



## 万米深井钻柱减振增能提速方法研究

纪国栋 陈畅畅 郭建华 夏连彬 刘永旺 孙钰淇

### Research on Vibration Reduction, Energy Enhancement, and Acceleration Methods for Drilling Strings of 10 000-Meter Deep Wells

Ji Guodong, CHEN Changchang, GUO Jianhua, XIA Lianbin, LIU Yongwang, SUN Yuqi

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2024038>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

#### 超深井钻柱粘滑振动特征的测量与分析

Measurement and Analysis of Stick-Slip Characteristics of Drill String in Ultra-Deep Wells

石油钻探技术. 2017, 45(2): 32-39 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201702006>

#### 井下钻柱振动信号的测量及振动激励源研究

Measurement of the Downhole Drill String Vibration Signal and Analysis of the Vibration Excitation Sources

石油钻探技术. 2021, 49(5): 57-63 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021011>

#### 振动减摩阻工具振动参数及安放位置研究

Research on Vibration Parameters and Determining the Position of a Vibration Friction Reducing Tool

石油钻探技术. 2018, 46(4): 78-83 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018050>

#### 丁页5井“井筒一体化”钻井提速技术

Integrated Wellbore Technologies to Enhance the Rate of Penetration for Well Dingye 5

石油钻探技术. 2018, 46(1): 24-29 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018029>

#### 塔里木油田HLHT区块超深井钻井提速配套技术

Technologies for Fast Drilling Ultra-Deep Wells in the HLHT Block, Tarim Oilfield

石油钻探技术. 2017, 45(2): 10-14 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201702002>

#### 南海文昌区块深部地层旋转切削齿PDC钻头提速技术

Technique for Enhancing the Rate of Penetration through the Application of a New PDC Bit with Rotary Cutters in Deep Formations in the Wenchang Block

石油钻探技术. 2017, 45(6): 65-69 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201706012>



扫码关注公众号，获取更多信息！

doi:10.11911/syztjs.2024038

引用格式: 纪国栋, 陈畅畅, 郭建华, 等. 万米深井钻柱减振增能提速方法研究 [J]. 石油钻探技术, 2024, 52(2): 100-107.

Ji Guodong, CHEN Changchang, GUO Jianhua, et al. Research on vibration reduction, energy enhancement, and acceleration methods for drilling strings of 10 000-meter deep wells [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(2): 100-107.

## 万米深井钻柱减振增能提速方法研究

纪国栋<sup>1</sup>, 陈畅畅<sup>1</sup>, 郭建华<sup>2</sup>, 夏连彬<sup>2</sup>, 刘永旺<sup>3</sup>, 孙钰淇<sup>1</sup>

(1. 中国石油集团工程技术研究院有限公司, 北京 102206; 2. 中国石油西南油气田分公司, 四川成都 610017; 3. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580)

**摘要:** 万米深井超深超长井段钻进过程中存在钻柱振动剧烈、破岩效率低、钻头使用寿命短等问题, 亟需开展万米深井钻柱减振与井底增能技术研究。根据超深层钻井环境的主要特征, 结合近年来钻柱动力学研究结果, 提出了以钻井过程中钻柱振动为能量来提高井底钻井液射流压力的方法, 在减小钻柱振动保护钻头的同时, 提高钻头射流压力, 实现井下增能破岩, 解决井下振动强度大、井底水力能量不足的问题; 并研制了井底钻柱减振增能装置, 进行了现场试验。研究和试验结果表明: 钻柱振动蕴含巨大的能量, 该能量可以转化为破岩提速能量; 设计的井底钻柱减振增能装置, 可以提高钻井液射流压力, 同时可以降低钻柱振动导致的安全风险, 从而显著提高钻井速度。研究成果为万米深井减振提速技术开拓了新方向, 为加快深部油气资源的勘探与开发提供了技术支持。

**关键词:** 万米深井; 钻柱振动; 井下增能; 高压射流; 机械钻速

**中图分类号:** TE245 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2024)02-0100-08

## Research on Vibration Reduction, Energy Enhancement, and Acceleration Methods for Drilling Strings of 10 000-Meter Deep Wells

Ji Guodong<sup>1</sup>, Chen Changchang<sup>1</sup>, Guo Jianhua<sup>2</sup>, Xia Lianbin<sup>2</sup>, Liu Yongwang<sup>3</sup>, Sun Yuqi<sup>1</sup>

(1. CNPC Engineering Technology R&D Company Limited., Beijing, 102206, China; 2. PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan, 610017, China; 3. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong, 266580, China)

**Abstract:** There are a series of problems in the drilling process of ultra-deep and ultra-long sections of 10 000-meter deep wells, such as severe vibration of the drilling string, slow speed of rock breaking, and short effective working life of the drill bit. Therefore, it is urgent to carry out research on vibration reduction of the drilling string and downhole energy enhancement technology of the 10 000-meter deep wells. According to the main characteristics of the ultra-deep drilling environment and recent research results on drilling string dynamics, a method was proposed to use drilling string vibration as an energy source during the drilling process to increase the jet pressure of downhole drilling fluid. While reducing drilling string vibration to protect the drill bit, the method increased the jet pressure of the drill bit to achieve downhole energy enhancement and rock breaking, solving the problems of high vibration intensity and insufficient hydraulic energy at the bottom of the wells. A vibration reduction and energy enhancement device for the downhole drilling string was developed, and on-site tests were conducted. The research results indicate that drilling string vibration contains enormous energy, which can be converted into energy for accelerating rock breaking. The designed vibration reduction and energy enhancement device for the downhole drilling string can increase the jet pressure of drilling fluid and reduce the safety risks caused by drilling string vibration, thereby significantly improving drilling speed. The research results have opened up new directions for the vibration reduction and acceleration

