

月球钻探取样技术研究进展

李 谦¹, 高 辉², 谢兰兰¹, 谭松成², 段隆臣^{*2}

(1. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:“嫦娥5号”探测器的成功发射与采样返回, 揭开了我国月球采样的序幕。面对当前月球(未来深空)探测的需求, 钻进技术作为能够获取深层地质样品的最常用手段, 受到越来越多的关注。然而, 地球环境下的常规钻探机具与工艺在面对月球(太空)环境时并不能直接进行应用。基于此, 本文就当前各国月球钻探技术的研究进展进行了广泛调研与分析, 具体包括真实月壤的性能及模拟月壤的研发、月球环境对钻进的影响、月球钻探机具结构和月球钻探规程的探索等几个方面; 并对未来月球钻探技术的发展进行了分析思考。

关键词: 月球探测; 嫦娥计划; 钻探取样技术; 钻探机具; 月球采样

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)01-0015-20

Review of research about lunar drilling technology

LI Qian¹, GAO Hui², XIE Lanlan¹, TAN Songcheng², DUAN Longchen^{*2}

(1. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China;

2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: The successful launch of the “Chang’e 5” probe has opened the prelude to the return of samples from the moon in China. To meet the current requirements of lunar (or deep space in future) exploration, drilling technology, as the most commonly used method to obtain deep geological samples, is receiving more and more attention. However, in the face of the extreme environment of the moon (or deep space in the future), the earth’s conventional machinery and craftsmanship cannot be directly transplanted. Therefore, this paper has conducted surveys and statistics on the current progress of lunar drilling technology in various countries, including several areas such as researching the properties of lunar soil, developing of lunar soil simulant, the impact of lunar environment acted on drilling, the structure and parameters designed for lunar drilling equipment, and optimization of lunar drilling regulations, and conducted thinking of future lunar drilling.

Key words: lunar exploration; “Chang’e” projects; drilling sampling technology; drilling tools; lunar sampling

0 引言

深空探测技术的发展是国家技术水平的综合体现, 对相关科学领域也存在着巨大的引领和驱动作用。作为距离地球最近的星体, 月球是各国在深空探测领域进行战略性抢占的首选试验场。近年来, 多国结合 20 世纪 50—70 年代美苏对月球探测

的经验教训, 开展了相关的月球探测计划。其中, 2004 年是一个重要时间节点, 中国、美国、俄罗斯和欧洲航天局都在同一年提出了各自的月球探测计划。中国于 2004 年启动“嫦娥工程”月球探测计划, 并将其分为“绕一落一回”三个阶段, 于 2020 年 11 月 24 日发射的“嫦娥 5 号”月球探测器, 实现了月面

收稿日期: 2020-12-22 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.01.004

基金项目: 国家自然科学基金项目“量化月壤扰动特征的模块化月球钻进力学模型研究”(编号: 42072344)、“模拟月球表层采样机土耦合力学模型研究”(编号: 11502034)

作者简介: 李谦, 男, 汉族, 1987 年生, 讲师, 硕士生导师, 地质工程专业, 博士, 从事智能钻探与地外钻探相关技术研究工作, 四川省成都市二仙桥东三路 1 号, liqian2014@cdut.edu.cn。

通信作者: 段隆臣, 男, 汉族, 1967 年生, 教授, 博士生导师, 地质工程专业, 博士, 从事钻探工艺与岩石破碎相关的教学与科研工作, 湖北省武汉市洪山区鲁磨路 388 号, duanlongchen@163.com。

引用格式: 李谦, 高辉, 谢兰兰, 等. 月球钻探取样技术研究进展[J]. 钻探工程, 2021, 48(1): 15-34.

LI Qian, GAO Hui, XIE Lanlan, et al. Review of research about lunar drilling technology[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(1): 15-34.

无人采样,同步完成深层钻取和浅层表取2项取样任务,并于12月17日携带1731 g样品成功返回^[1-2]。就国外而言,美国于2004年提出“新太空探索计划”,计划在2015—2020年重现载人登月,实现在月球表面建立有人居住的月球基地,并在2030年前把航天员送上火星;同年,俄罗斯提出新的“全月球”探测计划,目标是在2010年之前向月球发射绕月卫星,并最终于2025年前实现载人登月;欧洲航天局也在同一年提出要在2020年之前进行系统的机器人探测月球计划,并在2030年实现建立月球基地的目标。日本在2006年提出在月球表面建立“太空港湾”的探测计划,旨在开发月球表面的矿产资源和能源资源。印度于2008年10月发射了其第一个月球探测器“月船1号”,对月表形貌和月表矿物资源进行了系统探测^[3-7]。由此可见,月球探测不会止步于环绕卫星遥测,或月面着陆采样分析,而是会更进一步地建立月球基地,甚至会是实现大规模的月球资源勘探开发和利用。

“嫦娥5号”的成功实施,使中国成为继美国Apollo计划和前苏联Luna计划后成功实现了月球钻探采样的第三个国家。现阶段,对月球样品的分析是当前月球探测计划的主要目标之一。月球样品不仅包含月壳内部构造、演化历史等相关地质信息,也包含太阳系早期演化历史、太阳风性质与辐射特征、陨石撞击记录等领域的重要信息。对样品中这些相互交织的信息进行解读,是对月球、地球乃至太阳系研究的一项重大挑战和突破。就月球样品而言,广义上可分为3大类:坚硬固体类(月岩)、松散可变形类(月壤)、气态类(月尘)^[8]。考虑到月壤是月岩以机械破碎的方式而形成,而月尘则是专指月球低重力的条件下极易漂浮,粒径 $<20\text{ }\mu\text{m}$ 的月壤颗粒,因此月壤在一定程度上可视为同时包含了月岩和月尘的信息,也可认为月球取样的主要目标在于月壤。从科学角度看,月壤是固体月球与填充太阳系的物质和能量之间的实际边界层,能为地月起源、太阳系相关研究等方面提供丰富的信息^[9]。从资源角度上看,月壤富含丰富的矿物资源,包括超过1500万亿t的钛铁矿、硅酸盐、克里普岩(月球独有矿物,富含钾、磷和稀土元素)和超过100~500万t的氦-3资源^[10]。从可持续研究发展的角度看,月壤的物理力学性质、矿物资源储量以及特殊的环境资源(真空、低重力、辐射、磁场等)等信

息也是为后期月球基地建设、深空探测活动奠定了重要的资源保证。

但值得注意的是,仅凭月球表面样品无法获取足够丰富的信息,同时考虑到取样过程中对月球表面样品的潜在污染,故数十甚至百米深度以深的实物地质样品对月球探测任务不可或缺。为了有效保留样品层理性等更多信息,钻进技术是目前获取地下实物样品唯一有效的采样方式^[11-12]。基于现有的相关资料,美国Apollo系列任务载人登月,宇航员实地采样381.7 kg,最深达3050 mm,而前苏联Luna系列任务无人值守,设备自动采样321 g,最深仅350 mm。美苏在采样质量和深度上的巨大差异,主要是由于前苏联的自动钻进设备对月壤性质的错误判断,导致设备产生机械故障而被迫终止采样。有研究指出,不仅是前苏联Luna任务中,在美国Apollo任务中甚至后续的火星、金星和小行星采样过程中,均出现过由于对行星地层特征的误判引起的无法达到预计钻进深度和卡钻等问题,从而无法实现取心的目的^[13]。由此可见,现有技术储备虽然能够实现月球钻探动作,但月球环境的影响,月壤(月岩)性质的准确预判,以及月壤(月岩)与钻探设备、规程参数的相互耦合均与地球环境下的传统钻探工艺截然不同,因此不能套用地球环境的钻探经验直接对月球钻探的效率、能耗、寿命等因素进行直接判断分析,而是需要对其进行有针对性的特殊设计。为此,本文对当前月球钻探的研究进展进行了调研与分析。

1 月球钻探对象与环境

1.1 月壤的物理力学性能

了解地层结构是钻探任务设计的首要参考。对于月球地层结构,目前的学界共识是在月球表面覆盖有平均厚度为4~15 m的松散月壤^[9],其下才是坚硬月岩。综合目前美国Apollo任务、前苏联Luna任务与中国“嫦娥”任务,当前的取样深度均未超过该范围,故月壤可视为当前月球钻探任务的主要对象。相较而言,起源于月球极端环境条件下的月壤会为钻进带来极大的困难。与地球土壤在空气、水和生物共同风化作用下的形成过程完全不同,月壤是在陨石撞击、火山爆发、悬殊的昼夜温差等条件下由纯机械破碎产生,造就了与地球土壤截然不同的物理力学性质。例如,月壤在采样过程中极易被

扰动,且扰动后会起物理力学性质的明显变化。相关试验证明,在800 mm深度范围内,月壤仅在自重的作用下就能产生近40%的相对密度差^[9]。中国地质大学(武汉)研究表明,若无视模拟月壤因扰动产生的变化,而是将其性质定义为常量,则理论挖取扭矩计算结果与实测结果之间的误差值在30%~85%之间波动^[14];美国科罗拉多矿业大学也通过试验证明,采用月壤性质恒定的7种常规机—土耦合切削土力学模型计算反力曲线与模拟月壤实测值均不相符^[15]。由此可见,月壤的物理力学性

