

文章编号:1673-2677(2026)02-0010-09

DOI:10.12388/j.issn.1673-2677.2026.02.002

引用:穆总结,邱梓伦,方妍,等.深层致密页岩复合冲击钻井提速研究[J].新疆石油天然气,2026,22(2):10-18.

Cite: MU Zongjie, QIU Zilun, FANG Yan, et al. Study on ROP enhancement of composite percussive drilling in deep tight shale[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2026, 22(2): 10-18.

深层致密页岩复合冲击钻井提速研究

穆总结^{1,2}, 邱梓伦^{1,3}, 方妍¹, 杨哲华¹, 石建刚⁴, 张潘潘^{1,2}

(1. 中国石油大学(北京)克拉玛依校区, 新疆克拉玛依 834000; 2. 新疆油气智能勘探与开发重点实验室, 新疆克拉玛依 834000; 3. 中国石化东北油气分公司, 吉林长春 130062; 4. 中国石油新疆油田分公司采油工艺研究院, 新疆克拉玛依 834000)

摘要:针对玛北风城组深层致密页岩抗压强度高、可钻性差、钻井周期长的难题,开展了轴扭耦合冲击钻井参数优化实验研究,旨在明确影响破岩效率的主控因素,形成适用于该地层的冲击钻井参数匹配方法。采用复合冲击破岩效率测试装置,对目标地层岩心在定钻压、转速条件下,开展了不同轴扭冲击频率组合下的钻进实验,评估冲击频率对机械钻速、扭矩和机械比能的影响规律。结果表明,轴扭耦合冲击可显著提升钻速、降低扭矩和机械比能,其中高频扭向冲击在降扭和节能中起主导作用,轴冲与扭冲存在“轴冲促裂、扭冲解黏”的协同破岩机制。证实了轴扭耦合冲击技术在该页岩地层中具有显著的提速、降扭、节能效果,所得参数优化方法可为现场钻井设计提供理论依据,对深层硬地层钻井提速具有重要工程指导价值。

关键词: 深层致密页岩; 轴扭耦合冲击; 参数优化; 风城组; 破岩效率

中图分类号: TE21

文献标识码: A

Study on ROP Enhancement of Composite Percussive Drilling in Deep Tight Shale

MU Zongjie^{1,2}, QIU Zilun^{1,3}, FANG Yan¹, YANG Zhehua¹, SHI Jiangang⁴, ZHANG Panpan^{1,2}

(1. Karamay Campus, China University of Petroleum (Beijing), Karamay 834000, Xinjiang, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Oil and Gas Intelligent Exploration and Development, Karamay 834000, Xinjiang, China; 3. Sinopec Northeast Oil & Gas Company, Changchun 130062, Jilin, China; 4. Production Technology Research Institute, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay 834000, Xinjiang, China)

Abstract: To address the challenges of high compressive strength, low drillability, and extended drilling time in the deep tight shale of the Mabei Fengcheng Formation, an experimental study on drilling parameter optimization for axial-torsional coupled percussive drilling was conducted. This study intended to identify the dominant factors affecting rock-breaking efficiency and to establish a parameter matching method suitable for this layer. Using a composite percussive rock-breaking efficiency testing device, drilling experiments were performed on core samples from the target layer under fixed conditions of weight-on-bit and rotational speeds with different combinations of axial and torsional impact frequencies. The effects of impact frequency on rate of penetration (ROP), torque, and mechanical specific energy (MSE) were evaluated. The results show that axial-torsional coupled impact can significantly increase the ROP

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“流量-转速耦合作用下液力离合导向钻井控制机理研究”(52274017); 新型油气勘探开发国家科技重大专项“混积型页岩油优快钻完井与差异化压裂技术集成示范”(2025ZD1405002); 新疆维吾尔自治区天山英才培养计划“准噶尔盆地玛湖凹陷北斜坡二叠系风城组页岩油钻井提速技术研究”(2022TSYC-CX0055); 新疆维吾尔自治区科技计划“超深层岩体物理力学特性表征与原位测量方法”(2025B01014-1)。

第一作者: 穆总结(1981—), 2023年毕业于中国石油大学(北京)石油工程专业, 博士, 教授, 目前从事深井超深井先进钻井技术理论与应用方向研究。(E-mail)muzongjie@cupk.edu.cn

通讯作者: 张潘潘(1994—), 2023年毕业于中国石油大学(北京)油气井工程专业, 博士, 副教授, 目前从事油气井工程方向研究。(E-mail)zhangpanpan0819@126.com

while reducing torque and MSE. High-frequency torsional impact plays a dominant role in torque reduction and energy saving, and a synergistic rock-breaking mechanism was identified in which axial impact promotes crack propagation, whereas torsional impact alleviates bit sticking. This study confirms that axial-torsional coupled impact technology provides significant benefits in improving drilling efficiency, reducing torque, and lowering energy consumption in this shale formation. The obtained parameter optimization method provides a theoretical basis for field drilling design and offers important engineering guidance for accelerating drilling in deep hard strata.

