

飓风冲洗工具用于连续管钻磨的试验与评价

高森,杨红斌,韩磊

中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆井下技术作业公司 陕西咸阳 712000

通讯作者:Email:277103489@qq.com

项目支持:中国石油集团公司推广专项“连续油管作业技术专项推广”(二期)(2017B-4107)

引用:高森,杨红斌,韩磊. 飓风冲洗工具用于连续管钻磨的试验与评价[J]. 油气井测试,2022,31(2):42-48.

Cite: GAO Sen, YANG Hongbin, HAN Lei. Test and evaluation of hurricane flushing tool for coil tubing drilling and grinding operation[J]. Well Testing, 2022, 31(2): 42-48.

摘要 连续油管钻磨作业过程中,需反复拖动钻磨工具串完成井筒的冲洗,施工时间长、效率低。在连续油管钻磨工具组合中增加飓风冲洗工具,可提高冲洗阶段排量至设计值以上,清理井筒内大直径固相颗粒,提升了井筒清理效率。通过室内实验及现场试验效果评价,当排量高于500 L/min时,飓风冲洗工具完全开启,马达因液体分流未受损伤,清理井筒排量得到进一步提升,平均钻磨用时减少33.1%,平均清理井筒用时减少74.9%,平均施工用时减少52.7%;而当排量低于400 L/min时,飓风冲洗工具完全关闭。飓风冲洗工具可在确保配套连续油管、井口装置、井筒本质安全的前提下,提升钻磨整体施工效率。

关键词 连续油管;钻磨;飓风冲洗工具;排量;冲洗效率;室内实验;现场试验;效果评价

中图分类号:TE353 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2022.02.008

Test and evaluation of hurricane flushing tool for coiled tubing drilling and grinding

GAO Sen, YANG Hongbin, HAN Lei

Changqing Downhole Operation Company, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company Limited, Xianyang, Shaanxi 712000, China

Abstract: During the coiled tubing (CT) drilling and grinding operations, the drilling and grinding tool string needs to be dragged repeatedly to flush the wellbore, which is time-consuming and inefficient. Adding hurricane flushing tool to the CT drilling and grinding tool string can increase the displacement in the flushing stage above the design value to clean out large-diameter solid particles in the wellbore, so that the wellbore cleaning efficiency is improved. The results of indoor and field tests show that when the displacement is higher than 500 L/min, the hurricane flushing tool is fully turned on, the motor is not damaged due to liquid diversion, and the displacement for wellbore cleaning is further improved; meanwhile, the average drilling and grinding time is reduced by 33.1%, the average wellbore cleaning time is reduced by 74.9%, and the average operation time is reduced by 52.7%. When the displacement is lower than 400 L/min, the hurricane flushing tool is completely closed. The hurricane flushing tool can help improve the overall efficiency of drilling and grinding while ensuring the intrinsic safety of supporting CT, wellhead devices and wellbore.

Keywords: coiled tubing; drilling and grinding; hurricane flushing tool; displacement; flushing efficiency; indoor test; field test; effect evaluation

近年来,连续油管钻磨桥塞技术发展迅速,作业井次逐年上升,在页岩气、致密气、致密油和常规油气开发中,发挥了重要的作用。但同时,在钻磨复合桥塞、可溶桥塞方面,还存在安全风险较高、施工效率较低等问题,严重影响了施工效率,十分有必要寻找有效的技术解决措施。目前国内外采取的措施包括增加循环排量、科学设计施工程序、合理匹配磨鞋^[1]、配套解卡钻具组合、多次清理井筒以及使用高效降阻剂等。其中,针对产能较低的油气井钻塞作业,增加循环排量是一项重要的提效措

施^[2],但受到连续油管内径和马达自身极限工作参数限制,效果不是十分理想。因此,如何在不更换钻具和确保马达安全工作的前提下,提升清理井筒阶段的冲洗排量,成为一个技术难题。为此,本文提出在井筒清理及钻磨一体化钻具组合中,增加飓风冲洗工具,并通过合理的参数设计,较好地解决上述难题。

