

涡轮式水力振荡器在涪陵页岩气水平井中的应用

张东清

(页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 中国石化石油工程技术研究院, 北京 102206)

摘要:涪陵页岩气田长水平段水平井钻井施工中面临着轨迹调整频繁、摩阻扭矩大、定向钻井托压等技术难题和挑战。涡轮式水力振荡器通过机械振动将滑动钻进时钻柱与井壁的静摩擦转变为动摩擦, 取得了良好的降摩减阻效果, 大幅提高长水平段一趟钻完钻成功率。介绍涡轮式水力振荡器结构及其降摩减阻机理, 开展结构及性能专项优化, 分析涪陵地区该水力振荡器的应用情况, 对下一阶段该水力振荡器在涪陵页岩气田中的推广应用提出建议。

关键词:涡轮; 水力振荡器; 页岩气; 长水平段; 定向钻井; 降摩减阻

中图分类号:TE243 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2022)05-0283-05

目前水平井长水平段采用的降摩减阻技术主要包括基于摩阻预测优化井眼轨迹、使用降摩减阻工具、提高钻井液润滑性及携岩能力^[1-4]。其中, 水力振荡器作为一种有效的降摩减阻工具可以提高水平钻井机械延伸能力^[5-7], 并得到了钻井施工方和定向工程师的普遍认可^[8-10]。水力振荡器通过机械振动将钻柱与井壁的静摩擦转变为动摩擦, 以减小滑动钻进的摩擦阻力^[11-12]。自 2012 年以来, 多种水力振荡器在涪陵页岩气田进行了现场应用, 包括 NOV 螺杆式水力振荡器、水力脉冲诱发振动钻井工具、径向水力振荡器、双向水力振荡器、涡轮式水力振荡器等^[13]。部分水力振荡器由于技术及材料上的先天不足, 使用效果不佳, 增加了水力能量消耗的同时却没有起到理想的降摩减阻效果, 限制了长水平段钻井的钻井液排量和携岩能力, 甚至对长水平段防托压起了反作用。

为实现高减阻、低压耗的振荡减阻效果, 笔者以涡轮叶片组为动力单元研制了涡轮式水力振荡器。该工具在涪陵页岩气田累计推广应用 20 余井次, 未发生任何井下安全事故, 取得了良好的缓解托压和提高机械钻速的效果。通过分析该涡轮式水力振荡器的结构和降摩减阻机理, 优化提升其在长水平段的适用性能, 评价其在涪陵页岩气超长水平段的应用效果, 对涡轮式水力振荡器在涪陵页岩气田的进一步推广应用提出了建议。

1 涡轮式水力振荡器结构及降摩减阻原理

1.1 工具结构

涡轮式水力振荡器^[14]主要由脉冲发生器和振动发生器两部分组成(图 1)。脉冲发生器由涡轮马达、导流帽、扶正轴承和动静阀组组成, 依靠钻井液驱动涡轮转子转动, 涡轮组转子驱动动阀盘旋转, 动阀盘的偏心流道做平面行星运动。动阀盘偏心流道与静阀盘偏心流道周期性交错、重叠。动阀盘偏心流道和静阀盘偏心流道轴距最大时, 钻井液通过工具的截面积最小, 但不完全关闭通道, 使得钻井液流经通道被最大程度阻挡, 产生最大的水力压降。动阀盘偏心流道与静阀盘偏心流道完全重合时, 钻井液通过工具的截面积最大, 钻井液流动畅通度最高, 产生最小的水力压降。流道过流面积随时间周期性变化并对钻井液起到限流作用。当流道过流面积变化时会在工具内部产生压力脉冲并上传反馈到振荡短接的活塞面上产生轴向振荡力, 导致活塞推力呈周期性变化而引发振动短节振动。

1.2 工具降摩减阻原理

在大位移井、水平井定向钻井施工中钻具与井壁大面积接触, 在钻具重力及弯曲作用力的双重作用下, 滑动钻进钻具承受较大静摩擦力, 造成了钻压施加困难、工具面调整时间长、定向钻井机械钻速低。在导向马达钻具组合中加入涡轮式水力振