Key words: deep tight shale; axial-torsional coupled impact; parameter optimization; Fengcheng Formation; rock-breaking efficiency

我国陆相页岩油资源丰富、分布广泛,地质资源量超过300亿吨^[1-3]。随着油气勘探开发对象不断由浅层向深层、超深层拓展,超深层页岩油探明储量持续增加^[4]。中-高成熟度页岩油是我国页岩油战略突破的重要领域,加强陆相页岩油勘探开发是保障国家能源供应安全的重要途径^[5]。准噶尔盆地玛北地区风城组为我国陆相页岩油重要超深层目标层系之一,埋深达4 500~6 100 m,潜在资源量约5.3亿吨^[6-8]。玛北风城组页岩油的高效开发,对于增强国内油气供应能力、保障国家能源安全以及支撑深地领域关键技术突破具有重要意义。

提高钻井效率是深层陆相页岩油规模化开发的前提,也是深地资源高效利用的重要环节。受多期构造运动和成岩演化共同影响,深层陆相页岩地层通常具有高温、高地应力、高岩石强度及强非均质性等特征^[9]。在此条件下,井下岩石可钻性明显变差,钻头破岩效率降低,机械钻速偏低,钻井周期显著延长,严重制约了深层页岩油的效益开发。对于玛北风城组而言,该问题尤为突出。现场实践表明,玛北地区风城组页岩油井普遍存在钻井提速困难、参数优化难度大及钻井周期偏长等问题,已成为制约该区块规模开发的重要工程瓶颈^[10]。

针对深部硬脆及难钻地层提速需求,冲击钻井技术可在常规切削载荷基础上叠加瞬态动态载荷、强化井底岩石破碎过程,是提升硬地层破岩效率的重要技术途径^[11-12]。已有研究表明,动静组合载荷能够显著改变岩石内部应力分布,促进裂纹萌生、扩展与贯通,从而提高岩石破碎体积并改善能量利用效率^[13-18]。随着研究的深入,轴扭耦合冲击逐渐成为关注重点^[19]。相关研究表明,轴向冲击有利于增强法向动态载荷、促进裂纹扩展和体积破碎,扭向冲击则有助于削弱刀齿-岩石界面的黏滑效应、降低切削阻力并改善切削稳定性,二者合理匹配有望实现提速、降扭与降能耗的协同优化^[20]。

尽管轴扭耦合冲击钻井技术已取得一定进展,并在提速方面表现出较好的工程应用潜力,但针对玛北风城组深层致密页岩的参数匹配研究仍相对不足^[21]。

现有轴扭耦合冲击实验多以热干岩等硬岩为对象,而针对矿物组成复杂、层理发育明显、非均质性强的深层致密页岩地层,相关实验研究仍较少^[22]。已有数值模拟研究多围绕单个PDC齿条件下动态载荷参数对破岩效果的影响展开,对轴向冲击频率与扭向冲击频率耦合关系的系统揭示仍不充分^[23]。基于全尺寸PDC钻头的复合冲击破岩研究虽分析了机械比能(MSE)和破岩效率演化特征,但研究对象仍主要集中于高硬度硬岩,对深层页岩条件下“提速-降扭-节能”协同机制的认识仍有不足^[24]。已有轴扭等频冲击研究表明,频率匹配对硬岩钻进效率具有重要影响,但其结论尚不能直接作为玛北风城组深层致密页岩冲击参数设计依据^[25]。

基于此,本文以玛北风城组井下岩心为研究对象,依托复合冲击条件下PDC钻头破岩效率测试装置,在原位温压条件下开展轴扭耦合冲击破岩实验。通过轴向冲击与扭向冲击(下文简称轴冲、扭冲)频率组合实验,系统分析机械钻速、扭矩及机械比能的变化规律,揭示轴冲与扭冲在促裂、解黏及稳切削过程中的协同作用机制,并结合现场试验形成适用于玛北风城组深层致密页岩的冲击钻井参数优化思路。

1 实验材料与方法

本节主要介绍实验相关准备工作,包括破岩装置、工作原理、岩石材料及实验方案。

1.1 实验装置

实验在油气资源与探测国家重点实验室克拉玛依分室提供的复合冲击条件下PDC钻头破岩效率测试装置上完成。该装置主要由旋转系统、轴向冲击系统、扭向冲击系统、岩心夹持系统、参数采集系统、控制机柜及计算机等组成,可实现对钻压(钻头轴向压力)、转速、围压及冲击频率等参数的独立调控,并实时记录钻进位移、扭矩等实验数据。实验装置如图1所示。

1.2 试样制备方法

实验岩样为新疆玛北风城组井下岩心。原始岩心主要为直径约10 cm的圆柱状或不规则柱状样品。



1—控制机柜;2—拍摄装置;3—计算机;4—旋转系统;5—轴向冲击系统;6—扭向冲击系统;7—岩心夹持系统;
8—钻头;9—气压机;10—液压油罐;11—钻井液桶;12—加载系统;13—岩心加热装置。

图1 实验装置
Fig. 1 Experimental setup

为满足室内冲击破岩实验要求,先采用DL7732型往复复式切割机将岩样加工为厚度约5 cm的柱状样块,再采用水泥浇筑方式将岩样包埋固定于模具中心,以保证实验过程中岩样边界条件稳定、夹持可靠。待水泥固化后取出试样,用于后续钻进破岩实验,实验岩心样品如图2所示。

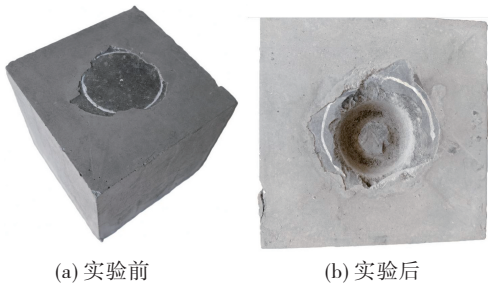


图2 实验岩心试样
Fig. 2 Experimental core sample

1.3 实验方案设计

1.3.1 轴扭冲击频率组合实验

为研究轴向冲击频率与扭向冲击频率匹配关系对玛北风城组深层致密页岩破岩效率的影响,本文开展轴扭耦合冲击频率组合实验。实验采用全因素设计方法,将轴向冲击频率和扭向冲击频率分别设置为0、8、16 Hz三个水平,构建9组频率组合工况,结果见表1。无轴冲、无扭冲的常规旋转钻进工况作为对照组,其余工况在此基础上分别施加不同水平的轴冲频率和扭冲频率,以对比分析单一轴冲、单一扭冲及轴扭耦合作用下的破岩效果差异。

