

锂电池电动冲击取样钻机及其配套工具的研制

岳永东, 谭春亮*, 卢倩, 郭强, 林广利

(北京探矿工程研究所, 北京 100083)

摘要:冲击钻进取样是支撑生态地质调查中松散地层优质高效、原状无污染取样的有效手段,但目前常见的便携式冲击取样钻机采用汽油机驱动,不能较好地适应安全生产与绿色勘查的发展要求。鉴于此,本文研制了一种以锂电池作为动力源的便携式电动冲击取样钻机及配套工具,详细介绍了钻机的电动冲击器、控制器、锂电池动力源及配套的取样器、锂电池液压起拔器的设计选型过程,并开展了钻机取样试验。实践证明该钻机及配套工具轻便可靠,可以实现5 m以浅松散地层的安全、高效、零碳排取样,是践行绿色勘查理念、推动浅层钻探装备电动化升级的有益尝试。

关键词:锂电池;冲击取样;便携式钻机;绿色勘查;生态地质调查

中图分类号:P634.3 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2022)03-0044-07

Development of the lithium battery-driven impact sampling drill and complete accessories

YUE Yongdong, TAN Chunliang*, LU Qian, GUO Qiang, LIN Guangli

(Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China)

Abstract: Impact sampling is an effective means to get high-quality, efficient, undisturbed and pollution-free sample from unconsolidated formation in eco-geological survey. However, the common portable impact sampling drill is driven by gasoline engine, which cannot somehow meet the development requirements of safe production and green exploration. Therefore, a portable electric impact sampling drill driven by lithium battery and its complete accessories were developed. The design and selection process of the electric hammer, the controller, the lithium battery power source of the drill is introduced in detail together with the matching sampler and the hydraulic puller driven by the same lithium battery. The sampling test of the drill has been carried out. Field results proved that the portable electric impact sampling rig and its complete accessories are portable and reliable, and can get high quality samples from unconsolidated formation within 5m safely and efficiently without carbon emissions, demonstrating a beneficial attempt to implement green exploration and promote the electric upgrading of shallow drilling equipment.

Key words: lithium battery; impact sampling; portable drill; green exploration; eco-geological survey

0 引言

生态地质调查是做好生态系统整体保护、系统修复与综合整治的必要条件,与传统地质调查相

比,生态地质调查更重视对浅表层土壤等松散地层的研究,其中浅层钻探取样技术是支撑生态地质调查不可替代的重要手段之一。生态地质调查钻探

收稿日期:2022-02-28; 修回日期:2022-04-20 DOI:10.12143/j.ztgc.2022.03.006

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“地质矿产勘查钻探技术升级与应用示范”(编号:DD20211345)

第一作者:岳永东,男,汉族,1990年生,工程师,硕士,从事浅层钻探技术及装备的研发与应用工作,北京市海淀区学院路29号探工楼,442710173@qq.com。

通信作者:谭春亮,男,汉族,1979年生,教授级高级工程师,硕士,从事浅层钻探技术及装备的研发与应用工作,北京市海淀区学院路29号探工楼,bjtan1979@163.com。

引用格式: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.

YUE Yongdong, TAN Chunliang, LU Qian, et al. Development of the lithium battery-driven impact sampling drill and complete accessories[J]. Drilling Engineering, 2022,49(3):44-50.

取样对钻进效率、取心率及样品的原状性等有较高要求,国内外研究实践表明,冲击钻进取样是实现松散地层优质高效、原状无污染取样的有效手段,能够客观真实地反映地层物质组成以及不同地层的接触关系,钻进过程无回转,对岩心扰动小,便于判断地层产状;不使用泥浆,样品不受污染,可满足后续科学研究与生态修复的需求,绿色环保^[1-4]。