收稿日期: 2024-01-09; 改回日期: 2024-03-01。

作者简介: 纪国栋 (1986—), 男, 山东单县人, 2008 年毕业于中国石油大学 (华东) 石油工程专业, 2020 年获中国石油勘探开发研究院油气井工程专业博士学位, 高级工程师, 主要从事深井超深井钻井安全与提速研究工作。E-mail: jigddri@cnpc.com.cn。

通信作者: 陈畅畅, chenccdr@cnpc.com.cn。

基金项目: 中国石油集团关键核心技术攻关项目“万米超深层油气资源钻完井关键技术与装备研究” (编号: 2022ZG06) 资助。

technology of 10 000-meter deep wells and provided technical support for accelerating the exploration and development of deep oil and gas resources.

**Key words:** 10 000-meter deep well; drill string vibration; downhole energy enhancement; high pressure jet; rate of penetration

为了提高深井超深井的钻井速度, 科研人员研发了多种提速工具, 如井下动力钻具、旋转冲击钻井工具、井下脉冲空化射流发生装置、井下扭力冲击钻井工具等<sup>[1-4]</sup>。虽然各种工具的结构及提速作用原理存在差异, 但所利用的能量均源于钻井液循环能量。深井超深井钻井循环压耗大, 井深超万米后循环压耗超过 40 MPa<sup>[5-6]</sup>。受地面装备的限制, 井口输入能量有限, 因此井下能量很小, 不仅无法使井下工具充分发挥效果, 也不符合入井要求, 寻找新的井下能量并开发新型提速技术及装备就成了提高深井超深井钻井速度的关键<sup>[7-8]</sup>。同时, 万米深井实钻过程中钻柱振动问题非常突出, 不仅影响钻井的施工效率, 还会带来严重的安全风险, 如频繁剧烈的振动会导致钻柱受到交变应力, 造成其疲劳断裂破坏, 从而带来经济损失、钻井成本增加。现有减轻钻柱振动的主要方法是利用减振器将振动能量转化为液压油的弹性势能和内能, 或者将减振器内弹簧间的摩擦能释放掉, 这不仅造成了能量浪费, 而且产生的热量也会影响井下工具的性能。基于现状, 笔者提出了将钻柱振动能量转化为井底射

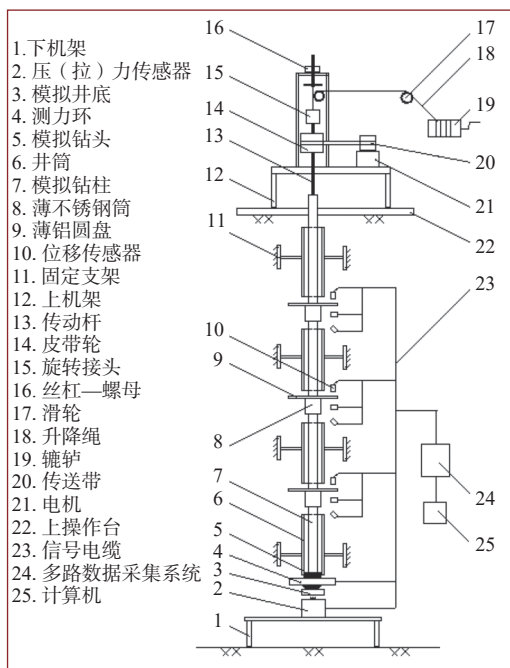
流压力的方法, 并设计了井底钻柱减振增能装置, 以期将这部分具有破坏作用的能量用于深井提速, 来实现万米深井井底增能提速。

### 1 钻柱纵向振动基本特征及规律

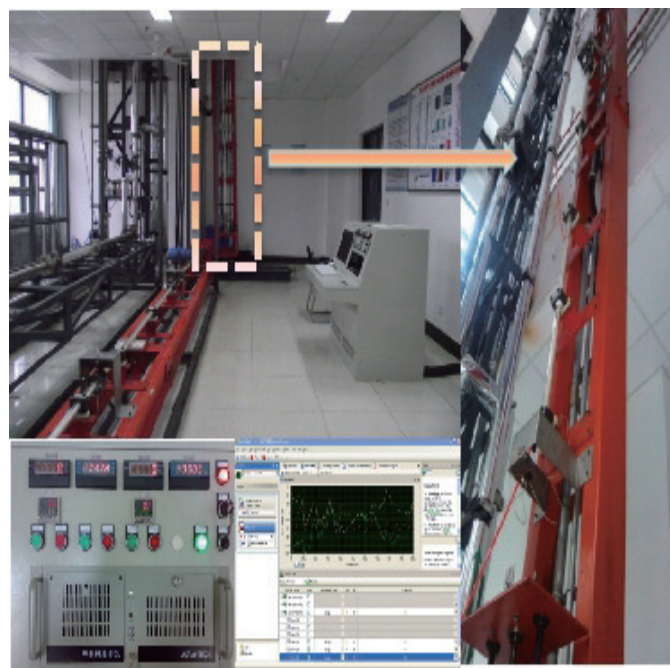
根据相似性原理<sup>[9-10]</sup>, 设计了底部钻柱动力学模拟试验装置, 如图 1 所示。该试验装置能够测试分析各制约参数(转速、钻压、钻具组合、钻具井筒尺寸配合及减振增压装置原理样机弹性和阻尼系数等)对钻柱振动特性的影响规律。

