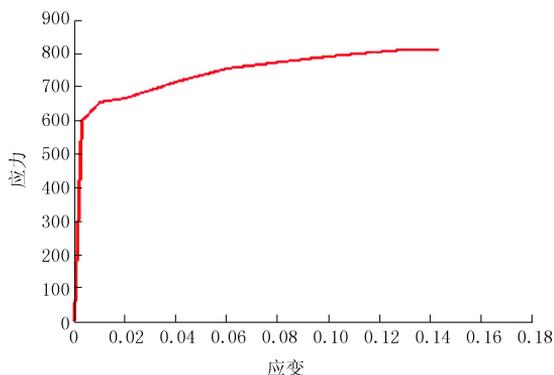


图 5 N80 钢的应力 - 应变曲线

将连接总成底部和顶部节点所有方向的位移全部约束住,对连接总成承压面节点施加面载荷<sup>[8-10]</sup>,载荷强度根据地层压力情况,选择 10、30

和 50 MPa 三个级别,可以得到如下结果。

(1) 五级分支井公板最大位移出现在承压面的中线上(图 6),在 10、30 和 50 MPa 的地层挤压力的作用下的最大位移量分别为 0.036、0.109 和 0.182 mm,基本上没有发生变形。

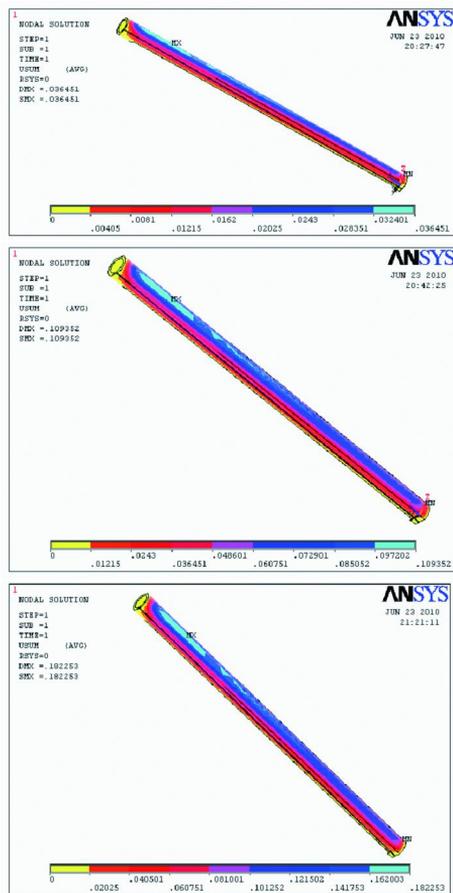


图 6 连接总成在不同地层压力下的变形

(2) 五级分支井公板 10、30 和 50 MPa 的地层挤压力作用下的最大应力分别为 89、267 和 444 MPa,最大应力均出现在公板内径两侧(图 7),并小于 N80 钢的屈服强度。

## 6 结论

(1) 设计的五级分支井眼连接总成由于导轨的支撑作用,在较高地层载荷挤压下基本不发生变形,可实现分支井眼的再进入。由于密封圈的作用,五级分支井眼回接处也具有完整的液力封隔性。

(2) 通过对分支井井眼连接总成进行有限元分析,得到了其在不同地层压力下的变形位移和内部应力,为现场应用提供了参考依据。

(3) 五级分支井连接总成加工难度大、成本

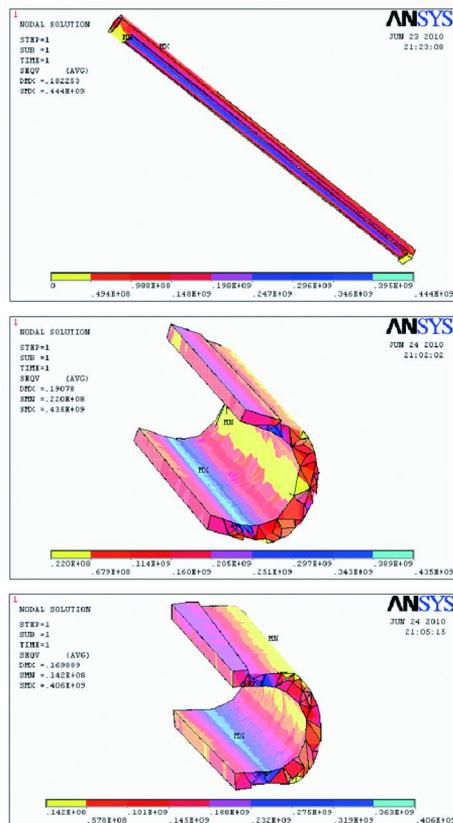


图 7 连接总成在 50 MPa 地层压力下的范式应力等值线图

较高,采用遇油遇水橡胶满足密封功能是今后该工具研究的重点方向。

## 参考文献:

- [1] 聂云飞,吴仲华,张辉,等. 五级分支井技术在河 3-支平 1 井的应用[J]. 石油钻采工艺,2012,34(2):13-16.
- [2] 蒋祖军. 国内第一口 TAML 五级双分支井完井技术[J]. 石油钻采工艺,2004,26(2):5-7.
- [3] 张桂林. 胜利油田水平井钻井技术现状与发展趋势[J]. 石油钻探技术,2005,33(2):66-67.
- [4] 都振川. 胜利油田薄油层水平井钻井技术综述[J]. 石油钻采工艺,2003,25(3):30-33.
- [5] 赵金洲,唐志军. 分支水平井钻井技术实践[J]. 石油钻采工艺,2002,24(2):19-21.
- [6] 刘坚,李勇,马旭川. XQ90 气井分支井完井技术[J]. 钻采工艺,2003,26(5):25-27.
- [7] Herve Ohmer, Mark Brockman, Mikhail Gotlib. Multilateral Junction Connectivity Discussion and Analysis[R]. SPE 71667,2001.
- [8] 付胜利,高德利. 可膨胀管膨胀过程三维有限元数值模拟[J]. 西安石油大学学报(自然科学版),2006,21(2):54-57.
- [9] Matt Bayfield, Simon Fisher, Lev Ring. Burst and Collapse of a Sealed Multilateral Junction; Numerical Simulations[R]. SPE/IADC 52873,1999.
- [10] 吴仲华,田家林,梁政,等. 分支井井眼连接总成预成形过程仿真分析[J]. 石油矿场机械,2009,38(1):23-27.