飓风冲洗工具入井时提供完全的向前冲洗能力,并且可以切换到高速反向射流,喷射的流体呈飓风状,实现井筒360°清洗,可有效提高冲洗效率。

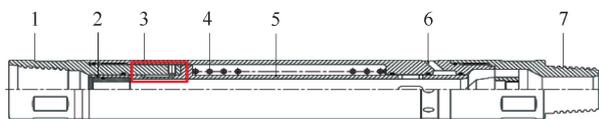
将该工具加入连续油管钻磨工具中,可在钻磨阶段,确保马达在 380 ~ 420 L/min 的最佳排量范围下稳定工作;在冲洗阶段^[3],确保马达在大于 500 L/min 的排量下被稳定旁通,实现环空的大排量冲洗,在高效清理井筒的同时,减少短途起下钻,实现安全、高效、低成本钻磨。

1 飓风冲洗工具

飓风冲洗工具是一种多次切换循环阀,通过改变地面排量,实现流体通过工具和分流到环空的切换。

1.1 飓风冲洗工具结构

飓风冲洗工具由上接头、节流嘴、转换机构、弹簧、芯轴、旁通水眼、下接头等组成(见图1)。



1-上接头;2-节流嘴;3-转换机构;4-弹簧;5-芯轴;
6-旁通水眼;7-下接头

图1 飓风冲洗工具结构组成

Fig. 1 Structure schematic diagram of hurricane flushing tool

1.2 飓风冲洗工具工作原理

当排量为零时,飓风冲洗工具旁通口处于关闭状态,随着排量的增加,它在入口节流嘴前后产生的内部压降增大^[4],产生的液压推力作用在预加载的弹簧上。当液压推力克服弹簧应变力时,芯轴向前移动,转位机构换位,工具的旁通口被打开。要关闭旁通口,必须要减小排量,直到弹簧应变力克服液压推力,允许芯轴向后移动。飓风冲洗工具旁通开启后,大部分流体经过旁通进入环空,少量流体经马达和磨鞋进入环空。

基于上述原理,飓风冲洗工具在钻塞时,旁通水眼应始终保持关闭,如果意外开启,会影响马达的水功率,从而影响钻塞效率^[5]。

1.3 螺杆马达技术参数

飓风冲洗工具的主要技术参数:长度 575 mm, 外径 73 mm, 连接扣型:60 mm PAC, 耐压 35 MPa, 作业温度 ≤ 150 °C, 最大流量 900 L/min。

螺杆马达主要技术参数:长度 4.8 m, 外径 73 mm, 连接扣型:60 mm REG, 头数 5:6, 级数 4, 排量 227 ~ 454 L/min, 转速 217 ~ 434 rpm, 工作压力降 3.2 MPa, 输出扭矩 415 N·m。

2 连续管飓风冲洗工具室内实验

室内实验期间,通过实验方案及实验参数的设计,为后期现场工具测试,提供前期经验和实验数据支撑。

2.1 实验方案设计

根据现场钻磨作业工况,将实验流程设计为:

(1)采用 73 mm 调整短节带变扣+定压凡尔(开启压力 5.3 MPa)+变扣+73 mm 飓风冲洗工具+73 mm 螺杆马达,采用泵撬+弯头、油管及高压软管,与调整短节连接,完成泵注流程连接。

(2)通过将整套工具串固定于测功机上,实现测功机对螺杆马达各项参数的监测。

(3)通过泵注排量的阶段提升(50 ~ 100 L/min、380 ~ 420 L/min、420 ~ 500 L/min)来验证飓风工具测试期间的排空、钻磨效率、大排量冲洗效果等,并记录用于分析评价的相关参数,为现场施工从钻磨模式切换至冲洗模式提供参考。

2.2 实验参数设计

参数设计的关键是如何设计工具内部节流嘴尺寸,以确保达到设计排量时,节流压差产生的液压推力能克服弹簧应变力,使芯轴向前移动,转位机构换位,工具旁通水眼正常打开。

2.2.1 测试排量设计

根据螺杆马达性能参数可知,马达的最大排量为 454 L/min,且马达的极限排量为 500 L/min,故测试期间的最大排量尽可能不高于 500 L/min。但现场钻磨期间,马达排量一般不低于 380 L/min(以 114.3 mm 井筒为例),否则无法满足钻磨屑上返要求。另外,由马达参数及现场施工经验可知,当排量不低于 420 L/min 时,马达转速、扭矩及效率达到最佳^[6-7]。

2.2.2 节流嘴尺寸设计

飓风工具节流嘴在不同排量下产生的压降可计算得出^[8],即

$$p = \frac{0.82 \times \rho \times Q}{10 \times C_d^2 \times d^4} \quad (1)$$

式中: p 为流速流经节流嘴产生的压力降,MPa; ρ 为流体密度,g/cm³; Q 为泵注排量,L/min; d 为节流嘴直径,mm; C_d 为节流嘴流量系数,无因次。

