

## 自研水力振荡器在川渝地区 连续管水平井作业中的应用\*

卢秀德, 刘佳林, 刘志尧, 孙兆岩, 马小龙  
(中国石油集团川庆钻探工程有限公司 井下作业公司, 成都 610000)

**摘 要:** 连续管在水平井施工作业时, 特别是长水平段、超长水平段、井眼轨迹弯曲、上翘井, 常因自身螺旋锁定, 出现不能到达目标深度、钻磨钻压难以加载等问题, 严重影响施工进度和施工质量。为解决连续管下入自锁的问题, 对标国外水力振荡器, 对定转子的线形进行了优化, 自主开发研制了一种水力振荡器。室内测试结果表明, 该水力振荡器的压降为2~5.4 MPa, 达到了设计要求。该水力振荡器在威X井进行了现场对比试验, 各项指标满足设计和使用要求, 降低了井下管柱在前进中的摩擦阻力和扭矩, 有效传递了钻压, 增加了连续管的下入深度。在川渝地区现场使用249井次, 效果显著, 能有效缩短施工周期, 提高施工质量。该水力振荡器实现了国产化, 打破了国外技术垄断, 缩短了供货周期, 节约了成本。

**关键词:** 连续管; 水力振荡器; 水平井; 长水平段; 自锁

**中图分类号:** TE931.2

**文献标识码:** B

**DOI:** 10.19291/j.cnki.1001-3938.2023.07.013

### Application of Self-developed Hydraulic Vibrator in Coiled Tubing Horizontal Wells Operation in Sichuan and Chongqing Area

LU Xiude, LIU Jialin, LIU Zhiyao, SUN Zhaoyan, MA Xiaolong

(PetroChina Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd., Underground Operation Company, Chengdu 610000, China)

**Abstract:** During construction of coiled tubing in horizontal wells, especially in wells with long horizontal section, ultra long horizontal section, curved wellbore trajectory and upturned wells, problems such as unable to reach the target depth and difficult loading of drilling bit pressure etc. often occur due to its own spiral locking, which seriously affects the construction progress and construction quality. In order to solve the problem of coiled tubing running in self-locking, a hydraulic oscillator is independently developed by benchmarking with foreign hydraulic oscillators and optimizing the alignment of stator and rotor. The indoor test results show that the pressure drop of the hydraulic oscillator is between 2~5.4 MPa, which meets the design requirements. The hydraulic oscillator has carried out field comparative test in well Wei X, and all indexes meet the design and application requirements, reduce the friction resistance and torque of downhole string, effectively transfer the bit pressure and increase the running depth of coiled tubing. The field application of hydraulic oscillator 249 wells has remarkable effect in Sichuan and Chongqing, which can effectively shorten the construction period and improve the construction quality. The hydraulic oscillator has realized localization, broken technical monopoly of foreign companies, shortened supply cycle and saved costs.

**Key words:** coiled tubing; hydraulic oscillator; horizontal wells; long horizontal section; self-locking

## 0 前 言

连续管的下深能力是连续管技术应用的基础<sup>[1-2]</sup>。 $\Phi 50.8$  mm 连续管下入水平井段2 000 m

左右基本就会发生螺旋锁定, 导致连续管无法继续下入, 不能到达目标深度<sup>[3-4]</sup>。随着页岩气平台井水平段长度的不断延伸, 连续管技术的应用也受到限制。长水平段水平井连续管技术需要配

