

基于振动冲击的高效钻进技术研究进展

王文龙¹, 信伟卫^{2*}, 张晓龙¹, 李 宽¹

(1. 山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队(山东省第六地质矿产勘查院), 山东 威海 264209; 2. 江西有色地质矿产勘查开发院, 江西 南昌 330000)

摘要:随着地质勘查与资源开发向深部复杂地层持续推进, 坚硬致密、破碎坍塌等难钻地层占比显著增加, 复杂结构井施工频率不断提升, 对钻进效率、井身稳定性及成本控制提出了更高要求。在此背景下, 振动与冲击钻进技术凭借其独特的复合破岩方式与振动减阻机制, 成为突破复杂地层钻进瓶颈的重要手段。冲击钻进通过高频冲击破碎坚硬岩层, 较传统单一回转钻进方式, 碎岩效率显著提高; 振动钻进则通过施加轴向或周向振动, 有效降低钻具与孔壁摩擦, 改善排屑与成孔稳定性。其应用效果在矿产资源勘查与能源开发领域受到广泛关注。本文从动力系统集成方式、钻具结构、冲击能量传递机制等维度, 重点研究液动冲击器、电动冲击器、水力振荡器和声波钻机, 系统梳理冲击回转钻进、水力振动减阻等关键提速技术的研发进展, 为复杂地层高效钻进技术的发展提供理论支撑与工程借鉴。

关键词:振动冲击钻进; 液动冲击器; 冲击回转钻进; 水力振荡器; 水力振动减阻; 声波钻机; 高效钻进

中图分类号: P634.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)S1-0022-07

Research progress on efficient drilling technologies based on vibration impact

WANG Wenlong¹, XIN Weiwei^{2*}, ZHANG Xiaolong¹, LI Kuan¹

(1. No. 6 Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources (No. 6 Institute of Geology and Mineral Resources Exploration of Shandong Province), Weihai Shandong 264209, China; 2. Jiangxi Nonferrous Geological Mineral Exploration and Development Institute, Nanchang Jiangxi 330000, China)

Abstract: With the continued advancement of geological exploration and resource development into deeper and more complex formations, there has been a significant increase in the proportion of hard, dense, fractured, and collapse-prone strata, along with a rising frequency of complex wellbore construction. These trends place higher demands on drilling efficiency, borehole stability, and cost control. Against this backdrop, vibration and percussive drilling technologies, by virtue of their distinct rock-breaking mechanisms and vibration-induced drag reduction capabilities have emerged as key solutions for overcoming drilling challenges in complex formations. Percussive drilling employs high-frequency impacts to break hard rock and enhance penetration rates. Compared with conventional rotary drilling, the efficiency is significantly improved. Vibration-assisted drilling reduces friction between the drill tool and borehole wall by introducing axial or torsional vibrations, thereby improving cuttings removal and borehole stability. These techniques have attracted widespread attention in mineral exploration and energy development. This paper focuses on the research of hydraulic impactors, electric impactors, hydraulic oscillators, and sonic drill rigs from the perspectives of power system integration methods, drill tool structures, and impact energy transfer mechanisms. It

收稿日期: 2025-07-11; 修回日期: 2025-08-04 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.S1.004

基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项“绿色高效精准智能化钻探技术与装备”(编号: 2024ZD1003100)课题6“绿色高效精准智能化钻探技术与装备应用示范”(编号: 2024ZD1003106)

第一作者: 王文龙, 男, 汉族, 1989年生, 工程师, 探矿工程专业, 从事地质钻探技术、工艺及设备研究工作, 山东省威海市高技术产业开发区火炬路209号, 278617641@qq.com。

通信作者: 信伟卫, 男, 汉, 1988年生, 工程师, 探矿工程专业, 主要从事地质岩心钻探技术工作, 江西省南昌市迎宾北大道938号, 1025569855@qq.com。

引用格式: 王文龙, 信伟卫, 张晓龙, 等. 基于振动冲击的高效钻进技术研究进展[J]. 钻探工程, 2025, 52(S1): 22-28.

WANG Wenlong, XIN Weiwei, ZHANG Xiaolong, et al. Research progress on efficient drilling technologies based on vibration impact [J]. Drilling Engineering, 2025, 52(S1): 22-28.

systematically sorts out the research and development progress of key rate-enhancement technologies such as percussive rotary drilling and hydraulic vibration drag reduction, aiming to provide theoretical support and engineering reference for efficient drilling in complex geological environments.

