

油管防溢通井规的研制

马金良,王方祥,王颖,呼桂艳,范旭

中国石油集团渤海钻探工程有限公司井下技术服务分公司 天津 300283

通讯作者:Email:mjl2000_ren@163.com

项目支持:中国石油集团渤海钻探工程有限公司井下技术服务分公司技术研发项目“新型通井规的研制与现场试验”(2019JXJF-11)

引用:马金良,王方祥,王颖,等. 油管防溢通井规的研制[J]. 油气井测试,2020,29(6):27-31.

Cite: MA Jinliang, WANG Fangxiang, WANG Ying, et al. Development of an overflow-proof drift size gauge tool [J]. Well Testing, 2020, 29 (6):27-31.

摘要 为解决常规通井规通井时油管液体外溢问题,研制了油管防溢通井规。通过阻流系统的自动开启和关闭,改变管柱的流道结构。利用流体力学方法,计算了阻流孔的直径及下钻时激动压力产生的阻力,推荐了弹簧的最大弹力。当阻流孔直径选用 14.32 mm,以 1.3 m/s 速度通井时,油管不会返液;以 0.2 m/s 速度通井时,阻流系统能在激动压力作用下关闭;管柱静止后,25 N 的弹簧弹力将阻流系统开启。现场 8 口井试验说明,通井时阻流系统工作正常,油管无井液溢出。油管防溢通井规的应用提高了通井时作业效率,减少了对环境的污染。

关键词 试油;通井规;油管防溢;阻流系统;激动压力;弹簧弹力;磨阻**中图分类号**:TE353 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2020.06.005

Development of an overflow-proof drift size gauge tool

MA Jinliang, WANG Fangxiang, WANG Ying, HU Guiyan, FAN Xu

Downhole Technical Service Company, CNPC Bohai Drilling Engineering Co., Ltd., Tianjin 300283, China

Abstract: Overflow often occurs when drifting with a conventional drifting size gauge tool. A new drifting size gauge tool has been developed. It is equipped with a choking system to control the flowing channel of the tubing string by automatically opening and closing of the choke. Following fluid mechanics, first we calculated the diameter of the choke and the resistance caused by the exciting pressure during drilling, then we got the maximum spring force. It's found that when the diameter of the choke was 14.32 mm, overflow would not appear when drifting at 1.3 m/s; when drifting at 0.2 m/s, the choke system would be closed at exciting pressure; and after the tubing string was at rest, a 25 N spring force would open the choke system. Field application in 8 wells has proved that the choking system can work normally without overflow. The overflow-proof drifting size gauge tool is effective to support drifting operation and reduces environmental pollution.

Keywords: production test; well gauge; oil pipe anti overflow; choking system; exciting pressure; spring force; friction resistance

通井规通井是检查套管是否变形的重要手段,直接关系着后续工序能否正常进行^[1-2]。在通井过程中,如果下管柱速度较快,由于激动压力的存在,入井管柱排开的井筒液(含油泥浆、压井液等)既由油套环空返出,又会由入井油管顶部溢出^[3-5]。油套环空返出的井筒液可以利用管线回收,而由于油管顶部无专用的回收装置,溢出的井筒液无法控制回收,直接由油管顶部洒落到钻台面,不仅使钻台面黏滑,存在安全事故隐患,影响作业进度,而且造成含油泥浆等井筒液落地,造成井场环境污染。在钻井过程中,逐步形成了以“撬装式设备+砖砌泥浆

池”为主体的泥浆不落地技术,在大牛地气田等环境敏感地区得到了普遍应用^[6-8]。在井下作业过程中,为解决下钻时井液从油管溢出问题,戴江等^[9]用正反方向两套游动凡尔,分别封闭正反方向洗井通道,并用弹簧限制凡尔开启压力的方法,研制了正反洗井油管防溢工具。该工具虽然能够正反洗井,但不是通径工具。当用于通井管柱时,若通井规被卡而且正反洗井都不通,无法采用连续油管或其他作业装备协助进行冲洗解卡。因此,正反洗井油管防溢工具的应用受到了一定的限制。马俊生等^[10]研制了由防溢器、油管喷提器,以及专用提升