本次实验期间,从钻塞模式至冲洗模式,根据测试排量设计及马达最佳性能参数可知,测试排量节点分别为 380 L/min、420 L/min、500 L/min。因

此, Q 可依次取值为 380 L/min、420 L/min 和 500 L/min; 又测试用液体为清水, 密度为 1 g/cm^3 , 故 ρ 取值为 1; C_d 取值为 0.953。

由于工具内部安装弹簧的弹力为 0.1 MPa, 因此, 节流嘴前后产生的节流压降应大于 0.1 MPa; 又考虑到转换机构与工具内腔还存在轴向磨阻, 为确保转换机构在节流压降作用下, 顺利克服弹簧应变力完成换向, 设计要求节流压降大于 0.3 MPa, 故 p 取值为 0.3 MPa。故根据(1)式, 可反算出所需的节流嘴尺寸即节流嘴尺寸设计值。

当 Q 取值分别为 380 L/min、420 L/min 和 500 L/min, p 取值为 0.3 MPa 时, 可分别计算出 d 为 18.5 mm、19.5 mm 和 21.3 mm。故实验期间, 3 种排量下所用节流嘴尺寸, 应分别小于 18.5 mm、19.5 mm 和 21.3 mm。

2.2.3 测试液体选型

室内测试实验过程中, 在正常钻磨阶段和冲洗井筒阶段, 均采用清水作为循环液。现场试验过程中, 在钻磨阶段多采用清水或滑溜水作为循环液体, 在冲洗清理井筒阶段, 采用瓜胶液作为循环液体。另外, 将测试液体的 pH 值控制在 8.0~10.5 之间, 防止 pH 值过低对马达零件产生的破坏作用, 延长马达使用寿命。

2.3 室内测试实验

室内测试实验主要进行了不同尺寸节流嘴的开启排量测试以及飓风工具与螺杆马达的联调测试, 并反算了不同尺寸节流嘴对应的开启压力。

2.3.1 不同尺寸节流嘴的开启排量测试

测试期间, 节流嘴尺寸选型为 11.0、15.0、17.0、18.0、18.6 mm, 对应的飓风工具旁通阀开启排量为 133、279、412、442、503 L/min, 具体见表 1 (其中, 11.0 mm 和 15.0 mm 节流嘴对应的“接近打开”排量和“半打开”排量低于起泵排量, 未作采集)。

表 1 不同尺寸节流嘴的开启排量测试结果

Table 1 test results of opening displacement of different sizes of throttle nozzles

测试节流嘴内径/ mm	旁通开启排量/($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)		
	接近打开	半打开	完全打开
11.0	/	/	133
15.0	/	/	279
17.0	388	394	412
18.0	424	436	442
18.6	485	497	503

飓风冲洗工具在旁通临界开启和完全开启状

态下, 内部流体的外溢状态如图 2 所示。

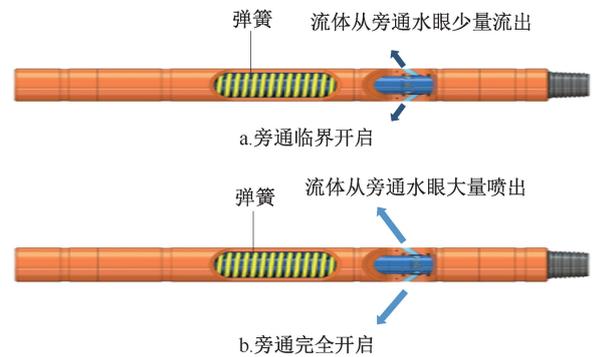


图 2 飓风工具旁通临界开启和完全开启状态
Fig. 2 Critical open and full open state of hurricane tool bypass

在测得不同节流嘴尺寸下的开启排量后, 可通过(1)式反算出不同尺寸节流嘴对应的工具旁通开启压力(见表 2)。

表 2 不同尺寸节流嘴的开启压力计算结果
Table 2 Calculation results of opening pressure of throttling nozzles with different sizes

测试节流嘴内径/ mm	旁通开启时节流嘴压降/MPa	
	接近打开	完全打开
11.0	/	0.30
15.0	/	0.39
17.0	0.45	0.51
18.0	0.43	0.47
18.6	0.49	0.53

