

声频振动取样钻机能量传递研究综述与展望

刘莉娅^{1,2}, 王 瑜^{1,2}, 孔令镛^{1,2}, 李舒霞^{1,2}, 吴 浩³, 周 兢^{1,4}

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 自然资源部深部地质钻探技术重点实验室, 北京 100083);
3. 中国煤炭地质总局第二勘探局, 河北 涿州 072750; 4. 中国煤炭地质总局, 北京 100083)

摘要: 声频振动钻机取样过程中产生的能量对钻机钻进系统的稳定性、效率及寿命有着重要影响。综述了国内外声频振动钻机取样技术的发展, 阐述了声频振动取样系统动力学建模方法和影响系统能量传递规律参数研究现状, 并对未来研究趋势进行了展望。认为在取样钻机钻进系统能量传递研究中, 需要注重振源参数、结构参数和地层参数对取样钻机钻进系统能量传递影响的深入分析。合理优化参数并改进结构以达到提升取样性能和能量传递效率的目的。

关键词: 声频振动; 钻探取样; 能量传递; 取样钻机; 动力学模型

中图分类号: P634.3; X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2023)S1-0063-08

Review and outlook of energy transfer in sonic vibration sampling rig

LIU Liya^{1,2}, WANG Yu^{1,2}, KONG Lingrong^{1,2}, LI Shuxia^{1,2}, WU Hao³, ZHOU Jing^{1,4}

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
2. Key Laboratory on Deep GeodDrilling Technology, MNR, Beijing 100083, China;
3. The Second Exploration Bureau of China National Administration of Coal Geology, Zhuozhou Hebei 072750, China;
4. China National Administration of Coal Geology, Beijing 100083, China)

Abstract: The energy generated during the sampling process of a sonic vibration rig plays a crucial role in determining the stability, efficiency, and longevity of the drilling system. In this paper, the advance of sonic vibration drilling rig sampling technology at home and abroad is reviewed, the current status of research on the dynamics modelling methods of sonic vibration sampling systems and the parameters affecting the energy transfer law of the systems is described, and future research trends are foreseen. It is judged that the influence of vibration, structural, and stratigraphic parameters should be emphasized. Reasonable optimization of parameters and improvement of structure should be made to improve sampling performance and energy transfer efficiency.

Key words: sonic vibration; sample boring; energy transfer; sampling rig; dynamic model

0 引言

声频振动钻探技术是采用高频振动的方式进行钻探取样, 是近些年应用于环境调查的新的钻进方法^[1]。声频动力头连接钻具, 通过钻具的振动和激振力的冲击, 使土壤颗粒的结构发生变化, 能够快速且有效地获得地层样品, 而且不会破坏地层结

构。这种技术在地质勘探、矿产勘查、环境监测等领域中得到广泛应用^[2]。

声频振动取样钻机利用动力头内部两个相向高速周期性回转运动的对称偏心块, 以产生振动力, 振动频率通常在 50~150 Hz 之间。由于偏心块的形状、大小和质量相同, 因此, 在两个偏心轴进行

收稿日期: 2023-05-30; 修回日期: 2023-07-26 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.S1.010

基金项目: 中煤地第二勘探局集团有限责任公司科技创新项目“声频环保钻机配套高效率取样钻具研制与钻进工艺研究”(编号: EKJKJ-2021-04)

第一作者: 刘莉娅, 女, 汉族, 1995年生, 博士研究生, 主要从事钻具振动方面研究, 北京市海淀区学院路29号, 3002200019@email.cugb.edu.cn。

引用格式: 刘莉娅, 王瑜, 孔令镛, 等. 声频振动取样钻机能量传递研究综述与展望[J]. 钻探工程, 2023, 50(S1): 63-70.

LIU Liya, WANG Yu, KONG Lingrong, et al. Review and outlook of energy transfer in sonic vibration sampling rig[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 63-70.