工具组成的喷提油管防污染装置,虽然使用成功率较高,但需要将防溢器安装于油管顶端,整体装置操作较为繁复,严重影响了下管柱的作业效率。因此,目前还没有一种使用方便、功能全面的油管防溢工具,经济高效的解决上述问题。

为此,以常规通井规为基础,研制了一种油管防溢通井规,利用流体力学方法对其关键部件的结构参数进行优化设计,最后通过现场应用,验证了工具结构和参数设计的合理性,从根本上解决了通井规通井时井筒液外溢问题。

1 油管防溢通井规的设计

油管防溢通井规利用小孔限流原理防止下钻时油管液体外溢,利用弹簧使限流装置在反洗井时失去作用。该设计的关键是通井规结构设计、限流孔参数的选择及弹簧参数的选择。

1.1 结构设计

油管防溢通井规的整体结构如图 1 所示,主要包括:上接头,上筒体,中心管,支撑杆,弹簧,外套管,阻流板,下筒体和加强筋等。其中,上接头如图 2a 所示,在上接头的台肩处,沿圆周方向均布四个过液孔。由外套管、阻流板和加强筋组成的阻流系统如图 2b 所示。外套管的内径略大于中心管的外径,在外套管偏下部沿圆周方向均布三个过液槽,在阻流板上加工三个阻流孔,将外套管和阻流板焊接,并沿圆周方向焊接加强筋,保证阻流系统的稳固性。

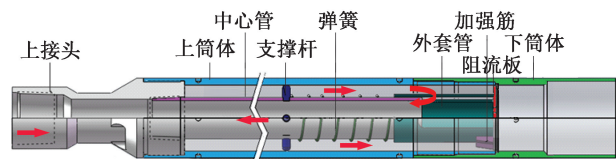


图 1 油管防溢通井规结构及反洗井井液流动状态示意图
Fig. 1 Schematic structure of the overflow-proof drifting size gauge tool and well fluid flow state during back washing

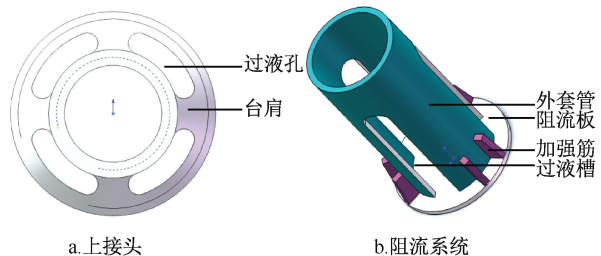


图 2 关键部件结构示意图

Fig. 2 Schematic structure of key parts

安装时,首先将中心管与上接头通过管螺纹连接,然后在中心管的外侧沿圆周方向等角度安

装四个支撑杆。接下来将上接头与上筒体通过机械螺纹连接后焊接为一体或用稳钉固定。再然后,将弹簧和阻流系统套入中心管,弹簧受到支撑杆的支撑限制作用。最后,将下筒体通过双级同步螺纹连接到上筒体上。由于下筒体内部缩径台阶处的直径略小于阻流板的外径,可支撑阻流板,防止阻流系统脱落。安装完毕后,弹簧处于轻微压缩状态。

1.2 工作原理

该油管防溢通井规主要包括三大工作过程:

(1) 下管柱过程中,井底产生激动压力,作用在阻流系统的阻流板上,推动阻流系统沿中心管上移,使阻流板紧贴在中心管的底部。此时,外套管侧面的 3 个过液槽被中心管的外壁面封闭,弹簧处于压缩状态。由于阻流板上阻流孔的限流作用,下入管柱体积排开的井筒液主要由通井规外筒与油层套管之间的环空上返,而只有一小部分井筒液通过阻流孔上返,且上返流速小于下管柱速度,油管无液体溢出。