质是月球钻探相关任务的主要影响因素之一。各国研究人员对美国和前苏联所采真实月壤进行了大量的数据分析与研究,从矿物成分至物理力学性能等各个方面均取得了翔实的研究成果^[9,16-17]。其中部分对月球钻探影响较大的物理力学性能如表1所示。由表1可知,月壤物理力学性质与地球土壤存在显著的区别,其中较高的孔隙度和较大的相对密度、压缩系数与承载力变化范围也证明月壤存在易扰动的特征。

表1 影响钻进效率的月壤物理力学性质^[9,16-20]

Table 1 The physical and mechanical properties of lunar soil affecting drilling performance

参 数	数 值
粒径分布	主要集中于40~800 μm,其平均粒径约为60~80 μm
颗粒形态	高度变化的颗粒形态(图1),不同颗粒相互粘结的聚合物(图2)占月壤总量近60%
颗粒密度	密度区间为2.3~3.2 g/cm ³ ,绝大部分超过2.9 g/cm ³ ,明显高于地球土壤颗粒密度(2.6~2.8 g/cm ³)
密度	与深度成正比,600 mm深度范围内大致区间为1.45~1.71 g/cm ³
孔隙度	颗粒间的棱角造就了较高的孔隙度(46%~52%),高于地球松散无粘性土(25%~45%)
相对孔隙比	与深度成正比,600 mm深度范围内大致区间为65%~92%
抗剪强度	内聚力约为0.1~1 kPa,颗粒间的棱角造就了较高的内摩擦角(30°~50°)
压缩系数	随孔隙比增大而显著增大,孔隙比<0.9时压缩系数<3,孔隙比>1.3时压缩系数>40
承载力	随孔隙比增大而显著降低,孔隙比<0.8时承载力>55 kPa,孔隙比>1.3时承载力<7 kPa



图1 来自Apollo 16任务的74个真实月壤颗粒样品形态^[19]

Fig.1 74 real lunar soil particle samples from Apollo 16

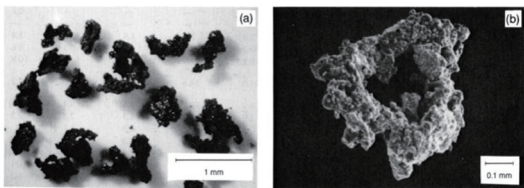


图2 典型月壤颗粒粘结物形态^[9]

Fig.2 Morphology of typical lunar soil granule

1.2 模拟月壤的研发进展

由于真实月壤数量极其稀少(中美苏合计不足

385 kg),不能满足各国针对月球探测的大规模研发需求,模拟月壤的研发不可避免。受采样位置限制,真实月壤特征参数较为离散,没有明显的规律性,因此各国的模拟月壤研发分为两个方向:一是特定功能性月壤,即仅针对某些特定物理力学性质的模拟,二是通用型模拟月壤,即对特定区域的真实月壤进行所有化学成分和物理力学性质的全面模拟。这两个方向不分优劣,在特定的条件下均能满足相关任务研发需求。如表2所示,目前常见的模拟月壤主要来自8个国家共38种,其中绝大多数由美国和中国研发(合计29种)。

将表2的数据进行统计如图3~4所示。从各国研发分布(图3)所示,各国对模拟月壤的研发爆发了2004年(在此之前仅有美日合计6种模拟月壤),正是同年各国掀开了对月球探测的第二次高潮。中国虽起步稍晚(2007年),得益于“嫦娥”计划的推动,研究增速非常迅猛,目前研究总量仅次于美国。对模拟月壤的研究热情体现了各国对月球探测的重视。从各国研发模拟月壤的功能划分(图4)所

表2 目前常见模拟月壤^[21-29]

Table 2 The research and development of common lunar soil simulant at present

国家	数量	型号(研发时间)
美国	15	LSS(1971)、MLS(1988)、ALS(1991)、JSC* (1994)、Sanders(1995)、GSC(2008)、GRC (2010)、CSM-CL*(2010)、NU-LHT* (2010)、CMU(2012)、BP(2014)、OPR* (2014)、LMS*(2019)、LHS*(2019)、DUST- Y(2019)
中国	14	TY II (2007)、JLU (2008)、CAS*(2009)、 NAO*(2009)、LBD (2010)、CUG*(2011)、 TJ*(2011)、CLRS*(2014)、QH-E (2015)、 HITLS (2016)、CLDS-i*(2016)、NEU (2017)、BHLD*(2017)、冻土模拟月壤 (2018)
日本	3	FJS*(1998)、Oshima*(2008)、Kohyama* (2008)
韩国	2	KOHLs(2014)、KLS*(2018)
加拿大	1	OB(2008)
英国	1	SSC*(2009)
意大利	1	DNA(2014)
澳大利亚	1	ALRS(2015)

注:带*号是在所有化学成分和物理力学性质上全方位模拟真实月壤;其余仅在特定的物理力学性质上模拟真实月壤。

示,各国在通用型月壤与特定功能型月壤的研发上几乎投入了相同的研发精力。

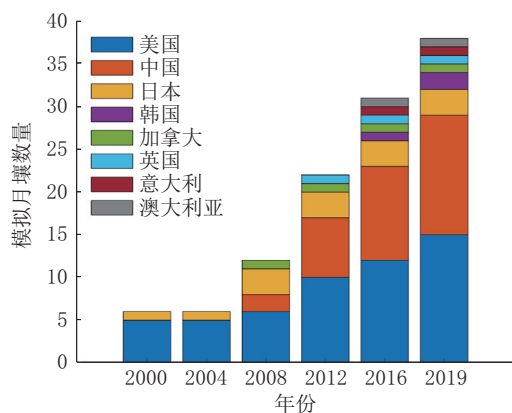


图3 模拟月壤研发国家分布

Fig.3 Research and development distribution of lunar soil simulant in various countries

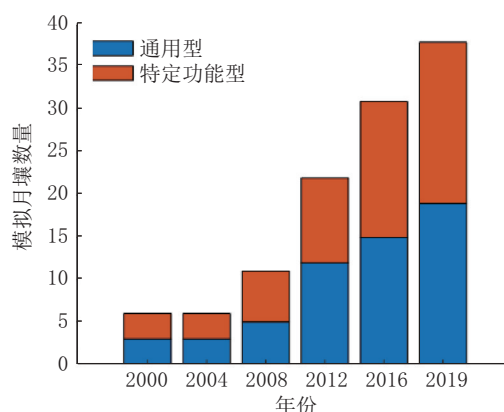


图4 模拟月壤的研发功能划分

Fig.4 Functional division of lunar soil simulant developed by various countries

1.3 月球钻探的环境与挑战

月球钻探过程中,首先需要面对的就是相比地球更极端的采样环境,如表3所示。月球环境会极大地限制采样设备的工作效率,因此高效的采样设备研发一定是建立在对采样环境有足够了解的基础之上。相关资料显示,月球钻探过程中出现故障的概率较大。在美国 Apollo 15 任务中就出现过包括:(1)无法达到预计的钻探深度;(2)钻杆与动力头或钻杆与钻杆之间的卸扣较为困难;(3)钻柱接头损坏;(4)孔内提钻较为困难等问题。而前苏联 Luna 系列任务更是出现机械故障,导致钻探采样任务被迫提前终止^[13]。

表3 地月环境对比^[30]

Table 3 Environment comparison between earth and moon

影响因素	地表状态	月表状态
大气	有大气	真空
水	大部分地区富含地表水	完全无水
重力	9.81 m/s ²	1.62 m/s ²
温度	平均 22 ℃	白天平均 107 ℃, 夜晚平均 -153 ℃
极端温差	-89~58 ℃	-233~123 ℃
采样对象	一般对象已知	对象不确定性大
时间窗口	大多无限制	严格受限
功率限制	一般无限制	受限
轻量化要求	一般低要求或无要求	严格要求
控制	一般近程实时控制	远程、信号迟滞
辐射	有保护、低辐射	高辐射

基于表3所示的地月环境对比,月球极端环境下对钻进可能带来的影响至少包括以下几个方面:

(1)有限的动力、能源和质量大小^[31]:月球探测代价极其昂贵,发射一枚卫星进入轨道就需要耗资过百万美元。探测器的质量大小将严格受限,因此必须使用轻型高强度金属,必须使用太阳能板提供能量,同时钻进功率消耗严格受限,钻进技术必须采用低功率模式;同时由于探测器空间受限,采样器在途中必须折叠,因此动力传输模式还需要考虑机具折叠的影响。

(2)恶劣的环境条件^[31-32]:低重力条件下,登陆车或着陆器自身的轻质量会限制作用在钻头上的最大钻压;低温环境要求材料不会产生脆性变化,悬殊的昼夜温差则要求材料有稳定的热膨胀系数,从而对钻进机构的制造材料提出了较高要求;低压和真空的环境条件同时限制了热量散发,在没有冷却介质下容易造成钻头局部热量过高。

