

“未亘”月球取样钻机的研究试制和试验

薛 军¹, 蒲忠庚²

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 北京兴骏驰市政工程有限公司, 北京 100020)

摘要: 本文介绍了一款月球取样钻机的研究目标、适用环境、结构、组成、工作参数核算及功能试验和钻进试验。该钻机为宇航员在月球取样提供一种手动与自动相结合, 实现月球多地点、多孔、多孔深、多回次、多品种、高品质取样的月球勘探钻机的方案和样机, 供有关部门参考。“未亘”取样钻机的研制包括特种取样钻具、钻机固定、手动控制等整套配属装置, 采用提动式冲击回转碎岩法钻进。经进一步改进后, 有望解决在月球上实现钻爆破孔、物探孔、锚固孔, 用于完成矿产开发、科研基地建设等任务。钻机预留配套安装位置, 为研制遥控月球自动取样钻机或遥控月球多功能自动取样钻机提供前期技术储备。该钻机的方案和样机也可用于火星取样钻机研制参考。

关键词: “未亘”月球取样钻机; “未亘”取样器; 提动式冲击回转碎岩法; 遥控月球自动取样钻机; 火星取样钻机参考样机
中图分类号: P634.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)S1-0120-11

Research, trial production and testing of the “Wigen” lunar sampling drill

XUE Jun¹, PU Zhonggeng²

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Beijing Xingjunchi Municipal Engineering Co., Ltd., Beijing 100020, China)

Abstract: This paper introduces the research objectives, applicable environment, structure, composition, working parameter calculation, functional tests and drilling experiments of a lunar sampling drill. This drill is expected to provide astronauts on the moon with a lunar exploration drill scheme and prototype that combines manual and automatic operations, enabling multi-site, multi-hole, multi-depth, multi-cycle, multi-variety and high-quality lunar sampling, for relevant departments to select and reference. The development of the “Wigen” sampling drill covers the entire set of supporting devices including special sampling drilling tools, drill rig fixation, and manual control systems, adopting the lifting-type percussive-rotary rock-breaking drilling method. After further improvement, it is also expected to realize the drilling of blast holes, geophysical prospecting holes and anchor holes on the moon, to support tasks such as mineral exploitation and scientific research base construction. The “Wigen” sampling drill reserves matching installation positions, providing preliminary technical reserves for the development of remote-controlled lunar automatic sampling drills or remote-controlled lunar multi-functional automatic sampling drills. The scheme and prototype of this drill can also serve as a reference for the development of Mars sampling drills.

Key words: “Wigen” lunar sampling drill; “Wigen” sampler; lifting-type rotary-percussive rock fragmentation method; remote-controlled lunar automatic sampling drill; reference prototype of Mars sampling drill

收稿日期: 2026-08-13 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.S1.013

作者简介: 薛军, 曾用名薛富民, 男, 汉族, 1942年生, 高级工程师、副教授, 钻探工程专业, 硕士, 先后当过地质队钻工、钻探技术管理员, 在地矿部勘探技术研究所从事冲击器实验室筹建、冲击器研制和电镀法金刚石钻头制造, 参与筹建中国地质大学(北京)工程技术学院超深钻探技术国家专业实验室, 同时承担“岩石破碎学”硕士研究生课程教学, 退休后继续为各大院校、研究所创新研制古地磁取样钻具及玉石勘探浅孔博地-10米型等钻机、工具, 2008—2010年完成北京卫星加工厂的月球取样钻具研制课题, 2010年起开始研究月球取样钻机, 2026年1月完成样机制造及钻进试验, 北京市海淀区西三旗街道育新花园小区8号楼801室(100096), Xuejun-nlsd@126.com。
蒲忠庚, 男, 汉族, 1975年生, 总经理, 地下建筑工程专业, 主要从事岩土工程、锚固孔钻进、锚固工艺等方面的技术和管理, 北京市朝阳区劲松五区503号楼1505号。

引用格式: 薛军, 蒲忠庚. “未亘”月球取样钻机的研究试制和试验[J]. 钻探工程, 2026, 53(S1): 120-130.

XUE Jun, PU Zhonggeng. Research, trial production and testing of the “Wigen” lunar sampling drill[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1): 120-130.

0 引言

从20世纪60年代起,随着科技水平的进步,深空探索不断发展。在人类深空探秘的系统工程中,在星体上取得实物样品带回地球进行研究是一种人类了解星球秘密的最重要的技术手段之一。

1970年9月起,苏联Luna 16、Luna 20、Luna 24^[1]通过两根导向杆配置顶端式回转器冲击器附着在返回舱上构成无人自动取样钻机,在月球表面取样成功,取样直径8 mm,取样深度2.25 m,取样质量0.17 kg。1972年12月,美国宇航员携带干式作业的“阿波罗”月面钻机,用空心螺旋形钻杆带取心管和特制表镶金刚石钻头,在月球表面钻了3个深度为2.5~3 m的钻孔。美国于2020年7月发射毅力号火星车,配置有9个钻头的旋转木马,2022年12月在火星上采集到长73.6 mm的样品。美国漫游者火星探测车的配置除了有导航相机、天线、X光谱仪、转向架系统、太阳能储电装置等外,还设有岩样研磨捕获工具。钻取硬岩的方法靠研磨,但钻深有限^[2]。

我国于2020年发射的月球“嫦娥五号”在月球采用返回舱附着导杆式无人自动取样钻机取样成功,采样1.7 kg。2024年“嫦娥六号”在月球背面仍依靠登月舱为支点多点取样获得成功,采样1.9 kg。这些无人自动钻机主要依赖登月舱为支点,虽然取样成功,但在作业地点灵活性、钻孔深度和岩样多样性上存在局限。

