

· 试油试采技术 ·

文章编号: 1004-4388(2025)01-0021-07

水平井连续油管快速钻磨桥塞技术优化与应用

李沅岷¹, 汤艳², 张骏强¹, 李运辉¹

1. 中石化西南石油工程有限公司井下作业分公司 四川德阳 618000

2. 中石化西南石油工程有限公司钻井工程研究院 四川德阳 618000

通讯作者: Email: 2732999712@qq.com

项目支持: 中石化石油工程重大专项课题“川南超深层页岩气压裂提效关键技术研究与应用”(SG2102-03K)

引用: 李沅岷, 汤艳, 张骏强, 等. 水平井连续油管快速钻磨桥塞技术优化与应用[J]. 油气井测试, 2025, 34(1): 21-27.

Cite: LI Yuanmin, TANG Yan, ZHANG Junqiang, et al. Optimization and application of coiled tubing quick bridge plug milling technology in horizontal wells[J]. Well Testing, 2025, 34(1): 21-27.

摘要 针对水平井可溶桥塞数量多与加砂量的增加造成常规连续油管钻磨桥塞施工效率低、故障频发的难题。基于连续油管钻磨桥塞技术原理、入井工具特点及钻磨液携屑返排特征,结合现场实践,优化工艺、细化参数,提出针对多桥塞、强加砂水平井钻磨桥塞施工方案:优化入井工具长度,优选五翼平底磨鞋,钻压选择 13~14 kN,钻磨液黏度为 25~30 mPa·s,排量>450 L/min,同时,基于加砂量与桥塞间距,增加上提连续油管至造斜点频率,在直井段活动循环冲洗至井筒无残留物。经现场多口井应用,单桥塞钻磨时间减少 78%(<10 min),一趟次钻磨桥塞数达 25 个,返出磨屑直径减小 50%以上、磨屑总重量提高 3 倍,显著提高施工效率、减少故障发生。研究成果可为水平井连续油管钻磨桥塞施工提供理论指导。

关键词 连续油管钻磨桥塞;水平井;可溶桥塞;施工参数优化;钻磨液;磨屑返排;井下工具

中图分类号: TE24

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2025.01.004

Optimization and application of coiled tubing quick bridge plug milling technology in horizontal wells

LI Yuanmin¹, TANG Yan², ZHANG Junqiang¹, LI Yunhui¹

1. Downhole Operation Company, Southwest Petroleum Engineering Co., Ltd., Sinopec, Deyang, Sichuan 618000, China

2. Drilling Engineering Research Institute, Southwest Petroleum Engineering Co., Ltd., Sinopec, Deyang, Sichuan 618000, China

Abstract: Addressing the challenges of low efficiency and frequent failures in conventional coiled tubing plug milling operations due to the increased number of soluble bridge plugs and sand content in horizontal wells, an optimized approach based on the principles of coiled tubing bridge plug milling, the characteristics of downhole tools, and the cuttings return with milling fluid was proposed. By combining field practice, the process was optimized, and parameters were refined to develop a bridge plug milling operation plan tailored to multi-plug, high-sanding-content horizontal wells. The optimized plan includes: length optimization of downhole tools; selection of five-wing flat-bottom milling shoes; selection of drilling pressure ranging from 13 to 14 kN; use of milling fluid with viscosity between 25~30 mPa·s; and flow rate exceeding 450 L/min. Additionally, based on the sand content and bridge plug spacing, the frequency of pulling the coiled tubing to the kickoff point was increased, and in the vertical interval, active circulation was conducted to flush out any remaining debris. Field application in multiple wells demonstrates a 78% reduction in single bridge plug milling duration (to less than 10 minutes), with up to 25 bridge plugs milled in a single run. The diameter of returned cuttings was reduced by more than 50%, and the total weight of cuttings retrieved increased threefold, significantly improving operational efficiency and reducing failures. The research results can provide theoretical guidance for coiled tubing bridge plug milling operations in horizontal wells.

