

海上油田负压作业有效负压值分析与管柱优化探讨

武广竣

(中海油研究总院有限责任公司;海洋石油高效开发国家重点实验室,北京 100028)

摘要:中国海上油田常采用负压射孔或平衡射孔负压返涌技术,以降低射孔作业对储层的污染问题,但当前作业并未考虑管柱结构对实际有效负压值的影响,且作业中有时会因井下工具原因导致复杂事故。在常用负压作业管柱结构的基础上,计算分析了RTTS封隔器位置、负压阀下入深度、钻杆套管尺寸等因素对有效负压值的影响,结果表明:若将RTTS封隔器置于井口位置,有效负压值不低于预设值的98%;在满足造负压的前提下适当提高负压阀的位置,由此对有效负压值的影响可以忽略。探究了采用环形防喷器替代RTTS封隔器、减小负压阀下深等优化方案的可行性,并针对该方案中存在的潜在风险进行了分析并提出相应解决对策。相比传统方案,改进后的负压作业管柱无RTTS封隔器,负压阀位置处井斜小,作业过程简化,有利于提高现场作业效率。

关键词:射孔;负压值;返涌;RTTS封隔器;环形防喷器;负压阀

中图分类号:TE257 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2020)06-0154-06

目前中国海上油气田常采用负压射孔或平衡射孔负压返涌技术,以尽量解除射孔作业对储层的污染问题^[1-2]。通常制造负压的方法是在负压射孔管柱/返涌管柱内替入一段空气或低密度完井液,配合管柱上的负压开孔装置及环空封隔器,实现射孔后封隔器以下管柱与环空内外连通,诱导储层流体反向冲洗射孔孔眼。

RTTS封隔器是一种全通径套管封隔器,带有胶筒、水力锚和卡瓦,可实现双向锁定,保持胶筒与套管之间的密封^[3]。由于该封隔器坐封、解封非常方便,且可多次重复使用,并能承受较大的上下压差,因此在负压射孔或负压返涌中得到了广泛的应用。但是,由于RTTS封隔器自身结构的原因,导致作业中封隔器胶筒脱落、解封困难、中心管接头断裂、附件落井等问题时有发生^[4-7],由此增加了非生产作业时间。

此外,当前业界采用的负压值设计方法多是根据渗透率、声波时差及地层出砂情况等要素来确定^[8-10],并未考虑负压作业时管柱结构对实际负压值的影响,导致实际有效负压值可能与预设值不一致,影响负压作业效果。

本文通过分析负压返涌过程中管柱与环空的变

形对负压效果的影响,讨论了简化改进负压管柱结构的可行性,对改进后的管柱结构进行了风险分析并提出解决方案,有助于提高现场作业效率。

1 常用负压作业管柱及存在问题

图1为海上常用负压作业管柱结构示意图。其中,a为投棒造负压射孔管柱,管柱下入并校深后,关闭环空防喷器,环空加压点火,射孔后快速将射孔枪起出射孔段,旋转下压坐封RTTS封隔器,井口投棒打开井下负压阀,实现负压返涌。该管柱也可在下入到位坐封隔器后,井口投棒直接打开负压阀并激发点火头,实现负压射孔作业,不过若地层较为疏松,射孔时出砂量较大,则有卡枪的风险^[11]。b为环空加压造负压射孔管柱,主要用于无法投棒的大斜度井作业。c为负压返涌管柱,用于避免b管柱作业中可能面临的环空加压导致的误操作(负压开孔装置提前打开)。

3种管柱均需采用RTTS封隔器隔离环空上下压力系统,并将负压阀置于RTTS封隔器之下,以实现储层与钻杆内低压系统的沟通。一旦RTTS封隔器出现故障,则负压射孔或负压返涌作业将无法完成,现场往往需要起出管柱重新作业,导致作业时间大大增加。