多年来,由于航天工程大推力火箭和月球绕、落、巡、回登月舱功能受限,各国的自动取样钻具质量较轻,方法单一,自动取样不能独立自主多方式进行,钻孔浅,取样数量少。

近十年来,在新工艺、新材料、人工智能、大推力火箭和航天飞行器研制等方面迅猛发展。火箭“胖五”地月转移轨道运载能力8~9 t。40~100 kg重的钻机发射到月球已成为可能,我国如能进一步研制成功拥有多功能的月球取样钻机,则我国登月宇航员不必采用20世纪美国登月宇航员采用的费力费时的手持式取样电钻,将能高效方便地实施多地点、多孔深、高采取率、多品种、直斜孔、爆破孔等钻探,不仅可应用于月球取样,而且对矿产勘探开发和月球科研基地建设发挥重要作用。

分析认为,月球取样钻机的研制包括两方面的课题:(1)月球取样钻机的研制,这是首先要解决的课题,该钻机本身在宇航员操控和电池配置下就可

完成多地点、多孔深、多回次钻探取样及事故处理任务;(2)配套装置研制,如录像导航、太阳能电池、核电池、月地信息传输系统、X光谱仪、传感系统等,以实现遥控月球自动取样钻机的研制。

作者在多年研制方案的基础上,试制试验成功一款月球取样钻机,取名“未亘”,隐含未来与适于相对时空、相对环境之意。该钻机基本具备上述所需功能,进一步改进后,可成为宇航员在月球勘探取样和科研基地建设的高效方便的工具。从这款月球取样钻机具备的结构、功能研判,此钻机也可作为火星取样钻机研制的参考方案。

1 “未亘”月球取样钻机研制

1.1 钻进环境和技术手段

1.1.1 钻进环境

(1)适用表面较平坦的月表环境,月表主要由月尘、沙类、黏土类及月表下有硬岩或月表上有岩石露头的情形。

(2)本设计以月球空间和月表无液态和气态可供冲洗岩粉和冷却钻头的介质,以真空为条件。

(3)本轮设计仅针对常规地球温差范围-10~+60℃,如用于月球适宜的温差环境则需采取特殊的技术手段,包括选择月球合适的地域和时段,或研制具有温度防护装置的工棚及月球基地等。

1.1.2 技术手段

(1)充分吸纳、创新地质岩心钻机、钻具和钻进工艺技术方法的成功经验。由于月球上无法使用液压系统,使用绞车系统带来控制上的复杂性,因此本钻机研制尽量采用机械改制及各动力合理组合的创新方法实现钻进的各项运动。

(2)尽可能采用人类在材料科学、机电一体化、AI技术、智能机器人等技术的最新科技成果。

(3)尽量与遥控月球多功能自动取样钻机的研制统一规划,无缝对接。

1.2 研制目标与要求

1.2.1 研制目标

“未亘”月球取样钻机的研制目标是提出一款在宇航员操作下,可完成多地点、多孔、多样品、高采取率、高品质的月球样品采取的取样钻机方案和样机,供有关部门参考。最大目标钻深8 m。此外,经进一步改进后,还可实现爆破孔、物探孔、锚固孔钻进,以辅助月球矿产开采和科研基地建设。“未

亘”月球取样钻机设计尽量预留录像导航、X光谱仪、温度和含水量检测仪、地月信号传输系统、太阳能电池板及核电池等装置的安装位置,以便实现遥控月球自动取样钻机的研制,并对火星取样钻机研制提供参考方案。

1.2.2 结构设计要求

(1)结构简单紧凑、重心稳定、质量尽量小、尽量减少人力运用部件。

(2)功能齐全。便于在月球由宇航员推动移位并在孔位锁定,具有多地点、多孔深、多回次、直斜孔、冲击回转钻进、爆破孔施工、一般事故处理功能等。

(3)“未亘”月球取样钻机结构设计参考作者在2006年研制成功的博地-10米浅孔钻机(参见实用新型专利号:03266880.5)(图1)^[3],其主要性能参数见表1。



图1 加桅杆后的博地-10米钻机

表1 博地-10米钻机主要性能参数

序号	性能参数	参数值及说明
1	钻机总高度/mm	2992(带桅杆)
2	钻机总质量/kg	66
3	给进方式	手轮给进(可双手轮给进)
4	手轮加压力比	1:10.4
5	单回次最大进尺量/mm	1041
6	钻具提升方式	手轮绞车
7	钻杆配置(外径×壁厚)/mm	25×5(20号钢)、33×5(45号钢)
8	钻头外径/mm	38、52.5、63
9	钻头切削具	硬质合金、孕镶金刚石钻头
10	岩心直径/mm	27、40
11	适宜岩层	第四系地层、花岗岩、玉石、砂卡岩等
12	最大钻深/m	10
13	钻机转速/(r·min ⁻¹)	440、1230
14	动力配置	国产YD-80型汽油机,4 hp(约3 kW)

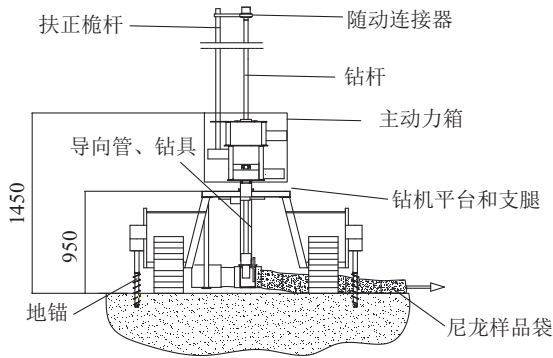


图2 “未亘”月球取样钻机结构示意图

1.3 “未亘”月球取样钻机结构和组成

“未亘”月球取样钻机的结构和组成见图2、图3。由上至下:随动连接器、扶正桅杆、钻杆(机上钻杆)、主动力箱、钻机平台和支腿、导向管、钻具、钻头、地锚、斜向拉杆、尼龙样品袋、脚轮、控制箱等。

地面部分有四条50 mm×50 mm×3 mm角钢外拉10°与上部平台组成一个上小下大的稳定梯形六面形体,重心较稳。后两根支腿中部焊有一根连接钢杆,加强了支腿强度。四根支腿底部装有Φ125 mm的万向橡胶脚轮,脚轮间距1.2 m×1 m,可人工推移选择孔位,并可自锁。两根前支腿和后支腿中部装有三根地锚,可用扳手拧进地层以固定钻