便携式冲击取样设备体积小、质量轻、效率高、搬运方便,适用于山地、林区等难进入地区,在土壤调查、泥炭调查等领域应用广泛。目前的便携式冲击取样设备以人工锤击和汽油机驱动冲击为主^[5-8],汽油机驱动冲击钻进能力比人工锤击更强,但随着生态文明建设向纵深发展,以汽油机为动力源的冲击取样钻机不能较好地适应安全生产要求和绿色勘查发展要求,在应用中存在诸多限制和弊端,主要表现在:

- (1)山区、林草区防火期内禁用燃油动力设备。
- (2)高海拔地区汽油机存在功率衰减。
- (3)零散汽油采购管制日益严格。
- (4)汽油机工作中的尾气排放、噪声污染等对环境和操作人员身体健康产生不良影响^[9]。

随着锂电池能量密度及安全性不断提高,以锂电池作为轻便型钻机的动力源成为可能。为解决汽油机驱动冲击取样钻机在应用中面临的问题,本文以锂电池作为动力源,研发了便携式锂电池电动冲击取样钻机及配套工具,助力生态地质调查浅层钻探取样实现“绿色”升级。

1 钻机总体设计

便携式电动冲击取样钻机通过无水冲击钻进实现浅表松散地层取样,围绕生态地质调查中对浅层钻探取样深度和样品质量的要求,以轻便、高效、安全为设计原则,并借鉴现有便携式冲击取样钻机的技术参数,确定钻机钻进取样最大深度为5 m、孔径 ≤ 40 mm、样品直径 ≤ 25 mm。

电动冲击取样钻机及配套工具的组成根据功能可划分为锂电池动力源、电动冲击器、取样器及起拔器等4部分(图1)。为保证便携性,钻机采用模块化分体设计的思路,各模块单体质量轻,结构紧凑,操作简单。

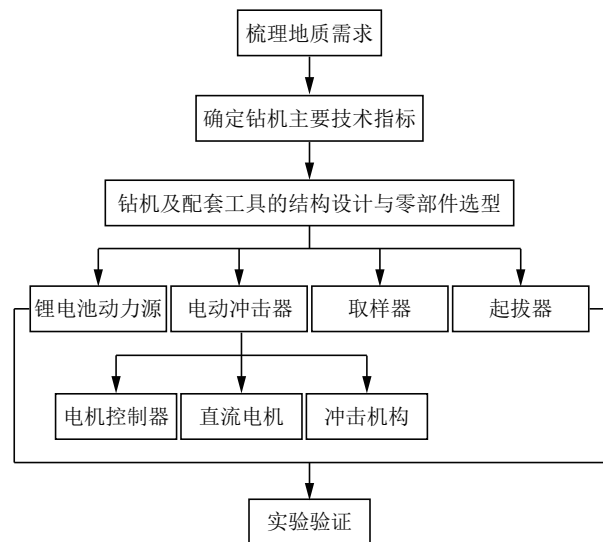


图1 电动冲击取样钻机研制技术路线图

Fig.1 Technical roadmap for development of the electric impact sampling drill

2 取样器设计及贯入阻力分析

2.1 取样器设计

便携式冲击取样钻机一般配套小口径的单管取样器使用,由受击杆、扶正套、钻杆接头、钻杆、取样管接头、取样管、管靴组成。管靴材质选用40Cr,刃口淬火处理,取样管材质为DZ40,采用半合管形式,由管靴和取样管接头通过丝扣连接,方便采集样品,取样管接头的中心设有贯通接头的中间通道和排气孔(图2)。钻杆材质为55SiMoMn,属于贝氏体钎具钢,钻杆外径25 mm,钻杆带中心通气孔,为减小冲击能的损失、提高钻杆强度,钻杆螺纹采用国标波形螺纹。

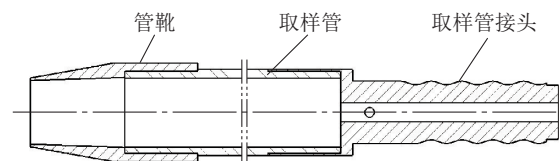


图2 冲击单管取样器结构示意图

Fig.2 Structure of the impact single tube sampler

取样器的刃口尖端宽度、刃口角度、取样面积比、内间距比、外间距比、管靴高度等结构参数对取样深度及取样质量有较大影响^[10],通过对比最终确定的取样器结构参数如表1所示。