由表 2 的计算结果可知, 在测试 5 种尺寸的节流嘴过程中, 节流嘴压降均能达到 0.3 MPa, 满足节流嘴尺寸设计要求。

2.3.2 飓风冲洗工具与螺杆马达联调测试

通过泵撬打清水过定压凡尔、飓风冲洗工具及螺杆马达, 测试当排量达到旁通临界开启排量下, 马达各项性能参数是否在正常范围。

考虑到当节流嘴尺寸不小于 18.6 mm 时, 旁通完全开启的排量不会对正常钻磨过程造成干扰, 因此, 取节流嘴尺寸为 19.3 mm, 确保室内测试期间马达与飓风工具联调时(排量不大于 500 L/min), 飓风工具不会意外打开。马达与飓风冲洗工具联调测试结果如表 3 所示。

表 3 马达与飓风冲洗工具联调测试结果
Table 3 test results of joint commissioning test of motor and hurricane flushing tool

测试节流嘴内径/ mm	排量/ ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)		转速/ rpm		工作压力 降/MPa		输出扭矩/ ($\text{N}\cdot\text{m}$)	
	正常	测试	正常	测试	正常	测试	正常	测试
19.3	227~454	300	217~434	296~305	3.2	3.2	415	300

从测试结果来看,除输出扭矩低于输出扭矩参考值(考虑到马达抖动对马达寿命的影响,马达测功机未满足负荷加载)外,其他性能参数均在正常范围,说明在未达到开启排量的情况下,井下工具组合中加入飓风工具对马达性能不构成影响。

3 现场试验

为进一步验证飓风冲洗工具在现场工况下的使用效果,在现场钻磨作业中进行了进一步试验。

3.1 飓风冲洗工具选型

试验前针对飓风工具对环空返速的影响。选取73 mm和95.25 mm两种规格的飓风工具和114.3 mm、139.7 mm两种规格的试验套管,进行环空返速的模拟计算。73 mm飓风极限排量大于600 L/min,与50.8 mm连续管配套使用为宜;95.25 mm飓风工具极限排量大于1 000 L/min,与60.32 mm连续管配套使用为宜。因此,分别取50.8 mm和60.32 mm连续管参数,在380~420 L/min(常规钻磨排量范围)、400~500 L/min(工具开启排量设计范围)两个区间分别计算环空返速,结果如表4所示。

表4 不同外径飓风工具与不同内径套管配套的环空流速
Table 4 Annular velocity of different outer diameter hurricane tools matched with different inner diameter casing

套管规格	飓风冲洗工具规格			
	73 mm		95.25 mm	
	Q/ (L·min ⁻¹)	V/ (L·min ⁻¹)	Q/ (L·min ⁻¹)	V/ (L·min ⁻¹)
114.3 mm	380~420	1.1~1.2	380~420	1.3~1.4
	400~500	1.2~1.4	400~500	1.3~1.7
139.7 mm	380~420	0.6~0.7	380~420	0.7~0.8
	400~500	0.7~0.8	400~500	0.8~0.9

另外,根据环空止动返速计算公式和现场实际情况,计算得出钻屑的环空止动返速均不大于0.85 m/s,与两种规格的飓风冲洗工具在两种排量范围下的环空返速比较可知:

(1) 选用50.8 mm连续管带73 mm的飓风冲洗工具,在114.3 mm套管内作业时,不论在钻磨阶段,还是大排量清理井筒阶段,环空返速均能达到钻屑的环空止动返速;在139.7 mm套管内作业时,环空返速均不能达到钻屑的环空止动返速。

(2) 选用60.32 mm连续管带95.25 mm的飓风冲洗工具,在114.3 mm套管内作业时,虽然在钻磨阶段和大排量清理井筒阶段,环空返速均能达到钻屑的环空止动返速,但工具外径与套管内径过于接近,卡钻风险太大,不建议两者配合作业;在139.7

mm套管内作业时,在大排量清理井筒阶段,环空返速能达到钻屑的环空止动返速,且工具外径与套管内径匹配。

因此,当试验井井筒套管为114.3 mm时,选用50.8 mm连续管带73 mm的飓风冲洗工具较为合适;当试验井井筒套管为139.7 mm时,选用60.32 mm连续管带95.25 mm的飓风冲洗工具较为合适;当试验井井筒套管为139.7 mm,且现场只能配套50.8 mm连续管和73 mm飓风冲洗工具时,则应进一步提升清理井筒阶段的排量,来弥补环空面积增大造成环空返速降低的不足。

