

# 环境取样钻机的关键技术及发展趋势研究

李 炯<sup>1,2</sup>, 王 瑜<sup>1,2</sup>, 周 琴<sup>1,2</sup>, 刘宝林<sup>1,2</sup>, 张 凯<sup>1,2</sup>, 王志乔<sup>1,2</sup>

(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)

**摘要:**环境质量同生活品质密切相关,环境取样钻机在环境质量检测中扮演着不可或缺的角色。本文综述了直推式、声频振动式和回转式环境取样钻机的工作原理及发展历程,总结了国内外钻机在智能化、结构紧凑程度和外观造型上的差距,提出了环境取样钻机的关键能力,包括移动能力、钻进能力和样品保真能力,指出了环境取样钻机将朝着动力采用清洁能源、自动分析样品和适应多种场合的方向发展。

**关键词:**环境质量检测;取样钻机;直推式取样钻机;声频推动式取样钻机;回转式取样钻机

**中图分类号:**P634;X54 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)09-0081-07

## Research on key technology and development trend of environmental sampling rig

LI Jiong<sup>1,2</sup>, WANG Yu<sup>1,2</sup>, ZHOU Qin<sup>1,2</sup>, LIU Baolin<sup>1,2</sup>, ZHANG Kai<sup>1,2</sup>, WANG Zhiqiao<sup>1,2</sup>

(1.School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2.Key Laboratory of Deep Geodrilling Technology, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Environmental quality is closely related to the quality of life and the environmental drilling rig plays an indispensable role in environmental quality testing. This paper reviews the working principle and development process of the direct push, sonic vibration and rotary environmental sampling drilling rig with summarization of the gap between domestic and foreign drilling rigs in intelligence, compact structure and appearance, and presents that the key capabilities of environmental sampling rigs include mobility, drilling capacity and sample fidelity-keeping ability. Finally, it is pointed out that the environmental sampling rig will develop towards the direction of using clean energy, automatically analyzing samples and adapting to various situations.

**Key words:** environmental quality testing; sampling rig; direct push environmental sampling rig; sonic vibration environmental sampling rig; rotary environmental sampling rig

## 0 引言

自工业革命以来,人类社会文明的发展进程急速变化。人们在享受工业革命带来的丰硕果实的同时,生态环境却遭受到了破坏。而随着社会的发展,人们不仅对物质文化生活提出了更高的要求,对环境等方面的要求也越来越高<sup>[1]</sup>。因此,通过进行环境取样来测定环境中物理化学和生态系统各指标,以确定环境污染状况或环境质量的高低显得尤为重要<sup>[2]</sup>。

环境取样通常包括水体取样<sup>[3-5]</sup>、气体取

样<sup>[6-8]</sup>和土壤或地质取样<sup>[9-11]</sup>。在环境地质取样中,主要有直推式取样、声频振动取样和回转取样。环境取样钻机通常具有钻探成本低、取心率高、钻进速度快、对样品无扰动及对土壤无污染的特点<sup>[12-15]</sup>。本文综述了环境取样钻机的发展历程。通过对国内外钻机的比较得出,国外钻机通常具有模块化和智能化程度高、结构紧凑、造型美观的特点,但同时价格昂贵;国内钻机也正朝着这几个方向发展。提出了环境取样钻机的关键技术应包括移动能力、钻进能力和样品保真能力 3 个方面,认为环境

收稿日期:2018-09-28; 修回日期:2019-02-24 DOI:10.12143/j.tkgc.2019.09.010

基金项目:国家自然科学基金项目“声频振动钻进系统共振机理及能量传递规律研究”(编号:41672366)

作者简介:李炯,男,汉族,1993 年生,硕士研究生在读,地质工程专业,主要从事钻探钻具方面的研究,北京市海淀区学院路 29 号,2102160053@cugb.edu.cn。

引用格式: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.