2.2 取样器贯入阻力计算

冲击钻进取样过程中,由冲击器产生的冲击能

表1 冲击单管取样器主要参数

Table 1 Main specifications of the impact single tube sampler

项 目	参 数
管靴外径	40 mm
管靴内径	26 mm
管靴高度	69 mm
刃口宽度	1 mm
刃口角度	15°
取样管外径	35 mm
取样管内径	28 mm
取样长度	500 mm
钻杆外径	25 mm

量以应力波的形式在钻杆和取样器中传播,取样器所受阻力主要是取样器底端的环端阻力、土塞与取样器内壁间产生的内摩擦力和取样器外壁由于挤土效应与四周接触产生的外摩擦力(图3)。当取样器顶部的冲击力、自重或配重克服了侧摩阻力和端阻力后,将土体冲切破坏,取样器与周围土体之间产生剪切滑移,取样器下沉取样。

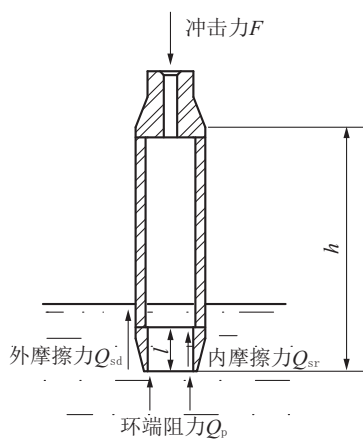


图3 冲击取样器受力分析示意

Fig.3 Force analysis of the impact sampler

取样器的贯入阻力与地层土体性质、取样器结构等参数有关,可参考建筑桩基技术规范及相关经验公式进行估算^[11-12]:

$$Q = Q_p + Q_{sd} + Q_{sr} \quad (1)$$

$$Q_p = q_p A_p \quad (2)$$

$$Q_{sd} = u_{sd} q_s h \quad (3)$$

$$Q_{sr} = u_{sr} q_s l \quad (4)$$

式中: Q ——贯入阻力, N; Q_p ——环端阻力, N; Q_{sd}

——外摩擦力, N; Q_{sr} ——内摩擦力, N; q_p ——极限端阻力标准值, Pa; A_p ——取样器环端面积, m^2 ; u_{sd} ——取样器外周长, m; q_s ——极限侧阻力标准值, Pa; h ——取样器外壁与地层接触长度, m; u_{sr} ——取样器内周长, m; l ——取样器管靴取样部分长度, m。

建筑桩基技术规范中给出了不同地层 q_p 、 q_s 的大量建议值,作为参考极限端阻力标准值 q_p 取 900 kPa、极限侧阻力标准值 q_s 取 50 kPa,代入式(1)~(4)中,取样器完全贯入地层后,考虑钻孔缩径的影响,对于冲击单管取样器, h 取 539 mm, l 取 39 mm,可得冲击单管取样器的贯入阻力约为 4200 N。

3 电动冲击器设计

3.1 电动冲击器工作原理

冲击钻进取样所需的电动冲击器工作原理与凿岩的电锤等设备类似,电动冲击器主要由电机、传动机构和冲击部件组成(图4)。工作时,电机输出轴的回转运动通过斜齿轮变速机构传递给曲柄连杆机构,曲柄连杆机构带动连接在连杆上的活塞做直线往复运动,由于活塞与顶部冲击锤之间为密封空间,顶部冲击锤在空气压强作用下也随着活塞的运动做直线往复运动,不断地冲击底部冲击锤,进而将能量传递到取样器上。