实验过程中采用流量为10 L/min的清水作为循环

表1 轴扭冲击实验参数							
Tab. 1 Axial-torsional impact experimental paraments							
序号	钻压/ kN	转速/ (r·min ⁻¹)	轴冲 频率/ Hz	扭冲 频率/ Hz	钻速/ (mm·s ⁻¹)	扭矩/ (N·m)	机械 比能/ MPa
1	10	20	0	0	0.77	163.77	81.67
2	10	20	8	0	0.26	147.19	211.67
3	10	20	16	0	1.14	151.60	51.45
4	10	20	0	8	0.30	110.58	140.57
5	10	20	8	8	1.12	159.30	55.03
6	10	20	16	8	0.99	172.83	67.09
7	10	20	0	16	0.55	31.26	23.09
8	10	20	8	16	0.32	22.70	28.48
9	10	20	16	16	0.98	38.21	29.35

介质,钻压设置为10 kN,转速设置为20 r/min,压力系数为1.4,即X、Y轴压力加载比例为1.4,模拟地层压力。实验中连续记录钻进位移、时间及扭矩等参数变化,用于后续机械钻速、扭矩和机械比能的计算与对比分析。

1.3.2 数据处理

实验过程中,钻进位移随时间变化通常表现为初始侵入阶段和随后稳定切削阶段,前者对应钻头逐步侵入岩石并建立切削作用,后者则表现为相对稳定的持续破岩过程^[26]。在侵入阶段,刀齿-岩石接触逐步建立,能量积累与岩石间歇性破坏交替出现,载荷信号通常表现出较明显波动^[27]。

当钻深增加至约6.5 mm后,钻头进入相对稳定的切削状态,扭矩曲线表现出较稳定的周期性变化;接

近实验终点时,受试样边界效应影响,扭矩再次出现明显波动,因此后续统计分析宜优先选取中段稳定切削区段^[28]。相应扭矩-时间典型曲线如图3所示。

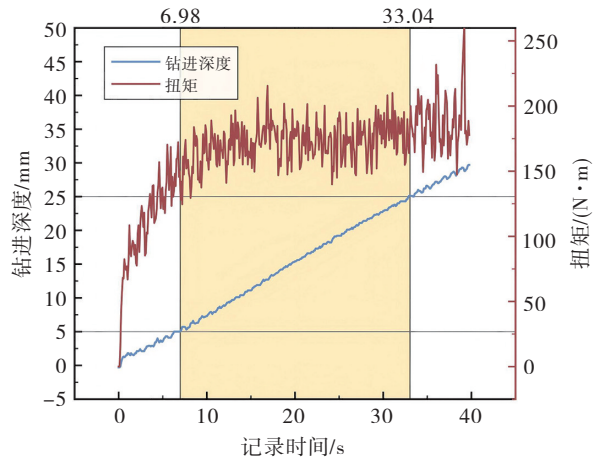


图3 破岩扭矩、钻深随时间变化曲线
Fig. 3 Rock torque and drilling depth changes over time

2 结果与分析

2.1 轴扭冲击频率组合对机械钻速的影响

在钻压10 kN、转速20 r/min、压力系数1.4条件下,不同轴向冲击频率与扭向冲击频率组合下的机械钻速差异明显,说明轴冲与扭冲对玛北风城组深层致密页岩破岩过程具有显著耦合作用。与无轴扭冲击对照组相比,轴扭耦合冲击总体上均能提高机械钻速,但提速效果并非随频率简单线性增加,而是表现出明显的组合敏感性。

如图4所示,从单独作用看,高频纯轴冲的提速效果明显优于纯扭冲。以无轴冲、无扭冲工况为对照,其机械钻速为0.77 mm/s;16 Hz纯轴冲条件下机械钻速为1.14 mm/s,较对照组提高约48.1%,表明轴冲提供的周期性法向动态载荷有利于促进裂纹萌生、扩展和体积破碎。相比之下,单独施加扭冲时机械钻速未表现出提升效果,其中8 Hz和16 Hz纯扭冲条件下机械钻速分别为0.30 mm/s和0.55 mm/s,均低于对照组。说明在缺乏足够轴向冲击能量输入时,扭冲主要表现为改善切削状态和降低切削阻力,而非直接增强体积破岩能力。

从耦合效应看,轴冲与扭冲对机械钻速的影响具有明显组合敏感性。按表1原始数据计算,8 Hz:8 Hz、16 Hz:8 Hz和16 Hz:16 Hz组合的机械钻速分别为1.12、0.99和0.98 mm/s,较对照组分别提高约45.5%、28.6%和27.3%;其中8 Hz:8 Hz组合提速效果最明显。与此同时,8 Hz:16 Hz组合机械钻速仅为0.32 mm/s,低于对照组,说明轴扭冲击并非简单叠加

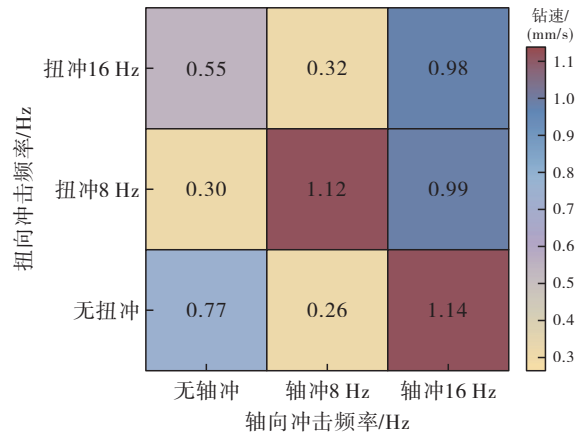


图4 不同轴扭冲击频率比下的平均机械钻速对比
Fig. 4 Comparison of average rate of penetration under different axial-torsional impact frequency ratios