利用该试验装置, 开展了不同工况条件下钟摆钻具组合井底钻柱的运动状态及受力测试研究。底部钻具组合为  $\phi 311.1$  mm 钻头 +  $\phi 228.6$  mm 钻铤  $\times 2$  根 +  $\phi 310.0$  mm 稳定器 +  $\phi 228.6$  mm 钻铤  $\times 4$  根 +  $\phi 203.2$  mm 钻铤  $\times 6$  根 +  $\phi 127.0$  mm 钻杆<sup>[11-12]</sup>, 测试结果如图 2 所示。

图 2(a) 中, 转速 69.0 r/min、钻压 178.9 kN 条件下, 当置信度为 90% 时, 钻压在 136.1~220.3 kN 波动; 当置信度为 80% 时, 钻压在 145.2~211.1 kN 波



(a) 试验装置结构示意图



(b) 试验装置

图 1 井底钻柱动力学模拟试验装置

Fig.1 Dynamic simulation test device for downhole drill string

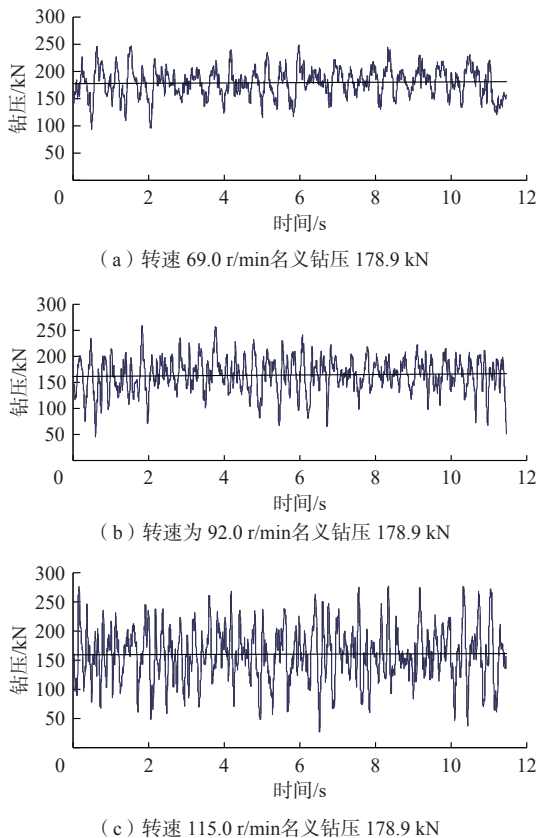


图2 实际钻压随时间的波动幅度

Fig.2 Fluctuation of actual weight on bit with time

动, 实测钻压平均 179.3 kN。图 2(b) 中, 转速 92.0 r/min、钻压 178.9 kN 条件下, 当置信度为 90% 时, 钻压在 105.0~210.4 kN 波动; 当置信度为 80% 时, 钻压在 123.1~210.2 kN 波动, 实测钻压平均 168.5 kN。图 2(c) 中, 转速 115.0 r/min、钻压 178.9 kN 条件下, 当置信度为 90% 时, 钻压在 80.1~236.8 kN 波动; 当置信度为 80% 时, 钻压在 101.2~218.5 kN 波动, 实测钻压平均 160.3 kN<sup>[13-14]</sup>。

综上所述可知:  $\phi 311.1$  mm 井眼采用  $\phi 228.6$  mm 钻铤和钟摆钻具组合, 当施加的钻压为 178.9 kN、转速在 69~115 r/min 波动时, 实际钻压波动范围 80.1~236.8 kN。同时, 分析图 2 还发现, 波动频率约为转速的 3~4 倍。同样, 通过室内试验发现: 对于  $\phi 244.5$  mm 井眼、 $\phi 177.8$  mm 钻铤和钟摆钻具组合, 当施加的钻压为 134.2 kN、转速在 70~120 r/min 波动时, 实际钻压波动范围 10~150 kN, 波动频率也为转速的 3~4 倍。这与文献中的井下实测结果吻合得很好。

上述试验结果分析表明, 深井超深井钻井过程中, 井底钻柱纵向振动尤为剧烈, 导致井底钻压存在高频高幅波动, 并且随着井深增加不断增加。振

动较常规钻进更加剧烈, 钻柱振动能量更大, 这为深井硬地层提速提供了可靠的能量。若能有效利用该能量, 可以提高深部复杂地层钻井速度。

## 2 井底钻柱减振增能提速原理及装置

### 2.1 井底钻柱减振增能提速原理

从目前的国内外钻井技术发展动态和相关技术的现场试验结果来看, 提高井底钻头喷嘴射流能量, 可以大幅度提高钻速, 水力、机械联合破岩方式是提高钻速的重要途径之一<sup>[15-17]</sup>。基于此, 国内外提出了在地面或井下对钻井液进行增能。

地面增能采用的设备和工艺比较复杂、成本高, 尽管提速效果明显, 但没有得到推广。井下增能是近十几年的研究重点<sup>[18]</sup>, 其主要优点在于不必改变现有钻井工艺及设备, 在钻头以上安装一个增能装置, 就可以使部分钻井液的压力达到 100 MPa 以上, 达到高压射流辅助破岩的目的。

现有井下增能装置的工作动力都来自钻井液本身所携带的压能, 基本工作原理都是将整体钻井液的部分能量集中提供给小部分钻井液。但在这种原理限定下, 要求增能装置必须具有复杂的液压转换机构(以活塞式增压装置为代表)或复杂的液能-机械能-液能的转换机构(离心式增压装置)。而在井下有限空间和恶劣工况条件下, 如此复杂的机构很难实现或很难正常工作。因此, 到目前为止, 尽管研究人员进行了艰苦的努力和潜心的研究, 但还是没有一种在不改变现有钻井工艺及设备的条件下, 使井下钻井液射流压力超过 100 MPa 的井底增压装置在钻井中推广应用, 仍停留在样机的研制、改进和试验阶段<sup>[19-21]</sup>。