相向转动时,所产生的离心力可以分解为横向和竖直方向上的作用力。在整个旋转过程中,横向作用力的合力为零,而竖直方向的作用力则会产生“力的叠加”效应。钻杆的高频振动使钻头周围土体液化,同时使周围土体被排开,降低了土体对钻杆的摩擦力,利用钻杆的自重及顶部施加的静压力来实现快速钻进和取样^[3-4]。其工作原理见图1。

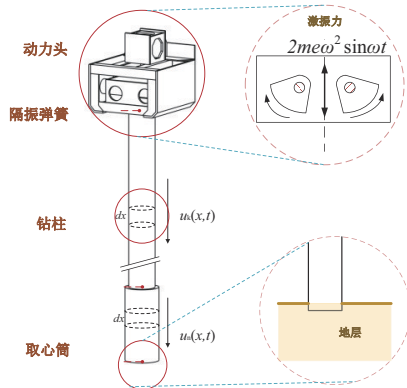


图1 声频振动取样钻机原理

声频振动钻机取样系统是一个复杂的非线性动力系统,其能量传递过程是一个动态、复杂的非线性过程,研究其能量传递过程对于准确地预测取样钻机钻进系统的动态性能、评价取样钻机钻进系统的可靠性、优化取样钻机钻进系统设计具有重要意义^[5-6]。取样钻机钻进系统能量传递的研究在国内外受到广泛关注,取得了丰富成果,但总体来说仍然存在一定不足,有待进一步深入研究。本文对声频振动取样技术研究进展和取样钻机钻进系统能量传递的研究现状进行综述,并对其未来发展趋势进行展望。

1 声频振动取样技术研究进展

1.1 国外发展现状

声频取样技术最早出自于1913年由罗马尼亚学者 George Constantinesco 在 British Admiralty 发表“声波理论”。1950s,苏联学者 D.D.Barkan 在国际会议上首次提出高频振动钻进在沉积岩层钻进效率更高,并未深入研究。最初的声频振动取样设备是通过声波振动钻杆来实现土壤和岩石的钻进。这种技术以其高效率 and 低扰动的特点迅速引起了关注。

1960s 美国发明家 Albert Bodine 首次进行了机

理研究,取得了多项专利。随后与罗德岛州的 Charles 协会联合发明了一种顶驱动力头,成功应用在打桩工程、安装路面下的套管和地热井中。

1980s 声频振动取样技术得到了进一步改进和推广。引入了新的振动器设计和控制系统,提高了钻探的准确性和控制性能。这一时期还出现了更多的声频振动钻进设备制造商,开发了多型号多功能的声频振动钻机(如图2),促进了技术的发展和应用。其中包括英国的 Sonic Drilling LTD 公司等,该公司的声频钻探技术在大不列颠屡获殊荣;美国的 Versa-Drill 国际公司,Geoprobe 公司、Boart Longyear 公司、Gus Pech 制造公司;加拿大的 Sonic Drill 公司等;荷兰的 Eijkelkamp 公司等;日本的利根公司^[7]。



图2 国外声频振动钻机

1990s 声频振动取样技术在环境勘察和地质勘探领域得到广泛应用。这一时期,声频振动取样设备的设计进一步改进,使其适用于不同地质条件下的钻探工作。同时,声频振动取样技术开始在水井钻探和地热能开发等领域得到应用。

2000 年,随着声频振动取样技术的进一步发展,新的创新性应用领域得到探索。声频振动取样被用于岩石样本的快速获取和地下水资源的勘探。该技术的快速、无孔隙塌陷 and 高质量样本采集的优势得到了广泛认可。

近年来声频振动取样技术在地质、工程和环境领域的应用不断扩大。其在土壤和岩石样本采集、地下水勘探、环境调查和土壤污染监测等方面的效

果得到广泛验证。同时,声频振动取样设备的技术性能和操作便捷性也在不断改善。

总体而言,国外声频振动取样技术经历了多年的发展和创新,从最初的概念引入到如今的广泛应用。这一技术的优势在于其高效率、准确性和低环境影响,使其成为地质勘探和工程钻探领域中一种重要的钻探方法。

1.2 国内发展现状

2000年初,国内开始对声频振动钻进技术进行研究和探索。一些科研机构 and 大学开始关注声频振动钻进技术的应用潜力,并进行了一些初步实验和模拟研究。如2007年中国地质大学(北京)最早研发的SDR-100型声频振动钻机样机^[8]。

2010年,国内声频振动钻进技术的研究逐渐深入,并取得了一些研究成果。一些企业开始自主研发声频振动钻进设备(如图3),并进行实际应用试验。如2010年北京探矿工程研究所研制的TGSD-50型声频振动钻机^[9]。2011年中国地质大学(北京)和中国煤炭地质总局第二勘探局联合研制的YSZ-50型声频振动钻机。2012年中国国际矿业大会期间,由中国地质大学(北京)和中国煤炭地质总局第二勘探局联合研制的全液压式声频振动钻机在大会上亮相,这是我国首台全液压式声频振动钻机,在实现我国环境取样专用钻机零的突破的同时,还缩小了我国特种钻机与国外同类钻机之间的差距^[10]。