Keywords: coiled tubing bridge plug milling; horizontal well; soluble bridge plug; operational parameter optimization; milling fluid; cuttings return; downhole tools

近年来,可溶桥塞已成为分段体积压裂储层改造中使用的主要分段工具^[1],随着川南页岩气与川西致密气的勘探开发持续深入,单井体积压裂使用的可溶桥塞的数量最多已增至 30 余个,储层压裂改

造后为高效安全的去除桥塞保证井筒通畅,减少外来液体在井筒内滞留时间,降低储层的伤害^[2],常采用连续油管带磨鞋进行钻磨桥塞作业。国内外针对提高连续油管钻磨桥塞的效率、降低故障率等

方面展开了大量研究。国外研究人员 DUREY D 等^[3]通过优化各施工参数在 2000 年之前就实现了对单桥塞钻磨时间在 15~25 min。国内连续油管发展发展较慢,现研究方向主要集中在入井工具串优化、施工参数优化、钻磨液优化、施工工艺设计优化四个方面。来国荣等^[4]与陈先昊等^[5]基于现场施工经验,针对特定地区采用“低钻压、高转速、小进尺”的施工设计思路,实现钻磨桥塞作业安全高效进行。逢仁德等^[6]改进入井工具以增加钻磨桥塞效率,优化施工工艺弥补水力能效的不足造成的磨屑返排困难。张正道^[7]考虑到钻磨桥塞时桥塞下部存在圈闭压力的问题,对井口、地面流程进行优化,减少井控问题发生。于洋^[8]提出连续油管泡沫钻塞技术,确定泡沫钻塞液的配方为 1.2%起泡剂 JY+0.15%稳泡剂 HPAM,有效提高页岩气井钻塞效率。杜承强等^[9]通过配置优化工作液体系,在保证排量的同时有效降低了泵压,使钻塞动力更充足,减少连续油管卡钻与自锁概率。金强^[10]通过优化设备、入井工具与钻磨液之间的匹配关系,针对复杂情况提出了一种了施工作业标准做法。

随着分段体积压裂技术大规模应用,单井使用的可溶桥塞数量逐渐增加、种类和型号逐渐丰富,加之井下复杂情况难以预测,导致钻磨桥塞施工时效难以保障,故障率呈现上升趋势。通过研究优化磨鞋类型与各入井工具结构、施工参数、钻磨液性能,提出一套连续油管钻磨桥塞施工工艺,应用于川南页岩气和川西致密气气井 10 余口,钻磨单个桥塞所用的时间减少至 10 min 以内,卡钻等事故率显著降低。

1 连续油管钻磨桥塞技术难点

连续油管钻磨桥塞具有效率高、保护储层等优点,但不能轴向转动。通过泵入钻磨液对螺杆马达做功带动磨鞋高速转动,同时通过注入头作用于连续油管向下施加轴向力,使得磨鞋保持对桥塞持续钻磨,钻磨桥塞后形成的较小磨屑被磨鞋水眼喷出的钻磨液携带通过环空返排至井口。重复该过程可实现对井筒桥塞的持续钻磨。该技术主要难点集中在:

(1)井筒清洁难度大,卡钻事故频发。可溶桥塞数量和加砂量的增加,导致井内残留物增多。磨鞋类型与参数选择不当易造成磨屑粒径较大,返排困难,井筒内堆积导致卡钻。

(2)连续油管易自锁、长工具串易遇阻。连续油管强度、刚度较低,长水平段中轴向力过大时易发生屈曲变形和自锁,难以保持合适钻压维持磨鞋对桥塞的持续钻磨。部分井井眼曲率较小,过长的工具串通过困难。

(3)钻磨液携屑返排困难。磨屑井筒内运移受到钻磨液性能参数以及排量的影响,使用黏度较小的钻磨液与较小的排量难以满足大粒径磨屑返排。

2 入井工具优化

合理选取磨鞋的参数与种类、优化入井工具的组合,可以在提高钻磨可溶桥塞效率的同时有效避免卡钻等事故。

2.1 磨鞋优化

磨鞋的选择应满足桥塞被钻磨后的磨屑上返通道通畅、钻磨过程中与桥塞接触面积足够以及磨铣面与铣齿强度足够等条件。

(1)磨鞋外径的选择:基于现场施工经验,磨鞋外径选择小于生产套管内径 6~10 mm,针对套变井宜选用外径小于套变点内径 6~10 mm 的磨鞋,若钻磨过程中钻磨无进尺,宜选用更小尺寸磨鞋。

(2)磨鞋磨铣面的优化:平底磨鞋的底部平滑,无明显的切削齿或凸起结构,可产生均匀的磨削力,同时减少对井筒的损害。较多的磨鞋翼数可对桥塞充分碾磨,形成较小的磨屑,促进返排,减少堵塞、卡钻风险。因此水平井中平底磨鞋更适用。