收稿日期:2022-01-02

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05060-12)。

作者简介:张东清(1974—), 男, 河北枣强人, 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 中国石化石油工程技术研究院, 钻井工艺研究所副所长, 高级工程师, 油气井工程硕士, 研究方向为钻井工艺技术。

荡器,脉冲发生器产生的压力脉冲作用在芯轴活塞上,带动芯轴产生轴向温和振动,当压力升高时,心轴伸出,压力降低时,心轴便会缩回。涡轮式水力振荡器通过周期性温和地振荡钻柱,可以使得钻具

长距离产生轴向振动及蠕动,将钻具与井壁的静摩擦转变为动摩擦,减少滑动钻进时的摩擦阻力,改善钻压传递^[15-16],提高定向钻井机械钻速及大位移井、水平井的延伸能力(图 2)。

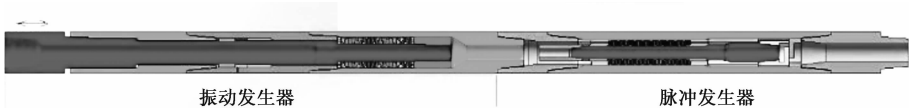


图 1 水力振荡器结构示意图

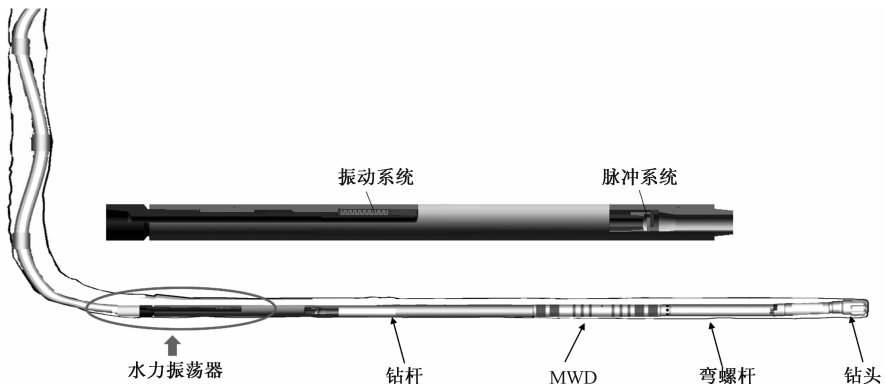


图 2 水平井使用水力振荡器钻具组合图例

由于动静阀盘工作时候相互摩擦,因此要求在阀片表面敷焊硬质合金提高其耐磨性,并使用调整垫片来补偿摩擦损失。实际使用中,阀盘偏心流道的直径、偏心距、开孔数量等参数需要根据钻井液流量、密度和工具允许压降来选择。其中,WSZ-172 型水力振荡器主要技术参数见表 1。

表 1 WSZ172 型水力振荡器结构及性能参数

结构参数		性能参数	
工具外径/mm	172	适用排量/(L/s)	25~32
工具总长/mm	3 780	工具压降/MPa	2.5~3 ($\rho=1.4$)
上端扣型	NC50 (410)	压力脉冲值/MPa	2.0~2.8 ($\rho=1.4$)
下端扣型	NC50 (411)	压力脉冲频率/Hz	19~24
适用井径/mm	215.9~244.5	轴向最大振幅/mm	10

1.3 工具技术优势

对比螺杆式水力振荡器等减摩阻工具,涡轮式水力振荡器具有以下技术优势:

- 1)涡轮式水力振荡器包含动力部件在内均为全金属材质,耐油基钻井液腐蚀、耐高温(220 ℃),对油基钻井液、水基钻井液、高温井等工况均具有适用性。
- 2)明显降低摩阻,通过高频振动带动钻具组合在井下振动、蠕动,改变钻具与井壁的接触状态与摩擦阻力,提高了定向钻井摆工具面效率和定向钻

- 进效率。
- 3)有效提高机械钻速,该工具配合螺杆钻具及 PDC 钻头使用,使 PDC 钻头滑动钻进更加容易,显著提高定向钻进机械速度。
- 4)工具振动频率与 MWD 和 LWD 信号传输不重叠,不会对井下工具、仪器和钻头造成振动破坏,具有广泛的现场适用性。