(a) TGSD-50型钻机 (b) YSZ-50型钻机

图3 国内声频振动钻机

2015年至今,国内声频振动钻进技术得到了更多关注和推广。很多单位加大了声频振动钻进技术的研究力度,致力于改进结构设计、振动系统控制、节能减排等方面,以提高声频振动钻进的效率和可靠性。并在地质勘察、基础设施建设等领域进行了

实际应用。国内的声频振动钻进技术研究机构积极参与国际合作与交流,与国外的相关机构进行技术交流合作,加速了声频振动钻进技术的发展进程。北京探矿工程研究所研发的轻便型TGQ-10SD声频振动钻机不需要旋转,可实现对土壤样品的非扰动取样,有效的满足环境取样要求。该单位联合中国地质科学院地质力学研究所在宁夏青铜峡地区开展钻探填图试点工作,完成钻进试验,取样率达到95%以上,为浅覆盖区的地质工作提供可靠的钻探技术服务支撑。无锡市金帆钻凿设备股份有限公司与世界500强德国蒂森克虏伯公司联手,在无锡联合生产国际一流的声波钻机动力头,开创了我国生产国际最先进动力头和声频钻机的先河;该公司还与日本东亚利根公司在国内市场推出JP系列波钻机,并自主研发了YGL-S100型声频钻机,先后用于环境地质勘测、地源热泵系统钻孔、水文观察孔等工程施工^[11]。中国煤炭地质总局第二勘探局在YSZ-50型的基础上改进推出了MGD-S50 II型声频振动钻机,解决了松散地层的快速钻进和非扰动取样难题,除在岩土工程勘察,岩土工程施工,物探爆破孔施工等领域发挥重要作用外,在环境钻探取样中也具有不可替代的作用。不久该单位又自主研发了MGD-S50 III型全液压声频振动环保钻机,在大直径环境取样方面有突出优势,填补了国内声频环保钻机先进装备研制领域的空白。

虽然国内声频振动取样技术的发展相对较晚,但在该领域的研究和应用上取得了一些进展。随着技术的不断创新和市场需求的增加,国内声频振动取样技术有望在更多领域得到应用,并为相关行业的钻进技术注入新的活力。

2 声频振动取样系统能量传递研究进展

2.1 能量传递机理

声频振动取样钻机是由声频动力头产生高频振动,振动能量通过钻柱呈应力波的形式传递到取样钻头,再通过取样钻头作为媒介传递到钻孔周围的地层。当动力头产生的激励频率到达系统的谐振频率时,整个系统会发生共振,钻头产生的振幅极大化,能量聚焦使得取样钻头对地层产生更强的作用力,加速取样的进行。声频振动取样系统能量传递机理的关键在于利用共振现象将振动能量高效地传递到钻头和地层中,从而实现快速而有效的钻进取

样过程。

声频振动取样钻机在工作时会发生横向振动、纵向振动以及多种形式在内的综合振动,但当动力头中两个偏心轴相反方向旋转并且相位达到完全同步的情况下,轴向振动是钻进取样的主要有效形式。为了阐明声频振动钻柱的能量传递,可以对钻柱系统进行纵向振动建模。通常假设声频振动取样钻柱是一个等截面长度为 L 的直杆,其纵向振动控制方程为:

$$\rho S \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} + c \frac{\partial u_1}{\partial t} - ES \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} = p(x, t) \delta(x)$$

式中, ρ ——钻柱的密度, S ——钻柱的横截面积, c ——粘性阻尼, E ——钻柱的弹性模量。激振力 $p(x, t)$ 作用在钻柱的顶部,可以表示为:

$$p(x, t) \delta(x) = \begin{cases} 2me\omega^2 \sin\omega t, & x = 0 \\ 0, & x \neq 0 \end{cases}$$

式中, me ——偏心轴力矩, ω ——激励频率, $\delta(x)$ ——狄克拉函数。

2.2 动力学建模方法

研究系统的能量传递规律,首先需要对系统进行动力学建模。声频振动取样系统的动力学建模方法有:解析法、有限元法以及其他建模方法。

2.2.1 解析法

解析法是应用解析式求解数学模型的方法。在声频振动取样系统中,将利用解析法对其求解的情况分为连续法和离散法。

2.2.1.1 连续建模方法

连续模型是指用连续函数表征模型的一类模型总称。实际的振动系统是具有连续质量和弹性的连续体。目前,已有很多学者使用连续建模法建立声频振动系统的物理模型。Ammari和Lotfi Beji^[12]重构了声频振动系统的动力学方程(模型见图4a),利用预解方法探讨所设计的PDE观测器的稳定性。Jing等^[13]建立了声频振动钻井系统的结构力学方程(模型见图4b),探究动力头的质量对钻柱模态频率的影响,得出动力头质量使模态频率降低的结论。Qian等^[14]通过设置钻进过程中钻柱上、下边界的条件,建立了柔性声频钻柱冲击钻井的动力学模型,利用最大冲击力和破岩能量利用率来评价线性钻头-岩石模型下声频振动钻井系统的破岩能力。