(2) 当管柱静止后,阻流系统在弹簧的弹力作用下下移,恢复成图 1 所示状态。此时外套管上的过液槽开启,油管与环空液面快速平衡,完成一根油管的下钻过程。

(3) 当下完通井管柱需要反替井内泥浆时,同样由于阻流板上阻流孔的限流作用,反循环流体主要由通井规上接头处的四个过液孔流入,经中心管外的环空,流过外套管上的过液槽,流入中心管内,继而流进油管内,反替出井内的泥浆。井液流动状态如图 1 所示。而有一小部分反循环流体流过井底,由阻流板上阻流孔进入中心管内。若井内有钻井时残留的大块胶皮,反替泥浆时,胶皮会被阻流板阻挡在油管外面,避免造成后续施工中的复杂情况。

通过以上分析可见,油管防溢通井规通过阻流系统的自动开启和关闭,改变管柱的流道结构,解决常规通井规通井过程中的油管返液问题。

2 关键部件优化设计

阻流系统是油管防溢通井规的关键部件,其依靠下管柱时产生的激动压力关闭、静止时依靠弹簧的弹力开启。阻流孔的直径关系着下管柱过程中进入油管内的流量大小,决定了油管顶部是否有流体溢出。弹簧的弹力大小决定了阻流系统能否在

激动压力作用下关闭和静止时顺利打开。因此,有必要对阻流孔的直径和弹簧的参数进行理论分析,以优化阻流孔直径、优选合适弹力的弹簧。

2.1 阻流孔当量直径

在下通井管柱时,排开的液体体积一部分进入油管内上返,一部分进入环空上返,两部分体积不等。通过理论分析可知,油管内液体流速若不大于下管柱速度,则下管柱时油管顶部无液体溢出^[11]。所以,问题的关键在于求取下管柱过程中进入油管的流量。通井管柱可以看成是“U”型管,分别列出管内和环空对油管底部的伯努利方程^[12],即

$$p_i + p_b + 10^{-3}\rho gh_i + 10^{-3}\rho v_i^2/2 = p_a + 10^{-3}\rho gh_a + 10^{-3}\rho v_a^2/2 \quad (1)$$

对(1)式变形,得

$$p_a - p_i - p_b + 10^{-3}\rho g(h_a - h_i) + 10^{-3}\rho(v_a^2 - v_i^2)/2 = 0 \quad (2)$$

式中: ρ 为井筒液密度, g/cm^3 ; h_i 为油管内液柱高度,m; h_a 为油套环空液柱高度,m; v_i 为管内流体流速, m/s ; v_a 为油套环空流体流速, m/s ; p_i 为管内流磨阻压降,MPa; p_a 为环空流动磨阻压降,MPa; p_b 为孔眼磨阻压降,MPa。

下通井管柱时, $|h_a - h_i|$ 很小,可以忽略。因此,(2)式可简写成

$$p_a - p_i - p_b + 10^{-3}\rho(v_a^2 - v_i^2)/2 = 0 \quad (3)$$

假设井筒液为宾汉流体,则计算可得管内流磨阻压降 p_i 、环空流磨阻压降 p_a 、孔眼磨阻压降 p_b ^[13],即

$$p_i = \frac{0.51655\rho^{0.8}\mu^{0.2}LQ_i^{1.8}}{d_i^{4.8}} \quad (4)$$

$$p_a = \frac{0.57503\rho^{0.8}\mu^{0.2}LQ_a^{1.8}}{(D-d)^3(D+d)^{1.8}} \quad (5)$$

$$p_b = \frac{0.081\rho Q_i^2}{C^2 D_2^4} \quad (6)$$

式中: d_i , d 分别为管柱内径和外径,cm; D 为套管内径,cm; D_2 为阻流孔当量直径,cm; Q_i , Q_a 分别为进入管柱内和油套环空的流体体积流量, L/s ; μ 为泥浆塑性黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; L 为管柱长度,m; C 为流量系数(一般取值 0.95)。

根据下管柱速度,计算单位时间内排开井筒液体体积流量为

$$Q_p = \left[\frac{\pi(D_1^2 - D_2^2)}{40} \right] v_p \quad (7)$$

式中: Q_p 为排开井筒液体体积流量, L/s ; D_1 为通井规

外径,cm; v_p 为管柱下放速度, m/s 。

假设进入管柱内的流体体积流量为 Q_i ,则进入油套环空的流体体积流量 Q_a 为

$$Q_a = Q_p - Q_i \quad (8)$$

则环空流体平均流速可表示为

$$v_a = \frac{40Q_a}{\pi(D^2 - d^2)} \quad (9)$$

将(7)式和(8)式带入(9)式,则有

$$v_a = \left(\frac{D_1^2 - D_2^2}{D^2 - d^2} \right) v_p - \frac{40Q_i}{\pi(D^2 - d^2)} \quad (10)$$