(3)地质条件的多样性和不确定性^[31, 33]:月球钻探的前提之一在于了解其地质结构;而探测器着陆点的选择与实际着陆时的可能偏差,令地质信息更难以预测。同时,即使在已知区域着陆或钻进时,不同深度的样品地质条件都可能存在很大的不同。钻进效率同时还可能受到样品力学性能、热物理性能、化学和矿物性能等影响。

(4)通信延迟^[31, 34]:通信延迟是决定行星采样自

动化级别的最重要因素。当出现通信中断或延迟时,采样器必须高度自治,从而要求自动钻进设备具备强大的故障检测和恢复功能。

2 月球(行星)钻探机具

2.1 月球(行星)钻探机具概况

基于对各国已实施和计划中钻进采样设备进行调研,月球(行星)钻进采样主要包含如图5所示5种不同钻进取样方式,包括:

(1)直接使用螺旋钻杆进行钻进,样品通过螺旋叶片传输至地表进行取样(图5a)。

(2)使用外螺旋内中空钻杆进行钻进,钻杆外壁螺旋叶片排除钻渣,月壤直接进入钻杆内中空进行采样(图5b)。

(3)使用双层结构,外部使用硬质螺旋钻杆结合钻头进行钻进并排除钻渣,内部使用软袋保护采集样品,随钻进深度的增加提拉软袋对样品进行保护(图5c)。

(4)使用双层结构,外部使用硬质螺旋钻杆结合钻头进行钻进并排除钻渣,内部使用硬管,在钻进深度到位后内部硬管伸出,压取样品(图5d)。

(5)鼯鼠式钻进结构,使用小型机器人结构,结构前端存在微型螺旋叶片,后端接入连接导线,完成初始设定后自动钻进至指定位置进行微量采样(图5e)。

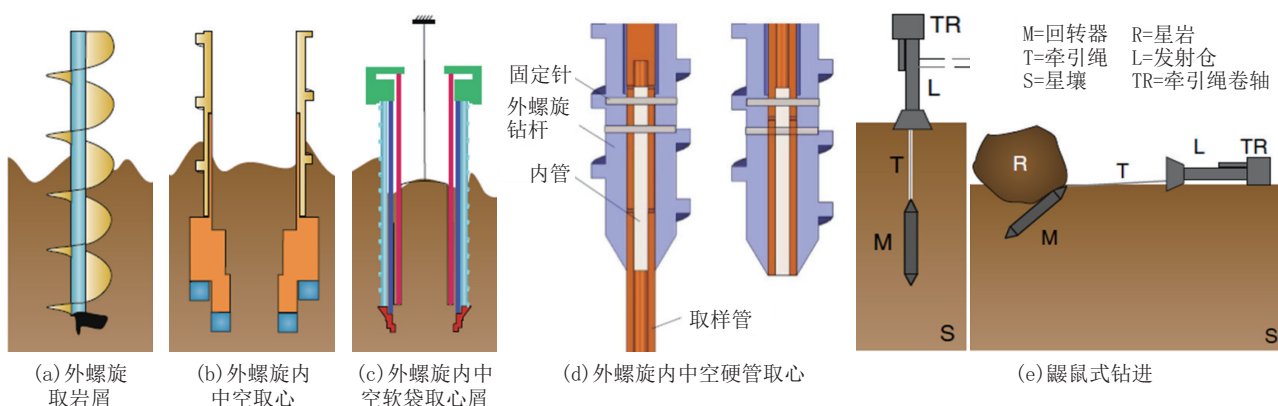


图5 常见的行星采样钻探机具类型^[31, 35]

Fig.5 Typical types of planetary drilling structure

基于对5种不同钻进取样方式的统计,从结构原理上看(图6),自1969年首次月球采样至今,外螺旋内中空取心方式一直是各国行星钻进设备的研发重点。对比之下,外螺旋内中空软袋取心和内中

空硬管取心的钻进方式的研发源于对采样样品提供额外保护,降低采样扰动。但因其结构过于复杂,潜在故障率高是不可忽视的缺点。除此以外,鼯鼠式钻进设备值得关注,因其极大地降低了对功

耗和质量的需求,近年来研究热度逐渐增加。但无法穿越硬岩和取心量少是目前鼯鼠式钻进需要解决的主要问题^[20]。外螺旋采取岩屑的钻进设备的研发相对较晚(始于2004年),因其相对较低的钻进功耗与较高的采样效率也获得了一定的关注。但外螺旋采取岩屑的取样方式会对样品产生较大的扰动,对采集样品中包含的层理性等信息会产生影响。

从国家和地区的发展趋势上看(图7),美国、前苏联、中国和欧盟是4个主要的行星采样钻进设备研发国家和地区。美国一直是研发主力,近年研发设备量缓慢增加;前苏联在20世纪80年代左右具有类似美国的研发水平,但进入90年代后未见后续报道;中国采样设备量自2009年首次报道^[36]后迅速增加,原型样机增长速率远超美国;欧盟虽然起步较早(1995年),但2007年后整机的研发陷入停滞。



图6 不同原理的行星钻进设备研发趋势

Fig.6 Development trends of planetary drilling equipment with different principles

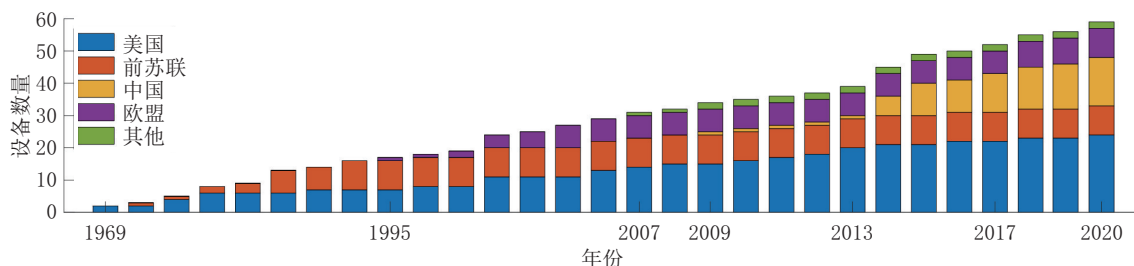


图7 不同国家的行星钻进设备研发趋势

Fig.7 Development trends of planetary drilling equipment in different countries

2.2 不同结构形式的典型钻进采样机具

2.2.1 外螺旋直接采样式机具

自2007年首次出现至今,据不完全统计,有6个探测器(含已发射和研发中)携带有外螺旋直接采样式钻具,包括:

(1)2007年美国NASA发射的火星Phoenix探测器(图8a),其上携带了用以钻取含冰样品的ISAD(Icy Soil Acquisition Device)设备,该设备由弹簧提供钻压,带冲击装置,带2块346 W电池,350 kg的平台能够提供最大1300 N的推力^[37]。

(2)2009年,Honeybee公司设计的CRUX型采样器(图9a),通过不同的执行器可分别实现单冲击、单回转和冲击回转,设计钻孔直径1.5 in(38.1 mm),钻进深度1.3 m,平均钻压453 N,平均钻速0.35 mm/s,平均功率150 W^[38]。

(3)2011年美国NASA发射的火星Curiosity火星车(图8b),其上携带了螺旋钻孔采集岩粉的设备,设计最大钻压240 N,实际作用在岩石上的钻压最大可达230 MPa,钻孔直径16 mm,钻进孔深50 mm,取心深度40 mm(前15 mm未采取)^[39-40]。

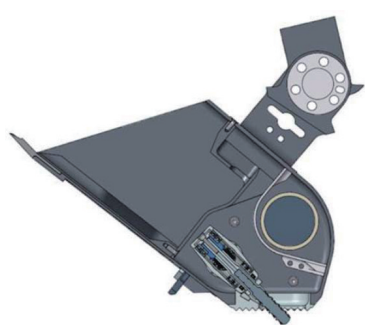
(4)2013年Honeybee公司为火星冰层钻进设计的Icebreaker钻具(图9b),包含回转和冲击2种钻进方式,具有自动钻探和故障恢复功能,整机质量32 kg,包含一个三自由度机械臂,其中带冲击功能的顶驱能够为钻柱提供最大200 N钻压,钻进过程中将钻压限制为最大100 N;携带长1.2 m、外径25 mm的外螺旋钻柱。同时钻头集成温度传感器,温度超过一定值后自动降低或停止钻速,防止冰层融化^[41-42]。

(5)2013年Honeybee公司设计的LITA整机式

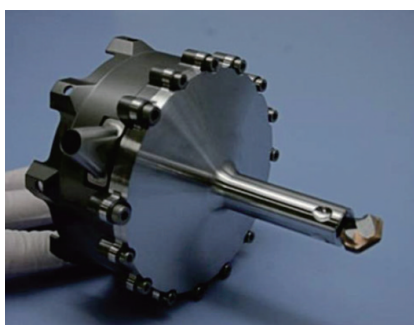
钻进系统(图9c),将Icebreaker钻具进行了轻量化,设计钻进深度0.5~1 m,降低质量至9 kg,设计能耗低于100 W,钻压 $<100\text{ N}^{[43]}$ 。

(6)2014年Honeybee公司推出的高功率整机式钻进系统LPD,整机12 kg,分为冲击、螺旋钻杆、

钻进、部署4个主要部分,其中螺旋钻杆可承受200 r/min、10 N·m扭矩;冲击机构可实现功率150 W、冲击功2.6 J/击和1600击/min的冲击频率;整机则可实现500 N高钻压^[44]。