关系,也并非频率越高提速效果越好。合理的轴扭频率匹配能够促进轴冲促裂与扭冲稳切削作用协同发挥,而不匹配的频率组合可能导致切削不连续、能量耗散增加或破岩效率下降。

如图5所示,机械钻速高值区主要集中在轴冲中等偏高、扭冲较高的局部区域,而非单一频率最大化或固定频率比例叠加。这表明轴扭耦合冲击破岩存在最优能量分配关系:轴冲负责提供法向动态载荷并诱导裂纹贯通,扭冲则负责维持切削稳定、抑制黏滑与促进排屑。若轴冲过强而扭冲不足,可能导致切削不连续和局部再压实;若仅提高扭冲而缺乏足够轴冲,则难以有效触发页岩内部裂纹扩展。因此,机械钻速的提升本质上来源于“轴冲促裂-扭冲稳切削”的协同作用。

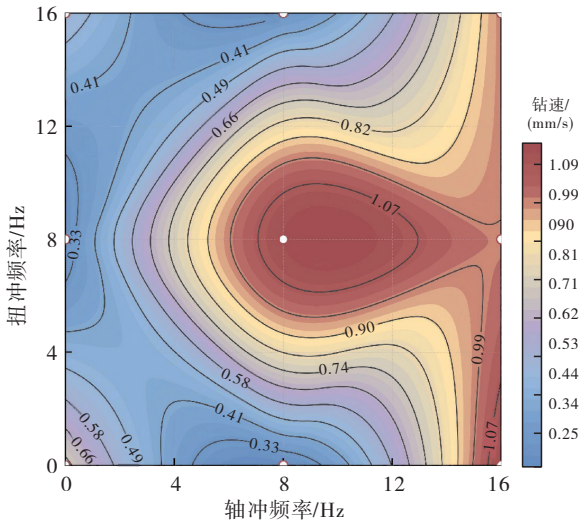


图5 轴扭冲击频率组合对机械钻速的响应曲面
Fig. 5 Response surface of rate of penetration under different axial-torsional impact frequency combinations

2.2 轴扭冲击频率组合对扭矩的影响

扭矩是评价钻头切削阻力和切削稳定性的重要参数。实验结果表明,不同轴扭冲击频率组合下扭矩

响应差异显著,其中扭冲频率对扭矩的影响尤为突出。总体来看,当扭冲频率较低(0或8 Hz)时,扭矩整体处于较高水平,集中在110.58~172.83 N·m区间;而当扭冲频率提高至16 Hz时,扭矩明显下降,说明高频扭向冲击能够显著降低钻头切削岩石过程中的旋转阻力,如图6所示。

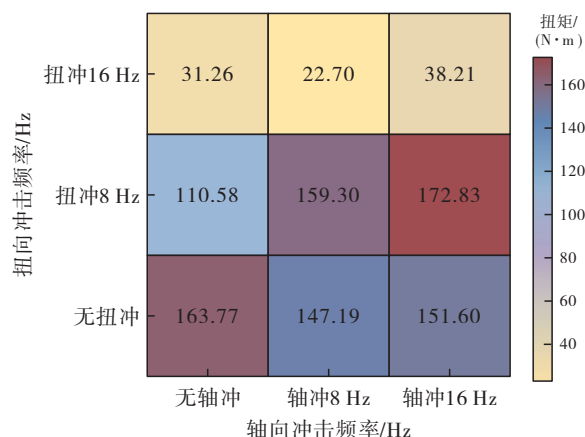


图6 不同轴扭冲击频率比下的平均扭矩对比

Fig. 6 Comparison of average torque under different axial-torsional impact frequency ratios

在16 Hz扭冲条件下,平均扭矩降至22.70~38.21 N·m,与无扭冲和8 Hz扭冲工况相比,平均扭矩整体降低约71.7%~85.8%,说明高频扭冲具有显著降阻作用,而低扭冲工况下通常维持在中高水平。这一结果表明,扭向冲击在破岩过程中主要承担“解黏”和“降阻”功能,如图7所示。

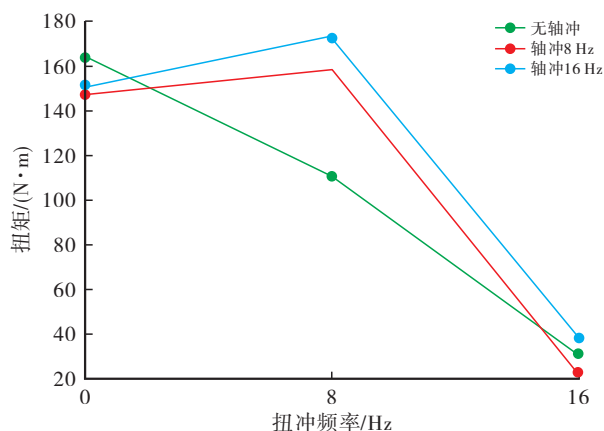


图7 扭向冲击频率对扭矩的降低效应

Fig. 7 Torque-reduction effect of torsional impact frequency

其机理在于,高频扭冲可周期性打断刀齿-岩石界面的静摩擦黏附,抑制黏滑振动,减小瞬时切屑厚度,并改善切屑形成与排出过程,从而使平均切削阻力和扭矩波动幅度同步下降。轴冲对扭矩的作用则表现出更强的条件依赖性:在低扭冲区,提高轴冲频