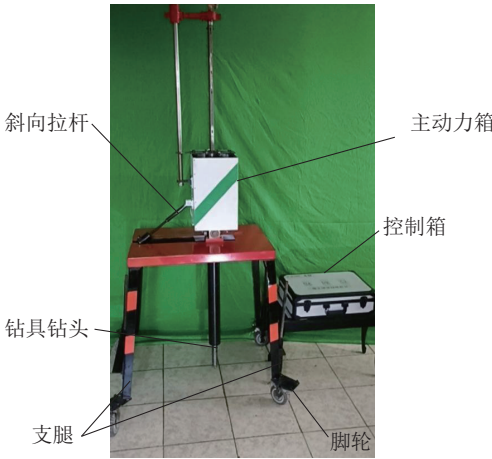


图3 “未亘”取样钻机样机

机并承受钻进反作用力。钻杆部分相当于岩心钻机配置的机上钻杆,为防止其工作时过大的S形弯曲,特用随动连接器与扶正桅杆连在一起。“未亘”月球取样钻机平台高度0.95 m,主动力箱含支腿和脚轮的总高度1.45 m,从地面到扶正桅杆最高点的总高度,按钻深3 m计为4.65 m,由于长钻杆加工困难,现样机钻杆仅长1.3 m,钻深0.6 m,则总高度为2.25 m。随动连接器右侧部设有导线分离器。由于本轮钻机着重进行功能试验,除少部分采用铝合金等轻质材料外,大部分采用的是钢铁材料,钻机主部(含导向管、钻具)质量68 kg左右,如正式研制将采用钛合金、超硬铝等轻质新型材料,估计质量可减小一半以上。

在钻机设计计划中,平台四边用于安装太阳能电池板,扶正桅杆顶部可安装录像导航装置和信息传输天线,平台下方空间可安装X光谱仪、测温仪等装置,平台内部安装控制电子元件、储能电池及单板机,脚轮可用自动转向行走的轮系代替,以便进一步实现遥控月球自动取样或遥控月球多功能自动取样钻机的研制。

用这种方法研制的遥控月球自动取样或多功能自动取样钻机的钻孔目标深度取决于钻杆加工长度及钻机的稳定性。如目标深度为5 m,则钻杆长度必须达5.7 m,此时钻机总高度达6.25 m,是否影响钻机稳定性需要进一步验证。

本钻机结构除可用于自动取样钻机研制,也为宇航员登月实现人工与自动相结合的勘探孔钻进创造条件。实现此种钻进时,机上钻杆不必太长(2 m左右),钻机总高度不应太高,平台高度适当增加,其下方取消导向管设置,机上钻杆可下接特制普通钻杆,并配有多种辅助钻具和工具,宇航员在平台下方进行孔口配合操作,则钻孔目标深度可增至8 m。

1.4 主要组成的功能及相关工作参数核算

1.4.1 主动力箱

这是钻机的主要组成部分之一,由冲击器、升降器和回转器组成,箱底与平台通过底座轴承相连,可45°内摆动,各组件的组装尽量紧凑,工作中心对中,主动力箱外部尺寸:长×宽×高=390 mm×236 mm×409 mm,质量19 kg,见图4。主动力箱可以实现钻杆钻具的回转运动、升降运动、正反转运动、冲击或振动运动。

回转器、升降器和冲击器采用直流电机带蜗轮

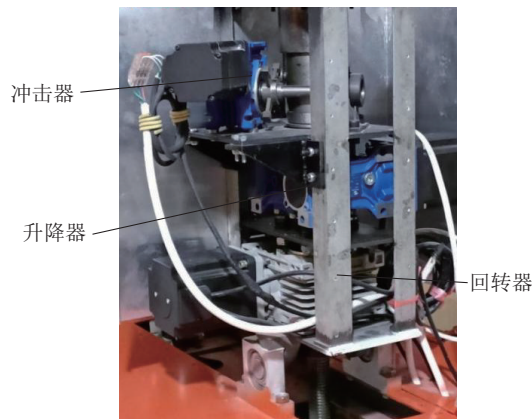


图4 主动力箱内部

蜗杆减速器改制,总质量14.95 kg。24 V直流电驱动,均可无级调速。回转器功率0.55 kW,升降器功率0.5 kW,冲击器功率0.2 kW。在电机额定转速下,回转器的额定转速为100 r/min,升降器额定升降速度400 mm/min,冲击器的额定冲击频率240次/min。

1.4.1.1 工作参数核算

(1)回转器额定扭矩:“未亘”月球取样钻机回转器额定扭矩 $T=974 \times 0.55/100=5.36 \text{ kgf} \cdot \text{m} \approx 53.6 \text{ N} \cdot \text{m}$;博地-10米浅钻有两种动力配置,其转速为440和1230 r/min,额定扭矩分别为65和31.7 N·m。“未亘”月球取样钻机扭矩介于博地-10米浅钻低转速和高转速扭矩之间,两个钻机钻杆截面尺寸基本相近,而“未亘”钻杆材质(以45号钢计)强度比博地-10米钻杆采用20号钢高1/3,因此,“未亘”钻杆的抗扭矩能力优于博地-10米的钻杆。

(2)升降器升降力:“未亘”月球取样钻机升降器额定扭矩 $T=974 \times 0.5/100=4.87 \text{ kgf} \cdot \text{m} \approx 48.7 \text{ N} \cdot \text{m}$,钻杆螺纹外径28 mm、螺距4 mm,产生的升降力为 $F=(4.87/0.014) \times 2\pi \times 14/4=7646 \text{ kgf} \approx 76.46 \text{ kN}$ 。博地-10米钻机以人力通过手轮放大10.4倍为升降力。“未亘”月球取样钻机升降器在升降钻杆钻具、钻压施加、处理卡埋事故的能力上明显优于博地-10米钻机。