\*基金项目: 中国石油天然气集团公司重大现场推广专项“全系列连续管作业技术推广”(项目编号2022ZT01)。

套合理的延长下深工具<sup>[5]</sup>,而水力振荡器可以通过自身产生的纵向振动来提高连续油管下入过程中钻压传递的有效性,并减少作业工具串与井壁之间的摩阻,从而实现增加连续油管下入深度的目的,振动温和,不会增加连续油管疲劳损伤,也不会导致配合作业的其他工具损坏。目前国外公司已经在水力振荡器的研究上取得了较大进展, National Oilwell Varcor 公司和 Pro-Leading Energy Solutions 公司的水力振荡器效果好、力量大,螺杆橡胶寿命长达几百小时;其次是 ASBR 公司的 ShockWave, 其产品效果较好、频率高、力量中等;而 Thru Tubing Solutions 公司的 XRV 寿命最长、长度最短、效果中等; Baker Hughes 公司的 Extended Reach Tools、自激式水力振荡器和空化射流式水力振荡器等产品,长度短、寿命长,虽有振荡效果,但力量弱<sup>[7]</sup>。综合来看,

连续管用水力振荡器生产厂家较多,但效果最好的仍然是 1/2 头或者 2/3 头螺杆式水力振荡器。由于小尺寸工具材质和加工问题,国内仿制的产品性能仍然不稳定,而国外水力振荡器存在造价成本高、购置周期长、维护费用高等问题。因此,为解决国内深层长水平段页岩气井开采面临的技术难题,自主设计了一种水力振荡器,并在现场进行了广泛的推广应用,旨在打破国外公司技术垄断,缩短供货周期,节约成本。

## 1 自研水力振荡器的特点

### 1.1 工具结构

水力振荡器的结构主要包括上接头、过滤环、螺杆外筒、螺杆转子、动阀座、动阀、定阀、O形密封圈和下接头,结构如图1所示。

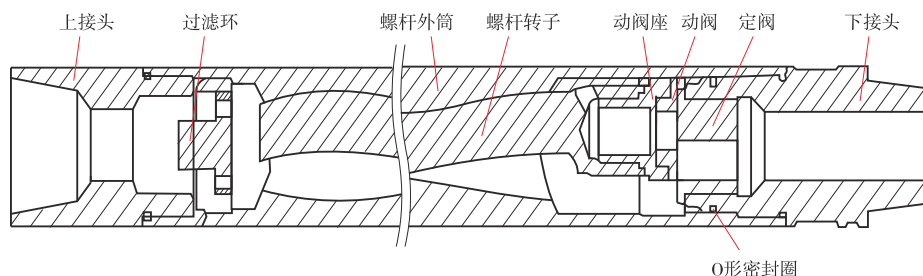


图1 水力振荡器结构示意图

### 1.2 水力振荡器的技术参数

水力振荡器的压降受动力马达级数和偏心阀通道面积的影响<sup>[8-10]</sup>,其计算公式为

$$\Delta p = K[\Delta p_k] + \Delta p_{r,s} \quad (1)$$

$$\Delta p_{r,s} = \frac{1}{2} \zeta \rho v_1^2 \quad (2)$$

式中:  $\Delta p$ ——水力振荡器的压降, MPa;

$[\Delta p_k]$ ——马达每级间的承压值, 取 0.8 MPa;

$K$ ——马达级数, 此处  $K$  取 1 级;

$\Delta p_{r,s}$ ——局部压力损失, MPa;

$\zeta$ ——局部阻尼系数;

$\rho$ ——工作液密度,  $\text{kg/m}^3$ ;

$v_1$ ——工作液流速,  $\text{m/s}$ 。

由式(1)、式(2)可知,在马达级数确定的情况下,水力振荡器的压降只与局部压力损失有关,而在不计摩擦阻力的情况下,局部压力损失取决于工作液密度及流速,而流速取决于工作

液排量和过流面积。因此,在工作液密度及排量不变的情况下,增大过流面积,就可以降低  $\Delta p_{r,s}$ ,从而实现减小水力振荡器压降的目的。

页岩气区块连续管作业通常采用外径为 73 mm 的井下作业工具,因此设计本工具的动阀和定阀流道直径为 18 mm,定阀偏移分别为 5 mm、7 mm 和 8 mm,动阀偏移分别为 10 mm、14 mm 和 16 mm,进行计算分析。当工作液排量为 400 L/min 时,水力振荡器压降计算结果见表 1。