(a)Phoenix探测器的ISAD设备



(b)Curiosity火星车采集岩粉的设备

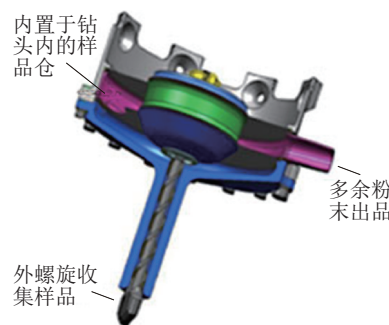


图8 美国NASA钻进机具^[37,39-40]

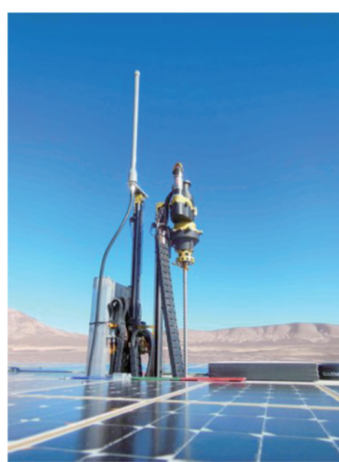
Fig.8 Drilling equipment developed by NASA



(a)CRUX型采样器



(b)Icebreaker钻具



(c)LITA整机系统

图9 Honeybee公司的钻进机具^[38,41-43]

Fig.9 Drilling equipment developed by Honeybee

2.2.2 外螺旋内中空取心式机具

外螺旋内中空取心式机具是最常规的月球(行星)钻进取样方式,在美国Apollo计划和前苏联Luna计划中就有使用这种方式。据不完全统计,前后有十余种(含已使用与研发中)设备采用这种形式,归纳如下:

(1)1970—1972年苏联Luna16、Luna20系列任务(图10):臂式钻机,钻具质量13.6 kg,尺寸690 mm×290 mm,设计最大钻进功率140 W,设计转速500 r/min,平均钻速80~240 mm/min,取心直径26

mm,估算能耗42~54 kJ/350 mm,估算扭矩0.2~0.3 N·m。实际钻进中Luna16用时7 min钻进350 mm,获取101 g月壤样品,Luna 20计划用时30 min钻进至350 mm深度,但钻进250 mm后被坚硬材料挡住,后续钻进7 min内三度过热中止钻进,获取55 g月岩样品^[13]。

1971—1972年美国Apollo15、Apollo16、Apollo17系列任务(图11),宇航员使用电池驱动的手持式钻机进行钻进,其中钻头带冲击回转功能,转速280 r/min,冲击功4.4 J/击,冲击频率2270次/min,

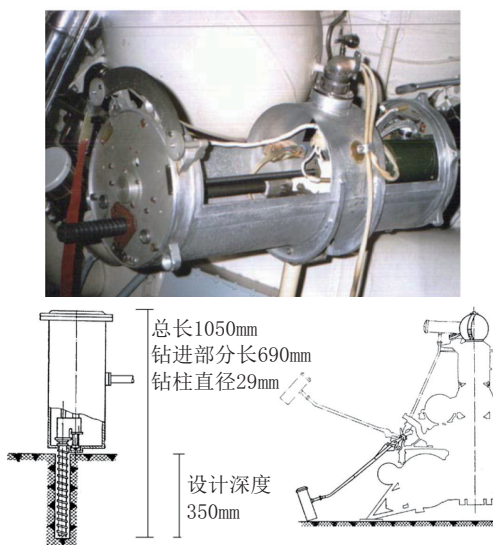


图10 Luna16、24任务的钻进机构^[13]

Fig.10 Drilling structure used in Luna16、24

能穿透孔隙率约为40%的岩石。不含钻柱和外包的情况下整机重13.4 kg,尺寸577 mm×244 mm×178 mm,电机功率24 V DC×19 A=456 W,最长连续钻进时间15 min。实际钻进效果Apollo 15任务钻进深度 2360 ± 10 mm,获取样品1343.5 g分装在6个独立的取心管内。Apollo 16任务钻进 2240 ± 30 mm,获取样品1007.6 g分装在7个独立的取心管内。Apollo 17任务钻进 3050 ± 10 mm(截至目前最深),获取1772.5 g样品分装在9个独立的取心管内^[13,20,45]。

(2)1978—1984年前苏联针对金星发射的采样器上携带的GZU drill设备(图12),携带气囊使用气压驱动,能够以最大90 W的功率钻进30 mm,由一个马达同时为回转和给进供电。能够用200 s时间采样 $1 \sim 6 \text{ cm}^3$ 。总重26.2 kg,大约0.5 m高^[13]。

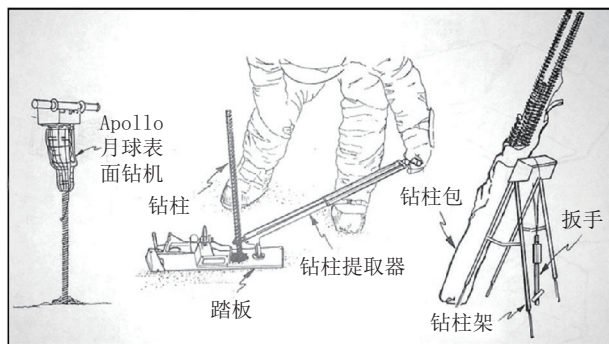
(3)1980年美国研发的CDS(Core Drill System)系统,整机质量41.2 kg,尺寸1765 mm×142 mm×140 mm,能耗236 W,设计钻进1 m,钻速500 mm/min(土体),50 mm/min(岩石),样品直径19 mm,需要能量65 kJ/m样品,计算能效 2.28 kJ/cm^3 ^[13]。

(4)1995年欧洲航天局针对彗星取样研发的Corer Tool和Surface Tool,其中Corer Tool设计直径100 mm,长度1400 mm,Surface Tool设计直径150 mm,长度600 mm^[13]。

(5)2002年意大利宇航局研发的Dee Dri设备(图13),使用多杆组接式结构进行连续钻进,整机高540 mm,钻孔直径35 mm,多杆组接可达2.5 m,取心方式为先钻进至设定深度,后采取岩心,设计取心直径14 mm,长度25 mm^[13]。

(6)2003年Honeybee公司针对火星钻进设计的Mini-Corer系统(图14),可以取两段心,分别长25 mm,直径8 mm,尺寸150 mm×100 mm×300 mm,质量2.7 kg,经测试6 min钻进25 mm消耗能量36 kJ,功率10 W;取心时通过旋转内管剪切岩心进行采样^[13,46]。

(7)2005年欧洲航天局针对火星钻探研发的原型样机MRoSA2(图15),主要开发理念为:整合在采样车上能移动的钻进系统,整机包括一个采样车,一个目标深度为2 m的钻进系统,一个样品存储系统,一个平台和样品分离模块。整机400 mm长,16 kg重,其中主要钻进模块为DSS(Drilling and Sampling Subsystem)。该模块钻探尺寸严格限制为110 mm×110 mm×350 mm,质量限制为5 kg;通过10根钻杆组接可达2 m深度,钻杆以旋转盘安装在箱体内部,钻杆内径13 mm,外径15 mm;拟钻



(a) 钻机



(b) 钻具

图11 Apollo15~17系列任务使用的钻进机具^[13,20,45]

Fig.11 Drilling structure used in Apollo 15~17

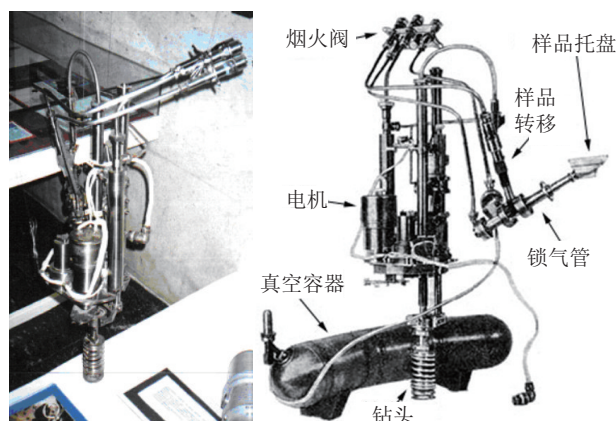
图12 GZU drill设备结构^[13]

Fig.12 GZU drill structure

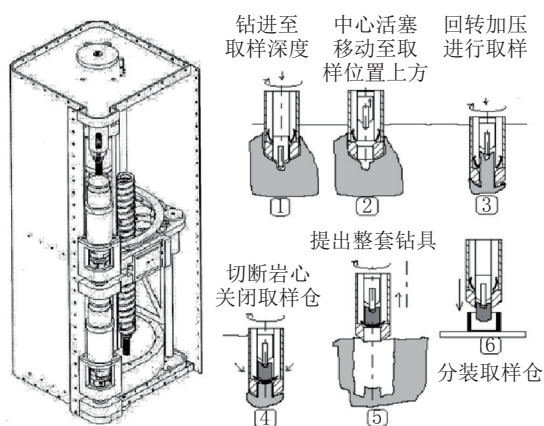
图13 Dee Dri 设备示意^[13]