1.4.1.2 回转器和升降器运动状态组合

回转器负责回转运动,升降器负责升降运动。运转速度的匹配关系决定了钻杆钻具的升、降、给进或是悬停(见表2)。钻机主要使用的有正转钻进、正转悬停、正转提钻、钻具纯提升、钻具纯下降5种运动状态,反转主要用于事故处理等场合。

表2 钻具的运动状态

回(回转器转速)	升(升降器转速)	速比	运 动 状 态	钻 进 状 态
正转	正转	回=升	钻具正转,不升不降,正转悬停状态	原位正转,未钻进
正转	正转	回>升	钻具向下作正转钻进,正转钻进状态	正转钻进,转速差越大,给进越大,钻压越大,钻速越快
正转	正转	回<升	钻具正转,上升运动,正转提钻状态	正转提钻状态
反转	反转	回=升	钻具反转,不升不降,反转悬停状态	原位反转,未钻进
反转	反转	回>升	钻具反转,上升运动,反转提钻状态	反转提钻状态
反转	反转	回<升	钻具反转,向下运动,反转钻进状态	反向钻进状态
不转	正转		钻具作纯上升运动,纯提钻状态	作纯上升运动,未钻进
不转	反转		钻具作纯下降运动,纯下降状态	作纯下降运动,未钻进
正转	反转		钻具向下作正转给进,正转钻进状态	正转钻进状态
反转	不转		钻具反转上升运动,反转提钻状态	纯上升运动,未钻进
正转	不转		钻具向下作正转钻进,正转钻进状态	钻进状态,钻压随正转速增大而增大
反转	正转		钻具反转,上升运动,反转提钻状态	上升运动,未钻进

还有一种重要组合是通过单板机或电脑设置,或手动操作,钻进时回转器作正向旋转钻进,升降器不断作正、反转运动,造成钻具不断提高孔底,冲击器配合以实现钻具不断上提又下降复位的提动式冲击回转钻进碎岩法,这种碎岩方式类似于地质无泵反循环取心钻进,相比月表环境下无冲洗介质的纯回转钻进,在解决钻头降温、排屑及提高钻进速度上有明显优势。而且,上述各种钻进状态均可在斜孔钻进状态下实现。

进行了室内动作试验,图5是钻具45°斜孔钻进工作情况。



图5 钻具45°方向运动

试验表明,由回转器、升降器和冲击器组成的主动力箱各组合运动功能正常,协同配合顺畅,达到预期目标。

1.4.1.3 冲击器

冲击器是主动力箱的重要组成部分之一,主要有三方面的作用:(1)提高硬岩的钻进速度;(2)可

用于处理孔内突发事件;(3)辅助解决在月表钻具内岩样脱出的问题。

本冲击器为自主创新研制,由直流电机加减速器、筒式冲锤、轴向及径向轴承、弹簧、拨叉等组成,钻杆从冲锤内孔穿过。可根据不同冲击功的需要,预先选择不同刚度的弹簧,本轮试验中冲击弹簧的刚度2.5 kgf/mm(25 N/mm),预压量9 mm,冲程16 mm,冲击功7 J。试验表明,当钻头接触孔底时冲击器作冲击运动,当钻头悬空时冲击器振动,室内试验功能发挥正常。图6是冲击器工作情况。



图6 冲击器工作照

冲击器拨叉的推力决定冲锤能否顶起,推力计算如下:已知功率200 W,减速比50,拨叉半径0.041 m,则拨叉推力为 $F=974\times0.2/60/0.041=79.2\text{ kgf}\approx792\text{ N}$,目前冲击弹簧的总压缩量为25 mm,其抗压力为 $2.5\times25=62.5\text{ kgf}\approx625\text{ N}$,拨叉推力大于冲簧压力,冲击器能工作。但冲击弹簧刚度的调节余地已不大,以后的设计中应适当增加冲击

器的功率。

三点说明:

(1)因月球表面重力加速度是地球的1/6,需特别关注冲击弹簧刚度对冲击功的调节作用,从而调节钻速,如冲击功不够应增加弹簧刚度。

(2)钻具悬空冲击时,冲击运动转变为振动运动,经试验,空振振幅受钻杆钻具自重的影响较大,在目前钻杆钻具总长2 m状况下振幅在4~6 mm。

(3)冲击运动可和上述各种钻进状态配合使用。

1.4.2 钻杆

钻杆(机上钻杆)是一个有中心孔的重要钻机组件,具有传输扭矩、冲击振动、回转、提升下降钻具的重要功能,此外,其内孔中要敷设两根导线用以传输给内置电器(直流电机或测温元件)的直流电源,因此在钻杆顶部必须设置有连通两根导线又不影响回转运动的分流器。钻杆是一个带扁方的矩形螺纹金属杆,如图7所示,外径28 mm,内径14 mm,扁方距22 mm,应采用高强度钛合金钢制造。



图7 钻杆

本样机钻杆用45号钢制造。45号钢抗拉强度约为600 MPa,屈服强度约355 MPa,取保险的抗剪系数0.5,则许用剪切应力 $[\tau]=178$ MPa,舍去外螺纹3 mm,不计扁方距影响,以外径25 mm、内径14 mm计,最大许用扭矩444.6 N·m,“未亘”月球取样钻机的额定回转扭矩为53.6 N·m,安全系数为8.29。如采用高强度钛合金钢制造,安全系数应更大。

博地-10米钻机的钻杆为外径25 mm、内径15 mm,材质20号钢,20号钢抗拉强度400 MPa,仅为45号钢的2/3,屈服强度245 MPa,从两者截面尺寸

和材质强度衡量许用扭矩,“未亘”钻机的钻杆强度大于博地-10米钻机。

1.4.3 斜拉机构

主动力箱由垂直向45°斜向来回运动是通过固定在平台的斜拉机构(图8)实现,图中下部所示为一个带行星减速机构的小功率直流电机,功率12 W,额定扭矩3 N·m,并配置了12和24 V直流电源。该小电机驱动螺杆拉近或撑开主动力箱,实现斜向或垂直钻进。试验表明,转向运动速度虽慢,但功率已够。正常工作采用12 V电源,24 V电源用于解卡。