Key words: vibratory impact drilling; hydraulic impactors; percussive rotary drilling; hydraulic oscillator; hydraulic vibration drag reduction; sonic drill rig; high-efficiency drilling

0 引言

现代钻探工程作为资源勘探、地质调查和基础建设的关键技术,正面临着日益复杂的地质条件和不断提升的效能要求^[1-2]。随着全球资源需求的持续增长和勘探开发领域的不断拓展,钻探作业需要应对极端地质环境、复杂井眼轨迹和精细化取样需求等多重挑战。传统钻探技术存在在坚硬岩层钻进效率低、大位移井摩阻控制难、原状样品获取困难等难题,亟需发展新型钻探技术以突破现有技术瓶颈^[3-5]。

其中,冲击回转钻进由于结合了冲击破碎和回转切削的优势,极大地提高了在坚硬、破碎等难钻地层中的钻进效率,被广泛研究。根据冲击回转机构的位置不同,可将其划分为顶驱式和潜孔式^[6]。顶驱式的核心是顶部的动力头。该动力头(可为气动、液动或电动)集成了冲击发生器和旋转驱动器,直接作用于钻杆顶部,为其同时提供冲击载荷和回转扭矩。而潜孔式的核心是靠近孔底的潜孔冲击器。动力介质(压缩空气、高压液体)驱动冲击器产生高频冲击;同时,轴向压力和回转扭矩主要通过钻柱由地面设备传递至孔底,或由孔底的液动/电动马达直接提供回转扭矩。自该技术问世以来,已经在矿山、水文水井、石油钻井、地热钻井、地质勘探等多个行业领域得到了广泛应用^[7]。

与此同时,振动减阻技术作为提升钻进稳定性与效率的重要手段,在复杂地层钻探中展现出独特优势。通过引入轴向或周向的强制振动,有效削弱钻具与孔壁之间的静摩擦与黏滑效应,降低摩阻峰值与机械传动阻力,从而改善钻柱传动效率与井眼轨迹控制能力。研究表明,合理设计的振动频率、振幅及激振形式,不仅可显著提升钻进速度和岩屑输运能力,还能减轻钻具磨损与能耗,对复杂结构井、大位移井和低压破碎带等高阻井段具有良好适应性。

本文围绕典型振动与冲击钻进核心工具,重点研究液动冲击器、电动冲击器、水力振荡器和声波

钻机,系统梳理各类工具的工作机理、结构特征、技术特点及发展趋势,为提升振动冲击钻进工具的提速效果与工程适应性提供借鉴。

1 液动冲击器类型及特征

液动冲击器(潜孔式)主要有阀式正作用液动冲击器、阀式反作用液动冲击器、阀式双作用液动冲击器、射吸式液动冲击器及射流式液动冲击器。液动冲击器的核心优势在于将液体的压力能转化为高频机械冲击,以冲击破岩为主、回转破岩为辅,可大幅提升硬岩及复杂地层的钻进效率,降低工具损耗。

1.1 正作用液动冲击器

正作用液动冲击器(见图1)的核心原理是利用高压钻井液直接推动冲锤高速下行撞击砧座产生冲击功,依靠被压缩的弹簧释放能量使冲锤复位,完成一个工作循环^[8]。其特点是“液推锤落(冲击),弹簧复位”。这种设计在需要较大单次冲击功的硬岩钻进中具有优势。正作用液动冲击器凭借结构简单、浅层硬岩效率高的优势,在地质勘探领域仍是不可替代的工具;但其弹簧可靠性低、深井适应性差的短板,也限制了在油气深井中的应用。成都理工大学介绍了一种阀式正作用液压冲击器的冲击功、冲击能量以及冲击频率的理论计算方法,并通过实例对该种计算方法进行验证。同时,利用FLUFNT软件对影响液动冲击器的冲击功和冲击频率的液体压力进行了分段分析和计算^[8-9]。前苏联的r-5A, r-7, r-8, r-9型及我国设计研发的YZ系列、ZF系列、ZG系列正作用液动冲击器均得到了良好的应用^[10]。