收稿日期:2020-02-24

基金项目:国家“十三五”科技重大专项(2016ZX05025-002)。

作者简介:武广竣(1984—),男,山东枣庄人,中海油研究总院有限责任公司,高级工程师,油气井工程硕士,研究方向:钻完井工程。

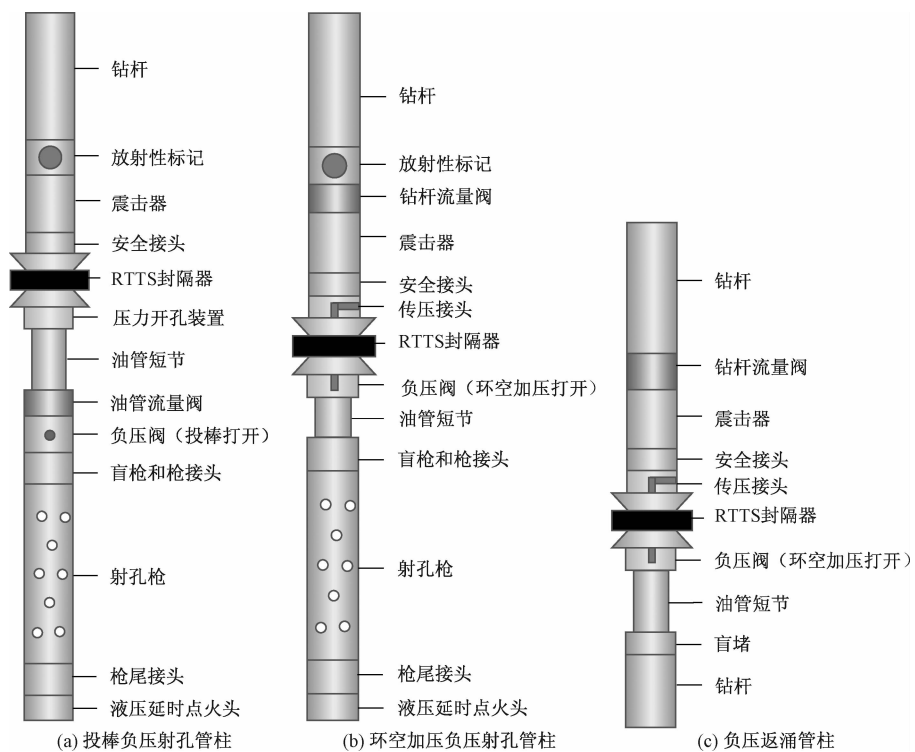


图 1 不同类型负压作业管柱

2 负压作业前后井筒压力变化

无论负压射孔还是负压返涌作业,均有一个打开负压装置释放压力的过程,本文将之统称为负压作业。图 2 为负压作业前后井筒压力变化示意图。作业前负压阀始终处于关闭状态(图 2-a),射孔管柱内空气段高度取决于预设负压值 P_n 。若作业过程中无井涌井漏事故,则 RTTS 封隔器坐封前后井底压力保持恒定(一般略大于储层压力 P_r)。负压作业阶段(图 2-b),负压阀打开,井底与管柱连通,井底压力下降为 $P_r - P_n$,在负压作用下储层流体进入井筒,管柱内液面逐渐升高,井底压力逐渐增加,压差逐渐降低,返涌速度逐渐趋缓。达到预定返涌时间或返涌量后,上提解封 RTTS,反循环洗压井。

显然,RTTS 封隔器以下的井筒区域(图 2-b 中红色粗线范围内,本文称之为有效井筒区域)在负压作业前后受力状态不同,在负压作用下此区域将有收缩量 ΔV ,由此将影响井底有效负压值的大小。缩小该区域有助于减小 ΔV ,故现场常将 RTTS 封隔器下至射孔段顶部,尽量缩小 H_{pb} 长度。

3 负压作业初期有效负压值计算

3.1 计算模型

为计算负压作业初期有效井筒容积的变化,做以下假设:

- 1)不考虑井筒内压力的传递时间。

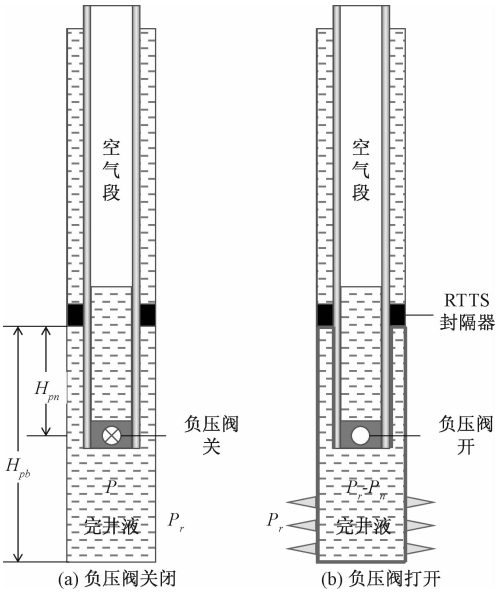


图 2 负压作业前后井筒压力变化示意图

- 2)所有工具的变形均为弹性变形。
- 3)不考虑 RTTS 封隔器及井底水泥塞的变形。
- 4)不考虑套管轴向变形。

负压作业过程中钻杆、套管受力情况如图 3 所示。

对于圆柱形空心容器,内部压力将同时作用在四周内壁和底部端面,四周内壁的压力使管柱膨胀缩短,底部端面的压力使管柱收缩伸长,计算时需综合

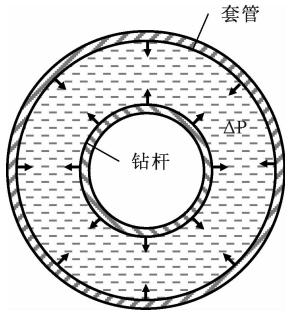


图 3 负压作业过程中钻杆、套管受力示意图

考虑。推算得到在负压作业下,有效井筒区域缩小体积如下:

$$\Delta V = \Delta V_c + \Delta V_d \quad (1)$$

根据弹性材料变形理论,可推算出套管周长变化量为:

$$\Delta L = \frac{\pi P_n D_{ci}^3}{2E(D_{co} - D_{ci})} \quad (2)$$

进而得到套管内容积减小量:

$$\Delta V_c = \left(\frac{\pi P_n D_{ci}^3}{4E(D_{co} - D_{ci})} + \frac{\pi P_n^2 D_{ci}^4}{16E^2(D_{co} - D_{ci})^2} \right) L_c \quad (3)$$

同理,得到钻杆外体积增量:

$$\Delta V_d = \left(\frac{\pi P_n D_{do}^3}{4E(D_{do} - D_{di})} - \frac{\pi P_n^2 D_{do}^4}{16E^2(D_{do} - D_{di})^2} \right) L_d \quad (4)$$

由于有效井筒区域体积变化导致钻杆内液柱高度变化情况为:

$$\Delta H = \frac{\Delta V}{\frac{\pi}{4} D_{di}^2} \cos \theta \quad (5)$$

由于有效井筒区域体积变化导致有效负压降低值 ΔP 为:

$$\Delta P = \rho g \Delta H \quad (6)$$

$$\text{有效负压值 } P'_n \text{ 为: } P'_n = P_n - \Delta P \quad (7)$$

式(1)~(7)中, ΔV_c 为套管内容积减小量, m^3 ; ΔV_d 为钻杆外体积增量, m^3 ; D_{ci} 为套管内径, m ; D_{co} 为套管外径, m ; D_{di} 为钻杆内径, m ; D_{do} 为钻杆外径, m ; P_n 为预设负压值, Pa ; E 为弹性模量, Pa ; L_c 为封隔器以下非固井段套管长度, m ; L_d 为封隔器至负压阀之间钻杆长度, m ; ϵ 为泊松比; θ 为井斜角, $^\circ$; ρ 为完井液密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