本文所述工具为73 mm飓风冲洗工具,故选择了套管外径为114.3 mm的宜X井进行了现场试验,同时,选配50.8 mm连续管带73 mm飓风冲洗工具开展钻磨作业。

3.2 试验工具组合配套

考虑到钻磨过程有下入自锁和钻后返排遇卡的风险,在井下工具组合配套过程中,除连续管连接器、液压式安全丢手、马达、磨鞋等常规钻磨工具外,还配套了水力振荡器和震击器,作为自锁和遇卡的应急工具^[9]。试验井钻磨作业的井下钻具组合见表5。

表5 现场试验井下工具组合

Table 5 combination of downhole tools for field test

名称	长度/外径/内通径/			螺纹长 度/mm	备注
	mm	mm	mm		
连续油管连接器	430	73	60	43	抗拉31.78 t
液压式安全丢手	807	73	24	43	投29 mm钢球
飓风洗井工具	567	73	/	43	节流嘴尺寸17.2 mm
水力振荡器	1 330	73	24	43	
震击器	1 730	73	30	43	
马达	4 190	73	/	43	备用1只
磨鞋	300	93	/	/	

3.3 现场试验过程

现场试验过程主要分地面测试和试验钻磨两个阶段完成。地面测试阶段预验证飓风冲洗工具在设计排量下能否完全开启,试验钻磨阶段进一步验证钻磨工况下,飓风冲洗工具能否在设计排量下正常开关,以及开关过程各项参数变化对马达工作造成的影响。

地面测试阶段,泵车按400 L/min、450 L/min和500 L/min,依次提高泵注排量,400 L/min时泵压22 MPa,450 L/min时泵压28 MPa,飓风冲洗工具旁通阀均未开启,螺杆马达正常工作,转速440 r/min(满足马达正常工作转速介于400~600

r/min 之间的常规钻磨要求^[10]); 提高排量至 500 L/min 时, 泵压达到 34 MPa(未接工具时, 连续管总循环磨阻不小于 29 MPa, 故工具串位置的循环磨阻不大于 5 MPa, 远低于飓风冲洗工具耐压等级), 飓风冲洗工具旁通阀开启, 开启瞬间泵压下降至 31 MPa, 压降信号明显。同时, 试验期间, 泵压未超过井口压力设定上限 50 MPa(井口防喷器承压能力为 70 MPa 时, 按照安全系数 0.8 计算, 井口压力应控制在 56 MPa 以内, 为保证新工艺试验的井控安全, 将本次试验的井口压力上限设定为 50 MPa^[11])。泵注压力与泵注排量的变化关系如图 3 所示。

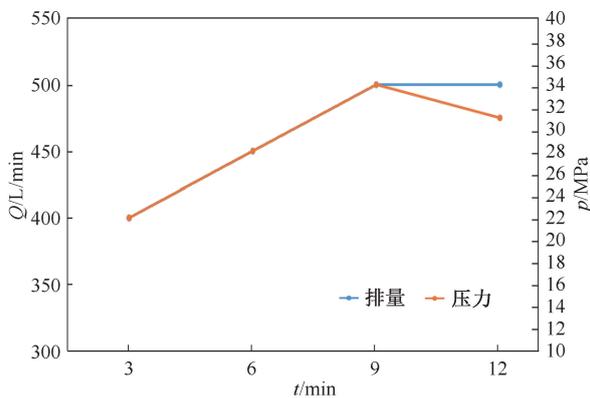


图 3 泵注压力随泵注排量的变化

Fig. 3 Variation of pumping pressure with pumping displacement

试验钻磨阶段, 整套工具组合泵注循环测试正常, 下管至设计深度后, 钻压由 6.8 t 下降至 6.2 t, 确认达到钻磨位置, 后以排量 410 L/min、泵压 21.8 MPa 开始钻磨, 正常钻磨期间, 钻压 33.9 kN(满足钻压在 10~40 kN 之间的常规钻磨要求^[12]), 平均钻进速度 10 m/h, 平均排量 440 L/min, 平均泵压 24.2 MPa, 各项参数显示正常, 且飓风工具始终处于关闭状态, 未出现异常开启现象。

试验清理井筒阶段, 缓慢提高排量, 当排量达到 500 L/min、泵压接近 30 MPa 时, 泵压快速下降至 28 MPa, 飓风冲洗工具开启, 处于正常工作状态, 直至排量降至 400 L/min, 飓风冲洗工具再次关闭。