2 涡轮式水力振荡器性能优化

2.1 扶正轴承防卡死结构改进

部分井队固控设备老旧、钻井液性能不达标,导致钻井液固相含量过高,偶尔会发生岩屑嵌入扶正轴承内外圈间隙,导致轴承和涡轮组定转子卡死,从而致使水力振荡器井下失效。针对这一问题,在不改变扶正轴承内外圈尺寸及公差的前提下,采用线切割工艺在扶正轴承静套内部加工排屑槽。改进后的扶正轴承组合既能约束涡轮转子径向活动量,又能促使大粒径岩屑顺利从排屑槽通过,后续应用未出现轴承组卡死问题。

2.2 活塞密封结构优化

水力振荡器工作时,推动活塞和振动芯轴周期性伸出、缩进,采用格莱圈实现轴向往复运动密封。铜粉导向带具有耐磨性强、柔韧性强、自恢复能力强的特点,在格莱圈前后安装铜粉导向圈,可有效

阻挡岩屑颗粒进入格莱圈。仿真分析结果显示,该格莱圈在 70 MPa 压差下依然具有良好的密封性,满足超深水平井钻井工具的密封需求。利用数控油压试压测试系统对振动短节施加 30 MPa 内压力,测试水力振荡器振动活塞密封性能,稳压 2 h 振动短节压力下降 0.2 MPa,符合井下工具使用密封性要求。

2.3 振动性能优化

水力振荡器实际使用中,阀盘偏心流道的直径、偏心距、开孔个数等参数需要根据钻井液流量、密度和工具允许压力降来选择。分析发现相对流量变化幅度受阀孔直径的变化影响:阀孔直径 D 增大,过流面积变化变小,相对流量随时间变化波动较小;阀孔直径越小,过流面积最小值与最大值相对差距越大,甚至出现流道完全闭合现象(图 3)。流道完全闭合可以产生较大的压差和推动力,但是也存在工具卡死导致钻井液无法循环的工况,因此流道完全闭合工况是一种危险工况。

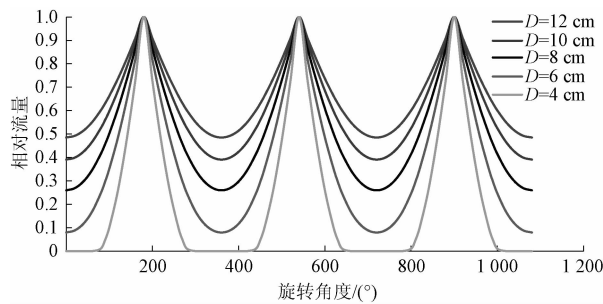


图 3 不同阀孔直径下相对过流面积变化曲线

采用节流孔板压力瞬间变化公式可以计算节流面积变化导致的阀孔前后压力波动情况,得到振动短节内部的压力差。采用单一变量法,多次改变偏心流道直径、偏心距、钻井液排量,计算偏心流道

重叠、交错过程中压力脉冲的幅度及振动力,分析各个因素对活塞振动力的影响。根据 $\phi 215.9$ mm 井眼钻井需求,在钻井液排量 30 L/s 工况下,设计 $\phi 172$ mm 水力振荡器的动静阀盘偏心流道的偏心距为 30 mm,偏心流道的直径为 50 mm,计算所得活塞振动力为 20~22 kN,基本满足现场降摩减阻需求,同时不会造成工具面及定向仪器的振动,保证定向钻井的安全性(图 4)。