3.2 算例

考虑到负压作业初始时刻 T 对应的负压值最大且直接影响整个负压作业的效果,本文针对此时刻的状态进行具体计算分析。

取负压值为 10 MPa, 9-5/8" 生产套管, 5-1/2" 钻

杆, 负压阀距井底 100 m, 钢材弹性模量 2.06×10^{11} Pa, 泊松比 0.31, 完井液密度 $1.05 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 造斜点位于垂深 400 m 处。

取套管内径 0.226 6 m, 钻杆内径 0.121 4 m, 计算不同预设负压值条件下有效负压降低值 ΔP 如图 4 所示。 ΔP 与预设负压值大小呈线性正相关, 有效井筒区域内套管和钻杆长度越大, ΔP 随预设负压值的变化就越迅速, 比例系数就越大。以 RTTS 封隔器以下套管长度为 150 m、钻杆为 50 m、预设负压值为 10 MPa 的井为例, 负压作业初期有效负压降低值为 0.004 MPa (0.04%)。而当其他条件不变, 套管及钻杆长度分别增加至 5 000 m 和 4 500 m 时, ΔP 将增加至 0.133 MPa (1.33%)。可以认为该工况下 RTTS 封隔器位于井口位置, 且井深处于相对极限工况, 此时有效负压降低值最大, 有效负压值为预设负压值的 98.67%。

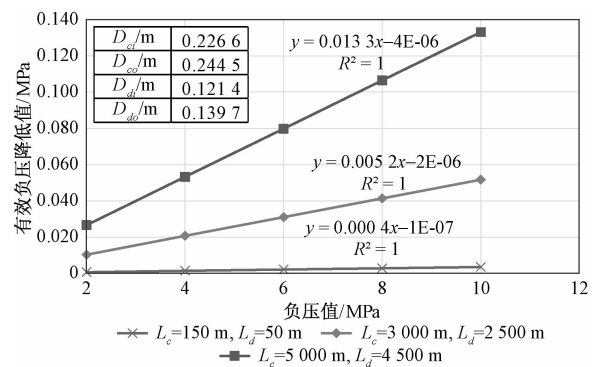


图 4 预设负压值对有效负压降低值的影响

计算不同尺寸钻杆条件下 ΔP 如图 5 所示。可以看出, 钻杆外径越大, ΔP 越小, 同样钻杆外径条件下, 钻杆内径越大, ΔP 越小, ΔP 与钻杆内径呈二次负相关。虽然钻杆内径增大导致在同样负压条件下钻杆的形变会增大 (增大 ΔV_d), 但内径增加的同时也导致了钻杆内横截面积增大 (减小 ΔH), 根据计算结果, 显然钻杆内横截面积的影响更大。

计算不同尺寸套管条件下 ΔP 如图 6 所示。可以看出, 套管内径越大, ΔP 越大, 两者呈二次方正相关。这是由于套管内径增大导致在同样负压条件下套管的形变会增大 (增大 ΔV_c), 增加了有效井筒区域的总体积变化量 ΔV 。

取负压值为 10 MPa, 其他参数不变, 计算封隔器距井底距离 H_{pb} 不同条件下 ΔP 如图 7 所示。可以看出, ΔP 与 H_{pb} 呈线性正相关, 封隔器距井底距离越远, ΔP 越大。