现场试验结果表明, 该工具能够通过泵注排量的增大顺利实现旁通开启, 进而实现大排量循环, 提高携屑能力, 达到高效清理井筒的目的; 同时, 不影响钻磨施工各项参数及其他井下工具性能的发挥。

3.4 施工效率比对

现场试验结束后, 为进一步验证飓风冲洗工具

对连续管钻磨时效的影响效果, 又在华 X 井丛开展了相关对比测试。

华 X 井丛连续管钻磨可溶球座作业中, 施工排量稳定在 420 L/min, 环空返速为 0.69 m/s, 未达到环空止动返速。后降低起管速度至 3~5 m/min, 每钻磨 2~3 个球座或者进尺 200 m 左右回拖一次, 辅助清理井筒, 但未能补偿环空返速不足造成的低返排问题, 且压裂砂和磨屑返出严重时, 还需增加回拖次数和回拖时间, 导致钻磨效率下降。

由于现场连续管均为 50.8 mm 连续管, 为解决上述问题, 在其中 4 口井施工工具串中, 加入 73 mm 飓风冲洗工具, 又因为套管规格为 139.7 mm, 在 500 L/min 排量下, 无法满足环空止动返速所需最佳选型, 因此, 在清理井筒阶段, 将施工排量提升并稳定至 550 L/min, 确保环空返速提升并稳定至 0.91 m/s, 与未加入飓风冲洗工具的另外 4 口井比较, 平均钻磨球座用时(纯钻磨时间/球座总数)减少 33.1%、平均清理井筒用时(其它时间/球座总数)减少 74.9%, 平均施工用时(施工总时间/球座总数)减少 52.7%, 施工总体效率显著提升, 同时, 降低了清理井筒周期及卡钻风险。

4 测试结果分析评价

针对室内及现场测试结果, 进行了节流压降计算、连续管及工具循环磨阻计算及旁通开启压力趋势等分析, 同时, 进行了测试结果评价。

4.1 节流压降计算分析

根据现场地面测试阶段的泵注排量, 可通过(1)式反算出 17.2 mm 节流嘴对应的旁通开启压力(见表 6)。

表 6 现场测试用节流嘴对应开启排量及压降
Table 6 corresponding opening displacement and pressure drop of the throttle nozzle for field test

测试节流嘴内径/mm	旁通开启时的泵注排量/(L·min ⁻¹)	旁通开启(完全打开)时节流嘴压降/MPa
17.2	400	0.46
	450	0.58
	500	0.71

从表 6 可知, 当节流嘴尺寸为 17.2 mm 时, 节流压降均能达到 0.3 MPa, 满足节流嘴尺寸设计要求; 且当排量在 400 L/min 时, 节流压降值略大于室内实验期间 17 mm 节流嘴、394 L/min 排量对应的压降值(0.45 MPa), 说明现场试验与室内实验节流压降变化趋势一致, 即工具内部转换机构克服弹簧

应变力发生位移的动作可通过排量调节正常完成,不受连续管长度影响。

4.2 连续管及工具循环磨阻计算分析

现场测试期间的各项基础参数为:液体密度 1.0 g/cm^3 ,液体黏度 $0.9784 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,连续管总长度 $4\ 500 \text{ m}$,直管段长度 $2\ 566 \text{ m}$,盘管段长度 $1\ 934 \text{ m}$,滚筒直径 $1\ 828 \text{ mm}$,套管内径 114.3 mm ,连油管外径 50.8 mm ,连续管壁厚 3.96 mm 。根据范宁公式及喷嘴节流压差计算公式,可计算出飓风工具开启前的循环磨阻损失(见表7)。

表7 飓风冲洗工具开启前的循环磨阻计算

Table 7 calculation of circulation resistance before opening hurricane flushing tool

排量/ ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	直管段 磨阻/ MPa	盘管段 磨阻/ MPa	环空 磨阻/ MPa	节流嘴 压差/ MPa	总循环 磨阻/ MPa
410	9.88	10.08	0.37	0.48	20.81
440	11.17	11.45	0.42	0.55	23.59

从循环磨阻计算结果可知,当排量为 410 L/min 和 440 L/min 时,总的循环磨阻(不含泵头压力损失)均接近现场实测的 21.8 MPa 和 24.2 MPa ,说明井下工具串中加入飓风冲洗工具对现场循环磨阻测试不构成影响。

