

国内外土壤环境调查声波钻机研究进展及发展探讨

潘云雨¹, 徐静¹, 梅金星¹, 高翔², 潘俊²

(1.南京中荷寰宇环境科技有限公司,江苏南京210019;2.溧阳市东南机械有限公司,江苏溧阳213399)

摘要:主要论述了声波钻进技术在理论以及应用方面的研究进展。阐述了声波钻进技术的发展历程;其次调研并对比了国内外声波钻机代表机型,分析得出国内同类钻机存在的不足。分析了声波钻机在土壤环境调查中的应用,可满足不同地层的连续完整原位弱扰动采样要求。探讨了声波钻机研发方向,如高频声波动力头双振子结构和复合橡胶减振材料的研发,以稳定达标150 Hz高振频并增强动力头寿命;抗疲劳、抗冲击铬钼合金材料的研发,以解决高振频下钻具疲劳损伤问题;故障诊断识别和自动修复、远程无人化操作和挥发性有机污染物在线监测系统研发,以提升高频声波钻机的智能化和自动化水平。

关键词:土壤环境调查;声波钻进技术;高振频;声波钻机;原位弱扰动采样

中图分类号:P634.3⁺1;X53 文献标识码:A 文章编号:2096-9686(2022)06-0096-08

Research progress and development discussion on sonic drilling rigs for soil environmental investigation at home and abroad

PAN Yunyu¹, XU Jing¹, MEI Jinxing¹, GAO Xiang², PAN Jun²

(1.Nanjing Sino-Dutch Universal Environ. Sci. & Tech. Co., Ltd., Nanjing Jiangsu 210019, China;

2.Liyang Dongnan Machinery Co., Ltd., Liyang Jiangsu 213399, China)

Abstract: The research progress on sonic drilling technology in theory and application is discussed. Firstly, the development history of sonic drilling technology is described. Secondly, the typical sonic drilling rigs at home and abroad are investigated and compared with analysis of the shortcomings of domestic sonic drilling rigs. Thirdly, analysis of the application of sonic drilling rigs in soil environmental investigation show that they can meet the requirement for continuous, complete and in-situ weak disturbance sampling of different soil layers. Finally, the research and development direction of sonic drilling rigs are discussed, including development of the high-frequency sonic power head with the dual vibrator structure and the composite rubber damping material to stabilize the high frequency of 150 Hz and prolong the life of the power head, development of anti-fatigue and anti-impact chromium-molybdenum alloy materials to solve the fatigue damage of drilling tools at high vibration frequencies, development of the malfunction diagnosis and auto-repair, remote operation and control, and volatile organic compound online monitoring systems to improve the intelligence and automation level of high-frequency sonic drilling rigs.

Key words: soil environmental investigation; sonic drilling technology; high-frequency; sonic drilling rigs; in-situ weak disturbance sampling

0 引言

土壤是地球生命赖以生存和发展的物质基础,

与农产品和人体健康息息相关,对国民经济发展和国土资源安全有直接影响^[1]。2014年全国土壤污染

收稿日期:2022-01-19;修回日期:2022-06-21 DOI:10.12143/j.ztgc.2022.06.013

基金项目:国家重点研发计划“污染场地土壤及地下水原位采样新技术与新设备”(编号:2018YFC1800800)

第一作者:潘云雨,男,汉族,1984年生,高级工程师,土壤污染修复专业,博士,长期从事污染土壤和地下水调查、评估和修复工作,江苏省南京市建邺区新城科技园创智路188号,yunyu.pan@u-est.com。

引用格式: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.

PAN Yunyu, XU Jing, MEI Jinxing, et al. Research progress and development discussion on sonic drilling rigs for soil environmental investigation at home and abroad[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(6):96-103.

状况调查公报显示,全国土壤总点位超标率为16.1%,耕地超标点位达到19.4%^[2]。土壤污染已成为亟待解决的重大环境问题^[3]。随着城市产业布局调整、结构升级以及“退二进三”、“退城进园”政策实施,全国出现了大量关停和搬迁遗留下来的工业场地,其原址被再次利用,带来的土壤环境污染问题日益显现^[4]。为保障农用地和工业企业用地安全,我国于2016年颁布了《土壤污染防治行动计划》并进行农用地和重点行业企业用地调查^[5]。2016—2018年,农用地详查布设点位55.8万个,基本查明农用地土壤污染面积、分布及其对农产品质量的影响。2018—2020年,全国重点行业企业调查涉及地块十几万个,基本掌握污染地块的分布及其环境风险。由此可见,我国土壤环境调查市场前景广阔,钻探采样设备需求较大。