取封隔器距井底距离为 3 000 m, 其他参数不

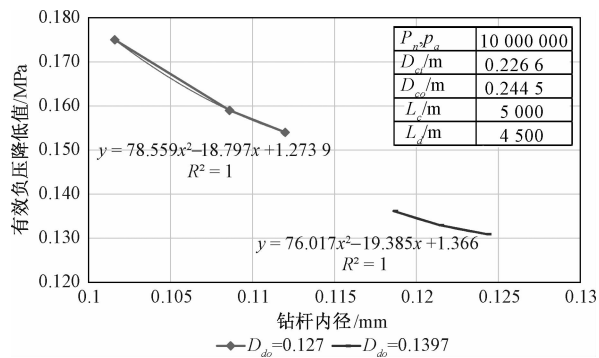


图5 钻杆尺寸对有效负压降低值的影响

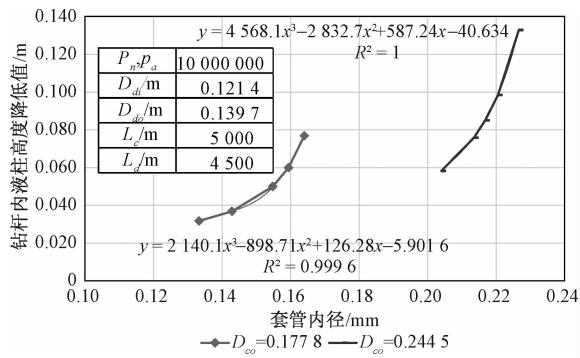


图6 生产套管尺寸对有效负压降低值的影响

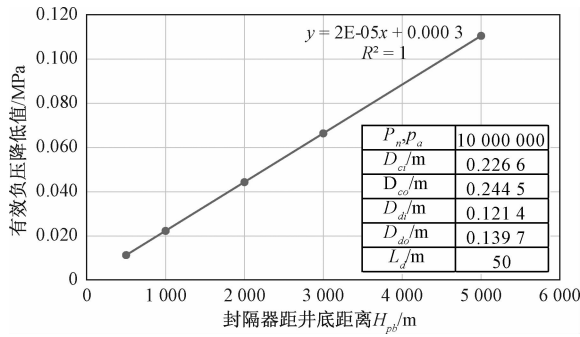


图7 封隔器距井底距离对有效负压降低值的影响

变,计算封隔器距负压阀距离 H_{pn} 不同条件下 ΔP 如图8所示。可以看出, ΔP 与 H_{pn} 呈线性正相关,同样条件下封隔器距负压阀距离越远, ΔP 越大。不过, H_{pn} 的影响力相对较小,其他因素不变的条件下, H_{pn} 由50 m增加至5 000 m, ΔP 由0.066 MPa增加至0.091 MPa,比例系数仅为 5.0×10^{-6} 。

3.3 小结

通过以上分析得出结论如下:

- 1)若将 RTTS 封隔器置于井口位置,则有效负压值较预设值最高降幅为1.33%。
- 2)封隔器以下钻杆内径越大,有效负压降低值越小,两者呈二次负相关。
- 3)封隔器以下套管内径越大,有效负压降低值越

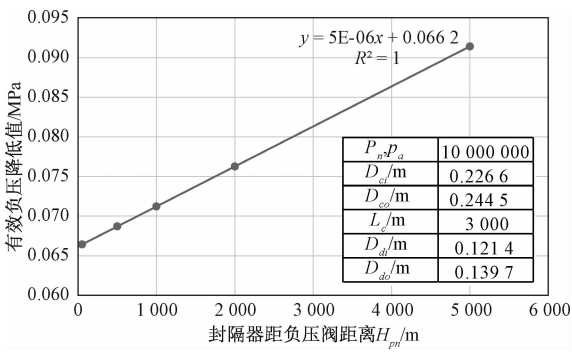


图8 封隔器距负压阀距离对有效负压降低值的影响

大,两者呈二次正相关。

4)封隔器距井底越远,有效负压降低值越大,两者呈线性正相关。

5)封隔器距负压阀的距离会影响有效负压降低值,但作用有限。

4 负压作业管柱结构优化探讨

从现场作业角度及负压值计算方法上来讲,1.33%的负压值降幅可以接受。此外,在满足负压值的前提下,负压阀的下入深度对有效负压值的影响也可以忽略不计。因此,建议考虑取消当前负压作业管柱上的 RTTS 封隔器,改用环形防喷器实现原目的功能,同时在满足循环压井的前提下适当提高负压阀的位置,降低其对应的井斜。改进后的管柱示意图如图9所示。