1.2 反作用液动冲击器

反作用液动冲击器(见图2)是一种通过弹簧蓄能释放产生冲击力、液压驱动复位的井下钻井工

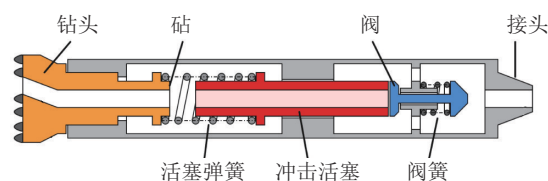


图1 阀式正作用液动冲击器结构原理

具。其核心特点是“弹簧冲击,液压复位”,与正作用式(液压冲击,弹簧复位)形成本质区别^[11]。此类冲击器通过协同作用释放弹簧压缩能与冲锤自重势能,显著提升单次冲击功输出。然而系统存在固有缺陷:结构设计复杂、关键部件(如弹簧)耐久性不足,且冲锤复位过程需极高液压流量支撑,实际工程普及率较低。前苏联研制的rBMC-5M型及我国研制的79-3型反作用液动冲击器得到了成功应用。长江大学创新性研制了一款直径为 $\Phi 172$ mm的反作用液动冲击器。基于多体动力学理论建模与工程软件仿真,通过系统调节进口流量、节流孔径及弹簧工作参数,对冲锤冲击末速度、单次冲击功及冲击频率进行多目标优化。最终确定最优节流口径为30 mm,工作流量区间20~30.85 L/s。在此配置下,冲击器输出频率为3.94~5.92 Hz,峰值冲击功达932 J,形成低频高功特性,适用于深井/超深井高硬度岩层钻井工况^[12-13]。

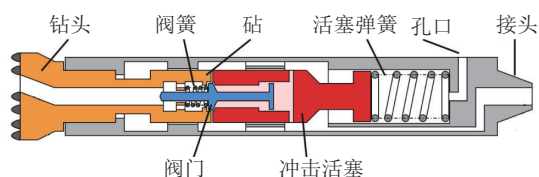


图2 阀式反作用液动冲击器结构原理

1.3 双作用液动冲击器

双作用液动冲击器(见图3)是一种利用高压流体能量产生周期性冲击载荷的井下工具。其核心原理是通过流体驱动活塞在缸体内做往复运动,从而产生冲击能量^[14]。凭借高能高效、适应硬岩的特性,成为复杂地层钻井的核心工具,但其结构复杂性和流体依赖性仍需通过技术创新突破。

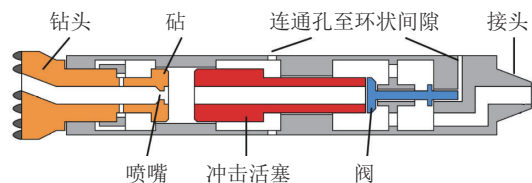


图3 阀式双作用液动冲击器结构原理

中国地质大学(北京)对YS型、YZX型、SYZJ型3种典型的阀式双作用液动冲击器展开研究,剖析其工作原理,对运动过程进行阶段划分,探究各阶段中具体受力状况,并构建3种双作用冲击器的

运动数学模型^[14]。西南石油大学研发了一种具有全新结构的冲击器,建立了双作用液动冲击器流固耦合数值计算方法。通过开展大量仿真计算,深入剖析不同结构参数与水力参数对冲击器性能的影响规律,探究不同活塞质量、上下端面积差、流体排量及流体密度对冲击功和冲击频率的作用机制,最终确定了最优组合方案^[15]。中国地质大学(武汉)对压差式及差动式双作用液动冲击器进行了研究。为提升压差式双作用液动冲击器在深孔钻进时的输出性能,利用MATLAB程序开发了计算机数值模拟程序,针对该型冲击器的冲锤质量、节流孔直径、活阀行程、自由行程以及冲锤上下端有效面积差这5个关键结构参数与输出性能的影响关联展开数值模拟分析^[16]。此外,为实现差动式双作用液动冲击器的结构优化,构建了适用于该型冲击器的数值模拟程序,以开展后续结构参数与输出性能影响关系的研究。通过对背压构成的分析,阐明了背压的组成部分;借助所建立的程序,探究了背压对差动式双作用液动冲击器输出性能的影响规律,并对其作用机理进行了剖析^[17]。