(3)磨鞋导流槽的设计:理想的磨鞋应具有较宽的流道,以确保较大碎屑能够顺利通过,防止碎屑在导流槽内卡住。

选择采用硬质合金钢制造的大导流槽五翼平底磨鞋,磨鞋外径大小基于井筒内径选择。

2.2 入井工具串优化

目前国内主要油田在连续油管钻磨桥塞入井管串为连续油管+外卡瓦连接接头+双瓣式单流阀+震击器+水力振荡器+丢手+螺杆马达+磨鞋^[11],存在以下问题:

(1)螺杆马达受到排量影响,钻磨过程中长时间接触塞面发生憋泵现象,造成螺杆马达损坏。

(2)震击器存在缩径区域,在磨屑、支撑剂上返情况下,容易在此处堆积,造成砂卡的现象,导致卡钻等问题

(3)使用震击器与水力振荡器会导致入井工具串过长,易发生自锁。

根据钻磨桥塞采用软件模拟连续油管是否存在自锁情况,决定是否安装水力振荡器;桥塞溶解程度与井内压裂加砂量大小选择是否安装震击器。优化后的入井工具串为:Φ50.8 mm 连续油管+Φ73 mm 外铆钉接头+Φ73 mm 双瓣式单向阀+Φ73 mm 液压丢手+螺杆马达+五翼平底磨鞋。

3 钻磨桥塞工艺参数

研究表明,通过精准控制施工排量、钻压以及泵压等参数可实现持续钻磨桥塞,同时维持井筒清洁。

3.1 排量

钻磨液排量的大小关系到螺杆马达输出扭矩以及环空的磨屑、压裂残留支撑剂返排效果。水平段桥塞磨屑返排出井口会经历水平井段(井斜角 60°~90°)、斜井段(井斜角 30°~60°)、直井段(井斜角 0°~30°)共三个井段。研究表明磨屑在不同井段有着不同的运移机理^[12],这些井段的所需带动磨屑返排基本钻磨液排量表达式如下:

(1)直井段(井斜角 0°~30°)

直井段磨屑受到重力以及钻磨液性能参数影响,刘希圣^[13]提出磨屑在直井段中的沉降末速公式为

$$v_1 = \frac{0.707d_s(\rho_s - \rho_1)^{2/3}}{(\rho_1\mu)^{1/3}} \tag{1}$$

式中: v_1 为磨屑沉降末速,m/s; d_s 为球形磨屑的粒径,m; ρ_s 为磨屑的密度,kg/m³; ρ_1 为钻磨液的密度,kg/m³; μ 为钻磨液黏度,mPa·s。

研究表明钻磨液直井段环空上返速度大于磨屑的沉降速度 1.7 倍以上时磨屑处于上升状态^[14],为保证磨屑便顺利返出至井口,直井段环空止动返速为

$$v_1 = 1.7v_1 \tag{2}$$

式中: v_1 为直井段环空止动返速,m/s。

直井段钻磨所需的最小的排量表达式为

$$Q_{\min 1} = 2\pi(R^2 - r^2)v_1 \tag{3}$$

式中: $Q_{\min 1}$ 为直井段钻磨所需的最小的排量,m³/s; R 为套管半径,m; r 为油管半径,m。

(2)斜井段(井斜角 30°~60°)

斜井段环空止动返速作为阻止磨屑在重力作用下沿该井段井筒下移的环空止动返速,其受到斜井段地层岩性参数和井内液体流变性能的影响,公式为^[15]

$$v_2 = \frac{\delta\tau_0}{2(r_1 - r_2)Kn + 1} \times \left[(r_1 - r_2) \left(\frac{r_1 - r_2}{\delta} - 1 \right)^{\frac{n+1}{n}} - \frac{\delta n}{2n + 1} \left(\frac{r_1 - r_2}{\delta} - 1 \right)^{\frac{2n+1}{n}} \right] \tag{4}$$

式中: v_2 为斜井段环空止动返速,m/s; δ 为环空流核宽度,m; r_1 、 r_2 为环空外、内径,m; τ_0 为钻磨液静切应力,MPa; K 为钻磨液稠度系数,Pa·s ^{n} ; n 为流性指数,无因次。

基于斜井段的环空止动返速,计算得到该井段钻磨所需的最小的排量表达式为

$$Q_{\min 2} = \pi(R^2 - r^2)v_2 \tag{5}$$

式中: $Q_{\min 2}$ 为斜井段钻磨所需的最小的排量,m³/s;

(3)水平井段(井斜角 60°~90°)

泥砂瞬时起动流速模型计算水平段起动流速的公式为^[16]

$$v_3 = 0.0175 \left(\frac{d'}{10} \right)^{1/6} \left[3.6 \frac{\rho_s - \rho_1}{\rho_1} g d_s + \left(\frac{r_0}{r'_0} \right)^2 \left(\frac{\xi_0}{d_s} + \frac{gh_w\delta_w^3}{d_w^3} \right) \right]^{0.5} \tag{6}$$