笔者提出了一种新的理念, 将钻井过程中钻柱纵向振动所引起的井底钻压波动作为能量来源, 通过钻柱的纵向振动带动工具内部柱塞泵的上下运动, 压缩钻井液并使之增加射流能量, 达到减振与增能的双重目的, 且工具压降极小, 不耗费钻井液原有能量。在此理念指导下, 研制出一种集钻柱减振和钻井液增能功能于一体的井底钻柱减振增能提速装置, 使钻头喷嘴射流压力达到 100 MPa 以上, 以实现超高压射流钻井, 达到提高万米深部超硬地层钻井速度、缩短钻井周期和降低钻井成本的目的。

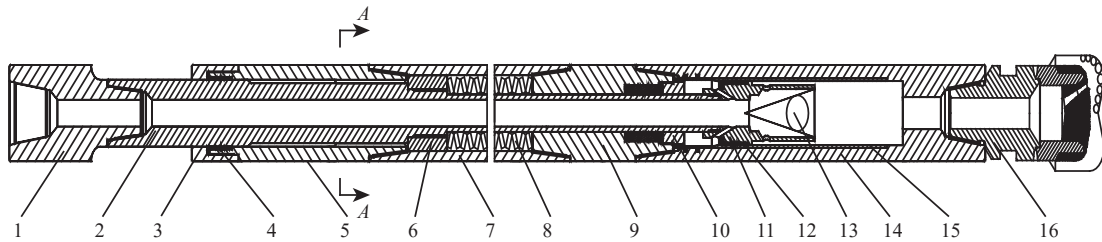
### 2.2 井底钻柱减振增能提速装置

井底钻柱减振增能提速装置的结构如图 3 所示。按照功能, 可将该装置划分为钻柱联动体和钻



柱分动体。钻柱联动体包括工具上接头、芯轴和套装在芯轴中部外侧的限位体, 钻柱分动体包括柱塞

缸外筒、钻头、套装在芯轴上部的花键外筒和与花键外筒连接的工具中心接头<sup>[22]</sup>。



1. 工具上接头; 2. 芯轴; 3. 上部密封总成压盖; 4. 上部密封总成; 5. 花键外筒; 6. 限位体; 7. 外部保护筒; 8. 弹簧;  
9. 工具中心接头; 10. 下部密封总成; 11. 柱塞头; 12. 滑动密封总成; 13. 控制单向阀; 14. 柱塞外套; 15. 柱塞缸套; 16. 钻头

图 3 井底钻柱减振增能提速装置结构示意图

Fig.3 Structure of vibration reduction, energy enhancement, and acceleration device for downhole drilling string

钻柱减振增能过程为: 当钻柱向下振动(钻压增大)时, 钻柱联动体相对于钻柱分动体向下运动, 柱塞缸内体积减小, 弹性复位元件压缩蓄能, 柱塞头的运动速度先增大后减小, 当该速度大于柱塞缸内钻井液的流速时, 控制单向阀关闭, 此时柱塞缸内的钻井液与弹性复位元件共同来分担钻压的增大, 柱塞缸内钻井液的液压能升高; 当该速度小于柱塞缸内钻井液的流速时, 控制单向阀开启, 钻井液常压流入钻头喷射; 当钻柱向上振动时, 即钻压减小时, 柱塞头相对于柱塞缸向上运动, 弹性复位元件释放能量并使工具加速复位, 控制单向阀开启, 钻井液进入柱塞缸内, 由于流道的截面效应, 柱塞缸内的压力低于正常压力, 压力周期性增大与减小的射流, 即为脉冲射流<sup>[23-25]</sup>。

该装置的优势在于:

1) 该装置吸收了钻具轴向振动能量, 减小了钻柱振动的剧烈程度, 保障了深井超深井钻井过程中的管柱安全, 同时由于轴向减振, 减小了钻头与地层间的冲击力, 减少了钻头崩齿, 增大了单趟钻进尺, 有助于深井安全提速钻井。

2) 实现了钻柱振动能量转移, 并对其进行了有效利用。利用钻柱振动的能量周期性压缩钻井液, 使钻井液产生超高压射流辅助破岩, 应用压耗小于 0.5 MPa, 可使钻井液瞬时脉冲压力提高 1.5~3.0 倍, 井下破岩及携岩能力增强, 降低了岩石的破碎难度。

3) 能量源随着井深增加而增加, 该装置的使用效果在深井超深井中更为显著。

4) 该装置的结构及工作原理简单, 易于生产、使用和维修, 可保障安全。

5) 减振增能提速装置产生的脉冲射流可以应

用于常规钻头, 无需特制。由于在井底产生大幅度脉动的流场, 该装置能够缓解钻头泥包现象, 且在排量受限导致的钻速低的情况下更为适用<sup>[25]</sup>。

### 3 井底钻柱减振增能效果模拟分析

为了解井底钻柱减振增能提速装置的井下增能效果, 以  $\phi 215.9$  mm 井眼的钻进过程为例, 对其进行了模拟分析。相关钻井参数设置: 增能提速装置外径为 177.8 mm, 钻井液流量为  $0.030 \text{ m}^3/\text{s}$ , 钻头喷嘴当量直径为 23.0 mm, 喷嘴压降为 3.47 MPa; 模拟模型内其他相关参数设置: 初步取运动件质量为 50 kg, 弹性复位元件弹性刚度为 50 kN/m, 阻尼系数取 2 711, 钻井液体积弹性模量取 1.40 GPa, 活塞直径取 100 mm, 活塞缸内柱塞直径为 100 mm, 活塞横截面积为  $78.53 \text{ cm}^2$ , 活塞腔体积为  $0.011 78 \text{ m}^3$ 。