Fig.13 Schematic of Dee Dri device

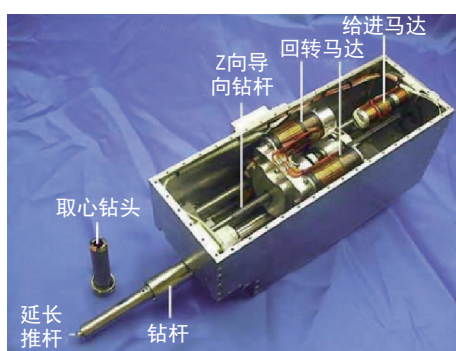
图14 Mini-Corer系统^[13, 46]

Fig.14 The Mini-Corer system

孔直径17 mm,获取10 mm直径和20 mm长岩心,使用硬质合金钻头,纯回转功率6 W,以30 N钻压足够在沙子和软质石灰岩中进行钻进,硬岩中钻进时需要增加40~60 W额外功率进行冲击^[13]。

(8)2008年美国NASA针对火星研发的MAR-

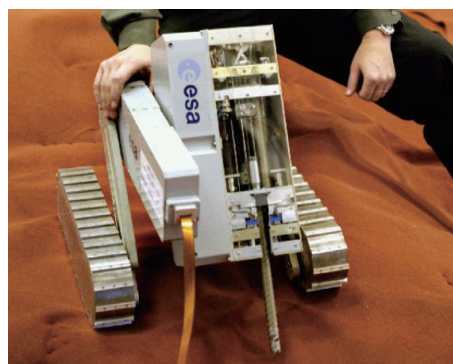
图15 MRoSA2样机^[13]

Fig.15 MRoSA2 prototype

TE试验系统(图16),整机尺寸2.1 m×0.58 m×0.77 m,质量55 kg,平均功率150 W,最大功率200 W,含1.5 m长的导杆和10根1 m长的钻柱,能够提供2670 N钻压,以最大150 r/min的转速和23.73 N·m的扭矩进行钻进,设计获取长250 mm、直径27 mm的岩心样品^[47-48]。

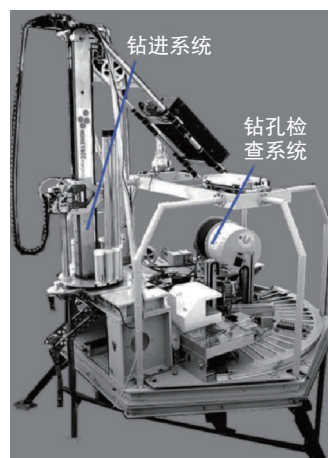
图16 MARTE试验系统^[47-48]

Fig.16 MARTE test system

(9)2009年中国北京航空航天大学研发了MRDD取样样机(图17),仍然采用多杆组接式实现深部钻探,但其换杆和下钻机构的结构非常高效和独特^[36]。

(10)2014年Honeybee公司为Mars2020计划研发的MicroDrill设备设计了双层管取样设备(图18),取样时偏心内管旋转切断岩心完成取样,并对应设计了钻头与取样管不分离,便于存储岩心的OBOC(One Bit One Core)系统^[49-50]。

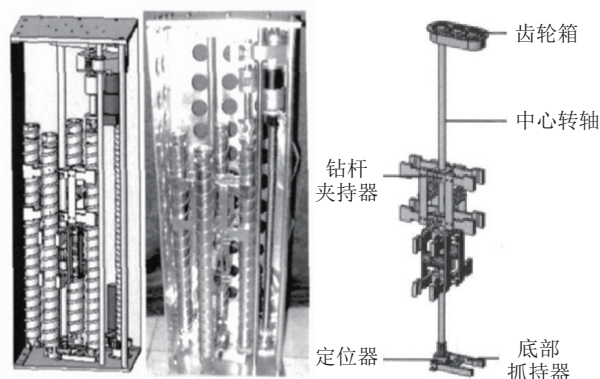
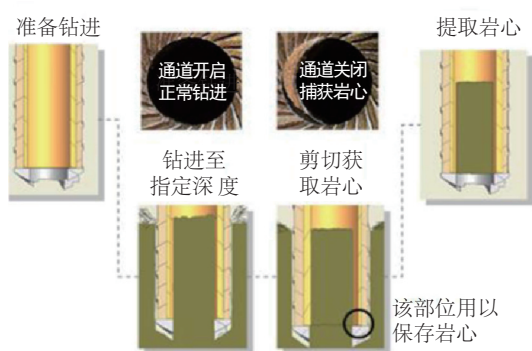
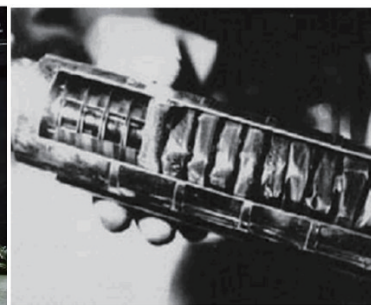
图 17 MRDD 取样样机^[36]

Fig.17 MRDD sample machine



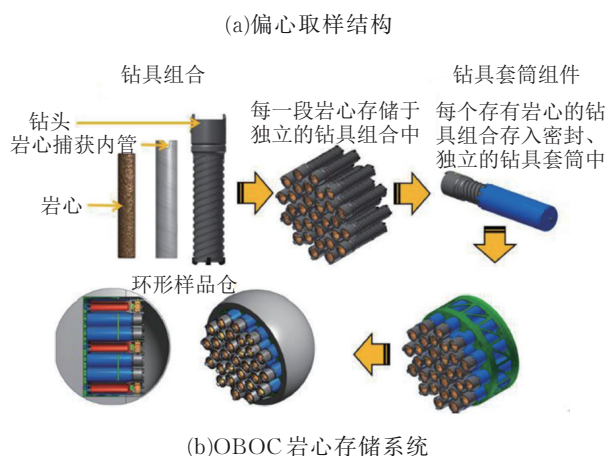
(a) 探测器



(b) 采样软袋

图 19 Luna 24 任务的取心装置^[13, 51]

Fig.19 Coring device of Luna 24



(b) OBOC 岩心存储系统

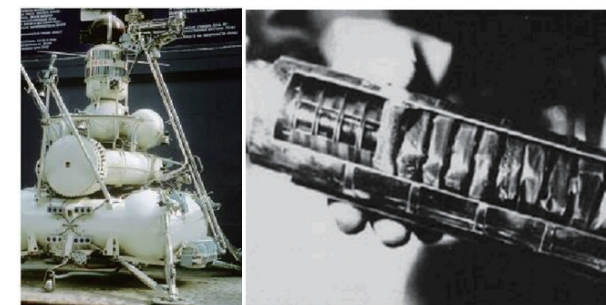
图 18 MicroDrill 双层管取样设备^[49-50]

Fig.18 MicroDrill double tube sampling equipment

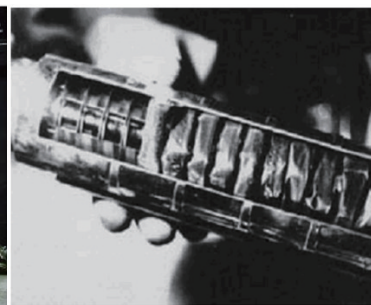
2.2.3 外螺旋内中空软袋取心式机具

外螺旋内中空软袋取心式钻具较为少见,迄今为止仅有前苏联 Luna 24 任务和中国嫦娥 5 号任务中进行过实地使用。如图 19 所示, Luna 24 探测器的取心装置相对之前有较大的改进,取心机构在空心钻杆内部,并不随钻杆一起转动,仅仅随钻杆做

进给运动。在钻进过程中,样品袋随着钻具运动包裹钻取月壤,样品袋与心管的内壁之间没有相对滑动。样品袋的一端固结钢丝绳,钢丝绳的另一端连接在整形机构上,钻取采样结束后,整形机构将样品袋从心管中拉出,并整形缠绕在回收卷筒上^[13, 51]。



(a) 探测器



(b) 采样软袋

图 19 Luna 24 任务的取心装置^[13, 51]

Fig.19 Coring device of Luna 24

中国嫦娥 5 号取样器的相关信息暂不明确,相关新闻报道如图 20 所示,其采用了带冲击功能的外螺旋、内中空软袋取心技术,整体钻探设备功率超过 1000 W,携带能够钻进 8 级硬岩的双排阶梯钻头,针对不同颗粒度月壤,该设备具有切、拨、挤、排能力^[52-53]。

得益于嫦娥 5 号的驱动,中国相关科研院所在这种采样方式上投入了相当的研发精力,哈尔滨工业大学、北京航空航天大学和中国地质大学(武汉)均有过类似样机的研发报道,如图 21 所示^[54-59]。哈尔滨工业大学先后研制了月壤样品取心过程模拟试验装置、钻取采样参数测试平台、热力耦合综合测试平台 3 种不同平台,其各自的钻进参数如表 4 所示^[60-62]。北京航空航天大学研发的样机设计采用螺旋钻杆外径 16.45 mm、内径 14.45 mm,钻头外径 17.75 mm、内径 7.7 mm,取心管外径 11.45 mm、内径 10 mm,设计钻进深度 2 m。中国地质大学(武汉)还设计了同时具备外螺旋与内拉软袋 2 种取心方式的联合机具^[63]。除基本的结构设计以外,国内各科研院所还就月球钻探机构的加载形式、钻头结构设计、取样层理分析、取样袋缠绕的动力仿真都进行了大量的研究分析^[64-82],受篇幅所限,本文不再展开。