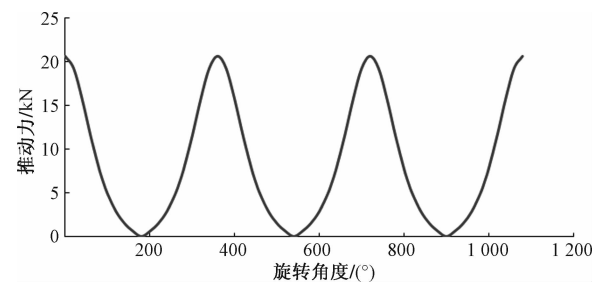


图 4 涡轮式水力振荡器振动力变化曲线

3 涡轮式水力振荡器应用实例分析

3.1 涪陵页岩气田应用概况

针对涪陵页岩气田“井工厂”作业模式钻井施工普遍存在的长水平段定向托压、轨迹控制难度大等问题^[17-18],与钻井施工方、定向工程师深入技术交流,提出了加大水力振荡器推广力度实现长水平段防托压的技术措施,合作建立了“国产钻头+国产螺杆+国产水力振荡器”的页岩气水平井一趟钻工艺配套技术,为工区后续提速提效起到了良好示范作用。涡轮式水力振荡器在涪陵工区累计推广应用 24 口井(部分统计见表 2),共计实现 11 口井长水平段一趟钻完钻。其中,焦页 23-S2HF 井实现长水平段一趟钻进尺 2 101 m,焦页 106-2HF 井实现最长工作时间 324 h。

表 2 WSZ172 型水力振荡器涪陵工区应用情况部分统计

应用井号	应用井段/m	进尺/m	纯钻时间/h	循环时间/h	工作时间/h	机械钻速/(m/h)
焦页 18-3HF	2 970~3 705	735	65.6	19.4	85	11.2
焦页 82-2HF	3 732~4 200	468	76	53	129	6.16
焦页 23-S1HF	3 400~4 772	1 372	151	32	183	9.09
焦页 23-4HF	2 712~4 608	1 896	172	32	204	11.02
焦页 23-S2HF	2 679~4 780	2 101	183	36	219	11.48
焦页 106-2HF	3 671~5 235	1 564	232	92	324	6.74
焦页 203-1HF	4 630~5 402	772	124	32	156	6.23
焦页 203-3HF	4 325~5 489	1 164	146	41	187	7.97
焦页 23-S3HF	2 650~4 447	1 797	132	75	207	13.61
焦页 66-6HF 井	2 771~4 526	1 755	204	52	256	8.60

3.2 焦页 23 平台 WSZ172 型水力振荡器现场应用

焦页 23-S1HF 井首先应用加拿大某品牌水力振荡器,由于工具压耗过大(6 MPa)导致开泵困难、排量受限,进尺不足 100 m 即停止使用。后续使用 WSZ-172 型涡轮式水力振荡器(压耗 2.5 MPa),实现一趟钻进尺 1 372 m(完钻),定向钻井提速 27.6%。随后,焦页 23 平台开展涡轮式水力振荡器配合常规导向钻具的推广应用,除焦页 23-4HF 井因钻头失效中途起钻外,其他 4 口井均实现了长水平段一趟钻。

长水平段钻进钻具组合: $\phi 215.9$ mmPDC + $\phi 172$ mm1°单弯螺杆 + $\phi 207$ mm 扶正器 + 止回阀 + 411×4A10 转换接头 + $\phi 165$ mm 无磁钻铤 + LWD 短节 + $\phi 127$ mm 加重钻杆 × 15 + $\phi 127$ mm 钻杆 × 15 + WSZ-172 型水力振荡器 + $\phi 127$ mm 钻杆 × 243 + $\phi 127$ mm 加重钻杆 × 15 + 411 × 520 转换接头 +

$\phi 139.7$ mm 钻杆。

钻井参数: 钻压 80~140 kN, 转速 50~60 r/min + 螺杆, 排量 28~30 L/s, 泵压 22~27 MPa。钻井液密度 1.51 g/cm³, 黏度 68 s。

焦页 23-S2HF 井应用施工井段 2 679~4 780 m(井斜 87.5°~95.2°), 地层为龙马溪组, 岩性为黑色页岩, 累计进尺 2 101 m。使用水力振荡器纯钻时间 183 h, 循环时间 36 h, 累计工作时间 219 h, 复合钻进平均钻时 3~5 min/m, 滑动钻进平均钻时 10~28 min/m。该井水平段使用水力振荡器平均机械钻速 11.48 m/h, 对比焦页 44-2HF 井相近水平段机械钻速 8.37 m/h, 机械钻速提高 37.2%, 该工具起到了显著的定向钻井提速提效效果。