率往往伴随扭矩升高;而在高扭冲区,这种放大效应明显减弱甚至被部分抵消,说明高频扭冲能够在一定程度上削弱轴冲所带来的瞬时法向载荷对扭矩的传递,响应曲面如图8所示。

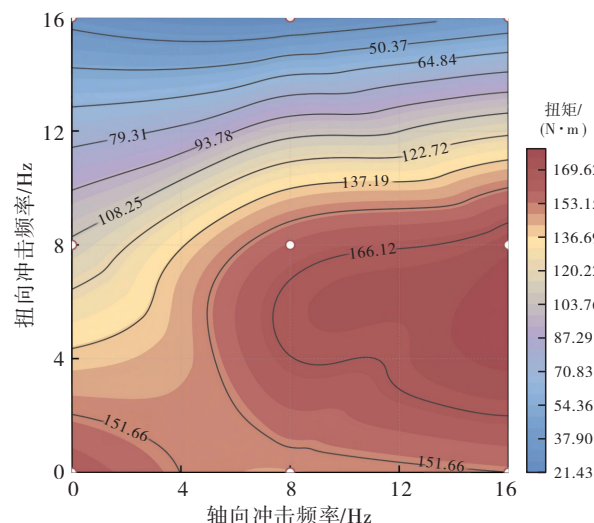


图8 轴扭冲击频率组合对扭矩的响应曲面

Fig. 8 Response surface of torque under different axial-torsional impact frequency combinations

因此,若以降低扭矩和改善钻头受力状态为目标,优选组合应位于高扭冲-中低轴冲区域。总体来看,扭冲是控制扭矩水平的关键变量,而轴冲对扭矩的影响取决于其与扭冲的匹配关系。

2.3 轴扭冲击频率组合对机械比能的影响

机械比能(MSE)反映单位体积岩石破碎所消耗的能量,是评价破岩能效的重要指标^[29]。实验结果表明,扭冲频率提高对MSE降低具有稳定而显著的促进作用,而轴冲对MSE的影响则具有明显条件性,二者之间存在显著耦合。

总体上看,当扭冲频率提高至16 Hz时,不同轴冲条件下MSE均明显降低。如图9所示,16 Hz扭冲条件下MSE较0 Hz扭冲降低约43.0%~86.5%,较8 Hz扭冲降低约48.2%~83.6%;按平均值计算,16 Hz扭冲下MSE较0 Hz和8 Hz扭冲分别降低约76.5%和69.2%。这说明高频扭冲能够有效降低无效摩擦与黏滑耗能,使输入能量更多转化为岩石有效破碎功,从而显著改善破岩能效。

与之相比,轴向冲击对MSE的影响依赖于扭冲是否充分。在低扭冲区,提高轴向冲击频率往往伴随MSE上升,说明单纯增强法向动态载荷虽有利于裂纹形成,但若缺乏足够扭向扰动,容易增加屑流阻滞、重复压实及局部摩擦损失,反而降低能量利用率。而在中高扭冲区,扭向冲击首先打破黏滑并改善切削环

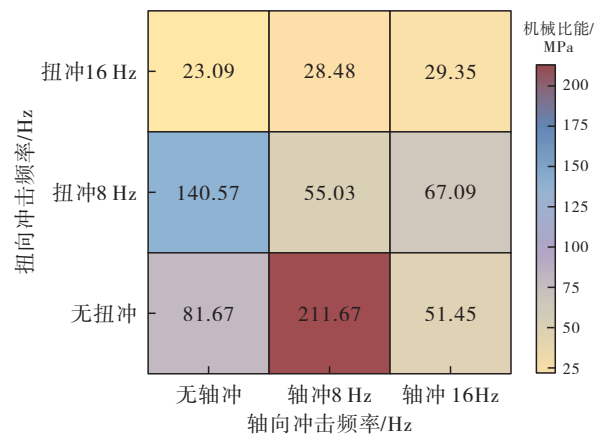


图9 不同轴扭冲击频率比下的平均机械比能对比
Fig. 9 Comparison of average MSE under different axial-torsional impact frequency ratios

境,随后轴冲的冲击力才能更有效地转化为岩石内部裂纹扩展功和压剪破坏功,此时MSE反而下降,表现出明显的协同降能效应,如图10所示。

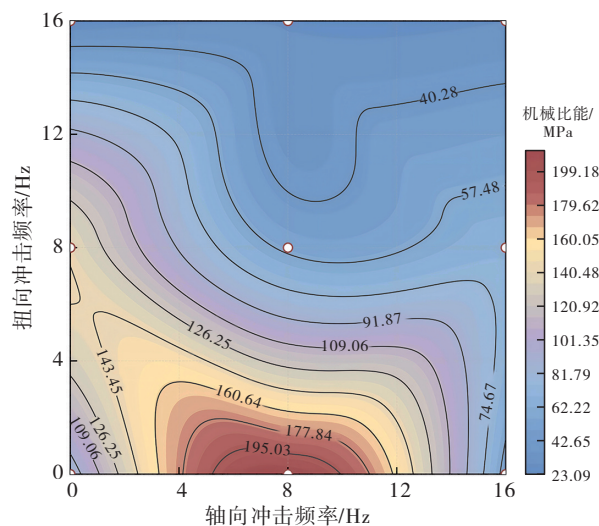


图10 轴扭冲击频率组合对机械比能的响应曲面
Fig. 10 Response surface of MSE under different axial-torsional impact frequency combinations

从优化结果看,MSE低值区主要分布在高扭冲配合中等轴冲区域,这与扭矩低值区具有较强一致性,也说明降低机械比能与降低切削阻力之间存在内在联系。然而,最低MSE并不必然对应最高机械钻速,说明能效最优与提速最优并不总是完全重合。现场参数优化应综合机械钻速、扭矩、MSE及振动响应等多指标进行平衡,而不能仅以单一最低MSE作为唯一目标。

3 现场试验

3.1 复合冲击提速工具介绍

研制的CUPK-II型轴-扭复合冲击提速钻井工具

在丰探102H井下二叠统风城组二段成功应用,工具如图11所示。



图11 复合冲击提速工具实物图
Fig. 11 Composite percussive rate-improvement tool

该复合冲击提速工具主要由加压总成、冲击总成、万向总成、马达总成等部分组成。钻井液流经马达总成,驱动转子旋转,转子带动万向总成及冲击总成动阀片旋转,动阀片与静阀片相对旋转,使过流面积周期性变化,从而使阀片两端的压差产生周期性变化,进而产生周期性的冲击力,以实现钻头高速旋转条件下的旋转冲击钻井,达到提高钻井速度的目的。