式中: v_3 为磨屑在水平井段的瞬时起动流速,m/s; d' 取决于球状磨屑粒径(见表 1),m; r_0 为砂床面球形磨屑干容重,kg/m²; r'_0 为球形磨屑颗粒稳定干容重,kg/m²; h_w 为薄膜水厚度,m; δ_w 为薄膜水厚度参数,取值为 2.31×10⁻⁸ m(770 个水分子厚度); ξ_0 为综合黏结力参数,其值与颗粒的物理化学性质有关,对于一般泥砂取值为 1.75×10⁻⁶ m³/s²。

表 1 d' 的取值范围

Table 1 d' value range

磨屑直径/m	d' 取值/m
<0.000 5	0.000 5
0.000 5~0.01	磨屑直径
>0.01	0.01

基于水平段的磨屑瞬时启动流速后,计算得到该井段的钻磨所需的最小的排量表达式为

$$Q_{\min 3} = \pi(R^2 - r^2)v_3 \tag{7}$$

式中: $Q_{\min 3}$ 为水平井段钻磨所需的最小的排量,m³/s。

在确保满足上返携屑所需的最小流速、不超过螺杆马达额定排量的条件下,钻磨桥塞需要使用最小理论排量应大于三个井段的理论排量中的最大值,应尽可能选择大排量的方案,尽量加大环空返速,利于携带出磨屑,从而有效减少油管卡钻等

风险。

结合现场拆解捕屑器发现磨屑为类球状物体，最大直径为 70 mm。结合公式(1)~(7)对不同直径下的磨屑在三个井段内的上返所需最小排量进行计算,设备、钻磨液等相关参数如表 2 所示,排量计算结果见图 1。

表 2 排量计算相关参数

Table 2 Numerical simulation parameters

参数	数值
套管内径/mm	121.36
连续油管外径/mm	50.8
钻磨液(清水)密度/(g·cm ⁻³)	1
磨屑密度/(g·cm ⁻³)	7.8
磨屑直径/mm	0.5~70

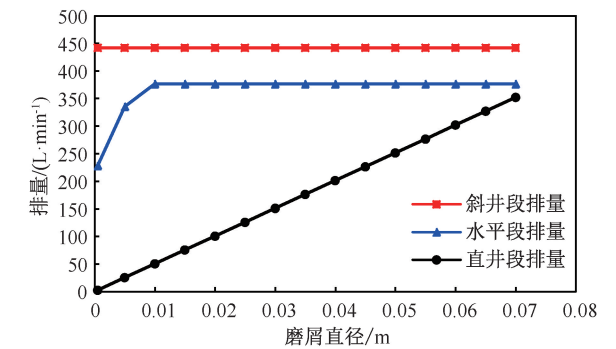


图 1 不同井段最小排量与磨屑直径变化关系
Fig.1 The relationship between the minimum displacement and the diameter of the grinding chips in different well sections

由图 1 可知,最大直径为 70 mm 的磨屑在斜井段中达到顺利返排的所需最小排量为 442 L/min,该排量大于水平井段的所需最小排量(376 L/min)与直井段的所需最小排量(352 L/min)。建议在水平段每钻磨一定数量桥塞后,循环洗井的同时缓慢上提磨鞋至造斜点以上,期间可在斜井段来回拖动循环洗井,促进斜井段磨屑返排,钻磨液量应大于直井段井筒容积,观察无返出物后继续下放钻磨桥塞。

针对漏失井、低压井可采用大直径连续油管,在增加排量的同时,减少环空横截面积,增加环空返速。

3.2 钻压

钻压是影响钻头的钻进效率和桥塞破碎效果的主要因素。在连续油管下入时,其受力包括自重、注入头施加的向下轴向力、浮力及井底压力产生的向上轴向力。连续油管的形变受到轴向力影响,当轴向力达到正弦屈曲临界值时,连续油管由线性变为正弦曲线。若轴向力持续增加,油管可能