深井条件下的振动能量转换效果与浅井时的差异主要体现在其水力参数(小排量、低钻头压降)的特殊性。以塔里木油田 BX1 井的实钻水力参数为例, 4 000 m 以深井段应用井底钻柱减振增能提速装置时, 该井的水力参数如表 1 所示。

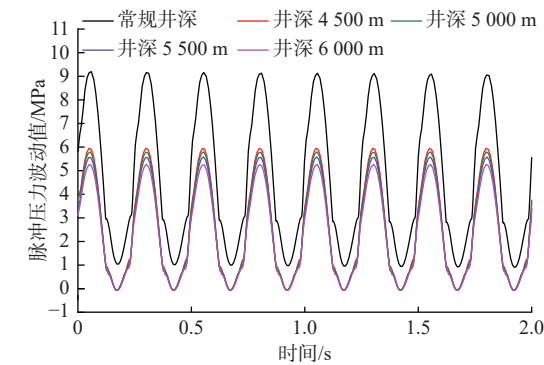
不同井深条件下, 井底钻柱减振增能提速装置振动能量转换后的压力、排量的对比曲线如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 深井条件下实现能量转换后, 产生的最高钻头压降较常规钻头压降提高了 4~10 倍, 输出的最大排量增大了 2~3 倍; 随着井深增加, 排量波动幅度增大, 压力波动幅度略有减小。分析其原因, 认为是深井所用钻头喷嘴当量面积较大, 喷嘴作为装置泄流口, 其面积增大, 液压缸内的压力振荡幅度减小, 但排量波动幅度增大。

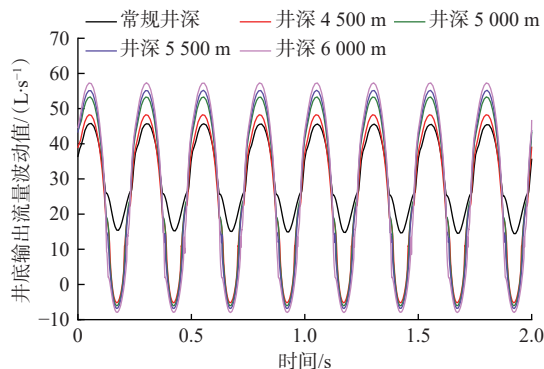
表 1 BX1 井钻至不同井深时的水力参数

Table 1 Hydraulic parameters during drilling at different depths of Well BX1

井深/ m	钻井液排量/ (L·s <sup>-1</sup> )	钻井液密度/ (kg·L <sup>-1</sup> )	钻头压降/ MPa	井口泵压/ MPa
4 500	25	1.66	1.20	19.5
5 000	24	1.71	1.08	19.4
5 500	22	1.79	0.78	20.0
6 000	19	1.83	0.45	19.8



(a) 脉冲压力波动曲线



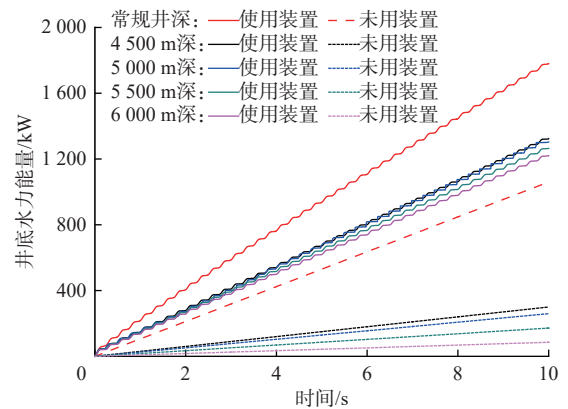
(b) 井底输出流量波动曲线

图 4 不同井深条件下振动能量转换后的压力、流量曲线对比

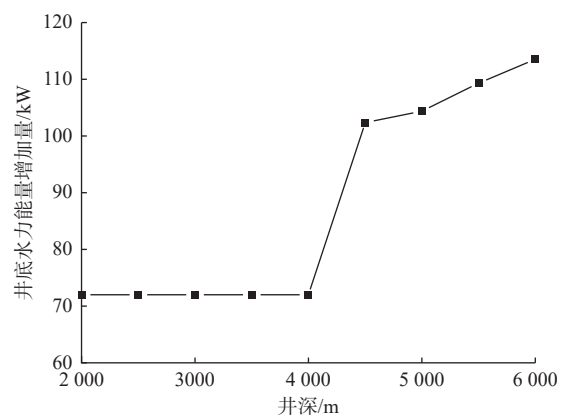
Fig.4 Comparison of pressure and flow rate curves after vibration energy conversion under different well depths

不同井深条件下的井底液压能变化规律如图 5 所示。

从图 5 可以看出,井底钻柱减振增能提速装置在振动能量转换后,随井深加深在井底输出的水力能量略有降低,主要原因是振动能量转换前井底的固有水力能量较低(图 5(a)中虚线所示),但井底水力能量的强化值显著增加。浅井(4 000 m 以浅)时,井底水力能量增加量为 72 kW;但深井(4 000 m 以深)时,井底水力能量增加量均在 100 kJ 以上。这说明,若在深井条件下实现转换钻柱振动能量强