焦页 23 平台 WSZ-172 型水力振荡器应用统计见表 3。

表 3 焦页 23 平台 WSZ-172 型水力振荡器应用统计

井号	入井次数	钻进井段/m	层位	进尺/m	纯钻时间/h	循环时间/h	工作时间/h	提速效果/%	是否一趟钻	起钻原因
焦页 23-S1HF	1	3 400~4 772	龙马溪	1 372	151	32	183	27.6	是	完钻
焦页 23-4HF	2	2 712~4 608	龙马溪	1 896	172	32	204	31.7	否	钻头失效
焦页 23-S2HF	1	2 679~4 780	龙马溪	2 101	183	36	219	37.2	是	完钻
焦页 23-S3HF	1	2 650~4 447	龙马溪	1 797	132	75	207	43.1	是	完钻
焦页 23-5HF	1	2 721~4 612	龙马溪	1 891	186.5	40	226.5	42.5	是	完钻

3.3 焦页 66-6HF 井涡轮式水力振荡器现场应用

3.3.1 焦页 66-6HF 井基础数据

设计井深为 4 520 m, 目的层为五峰组。A 靶点垂深 2 448 m、B 靶点垂深 2 677 m, AB 段长 1 837 m, 完钻原则为钻至 B 靶点留口袋完钻。

3.3.2 现场应用情况

WSZ-172 型涡轮式水力振荡器于 2020 年 5 月 20 日 8:00 入井, 2020 年 6 月 3 日 9:00 出井, 使用地层为五峰组, 井段为 2 771~4 526 m, 段长 1 755 m, 纯钻时间 204 h, 循环时间 52 h, 累计工作时间 256 h, 复合钻进平均钻时为 5~8 min/m, 滑动钻进平均钻时 10~15 min/m, 机械钻速为 8.6 m/h; 使用钻头型号为 KSD1652FRITY。

钻具组合: $\phi 215.9$ mmPDC 钻头 + $\phi 172$ mm 螺杆 1.25° + $\phi 210$ mm 扶正器 + $\phi 172$ mm 浮阀 + 无磁承压钻杆 × 1 + $\phi 172$ mm 无磁悬挂 + $\phi 127$ mm 加重钻杆 × 6 + $\phi 127$ mm 钻杆 × 12 + WSZ-172 型水力振荡器 + $\phi 127$ mm 钻杆 × 156 + $\phi 127$ mm 加重钻杆 × 15 + $\phi 127$ mm 钻杆。

钻井参数: 钻压 80~120 kN, 转速 70 r/min + 螺杆, 排量为 28~30 L/s, 泵压为 24~28 MPa, 钻井液密度为 1.42 g/cm³, 黏度 65 s。

3.3.3 使用情况汇总

WSZ-172 型水力振荡器累计入井 1 次, 完钻之后出井, 实钻井眼轨迹满足地质及钻井相关技术要求。工具应用后水平段定向钻井钻时为 10~25 min/m, 托压问题得到较好缓解, 滑动钻进钻时大幅缩短。该井水平段后期因地质追层需要频繁定向作业, 滑动钻进比例大幅提升, 定向工具面调整及滑动钻进钻时数据依然较为良好, 成功实现长水平段一趟钻完钻(图 5)。

4 结论及建议

1) 涡轮式水力振荡器以涡轮叶片组为动力单元, 全金属材质耐油、耐高温, 对油基钻井液环境具有适用性, 与各类钻头、井下工具仪器具有良好的现场兼容性。

2) 针对涪陵页岩气田长水平段定向钻井工况, 进行了涡轮式水力振荡器结构及性能专项优化, 形成了页岩气水平井一趟钻工艺配套技术, 焦页 23 平台 5 口井应用 4 口井实现了长水平段一趟钻完钻, 为工区后续提速提效起到了良好示范作用。

3) 涡轮式水力振荡器在涪陵页岩气田累计应用 20 余井次, 有效解决了滑动钻进钻头托压问题, 显著提高了 PDC 钻头的定向效率和机械钻速, 建议后续推广应用。