进入螺旋屈曲并最终锁死。垂直井段连续油管易发生弯曲,此时的轴向力主要用于克服直井段的摩擦阻力。而在弯曲井段,油管屈曲的可能性较低^[17]。

(1)垂直井段连续油管临界螺旋屈曲载荷为

$$F_{hel1} = \sqrt[3]{5.55(EIq_r^2)} \tag{8}$$

式中: F_{hel1} 为直井段轴向压缩正弦屈曲临界力,N; E 为弹性模量,N/m²; I 为惯性矩,m⁴; q_r 为油管单位长度浮重,N。

(2)斜井段连续油管临界螺旋屈曲载荷为

$$F_{hel2} = \frac{8EI}{r_e R} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{q_r \sin \alpha r_e^2}{2EI}} \right] \tag{9}$$

式中: F_{hel2} 为弯曲井段轴向压缩正弦屈曲临界力,N; α 为井斜角,°; r_e 为套管半径与油管半径的差值,m。

(3)水平井段连续油管发生螺旋屈曲的临界压力为

$$F_{hel3} = 4 \sqrt{\frac{2EIq_r}{r_e}} \tag{10}$$

式中: F_{hel3} 为水平井段轴向压缩正弦屈曲临界力,N。

为避免连续油管在井筒内形成螺旋弯曲导致自锁、减少连续油管磨损。计算得到实际施工时,直径为 50.8 mm 的连续油管在内径为 121.36 mm 的生产套管内计算得到 F_{hel} 为 12~14 kN,钻进时钻压应该控制在此范围内。

3.3 泵压

在钻磨桥塞过程中,由注入泵提供的总泵压 p_a 为全部循环中各部分压力损耗与井口压力 p_4 的总和。总泵压表达式为

$$p_a = p_1 + p_2 + p_3 + p_4 \tag{11}$$

式中: p_a 为总泵压,MPa; Δp_1 为连续油管内部流体压降,MPa; Δp_2 为环空流体压降,MPa; Δp_3 为经过螺杆马达、磨鞋等入井工具的局部变截面流体压降,MPa; p_4 为井口压力,MPa。

连续油管内部流体压降为连续油管在滚筒螺旋缠绕内部流体压降与井内连续油管内部流体压降之和。连续油管缠绕在滚筒上的压降受到连续油管弯曲半径(滚筒直径)、缠绕在滚筒上的圈数、泵入连续油管的钻磨液的排量、钻磨液性能影响。井内连续油管内部流体压降受到直井段摩阻、斜井段摩阻、水平井段摩阻的影响。为简化计算使用直径段的公式进行总体计算^[18]。

(1)连续油管内流体压降表达式为

$$\Delta p_1 = \Delta p_{\text{螺旋}} + \Delta p_{\text{井内}} \tag{12}$$
$$\Delta p_{\text{螺旋}} = \begin{cases} \frac{2.39\rho L Q^2}{\pi^2 r^5 Re_f^{0.195}} \left(\frac{2r}{D}\right)^{0.1} & \text{牛顿流体紊流状态} \\ \frac{30.4a\rho L Q^2}{\pi^2 r^5 Re_f^{0.78b}} \left(\frac{2r}{D}\right)^{0.1} & \text{非牛顿流体紊流状态} \\ \frac{167.04\rho L Q^2}{\pi^2 r^5 Re_f^{0.6}} \left(\frac{2r}{D}\right)^{0.3} & \text{牛顿流体及非牛顿} \\ & \text{流体层流状态} \end{cases} \tag{13}$$

$$\Delta p_{\text{井内}} = \frac{32a\rho L Q^2}{\pi^2 d_i^5 Re^b} \tag{14}$$

式中: ρ 为流体密度,kg/m³; r 为连续油管半径,m; L 为连续油管长度,m; Q 为流体体积流量,m³/s; D 为连续油管滚筒直径,m; π 为圆周率,无量纲。

Re_f 为钻磨液雷诺数、 a 和 b 为计算参数,无因次,表达式为

$$Re_f = \frac{\rho_i v_i^{(2-n)} D_i^n}{\mu_i 8^{(n-1)}} \left(\frac{4n}{3n-1}\right)^n \tag{15}$$

对于不同的雷诺数 Re_f 、 a 、 b 参数:层流 ($Re_f < 3\,470 - 1\,370n$): $a = 16$, $b = 1$; 紊流 ($Re_f > 4\,270 - 1\,370n$): $a = \frac{\lg n + 3.93}{50}$ 、 $b = \frac{1.75 - \lg n}{7}$ (式中: n 为流性指数)。

(2)井内连续油管压降受到连续油管参数、钻磨液体性质磨屑以及砂床厚度等因素的影响。

实验获得井筒内环空内流体压降表达式为

$$\Delta p_2 = \frac{0.026\Delta p_0}{f} \left[\frac{v_2}{g(r_1 - r_2)} \frac{1}{s - 1} \right]^{-1.25} + (1 + 0.005\,8H)\Delta p_0 \tag{16}$$