(a) 振动能量转换前后井底水力能量随时间的变化曲线



(b) 振动能量转换后井底水力能量增加量

图 5 不同井深条件下井底水力能量变化规律

Fig.5 Variation law of downhole hydraulic energy with well depth conditions

化井底液压能,可有效解决深井井底水力能量不足的问题。

## 4 现场试验

为考察井底钻柱减振增能提速装置在钻井中的实际应用效果,在四川盆地宁探 1H 井、塔里木盆地 M502-H2 井进行了现场试验。

### 4.1 宁探 1H 井现场试验

宁探 1H 井是四川盆地首口深层煤岩气科探井,设计完钻井深 5 620 m,面临嘉陵江组膏岩层蹩跳钻/卡钻、雷口坡组一段采空区漏失(压力系数 0.4)以及防斜打直等一系列难题。井底钻柱减振增能提速装置在该井四开井段( $\phi 215.9$  mm 井眼)进行了现场试验,钻具组合为  $\phi 215.9$  mm ZTS516 PDC 钻头+ $\phi 177.8$  mm 井底钻柱减振增能提速装置+431×411 双公接头+ $\phi 172.0$  mm 直螺杆+ $\phi 212.0$  mm 稳定器+ $\phi 172.0$  mm 无磁钻铤+ $\phi 172.0$  mm 无磁悬挂

器+ $\phi 165.1$  mm 钻铤 $\times 2$  根+旁通阀+ $\phi 165.1$  mm 钻铤+411 $\times$ 410DS 转换接头+ $\phi 127.0$  mm 加重钻杆 $\times 4$  根+ $\phi 139.7$  mm 钻杆。井底钻柱减振增能提速装置自井深 2 622 m 入井钻至井深 3 246 m(因更换螺杆钻具起钻),总进尺 624 m,纯钻时间 128 h,平均机械钻速 4.88 m/h(见图 6),较邻井同井段平均提速 32.9%,提速效果显著,钻头起出后轻微磨损,新度 90%,对钻头起到了较好的保护作用。

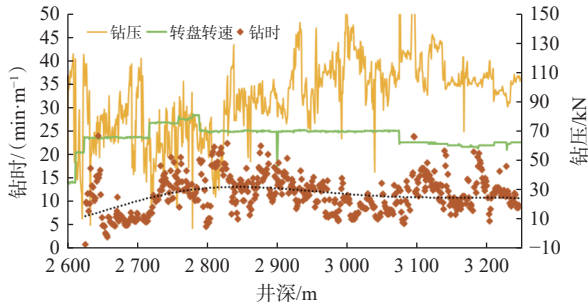


图 6 井底钻柱减振增能提速装置在宁探 1H 井现场试验情况

Fig.6 On-site test of vibration reduction, energy enhancement, and acceleration tool for downhole drilling string in Well Ningtan 1

应用自研钻柱振动监测系统,全过程随钻监测振动情况,结果如图 7 所示。从图 7 可以看出,应用井段平均振动指数 3.10,相较于宁探 1H 井未使用井底钻柱减振增能提速装置井段,振动下降 35.4%,钻进中未发生漏失、阻卡等井下复杂情况,井斜控制良好(井斜角在 2.6°以内),减振提速效果显著。

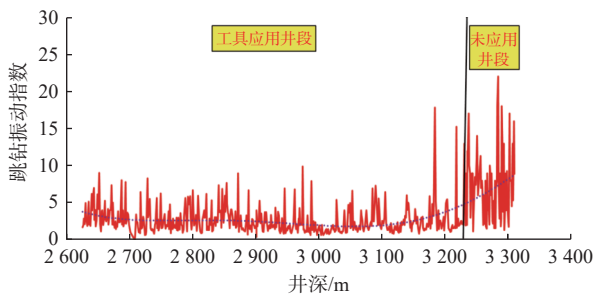


图 7 宁探 1H 井使用井底钻柱减振增能提速装置钻进井段振动监测结果

Fig.7 Drilling vibration monitoring results of Well Ningtan 1H using vibration reduction, energy enhancement, and acceleration tool for downhole drilling string

#### 4.2 M502-H2 井现场试验

M502-H2 井是一口超深水平井,设计完钻井深 8 780 m,二开井段(1 500~4 024 m)钻遇新生界古近系、中生界白垩系一二叠系,岩性为泥岩、砂岩、含砾砂岩及火成岩,该井段试验应用了井底钻柱减

振增能提速装置。钻具组合为  $\phi 333.4$  mm PDC 钻头+ $\phi 228.6$  mm 井底钻柱减振增能提速装置+ $\phi 228.6$  mm 钻铤 $\times 2$  根+ $\phi 318.0$  mm 稳定器+ $\phi 177.8$  mm 钻铤 $\times 18$  根+ $\phi 177.8$  mm 随钻震击器+ $\phi 177.8$  mm 钻铤 $\times 3$  根+ $\phi 139.7$  mm 钻杆。钻进参数:钻压为 30~100 kN,排量为 48~65 L/s,泵压为 18~25 MPa,转速为 60~100 r/min,钻井液密度为 1.05~1.11 kg/L。井底钻柱减振增能提速装置在井下使用 247 h,纯钻进时间 119 h,进尺 2 524 m,平均机械钻速 21.2 m/h。使用了井底钻柱减振增能提速装置的 M502-H2 井,与未使用该装置的 3 口邻井在相同井段的机械钻速对比情况见表 2。

表 2 使用与未使用井底钻柱减振增能提速装置的机械钻速对比

Table 2 Comparison of ROP with and without vibration reduction, energy enhancement, and acceleration tools for downhole drilling string