取样钻机将朝着采用清洁能源动力、自动分析样品和适应多种场合的方向发展。

## 1 直推式取样钻机

### 1.1 直推式取样钻机的工作原理

直推式取样钻机通常由导轨、给进油缸、振动冲击器、马达和变速箱等组成。其钻进方法包括推钻、锤击或振动推进钻头3种。工作原理是在钻进过程中,遇阻力较小的时候给进油缸产生静压力推动变速箱沿导轨向下运动,带动取样装置无回转地进入地层中;阻力较大或者无法静压进尺的时候,振动冲击器产生冲击力,配合静压入土的方式快速钻进成孔并取样。直推钻机在取样过程中不需要冲洗液,确保所得到的样品不被交叉污染,能最大程度的保证土样的原状特性<sup>[16-17]</sup>。

### 1.2 直推式静压取样钻机的发展

直推技术起源于20世纪20年代的荷兰,当时荷兰人在进行收集岩土和水文地质数据及土壤和地下水样品的时候,直接将锥形取样或测量装置推入地下;到20世纪90年代,随着国外的环境钻探项目日益增多,为快速高效地获得高质量原状土样品,美国 Geoprobe 公司率先在钻机中应用了直推技术,在首次应用中钻进速度明显超过普通回转钻机,目前该公司生产的 Model7800 型直推式静压取样钻机(见图1),具有直推和声频振动钻进功能且车载方式使其具有在野外能快速往返于不同取样地点的特点<sup>[18-19]</sup>。



图1 Model7800 型钻机  
Fig.1 Model 7800 drill rig

除了 Geoprobe 公司之外,美国的 PowerProbe 公司研发了 VTR 系列直推式静压钻机,其

9520VTR 型钻机具有动力强、燃油效率高、环保且能自动调整支架的特点;西班牙 TEOP. S. A 公司研制的 TEC12 型钻机模块化程度高,同时拥有旋转头和锤击头的设计使其既能进行勘探取样又能进行标准贯入实验,三类静压钻机的技术参数见表1。

表1 国外直推式钻机技术参数

研制公司	钻机型号	回次进尺/m	给进力/kN	起拔力/kN	功率/kW	钻进能力/m
Geoprobe	Model7800	2	160.00	214.00	42	23
PowerProbe	9520VTR	2	163.29	217.72	44	30
TEOP. S. A	TEC12	1	20.00	40.00	11	30

我国在进入21世纪之后,原建设在城市内部的工业园区外迁趋势加快,原有场地转变为商业或居民用地,对这些场地的污染状况调查引发了国产环境钻机的研制热潮。此时,国外的直接推进钻探技术进入中国,经过十几年发展,南京贻润环境科技有限公司自主研制出了智能化程度较高的土壤地下水环境取样修复一体机,其中 Eprobe2000 型钻机(见图2)不仅可以远程无线遥控,还因行走装置设计成三角形提高了场地通过性。



图2 Eprobe2000 型钻机  
Fig.2 Eprobe2000 drill rig

此外,江苏盖亚环境科技股份有限公司、浙江清阳环境工程有限公司分别研制了 GY-SR600 型和 QY-100L 型具有无原位扰动能力的环境取样修复一体机<sup>[20]</sup>,其技术参数见表2。

表2 国内直推式钻机参数

研制公司	钻机型号	回次进尺/m	给进力/kN	起拔力/kN	功率/kW	钻进能力/m
南京贻润	Eprobe2000	2.000	129.8	186	75	30
江苏盖亚	GY-SR600	2.000	164.0	246	60	50
浙江清阳	QY-100L	2.134	269.0	356	90	60

目前,国内企业所研制的直推式钻机具有取样

功能的同时兼具修复功能,在智能化和模块化方面同国外钻机差别不大,但是在钻机种类的丰富程度和适应性方面同国外钻机具有较大差距,需要在挖掘新的工作原理的同时在钻机的行走方式等方面拓展钻机的多样性。

## 2 声频振动取样钻机

### 2.1 声频振动取样钻机的工作原理

声频振动钻机主要包括振动头、液压系统、动力系统、行走底盘和桅杆五大部分。它的工作原理是通过声频振动头上两个对称分布的偏心轴或偏心块相向转动使轴向力叠加,水平力抵消,叠加的轴向力能通过钻杆传递给周围土体,通过调节偏心轴或偏心块的转动频率能使其同钻杆产生共振,产生驻波,驻波的巨大能量也传递给周围土体,从而挤开或液化周围土体实现高速钻进<sup>[21-23]</sup>(参见图 3)。