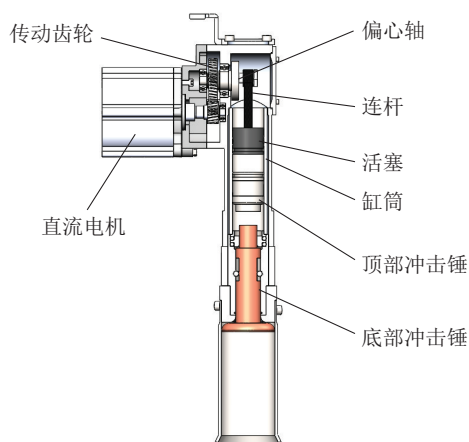


图4 电动冲击器结构示意图

Fig.4 Structure of the electric hammer

冲击过程中顶部冲击锤的下端和底部冲击锤的上端都将产生压应力,应力将以顺波和逆波的形式分别向两侧传播,并且在截面突变处发生反射和透射,最终在管靴末端产生作用力作用于工作介质,达

到钻进取样的目的。应力波能量在取样钻具和钻杆中的传递效率影响因素众多,其中钻杆的连接是应力波能量传递效率的主要影响因素之一。参考凿岩钎杆接头对能量传递效率影响的相关研究,不同类型接头的能量传递效率一般在80%~90%之间^[13-14]。单管冲击取样钻杆接头类型为套筒形式,钻杆接头能量传递效率相对较低,此处取85%,则由估算的冲击取样器贯入阻力可得,冲击单管取样器至5 m取样深度时所需的冲击力 ≤ 9465 N。

3.2 电动冲击器主要零部件设计选型

冲击功是衡量冲击器性能的主要指标,偏心轴偏心距、偏心轴转速、顶部冲击锤质量、气缸直径等参数对冲击能有直接的影响。假定冲击锤与活塞作同步运动,则由“对心曲柄滑块机构”运动计算公式,可推得冲击功大小的经验计算公式为^[15]:

$$W = 2mr^2(\pi n/30)^2 \times 10^{-6} \quad (5)$$

式中: W ——冲击功,J; m ——顶部冲击锤质量,kg; r ——偏心轴偏心距,mm; n ——偏心轴转速,r/min。

依据动能守恒定律有:

$$W = \frac{1}{2}mv_m^2 \quad (6)$$

式中: v_m ——冲击锤冲击速度,m/s。

顶部冲击锤所获得的动能通过冲击转变为取样器所受的冲击力,依据动量定理有:

$$mv_r - mv_m = \int_0^t F_m dt \quad (7)$$

式中: v_r ——冲击锤末速度,m/s; t ——碰撞作用的时间,s; F_m ——冲击锤受到的作用力,N。

取样器受力过程与冲击锤在瞬间可以假定是大小相同的:

$$F = -F_m \quad (8)$$

式中: F ——取样器所受冲击力,N。

冲击碰撞过程瞬间的动力学情况很难准确测量,为简化分析,假设冲击力为一均值,在一次冲击过程中,冲击锤的冲击速度由最大变为0时可得最大的冲击力为:

$$F = mv_m/t = \sqrt{2Wm}/t \quad (9)$$

冲击作用接触时间参考电锤冲击系统模拟仿真及试验测试结果相关研究^[16],此处 t 取0.5 ms进行计算。

电机选用永磁同步直流无刷电机,具有高效节能、质量轻、体积小、噪声低、过载能力强、寿命长等

优点。电机输出轴与偏心轴之间通过一级斜齿轮传动,齿轮材料选用20CrMnTi,渗碳淬火处理。冲击器壳体采用铝合金材料,为减少模具开发、材料试验等前期基础性研究投入,提高各结构参数的匹配程度以保证冲击性能的最优化,偏心轴、连杆、活塞、缸筒等部件选用现有成熟配件,最终确定的电动冲击器主要技术参数如表2所示。

表2 电动冲击器主要参数

Table 2 Main specifications of the electric hammer

项 目	参 数
电机类型	直流无刷电机
功率	1000 W
电压	60 V
电机转速	3000 r/min
冲击频率	1700次/min
偏心距	25 mm
冲击锤质量	600 g
缸筒直径	44.5 mm
机身自重	16 kg