1.4 射吸式液动冲击器

射吸式液动冲击器(见图4)是利用射吸负压卷吸作用产生的压力差,使活阀与冲锤配合运动,产生水击压强,从而推动冲锤击打砧座,实现冲击做功,辅助钻头破岩^[18]。以其结构简单、低压适应性强的特点,在特定场景中具有不可替代的优势,但受限于能量输出和高压性能,难以满足深部硬岩钻井需求。

中国石油大学(北京)通过运用计算流体动力学方法,对冲击器内部流场开展了数值模拟研究,从而获取了冲击器内部流场的速度与压力分布特

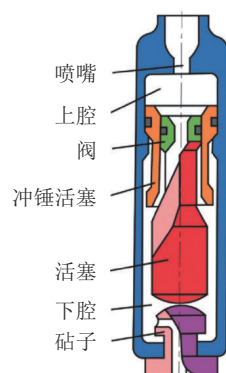


图4 射吸式液动冲击器结构原理

性;明确了排量与卷吸作用之间的内在联系;探究了冲击器各受力面的受力状况;揭示了喷嘴直径及结构对工作参数的影响规律;此外,还深入分析了冲程因素对冲击器工作参数产生的作用^[19]。西安石油大学利用FLUNT软件,通过单一变量法,分别改变喷嘴内径、节流环内径和流量来研究压差的变化规律^[20]。东北石油大学对现有的射吸式冲击器进行了有限元模拟分析,研究了不同冲锤质量、泵排量、喷嘴直径对冲击功和冲击频率的影响,选出最优的工作参数^[21]。

1.5 射流式液动冲击器

射流式液动冲击器(见图5)是我国自主研发的一款新型的冲击器,是利用双稳态射流元件,将高压液流交替分配到冲锤活塞上腔和下腔,使冲锤形成往复冲击运动的液动冲击器^[22]。具有结构简单、工作稳定等优点,但也存在射流元件易磨损等不足。近年来北京探矿工程研究所将射流式液动冲击器运用在项目中,在硬岩地层中实现了高效破岩的应用效果。此外,钻进过程中还对排量、钻压、转速等多种钻井工艺参数进行了优化分析,并进行了多次现场试验验证^[23]。吉林大学研发了高能型射流式液动冲击器,在干热岩钻进、煤矿、水电硬岩钻进方面取得了显著效果。基于计算流体动力学分析方法与实验室测试方法,针对SC-86H型高能射流式液动冲击器活塞与缸体的密封特性展开系统性研究。分析活塞密封段长度、环状间隙尺寸、活塞往复运动速度、角速度,以及活塞外表面螺旋槽螺距与半径等关键参数对射流式冲击器前后腔之间泄漏量的影响机制与变化规律^[24]。

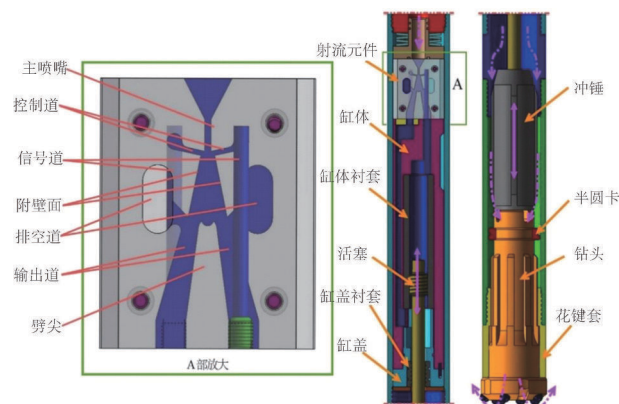


图5 射流式液动冲击器结构原理

2 电动冲击器

电动冲击器(潜孔式)的核心在于其气动活塞冲击机构。如图6所示。电机通过曲柄/摆杆驱动活塞做往复运动,压缩空气推动冲击活塞高速撞击钻杆,产生强大的轴向冲击力。同时,旋转机构驱动钻杆持续旋转。这种“高频率轴向冲击+持续旋转”的复合运动,使其成为在混凝土、砖石等硬脆材料上钻孔的高效利器。电动冲击器不仅具有液动、气动冲击器的这些优点,同时对循环介质没有特殊要求,参数的调节简单方便,具有液动、风动冲击器无可比拟的优势。中国地质大学依托中国地质调查局科技处计划项目“孔底电动冲击器及其配套钻探技术的研究”进行了孔底电动冲击回转钻具的研制^[25]。北京探矿工程研究所成功研发了由锂电池驱动的便携式电动冲击取样钻机及配套工具。钻机取样试验表明,该设备轻便可靠,可在5 m以浅的松散地层实现安全、高效、零碳排放取样^[26]。