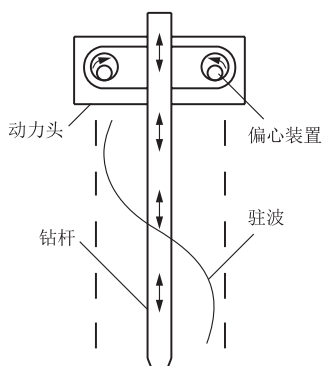


图 3 声频振动钻机原理图

Fig.3 Working principle of sonic vibration drill rig

### 2.2 声频振动取样钻机的发展

声频振动钻机又称声波钻机,因其振动频率在 50~200 Hz 的人耳能感受到的频率区间而得名。声频钻进理论最早是由罗马尼亚工程师 George Constantinesco 提出,1930 年,另一位罗马尼亚工程师 Ion Basgan 介绍了将高频振动应用在传统钻进技术的理论,加快了声频钻进技术的发展;20 世纪 60 年代,美苏两国相继研发了适用于孔底或只依靠振动不具备回转功能的振动器,虽然钻进速度快,但巨大的振动能量总能造成结构损坏,因此,实验以失败告终;70 年代之后,美国的 Ray Roussy 和他的助手设计了一种低频振动钻机并在油田、砂土地层和冰冻层实验成功,后来陆续有其他国家和公司对声频钻机进行研究,使得声频钻机迅速发展;90 年代之后,声频振动钻机已经得到了充分的发展。由

于声频振动钻机在钻进过程中不需要水或其他钻井液,对周围环境不会产生污染,各个国家相继将声频振动钻机应用在环境钻探中。目前英国 Ecoprobe、荷兰 Eijkelkamp、美国 BoartLongyear、加拿大 Sonic Drill 和日本 ToneBoring 等公司都有自己的声频振动钻机<sup>[24-27]</sup>,技术参数见表 3。

表 3 国外声频振动钻机参数

Table 3 Technical parameters of foreign sonic vibration drill rig

研制公司	钻机型号	回次进 尺/m	给进 力/kN	起拔 力/kN	功率/ kW	钻进能 力/m
Ecoprobe	EP-26N	1.4	20	93.2	20	30
Eijkelkamp	SRS-PL	1.5	35	25.0	49	100
BoartLongyear	LS250	3.0	24	66.0	119	80
Sonic Drill	Probe200	1.5	5	5.0	42	200
ToneBoring	JP-50	1.0	20	93.2	37	60

中国在 21 世纪初引入声频振动钻机之后在吸收国外先进经验的同时,对钻进机理等进行了深入的研究,采用虚拟样机技术设计并模拟钻进过程。现在中国地质大学(北京)、中国煤炭地质总局第二勘探局、北京探矿工程研究所及无锡金帆钻凿设备股份有限公司相继研发出了自己的声频振动钻机<sup>[28-31]</sup>,技术参数见表 4。

表 4 国内声频振动钻机参数

Table 4 Technical parameters of domestic sonic vibration drill rig

研制公司	钻机型号	回次 进尺/ m	给进 力/ kN	起拔 力/ kN	功 率/ kW	钻进 能力/ m
地大(北京)	SDR-100	1.2	25	35	57	100
中国煤炭二局	MGD-S50 II	3.1	58	128	110	50
探矿工程研究所	TGSD-50	1.8	40	60	50	50
金帆钻凿设备	YGL-S100	3.5	40	60	170	100
中煤二局和地大 (北京)联合	YSZ-50	3.5	31	62	131	50

声频振动钻机进入我国较晚,虽然国内研制该类型钻机的厂家已经较多,但是产品性能以及减振措施等关键技术同国外钻机差距较大,在加大研发力度的同时同国外企业开展技术交流显得很有必要。

## 3 回转取样钻机

### 3.1 回转取样钻机的工作原理

环境取样过程中所用到的回转钻机具有轻便、易操作的特点,通常有两种类型(见图 4):(1)自行走式钻机,即可通过控制钻机自身安装的系统使钻

机移动,该类钻机通常由柴油机/汽油机、桅杆、卷扬机和动力头组成;(2)背包式钻机,主要由主机、钻具和钻杆组成。两种回转钻机的工作原理是钻杆和动力头或主机相连,动力头或主机带动钻杆回转并加压,冲洗液通过钻杆内部流入孔底,冷却钻头,并携带岩屑从钻杆外壁和钻孔间隙之间返回到地面<sup>[32-34]</sup>。