图 20 嫦娥 5 号取样机具

Fig.20 Sample structure of Chang'e-5

表 4 哈尔滨工业大学研发月球钻探平台参数^[60]

平 台	有效行程/mm	回转功率/W	冲击功率/W	钻速/(mm•min ⁻¹)	转速/(r•min ⁻¹)	扭矩/N•m	钻压/N	冲击频率/Hz	冲击功/J
月壤样品取心过程模拟试验装置	400			手动加载	240				
钻取采样参数测试平台	2250	1000	750	0~200	0~300	0~30	0~1000	0~20	3.9
热力耦合综合测试平台	600	750	400	0~200	0~100	0~45	0~1000	0~20	2.6

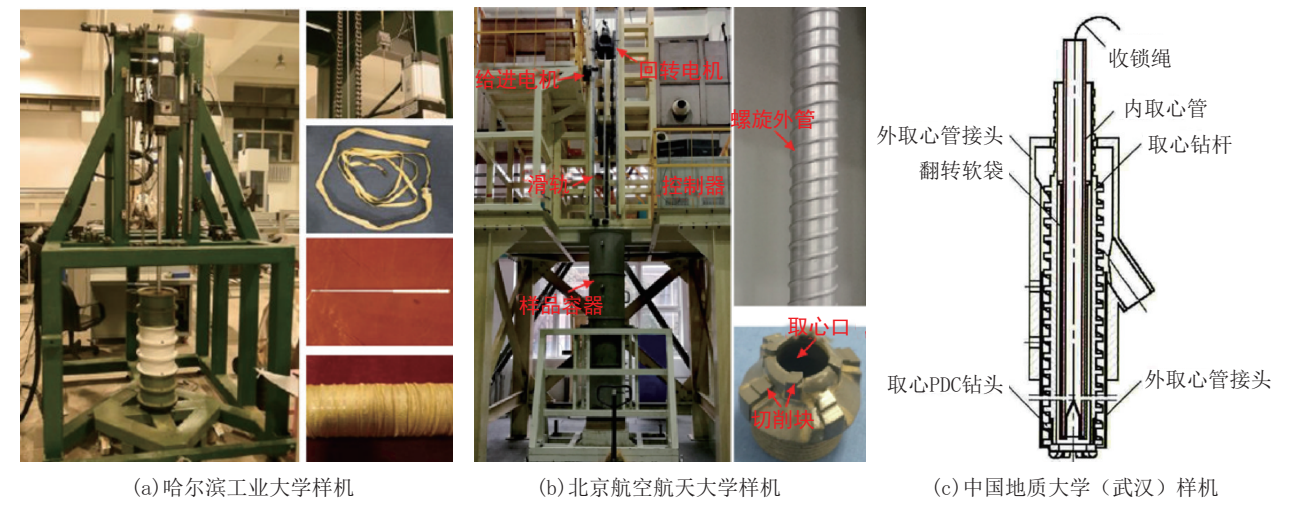


图 21 外螺旋内中空软袋取心采样样机

Fig.21 Coring sampling proto type with outer helix inner hollow soft bag

2.2.4 外螺旋内中空硬管取心式机具

目前可见报道的外螺旋内中空硬管取心式钻具主要针对小行星钻探设计,其中已发射的探测器包括 2004 年的 Rosetta 任务中 Philae 探测器上携带的 SD2(Sampler, Drill and Distribution)设备,设计钻进深度 230 mm,考虑到着陆器和彗星表面的距离,实际钻距 530 mm。自身为 4 自由度结构,总质量 5100 g,机械部分 3700 g,电子控制设备 1000 g,其余 400 g。电力消耗,待机 1.5 W,钻进时 6~14.5 W,采用聚晶金刚石钻头,钻压 100 N,采样尺寸 3 mg 或 20 mm³。其结构与采样流程如图 22 所示,在

钻进至指定深度后,内管伸出进行采样,然后提出钻具将内管样品放入样品分布处理机构完成采样^[11,83]。

北京航空航天大学于 2017 年也针对小行星钻进采样研发了 DSSHS 系统(Drilling, Sampling, and Sampling-Handling System),如图 23 所示,该系统设计尺寸 950 mm×330 mm×250 mm,整机质量 17 kg,采样深度 300 mm,设计钻压 50 N,样品密封压力 100 N,总共 16 个样品仓,每个样品仓能够容纳样品 35 mm³,最小采样硬度 6 级,平均功率 20 W,最大功率可达 45 W,单次钻进时间 2 h,钻孔直径 12 mm^[35]。

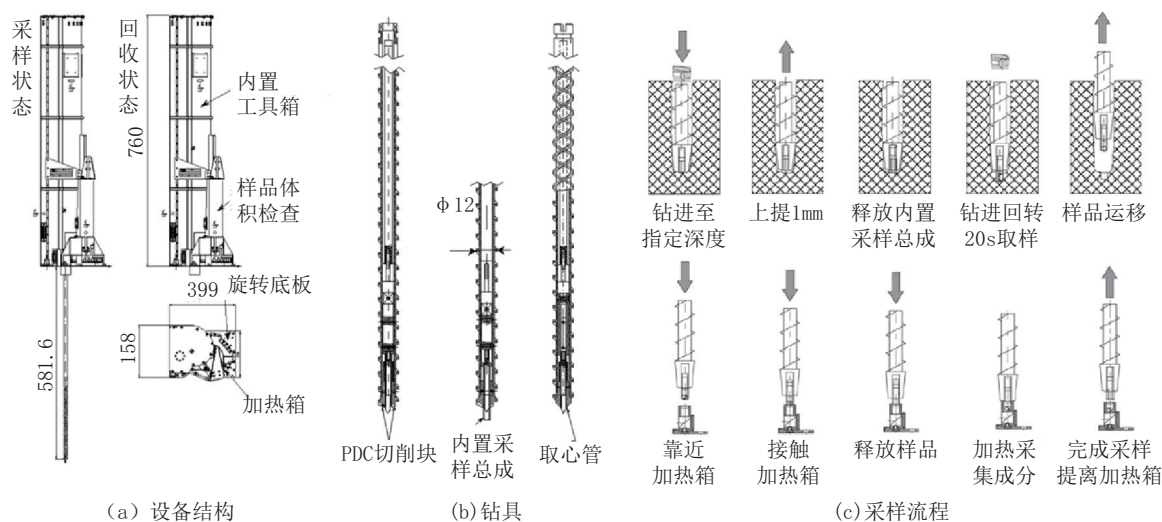
图22 Rosetta任务SD2采样设备^[11, 83]

Fig.22 SD2 sampling equipment of Rosetta

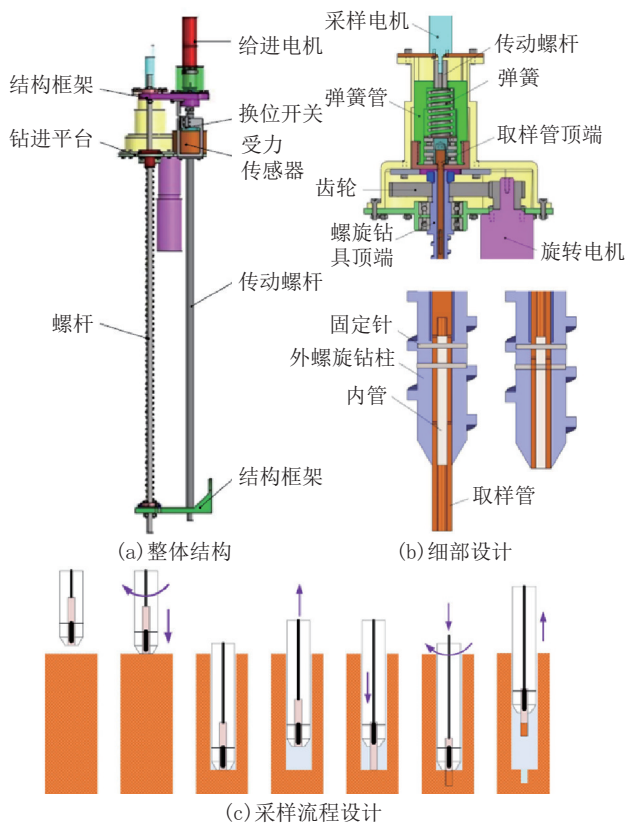
图23 DSSH系统^[35]

Fig.23 DSSH system

2.2.5 鼯鼠式钻进机具

在前4种钻进方式里,共同的特点在于都存在较长的钻柱,当钻进深度较大时上部钻柱的运动将耗费探测器珍贵的功率。因此鼯鼠式钻进机具应

应运而生,其研发的主要目的在于利用更小的功耗达到更大的钻进深度以及更远的钻进位置。相对于前4种钻进方式更贴近于垂直钻进的特点,鼯鼠式钻进方式由于其尺寸的优势可达到近似定向钻进的效果。自1999年以来,鼯鼠式钻进设备的研发不完全统计如下:

(1)1999年美国NASA在针对火星的Mars Polar Lander任务中首次研发了DS2(Deep Space 2)设备(图24),打开了鼯鼠式采样设备的先河^[13]。

(2)2003年欧洲航天局针对火星的Mars Express任务研发的Beagle2着陆器同样携带了鼯鼠式钻进设备PLUTO(PLANetary Underground TOol),如图25所示,设计钻进深度1.5 m,最远可移动3 m,自重900 g,总长280 mm,直径20 mm。设备前方设计锥角60°,回转同时能够提供冲击力,振动频率5 s/次。采样模式为提钻采样模式,一次下放到指定深度后采集样品回收,可采样0.24 cm³,收回时绞车回收速度1~5 mm/s^[13, 84]。

(3)2003年Honeybee公司也推出了IDDS系统(Inch-worm Deep Drilling System),如图26所示,该系统直径150 mm,长2 m,不取心,以前后蠕动式前进^[46]。

(4)2006年美国东北大学报道鼯鼠式钻进设备的样机RPDS(Robotic Planetary Drilling System),如图27所示,该设备整机50 kg,尺寸 $\Phi 150\text{ mm} \times 500\text{ mm}$,在570 W功率驱动下能提供2000 N钻压、57 N·m扭矩、20 r/min转速,额定钻进速率1~5

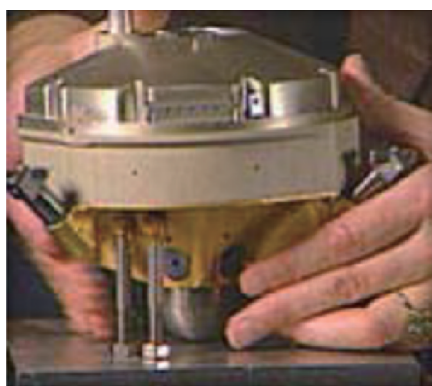
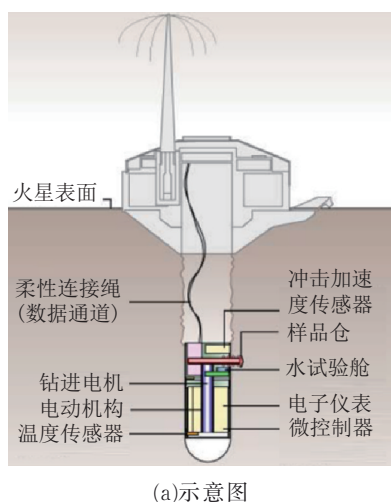
图24 DS2设备^[13]

Fig.24 DS2 equipment

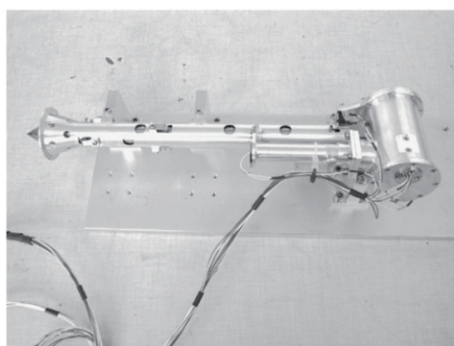
图25 PLUTO设备^[13, 84]

Fig.25 PLUTO equipment

mm/min。该系统自带的三自由度旋转推进单元可帮助设备退出钻孔,具备退出吐出岩屑的功能,在一定程度上可视为取心功能的实现^[85]。

(5)2009年日本研究生院大学和日本宇航局联合研发推出了SSD和CSD两款鼯鼠式钻进设备

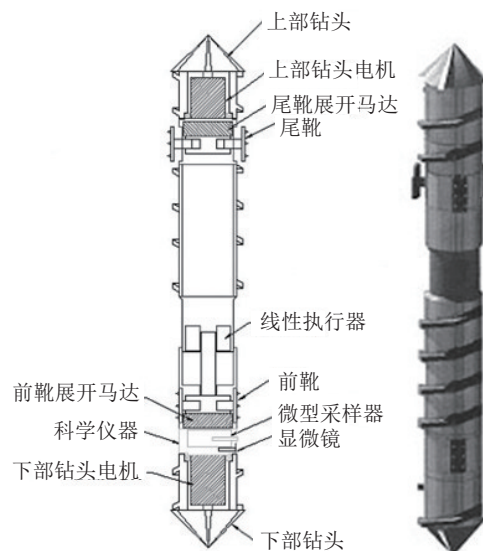
图26 IDDS系统^[46]

Fig.26 IDDS system

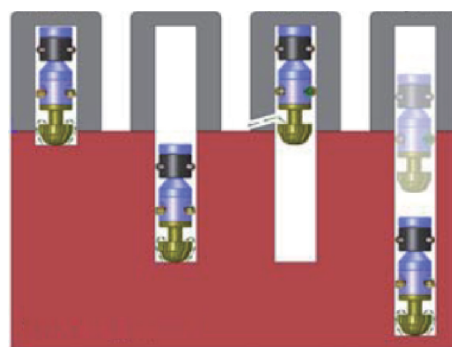
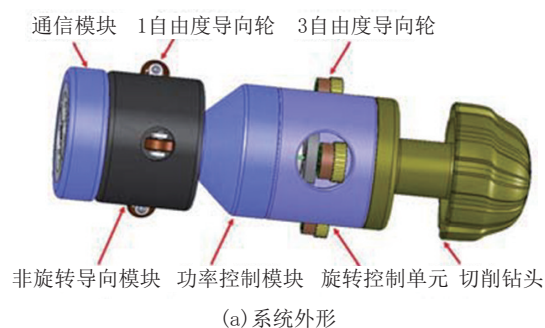
图27 RPDS系统^[85]

Fig.27 RPDS system

(图28~29)。两款设备总长均为50 mm,前端为锥形旋转头,底端最大外径50 mm,中值旋转外径30 mm,整机质量356~604 g(目前有记录的最小设备)。两款设备的主要区别在于前端锥形旋转头,其中SSD(Single Screw Drilling)设备是指设备前方

旋转头只能实现单向旋转,而CSD(Contra-rotor Screw Drilling)则创新性地实现了旋转方向相反的两段式锥形旋转头^[86]。

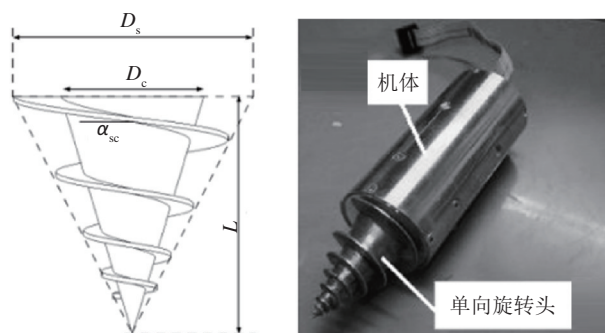


图28 CSD系统^[86]

Fig.28 CSD system

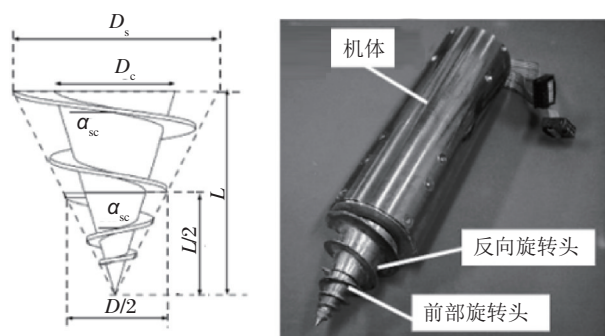


图29 SSD系统^[86]

Fig.29 SSD system

(6)2014年中国哈尔滨工业大学研制了蠕动掘进式潜入器样机(图30),整机质量4.1 kg,外形尺寸80 mm×560 mm。整机包含主副两个掘进单元,主掘进单元额定转速93.69 r/min,额定扭矩3.745 N·m,额定功率50 W;副掘进单元额定扭矩2.78 N·m,额定功率40 W;姿态控制单元定位力187.3~335.4 N;蠕动给进单元给进速度0.6 mm/s,单次给进行程60 mm,额定推力466.98 N^[87]。

(7)2016年美国喷气推进实验室(JPL)与Hon-

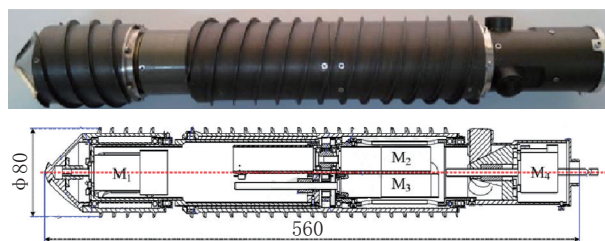


图30 哈尔滨工业大学蠕动式潜入器样机^[87]