土壤环境调查钻探地层为第四纪覆盖层,一般采样深度 ≥ 30 m,钻探施工周期短,且要满足土壤原位弱扰动采样要求。土壤环境调查钻探设备有回转钻机、直推静压式钻机、冲击式钻机、声波钻机^[6]。回转钻机采用螺旋钻具钻进土壤,对土壤的扰动较大,且不适于挥发性有机污染物的采集;直推静压式钻机利用自身重力和外加敲击锤的冲击力将钻具直接贯入土壤进行采样,不适于钻进较深的土层;冲击式钻机利用机械冲击力进行钻进和取样,对土壤的压缩较严重^[7-9]。上述钻探设备不能完全满足土壤原位弱扰动采样要求。而声波钻机通过线性共振切削穿透地层,可获得精确的土层信息,不仅钻进速度快、效率高,同时可获得原位弱扰动样品,采样时挥发性有机污染物不易损失,对环境污染较小,在土壤环境调查领域有很好的应用前景^[7,10]。本文从声波钻进技术发展、设备对比、应用领域以及研发方向4个方面进行系统阐述,以期为国内声波钻机发展提供有益借鉴。

1 声波钻进技术发展

声波钻进技术理论诞生于20世纪初^[11]。1930年罗马尼亚工程师Ion Basgan首次提出将声波钻进技术应用到传统钻机的理念并加快了这一技术的发展^[12]。1948年美国研制出了一种孔底振动器但未能得到很好的应用,原因在于振动能量过高导致孔底部件易损^[7]。1957年苏联科学家研发了一套地面振动器但应用受到极大限制,原因在于振动器仅依

靠振动作用钻进土层,钻进深度浅^[13]。60年代美国壳牌石油公司研制出了一种大功率地面振动器,该振动器成功应用于石油勘探和高速打桩领域^[14]。70年代美国科学家Ray Roussy研制出了小功率振动器,先后被应用到北极地区的物探爆破孔施工和砂金矿取样领域中^[15]。

90年代后,随着液压、自动化等相关行业的发展,声波钻进技术日趋成熟,国外多家企业相继开展了声波钻机的研发。美国Boart Longyear公司、Prosonic公司,荷兰Eijkelkamp公司,加拿大Sonic-Drilling公司,日本利根公司均已产出成熟的声波钻机,在军事基地油罐场、公用加油站、矿山尾矿库和垃圾填埋场等土壤环境调查领域得到了广泛应用^[16-18]。

目前国内声波钻进技术的研究和应用尚处于起步阶段。在借鉴发达国家经验的基础上,一些科研机构及公司开展了声波钻机的研发,如中国煤炭地质总局第二勘探局(简称“第二勘探局”)、中国地质大学(北京)和无锡金帆钻凿设备股份有限公司(简称“无锡金帆”)均研发了声波钻机并在在产企业的例行监测、工业企业退役场地调查、矿山尾矿库调查和垃圾填埋场调查等土壤环境调查领域进行了应用^[19-20]。

与国外成熟的声波钻进技术相比,国内在声波动力头振动、减振以及轴承冷却装置等方面尚存在较大差距^[21]。

2 国内外土壤环境调查声波钻机现状及对比分析

近30年声波钻进技术得到了充分的发展,国内外出现多家声波钻机制造商。本文结合国内外声波钻机代表机型的现状,重点比较分析国内外声波动力头、隔振材料、动力头轴承冷却装置、配套钻具、钻机的智能化和自动化控制水平方面的差异。

2.1 国外典型土壤环境调查声波钻机

LS250MiniSonic钻机是美国Boart Longyear公司生产的一种适用于土壤环境调查的声波钻机^[22]。其特点为:(1)配置自主研发MiniSonic型声波动力头,且采用空气弹簧系统将振动与钻机隔离,极大地提高了钻进效率;(2)配置Cummins QSB型大马力发动机,能够满足土壤环境调查钻探深度要求;(3)配置不同尺寸钻具,钻孔直径76~305 mm,可以满足不同场景的取样需求;(4)配置较宽橡胶履带,接

地压力小,适用于大多数环境敏感地表、不稳定地面以及大型钻机难以进入的场地环境^[16]。

SRS型声波钻机是荷兰Eijkelkamp公司研发的世界最小的声波旋转钻机。它的主要特点是:(1)配置高频声波动力头和旋转动力头,采用复合型橡胶作为减振材料,大大提高钻进效率;(2)配置小功率的发动机,钻进深度满足土壤环境调查采样深度要求;(3)根据不同地质条件配置不同钻具和钻头,可以达到上覆地层98%、其它土层95%以上的岩心采取率;(4)目前已应用到环境钻探与取样、岩土工程取样与测试、地震爆破井钻探、岩土施工钻探等领域。