本工具对钻头无特殊要求,根据拟钻进地层情况选用常规优选钻头即可,其在钻进过程中能提供额外的非持续性冲击力,可有效保护钻头,且碎岩能力更强,同时凭借独特的内部结构,使用寿命也更长,详细参数见表2。

表2 提速工具参数表			
Tab. 2 Parameters of the rate-improvement tool			
参数	数值	参数	数值
本体外径	172 mm	适用钻头直径	215.9 mm
马达头数比 (转子:定子)	7:8	钻井液特性	水基钻井液、 油基钻井液
马达级数	5.5 级	上端扣型	114.3 mm IF (母扣)
转速	83 ~ 166 r/min	下端扣型	114.3 mm REG (母扣)
工作压降	3.0 ~ 6.0 MPa	冲击频次	390 ~ 660次min ⁻¹
流量范围	28 ~ 38 L/s	最大冲击力	19 kN
额定扭矩	≥9 552 N·m	工作温度	160 ℃
承受最大 拉力	3 240 kN	长度	8 300 mm
使用井眼	212.7~ 250.8 mm	总重量	960 kg
适用温度	≤160 ℃	扶正器外径	208 mm

3.2 钻具组合

试验井段复合冲击提速钻具组合见表3。

表3 丰探102H井提速工具使用情况
Tab. 3 Bottom hole assembly (including the rate-improvement tool), Well Fengtan-102H

开次	井眼尺寸/mm	钻进井段/m	钻具组合
三开	215.9	6 484 ~ 6 684	Φ215.9 mm钻头+Φ172 mm复合冲击提速工具+Φ212 mm扶正器+浮阀+Φ172mm 随钻测量工具(LWD)+转换接头+Φ139.7 mm加重钻杆3根+Φ139.7 mm钻杆219根+Φ127 mm加重钻杆54根+Φ127 mm钻杆

3.3 现场试验情况

2025年8月30日,第一套CUPK-Ⅱ型复合冲击提速钻井工具顺利完成入井作业。在井口测试阶段,该工具在测试排量27 L/s、泵压3.67 MPa的条件下运行正常,性能符合预期。本次作业使用的钻头为DBS公司生产的CS55DRMs型钻头,钻具入井时井深为6 484 m,

钻进阶段主要参数包括:转速25~60 r/min、排量30 L/s、泵压33~35 MPa、钻压80~160 kN。全程采用复合钻进模式,因钻时逐渐变慢,于井深6 633 m起钻进行钻头更换。该工具本次入井共完成进尺149 m,纯钻时间48 h,平均机械钻速达3.1 m/h,相关参数见表4。出井后复合冲击提速工具检查外观完好,工作正常。

表4 丰探102 H井提速工具使用情况
Tab. 4 Operation parameters of the rate-improvement tool, Well Fengtan-102H

工具 编号	井段/ m	进尺/ m	钻压/ kN	排量/ (L·s ⁻¹)	转速/ (r·min ⁻¹)	纯钻时间/ h	平均机速/ (m·h ⁻¹)	层位	岩性
06255070	6 484~6 633	149	80~160	30	25~60	48	3.1	风城组	灰色荧光含云灰长英质页岩

3.4 提速效果对比

复合冲击提速工具应用于风城组6 484 ~ 6 633 m井段,该井段岩性以灰色荧光含云灰长英质页岩为主。如图12所示,与同井未采用提速工具的上趟钻相比,该工具在风城组地层中进尺提升12%,机械钻速提高46.2%,展现出良好的破岩与提速效果。

3.5 试验总结

本次CUPK-Ⅱ型复合冲击提速钻进工具在风城组现场技术服务中提速效果显著。在风城组硬质地层钻进过程中,机械钻速稳定在3.1 m/h,较本井上趟钻提高46.2%,通过高频轴扭复合冲击有效解决了硬地层黏滑振动问题,大幅提升了钻井效率;工具实现一趟钻完成149 m进尺作业,较上趟钻提高12%,并在

井深6 484~6 633 m井段连续钻进48 h,工作状态稳定,具备良好的井下适应性与可靠性;同时,使用该复合冲击提速钻具后,钻头磨损程度明显减轻,刀翼结构保持完整,崩齿率降低,减少了钻头更换频次,也降低了井下作业风险。本次复合冲击提速钻井工具现场试验在丰探1区块取得成功,积累了关键作业参数与实践经验,为后续该区域水平段钻井提速提效奠定了基础。

4 讨论

4.1 轴扭耦合冲击破岩机理

试验结果表明,玛北风城组深层致密页岩在轴扭耦合冲击条件下可同时提速、降扭和降低机械比能,原因是轴向和扭向冲击作用于破岩不同环节,频率合理匹配时可形成协同效应。轴向冲击通过周期性法向载荷脉动增强刀齿压入岩石作用,促进裂纹扩展,提高体积破碎能力;扭向冲击通过高频切向扰动削弱刀齿-岩石界面黏滑接触,减小切屑厚度,改善排屑与切削稳定性。二者使破岩转变为“动态促裂-稳定剥离-连续切削”高效模式。

轴向冲击对机械钻速提升更直接,扭向冲击对降扭和降低机械比能作用更显著,即轴向冲击“促裂增破”,扭向冲击“解黏降阻”。高频扭冲时,扭矩和MSE显著下降,表明其能有效打断静摩擦黏附,提高能量转化效率。需要注意的是,轴扭耦合冲击非简单叠加,具有非线性特征。轴向冲击过强而扭向不足,虽裂纹扩展能力增强,但切削阻力和载荷波动可能增