将相关参数代入式(5)、(9),可得电动冲击器提供的冲击功约为24 J、冲击力约为10680 N,满足冲击单管取样器至5 m取样深度时所需的冲击力需求。

4 控制器及锂电池动力源选型

直流无刷电机通过控制器控制电机的启停,采用PWM控制技术实现直流电机的无级调速,从而调节冲击器的冲击频率以适应不同地层的取样需求。锂电池组选型在满足质量大小要求的前提下尽可能选择大容量电池,以提升钻机野外有效工作时长。锂电池组与控制器外形设计为可组合式模块化结构,共同组成钻机的动力与控制单元(图5)。锂电池组参数如表3所示,电池标称容量1728 Wh,理论上可支持1000 W直流电机连续工作超过1.5 h。考虑到实际取样过程中辅助作业时间占比较高,电机工况为间断性短时工作,锂电池续航基本可满足实际应用的需求

5 起拔器设计

浅层冲击取样过程中,钻孔缩径现象普遍,起拔过程中较大的侧摩擦阻力导致冲击钻进取样面临



图5 钻机动力与控制单元

Fig.5 Power and control units of the portable electric impact sampling drill

表3 锂电池组主要参数

Table 3 Main parameters of the lithium battery

项 目	参 数
标称容量	28.8 Ah
额定电压	60 V
尺寸	160 mm×160 mm×250 mm
质量	11 kg
最大充电电流	8 A
最大放电电流	工作电流≤50 A, 瞬间最大工作电流 75 A

“钻进易、起拔难”的困境。除了要优化钻具结构降低摩擦阻力外,一套轻便、高效、易于操作的起拔装置是冲击取样钻机必不可少的辅助工具。

目前现有的起拔器结构形式多样,但总体可分为两类:人力杠杆式起拔和液压式起拔。人力杠杆式起拔器较为轻便,但起拔力有限,起拔效率低,劳动强度大;液压式起拔器起拔力大,但通常需配套燃油动力泵站使用,不适合配套电动冲击取样钻机使用,若采用市场上常规的直流液压动力单元,又存在功率或工作电流较大,现有锂电池组无法满足要求的问题。针对这一现状,设计了一套采用锂电池作为动力源、配套便携式电动冲击取样钻机使用的滚轮液压起拔器,从而实现整套便携式电动冲击取样钻机及配套工具均可由同一锂电池组驱动。

该起拔器由小型锂电池液压动力单元、起拔液压缸、钻杆夹持装置等组成。起拔器液压系统(图6)设计额定压力为10 MPa,最大起拔力60 kN,起拔油缸行程250 mm,上升速度500 mm/min,下降速度1000 mm/min。

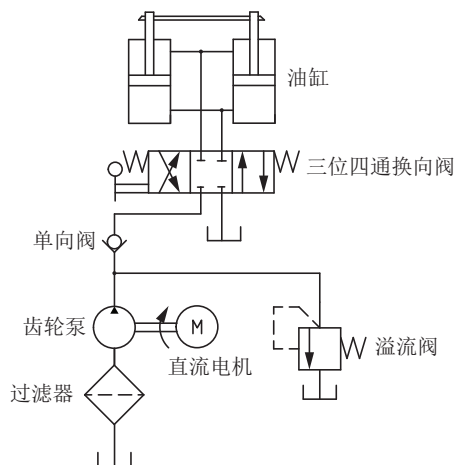


图6 起拔器液压原理

Fig.6 Hydraulic principle of the puller

锂电池液压动力单元主要由直流电机、液压油路阀块组件、齿轮泵、联轴器、吸油过滤组件及油箱等组成(图7)。液压油路阀块组件是其中的关键部件,既集成了换向阀、溢流阀、单向阀等液压控制阀及液压油通道于一体,又起到了安装固定直流电机、齿轮泵及油箱的作用,同时阀块中间还存在通孔以使电机与齿轮泵通过联轴器相连,结构复杂,加工及密封要求较高。阀块组件采用铝合金材料加工,保证结构件强度的同时做到小巧轻便。