SP-50型钻机是日本利根公司研发的环保类声波钻机。其主要特点有:(1)配置液压马达驱动振动器,振动频率为64.5 Hz;(2)柴油发动机输出功率较低,另外配置动力头旋转用辅助发动机,满足土壤环境调查采样深度,对能源消耗较小;(3)钻孔直径60~230 mm,基本满足土壤环境调查的各种取样场景;(4)已经应用于土壤和地下水环保调查领域。

2.2 国内典型土壤环境调查声波钻机

MGD-S50 II型钻机是第二勘探局自主研发的高频声波钻机^[23-26]。该钻机主要特点有:(1)采用派

克马达声波动力头,动力头采用整体框架和侧面橡胶减振方式结合,性能可靠、力学结构合理^[24];(2)配置大功率6BTAA-C150型东风康明斯柴油发动机,钻进深度可达50 m;(3)在河北涿州开展不同地层试验,针对不同地层配置不同钻具,结果表明3种地层的岩心采取率高达96%以上^[26];(4)主要用于污染场地土壤环境调查、尾矿坝勘察、环境监测井等领域^[27]。

YGL-S50型钻机是无锡金帆引进原装进口声波动力头研制的声波钻机。该声波钻机特点有:(1)采用偏心重锤式、液压马达驱动的振动器,实现振动与回转工艺结合的钻进方式,通过自给式和空压机式减振装置,具有良好的降噪效果,且能提高钻机寿命;(2)采用小功率柴油发动机,基本满足土壤环境调查采样深度的要求;(3)配置单管和双管取样器,取样直径达到95~130 mm,基本满足土壤环境调查的各种取样场景;(4)主要用于土壤环境污染取样、尾矿坝勘察等领域^[28]。

2.3 国内外声波钻机对比分析

国内外声波钻机主要技术参数和技术水平情况见表1、表2。

表1 国内外声波钻机主要技术参数对比

Table 1 Comparison of main technical parameters of sonic drilling machines at home and abroad

制 造 商	钻进深度/ m	振动频率/ Hz	激振力/ kN	最大输出扭矩/ (N·m)	给进力/ kN	起拔力/ kN	功率/ kW	整机质量/ t
美国 Boart Longyear	61	0~75	182	2400	24	66	119	11.5
荷兰 Eijkelkamp 公司	50	0~150	100	1400	40	60	75	5
日本利根公司	30	0~64.5	63	4460	20	93.2	19.6	4.4
第二勘探局	50	0~150	140	1800	58	128	110	6.5
无锡金帆	50	0~66.7	38	3240	20	50	46	3.8

表2 国内外声波钻机技术水平对比

Table 2 Technical level comparison of acoustic drilling machines at home and abroad

技 术	国 外	国 内
声波动力头	自主研发	进口
隔振材料	采用先进的隔振材料,隔振效果好	隔振材料较为落后,隔振效果较差
动力头轴冷却装置	冷却润滑效果好,轴承寿命长	仅有润滑效果,轴承寿命短
配套钻具	采用新材料,提高钻具使用寿命	材料落后,钻具寿命较短
钻机智能化和自动化控制	采用智能控制系统,自动化、智能化程度高	自动化、智能化程度低

可以看出,国内外在声波动力头主要技术参数(振动频率、激振力、最大输出扭矩、给进力、起拔力)没有明显的差距,但是国内在声波动力头、隔振材料以及动力头轴承冷却装置研发等方面还存在不足。

2.3.1 国内声波动力头仍需进口,缺乏自主创新

声波动力头是声波钻机的关键部位,国外对其研究较早,有很多专利产品,如美国 Boart Longyear 公司、荷兰 Eijkelkamp 公司研发的系列声波钻机,两家声波动力头已申报了国际专利。国内具有自主知识产权、自主研发能力的专业化公司少,动力头依靠进口。如无锡金帆的声波钻机采用了日本进口的声波动力头。

2.3.2 国内隔振材料落后,减振效果较差

隔振材料可以吸收振动器产生的能量,避免钻机因强振作用导致部件损坏,增加钻机寿命^[29]。国外钻机隔振方式多样,且隔振材料比较先进。如荷兰 Eijkelkamp 公司的 SRS 高频声波钻机隔振材料采用复合橡胶进行隔振,耐腐蚀、抗负荷能力大、减振效果好。目前国内声波钻机隔振材料相对落后,如第二勘探局研发的钻机隔振材料为普通橡胶,该材料性能受温度影响大、耐腐蚀和抗负荷能力差、易形变和老化。

2.3.3 国内声波动力头轴承运转温度高,使用寿命短

动力头轴承冷却装置能够有效控制偏心轴轴承的工作温度,提高轴承使用寿命。目前国外钻机采用的轴承冷却系统能够在轴承运转过程中实现轴承循环喷油润滑和冷却,如荷兰 SRS 型高频声波钻机。而国内钻机一般采用轴承循环换脂技术来实现动力头轴承冷却润滑,如中国地质大学(北京)研发的 SDR-100 型声波钻机,无法完全解决偏心振动轴承温度高、寿命短问题。