式中: H 为无因次磨屑床厚度; Δp_0 为环空无固相时压耗,MPa; s 为磨屑与钻磨液的相对密度比值,无因次; f 为摩擦系数。

(3)入井工具的局部变截面流体压降主要由螺杆马达压耗与磨鞋压耗构成,其表达式为

$$\Delta p_3 = \frac{M_T \omega_T}{Q} + \frac{\rho Q^2}{2c^2 A_0^2} \tag{17}$$

式中: M_T 为马达的理论扭矩,N·m; ω_T 为理论角速度,r·s⁻¹; c 为喷嘴流量系数,无因次; A_0 为磨鞋上总的喷嘴出口截面积,m²。

相同排量下,应选取性能达标的钻磨液能有效降低连续油管内的流体压降,减少非必要能量损耗,保证螺杆马达扭矩处于最佳状态。研究发现环

空流体压降在水平段相较于直井段高出 4~5 倍,且随着钻磨液雷诺数增加 ($Re_f > 4\,000$) 此现象加剧。为减少水平段环空流体压降带来的流体返速下降,确保钻磨液携磨屑与残余支撑剂顺利返排,在水平井段每钻磨 1 个桥塞应上提油管活动循环至上个桥塞位置,小范围活动循环洗井,钻磨液量应大于该桥塞上部水平段容积,促进磨屑及残留支撑剂返排。每钻磨 3~5 个桥塞上提连续油管至造斜点及以上位置进行活动循环,活动循环期间观察悬重,防止磨屑与支撑剂沉积导致连续油管遇卡,钻磨液量应大于直井段井筒容积,观察无砂返出后继续下放钻磨桥塞。考虑目前体积压裂施工的加砂量逐渐增加,桥塞间隔间的残留支撑剂数量难以预测,如果桥塞间隔较大 (>150 m),两桥塞之间井筒内的支撑剂过多,返排困难,易造成连续油管遇卡。此时应该同时考虑桥塞数量及其相互间隔距离,施工中可减少通过桥塞数量及时上提连续油管至造斜点以上,活动循环洗井,可以有效减少复杂情况发生。

4 钻磨液

连续油管钻磨液是一种用于连续油管钻磨作业的特殊液体介质,其应具有强稳定性并可多次循环使用。结合现场施工实践,合适的钻磨液可以在维持环空返速同时,相较于清水可以降低泵压 60%~80%,亦可有效带出磨屑出井。钻磨液材料组成通过实验确定,以滑溜水为基液,并添加不同类型液体达到增加黏度、降低摩阻等目的,增加适当 KCl 溶液可以适当加快可溶桥塞溶解。

据实验得到返出物为大量支撑剂混合大颗粒桥塞未溶解物的返出物异常井的钻磨液配方为:滑溜水+降阻剂+5%~10%KCl。黏度:25~35 mPa·s。

5 现场应用

以川南页岩气 W30 平台共计 6 口井中进行连续油管钻磨桥塞施工为例,前期按照常规方法钻扫,存在钻磨桥塞用时较长,期间发生卡钻等复杂情况。修改入井工具,使用优化的施工方案在该平台钻磨桥塞施工,获得成功。不同的钻磨工具及工艺对比见表 3。

W30-8HF 井为水平井,完钻井深 5 800 m,水平段长 1 600 m,桥塞个数累计 22 个,钻磨桥塞施工首趟采用入井工具为:Φ50.8 mm 油管+Φ73 mm

表 3 不同钻磨工艺施工效果对比

Table 3 Comparison of construction effects of different drilling and grinding processes

井号	磨鞋	排量/ (L·min ⁻¹)	钻压/ kN	泵压/ MPa	钻磨液黏度/ (mPa·s)	单趟钻磨 桥塞个数	钻磨单个 桥塞/min
W30-8HF	Φ102 mm 三翼平底磨鞋	350~400	6~12	36~42	10~20	5	17.00
W30-8 HF	Φ96 mm 五翼平底磨鞋	400~450	11~14	28~31	25~30	17	4.50
W30-2 HF		430~450	10~15	35~40	25~30	17	4.59
W30-4 HF		450	10~15	41~43	25~30	17	1.47
W30-9 HF		450	10~13	45~49	21~26	25	2.91
W30-3 HF		400~420	12~16	36~45	25~30	17	6.63
W30-7 HF	Φ89 mm 五翼平底磨鞋	450	8~12	45~51	20~25	25	1.23