由表 1 可知,定阀偏移量为 5 mm 时,压力波动最小;定阀偏移量为 8 mm 时,压力波动最大。此外,定阀偏移量为 5 mm 时,振荡效果最差;定阀偏移量为 8 mm 时,振荡效果最强,但其压力变化过大,平均压降也高,对泵和井口设备伤害大,故不能选择 5 mm 和 8 mm 的偏移量。定阀偏移量为 7 mm 时,平均压降为 3.75 MPa (约 543 psi),与 NOV 公司的 Agitator XP 振荡器压降 3.45~4.83 MPa

表1 水力振荡器压降计算结果

| 定阀偏移量/mm | 压降/MPa |      |      |        |      |      |      |
|----------|--------|------|------|--------|------|------|------|
|          | 0°     | 60°  | 120° | 180°   | 240° | 300° | 360° |
| 5        | 0.38   | 0.65 | 1.31 | 3.47   | 1.31 | 0.65 | 0.38 |
| 7        | 0.38   | 0.84 | 2.77 | 25.79  | 2.77 | 0.84 | 0.38 |
| 8        | 0.38   | 0.96 | 4.45 | 199.20 | 4.45 | 0.96 | 0.38 |

相吻合。因此, 7 mm的偏移量为最优偏移量。

水力振荡器动力部件螺杆马达的输出参数计算公式为

$$M = \frac{1}{2\pi} \times \Delta p \times q \quad (3)$$

$$q = A_G \times N \times T_s \quad (4)$$

$$A_G = A_s - A_r \quad (5)$$

$$F = \Delta p A_G \quad (6)$$

式中:  $M$ ——螺杆马达输出扭矩,  $\text{N} \cdot \text{m}$ ;

$\Delta p$ ——螺杆马达总压降,  $\text{MPa}$ ;

$q$ ——每转排量,  $\text{L}$ ;

$N$ ——转子头数;

$T_s$ ——定子导程,  $\text{mm}$ ;

$A_G$ ——过流面积,  $\text{mm}^2$ ;

$A_s$ ——定子截面积,  $\text{mm}^2$ ;

$A_r$ ——转子截面积,  $\text{mm}^2$ ;

$F$ ——水力振荡器轴向冲击力,  $\text{kN}$ 。

本工具设计的参数为: 转子头数  $N=1$ , 定子导程  $T_s=720 \text{ mm}$ , 定子截面积  $A_s=1\,232 \text{ mm}^2$ , 转子截面积  $A_r=616 \text{ mm}^2$ , 马达平均压降  $\Delta p = 3.75 \text{ MPa}$ , 马达最大压降  $\Delta p=25.79 \text{ MPa}$ 。

根据公式(3)~公式(6)计算, 过流面积为  $616 \text{ mm}^2$ , 每转排量为  $0.433 \text{ L}$ , 平均输出扭矩为  $264.7 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 最大输出扭矩为  $1\,820.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 水力振荡器平均轴向冲击力为  $2.31 \text{ kN}$ , 最大轴向冲击力为  $15.89 \text{ kN}$ 。与NOV公司的Agitator XP水力振荡器对比见表2, 由表2可知, 自研水力振荡器的各项技术参数均达到了施工要求, 同时其长度更短、排量范围更广、抗拉强度更高、振荡频率更强。

表2 水力振荡器技术参数对比

| 水力振荡器类型           | 外径/mm | 长度/m | 排量/( $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ ) | 抗拉强度/kN | 振动频率/Hz | 工作压降/MPa | 扣型          |
|-------------------|-------|------|---|---------|---------|----------|-------------|
| 自研                | 73    | 1.48 | 150~560                                 | 387     | 15      | 2~12     | 60.3 mm PAC |
| NOV公司 Agitator XP | 73    | 1.56 | 151~530                                 | 354     | 9       | 3.4~4.8  | 60.3 mm PAC |