2.3.4 国内声波钻机配套钻具材料落后,易产生疲劳损伤

钻具的寿命受材料种类影响较大。目前国外钻机配套钻具一般选用高强度合金材料,如荷兰 SRS 型高频声波钻机钻具选用的 42CrMo 材料,其强度、疲劳极限和耐冲击能力高于其它铬钼合金材料。国内第二勘探局研发的声波钻机选用的钻具材料为 35CrMo,已具有良好的荷载和承受冲击的能力,但存在在高频振动下韧性差、易产生疲劳损伤问题。

2.3.5 国内钻机智能化和自动化控制水平低

钻机智能化和自动化控制技术是一种将智能诊断识别修复、智能化操控和智能监测与自动化控制相结合的技术,可以普遍提升声波钻机设备的运行效率和质量^[30-32]。如美国 Boart Longyear 公司的 LS250MiniSonic 型声波钻机采用上述技术后,可实现设备故障的智能诊断识别并预设相应解决程序,以达到故障的自动修复;可实现集成性高、准确度高的远程智能化操控;可协同膜界面探测器(MIP)实现对挥发性有机污染物浓度的智能监测功能。然而,国内钻机在上述技术领域智能化和自动化控制水平相对较低。

3 声波钻机在土壤环境调查中的应用

土壤环境调查目的是获取连续完整原位弱扰动土壤样品,以掌握土壤污染情况。土壤钻探是获取场地土壤和地下水样品以及岩石最有效的手段^[33-34]。而声波钻机由于钻进速度快、压缩比小、岩心采取率大以及易获得原位弱扰动土壤样品等优点,在土壤环境调查的应用广泛。如在产企业的例行监测、工业企业退役场地调查、矿山尾矿库土壤调查、垃圾填埋场调查等^[35-38]。

3.1 在产企业的例行监测

根据《工矿用地土壤环境管理办法(试行)》(生态环境部部令)中的规定,土壤重点监管单位应当定期开展土壤和地下水监测^[39]。这类企业由于构筑物完整、硬化良好,如何将硬化层破除是此类企业例行监测的难点之一。常规钻机大部分适合在粉土、砂土等地层钻进,在硬化层钻进速度慢、钻头损耗较大,推广使用具有局限性。而声波钻机采用高频振动技术原理,使硬化水泥实现共振破碎,钻头磨损较小,钻进速度较快,极大地提高了在产企业例行监测的效率。以南京某船厂为例,该地块硬化层厚度 1~2.5 m,选用的荷兰 Eijkelkamp 公司 SRS-PL 型钻机在硬化层的钻进速度是其它钻机的 2~3 倍,高效完成了企业的例行监测。

3.2 工业企业退役场地调查

根据《土壤污染防治行动计划》中的规定,对拟收回土地使用权的重点行业企业用地,以及用途拟变更为居住和商业、学校、医疗、养老机构等公共设施的工业企业,需开展土壤环境状况调查^[5]。我国工业企业退役场地数量较多、分布广泛、地质跨度较

大且存在污染隐患,所以要求钻机具有适应多种环境取样、机动性能高、获取连续完整原位弱扰动样品的特点^[40]。常规钻机大多笨重、机动性不强,对土壤扰动性大,难以达到原位弱扰动采样要求。声波钻机可车载可便携、机动性强、可干式钻进、且对土层干扰小,适用于偏远、交通不便地区钻探采样。以某关闭地块的松散土层钻探采样为例,该地块地层以粉土和粉砂为主,地下水位较浅。常规钻机在钻进过程中易发生钻孔坍塌,且土样压缩比较大。选用声波钻机,采用内管超前钻探、外套管跟进封隔地下含水层的钻探方法,配套爪簧钻头和合页板钻头,轻松取出连续完整原位弱扰动粘土样品,为关闭企业的风险管控和修复打下了坚实的基础^[35,41]。

3.3 矿山尾矿库调查

尾矿库以坚硬地层为主,取样最大的难点为钻进难度大、深度浅、岩心采取率低。常规钻机在砂卵石层等坚硬地层取样困难、岩心采取率较低、保真度较差^[42]。声波钻机采用高频振动,配套双管钻具和钻头,在坚硬地层中钻进速度较快,岩心采取率较高,钻进深度可满足土壤环境调查取样要求。以安徽某尾矿库为例,该尾矿库位于山区的沟谷中,地层以黄褐色粘土、亚粘土、砂、砾石为主。浅层土壤为松散(软)地层,易发生钻孔坍塌事故;深层土壤为砂、砾石地层,钻进难度大。其它钻机对钻孔的冲击力较大、钻进深度较浅、岩心采取率低,难以满足尾矿库的采样调查。综合考虑后选用声波钻机,采用双管钻探方法,既可避免松软土层坍塌,又可深入钻进坚硬地层,在尾矿库环境调查中发挥了重要作用。