一般情况下,连续系统贴近声频振动取样的实际钻井系统。但由于连续系统的自由度过多,不易

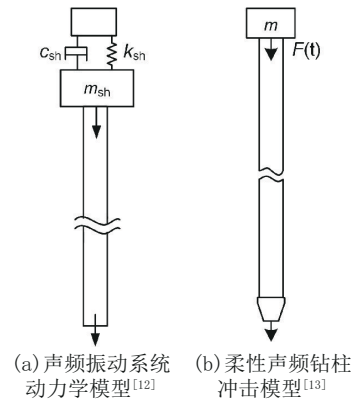


图4 连续模型

使用数学模型进行求解,需要设置众多假设来简化函数形式和求解步骤,因而与实际钻进的振动形式有一定的误差。

2.2.1.2 离散法

离散法是将系统的全部或关键组成部分离散化的方法。当个别影响因素较小或者是研究系统某一部分时,可将系统离散化处理,即忽略影响小的部分,重点部分用刚度、质量等物理量代替。振动系统的重要基本组成元素为:弹性元件、惯性元件、阻尼元件。

Pavlovskaja^[15]根据声频振动取样系统的特点将其离散,建立连续钻进的三质量模型(见图5a),探究高频振动冲击钻的钻头和已钻地层之间的动态相互作用。Liao等^[16]根据目前工作中需要分析的振动-冲击钻井系统的物理模型,提出了钻进模型,该模型由质量块、阻尼器、惯性元件组成。Potthast等^[17]研究了一种冲击振动钻井和岩石采集工具的两有限元法模型和离散集总参数。Aguilar等^[18]提出了一个集总参数振动冲击模型来表示振动辅助钻井工具的轴向动力学。Li等^[19]建立了考虑振动头和地层耦合边界的声波钻柱纵向振动模型(见图5b),通过数值模拟,得出了覆盖层与钻柱之间纵向振动的传递规律。

离散模型简化了模型,主要用于研究某个具体的行为。例如,研究钻头和土层的相互作用时可以将钻杆简化为质量块。但是这种方法不适合钻杆过长的情况。当井深较深时研究的内容只能显示时间的变化,不具有空间意义。

2.2.2 有限元法

有限元法汲取了物理离散与函数展开两类方法

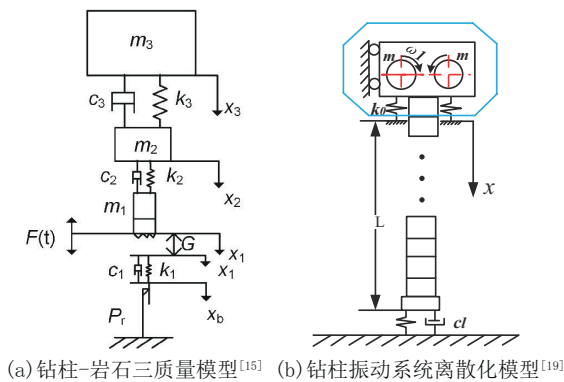
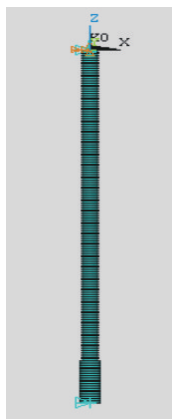


图 5 离散模型

的优点,将复杂的连续系统转化为有限自由度的离散系统,是一种广泛应用于计算工程复杂结构的方法^[21-22]。该方法随着计算机的发展得到了快速发展,成为求解声频振动取样系统的常用方法。