考虑井筒液的黏滞效应^[14], (10)式可写成

$$v_a = \left(\frac{D_1^2 - D_2^2}{D^2 - d^2} + K_c \right) v_p - \frac{40Q_i}{\pi(D^2 - d^2)} \quad (11)$$

式中: K_c 为流体黏附系数(一般取值 0.4~0.5),无因次。

油管内流体体积流量 Q_i 可表示为

$$Q_i = \pi d_i^2 v_i / 40 \quad (12)$$

在给定下管柱速度 v_p 时,以油管内液体流速 v_i 等于下管柱速度 v_p 的极限情况,将(4)~(6)式、(11)和(12)式代入(3)式,即可计算下管柱过程中进入油管的流量,进而计算阻流孔当量直径 D_2 。

以某井为例。套管内径 12.136 cm,井筒液密度 1.28 g/cm^3 ,塑性黏度 0.012 $\text{Pa}\cdot\text{s}$,通井管柱结构为 $\phi 73 \text{ mm} \times 2900 \text{ m}$ 油管+ $\phi 116 \text{ mm} \times 1.2 \text{ m}$ 通井规。根据以上公式可计算出,当下钻速度达到 1.3 m/s 时,阻流孔最大当量直径为 1.432 cm 时油管顶部无液体溢出。按三个孔算,每个孔的当量直径 8.2 mm。

2.2 弹簧的优选

弹簧的最大弹力决定着阻流系统能否在下钻时被彻底关闭,最小弹力决定着阻流系统何时被打开,对油管防溢效果有重要影响。因此,有必要计算出下钻时的激动压力大小,选择合适的弹簧参数。

2.2.1 激动压力的计算

对于通井管柱,激动压力应分别计算通井规部分和油管部分的激动压力,然后求和。管柱底部产生的激动压力^[15-16]为

$$p_{sw} = 0.196\rho \frac{fLv_a^2}{D-d} \quad (13)$$

其中 $f = 0.0295 \left[\frac{\mu}{\rho(D-d)v_a} \right]^{0.2}$

式中: p_{sw} 为激动压力,MPa; f 为磨阻系数,无因次。

激动压力在阻流板上产生的动力可表示为

$$F = p_{sw}A \tag{14}$$

式中: F 为激动压力产生的动力, N; A 为阻流面积, mm^2 。

仍以前面提到的某井为例。当下管柱速度为 0.2 m/s 时, 激动压力为 0.08 MPa, 激动压力产生的动力为 857 N; 当下钻速度 1.3 m/s 时, 激动压力为 2.36 MPa, 激动压力产生的动力为 24 898 N。该计算结果说明, 激动压力产生的动力足够大, 在选择合适弹力弹簧的情况下, 完全能够使弹簧压缩, 从而有效关闭阻流系统。

2.2.2 弹簧的选型

弹簧最大弹力要小于下钻时激动压力产生的推力, 以便能够彻底关闭阻流系统; 弹簧最小弹力要大于外套管与中心管相对运动时的摩擦力, 以便在油套液面基本平衡后能够推开阻流板, 打开外套管上的三个过液槽, 为反洗井作业提供足够大的过流通道。推荐弹簧的最大弹力为 25 N。

根据机械设计手册中压缩弹簧的计算选型方法^[17], 获得弹簧参数的设计结果如下: 弹簧中径 $d_1 = 65 \text{ mm}$, 弹簧线径 $d_2 = 2.5 \text{ mm}$, 旋绕比 $C = 26$, 节距 $P = 25 \text{ mm}$, 有效圈数 $n = 7.5$, 总圈数 $n_1 = 9.0$ 圈,