图4 回转钻机  
Fig.4 Rotary drill rig

### 3.2 回转取样钻机的发展

(1)自行走式钻机。西方国家在20世纪70年代为方便在偏远地区钻探施工,开始研制轻便化的钻探设备,到90年代,美国 Mobile drilling 公司研制的 Minuteman 钻机、Acker Drill 公司研制的 KODIAK 及加拿大 EGR 公司的 EP600 型钻机均具有整体结构简单紧凑,能够在空间狭小的地方进行取心作业并快速移动的特点,且机械化接卸钻杆的方式,大大缩短了钻进过程的辅助时间<sup>[35-37]</sup>,三类钻机的技术参数见表5。

表5 国外自行走式钻机技术参数

Table 5 Technical parameters of foreign self-propelled drill rig

研制公司	钻机名称	回次进尺/m	功率/kW	钻进能力/m
Mobile drilling	Minuteman	1.10	6.0	15
Acker Drill	KODIAK	1.75	16.5	3
EGR	EP600	1.83	3×23.5	600

中国在20世纪70年代生产的“争光”系列钻机开创了我国轻便钻机的先河,80年代无锡探矿机械总厂研制的G系列轻型钻机在当时广受欢迎,随后在90年代进行的国土资源大调查中多家企业和科研院所自主研发了多种轻便钻机,这些钻机技术参数上虽有差异(见表6),但结构上相似度却很高。

表6 国内自行走式钻机技术参数

Table 6 Technical parameters of domestic self-propelled drill rig

研制单位	钻机型号	回次进尺/m	功率/kW	钻进能力/m
中国地质大学(北京)	NLSD-60	2.00	6.6	60
探矿工程研究所	TGQ-50	1.20	13.5	50
地科院勘探所	QK-50	2.30	15.7	100
吉林大学	JSWS-II	1.20	9.5	30
中地装(北京)科研院	XD-800	1.85	99.0	800

(2)背包式钻机。背包式钻机最早是由美国绍尔公司为进行矿物考察、油田勘测等地质研究者打造的一种轻型钻机,包括动力机、回转器和手持压力桶等部件,现也经常用于环境取样钻进中。由于背包式钻机具有质量轻、可由单人携带和使用方便等特点,深受钻探工作者的喜爱,因此自问世以来迅速发展。目前,国外常见的背包式钻机为澳大利亚科力公司研发的SD-1型单人手持式土壤取样钻机和德国高兹研制的WD-H型手持岩心取样钻机<sup>[38-40]</sup>,技术参数见表7。

表7 国外背包式钻机技术参数

Fig.7 Technical parameters of foreign knapsack type drill rig

研制公司	钻机型号	回次进尺/m	功率/kW	钻进能力/m
美国绍尔	Shaw	2.0	6.6	60
澳大利亚科力	SD-A	2.3	15.7	100
德国高兹	WD-H	1.2	9.5	30

鉴于进口的背包式钻机价格昂贵,且不能满足我国复杂地层的取样需求,因此,研制适合我国地质工作者们使用的背包式钻机显得十分必要。经过近几年的发展,北京探矿工程研究所、济宁恒旺集团、山东巨匠机械集团有限公司、唐山凯地勘探设备制造有限公司和新泰宏丰地质钻探工程有限公司相继研发了自己的背包式钻机<sup>[41-43]</sup>,技术参数见表8。

表8 国内背包式钻机技术参数

Fig.8 Technical parameters of domestic knapsack type drill rig

研制单位	钻机型号	回次进尺/m	功率/kW	钻进能力/m
探矿工程研究所	TGQ	0.85	1.2	5
济宁恒旺集团	HW-B30	0.70	4.8	30
山东巨匠机械	BXZ-1	0.70	2.4	20
唐山凯地勘探	KD-2	1.20	9.5	30
新泰宏丰地质钻探	HF-30B	1.83	3×23.5	600

通过对环境取样过程中常用钻机的综述,可以得出,国外钻机无论是在智能化、模块化还是结构及外观方面都拥有成熟的技术,但是,国外钻机价格昂

贵,国内钻机需在技术上赶超国外钻机的同时,可充分发挥价格和售后服务的优势来开辟市场。

## 4 环境取样钻机关键技术和发展趋势

### 4.1 关键技术

环境取样主要是通过通过对原状样品进行分析测试得出该地区的环境污染状况,通常施工环境复杂多样,且采样点数目繁多。环境取样钻机是集智能化、模块化、轻便化于一体的技术集成,其关键技术主要包括以下几个方面:

(1)移动能力:由于取样环境或取样数目的不确定性,对环境取样钻机的移动能力有较高的要求,在野外地形复杂或取样数目较多的时候,为节省时间提高效率,要求钻机能快速移动到不同取样点,这种情况下就需要具有较大结构和质量的直推式取样钻机同时具有稳定性较好的履带和能快速移动的轮式移动机构,或者易于轮式越野车辆搬运。

(2)钻进能力:钻机的最终用途是用来钻取样品,复杂的野外环境使便于携带的轻便钻机广受欢迎,但轻便性造成动力装置小型化,随着钻进深度的增加或遇到坚硬地层的时候,阻力越来越大,没有充足的动力将会出现钻进乏力、效率低下等问题,在保证二者兼备的情况下,提高钻进能力将具有重要意义。

(3)样品保真能力:样品的保真主要指对样品的结构和成分的保真,由于样品本身包含较多的夹杂物,为了解样品中所包含的内容,在钻进过程中,需要避免样品受到冲洗液的二次污染,或者钻具对样品产生扰动,因此,结合化学、材料和力学等学科对所研究样品不会产生污染的冲洗液和钻具需要被研发。

### 4.2 发展趋势

综述国内外的环境钻机可以得出,环境钻机通常具有小型轻便、无泥浆、多功能的特点,但也有需要进一步完善的地方,例如大部分钻机还是采用内燃机驱动,而在采样分析过程中还需要花费大量时间在实验室进行,另外,虽然多功能环境钻机具有能够进行浅层地表取样以用于分析污染情况、地质勘察、浅层矿产资源勘探及浅井槽探工程等能力,但是适用场地还是比较单一,因此,随着社会的进一步发展,环境钻机将有以下几个方面的发展趋势:

(1)动力等采用清洁能源:目前,风能、太阳能等

清洁能源技术已经非常成熟,钻探工作在野外作业时采用内燃机驱动钻机时,需要另外携带燃油增加了工作负担,而自带太阳能芯片或扇叶的钻机能在一定程度上缓解或满足自身的需求,并减少对环境的污染。

(2)自动分析样品:微型计算机技术在现在社会中已经得到了普遍应用,结合材料工程和编程技术,通过研发新型感应钻杆钻具,在钻进过程中将地层或其他信息实时显示在钻机上的微型计算机上面,能迅速了解地层土壤的污染情况。

(3)适应多种场合:由于现在的钻机适用场合很单一,而环境钻探的场合包括陆地、水面等,因此结合造船、两栖技术在现在钻机基础上增加漂浮装置等,研制用于水体或淤泥取样的钻具,使原来的陆用钻机能在湖泊沼泽滩涂等地使用,拓展钻机的应用范围,从而节约成本。

## 5 结语

随着人们对生存环境的质量要求越来越高,环境钻机成为检测环境污染程度的重要装备,其在未来的时间必将获得较大的发展。我国环境钻机在发展的过程中,虽然在智能化、模块化、结构及外观上同国外差距较大,但是我们在追赶国外技术的同时,还可从绿色环保、智能分析及适应多种取样场地等方面入手来弥补这些差距。

## 参考文献(References):

- [1] 彭本利.习近平共同体理念下的环境治理和全球气候治理[J].广西社会科学,2018(1):1-5.  
PENG Benli. Environmental governance and global climate governance under the XI Jinping Community Concept[J]. Social Sciences in Guangxi, 2018(1):1-5.
- [2] 何远信,夏柏如,赵尔信.环境科学钻探取样技术研究[J].现代地质,2005,19(3):471-474.  
HE Yuanxin, XIA Bairu, ZHAO Erxin. Research on the sampling technology of environmental and scientific drilling[J]. Geoscience, 2005,19(3):471-474.
- [3] Sousa J C G, Ribeiro A R, Barbosa M O, et al. A review on environmental monitoring of water organic pollutants identified by EU guidelines[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 344:1-13.
- [4] 朱乐章.利用水化学特征识别朱庄煤矿突水水源[J].中国煤炭,2018,44(5):100-104,119.  
ZHU Yuezhong. Identification of water inrush source of Zhuzhuang Coal Mine based on hydrochemical characteristics [J]. China Coal, 2018,44(5):100-104,119.