图8 主动力箱的斜拉机构

小电机的推力计算:已知直流电机额定扭矩3 N·m,传动杆螺纹M14×1.5,则可算出其额定推力为 $F=(0.3/0.007) \times 2\pi \times 14/1.5=2512$ kgf ≈ 25.12 kN,已足够大。

1.4.4 导向管

无论直、斜孔开孔,都需要有导向管稳定钻具钻头,防止孔位偏斜或孔径超大。本设计的导向管外径76 mm,长度0.78 m,如图9所示。



图9 导向管照片

该导向管附带设置有两种功能:

(1)钻具钻杆清扫:钻进之后,钻具螺旋面和钻杆螺纹上会有月尘岩屑驻留,不利于下个回次钻进和升降器工作,故在导向管内壁环周均匀分布11组钢丝刷,每组4束,每束由20多根 $\phi 1$ mm的小钢丝组成,试验表明,该钢丝刷不会影响钻具上下运动,当钻具回转运动时,螺旋面上和钻杆螺纹上的月尘将

清除掉落。

(2)钻具上升限位缓冲设置:在导向管上部设有两片蝶形弹簧(见图10),钻具上升至该处时将受到缓冲作用,此时升降器直流电量增大,通过编程可及时停止钻具运动保护了钻具和设备安全。

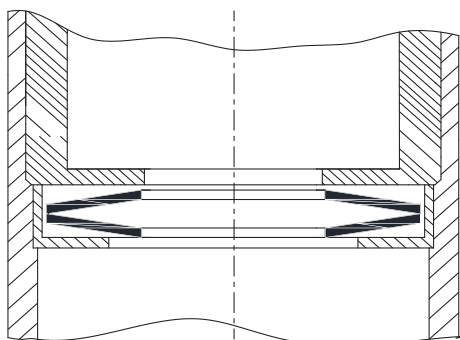


图10 导向管的蝶形弹簧缓冲机构

1.4.5 钻头

有三个重要问题需要解决:

(1)应研究采用何种材质的切削刃和钻头体能达到多孔钻进的长寿命并具有较大的高温强度和较高的钻进效率,包括超硬材料^[4]、金刚石^[5-6]、硬质合金^[7]、针状硬质合金^[8-9]等。

(2)采用何种钻头结构形式和钻进工艺,在无冲洗介质的条件下可顺利排除切削下来的岩屑,并有利于散热。

(3)切削刃和钻头本体都应具有红硬特性,并具有足够的一体强度。

早在2010年,作者在完成北京卫星厂关于月球取样钻具的课题时提出了如下结构形式的取样钻头,见图11^[10]。图中排屑槽用电火花加工,呈截锥式圆锥面形式,并使圆锥面下部与钻头螺旋槽相通。

本次试验采用硬质合金为切削具,仍设计了钻头圆锥面排屑槽与钻具螺旋槽相通,设计钻头外径38.5 mm,公称内径20 mm,钻头外形见图12。钻进试验表明,钻头圆锥面排屑槽与钻具螺旋槽相通的设计能较好地排屑,也有利于散热。

1.4.6 控制箱

“未亘”月球取样钻机含有三个主动力箱直流电机,一个45°斜拉小功率直流电机,一个钻具内驱动直流电机,共计需有五套电源开关、电流电压指示表、驱动器或控制器、电流调节电位器、12和24 V



图11 2010年提出的取样钻头排屑槽结构^[10]

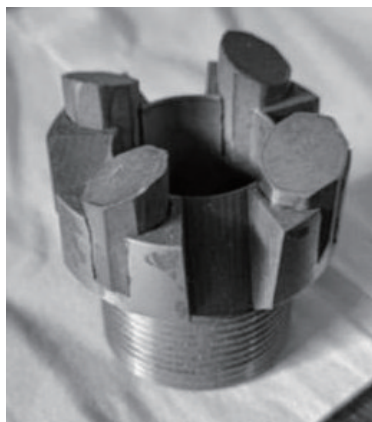


图12 本次试制的取样钻头结构

锂电池、倒顺开关及各种连接线,插接头,全部安装在两块底板上,最终安装在一只铝合金箱中,见图13。可手动操作控制箱钻进,也可通过单板机编程实现自动控制钻进。



图13 控制箱

1.5 “未亘”月球取样钻机的钻进试验

因无月壤模拟钻进条件,只能在地表环境下对“未亘”月球取样钻机进行少量钻进试验,以观察钻机、钻具的钻进工作状态。关于钻机的工作寿命、工况、安全状态只能通过与博地-10米浅钻相比较

并通过有关工作参数核算判断。全部采用手动调节控制箱内有关电流参数元件控制钻具转速、钻压及冲击频率和碎岩方式。

试验在一个地铁站工地混凝土地面进行,地锚无法拧入固定钻机,钻压只能在钻机自重(68 kg)范围内调节,钻压不足,钻速较慢。只钻进1孔,孔深60 mm,时长40 min。同时做了砖块钻进试验,4 min完成50 mm深钻孔4个,试验情况见图14。

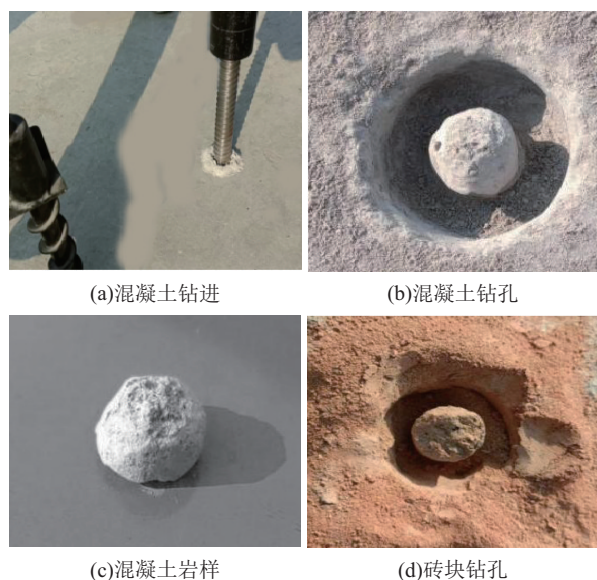


图14 钻进试验情况

通过钻进试验得到如下认识:

- (1) 钻孔开孔基本顺利,导向管导向有效。
- (2) 控制箱内转速钻压冲击器工作电流调节顺利,互相配合顺畅,钻进工况正常。
- (3) 在混凝土中钻进60 mm后,提钻时未启动钻具内置取心机构,岩心已折断在钻头内带上地面,这是由于钻机未固定、钻具晃动造成。
- (4) 月球表面重力加速度是地球的1/6,靠钻机

自重钻进钻压明显不足,所以无论在孔内硬岩或是月表露头硬岩钻进,应优先用地锚解决钻机固定问题,否则不易钻进。

2 取心钻具研制

相关文件^[2,11-14]有多种关于国外取样钻具钻头的介绍,但这些取样钻具都只能取硬岩,不能同时取月尘、月沙等散碎状样品,且未见这些取样钻具样机及试验状况报告。

“未亘”月球取样钻机设计的取样钻具外形为螺旋翼状,配置外径为38.5 mm的钻头,总长710 mm。钻具内除去内置电机和传动机构所占有的空间,取样空间高度为0.3 m,即是钻具回次最大进尺量,若要增大回次进尺量,则必须增长钻具。钻具含钻头外形见图15。



图15 钻具实物

2.1 新型普通取样钻具

新型普通取样钻具参考我国地质金刚石小口径钻具的设计和应用^[15-17],为双层管设计。在内管下端设计有多款可更换的取样、脱样机构。设计有内置直流电机、传动杆、单动接头、内管、外管等,见图16。单动接头是为设计双管单动钻具而准备的,钻具外管下端内孔中的一段做成内锥面,卡簧下端呈外锥面,卡簧下端处在外管内锥面上部,钻进时,卡簧连同其上的内管不会旋转,钻具呈双管单动工作状态。当回次钻进结束,开通电机,卡簧将下行抱紧岩心并贴紧在外管内锥面,在钻具回转扭矩作用下岩心被扭断提钻至地面。

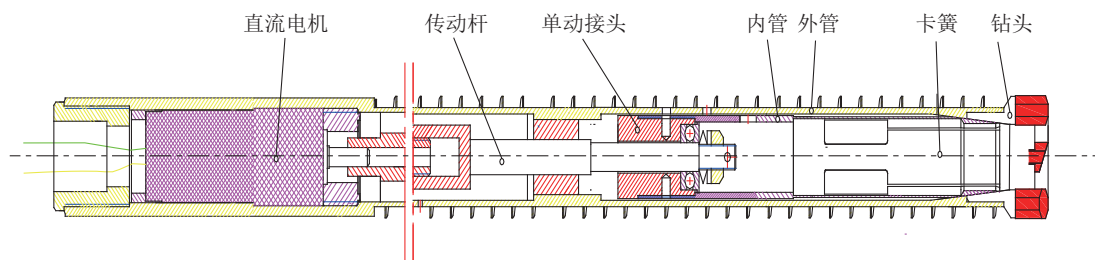


图16 新型普通取样钻具

在地面取心时,通过电机反向旋转,卡簧上行,松开硬岩岩心,岩心脱落,掉入预置的尼龙样袋。如卡簧过紧不能上行,则可通过钻头下方配置的岩心顶杆顶动促其上行。双管单动特性的钻具在钻进时可保护进入内管的样品呈原生状态,保证了采样品质。

钻具内置直流电机额定推力计算:已知额定扭矩 $3 \text{ N}\cdot\text{m}$,传动杆传递螺纹 $\text{M}12\times 1.75$,额定推力 $F = (0.3/0.006) \times 2\pi \times 12/1.75 = 2153 \text{ kgf} \approx 21.53 \text{ kN}$,已足够。

2.2 同时用于月硬岩和月尘的取样钻具

目前所知的月表岩样可分为两种状态:一种是沙土月尘类,具粒状流动性,样品无固定状态,最细颗粒直径 0.02 mm ^[18],大部分颗粒直径 $0.04\sim 1 \text{ mm}$,另一种即是月岩或月壤,月岩可能以岩石露头形态出现,月球表面下也可能碰到,坚硬致密的月壤也可能呈柱状^[18]。由于上述新型普通钻具只是针对硬岩取样设计,对月尘类取样难以成功,而钻机在月球根据不同岩样更换不同取心钻具的无人操作(如遥控自动取样钻进)比较困难,寻求这两类岩样均可取心的同一种取样钻具是必须解决的难题。为此,从2021年起,笔者历经4年的时间自主创新设计了十余种可与内管连接的钻具方案。下面列出三种经过试验的方案。

2.2.1 十二簧片取样钻具

钻具内管有十二片簧片,组成联动取样机构,是具有双管双动性质的取样钻具,见图17。

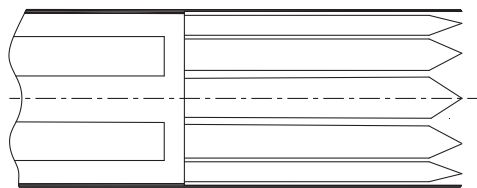


图17 簧片

取沙样时,在电机推动下由于设有两种角度互成间隔的斜角导向面,因而十二簧片可交织编成两层叠加状网兜(见图18),在电机推动下完成插入式而非夹卡式取样动作,在取柱状硬岩样品时,由于内管位置不同,簧片不会交织成网兜,从而不会影响硬岩岩样的取样。