铆钉接头+Φ73 mm 单流阀+Φ73 mm 液压丢手+Φ73 mm 震击器+Φ73 mm 螺杆马达+Φ102 mm 三翼磨鞋(水眼 8 mm×4),该井前期加砂强度较大,加之井下桥塞溶解情况不明,前期钻磨由于钻磨液选用压裂液,黏度 10~20 MPa,排量选用 350~400 L/min,每钻磨 3~5 个桥塞上提至造斜点以上定点循环洗井一周,钻磨至第 5 个桥塞时突遇圈闭压力释放,井口压力急剧上升,大量磨屑与支撑剂混合物冲出,因为排量选择较小、钻磨液黏度较低难以满足携砂返排的条件,造成连续油管砂埋造成卡钻。解卡后,通过采用优化后的施工方案,选用外径小于井筒内径 5~10 mm 的五翼平底磨鞋,增加排量接近 450 L/min,提高钻磨液黏度到 25~30 mPa·s,考虑桥塞间隔距离为 150~200 m,加砂量 2.1 m³/m,钻磨桥塞施工按照钻磨距离(每前进 300~400 m)上提连续油管至造斜点以上进行活动循环,一趟钻完成后继 17 个桥塞的钻扫。后续施工井钻磨桥塞实现一趟最多钻磨 25 个桥塞。

对比改进前后两次钻磨桥塞的磨屑参数如表 4 所示。

表 4 工艺改进前后磨屑参数对比

Table 4 Comparison of grinding parameters before and after process improvement

磨鞋种类	三翼磨鞋	五翼平底磨鞋
钻压/kN	6~12	11~14
磨屑直径/mm	5.6~66	2~34
返排出磨屑重量/kg	6.0~11.2	18.3~22.6

由表 3、表 4 可知,采用改进后的施工方案,单桥塞钻磨平均时间减少 78%(由 17 min 减少至 1~7 min),随着磨鞋翼数增加,返出磨屑直径减小 50%以上、磨屑总重量提高 3 倍。在增加施工效率的同时,保证了井筒的清洁。调研使用改进后钻磨桥塞施工方案的该平台剩余 5 口井以及其余气井 10 余口,均未发生卡钻等事故。

6 结论

(1) 根据水平井以及水平井钻塞工艺特点,优化选取磨鞋的参数与种类选择、优化入井工具的组合。针对漏失井、低压井可采用大直径连续油管。

(2) 选择钻压时应考虑连续油管的屈曲载荷,外径 50.8 mm 的连续油管钻进钻压应该控制在 13 kN 左右,可有效防止油管屈曲带来的设备损坏、油管自锁问题。

(3) 钻磨液性能的优化在提高排量的同时能降低泵压,还要有足够的黏度(25~30 mPa·s),便于磨屑返排出井口,由具体井况选择合理参数的钻磨液。

(4) 在水平井段每钻磨 1 个桥塞后应上提油管活动循环至上个桥塞位置循环洗井,同时还应考虑桥塞数量以及桥塞间隔距离,提高上提连续油管至造斜点及以上位置进行活动循环频率,防止磨屑与支撑剂沉积导致连续油管遇卡,观察无返出物后可继续下放钻磨桥塞。

(5) 现场应用表明,优化后的连续油管钻磨桥塞工艺可以有效降低单桥塞钻磨时间(<10 min),单趟最多钻磨桥塞数量多达 25 个,卡钻等复杂情况显著降低。

致谢:衷心感谢中石化西南石油工程公司井下作业分公司领导及同事在论文编写过程中提供的帮助。

参考文献

[1] 廷亮. 连续油管通钻可溶桥塞工艺在页岩气井重复压裂中的应用[J]. 江汉石油职工大学学报, 2023, 36(1): 24~26.

TING Liang. Application of soluble plug drilling-out technology with coiled tubing in refracturing shale gas wells [J]. Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers, 2023, 36(1): 24~26.

[2] 刘巨保, 王艳, 兰乘宇, 等. 复合桥塞钻削过程力学分析[J]. 石油矿场机械, 2016, 45(10): 1~6.