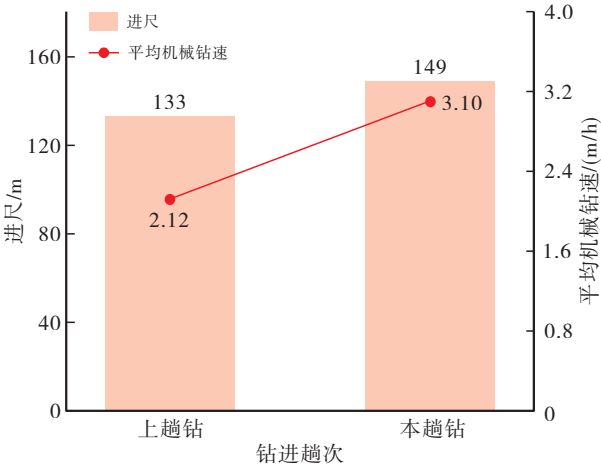


图12 上趟钻和本趟钻进尺、平均机械钻速对比情况
Fig. 12 Comparison of footage drilled and average rate of penetration between the previous run and the current run

加,削弱提效效果;仅提高扭向冲击而轴向不足,有利于降扭和机械比能,但难提升体积破碎能力。因此,参数优化关键在于实现促裂能力、切削稳定性和能量利用率协调匹配。

4.2 工程启示与研究局限

室内实验与丰探102H井现场试验表明,轴扭耦合冲击可改善玛北风城组难钻页岩地层破岩方式,提高机械钻速,降低扭矩与钻头异常磨损风险。开展该类高强度、强非均质页岩地层现场参数优化,应重点考虑轴扭耦合冲击、钻压、转速的协同。在扭矩控制和能量利用上,应先保证较高扭向冲击水平,再结合适度轴向冲击实现体积破碎与稳定切削统一。

受实验条件限制,本研究存在一些局限性。实验用小尺寸岩心与实际井下大尺度地层在应力状态等方面有差异,尺度效应可能影响实验精度;目标地层岩样非均质性强,可能影响参数优化结果普适性;未系统考虑井底温度等工程因素对冲击破岩效果的耦合影响。后续研究可结合现场实时数据及更多井段数据对冲击参数进行动态修正与优化。

5 结论与建议

本文以玛北风城组井下岩心为研究对象,开展了轴扭耦合冲击破岩实验,明确了轴向与扭转冲击频率组合对机械钻速、扭矩及机械比能的影响规律,验证了该技术在深层致密页岩地层中提速、降扭和节能的可行性。

1)轴向冲击为提升机械钻速的主要因素,作用效果总体优于纯扭转冲击;扭转冲击是降低扭矩与机械比能的关键,高频扭转冲击可有效削弱黏滑效应,提升切削稳定性与能量利用率。轴冲与扭冲存在非线性耦合关系,最优破岩效果来自“轴冲促裂、扭冲解黏”的协同作用,而非单一频率最大化。

2)实验条件下,中高轴向冲击搭配较高扭转冲击综合效果更优,其中16 Hz纯轴冲、8 Hz:8 Hz组合机械钻速提升显著,16 Hz高频扭冲在降阻节能方面表现突出。现场应用时,该参数区间仍需结合钻压、转速及井下响应进一步动态优化。

3)现场试验表明,轴扭耦合冲击提速效果不受单一工况限制。在较高钻压下,等频轴扭冲击仍可显著提高机械钻速、降低扭矩与机械比能,相比单纯提高钻压,更能优化破岩方式与能量利用路径。

4)丰探102 H井现场试验与室内认识相吻合,CUPK-II型复合冲击工具在风城组完成单趟钻进尺149 m、纯钻48 h,平均机械钻速3.1 m/h,较上趟钻提

高46.2%,表明该技术在玛北风城组难钻页岩地层中具有良好的工程应用前景。

参考文献

- [1] 赵文智,朱如凯,张婧雅,等. 中国陆相页岩油类型、勘探开发现状与发展趋势[J]. 中国石油勘探,2023,28(4):1-13.
ZHAO Wenzhi, ZHU Rukai, ZHANG Jingya, et al. Classification, exploration and development status and development trend of continental shale oil in China [J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(4): 1-13.
- [2] 贾承造,郑民,张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发,2012,39(2):129-136.
JIA Chengzao, ZHENG Min, ZHANG Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 129-136.
- [3] 张大权,张家强,王玉芳,等. 中国非常规油气勘探开发进展与前景[J]. 资源科学,2015,37(5):1068-1075.
ZHANG Daquan, ZHANG Jiaqiang, WANG Yufang, et al. China's unconventional oil and gas exploration and development: progress and prospects [J]. Resources Science, 2015, 37(5): 1068-1075.
- [4] 黄福喜,汪少勇,李明鹏,等. 中国石油深层、超深层油气勘探进展与启示[J]. 天然气工业,2024,44(1):86-96.
HUANG Fuxi, WANG Shaoyong, LI Mingpeng, et al. Progress and implications of deep and ultra-deep oil and gas exploration in PetroChina [J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(1): 86-96.
- [5] 汪海阁,常龙,卓鲁斌,等. 中国石油陆相页岩油钻井技术现状与发展建议[J]. 新疆石油天然气,2024,20(3):1-14.
WANG Haige, CHANG Long, ZHUO Lubin, et al. Current status and suggestions for drilling technology of CNPC continental shale oil reservoirs [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2024, 20(3): 1-14.
- [6] 朱昌海,李文翎. 我国非常规油气成为增储上产重要支撑[J]. 中国石油企业,2024(3):36-38.
ZHU Changhai, LI Wenling. China's unconventional oil and gas has become an important support for increasing reserves and production [J]. China Petroleum Enterprise, 2024(3): 36-38.
- [7] 孙志刚,于春磊,陈辉,等. 陆相页岩油开发实验技术现状与展望[J]. 油气地质与采收率,2024,31(5):186-198.
SUN Zhigang, YU Chunlei, CHEN Hui, et al. Progress and prospect of experimental technologies for continental shale oil development [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(5): 186-198.
- [8] 郭旭升,黎茂稳,赵梦云. 页岩油开发利用及在能源中的作用[J]. 中国科学院院刊,2023,38(1):38-47.
GUO Xusheng, LI Maowen, ZHAO Mengyun. Shale oil development and utilization and its role in energy industry [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1): 38-47.
- [9] 孙金声,杨景斌,白英睿,等. 深层超深层钻井液技术研究