- [5] 张琪.具有滤网的水质取样器:104165783A[P].2014-11-26. ZHANG Qi. Water quality sampler with filter: 104165783A [P]. 2014-11-26.
- [6] 田海燕.一种便携式空气取样系统的研制[D].成都:电子科技大学,2015. TIAN Haiyan. The development of a portable air sampling system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- [7] Bayat B, Crasta N, Crespi A, et al. Environmental monitoring using autonomous vehicles: a survey of recent searching techniques[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2017,45:76.
- [8] 窦义同,王凯,张志鹏.放射性场所区域空气取样监测系统的改进[J].核电子学与探测技术,2015,35(11):1116-1118,1145. DOU Yitong, WANG Kai, ZHANG Zhipeng. The improvements of area air sampling monitored system in radioactive workplace[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2015,35(11):1116-1118,1145.
- [9] Francová A, Chrástný V, Šillerová H, et al. Evaluating the suitability of different environmental samples for tracing atmospheric pollution in industrial areas[J]. *Environmental Pollution*, 2016, in press (Pt A):286-297.
- [10] 吕昕培,张吉平,李永生,等.内蒙古科尔沁草原不同植物生境土壤盐分特征研究[J].草地学报,2017,25(4):749-755. LÜ Xinpei, ZHANG Jiping, LI Yongsheng, et al. Soil saline characteristics of different plants inhabitant on Horqin grassland[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2017,25(4):749-755.
- [11] 贾亚琪,程志飞,刘品祯,等.煤矿区周边农田土壤重金属积累特征及生态风险评价[J].土壤通报,2016,47(2):474-479. JIA Yaqi, CHENG Zhifei, LIU Pinzhen, et al. Accumulation characteristics of heavy metals in agricultural soil around the mining area and ecological risk assessment[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016,47(2):474-479.
- [12] 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-S50 II type sonic frequency resonance drill[J]. *Coal Geology of China*, 2017,29(12):75-77,95.
- [13] 刘坤,杨凤申,贺子延.轻型声频钻机设计探讨[J].物探装备,2018,28(2):137-140. LIU Kun, YANG Fengshen, HE Ziyang. Design analysis of light sonic vibration drilling rig[J]. *Equipment for Geophysical Prospecting*, 2018,28(2):137-140.
- [14] Wang Y, Zhou Q, Liu B, et al. Design and model analysis of the sonic vibration head[J]. *Journal of Vibroengineering*, 2015,17(5):2121-2131.
- [15] Wang Y, Liu B, Zhou Q, et al. Design of a sonic drill based on virtual prototype technology[J]. *Transactions-Canadian Society for Mechanical Engineering*, 2013,37(2):185-196.
- [16] 孔祥科,马骏,韩占涛,等.直接推进技术在有机污染场地调查中的应用研究[J].水文地质工程地质,2014,41(3):115-119. KONG Xiangke, MA Jun, HAN Zhantao, et al. Application of direct push technology to organic contaminated site investigation[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2014,41(3):115-119.
- [17] 朱文鉴,王鹏,张培丰,等.带有液压振动冲击器的直推式取样钻机:201326415Y[P].2009-10-14. ZHU Wenjian, WANG Peng, ZHANG Peifeng, et al. Direct-push sampling drill with hydraulic vibrating impactor: 201326415Y[P]. 2009-10-14.
- [18] Dalzell T D. Environmental and direct push drilling technologies[J]. *Pollution Engineering*, 2012,18:18-20.
- [19] 赵龙,韩占涛,孔祥科,等.直接推进钻探技术在污染场地调查中的应用进展[J].南水北调与水利科技,2014(2):107-110. ZHAO Long, HAN Zhantao, KONG Xiangke, et al. Application of direct push technology in the investigation of contaminated site[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2014(2):107-110.
- [20] 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 sample and remediation of soil and groundwater[J]. *Environmental Engineering*, 2017(S1):200-205.
- [21] Barrow J C. The Resonant Sonic Drilling Method: An Innovative Technology for Environmental Restoration Programs[J]. *Ground Water Monitoring & Remediation*, 2010,14(2):153-160.
- [22] Barrow J. Sonic drilling method and apparatus: US5549170 [P]. 1996-08-27.
- [23] Šporin, Jurij, Vukelić Ž. Structural drilling using the high-frequency (sonic) rotary method[J]. *Materials & Geoenvironment*, 2017,64(1):1-10.
- [24] 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. Sonic drilling rig abroad and its application[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2008,35(7):105-107.