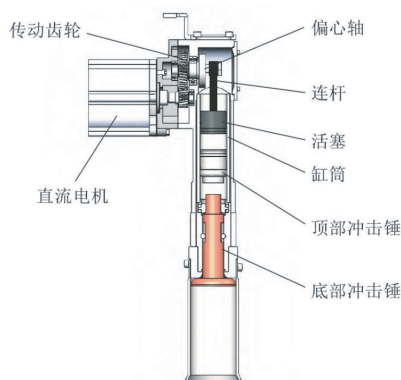


图6 电动冲击器结构示意图

3 水力振荡器类型及特点

3.1 旋转阀工具

旋转阀工具的特征通常是具有连接在阀门元件上的转子和定子对。这类工具已有较长的有效应用历史,但不适用于高温、化学品及气体等特殊环境,且其尺寸相对较长。

由美国NOV公司研发的水力振荡器(Agitator)是具有代表性的旋转阀工具。如图7所示,该工具主要由振荡短节、动力短节和阀门短节3个部分组成。振荡短节主要包括心轴、活塞和碟簧组等。动力短节为1:2定排量马达,由转子与定子组成。阀门短节主要包括一对转动阀和静止阀,其中转动阀固定于转子一端。当钻井液被泵送至动

力短节后,转子在钻井液的驱动下旋转,并带动转动阀相对静止阀做直线往复运动,导致转动阀和静止阀周期性地错开和重合,即过流面积周期性变化,钻井液产生压力脉冲。压力增大时,钻井液推动心轴压缩碟簧组,心轴向外出伸。压力减小时,心轴在碟簧组作用下复位,从而实现轴向振动。

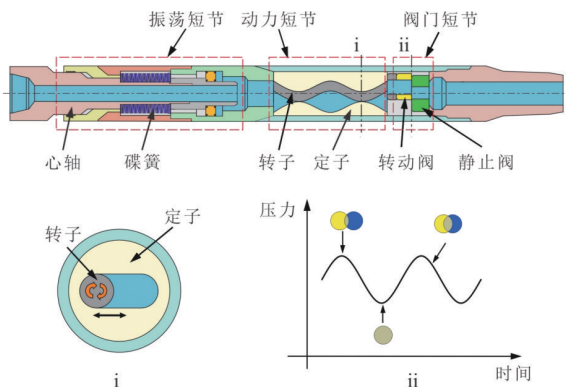


图7 Agitator结构及原理示意

3.2 流体脉冲发生器

由 Standen 等^[27]研发的 FIG, 其主体结构包括射流振荡器、活塞以及中断阀。如图8所示, 该装置设有两条流体通道: 主流道负责输送 90%~95% 的流体, 剩余的少量流体则通过次流道流动。在中断阀的下游位置安装有插塞, 其作用是对主流道内的流体流动进行限制。在整个工具中, 仅有活塞这一个运动部件。次流道上配置的射流振荡器具备两条对称的输出道, 依据柯恩达效应 (Coanda 效应), 射流能够随机地从其中一侧的输出道流出, 从而实现活塞往复运动的控制。与此同时, 活塞的运动还会通过反馈通道, 向主射流施加一个横向压力, 以此来控制射流在两条输出道之间进行周期性的切换。随着活塞进行周期性运动, 中断阀里的旁路通道会不断地重复开启和关闭动作, 进而产生压力脉冲。

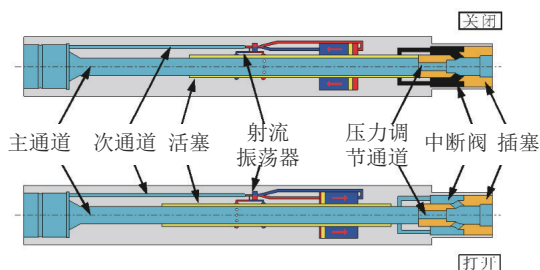


图8 FIG示意

实验室测试结果显示, 该工具所产生的轴向振动力显著超过钻柱与井壁之间的摩擦力, 而过大的轴向力会导致井下钻井工具寿命缩短。基于此, 在插塞上增设了压力调节通道, 主流道内的流体可通过该通道流动, 从而降低了流体压降, 进而延长了工具的使用寿命^[27-28]。