- 进展与展望[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(4): 889-898.
- SUN Jinsheng, YANG Jingbin, BAI Yingrui, et al. Research progress and development of deep and ultra-deep drilling fluid technology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(4): 889-898.
- [10] 伊明, 范川闽, 赵志俊, 等. 玛北地区二叠系风城组页岩油钻井优化实践与下步建议[J]. 钻采工艺, 2024, 47(6): 117-124.
- YI Ming, FAN Chuanmin, ZHAO Zhijun, et al. Drilling optimization practice and suggestions of Permian Fengcheng Formation shale oil in Mabei Area [J]. Drilling & Production Technology, 2024, 47(6): 117-124.
- [11] 杨龔栋. 深层钻井冲击载荷调制及其破岩特性研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2021.
- YANG Yandong. The impact load modulation and rock breaking in deep well drilling [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2021.
- [12] 穆总结, 李根生, 黄中伟, 等. 轴扭耦合冲击钻井技术研究[J]. 石油机械, 2018, 46(10): 12-17.
- MU Zongjie, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Research on axial-torsional coupling percussion drilling technology[J]. China Petroleum Machinery, 2018, 46(10): 12-17.
- [13] 左宇军, 李夕兵, 马春德, 等. 动静组合载荷作用下岩石失稳破坏的突变理论模型与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 741-746.
- ZUO Yujun, LI Xibing, MA Chunde, et al. Catastrophic model and testing study on failure of static loading rock system under dynamic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(5): 741-746.
- [14] 谢世勇, 赵伏军, 袁长林, 等. 动静组合载荷作用下岩石破碎试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2008, 28(3): 19-21.
- XIE Shiyong, ZHAO Fujun, YUAN Changlin, et al. Experimental research on breakage of rock under combined dynamic and static loading[J]. Mining Research and Development, 2008, 28(3): 19-21.
- [15] NIU D. Rigid impact: The mechanism of percussive rock drilling[C]//ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, ARMA, 2008: ARMA-08-075.
- [16] 李玮, 闫铁, 张志超, 等. 高频振动钻具冲击下岩石响应机理及破岩试验分析[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(6): 25-28.
- LI Wei, YAN Tie, ZHANG Zhichao, et al. Rock response mechanism and rock breaking test analysis for impact of high-frequency vibration drilling tool[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(6): 25-28.
- [17] 闫炎, 管志川, 玄令超, 等. 复合冲击条件下 PDC 钻头破岩效率试验研究[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(6): 24-30.
- YAN Yan, GUAN Zhichuan, XUAN Lingchao, et al. Experimental study on rock breaking efficiency with a PDC bit under conditions of composite percussion[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(6): 24-30.
- [18] LIAO M, WIERCIGROCH M, SAYAH M, et al. Experimental verification of the percussive drilling model[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 146: 107067.
- [19] 李根生, 穆总结, 田守增, 等. 冲击破岩钻井提速技术研究现状与发展建议[J]. 新疆石油天然气, 2024, 20(1): 1-12.
- LI Gensheng, MU Zongjie, TIAN Shouceng, et al. Research status and development proposal of ROP improvement technology with percussion rock-breaking method [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2024, 20(1): 1-12.
- [20] LIU S, NI H, JIN Y, et al. Experimental study on drilling efficiency with compound axial and torsional impact load [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 219: 111060.
- [21] MU Z, LI G, HUANG Z, et al. Research and field application of the axial-torsional coupled percussion drilling technology [J]. Journal of Energy Resources Technology, 2020, 142(3): 032901.
- [22] JI R, SHI H, HUANG Z, et al. A novel experimental setup for axial-torsional coupled vibration impact-assisted PDC drill bit drilling [J]. Review of Scientific Instruments, 2024, 95(1): 015106.
- [23] XI Y, WANG H Y, ZHA C Q, et al. Numerical simulation of rock-breaking and influence laws of dynamic load parameters during axial-torsional coupled impact drilling with a single PDC cutter [J]. Petroleum Science, 2023, 20(3): 1806-1827.
- [24] HUANG J, ZENG B, HE Y, et al. Numerical study of rock-breaking mechanism in hard rock with full PDC bit model in compound impact drilling [J]. Energy Reports, 2023, 9: 3896-3909.
- [25] SUN Z, MU Z, HUANG Z, et al. Hard rock drilling characteristics under axial-torsional isofrequency impact: insights for improving efficiency of deep energy mineral excavation [J]. Geoenergy Science and Engineering, 2024, 240: 213089.
- [26] WANG M, HE S, XIONG C, et al. Multi-objective optimization of Stinger PDC cutter breaking rock parameters under intrusion-cutting action using Taguchi-based gray relational analysis[J]. Review of Scientific Instruments, 2024, 95(9): 095106.
- [27] RONG Z, DAI X, YAN S, et al. Experimental and theoretical analysis of rock failure characteristics by a single PDC cutter under downhole pressurized conditions [J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 11: 1264804.
- [28] CHEN X, LI X, HE W, et al. Experimental study on rock-breaking characteristics of conglomerate with special-shaped PDC cutters under high confining pressure [C]// ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, ARMA, 2024: D022S020R016.
- [29] TEALE R. The concept of specific energy in rock drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Pergamon, 1965, 2(1): 57-73.

(修改回稿日期: 2026-05-13 编辑: 粟刘)