3.4 垃圾填埋场调查

生活垃圾填埋场一般选址距城区较远、交通欠发达地区,且多以坚硬地层为主^[38]。常规钻机较为笨重机动性不强,在交通欠发达地区移动较困难,且不易在坚硬地层钻进。声波钻机可车载、可自行走,机动性较强,在坚硬地层中亦能快速钻进。以南京某垃圾填埋场为例,该垃圾填埋场远离主城区,且地层以碎石土、强风化泥质粉砂岩、中风化泥质粉砂岩、强风化粉砂岩等坚硬地层为主。考虑填埋场内部钻探点位距离较远,常规钻机钻进易发生卡钻、埋钻等事故,导致完钻周期长甚至钻孔报废,造成经济损失等原因,故选择声波钻机,并采用内管钻探外套管跟进的钻探方法^[43]。外套管能保证土层不发生坍塌,从而成功采集连续弱扰动的土样,更好地反映

该填埋场污染情况。

随着高频声波钻机在土壤环境调查中的逐步推广应用,相关技术问题也亟待解决。例如长时间高振频会导致动力头工作效率下降,甚至会缩减钻机使用寿命;高振频会对钻具造成疲劳损伤;声波钻机功能相对单一。

4 国内声波钻机研发方向探讨

随着声波钻进技术在土壤环境调查方面的应用日趋广泛,我国开始加大对声波钻机的研发。目前国内大多数制造商通过购买国外声波钻进设备来仿制组装声波钻机,生产成本较高,且售后维修和维护较为困难。为打破国外声波钻机技术垄断地位,国内开展声波钻机研发就显得十分重要。结合国内外声波钻机发展现状以及存在的差距,提出以下研发方向,与同行进行探讨。

4.1 增强高振频动力头寿命

振动频率是声波钻机的核心性能参数,高振频(150 Hz)可以减少地层对钻具周围的摩擦阻力,提高钻进速度,但高振频亦会对钻机造成损伤,因此稳定达标高振频并增强动力头寿命是高频声波动力头亟待攻克的研究方向。目前国内外的钻机采用单振子结构声波动力头,其高频振动稳定性和持久性较差;振子持续高速运转会导致轴承损坏,产生的高温会导致动力头工作效率下降;在无减振材料配套工况条件下,声波动力头在运行时高频振动容易对钻机造成损坏。马志鹏等^[44]通过研究可选择刚度小、阻尼较大橡胶材料,可提高动力头隔振性能,从而减轻高振频对钻机的损害。笔者研发团队在国内外声波钻机研究分析基础上进行设计,通过2组具有相等偏心质量和偏心轴的振子轴,质心相位两两串联后并联,相向转动、同步回转,可使振动频率稳定达到150 Hz;通过液电负载敏感比例阀,并利用冷却供油泵和吸油泵配合,使得声波动力头双振子同步进油和回油,可有效降温并使轴承使用寿命提升50%以上;利用纵向与主轴振动方向一致的复合橡胶减振材料,使得纵向有较好的弹性变形性能,横向具有较强的支撑性能,可有效吸收振动能量,减轻对钻机的损坏,可显著提升钻机寿命^[45-47]。

4.2 解决高振频下钻具疲劳损伤问题

钻具主要由钻头和钻杆组成。钻具材料在钻机钻进时会承受高振频并产生疲劳损伤。为解决钻具

使用寿命短问题,可采用疲劳累积损伤理论,进行旋转变曲疲劳试验和升降法试验获得不同材料的疲劳寿命;可通过有限元分析,了解其在极限工况下的变形应力分布情况;可利用三维设计软件对钻具进行仿真设计,通过设定不同边界条件的参数,分析评价合金材料的塑性疲劳极限和抗多次冲击能力。笔者研发团队通过疲劳累积损伤理论并利用有限元分析进行了合金材料研发。通过对比不同铬钼合金材料的寿命、疲劳极限、抗冲击能力等,最后发现42CrMo合金材料是研制高频声波钻具的相对最优选择,最终设计研制了适用于松软地层的活塞式钻具、中等及坚硬地层的双壁式钻具。2套钻具在松软地层和坚硬地层测试过程中分别钻进21 m和34.5 m,其岩心采取率95%~98%,满足土壤环境调查的取样要求^[19]。