3.3 涡流控制的流体减摩装置

Schultz 等^[29]提出了一种名为 VFRD 的新型轴向振动减阻工具。如图9所示, 该工具采用一个涡流腔替代了传统的活塞与中断阀结构。与涡流腔相连的是带有三信号道的射流振荡器, 其结构可视为单反馈回路振荡器^[30]与双反馈回路振荡器^[31]的组合。涡流腔的设计理念源于涡流二极管。射流在两个输出道之间的周期性切换, 会使涡流腔内流体的运动方式发生改变, 进而产生压力脉冲, 该压力脉冲将引发工具的轴向振动。此外, Schultz 还提出了一系列配备多个涡流腔的工具, 以满足不同的工程应用需求。

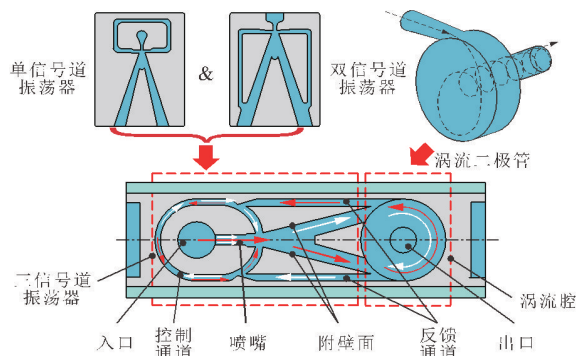


图9 VFRD示意

3.4 射流式水力振荡器

柳鹤^[32]通过对冲击式旋转钻井用射流液动锤进行结构改进, 提出了射流式水力振荡器 (FAOT)。如图10所示, 该装置利用射流振荡器控制流体交替进入气缸前腔与后腔, 驱动活塞往复运动, 活塞周期性经过节流板锥孔时堵塞流道, 从而产生压力脉冲。研究发现当活塞高速移动时, 大部分流体涌入气缸前腔, 导致通过节流阀的流量受限, 压力脉冲强度低于设计值。针对这一问题, Zhang 等^[33]对该工具进行改进, 移除了节流阀结构, 试验表明改进后工具的性能优于原始设计。

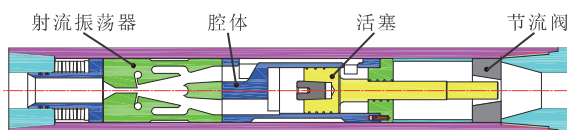


图10 FAOT示意图

4 声波钻机

声波钻机(顶驱式)是一种利用高频振动能量破碎岩土并实现高效钻进的特种工程设备,实现了“无扰动”取样,广泛应用于传统水利水电勘察、水面勘察以及土壤环境调查等领域,正逐步成为复杂地质条件下高效、环保钻进的主流设备之一^[34-38]。其通过“振动+推进”的复合机制,在松散-中硬、颗粒混杂、软硬不均地层中具有显著优势。其结构原理如图11所示。

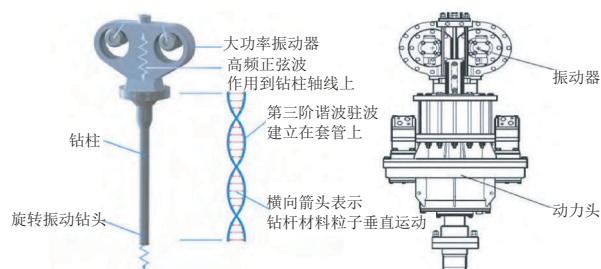


图11 声波钻机工作原理及结构示意图

声波钻机最重要的部件为振动回转动力头。当偏心轮高速运转时产生精确控制的共振能量,使钻柱系统进入谐振状态。这种高频振动可瞬间降低土壤颗粒间的黏结力和摩擦阻力,使钻具能够轻松穿透各类地层。