众多研究者常用 ANSYS、ABAQUS 等软件研究声频振动系统的响应、模态等物理量。YU 等^[20]基于有限元法建立了柔性多体钻柱系统横向、扭转和纵向耦合振动的特征方程。利用 ANSYS 软件研究了柔性多体钻柱系统的扭转振动和纵向流固耦合振动(见图 6)。Priest 等^[21]比较了 ABAQUS/Explicit 中耦合的欧拉-拉格朗日公式和更新的拉格朗日公式,以及 DEFORM 3D 中更新的拉格朗日公式,确定了网格制定和切屑分离方法对大直径钻井作业有限元建模的可靠性和准确性的影响。李婷^[22]将钻柱视为一个弹性杆,并在此基础上建立了几何模型,通过 ANSYS 软件分析钻柱纵向振动特性和减震器安放位置对钻柱纵向振动的影响^[23]。

也有很多学者基于有限元的划分理念,根据拉格朗日方程等数学物理公式对声频振动取样技术进

图 6 有限元仿真模型^[20]

行研究。为了与有限元软件进行区分,这里将此方法称为有限元分析法。邱利琼^[23]建立了钻柱系统动力学的有限元模型,利用微分方程的数值计算方法对钻柱过程进行计算机仿真。伊鹏等^[24]基于有限元法建立了直井段中单根钻杆的动力学模型,对钻杆受迫振动过程进行仿真模拟分析。Adhikari^[25]提出了一种频率相关的动力有限元方法来获得受迫振动响应。

使用有限元软件对声频振动取样系统进行研究时,建模的准确性可能在一定程度上影响结果的正确性。使用有限元分析法对声频振动取样系统进行研究时,结果的准确性依赖于研究者的编程能力和数值软件的性能。因此,该方法也存在一定的局限性。

2.2.3 其他建模方法

除解析法和有限元法外,半解析法、多种方法结合(有限元法与模态综合法结合用于子结构的模态计算)等建模方法也被学者用于研究声频振动取样系统。

2.3 系统能量传递规律研究

在声频振动取样系统中,能量的传递可分为 2 个阶段:第一阶段为动力头能量输入过程,第二阶段为钻头能量输出过程。钻进过程中的响应直接反映了能量传递的效果。钻机的结构参数、地层边界和振源参数直接影响了系统输出响应和取样钻头的破岩能量。

对于声频振动取样共振能量传递方面的研究,早在 1950s, Lubinski 撰写了多部关于组合钻具的受力分析与变形研究的论著,这对后续研究钻进取样技术提供一些理论的参考。1960s 时,美国发明家 Finnie 等针对纵向振动和扭转振动的钻进机理首次进行了研究分析。此研究中将钻具简化为弹性体,并忽略能量在钻具中传递时的能量损失和孔壁对钻具的阻尼作用,将整个声频振动系统简化为集中质量的弹簧振子,从而将其等效为一个振荡电路进行详细的分析。该模型虽然整体上反映了系统的共振特性,但由于忽视了地层的差异,因此并不能准确地描述出钻进机理。直到 80 年代,苏华、张学鸿等才开始对钻柱振动进行了比较全面深入的研究^[26]。

2.3.1 结构参数影响

声频振动取样钻机能量传递的效率和性能受到结构参数的影响。这些结构参数包括取样钻头的刚

度和质量、钻杆长度、钻杆材料和动力头的设计等。

钻头刚度是影响能量传递的关键参数之一。较高的钻头刚度能够更好地将振动能量传递到地层中,从而提高取样钻机的效率。刚度越大,能量传递的损耗越小,振动能量传输的效率越高。钻头质量也对能量传递起着重要作用。较重的钻头可以在钻进过程中产生更大的振动力,从而更好地传递能量。钻头质量的增加能够增强振动能量的传递效果。

钻杆刚度和长度制约着振动能量的传递。例如,Sun等^[27]通过求解模型得到钻柱的瞬态响应解析解,研究了钻柱长度、岩石刚度和阻尼比等钻进系统参数对钻柱振动特性的影响,获得参数对地层最大冲击力的影响。Qian等^[14]计算了前六阶声频钻柱破岩系统的共振频率并研究了钻进深度对钻柱振动特性的影响。较高的钻杆刚度可以减少能量损失,提高能量传递效率。然而,较长的钻杆可能会引起振动的衰减和能量损失。适当控制钻杆的长度可以减少能量损失,提高能量传递效率。钻杆的材料也对能量传递的效率和振动衰减起着重要作用。选择高强度和低阻尼的材料可以减少能量损失,并提高振动能量传递的效率。