自由高度 $H_0 = 191 \text{ mm}$, 刚度 $p = 0.186 \text{ N/mm}$, 弹簧丝总长 $L_0 = 1\,851 \text{ mm}$ 。当阻流板与中心管底部紧密接触时, 弹簧变形量 139 mm, 此时弹力 25.87 N。

3 现场应用

油管防溢通井规研制成功后, 在 Y109X1 井进行了首次试验。该井油层套管内径 121.36 mm, 人工井底 3 732.0 m (垂深 3 690.0 m), 其中井深 0~2 900.0 m 为直井段, 2 900.0~3 732.0 m 为造斜及稳斜段。稳斜段井斜角基本在 20°左右, 井液为密度 1.36 g/cm³ 的泥浆。用 $\phi 116 \text{ mm} \times 1.2 \text{ m}$ 新型通井规以平均 1.3 m/s 的下钻速度通井至井底的过程中, 油管顶部始终不见返液, 而环空大量返液, 下钻时的悬重比静止时的管柱悬重少约 20 kN。用清水反替井内泥浆时, 最高泵压 15 MPa, 只比油管内充满泥浆、油套环空充满清水时的理论最高压差 (不考虑流动摩阻) 高 2 MPa。该试验结果说明, 通井规结构设计、参数设计都是合理的。

继 Y109X1 井之后, 又进行了 7 口井现场试验, 试验结果见表 1。这 7 口井的试验结果进一步说明了通井规结构设计、参数设计结果可靠。

表 1 试验井情况及试验结果
Table 1 Well conditions and test results

井号	井深/m	井液类型	井液密度/(g·cm ⁻³)	下钻返液情况	反洗井泵压情况
X36-11-4	1 183.0	清水	1.00	油管不出, 套管大量返液	正常
Y20-37	3 700.0	清水	1.00	油管不出, 套管大量返液	正常
Y106X1	3 929.0	泥浆	1.30	油管不出, 套管大量返液	正常
Y7X1	4 745.0	泥浆	1.31	油管不出, 套管大量返液	正常
G2-61-4	2 475.0	泥浆	1.32	油管不出, 套管大量返液	正常
G1-60-6	2 820.0	泥浆	1.28	油管不出, 套管大量返液	正常
G508-29	2 900.0	泥浆	1.26	油管不出, 套管大量返液	正常

4 结论

(1) 研制了油管防溢通井规, 通过阻流系统的自动开启和关闭, 改变管柱的流道结构, 解决了常规通井规通井过程中的油管返液问题。

(2) 油管防溢通井规的应用, 大大提高了通井时的作业效率, 减少了对环境的影响, 更解决了冬天施工时吊卡被油管返出的井液冻住打不开的问题。

(3) 井内管柱较少时, 注意控制管柱下放速度, 避免出现油管顶部顶修井机游动滑车的现象。

(4) 在使用过程中, 清水反替井内泥浆时要注意观察泵压和出口排量。若泵压高而出口排量小, 说明阻流系统被卡住未能下移。此时只需油管正

打压 1~5 min, 推动阻流系统下移, 油套环空返液正常后即可再次进行反替井内泥浆作业。

致谢: 感谢渤钻井下技术服务分公司技术研发项目“新型通井规的研制与现场试验”为该论文提供支持; 感谢分公司张世林总工程师为该论文提供保密审查把关。

参考文献

[1] 李国平, 李洪建. 井下作业多功能套管通刮器的研制及应用[J]. 油气井测试, 2017, 26(3): 54-55.
LI Guoping, LI Hongjian. Development and application of multi-function casing scraper by down-hole operation [J]. Well Testing, 2012, 35(4): 32-34.
[2] 鄢标, 刘方检, 王庆潮. 普光气田套管变形规律与强度评价方法[J]. 石油机械, 2019, 47(9): 132-137.
YAN Biao, LIU Fangjian, WANG Qingchao. Deformation