4.3 旁通开启压力趋势分析

从室内试验过程看,当节流嘴尺寸从 $17.0 \sim 18.6 \text{ mm}$,排量从 $412 \sim 503 \text{ L/min}$ 时,节流压降均在 0.5 MPa 左右,说明工具内部转换机构需要克服的弹簧应变力较为稳定,开启压力在可控范围内。但当节流嘴尺寸从 $11.0 \sim 15.0 \text{ mm}$,排量从 $133 \sim 279 \text{ L/min}$ 时,较低的节流压降也能使得旁通开启。因此,为防止弹簧应变力较小,开启压力较低,现场试验中旁通意外开启,建议室内实验后更换弹簧应变力较大的弹簧。

从现场试验过程看,当节流嘴尺寸为 17.2 mm ,排量从 $400 \sim 500 \text{ L/min}$ (现场尽可能控制排量在 $400 \sim 450 \text{ L/min}$ 之间,确保钻屑循环至井口的同时^[13],保护螺杆马达),节流压降从 $0.46 \sim 0.71 \text{ MPa}$ 持续升高,且已大于室内实验期间的旁通开启压力,说明在同样的节流嘴尺寸和排量下,现场改进后的工具具有更大的旁通开启压力,稳定开启排量区间与正常钻磨排量区间的交集更小,意外开启风险更小。

4.4 测试结果评价

由测试结果分析可知:(1)当节流嘴尺寸在

$15.0 \sim 17.0 \text{ mm}$ 之间时,旁通完全开启的排量在正常钻磨排量区间内,会对正常钻磨过程造成干扰;(2)当节流嘴尺寸不小于 17.0 mm 时,旁通开启的临界排量和半开排量有明显的显示;(3)当节流嘴尺寸取 18.0 mm 或 18.6 mm 时,临界开启排量大于最佳钻磨排量,对钻磨效率不构成影响;(4)当节流嘴尺寸不小于 18.6 mm 时,旁通完全开启的排量大于 500 L/min ,与正常钻磨排量区间不存在交集;同时,虽与马达极限排量接近,但短时间泵注不会对马达造成永久性损伤。

5 结论

(1)室内实验期间,飓风工具节流嘴尺寸调整至最大值后,形成的压力降经计算可达 0.53 MPa ,超过设计所需的 0.1 MPa 。因此,弹簧抗形变的力满足旁通正常开启设计要求。

(2)室内实验期间,由于测试所得排量区间之间存在交集,且每个区间范围较小。因此,现场试验期间,改进节流嘴尺寸和弹簧应变力,并严格按排量区间实施泵注,可以避免飓风工具旁通在钻磨阶段异常开启或关闭。

(3)由于液体降阻性能降低,循环压力过高,泵车若长时间大排量泵注,会出现发动机水温过高的现象,但排量过低,又会对正常钻磨作业造成干扰。因此,有必要通过降阻水替代清水或常规钻磨工作液,以降低飓风冲洗工具旁通开启前的循环压力。

(4)为了不对正常钻磨过程造成干扰,旁通开启排量以大于 500 L/min 为宜,此时,排量与马达极限排量接近。因此,需通过精准控制旁通开启排量,确保马达不在极限排量下长时间工作。

(5)通过测试数据可知, 18 mm 和 17 mm 节流嘴对应的完全开启排量均能达到理想开关效果,且不超过马达极限排量,但在现场施工中,考虑到连续油管沿程磨阻、工具内部结构组件以及工具所处作业环境与实验室存在的差异,建议安装 17 mm 节流嘴,以确保地面测试和入井作业中,工具旁通均能顺利开启和关闭。