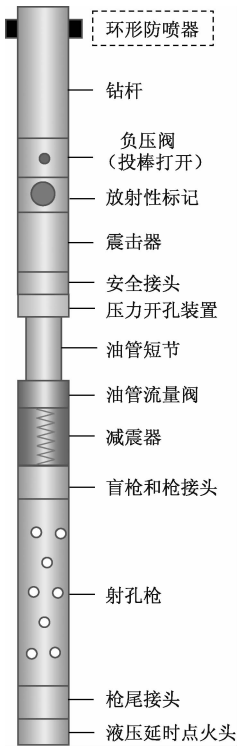


图9 改进后的负压作业管柱

改进后的管柱具有以下优点：

- 1)无 RTTS 封隔器,避免了相关的连接、入井及操作需求。
- 2)适当提高负压阀位置以使其对应的井斜处于常规范围,可采用投棒方式打开,避免了大斜度井环

- 空加压操作及加压开孔工具的使用及潜在风险。
- 3)管柱整体结构简单,作业过程简化,复杂事故率降低。
- 常规定向井和大斜度定向井管柱优化前后作业程序对比及效果分析见表 1 和表 2。

表 1 管柱优化前后作业程序对比(常规定向井)

优化前	优化后	效果分析
连接并下入射孔管柱	按顺序连接并下入射孔管柱	/
连接 RTTS 封隔器	/	节省连接 RTTS 封隔器的时间
下钻,校深,配长,调整管柱至射孔位置	下钻,校深,配长,调整管柱至射孔位置	/
环空加压点火	环空加压点火	/
快速起钻,将射孔枪起出射孔段	快速起钻,将射孔枪起出射孔段	/
坐 RTTS 封隔器,关环形防喷器	关环形防喷器	节省坐封 RTTS 封隔器的时间及潜在风险
投棒打开负压阀,放喷	投棒打开负压阀,放喷	/
上提解封 RTTS 封隔器	/	避免解封 RTTS 封隔器的潜在风险
反循环洗井	反循环洗井	/
甩射孔枪,检查发射率	甩射孔枪,检查发射率	/

表 2 管柱优化前后作业程序对比(大斜度定向井)

优化前	优化后	效果分析
连接并下入射孔管柱	连接并下入射孔管柱	/
下钻,校深,配长,调整管柱至射孔位置	下钻,校深,配长,调整管柱至射孔位置	/
环空加压点火	环空加压点火	/
快速起钻,将射孔枪起出射孔段	快速起钻,将射孔枪起出射孔段	/
反循环洗井	/	优化后,负压阀处井斜满足投棒要求,可实现一趟管柱完成射孔+负压返涌作业。相比优化前,节省一趟起下钻作业,并避免了坐封、解封 RTTS 封隔器的时间及潜在风险
甩射孔枪,检查发射率	/	
下入负压返涌管柱至目的深度	/	
坐 RTTS 封隔器	关环形防喷器	/
环空加压打开负压开孔装置,放喷	投棒打开负压阀,放喷	
上提解封 RTTS 封隔器	/	
反循环洗井	反循环洗井	/
甩负压返涌管柱	甩射孔枪,检查发射率	/

需要注意的是,改进后的管柱没有锚定结构,轴向承载能力将会有所降低,因此必须确保管柱重量超过作业期间最大可能上推力,同时在管柱上配备相应的减震工具。不同钻杆外径及预设负压值条件下,管柱最大上推力如图 10 所示。

5 结论与建议

本文围绕当前海上常用负压作业管柱的结构及功能开展分析,并探讨了优化的可能,得到结论及建议如下：

- 1)有效负压值受封隔器距井底和负压阀的距离、钻杆尺寸及长度、套管尺寸及长度等多个因素的影响。
- 2)用环形防喷器实现 RTTS 封隔器的功能是可行的,有效负压值的降幅可以忽略不计。