## 2 室内测试评价

为评价自研水力振荡器的整体性能, 在室内对不同排量下的泵压、振动频率和振幅进行测量, 测试流程如图2所示。将 $\Phi 73 \text{ mm}$ 的水力振荡器两端分别与试压泵的进水、回水管线连接, 并在水力振荡器上安装压力传感器和测振仪, 进行脉冲压力监控, 同时测量工具的振动频率和振幅。

开启试压泵, 然后记录不同排量下的泵压、振动频率和振幅, 测试结果见表3。由表3可以看出, 随着排量的增大, 工具振动频率和振幅逐渐增大。在相同的条件下, 进行了多组室内测试, 工具振动频率与振幅随排量增大而增大的趋势是一致的, 且工具工作稳定, 未出现故障。

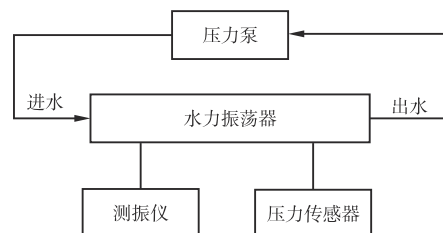


图2 水力振荡器室内测试流程示意图

表3 水力振荡器的室内测试结果

| 序号 | 排量/( $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ ) | 振动频率/Hz | 振幅/mm | 泵压/MPa |
|----|---|---------|-------|--------|
| 1  | 150                                     | 9       | 1.5   | 2.0    |
| 2  | 300                                     | 11      | 3.0   | 3.4    |
| 3  | 400                                     | 13      | 4.0   | 4.0    |
| 4  | 450                                     | 15      | 4.5   | 4.2    |
| 5  | 560                                     | 16      | 5.5   | 5.4    |

### 3 现场试验评价

#### 3.1 目标井井况

威X井为一口页岩气水平评价井, 该井实际完钻井深6 330 m, 现人工井底6 289 m, 造斜点深2 930 m, 最大井斜100.03°, 最大井斜井深5 184.28 m, 为上倾井, 入靶点井深4 130 m, 水平井段全长2 200 m。

#### 3.2 软件模拟情况

采用外径 $\Phi 50.8$  mm、壁厚4.44~5.2 mm、钢级CT110的连续管进行软件模拟, 结果如图3所示。当取摩阻系数0.3时, 连续管至井下5 225.5 m时会出现锁定, 因此通常在连续管通刮洗作业工具管串中加入水力振荡器, 可延长连续管下深, 即 $\Phi 106$  mm磨鞋+ $\Phi 73$  mm螺杆马达+ $\Phi 73$  mm水力振荡器+ $\Phi 73$  mm震击器+ $\Phi 73$  mm丢手+ $\Phi 73$  mm单流阀+ $\Phi 73$  mm复合接头+ $\Phi 50.8$  mm连续管。

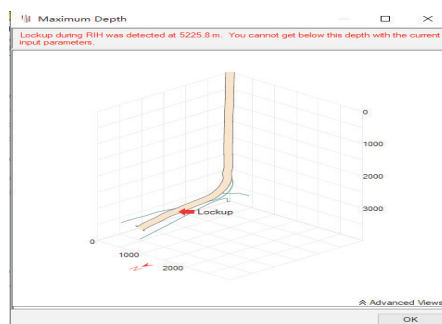


图3 软件模拟计算结果

#### 3.3 施工简况

在实际施工过程中, 连续管下井至5 450 m处出现锁定, 作业曲线如图4所示。下放速度明显放缓, 通过反复短起下放, 泵注金属降阻剂, 在水力振荡器的作用下, 用时9 h最终下至人工井底6 289 m处, 作业曲线如图5所示。其中橘色线为连续管悬重, 蓝色线为下井深度。