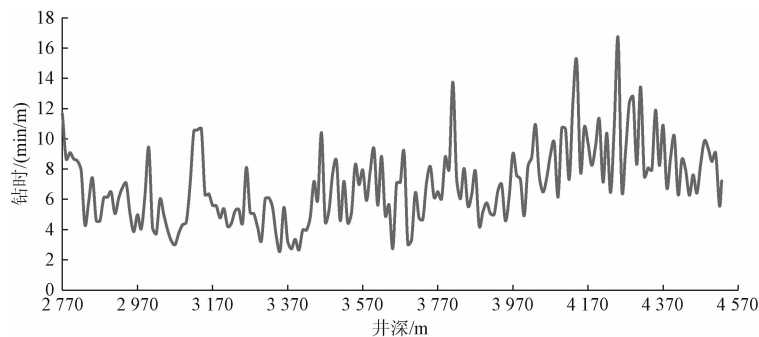


图5 焦页 66-6HF 井水平段钻时曲线

参考文献

[1] 光新军,叶海超,蒋海军. 北美页岩油气长水平段水平井钻井实践与启示[J]. 石油钻采工艺,2021,43(1):1-6.

[2] 杨海平,游云武. 焦页 2-5HF 长水平井钻完井关键技术[J]. 钻采工艺,2018,41(3):5-8.

[3] 牛新明. 涪陵页岩气田钻井技术难点及对策[J]. 石油钻探技术,2014,42(4):1-6.

[4] 王先洲,蒋明,邓增库,等. 苏 76-1-20H 井钻井技术[J]. 石油钻采工艺,2013,35(2):26-30.

[5] 胡德高,黄文君,石小磊,等. 页岩气水平钻井延伸极限预测与参数优化[J]. 科学技术与工程,2021,21(17):7053-7058.

[6] 罗伟,付建红,宋科熊,等. 大位移井水平井极限延伸长度预测研究[J]. 科学技术与工程,2013,13(35):197-201.

[7] 刘茂森,付建红,白璟. 页岩气双二维水平井极限延伸能力研究[J]. 科学技术与工程,2016,16(10):29-33.

[8] 张晓明,胥豪,张远军. 新场气田新沙 21-28H 井钻井技术与应用[J]. 石油地质与工程,2013,27(3):94-97.

[9] 胥豪,牛洪波,唐洪林,等. 水力振荡器在新场气田新沙

21-28H 井的应用[J]. 天然气工业,2013,33(3):64-67.

[10] 许京国,陶瑞东,杨静,等. 水力振荡器在大位移井张海 29-38L 井的应用[J]. 断块油气田,2014,21(4):527-529.

[11] 柳鹤. 射流式水力振荡器理论分析与试验研究[D]. 长春:吉林大学,2014.

[12] 李永波. 石油钻井用水力振荡器的设计及分析[D]. 扬州:扬州大学,2015.

[13] 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.

[14] 王杰,夏成宇,冯定,等. 新型涡轮驱动水力振荡器设计与实验研究[J]. 工程设计学报,2016,23(4):391-395,400.

[15] 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.

[16] 刘华洁,高文金,涂辉,等. 一种能有效提高机械钻速的水力振荡器[J]. 石油机械,2013,41(7):46-48.

[17] 潘军,刘卫东,张金成. 涪陵页岩气田钻井工程技术进展与发展建议[J]. 石油钻探技术,2018,46(4):9-15.

[18] 张金成,艾军,臧艳彬,等. 涪陵页岩气田“井工厂”技术[J]. 石油钻探技术,2016,42(5):9-15.

Application of Turbine Hydraulic Oscillator in Horizontal Wells in Fuling Shale Gas Field

ZHANG Dongqing

(State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development,
Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 102206, China)

Abstract: The drilling works are faced with technical difficulties and challenges such as frequent trajectory adjustment, high frictional drag and torque and pressure support in directional drilling. The turbine hydraulic oscillator converts the static friction between drilling string and the well wall into dynamic friction through mechanical vibration. It has been achieved good effect of friction reduction and drag reduction, and greatly improved the completion success rate of long horizontal section in one trip. The structure and friction reduction mechanism of the turbine hydraulic oscillator is introduced, the special optimization of the structure and performance of the turbine hydraulic oscillator is carried out, the application of the hydraulic oscillator in Fuling area is analyzed, and some suggestions for the popularization and application of the hydraulic oscillator in Fuling shale gas field in the next stage are put forward.

Keywords: turbine; hydraulic oscillator; shale gas; long horizontal section; directional drilling; friction reduction and drag reduction