LIU Jubao, WANG Yan, LAN Chengyu, et al. Mechanical

- analysis of composite bridge-plug drilling process[J]. Oil Field Equipment, 2016, 45(10): 1-6.
- [3] DUREY D, DEGENER D. Bridge-plug millout with coiled tubing-case histories[R]. SPE 60725, 2000.
- [4] 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. Coiled tubing bridge plug drilling and grinding technology analysis and application [J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2016, 32(1): 54-57.
- [5] 陈先昊, 卢超. 连续油管钻磨桥塞工艺在克拉玛依玛湖区块的应用[J]. 工程技术研究, 2020, 5(11): 6-8.
- CHEN Xianhao, LU Chao. Application of coiled tubing drilling and grinding bridge plug technology in Karamayma Lake block [J]. Engineering and Technological Research, 2020, 5(11): 6-8.
- [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.
- PANG 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] 张正道. 涪陵页岩气田暂闭井连续油管钻塞工艺[J]. 石化技术, 2019, 26(6): 112-114.
- ZHANG Zhengdao. Coiled tubing drilling technology for temporary closed wells in fuling shale gas field [J]. Petrochemical Industry Technology, 2019, 26(6): 112-114.
- [8] 于洋. 连续油管泡沫钻塞技术研究与应用[J]. 复杂油气藏, 2022, 15(2): 90-96.
- YU Yang. Research and field application of foam drilling technology for drilling out composite bridge plugs in coiled tubing [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2022, 15(2): 90-96.
- [9] 杜承强, 宋文, 唐永生, 等. 连续油管带压快钻桥塞技术研究[J]. 中外能源, 2023, 28(5): 96-101.
- DU Chengqiang, SONG Wen, TANG Yongsheng, et al. Research on fast drilling bridge plug technology of coiled tubing [J]. Sino-Global Energy, 2023, 28(5): 96-101.
- [10] 金强. 页岩气井连续油管钻塞技术研究应用[J]. 新型工业化, 2021, 11(6): 233-235.
- JIN Qiang. Research and application of continuous tubing drilling plug technology in shale gas wells [J]. The Journal of New Industrialization, 2021, 11(6): 233-235.
- [11] 杨海. 页岩气水平井分段桥塞处理技术研究[D]. 西南石油大学, 2021: 1-46.
- YANG Hai. Research on segmented bridge plug treatment technology for shale gas horizontal wells [D]. Southwest Petroleum University, 2021: 1-46.
- [12] 宋先知, 李根生, 王梦抒, 等. 连续油管钻水平井岩屑运移规律数值模拟[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(2): 28-32.
- SONG Xianzhi, LI Gensheng, WANG Mengshu, et al. Numerical simulation on cuttings carrying regularity for horizontal wells drilled with coiled tubing [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(2): 28-32.
- [13] 刘希圣. 钻井工艺原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1981: 55-120.
- [14] 赖枫鹏, 李治平, 岑芳, 等. 水平井水力冲砂最优工作参数计算[J]. 石油钻探技术, 2007, 35(1): 69-71.
- LAI Fengpeng, LI Zhiping, CEN Fang, et al. Optimum working parameters for hydraulic sand washing in horizontal wells [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(1): 69-71.
- [15] 李洪乾, 杲传良, 任耀秀, 等. 水平井钻井第二洗井区环空止动返速的计算[J]. 石油钻探技术, 1995, (增刊 1): 27-29.
- LI Hongqian, GAO Chuanliang, REN Yaoxiu, et al. Calculations of annular slip velocity in the 2nd cleaning area during horizontal drilling [J]. Petroleum Drilling Techniques, 1995, (Suppl. 1): 27-29.
- [16] 窦国仁. 再论泥沙起动流速[J]. 泥沙研究, 1999(6): 1-9.
- DOU Guoren. Incipient motion of coarse and fine sediment [J]. Journal of Sediment Research, 1999(6): 1-9.
- [17] 曲宝龙, 安峰, 李燃, 等. 基于摩擦系数的连续油管钻桥塞力学特性研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(9): 56-60.
- QU Baolong, AN Feng, LI Ran, et al. Research of the mechanics characteristic of the coiled tubing drillable bridge plug base the friction coefficient [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(9): 56-60.
- [18] 陈勋, 闫铁, 毕雪亮, 等. 连续油管管内摩擦压降计算模型与敏感性分析[J]. 石油钻采工艺, 2014, 36(5): 13-17.
- CHEN Xun, YAN Tie, BI Xueliang, et al. Calculation model for internal frictional pressure drop in coiled tubing and analysis of sensitivity [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2014, 36(5): 13-17.

编辑 陈晓微

第一作者简介:李沅岷,男,1998 年出生,硕士,助理工程师,2023 年毕业于西南石油大学石油与天然气工程专业,主要从事带压作业技术工作。电话: 18381018187, Email: 2732999712@qq.com。通信地址:四川省德阳市旌阳区金沙江西路 699 号井下作业分公司,邮政编码:618000。