(6)现场采用 50.8 mm 连续管带 73 mm 飓风工具在 139.7 mm 套管内作业时,通过增加排量,可弥补工具选型的不足,提升钻磨效率。

致谢:感谢低渗透国家工程实验室井下工具与装备实验室科研及技术人员,在飓风冲洗工具室内测试实验过程中,给予的支持和帮助。

参考文献

- [1] 江强,王汤,刘少胡. 连续管钻复合桥塞磨鞋优化设计及应用[J]. 江汉石油职工大学学报, 2020, 33(3): 68-70.
JIANG Qiang, WANG Tang, LIU Shaohu. Optimum design and application of composite bridge plug grinding shoes for coiled tubing [J]. Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers, 2020, 33(3): 68-70.
- [2] 向刚,卢秀德,宋丹. 连续油管钻磨工艺螺杆马达特性分析及现场应用[J]. 钻采工艺, 2014, 37(1): 75-77.
XIANG Gang, LU Xiude, SONG Dan. Characteristics analysis and field application of screw motor used in coiled tubing milling technology [J]. Drilling & Production Technology, 2014, 37(1): 75-77.
- [3] 盖志亮,刘洪翠,辛永安,等. 连续管冲砂洗井技术的应用[J]. 石油机械, 2017, 45(2): 78-82.
GAI Zhiliang, LIU Hongcui, XIN Yong'an, et al. Application of sand flushing and washing technology using coiled tubing [J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(2): 78-82.
- [4] 徐丽萍. 双喷嘴射流泵冲砂洗井系统数值模拟研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2020.
XU Liping. Numerical simulation of sand washing system with double nozzle jet pump [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2020.
- [5] 郭瑞华,黄杰,姚传高,等. 连续管磨钻工艺的研究与应用[J]. 石油机械, 2013, 41(8): 87-89.
GUO Ruihua, HUANG Jie, YAO Chuangao, et al. Research and application of downhole milling technology with coiled tubing [J]. China Petroleum Machinery, 2013, 41(8): 87-89.
- [6] 逢仁德,崔莎莎,韩继勇,等. 水平井连续油管钻磨桥塞工艺研究与应用[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(1): 57-62.
FENG Rende, CUI Shasha, HAN Jiyong, et al. Research and application of drilling, milling-grinding techniques for drilling out composite bridge plugs in coiled tubing in horizontal wells [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(1): 57-62.
- [7] 王文胜. 一趟多层防砂管柱反洗井工艺参数优化研究[J]. 石化技术, 2020, 27(8): 76-78.
WANG Wensheng. Parameters optimization with numerical simulation for reverse washing of multi-layer gravel packing system [J]. Petrochemical Industry Technology, 2020, 27(8): 76-78.
- [8] 任志平. 水平井连续油管钻磨复合桥塞施工参数优化[D]. 重庆: 重庆科技学院, 2019.
REN Zhiping. Analysis and parameter optimization of drilling, milling-grinding techniques for drilling out composite bridge plugs in coiled tubing in horizontal well [D]. Chongqing: Chongqing University of Science and Technology, 2019.
- [9] 尚琼,王伟佳,王汤,等. 连续油管钻复合桥塞工艺研究[J]. 钻采工艺, 2016, 39(1): 68-71.
SHANG Qiong, WANG Weijia, WANG Tang, et al. Research on milling technology of one CP through CT [J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(1): 68-71.
- [10] 白田增,吴德,康如坤,等. 泵送式复合桥塞钻磨工艺研究与应用[J]. 石油钻采工艺, 2014, 36(1): 123-125.
BAI Tianzeng, WU De, KANG Rukun, et al. Research and application of drilling technique of pumping type composite bridge plug [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2014, 36(1): 123-125.
- [11] 孙杰文,张宝瑞,刘刚,等. 高压深井连续油管复合解堵工艺[J]. 油气井测试, 2020, 29(3): 45-49.
SUN Jiewen, ZHANG Baorui, LIU Gang, et al. Compound plug removal technology using coiled tubing for high pressure wells [J]. Well Testing, 2020, 29(3): 45-49.
- [12] 来国荣,安崇清,范琳沛. 水平井连续油管钻磨桥塞技术分析及应用[J]. 石油工业技术监督, 2016, 32(1): 54-57.
LAI Guorong, AN Chongqing, FAN Linpei. Analysis and application of coiled tubing bridge plug drilling and grinding technology for horizontal wells [J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2016, 32(1): 54-57.
- [13] 平恩顺,张曙光,胡永雄,等. 水平井连续油管高效钻磨技术研究[J]. 钻采工艺, 2018, 41(5): 56-58.
PING Enshun, ZHANG Shuguang, HU Yongxiong, et al. Research on efficient milling by coiled tubing in horizontal wells [J]. Drilling & Production Technology, 2018, 41(5): 56-58.

编辑 吴志力

第一作者简介:高森,男,1982年出生,工程师,2006年毕业于陕西科技大学测控技术与仪器专业,现从事连续油管修井技术服务及工程技术研究方面的工作。电话:029-86021700,18092493479;Email:277103489@qq.com。通信地址:陕西省咸阳市朝阳七路长庆井下生产科研基地,邮政编码:712000。