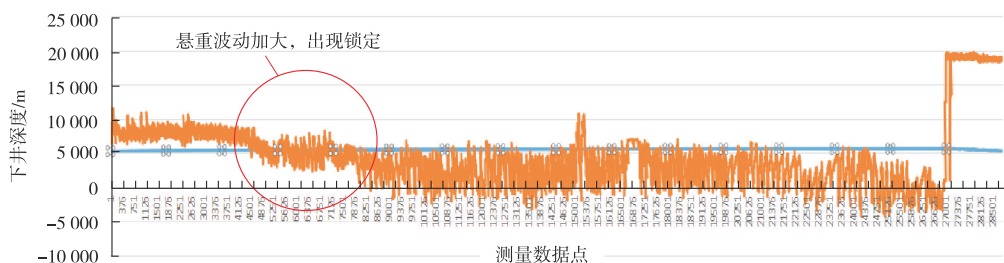


图4 5 450 m处作业曲线图

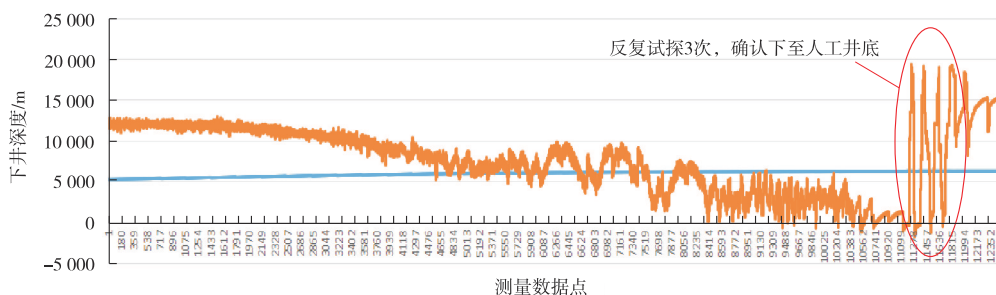


图5 6 289 m处作业曲线图

现场测试结果表明, 该井使用水力振荡器后, 可使连续管继续下入839 m, 效果显著, 满足了长水平段井的施工要求, 有效解决了连续管在长水平段的下入自锁问题, 同时替代了进口水力振荡器, 打破了国外公司技术垄断, 实现了水力振荡器的国产化, 缩短了供货周期。

### 4 自研水力振荡器在川渝地区应用情况

2019年—2021年自研水力振荡器在川渝地区应用情况如图6所示, 具体数据统计结果见表4。通过图6可以看出, 使用水力振荡器后, 连续管下入深度得到了显著提升。同时, 2019年—2021年, 在长宁、威远、昭通等多口页岩气井进行通刮洗



作业423井次,使用自研水力振荡器249井次,使用率达到58.87%,自研水力振荡器在现场得到广泛应用,其延伸下井深度的能力得到充分验证,具有良好的应用前景。

现场应用表明,自研水力振荡器的使用可大大降低井下管柱在前进中的摩擦阻力和扭矩,从而有效传递钻压,提高连续管的下入深度,解决了深层页岩气长水平段出现“螺旋锁定”的技术难题。