- law and strength evaluation method of casing in Puguang gas field [J]. China Petroleum Machinery, 2019,47(9): 132-137.
- [3] 李夯,郭朝辉,张瑞,等. 尾管快速下入技术分析及进展[J]. 石油机械,2014,42(9):6-10.
LI Hang, GUO Zhaohui, ZHANG Rui, et al. Analysis and development of fast liner running technology [J]. China Petroleum Machinery, 2014,42(9):6-10.
- [4] SALAHELDIN E, IBRAHIM G, TAMER M. New approach to obtain the rheological properties of drill-in fluid on a real-time using artificial intelligence [J]. Petroleum, 2019,3(1):1-20.
- [5] 历玉英. 井下作业油管环空防溢控制的理论与应用研究[D]. 大庆:大庆石油学院,2008.
LI Yuying. Theory and application study on annular kick-control technology of through-tubing blowout preventer in downhole operation [D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2008.
- [6] 邓红琳,赵文彬,袁立鹤. 钻井液不落地技术在大牛地气田的应用[J]. 断块油气田,2014,21(1):97-99.
DENG Honglin, ZHAO Wenbin, YUAN Lihe. Application of without landing drilling fluid technology in Daniudi gas field [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014,21(1):97-99.
- [7] 李维斌,张阳. 大牛地气田钻井液不落地技术与实践[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版),2016,18(1):57-59,102.
LI Weibin, ZHANG Yang. Technology and practice of without landing drilling fluid in Daniudi gas field [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2016,18(1):57-59,102.
- [8] 孙金柱. 大牛地气田钻井泥浆不落地技术的应用研究[D]. 南京:南京大学,2016.
SUN Jinzhu. Study on the application of waste drilling mud non-landing technology on Daniudi gas field [D]. Nanjing: Nanjing University, 2016.
- [9] 戴江,崔立宏,李子丰,等. 正反洗井油管防溢工具的改进[J]. 钻采工艺,2005,28(5):77-79.
DAI Jiang, CUI Lihong, LI Zifeng, et al. Improvement of preventing tubing overflow tool in the course of well cleanout and reverse cleanout [J]. Drilling & Production Technology, 2005,28(5):77-79.
- [10] 马俊生,尹锐,邵宝华,等. 喷提油管防污染装置的研制与应用[J]. 石油机械,2011,39(1):85-86.
MA Junsheng, YIN Rui, SHAO Baohua, et al. Development and application of anti-pollution device for spray oil pipe [J]. China Petroleum Machinery, 2011,39(1):85-86.
- [11] 历玉英. 井下作业油管环空防溢控制的理论与应用研究[D]. 大庆:大庆石油学院,2008.
LI Yuying. Theory and application study on annular kick-control technology of through-tubing blowout preventer in downhole operation [D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2008.
- [12] 袁恩熙. 工程流体力学[M]. 北京:石油工业出版社,1986:45-60.
- [13] 陈庭根,管志川. 钻井工程理论与技术[M]. 东营:中国石油大学出版社,2000:148-155.
- [14] 李征,朱宏武,孔祥领,等. 幂律流体偏心环空流动中钻井液黏附系数研究[J]. 石油机械,2013,41(3):51-54.
LI Zheng, ZHU Hongwu, KONG Xiangling, et al. Research on the drilling fluid adhesion coefficient in the eccentric annular flow of power-law fluid [J]. China Petroleum Machinery, 2013,41(3):51-54.
- [15] CRESPO F E, AHMED R M, SAASEN A. Surge-and-swab pressure predictions for Yield-Power-Law drilling fluids [J]. SPE Drilling & Completion, 2012,27(4):574-585.
- [16] 彭齐,樊洪海,刘劲歌,等. 起下钻过程中井筒稳态波动压力计算方法[J]. 石油钻探技术,2016,44(4):35-40.
PENG Qi, FAN Honghai, LIU Jingge, et al. Improved calculation of wellbore steady fluctuation pressure in tripping operations [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016,44(4):35-40.
- [17] 闻邦椿. 机械设计手册[M]. 北京:机械工业出版社,2010:18-37.

编辑 刘振庆

第一作者简介:马金良,男,1978年出生,高级工程师,2002年毕业于江汉石油学院石油工程专业,现从事油气田开发方面的技术服务和相关技术研究工作。电话:022-25934595,15302132113;Email:mjl2000_ren@163.com。通信地址:天津市滨海新区港西大道640号井下技术服务分公司,邮政编码:300283。