2.2.2 活瓣挡沙片取心钻具

取心簧管设计有六条卡簧爪和六瓣挡沙片,挡

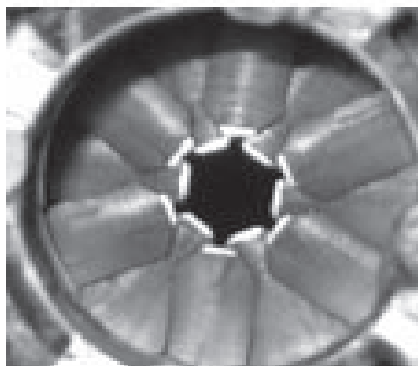


图18 两层簧片在叠合过程中

沙片根部有铰链,可灵活关闭或打开。当柱状硬岩岩样在内管中随钻进而上行时,会推开挡沙片,进入六卡条内腔,此时钻具作双管单动运动。取柱状样时,在电机推动下,六卡块向下卡紧岩样,钻具回转从而扭断岩样,带至地面,实现了硬岩岩样采取。

取月沙类岩样时,挡沙片在样品进入时被顶开,钻具上提时挡沙片在沙样自重下落下关闭,提钻到地面后上提内管,沙样从缝隙中流出实现取样。卡簧管在下限时,六挡沙片下落后必须关闭严密,因此在设计加工上是按三种不同外形挡片加工,由两组组合而成,相互叠盖后没有缝隙,见图19、图20。

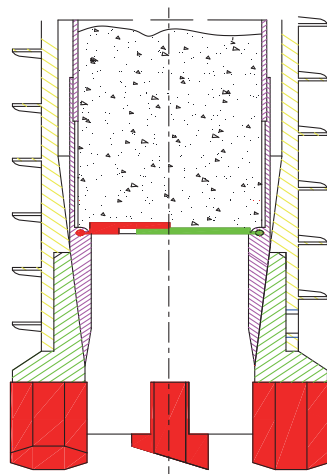


图19 活瓣叠盖取沙示意

试验表明,该钻具也能完成双岩样的取样任务,只是各部件加工比较困难,要确保做到铰链灵活自由,一旦有一片挡沙片不到位,取样就会失败。

2.2.3 “未亘”双岩样双管单动取样钻具及试验

在上述取样钻具设计试验的基础上,创新设计出“未亘”双岩样双管单动取样钻具,该钻具内含一

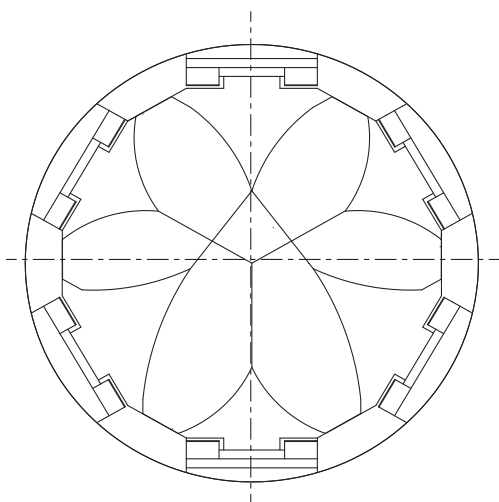


图20 内圈是两组六挡片重叠透视

个“未亘”取样器组件,见图21。

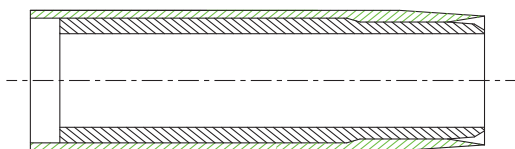


图21 “未亘”取样钻具组件简图

先进行了手动简易试验,将取样钻具用木棒敲击并旋转钻入模拟月沙120 mm,开通电流让“未亘”取样器取样,然后钻具提出,沙样已保存在钻具内管中,见图22。手动简易试验共进行4次,全部取样成功。然后进行钻机取样试验。

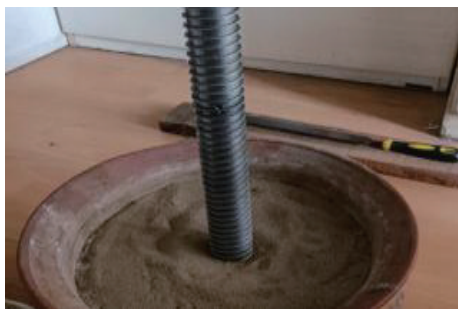


图22 钻具敲入沙中

钻机取样试验也在沙盆中进行,第一回次钻进50 mm,第二至第五回次每回次钻进120 mm,钻进方式有正转钻进、压入、压入加冲击钻进,提钻方式有纯上升运动、钻具正转加上升运动、钻具反转加上升运动。共进行了5次试验,全部取样成功。第一回次钻进太少不计入,第二至第五回次试验总取样量

95.6 g,试验用月尘月沙的密度 1.027 g/cm^3 ,钻头内部前端44 mm为非取心长度,其岩心采取率为: $\eta = (95.6/1.027/4) \times 10^3 / (\pi \times 10^2) / 120 = 61.8$ 。采取率较低的原因是钻进回次太短。如不计入前端44 mm空白区,则: $\eta = 74.11 / (120 - 44) = 97.5$ 。

这说明,“未亘”取样器去除空白区,岩心采取率达97.5,由于测量有误差,从钻头底部观察,样品无泄漏,进入取样器取样范围的样品已全部取出。

沙样从钻具放出的照片见图23。



图23 沙样放出照片

至于硬岩的取样虽未作试验,但其取样功能从原理上分析,由于是卡簧主动推进,应优于金刚石小口径钻进被动式卡簧取心方式,硬岩取心应更为可靠。从试验结果看,第三种“未亘”取样钻具取样效果最好,加工也不复杂,应优先采用。

3 结论

(1)在人类深空探索的系统工程中,在星体上实现自动取样、回收样品取得实物进行研究是最重要的技术手段之一。当前,研制月球取样钻机进而研制遥控月球多功能取样钻机发射月球已具有实现的可能性。