- [25] 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):2386-2390. WANG Yu, LIU Baolin, ZHOU Qin, et al. Development and research of sonic drilling rig driven by dual-eccentric shaft[J]. *China Mechanical Engineering*, 2013,24(17):2386-2390.
- [26] 陈跃.WT50型超高频振动物探钻机设计[D].大庆:东北石油大学,2014. CHEN Yue. The design of the WT50 UHF geophysical rig [D]. Daqing Heilongjiang: Northeast Petroleum University, 2014.
- [27] 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. The development of sonic drilling technology and its applications[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2004,31(3):39-41.
- [28] 熊玉成.声频振动钻进的机理研究[D].北京:中国地质大学(北京),2007. XIONG Yucheng. The research on the mechanism of the sonic drilling technology[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2007.
- [29] 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.
- [30] 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.
- WU Hao, ZHAO Xiaodong. Field application and technical improvement of YSZ-50 sonic vibration drill[J]. *Equipment for Geotechnical Engineering*, 2016,17(1):20-22.
- [31] 赵晓冬,吴浩,陆卫星,等.YSZ-50 型声频振动钻机动力头减振方案的改进[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2012,39(12):1-3.
- ZHAO Xiaodong, WU Hao, LU Weixing, et al. Improvement of vibration-absorbing scheme for dynamic head of YSZ-50 audio frequency vibration drilling rig[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2012,39(12):1-3.
- [32] 冉灵杰,宋殿兰,刘家荣.30m 无循环取样钻机的研制[J].*地质科技情报*,2016(5):221-225.
- RAN Lingjie, SONG Dianlan, LIU Jiarong. Development of 30 meters no-circulating sampling drilling rig[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2016(5):221-225.
- [33] 吴浩.新型轻便浅孔取样钻机的研制[D].北京:中国地质大学(北京),2009.
- WU Hao. The research of a new portable shallow hole sampling drill rig[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2009.
- [34] 张乐冲.复杂地层轻便取样设备的研制[D].北京:中国地质大学(北京),2018.
- ZHANG Lechong. Development of portable sampling equipment for complex strata[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [35] 宁国军,王书辰,申大元.便携式浅层取样钻在矿产勘查中的应用[J].*采矿技术*,2015(4):106-108.
- NING Guojun, WANG Shuchen, SHEN Dayuan. Application of portable shallow sampling drills in mineral exploration[J]. *Mining Technology*, 2015(4):106-108.
- [36] 王毅,赵斌.轻便钻机在黄土塬地区的应用现状及前景[J].*机电工程技术*,2017,46(3):43-45.
- WANG Yi, ZHAO Bin. Present situation and prospects of portable drilling rig in Loess Tableland Area[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2017,46(3):43-45.
- [37] 王胜利,王明亮.便携式地质勘探取样钻机:103726841A[P]. 2014-04-16.
- WANG Shengli, WANG Mingliang. Portable sampling rig for geological exploration: 103726841A[P]. 2014-04-16.
- [38] 刘广治,卢猛.一种浅层轻便土壤取样钻机的研制[J].*地质装备*,2018,19(1):30-32.
- LIU Guangzhi, LU Meng. Development of shallow soil sampling rig[J]. *Equipment for Geotechnical Engineering*, 2018,19(1):30-32.
- [39] 杨涛.电动冲击式取样钻机的研制[D].北京:中国地质大学(北京),2018.
- YANG Tao. Development of electric impact sampling drill rig [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [40] <https://baike.baidu.com/item/美国绍尔单人背包式岩芯钻机/3787350?fr=aladdin>[DB/OL].
- <https://baike.baidu.com/item/American Shaw single backpack core drill /3787350?fr=aladdin>[DB/OL].
- [41] 冉灵杰,宋殿兰,卢猛.TGQ 背包式取样钻机的研制[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2016,43(6):49-51.
- RAN Lingjie, SONG Dianlan, LU Meng. Development of TGQ knapsack sampling drill [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2016,43(6):49-51.
- [42] 李锡.背包式钻机的工程应用与存在的若干问题[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2016,43(5):56-58.
- LI Xi. Engineering application of knapsack type drilling machine and its problems[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2016,43(5):56-58.
- [43] 俞超,徐彬彬,贾绍宽,等.30HB 多功能环境勘察钻机[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2016,43(10):135-138.
- YU Chao, XU Binbin, JIA Shaokuan, et al. 30HB multi-functional environmental investigation drilling rig[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2016,43(10):135-138.

(编辑 王建华)