井类型	井名	井段/m	平均机械钻速/ ( $\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ )
试验井	M502-H2井	1 500~4 024	21.1
	M502井	1 498~4 110	11.8
对比井	M502-H4井	1 502~4 070	12.6
	M502-H6井	1 500~4 250	12.2

由表 2 可知,在钻进参数基本一致的情况下,M502-H2 井使用井底钻柱减振增能提速装置井段与 3 口未使用该装置邻井相同层段的机械钻速相比,机械钻速提高 67.5% 以上。而且,由现场试验情况可知,中生界侏罗系地层(3 286~3 780 m 井段)机械钻速提高幅度可达 151%。这充分说明,井底钻柱减振增能提速装置具有较好的提速效果。

M502-H2 井二开井段的现场试验也证明,井底钻柱减振增能提速装置对钻头具有较好的保护作用。图 8 所示为 M502-H2 井二开井段 PDC 钻头切削齿的磨损情况,该钻头配合井底钻柱减振增能提速装置钻进 2 524 m,起出后钻头新度为 95%;图 9 所示为邻井相同井段 PDC 钻头切削齿的磨损情况,该钻头配合常规钻具组合进尺 1 602 m,起出后钻头新度 60%。

不仅如此,使用井底钻柱减振增能提速装置只用 1 只 PDC 钻头就完成了 M502-H2 井二开井段的钻井施工,且钻头起出后新度达 95% 以上,而不采用该装置时在该区块二开井段需要 1 只 PDC 钻头和 1 只牙轮钻头,甚至更多钻头才能完成。由此可





图8 M502-H2井二开井段钻头使用情况（从左到右依次为1#~5#刀翼）

Fig.8 Application of drill bits in second section of Well M502-H2 (Blade 1~5 from left to right)



图9 邻井二开井段钻头使用情况（从左到右依次为1#~5#刀翼）

Fig.9 Application of drill bits in second section of adjacent well (Blade 1~5 from left to right)

知,使用井底钻柱减振增能提速装置不但可以提速,还可以通过减振保护钻头,有效延长钻头使用寿命,减少钻头使用量,从而缩短钻井周期、降低钻井成本。

## 5 结论与建议

1)钻柱振动具有强度大、频率高和随着井深增加而增强的特点,给钻具及钻头等带来了巨大的危害,提出将该部分能量作为井下提速工具的动力源,研制了基于该能量的井下提速工具,既能减小钻柱振动的危害,又能提高钻井效率。

2)设计了井底钻柱减振增能提速装置,模拟分析认为,钻柱振动能量可以转化为钻井液的喷射能量,实现钻井液高压喷射辅助提速的目的。

3)井底钻柱减振增能提速装置的现场试验表明,该装置不但可以提高钻速,还可以通过减振保护钻头,有效延长钻头使用寿命,从而缩短钻井周期、降低钻井成本。

4)深井超深井钻速低是目前深部油气藏开发过程中面临的主要难题之一,要想攻克该难题,应该充分、合理、有效地利用井下可以利用的一切能量,来提高破岩钻进效率。井下钻柱振动能量利用技术的相关研究刚刚开始,目前仅实现了振动能量

到钻井液喷射能量的转换,建议开展更深入、广泛的研究。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 陈国庆,郑瑞强,刘文鹏,等. 钻井提速工具设计与井下安全的探讨[J]. 西部探矿工程, 2022, 34(8): 51-53.  
CHEN Guoqing, ZHENG Ruiqiang, LIU Wenpeng, et al. Exploration of design of drilling acceleration tools and underground safety[J]. West-China Exploration Engineering, 2022, 34(8): 51-53.
- [2] 甘心. 钻井提速用振动冲击工具研究进展[J]. 钻探工程, 2021, 48(2): 85-93.  
GAN Xin. Advances in vibration impactors for drilling acceleration[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(2): 85-93.
- [3] 穆总结,李根生,黄中伟,等. 振动冲击钻井提速技术现状及发展趋势[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(3): 253-260.  
MU Zongjie, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Status and development trend of vibration-impact ROP improvement technologies[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42(3): 253-260.
- [4] 罗恒荣,崔晓杰,谭勇,等. 液力扭转冲击器配合液力加压器的钻井提速技术研究与现场试验[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(3): 58-62.  
LUO Hengrong, CUI Xiaojie, TAN Yong, et al. Research and field test on drilling acceleration technology with hydraulic torsional impactor combined with hydraulic boosters[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(3): 58-62.
- [5] 尹浩,梁健,李宽,等. 万米科学钻探关键机具优化措施研究[J]. 钻探工程, 2023, 50(4): 16-24.  
YIN Hao, LIANG Jian, LI Kuan, et al. Research on optimization measures of key instrument for myriametric scientific drilling[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(4): 16-24.
- [6] 尹浩,梁建,孙建华,等. 万米科学钻探钻杆柱的优化配置发展趋势[J]. 科技导报, 2023, 41(6): 108-120.  
YIN Hao, LIANG Jian, SUN Jianhua, et al. Development trend of drill string optimal configuration in myriametric scientific drilling[J]. Science & Technology Review, 2023, 41(6): 108-120.
- [7] 刘永旺,管志川,张洪宁,等. 基于钻柱振动的井下提速技术研究现状及展望[J]. 中国海上油气, 2017, 29(4): 131-137.  
LIU Yongwang, GUAN Zhichuan, ZHANG Hongning, et al. Research status and prospect of ROP-enhancing technology based on drill string vibration[J]. China Offshore Oil and Gas, 2017, 29(4): 131-137.
- [8] 高明帅,王瑜,王志乔,等. 基于磁流变液的井下钻具主动减振技术[J]. 石油机械, 2013, 41(9): 7-11.  
GAO Mingshuai, WANG Yu, WANG Zhiqiao, et al. MRF-based downhole tool active vibration damper technology[J]. China Petroleum Machinery, 2013, 41(9): 7-11.
- [9] 汤楠,汪跃龙,霍爱清,等. 基于信号相似性的导向钻井下传信号处理方法[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 111-117.  
TANG Nan, WANG Yuelong, HUO Aiqing, et al. A downward signal processing method for rotary steerable drilling system based on signal similarity[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 111-117.