4.3 提升高频声波钻机的智能化和自动化水平

智能化和自动化控制技术是一种多学科融合的技术,涉及物联网、大数据分析、语音识别、在线监测等,在国外机械装备领域如美国GeoProbe钻机中已有较多应用。为提升我国声波钻机智能化和自动化水平并与国际接轨,可结合物联网和大数据分析技术,以实现钻机故障智能预警和设备自动修复功能;可结合语音识别技术,以实现人机交互智能化远程操控功能;可结合在线监测技术,以实现钻机与膜界面探测器(MIP)协同联动达到对挥发性有机污染物浓度的自动监测功能。笔者研发团队已基于可编程逻辑控制器(PLC)技术,实现了全机器液压智能分配。目前通过物联网以太接入技术结合大数据分析、语音识别和在线监测,正在构建物联监控平台。该平台可实现钻机故障智能预警和设备自动修复、智能远程操控功能;后期与土壤取样量和监测数据融合,可实现钻机的自动监测功能。

5 结语

随着《中华人民共和国土壤污染防治法》的颁布实施,国内土壤环境调查的有序开展,土壤环境调查钻探设备的需求日益增加^[48]。声波钻进技术以其高效且适应性强,可获得连续完整原位弱扰动土样的优势,在土壤环境调查中具有广阔的应用前景。国内在声波钻机动力头振动和减振装置、轴承冷却润滑装置以及配套钻具等方面与国外同类钻机有较大差距。针对我国声波钻机现状,建议在高频声波

动力头、配套钻具研制以及智能化和自动化控制水平等方面加大研发力度,以期为国内声波钻机发展提供有益借鉴。

参考文献(References):

- [1] 李卓.土壤环境监测信息系统构建研究[D].青岛:山东科技大学,2011.
LI Zhuo. Research on the built of soil environmental monitoring information system [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2011.
- [2] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. 2014. <http://www.gov.cn/foot/site1/20140417>.
Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources. National Survey Communique on Soil Pollution Status [EB/OL]. 2014. <https://www.gov.cn/foot/site1/20140417>.
- [3] 程功弼,田英,许孟一,等.一种用于土壤地下水取样修复的新型设备的研究[J].环境工程,2017(S1):200-205.
CHENG Gongbi, TIAN Ying, XU Mengyi, et al. Study on a new device for sampling and remediation of soil and groundwater [J]. Environmental Engineering, 2017(S1):200-205.
- [4] 余慧萍,张亚楠.工厂搬迁仍留“毒”,污染场地修复红火[N].南方都市报,2011-01-17(3).
YU Huiping, ZHANG Yanan. "Poison" is remaining in factory while remediation of contaminated sites is booming [N]. Southern Metropolis Daily, 2011-01-17(3).
- [5] 中华人民共和国国务院.土壤污染防治行动计划[Z].北京,2016.
National Assembly of the PRC. Soil Pollution Prevention and Control Action Plan[Z]. Beijing, 2016.
- [6] ASTM D 6286—1998.环境位点特性分析用钻削方法选择的标准指南[S].美国材料与试验协会,1998.
ASTM D 6286—1998. Standard guide for selection of drilling methods for environmental site characterization [S]. American Society for Testing and Materials, 1998.
- [7] 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.
YE Chengming, LI Xiaojie, LIU Yingjuan. Preliminary analysis of sonic drilling technology [J]. Site Investigation Science and Technology, 2007(5):29-31.
- [8] 雷开先.声波钻机在环境地质调查中的应用研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(6):4-8.
LEI Kaixian. Application study of sonic drill in environmental geological survey [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013,40(6):4-8.
- [9] 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,2012,24(7):73-76.
LU Weixin, REN Xiaofei, WU Hao, et al. Application and advance on vibration drilling rigs in China [J]. Coal Geology of China, 2012,24(7):73-76.
- [10] 宋家音,赵玲,滕应,等.污染场地采样调查技术与设备研究进