动力头的设计也会对能量传递产生影响。动力头的质量和隔振弹簧的刚度会影响振动模式和能量分布,从而影响能量传递效率和取样性能。例如,雷玉如^[28]、韩磊^[29]和陈博文^[30]都关注动力头与钻机本身之间的隔振结构,分析了声频动力头内部空气弹簧结构参数对声振系统的振动特性的影响。张旭^[31]根据动力学相似理论计算了模拟纵向振动的声频钻具的基本参数,开展了声频振动钻具的相关振动参数与波动特性的研究。Xiao等^[13]研究了声频动力头的质量对钻柱动力特性的影响。

综上,结构参数对声频振动取样钻机的能量传递影响显著。通过优化这些参数,可以提高钻机的效率、减少能量损失,并提高取样质量。未来的研究可以进一步探索不同结构参数的影响,以改进声频振动取样钻机的性能和应用。

2.3.2 地层参数影响

声频振动取样钻机能量传递的效率和性能也受地层参数影响。地层参数是指地下岩层或地质介质的物理和力学特性,包括密度、速度、刚度、阻尼等。地层的特性对振动能量的传递和反射产生重要

影响。

地层边界的刚度差异对能量传递起着关键作用。当声频振动传播到不同刚度的地层边界时,会发生反射和透射。较大的刚度差异会导致更强烈的反射和能量损失,从而减弱能量传递效果。地层边界的阻尼特性也会影响能量传递。地层边界的阻尼水平决定了振动能量在传递过程中的衰减程度。较高的阻尼会导致能量的迅速衰减,减弱能量传递效率。J. A. Baird等^[32]开发了有限元计算程序,该程序模拟钻头与与非均匀地层相互作用的三维瞬态动态响应,获得由孔尺寸、孔底表面形状和地层材料不均匀性引起的响应变化。H. ahmadian等^[33]假设钻头/地层相互作用钻头运动并对其行为进行了研究。Song等^[34]考虑钻头与岩石的相互作用,建立了一个描述钻柱动态特性的新模型,更好地理解钻头存在时钻柱的动态行为。K. Jeroen等^[35]在阿姆斯特丹的一块致密和坚硬的沙层中进行声频钻机钻进试验。试验结果提到了声频动力头在钻柱顶部产生应力波,钻柱的弹性和惯性特性允许波传播,应力波穿过钻柱并部分传递到周围的土壤。在侧面主要发生横波,而在尖端同时存在应力波和横波。在波传播过程中,由于散射、径向阻尼和适当的阻尼,能量会损失。声波钻孔技术利用高频振动来大幅度降低土壤阻力。由于液化、惯性效应和土壤孔隙度的暂时降低,该元件的抗渗透阻力降低。孔华等^[36]采用井下振动高频测量工具的实测手段,测量了钻头—钻柱系统的动态振动加速度参数,结合地层的岩性和矿物组分分析,并开展了现场试验。E. Marquez和S. Garcia^[37]采用四阶龙格-库塔法数值求解估计了软地层和致密地层的响应和功率谱。

深入研究地层参数的特性和对能量传递的影响,有助于优化声频振动取样钻机的设计和操作,提高能量传递效率和取样质量。未来的研究可以进一步探索不同地层参数之间的相互关系,并开发相应的模型和算法来优化能量传递过程。

2.3.3 振源参数影响

声频振动钻机的动力来源是顶部的动力头,其内部两个偏心质量块的相反方向旋转运动而产生高频振动。振源参数,特别是激励频率和振幅,对钻机能量传递有着显著的影响。控制激励频率和振幅即可控制钻机振动能量的传递效率,从而可以调整钻机钻井或取样的速率。

LM. Knolle 和 SR. Bratton^[38]考察了钻井系统的各种机械和操作方面和能力,以及在阿萨巴斯卡焦油砂中使用声波作为勘探和资源开发工具的潜在优势。最终给出控制谐振频率以适应操作条件可以实现最佳钻孔速率的结论。M A. Trindade 和 R. Sampaio^[39]测试了使用顶部驱动的轴向激励和轴向直接速度反馈控制器的替代钻井条件,以最小化钻速振荡。Li等^[40]分析了岩石谐波振动激发稳态机械振动的振频特性,搭建了实现岩石高频振动的装置,分析了激励频率等参数对共振钻孔钻速的影响。Zhang等^[41]在考虑轴向和扭转振动的情况下,对钻柱进行了时域和频域疲劳计算,将确定性和随机激励下的结果相互比较。Qiu等^[42]利用有限元模型研究了确定性激励和随机激励联合作用对钻柱振动的影响。LÜ等^[43]采用四阶龙格-库塔法求解位移和荷载力激励下的动力响应,结果表明,不同函数形式的位移和荷载激励下的稳态响应是不同的。余弦函数形式的位移和荷载力激励下的位移和速度响应曲线比正弦函数形式的荷载和位移激励下的响应曲线波动更大。