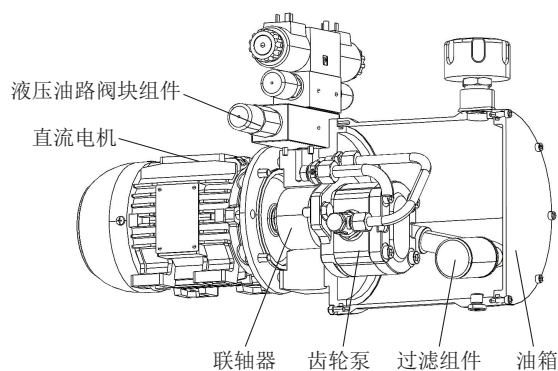


图7 锂电池液压动力单元结构示意图

Fig.7 Structure of the hydraulic power unit driven by lithium battery

依据液压起拔器设定的工作参数,完成了液压油缸、液压泵及其他液压元件的选型。由液压泵工作压力及输出流量可得直流电机所需的功率约为0.8 kW,因此选择与电动冲击器相同型号的直流无刷电机,从而使电动冲击器与起拔器可共用一套锂电池动力源与控制器,减少系统配件数量,减轻整机

质量。锂电池液压起拔器的主要参数如表4所示。

表4 锂电池液压起拔器主要参数

Table 4 Main parameters of the lithium battery hydraulic puller

项 目	参 数
系统压力	10 MPa
起拔能力	60 kN
上升速度	0.5 m/min
下降速度	1 m/min
油缸行程	250 mm
油缸尺寸	63~45 mm
齿轮泵排量	1.2 cc
功率	1000 W

钻杆夹持装置(图8)固定在起拔油缸的活塞杆上端,活塞杆上升时带动夹持装置上移,滚轮在重力作用下沿导向槽向下移动,从而夹紧钻杆,之后钻杆随夹持装置一起上升,完成起拔;活塞杆下降时带动夹持装置下移,此时钻杆由人力固定,滚轮在钻杆摩擦力作用下沿导向槽上移,钻杆由夹紧状态转为松开状态,随着活塞杆降到极限位置,完成一个起拔工作循环^[17]。

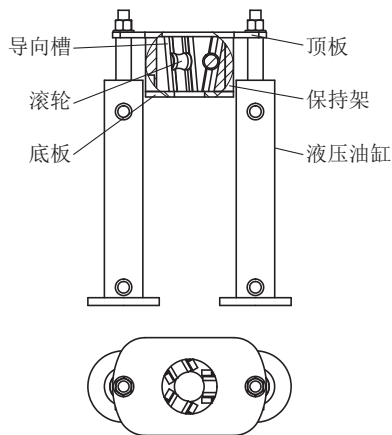


图8 夹持装置结构示意图

Fig.8 Structure of the clamping device

6 钻机试验

2021年10月,在北京市房山区良乡开展了锂电池电动冲击取样钻机取样试验(图9),取样地层为混合回填土、砂质粘土。试验结果为:锂电池电动冲击取样钻机及配套起拔器等均可正常工作,采用40 mm直径单管取样器冲击钻进取样深度达到了5 m,

采集土壤样品质量良好,取心率 $\geq 98\%$,钻进效率 > 1 m/min,起拔器可顺利实现钻杆的高效起拔。



图9 钻机试验现场

Fig.9 Sampling test site of the electric impact sampling drill

7 结语

本文完成了以锂电池作为动力源的便携式电动冲击取样钻机及配套工具的设计,通过试验证明锂电池电动冲击取样钻机及配套工具可以实现5 m以浅松散地层的优质高效、原状无污染取样,整机轻便可靠,可以替代汽油机驱动的冲击取样钻机,实现生态地质调查浅层钻探取样“零碳排”,是融合新能源技术进步、践行绿色勘查理念、推动浅层钻探装备电动化升级的有益尝试。

参考文献(References):

[1] 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.