- 展[J].土壤,2021,53(3):468-474.
- SONG Jiayin, ZHAO Ling, TENG Ying, et al. Research progress on sampling survey technology and equipment for contaminated sites[J]. Soils, 2021,53(3):468-474.
- [11] Constantinesco George. A treatise on Transmission of Power by Vibrations[M]. London: The Admiralty, 1918.
- [12] 李炯,王瑜,周琴,等.环境取样钻机的关键技术及发展趋势研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(9):81-87.
- LI Jiong, WANG Yu, ZHOU Qin, et al. Research on key technology and development trend of environmental sampling rig[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(9):81-87.
- [13] 赵伟.高频振动回转钻进机理分析与研究[D].长春:吉林大学,2008.
- ZHAO Wei. The analysis and research on the mechanism of high-frequency vibration and rotary drilling technology [D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- [14] Jeffrey C. Barrow. The resonant sonic drilling method: An innovative technology for environmental restoration programs[J]. Ground Water Monitoring & Remediation, 1994, 14 (2) : 153-160.
- [15] Roussy R. The development of sonic drilling technology [J]. Geo Drilling International, 2002, 10(10): 12-14.
- [16] 张燕.国外声波钻机及其应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(7):105-107.
- ZHANG Yan. Foreign sonic drilling rigs and their applications [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2008,35(7):105-107.
- [17] 吴光琳.声波钻进技术的发展及其应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2004,31(3):39-41.
- WU Guanglin. Development and application of sonic drilling technology[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2004,31(3):39-41.
- [18] 吴光琳.欧美环境保护钻探和钻孔工程[J].国外地质勘探技术,1998(1):35-40.
- WU Guanglin. European and American environmental protection drilling and engineering [J]. Foreign Geological Exploration Technology, 1998(1):35-40.
- [19] 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.
- PAN Yunyu, MEI Jinxing, XU Jing, et al. Design of ZHDN-SDR 150A high-frequency sonic drill[J]. Drilling Engineering, 2022,49(2):135-144.
- [20] 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.
- LU Weixing, WU Hao, REN Xiaofei. Application test and optimization of MGD-S50 II acoustic vibration drill[J]. Geology Equipment, 2021,22(6):14-18.
- [21] 冉灵杰.浅层土壤环境取样钻进技术研究[D].北京:中国地质大学(北京),2019.
- RAN Lingjie. Research on drilling technology of soil environment sampling in shallow layer[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- [22] 颜纯文.声波钻进和宝长年LS250声波钻机[J].地质装备,2016,17(5):11-15.
- YAN Chunwen. Sonic drilling and Boart Longyear LS250 sonic drilling rig[J]. Geology Equipment, 2016,17(5):11-15.
- [23] 吴浩,陆卫星,任晓飞,等.YSZ-50型声频振动钻机的研制[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(1):9-13.
- WU Hao, LU Weixing, REN Xiaofei, et al. Development of YSZ-50 sonic drilling rig[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012,39(1):9-13.
- [24] 任晓飞,赵振国,牛军辉,等.YSZ-50型声频振动钻机在尾矿坝勘察中的应用[J].地质装备,2013(1):27-28.
- REN Xiaofei, ZHAO Zhenguo, NIU Junhui, et al. Application of YSZ-50 acoustic frequency vibration drill in investigation of tailings dam[J]. Geology Equipment, 2013(1):27-28.
- [25] 吴浩,赵晓冬.YSZ-50型声频振动钻机的工程应用及技术改进[J].地质装备,2016,17(1):20-22,30.
- WU Hao, ZHAO Xiaodong. Engineering application and technical improvement of YSZ-50 acoustic vibration drill[J]. Geology Equipment, 2016,17(1):20-22,30.
- [26] 李伟,吴浩,杨恺.MGD-S50 II型声频振动钻机的研制与试验[J].中国煤炭地质,2017,29(12):75-77,95.
- LI Wei, WU Hao, YANG Kai. Development and site testing of MGD-S50II type sonic frequency resonance drill [J]. Coal Geology of China, 2017,29(12):75-77,95.
- [27] 吴浩,康凯.国内外环保调查钻机新进展[J].环境工程,2019,37(S1):854-856,864.
- WU Hao, KANG Kai. New development of drill rigs for environmental protection investigation at home and abroad[J]. Environmental Engineering, 2019,37(S1):854-856,864.
- [28] 无锡金帆钻凿设备股份有限公司.YGL-S100和YGL-S50型声波钻机[J].地质装备,2016,17(5):45.
- Wuxi Jinfan Drilling Equipment Company Limited. YGL-100 and YGL-S50 sonic drilling rigs [J]. Geology Equipment, 2016,17(5):45.
- [29] 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.
- CHEN Bowen. Research on air vibration isolation performance of sonic drill [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [30] 薛倩冰,张金昌.智能化自动化钻探技术与装备发展概述[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):9-14.
- XUE Qianbing, ZHANG Jinchang. Advances in intelligent automatic drilling technologies and equipment[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):9-14.
- [31] 刘凡柏,高鹏举,任启伟,等.4000 m交流变频电驱动岩心钻机的研制及其在地热井的工程应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(10):40-46.
- LIU Fanbai, GAO Pengju, REN Qiwei, et al. Development