较高的振动频率和较大的振幅通常能够提供更强的振动能量和更高的传递效率,对于地层的适应性更高。当振动频率处在系统共振频率附近时,钻进效率可大大提高。不同的工程需要根据具体情况选择适当的频率和振幅,以实现高效、精确的取样。

3 结论与展望

对于声频振动取样钻机能量传递的研究已经取得了一些重要的结论,并且也有一些展望值得关注。研究发现,合理选择声频振动取样钻机的振动频率和振幅可以显著影响取样效率。地层特性对于声频振动钻机的能量也有重要影响,不同地层对振动的响应不同,因此需要根据具体取样目标的地质情况,优化振动参数和钻头设计,以实现最佳的取样效果。在振动传递的过程中,能量会受到损耗和衰减。这些能量损耗与振动传播距离,钻杆特性和振动频率等因素有关,可以通过实验和仿真来评估能量衰减情况。

未来的研究可以进一步注重模型的建立,考虑多场耦合问题、非线性动力学问题以及多种分析方法的综合应用,更深入理论方面的探究;发展更先进的传感技术和控制系统可以实时监测振动效果,根

据地层性质和取样状态进行自适应调整。这样的技术可以提高取样钻进的准确性和稳定性,并避免因振动参数不合适而导致的损伤或振动能量浪费;优化声频振动钻机的振动源和钻头设计,以提升更高的取样性能和能量传递效率。可能会涉及更先进的振动源同步技术、改进钻头结构和材料等方面的研究;随着环境保护和安全意识的提高,未来的研究也应考虑声频振动取样钻机在使用过程中对环境和工作安全的影响,开展相关研究,确保符合可持续发展的要求。

总体而言,充分认识声频振动取样钻机的能量传递机理和进行相关研究在实践中具有重要意义,进一步深入研究和优化,有望提高勘探、采矿和地质调查等领域的钻进效率,并为更广泛的应用领域提供更高效、更精确的取样解决方案。

参考文献:

- [1] 叶成明,李小杰,刘迎娟.浅析声波钻进技术[J].勘察科学技术,2007,(5):29-31.
- [2] 王瑜,刘宝林,周琴,等.基于双偏心轴驱动的声频振动钻机设计研究[J].中国机械工程,2013,24(17):86-90.
- [3] 史海岐,刘宝林.声频振动钻机及其液压系统的设计[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,(7):44-6.
- [4] 马志鹏,王瑜,吴浩,等.基于Workbench的声频钻机动力头隔振特性分析[J].钻探工程,2022,49(3):60-69.
- [5] 王瑜,刘宝林,周琴,等.声频振动钻机液压系统设计与研究[J].机床与液压,2012,40(23):76-79.
- [6] 孙允旺,王瑜,吴浩,等.声频振动头同步机构设计与试验研究[J].现代制造工程,2022,(5):9-17.
- [7] 赵磊.取样技术在挥发性有机物污染土壤治理中的应用研究[D].中国地质大学(北京),2009.
- [8] 陆卫星,任晓飞,吴浩,等.国内振动钻机的发展及应用[J].中国煤炭地质,2012,(7):73-76.
- [9] 王达,赵国隆,左汝强,等.地质钻探工程的发展历程与展望——回顾探矿工程事业70年[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(9):1-31.
- [10] 我国首台全液压声频振动钻机亮相[J].地质装备,2013,14(1):8.
- [11] 无锡金帆与德国克虏伯合作生产声波钻机动力头[J].地质装备,2015,16(5):42.
- [12] Ammari K, Beji L. Reconstructed drill-bit motion for sonic drillstring dynamics[J]. European Journal of Control, 2019, 50: 145-52.
- [13] Xiao J, BU C, HU Y, et al. Influence of sonic vibrator mass on the modal frequency of the drill string[J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2019,44(1):65-71.