(2)本次研制的“未亘”月球取样钻机主要由钻杆加扶正杆、钻杆(机上钻杆)、主动力箱、平台、斜拉机构、支腿、地锚、钻具导正管、钻具、地脚轮和控制箱等组成,结构简单紧凑,重心稳定、功能可靠,质量尽量小。经进一步改进后,可实现由宇航员在月球手动操作和自动操作相结合,完成多地点多孔钻进等勘探孔取样任务,并可进一步实现爆破孔、物探孔、锚固孔钻进,有望成为月球矿产开发和科研基地建设的一机多用的多功能钻机。此钻机对火星取样钻机研制也具有参考意义。

(3)本次研制的“未亘”月球取样钻机的总高度2.25 m,主动力箱高度1.45 m,平台高度0.95 m,支

腿底脚:长 $\times$ 宽=1.2 m $\times$ 1.0 m;公称取样直径 20 mm,回次钻进深度 0.3 m,钻孔所能达到的最大深度,在人工孔口操控下将近 8 m。动作试验和钻进试验证明,钻机主部的功能:回转、升降、冲击、给进、直孔、45°斜孔、取样、脱样等安全可靠,达到设计目标。

(4)“未亘”月球取样钻机回转器功率 0.55 kW,升降器功率 0.5 kW,冲击器功率 0.2 kW。回转器额定扭矩 53.6 N·m;升降器额定升降力 76.46 kN;钻杆最大抗扭力矩 444.6 N·m,安全系数 8.29;钻具内置小电机的额定推力 21.53 kN;斜拉机构配置的小电机的额定推力为 25.12 kN。参数计算表明,除回转器冲击器功率应适当增大外,其他相关零件具有足够的功率或推力参与工作,其功能强于博地-10 米钻机。

(5)利用主动力箱的动力配置关系,通过单板机或电脑设置或人工操作,回转器作正向旋转钻进,升降器不断作正、反转运动,造成钻具不断提高孔底,冲击器配合以实现钻具不断上提又下降复位的提动式冲击回转钻进碎岩方式,类似于地质无泵反循环取心钻具,相比月表环境下无冲洗介质的纯回转钻进,在解决钻头降温、排屑及提高钻进速度上有明显优点。

(6)试验表明,“未亘”月球取样钻机配套的“未亘”双岩样双管单动取样钻具及内置“未亘”取样器,具有月尘月沙类和硬岩类样品均可采样的功能,且岩样采取率高,取样品质好,工作可靠,是一项创新发明的取心钻具。

“未亘”月球取样钻机,虽从理论及少量试验证明其具有多功能动作,岩心采取率高、岩样品质好、结构简单紧凑等力图达到的目标,但由于条件所限,无法开展模拟月球环境下充分的钻进试验,因此这些结论无绝对准确性,只具有相对参考价值,供有关部门参考。希望同行及科研工作者提出意见建议。

致谢:在“未亘”月球取样钻机研制和试验过程中,第一作者薛军的导师、俄罗斯科学院外聘院士、中国地质大学(北京)教授李世忠先生(1921—2022),中国地质大学(北京)水文系教授岑文龙先生(1943—2023),中国地质大学(北京)地质超深钻探技术国家专业实验室主任刘宝林教授,国家探月与

航天工程主任刘继忠先生,航天科工集团五院李飞主任等都给予热情指导和帮助;北京昌平、沙河、小辛庄、河北涿州等地外地来京加工师傅,想方设法克服加工难点,作了很大努力;北京兴骏驰市政工程有限公司给予试验场地和人力支援;北京科技大学教授梁素芹女士在论文阶段给予了热情指导;家人更是在交通、生活、身体方面给予多方面爱护和支持。在此一并表达我的衷心感谢!

参考文献:

- [1] 鄢泰宁,段新胜,冉恒谦,等.我国探月工程可采用的一种月球钻探取样方法[C]//赵文津.探月与地学研究会议文集.北京:地质出版社,2009:206-216.
- [2] Anttila, Matti. Concept evaluation of Mars drilling and sampling instrument[R].Helsinki University of Technology, Laboratory of Space Technology. Espoo, 2005.
- [3] 薛军.博地-10米支架式浅孔钻机及其在俄罗斯海金玉石矿区的勘探应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(4):9-12.
- [4] 方啸虎.人造金刚石立方氮化硼基础与标准[M].北京:化学工业出版社,1993.
- [5] 薛军.大陆科学钻探孕镶金刚石钻头胎体配方的前期研究[J].探矿工程,2000(5):62-63,66.
- [6] 薛军.关于薄壁金刚石钻头金刚石浓度的设计问题[J].探矿工程,2001(S1):253-255.
- [7] 王国栋.硬质合金生产原理[M].北京:冶金工业出版社,1988.
- [8] 山东省地质局,山东省石油探矿厂钻探研究队.针状合金钻进试验情况[J].勘探技术,1974(1):21-25.
- [9] 江西省地质局赣西北队 507 队.针状合金在八种岩层中的钻进试验[J].勘探技术,1976(5):34-39.
- [10] 薛军,殷参,刘宝林,等.探月取样钻具的初步研制[C]//赵文津.探月与地学研究会议文集.北京:地质出版社,2009:196-205.
- [11] 韩静,邓全,吴湘.月球取样器的结构设计与运动分析[J].机械工程师,2005(6):70-72.
- [12] 薛军.金刚石钻头硬岩钻进规律的试验研究[J].探矿工程,1987(1):5-8.
- [13] 薛军.孕镶金刚石钻头最优化钻进的试验研究[J].探矿工程,1983(6):1-6.
- [14] BarCohen, Sherritt Y, Dolgin S, et al. Ultrasonic/sonic drilling/coring (USDC) for planetary applications[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2000,4327:441-448.
- [15] 张春波,等.绳索取心金刚石钻进技术[M].北京:地质出版社,1985.
- [16] 国家地质总局.小口径钻探管材螺纹(试行):DZ1—78[S].1978.
- [17] 中国地质科学院勘探技术研究所.小口径金刚石钻进用钻具标准系列(草案)[S].1976.
- [18] 郑永春,欧阳自远,王世杰,等.月壤的物理和机械性质[J].矿物岩石学报,2004,24(1):14-19.

(编辑 王文)