现阶段,我国声波钻进技术的研究与应用仍处于初步发展阶段。在吸收国际先进经验的基础上,国内科研机构与企业(如中国煤炭地质总局第二勘探局、中国地质大学(北京)、无锡金帆钻凿设备股份有限公司)已着手研发声波钻机,并将其应用于土壤环境调查领域,涵盖在产企业监测、工业企业退役场地评估、矿山尾矿库调查及垃圾填埋场调查等多个场景^[39-40]。近年来,中煤科工集团重庆研究院有限公司对液压振动头进行了结构设计及液压系统设计,并建立了液压系统 AMESim 模型,通过仿真分析寻找液压振动头的振动频率对液压系统性能的影响^[41]。鲁山豫能抽水蓄能有限公司将声波钻机应用于水电站覆盖层成孔取样施工,证实其在提高取样质量和效率方面具有显著优势^[42]。

5 结论

通过列举以上振动冲击提速工具的最新研究进展,可以清楚地看到该领域正朝着智能化、高效化方向发展。液动/电动冲击器、水力振荡器与声波钻机作为现代钻探工程中关键的振动与冲击工具,分别依托不同的能量激发与传递机制,在提高硬岩破碎效率、降低长井段钻具摩阻及提升原状样品质量等方面展现出显著优势,已成为应对复杂地层钻进挑战的重要技术手段。

而基于振动冲击的高效钻进技术在未来的发展过程中,需要进一步开展的优化研究分别为:液动/电动冲击器需加强在材料结构优化设计、智能化控制、多元技术融合和井场应用优化等方面的研究力度;水力振荡器需优化内部结构,降低压耗,或是改进压力脉冲产生方式;动力头为声波钻机核心结构,未来研究需系统性地聚焦于高效振动发生机理、耐疲劳材料与工艺、智能监测与控制等核心方向。

参考文献:

- [1] 张锦宏. 中国石化页岩油工程技术新进展[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(1): 1-8.
- [2] 李德宝. 深井复杂地质条件下中厚煤层巷道高效快支快掘探索[J]. 山东煤炭科技, 2020, 38(12): 61-63, 66.
- [3] 王佳琪, 刘晓, 薛羽彤. 我国寒区物探技术综述[J]. 吉林水利, 2025(5): 62-66.
- [4] 崔爱贞, 石磊. 某油气田水平井定向钻井的关键技术研究[J]. 石化技术, 2025, 32(3): 46-48.
- [5] 纳启财, 郭鸿雁, 胡居义, 等. 炭质页岩隧道围岩力学参数测试与反分析[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(S2): 504-509.
- [6] 葛东. 不同钻井液驱动下高能射流式液动潜孔锤性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [7] 李军委, 李凤乐, 魏冬哲. 矿山深孔钻探绳索索取芯钻进技术的应用研究[J]. 世界有色金属, 2019(3): 281, 283.
- [8] 代常友, 石永泉, 李西. 阀式正作用液冲击器的冲击功和冲击频率[J]. 煤矿机械, 2006(10): 35-38.
- [9] 代常友. 阀式正作用液冲击器的性能参数分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2007.
- [10] 黄雪琴, 孟庆昆, 郑晓峰. 液动冲击器发展现状及在油气钻井应用探讨[J]. 石油矿场机械, 2016, 45(9): 62-66.
- [11] 赵洪激, 董家梅. 阀式反作用液冲击器参数计算及性能分析[J]. 中国海上油气(工程), 1995(3): 21-26, 5-7.
- [12] 何臻, 冯进, 张慢来, 等. 新型反作用液冲击器的设计及碰撞性能分析[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2020, 17(2): 85-91.
- [13] 何臻. 井下反作用液冲击器动力性能分析及结构优化[D]. 荆州: 长江大学, 2020.
- [14] 李博. 阀式双作用液冲击器的仿真[D]. 北京: 中国地质大