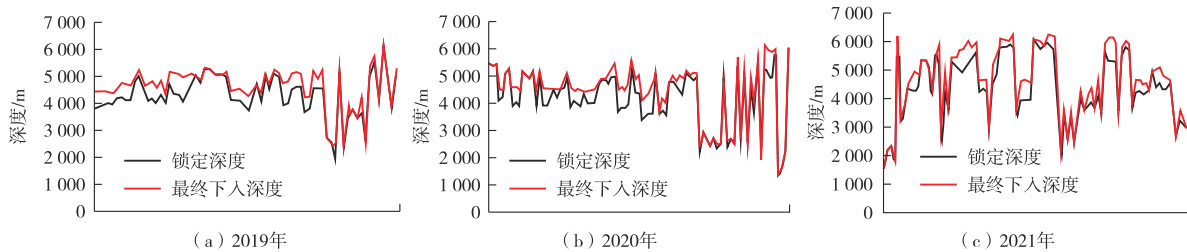


图6 2019年—2021年自研水力振荡器在川渝地区应用情况

表4 自研水力振荡器在川渝地区应用情况数据统计结果

| 井号  | 施工年份  | 锁定深度/m  | 最终下入深度/m | 延伸深度/m  | 延伸率/% | 年应用井次 | 年平均延伸率/% | 年最大延伸率/% |
|-----|-------|---------|----------|---------|-------|-------|----------|----------|
| X1井 | 2019年 | 4 391.9 | 5 081.0  | 689.1   | 15.69 | 70    | 8.49     | 21.46    |
| X2井 |       | 4 307.5 | 5 083.4  | 775.9   | 18.01 |       |          |          |
| X3井 |       | 4 080.1 | 4 955.8  | 875.7   | 21.46 |       |          |          |
| X4井 | 2020年 | 3 536.0 | 4 258.5  | 722.5   | 20.43 | 89    | 7.73     | 29.16    |
| X5井 |       | 3 596.0 | 4 323.0  | 727.0   | 20.22 |       |          |          |
| X6井 |       | 3 597.0 | 4 646.0  | 1 049.0 | 29.16 |       |          |          |
| X7井 | 2021年 | 3 944.7 | 4 658.2  | 713.5   | 18.09 | 90    | 6.60     | 18.09    |
| X8井 |       | 3 969.7 | 4 614.4  | 644.7   | 16.24 |       |          |          |
| X9井 |       | 3 945.3 | 4 576.2  | 630.9   | 15.99 |       |          |          |

## 5 结 论

(1) 与国外水力振荡器的技术参数进行对标,自主研制了一种长度1.48 m、排量150~560 L/min、工作压降2~5.4 MPa、振荡频率15 Hz、抗拉强度1 080 MPa的水力振荡器,各项技术参数均达到了施工要求。该振荡器长度更短、排量范围更广、抗拉强度更大、振荡频率更强。

(2) 该水力振荡器在川渝地区得到广泛的使用,使用率达到58.87%,实现单趟最大下井延伸1 049 m,延伸率达到29.16%,提高了作业效率和质量,减少了短起次数,保证了井下施工安全。

## 参考文献:

- [1] 王海涛,李相方.连续油管技术在井下作业中的应用现状及思考[J].石油钻采工艺,2008,30(6):120-124.
- [2] 王方祥,张乾,姜有才,等.连续油管长水平段防自锁技术[J].油气井测试,2021,30(2):25-29.

- [3] 余长柏,黎明,刘洋,等.水力振荡器振动特性的影响因素[J].断块油气田,2016,23(6):842-845.
- [4] 孙庆春,郭宝林,赵利锋.水力振荡器降低摩擦阻力影响的分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(12):69-71.
- [5] 明瑞卿,张时中,王海涛,等.国内外水力振荡器的研究现状及展望[J].石油钻探技术,2015,43(5):116-122.
- [6] 王建龙,冯冠雄,刘学松,等.长宁页岩气超长水平段水平井钻井完井关键技术[J].石油钻探技术,2020,48(5):9-14.
- [7] 吴德胜,黄瑞,张楠,等.水力振荡器+大功率螺杆在吉木萨尔的应用及分析[J].云南化工,2020,47(7):109-111.
- [8] 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.
- [9] 李博.水力振荡器的研制与现场试验[J].石油钻探技术,2014,42(1):111-113.
- [10] 石崇东,党克军,张军,等.水力振荡器在苏36-8-18H井的应用[J].石油机械,2012,40(3):35-38.

作者简介:卢秀德(1976—),男,大学本科,高级工程师,主要从事油气田开发及连续管作业技术研究工作。

收稿日期:2022-08-01

修改返回日期:2023-02-11

编辑:董超