- [14] Qian Y, Wang Y, Wang ZH, et al. The rock breaking capability analyses of sonic drilling [J]. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2021, 40(4):2014-2027.
- [15] Pavlovskaja E, Wiercigroch M, Grebogi C. Modeling of an impact system with a drift [J]. *Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics*, 2001, 64(5):056224.
- [16] Liao M, Wiercigroch M, Sayah M, et al. Experimental verification of the percussive drilling model [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 146:107067.
- [17] Potthast C, Twiefel J, Wallaschek J. Modelling approaches for an ultrasonic percussion drill [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2007(3/5):308.
- [18] Aguiar R R, D'almeida E F V, Ritto T G. Vibro-impact model and validation of the axial dynamics of a vibration-assisted drilling tool [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2020, 42(11):598.
- [19] Li S, Wang Y, WU H, et al. Dynamic response of drill string when sonic drilling rig is applied to blasting hole operation [J]. *Geoenery Science and Engineering*, 2023, 221:211392.
- [20] Yu G, FU L, Xiao W, et al. Vibration Analysis of Flexible Multi-Body Drill String System by FSI [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 184-185:31-40.
- [21] Priest J, Ghadbeigi H, Avar-soberanis S, et al. 3D finite element modelling of drilling: The effect of modelling method [J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2021, 35:158-168.
- [22] 李婷, 王生楠. 钻柱纵向振动的有限元分析 [J]. *科学技术与工程*, 2009, 9(13): 3773-3775.
- [23] 邱利琼. 钻柱动态数学模型的建立及求解 [J]. *重庆大学学报 (自然科学版)*, 2002(5):148-151.
- [24] 伊鹏, 刘衍聪, 高凯, 等. 基于有限元法的单根钻杆动力学仿真模拟分析 [J]. *石油钻采工艺*, 2009, 31(4):12-15.
- [25] Adhikari S, Murmu T, Mccarthy M. Dynamic finite element analysis of axially vibrating nonlocal rods [J]. *Finite Elem Anal Des*, 2013, 63:42-50.
- [26] 苏华, 张学鸿, 王光远. 钻柱力学发展综述之二: 钻柱静力学 [J]. *大庆石油学院学报*, 1994, 18(1):43-52.
- [27] Sun L, Bu C, Hu P, et al. The transient impact of the resonant flexible drill string of a sonic drill on rock [J]. *IJMS*, 2017, 122: 29-36.
- [28] 雷玉如. 声频钻机隔振结构仿真分析研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
- [29] 韩磊. 声频钻机动头空气减振机构的设计与仿真研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- [30] 陈博文. 声频钻机空气隔振性能研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- [31] 张旭. 声频钻进中钻具纵向振动规律研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- [32] Baird J A, Caskey B C, Tinianow M A, et al. GEODYN: A geological formation/drillstring dynamics computer program [C]. *Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, F, 1984. SPE-13023-MS.
- [33] Ahmadian H, Nazari S, Jalali H. Drill string vibration modeling including coupling effects [J]. *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, 2007, 18(4):59-66.
- [34] Song X, Tijani M, Seillami H. Modeling of dynamic behavior of drillstring taking rock-bit interaction into consideration [C]. *Proceedings of the ISRM International Symposium-EUROCK 2016*.
- [35] Keuzenkamp J. The additional value of a sonic drill in a new compaction method: An experimental approach [C]. 2017.
- [36] 孔华, 兰凯, 刘香峰, 等. 基于振动实测的非均质地层钻头失效分析与对策 [J]. *天然气工业*, 2019, 39(12):110-115.
- [37] Marquez E, Garcia, S. A Probabilistic analysis in vibration-assisted drilling to measure dynamic behavior during drilling and understand risk factors [C]. *Proceedings of the ASME 2022 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2022.
- [38] Knolle, L M, Bratton, S R. The use of high-horsepower resonant sonic drilling as an exploratory tool of the Athabasca oil sands [C]. *The Canadian International Petroleum Conference 2005 and the 56. Annual Technical Meeting of the Petroleum Society of CIM*, 2005.
- [39] Trindade M A, Sampaio R. Active control of coupled axial and torsional drill-string vibrations [C]. *Proceedings of the Proceedings of 18th COBEM International Congress of Mechanical Engineering*, Ouro Preto, MG, in CD-ROM, F, 2005.
- [40] Li W, Yan T, Li S, et al. Rock fragmentation mechanisms and an experimental study of drilling tools during high-frequency harmonic vibration [J]. *Pet Sci*, 2013, 10(2):05-11.
- [41] Zheng J. Fatigue estimation of drill-string and drill-pipe threaded connection subjected to random loadings [D]. *Memorial University of Newfoundland*, 2015.
- [42] Qiu H, Yang J, Butt S. Stick-slip analysis of a drill string subjected to deterministic excitation and stochastic excitation [J]. 2016(PT5):1-7.
- [43] Lü J, Xing M. Characteristic analysis of longitudinal vibration sucker rod string with variable equivalent stiffness [C]//2018. DOI:10.1051/mateconf/201815306009.

(编辑 王文)