[2] 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 Tunnel-

- ing), 2019, 46(9): 81-87.
- [3] 盛海星, 高成, 吕佩东, 等. ESD-70型环保取样钻机的研制[J]. 钻探工程, 2021, 48(12): 101-106.
SHENG Haixing, GAO Cheng, LÜ Peidong, et al. Development of ESD-70 environmental protection sampling drill [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(12): 101-106.
- [4] 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, 2019.
- [5] 张志民, 李国民, 朱文鉴. 轻便快速振动冲击取样机具的研制[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2007, 34(10): 41-42, 45.
ZHANG Zhimin, LI Guomin, ZHU Wenjian. Development of the portable fast vibrating and percussive sampling machine and their outfitting tools[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2007, 34(10): 41-42, 45.
- [6] 杨建立. 农业用机动取土器的研制与失效分析[D]. 郑州: 河南农业大学, 2013.
YANG Jianli. Development and failure analysis on motorized soil for agriculture[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2013.
- [7] 肖燕波, 彭儒金, 邱华. CBJ-10型冲击取样钻机的研制与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(9): 39-45.
XIAO Yanbo, PENG Rujin, QIU Hua. Development and application of CBJ-10 percussion sampling drill rig[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(9): 39-45.
- [8] 卢倩, 唐守宝, 卢猛, 等. 轻便无水取样钻机研制与试验[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(7): 69-73.
LU Qian, TANG Shoubao, LU Meng, et al. Development and test of anhydrous drill [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(7): 69-73.
- [9] 谭春亮, 渠洪杰, 彭新明, 等. 基于锂离子电池储能技术的便携式钻机研制与应用[J]. 钻探工程, 2021, 48(S1): 361-365.
TAN Chunliang, QU Hongjie, PENG Xinming, et al. Development and application of portable drilling rig based on lithium-ion battery energy storage technology [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(S1): 361-365.
- [10] 张志民. 轻便快速振动冲击取样机具与钻进工艺的研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2007.
ZHANG Zhimin. The research of portable and quick vibration impact sampling equipment and drilling technology [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2007.
- [11] 李蒙, 张清, 孙艳楠, 等. 田间取土器的取土过程及受力分析研究[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版), 2013, 34(1): 136-139.
LI Meng, ZHANG Qing, SUN Yannan, et al. Process of sampling soil by the geotome in the field and the analysis and research of the force[J]. Jilin Normal University Journal (Natural Science Edition), 2013, 34(1): 136-139.
- [12] 陈新奎, 戴国亮, 龚维明. 开口钢管桩竖向承载力计算方法[J]. 水运工程, 2016(3): 137-144.
CHEN Xinkui, DAI Guoliang, GONG Weiming. Calculation method for vertical bearing capacity of open-ended steel pipe piles [J]. Port & Waterway Engineering, 2016(3): 137-144.
- [13] 王长春. 凿岩系统钎杆接头能量传递特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
WANG Changchun. Study on energy transmission characteristics of drill rod joint in percussive drilling system [D]. Changsha: Central South University, 2008.
- [14] 汪学清, 赵统武. 冲击机具凿入过程的能量传递[J]. 振动与冲击, 2018, 37(9): 202-207.
WANG Xueqing, ZHAO Tongwu. Energy transmission in penetration process of percussive machines[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(9): 202-207.
- [15] 闫世凤, 何予鹏, 李明阳, 等. 机动取土器取土杆结构的设计[J]. 农机化研究, 2019, 41(11): 80-85.
YAN Shifeng, HE Yupeng, LI Mingyang, et al. Design of earthing rod structure of maneuvering earth plough[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(11): 80-85.
- [16] 徐恩科. 电驱冲击气锤的冲击性能建模和优化[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
XU Enke. Modeling and optimization for impact performance of an electrically driven impact pneumatic hammer [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [17] 郭强, 刘广治, 卢猛. 一种滚轮起拔器的研制[J]. 地质装备, 2021, 22(3): 12-13.
GUO Qiang, LIU Guangzhi, LU Meng. The development of a roller pulling-out device[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2021, 22(3): 12-13.

(编辑 荐华)