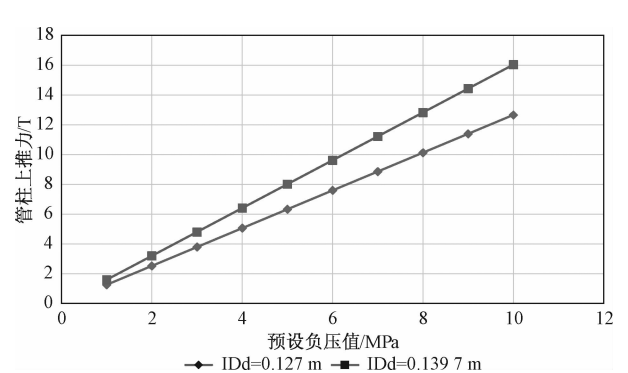


图 10 管柱承受的最大上推力与管柱外径和负压值的关系

- 3)在满足造负压的前提下适当提高负压阀的位置,由此对有效负压值的影响可以忽略。

4)改进后的负压作业管柱无 RTTS 封隔器, 负压阀位置处井斜小, 作业过程简化, 有利于提高现场作业效率。

参考文献

- [1] 孙连伟, 王平双, 武广媛, 等. 适合海上疏松砂岩油藏的射孔负压值设计方法[J]. 断块油气田, 2016, 23(6): 846—850.
- [2] 李安豪, 张俊斌, 段永刚, 等. 近平衡正压射孔与负压返涌联作技术在海上油田的应用[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(17): 137—140.
- [3] 江汉石油管理局采油工艺研究所. 封隔器理论基础与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1983.
- [4] 冯彬, 卫骏, 闫磊. 海上某井 RTTS 封隔器附件落井打捞实践[J]. 内蒙古石油化工, 2017, 43(6): 76—78.
- [5] 江武, 王开伟, 王爱华. RTTS 封隔器的应用问题探讨[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2013, 33(21): 90.
- [6] 刘箬霖, 李玉民, 张金源. RTTS 封隔器中心管外螺纹接头断裂分析[J]. 理化检验: 物理分册, 2012, 48(5): 337—341.
- [7] 邵想全, 莫尚贤, 陈忠, 等. RTTS 封隔器解卡方法探讨[J]. 油气井测试, 2008(5): 50—51, 53, 77.
- [8] 徐睿. 射孔负压优化设计研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2014.
- [9] 许彬, 熊友明, 张自印, 等. 负压射孔参数优化设计[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2010, 12(3): 67—69.
- [10] 李拥军, 黄继红, 刘健, 等. 一种新的射孔负压设计方法[J]. 石油钻采工艺, 2010, 32(2): 118—121.
- [11] 高旭升. 典型试油井下事故处理[J]. 油气井测试, 2015, 24(6): 49—51, 54, 75.

Analysis of Effective Negative Pressure and Discussion of String Optimization in Offshore Oilfield

WU Guang-ai

(CNOOC Research Institute Co., Ltd; State Key Laboratory of Offshore Oil Exploitation, Beijing 100028, China)

Abstract: In offshore oil field in China, negative pressure perforating or balanced perforating with negative pressure flowback technology is often adopted to reduce the pollution of reservoir during perforating operations. However, the influence of string structure on actual effective negative pressure value is not considered in current operations, and sometimes complicated accidents may be caused by downhole tools during operations. Based on the commonly used negative pressure string structure, this paper calculated and analyzed the influence of RTTS packer position, negative pressure valve depth, drill pipe casing size and other factors on effective negative pressure value. On the premise of meeting the requirements of negative pressure, raising the position of the negative pressure valve moderately has little effect on the effective negative pressure value. The feasibility of using annular blowout preventer instead of RTTS packer and reducing the depth of negative pressure valve was researched. Compared with the traditional scheme, the improved negative pressure operating string has no RTTS packer, and the well deviation is low in negative pressure valve position, which simplifies the operation process and is conducive to improving the field operation efficiency.

Key words: perforating; negative pressure value; flow back; RTTS packer; annular blowout preventer; negative pressure valve