- 学(北京),2013.
- [15] 刘上. 双作用液动冲击器性能研究[D]. 成都:西南石油大学, 2016.
- [16] 叶晓平, 李博, 刘晓阳, 等. 压差式双作用液动冲击器结构参数与输出性能关系数值模拟分析[J]. 地质科技情报, 2017, 36(1): 219-225.
- [17] 叶晓平, 李博, 刘晓阳, 等. 差动式双作用液动冲击器冲锤动力学方程的研究和应用[J]. 地质与勘探, 2018, 54(4): 801-809.
- [18] 刘江. 双作用射吸式液动冲击器优化配置研究与应用[D]. 西安:西安石油大学, 2019: 8-11.
- [19] 蒋宏伟, 黄成, 王克雄, 等. 射吸式液动冲击器内部流场数值模拟研究[J]. 石油机械, 2007, (9): 25-28.
- [20] 张元志. 射吸式液动冲击器的优化设计[D]. 西安:西安石油大学, 2015.
- [21] 李玮, 盖京明, 程长坤, 等. 小井眼射吸式液动冲击器工作性能数值模拟[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(6): 691-696.
- [22] 吴鹏, 韦忠良, 吕苗荣, 等. 射流式液动冲击器优化设计研究[J]. 石油机械, 2014, 42(7): 24-27, 31.
- [23] 郭强, 翁伟, 袁文真, 等. 射流式液动冲击器在ZK01-2井提速应用研究[J]. 钻探工程, 2021, 48(10): 56-61.
- [24] 张鑫鑫, 彭视明, 孙铭泽, 等. 基于CFD的高能射流式液动冲击器活塞与缸体密封特性研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2017, 47(2): 534-541.
- [25] 陆洪智, 鄢泰宁, 蒋国盛. 孔底电动冲击回转钻具的研制[J]. 煤田地质与勘探, 2009, 37(4): 72-73.
- [26] 岳永东, 谭春亮, 卢倩, 等. 锂电池电动冲击取样钻机及其配套工具的研制[J]. 钻探工程, 2022, 49(3): 44-50.
- [27] Standen R, Brunskill D J. Fluidic impulse generator; 2012/0312156 A1[P]. 2012.
- [28] Castaneda J C, Schneider C E, Brunskill D. Coiled tubing milling operations: Successful application of an innovative variable water hammer extended-reach BHA to improve end load efficiencies of a PDM in horizontal wells[R]. The Woodlands: Society of Petroleum Engineers, 2011.
- [29] Schultz R L, Connell M L, Ferguson A M. Vortex controlled variable flow resistance device and related tools and methods; 2012/0292018 A1[P]. 2012.
- [30] Spyropoulos C E. A sonic oscillator[J]. In: Fluid Amplification Symposium (Washington, DC), 196.
- [31] Warren R W. Negative feedback oscillator; 3, 158, 166[P]. 1964.
- [32] 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.
- [33] Zhang X, Peng J, Liu H, et al. Performance analysis of a fluidic axial oscillation tool for friction reduction with the absence of a throttling plate[J]. Applied Sciences, 2017, 7(4): 360.
- [34] 杨正春, 徐连锋, 伍宛生, 等. 便携式声波钻机在水利工程地质勘察中应用效果研究[J]. 治淮, 2015(9): 35-36.
- [35] 王振, 李粮纲, 何有强. 松散地层声波钻机配套取心钻具的研制[J]. 勘察科学技术, 2016(3): 60-63.
- [36] 李厚义, 杨春普. 高频振动水底淤积层取样技术应用[J]. 吉林水利, 2021(3): 48-50.
- [37] 崔双利, 马丽丽, 刘元锋, 等. 浅地层剖面技术在水库淤积探测中的应用[J]. 水利科学与寒区工程, 2023, 6(7): 105-107.
- [38] 潘云雨, 徐静, 梅金星, 等. 国内外土壤环境调查声波钻机研究进展及发展探讨[J]. 钻探工程, 2022, 49(6): 96-103.
- [39] 潘云雨, 梅金星, 徐静, 等. ZHDN-SDR 150A型高频声波钻机设计[J]. 钻探工程, 2022, 49(2): 135-144.
- [40] 陆卫星, 吴浩, 任晓飞. MGD-S50 II型声频振动钻机应用试验及优化研究[J]. 地质装备, 2021, 22(6): 14-18.
- [41] 樊姗, 陈泽平. 声波钻机液压振动头的液压系统设计及仿真分析[J]. 机床与液压, 2019, 47(11): 67-70, 102.
- [42] 夏景科. 基于声波钻机的水电站覆盖层成孔取样施工技术[J]. 电声技术, 2024, 48(12): 135-138.

(编辑 王文)