- and application of 4000m AC frequency conversion core drill [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2018, 45(10):40-46.
- [32] 黄洪波,朱江龙,刘跃进.我国钻探技术装备“十一五”回顾与“十二五”展望[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2011, 38(1): 8-14.
HUANG Hongbo, ZHU Jianglong, LIU Yuejin. Review of drilling technology and equipment for the 11th Five-year Plan period and envisioning of same for the 12th Five-year Plan period in China[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2011, 38(1):8-14.
- [33] 王颖.我国污染场地调查概述[J].*建筑工程技术与设计*, 2016 (15):7714.
WANG Ying. An overview of the investigation of contaminated sites in China [J]. *Construction Engineering Technology and Design*, 2016(15):7714.
- [34] 鞠凤萍,郭密文,李旭,等.污染场地调查评估现状及市场分析 [J].*绿色科技*, 2016(16):68-70.
JU Fengping, GUO Miwen, LI Xu, et al. Current status of investigation and evaluation of contaminated sites and market analysis [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2016 (16):68-70.
- [35] 吴浩,周兢.50米超高频声波环保钻机研制及其在污染场地调查的应用研究[J].*环境工程*, 2019, 37(S1):903-906.
WU Hao, ZHOU Jing. The Research of 50m super frequent sonic environmental rig and the application of investigation in polluted site [J]. *Environmental Engineering*, 2019 (S1) : 903-906.
- [36] 吴浩,赵晓冬,李伟.新型声频振动环保钻机的研制与工程应用[J].*机床与液压*, 2019, 47(4):62-66.
WU Hao, ZHAO Xiaodong, LI Wei. Development and application of the new type sonic environmental drilling rig [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2019, 47(4):62-66.
- [37] Kasassi A., Rakimbei P., Karagiannidis A., et al. Soil contamination by heavy metals: measurements from a closed unlined landfill [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99 (18) : 8578-8584.
- [38] 李玲,王颀军,唐跃刚.封场非正规垃圾填埋场的场地调查浅析[J].*环境卫生工程*, 2014, 22(2):59-61.
LI Ling, WANG Tingjun, TANG Yuegang. Site investigation of closed informal landfill sites [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2014, 22(2):59-61.
- [39] 中华人民共和国生态环境部.工矿用地土壤环境管理办法(试行)[Z].北京, 2018.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Soil environmental management measures for industrial and mining land (for trial implementation) [Z]. Beijing, 2018.
- [40] 罗强,刘良平,谢士求,等.YGL-S100型声波钻机及其在深厚覆盖层成孔取样施工实践[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2013, 40(6):9-13.
LUO Qiang, LIU Liangping, XIE Shiqiu, et al. Introduction of YGL-S100 sonic drill and the sampling practice in deep overburden layer [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2013, 40(6):9-13.
- [41] 谈耀麟.钻孔下套管方法综述[J].*地质与勘探*, 1991, 27(6): 52-57.
TAN Yaolinlin. A review on drill hole casing methods [J]. *Geology and Exploration*, 1991, 27(6):52-57.
- [42] 颜俊,卢薇艳.采用地质工程手段处治垃圾填埋场渗滤液方法研究[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2016, 43(10):108-111.
YAN Jun, LU Weiyang. Study on refuse landfill leachate treatment by means of engineering methods [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2016, 43(10): 108-111.
- [43] 张健松,刘永升,李之军,等.地质钻探复杂地层固壁堵漏新工艺[J].*地质与勘探*, 2020, 56(4):819-825.
ZHANG Jiansong, LIU Yongseng, LI Zhijun, et al. New technology of geological drilling for borehole-wall reinforcement and leaking stoppage in complex formation [J]. *Geology and Exploration*, 2020, 56(4):819-825.
- [44] 马志鹏,王瑜,吴浩.基于Workbench的声频钻机动头隔振特性分析[J].*钻探工程*, 2022, 49(3):60-69.
MA Zhipeng, WANG Yu, WU Hao, et al. Analysis of vibration isolation characteristics of the sonic drill power head based on Workbench [J]. *Drilling Engineering*, 2022, 49(3):60-69.
- [45] 南京中荷寰宇环境科技有限公司.一种钻机用高频偏心振动声波动力头:202010391877.3[P]. 2020-05-11.
Nanjing Sino-Dutch Universal Environ. Sci. & Tech. Co., Ltd. A high-frequency eccentric and sonic vibration power head for a drilling rig: 202010391877.3 [P]. 2020-05-11.
- [46] 潘云雨,高翔,潘俊,等.一种钻机声波动力头偏心振动轴承冷却保护系统:202020764830.2[P]. 2020-05-11.
PAN Yunyu, GAO Xiang, PAN Jun, et al. A kind of bearing cooling protection system for eccentric and sonic vibration power head of a drilling rig: 202020764830.2 [P]. 2020-05-11.
- [47] 溧阳东南机械有限公司.一种钻机声波动力头偏心振动发生装置:20201039188.7[P]. 2020-05-11.
Liyang Dongnan Machinery Co., Ltd. A kind of vibration generating device for eccentric and sonic vibration power head of a drilling rig: 20201039188.7 [P]. 2020-05-11.
- [48] 中华人民共和国环境保护部.中华人民共和国土壤污染防治法[Z].北京, 2018.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Soil Pollution Prevention and Control Law of the People's Republic of China [Z]. Beijing, 2018.