- [ 10 ] 左欢欢. 相似性原理的应用探究 [J]. *产业与科技论坛*, 2016, 15(20): 73.  
ZUO Huanhuan. Exploration of the application of similarity principle[J]. *Industrial & Science Tribune*, 2016, 15(20): 73.
- [ 11 ] 魏文忠, 管志川, 刘永旺, 等. 直井眼钟摆钻具纵向振动特性的实验研究 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2007, 31(2): 64-68.  
WEI Wenzhong, GUAN Zhichuan, LIU Yongwang, et al. Experimental study on longitudinal vibration characteristics of pendulum assembly in straight hole[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2007, 31(2): 64-68.
- [ 12 ] 刘永旺, 管志川, 魏文忠, 等. 井底钟摆类钻具转动规律的实验研究 [J]. *钻采工艺*, 2008, 31(5): 27-29.  
LIU Yongwang, GUAN Zhichuan, WEI Wenzhong, et al. Experimental study on rotary characteristics of bottom pendulum assembly[J]. *Drilling & Production Technology*, 2008, 31(5): 27-29.
- [ 13 ] 魏文忠. 底部钻柱振动特性及减振增压装置设计研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2007.  
WEI Wenzhong. Study on vibration characteristic of bottom drilling string and design of drilling string shock absorption & down hole hydraulic pressurizing system[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2007.
- [ 14 ] 崔金栋. 减振冲击钻井系统设计研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2008.  
CUI Jindong. Design research on drilling string shock absorption & percussion system[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2008.
- [ 15 ] 史怀忠, 李根生, 王学杰, 等. 水力脉冲空化射流欠平衡钻井提高钻速技术 [J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(1): 111-115.  
SHI Huaizhong, LI Gensheng, WANG Xuejie, et al. Improving the rate of penetration by hydraulic pulsating-cavitating water jet under-balance pressure drilling[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(1): 111-115.
- [ 16 ] 李根生, 史怀忠, 沈忠厚, 等. 水力脉冲空化射流钻井机理与试验 [J]. *石油勘探与开发*, 2008, 35(2): 239-243.  
LI Gensheng, SHI Huaizhong, SHEN Zhonghou, et al. Mechanisms and tests for hydraulic pulsed cavitating jet assisted drilling[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, 35(2): 239-243.
- [ 17 ] 王智锋. 负压脉冲钻井技术理论及方法 [J]. *石油钻采工艺*, 2005, 27(6): 13-15.  
WANG Zhifeng. Discussion on theory & methodology of suction-pulse drilling technique[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2005, 27(6): 13-15.
- [ 18 ] LIU Yongwang, GUAN Zhichuan. Discussion on the energy sources of down-hole accelerate ROP tool in the process of drilling deep or ultra-deep well[C]//The International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE 2012). Nanjing: IEEE, 2012: 886-890.
- [ 19 ] 刘永旺. 井下减振增压装置设计研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2007.  
LIU Yongwang. Design research on drill string absorption & down hole hydraulic pressurizing system[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2007.
- [ 20 ] 刘永旺, 管志川, 史玉才, 等. 井底光钻铤钻具组合旋转及钻压波动规律模拟研究 [J]. *石油矿场机械*, 2012, 41(5): 52-56.  
LIU Yongwang, GUAN Zhichuan, SHI Yucai, et al. Experiment on rotation and longitudinal vibration regularity of slick bottom hole assembly in bottom hole[J]. *Oil Field Equipment*, 2012, 41(5): 52-56.
- [ 21 ] ZHANG Yuying, LIU Yongwang, XU Yiji, et al. Drilling characteristics of combinations of different high pressure jet nozzles[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2011, 23(3): 384-390.
- [ 22 ] 管志川, 张洪宁, 张伟, 等. 吸振式井下液脉冲发生装置 [J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(5): 618-622.  
GUAN Zhichuan, ZHANG Hongning, ZHANG Wei, et al. Equipment and technique for improving penetration rate by the transformation of drill string vibration to hydraulic pulsating jet[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(5): 618-622.
- [ 23 ] 张德彪. 井下减振增压钻井提速技术及其现场应用分析 [J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2021, 41(16): 183-184.  
ZHANG Debiao. Analysis of downhole vibration reduction and pressure boosting drilling speed increasing technology and its on-site application[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2021, 41(16): 183-184.
- [ 24 ] 管志川, 刘永旺, 魏文忠, 等. 井下钻柱减振增压装置工作原理及提速效果分析 [J]. *石油钻探技术*, 2012, 40(2): 8-13.  
GUAN Zhichuan, LIU Yongwang, WEI Wenzhong, et al. Down-hole drill string absorption & hydraulic supercharging device' working principle and analysis of speed-increasing effect[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2012, 40(2): 8-13.
- [ 25 ] 张洪宁. 直井井底钻压波动特性及吸振式脉冲发生装置设计与应用 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016.  
ZHANG Hongning. Design and application of hydraulic pulsed jet generator based on the research of fluctuation of weight on bit in vertical well[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2016.