Fig.30 Peristaltic submersible prototype of Harbin Institute of Technology

eybee公司联合推出了带冲击回转功能的长管式鼯鼠钻进设备Auto-Gopher钻具(图31),整机22 kg,1500 mm长(含带冲击功能、外径71 mm的钻头),在有线状态下能实现深达3 m的钻深。该设备通过锚固的方式提供钻压,能够以1600 N的力钻出锚孔,施加最大钻压1000 N,可以100 r/min的转速提供15.5 N·m的扭矩,实现直径60 mm,长100 mm的取心功能^[88-89]。



图31 Auto-Gopher钻具样机^[88-89]

Fig.31 Auto-Gopher drilling tool prototype

3 月球钻探效率评价及其影响因素

3.1 螺旋钻具钻屑输送效率

综合分析5种不同月球(行星)钻进机具可知,尽管取心方式不同,各种类型的设备其主导的钻进方式仍然是螺旋钻进为主,故螺旋钻具的钻屑输送效率是评价月球钻探效率的关键因素。在这方面,我国哈尔滨工业大学、北京航空航天大学均进行了较为深入的研究。

哈尔滨工业大学提出使用输送能力因子用以表征螺旋叶片清除岩屑的效率。通过理论分析和离散元模拟,证明螺旋钻的俯仰角、摩擦环境和螺旋槽边界等参数均会对螺旋叶片的输送效率产生影响,并且得到了经过优化的螺旋俯仰角约为15°~30°(具体值需要随环境变化而改变)。相关试验证明,在较低的俯仰角条件下,钻进系统的环境适应性更好,但输送效率降低;较高的俯仰角输送效率

增加,但环境适应性降低^[90]。

北京航空航天大学研究了螺旋叶片的输送动力学,并基于模拟月壤试验证明叶片携带岩屑颗粒的应力耦合效应对输送动力学起重要的作用。通过DEM离散元模拟了输送过程中颗粒的运动和应力特征,并以此为据建立了简化的动力学模型,试验、模拟与理论3个方面证实螺旋叶片的输送效率仅与转速成正比,与重力无关^[56]。同时,基于试验,北航以螺旋钻最大输送效率和取心量为目标,得到了优化的给进速率和转速的关系^[58]。

3.2 钻进规程参数

钻进规程参数也是影响钻进效率的重要因素,因此各国研究人员在这方面也进行了相关研究。加拿大北方先进技术中心(NORCAT)通过试验提出了在行星钻进过程中,钻进1 m深度时大致功率分布为:粉碎岩屑占总消耗功率的30%,钻柱的摩擦和岩屑运移占总消耗功率的50%,给进过程占比5%,而驱动损耗占比15%,且随钻进深度的增大,钻杆摩擦所消耗的能量会越来越大^[91]。由此可见钻柱减阻与提高螺旋叶片的传输效率是提高钻进效率的有效策略。

Honeybee公司除了研发机具外,就钻进规程也通过试验验证在指定钻压条件下,钻速和钻进能耗正比于转速,高转速同时也能提高排屑效率^[92-93]。除此以外,在研发Auto-Gopher钻具时,为防止产生没有冷却的条件下电动钻具自身过热的问题,Honeybee公司还进行了间歇性开关机与钻速之间效率的试验,如图32所示,5 s开机、5 s关机时钻速约为800 mm/h,1 s开机、1 s关机时钻速几乎与全功率运行(不关机)相同,达到约1500 mm/h。由此可见,若间歇开关机的效率与持续开机的效率相同,则在功率受限的条件下间歇开关机不失为节省能源的选项之一^[89]。

中国地质大学(武汉)通过试验指出,月球钻探过程中钻压和转速对钻进功率消耗的影响显著,当钻速恒定,转速增大8倍(由40 r/min增长至320 r/min)时,钻进功率增大14.3倍(由11.3 W增长至172.88 W);当转速(320 r/min)、钻速(100 mm/min)与钻深(2 m)均恒定时,钻压增大10倍(由100 N增长至1000 N)功率仅增加1.09倍(由153.42 W增长至320.33 W)。由此可见,转速是影响月球钻探功率消耗的核心因素。但试验同时指出,转速的

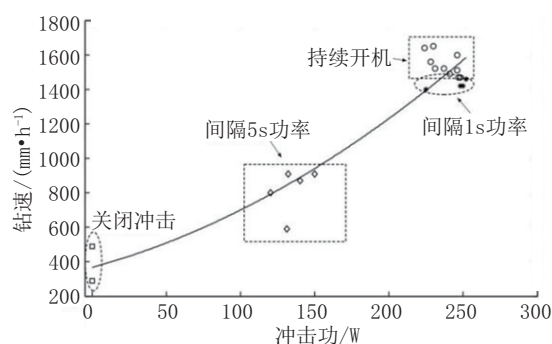


图32 Auto-Gopher钻具间歇开关机钻速效率分析^[89]

Fig.32 Analysis of drilling efficiency of intermittent switch machine based on Auto-Gopher

变化与取心率之间并无显著关联,因此在实际钻进中,应在保证钻进排屑正常的条件下,采用相对较低的转速进行钻进,此时对功耗的需求较低,且转速偏低时钻具对内管中的取心样品扰动也更小^[94]。同时,还研究了钻进规程参数(钻压、转速、给进速度)和钻具结构参数(螺旋叶片升角、钻头外径、螺旋叶片宽度)对钻进功率的影响规律,并提出了钻具结构的优化设计思路和钻进规程参数优选原则。除此以外,还总结和分析了月球钻探取样过程中可能出现的4种典型钻进事故模式,即岩心堵塞不进尺、卡钻、埋钻和烧钻,并分别对其形成机理、事故识别与预处理进行了分析^[95-98]。

4 总结与展望

作为距离地球最近的星体,月球在深空探测中的地位无可撼动。分析采集回的样品是了解月球乃至太阳系相关地质结构等信息最有效的途径。为了确定月球(行星)的地质构成,为了寻找现存或过去的微生物(水源)的证据,仅凭地表的样品无法满足要求,必须采集数米到数百米深度的地下地质样品。在这样的需求条件下,钻进是最有效的采样方式,迄今为止全世界所有计划和实施的采样任务中均涉及包含了钻探采样设备。因此钻进技术无疑是当前月球探测与未来深空探测不可或缺的技术手段。

据此,本文针对当前月球钻探采样的对象、环境、机具与钻进效率评估进行了相关文献资料的调研与统计分析。从中可以看出,常规钻探技术储备仅能够满足实现月球钻探动作,但月球钻探任务的设计研发过程中,就其中不可或缺的钻进效率分

析、钻进能耗控制、高效规程参数优化等关键环节而言,在月球极端环境下,这些关键环节需要考虑的影响因素与地球截然不同。综上所述,可展望在未来月球(深空)钻探相关任务中,钻探技术需要发展的几个方向为:

(1)研发多元化的钻探取样方法:可根据任务的特点、钻探对象的属性、探测器功耗等影响因素有针对性地选用最合适的钻探方法;

(2)研发多元化的钻进取心结构:可根据不同的钻探环境(低温、低压、电磁干扰等)和不同的取样要求(质量、数量、层理、深度等),可实现有针对性地选用不同的钻进取心结构,同时各取心结构的运动与采样机理也需要建立对应的量化分析模型;

(3)研发钻探过程中工况识别相关技术:面对陌生的地外钻探环境,对周围环境、钻进地层、以及机具自身工况的分析识别技术,是保证地外钻探采样不可或缺的技术,准确的工况识别技术能够最大程度地保护设备在遭遇极端情况时及时采取相关的对应措施;

(4)研发具有高度自适应的无人自动控制技术:我国针对地外行星的钻探探索一定是无人自动采样探测器优先,故能够进行自动探测、分析、决策的钻探采样设备不可或缺。

参考文献(References):

- [1] 林杨挺,欧阳自远.地球化学发展新机遇:嫦娥5号月球样品研究[C]//中国矿物岩石地球化学学会第九次全国会员代表大会暨第16届学术年会.西安,2017.
LIN Yangting, OUYANG Ziyuan. New opportunities for geochemistry development: research on Chang'e 5 moon samples [C]//The Ninth National Congress of Chinese Society of Mineralogy, Petrology and Geochemistry and the 16th Annual Academic Conference. Xi'an, 2017.
- [2] 尹怀勤,王洪鹏.飞向月球——嫦娥工程[J].军事文摘,2016(22):34-37.
YIN Huaqin, WANG Hongpeng. Flying to the moon—Chang'e Project[J]. Military Abstracts, 2016(22):34-37.
- [3] GALIMOV E M. Luna—Glob project in the context of the past and present lunar exploration in Russia[J]. Journal of Earth System Science, 2005,114(6):801-806.
- [4] LAWLER A. The new race to the moon[J]. Science, 2003,300(5620):724-727.
- [5] MATSUMOTO K, KAMIMORI N, TAKIZAWA Y, et al. Japanese lunar exploration long-term plan[J]. Acta Astronautica, 2006,59(1-5):68-76.
- [6] NAJA G. The second report by ESA's Long-Term Space Policy Committee (LSPC)[J]. Esa Bulletin-European Space Agency, 2000,102:87-90.
- [7] NEAL C R. The moon 35 years after Apollo: What's left to learn?[J]. Chemie der Erde-Geochemistry, 2009,69(1):3-43.
- [8] 姜生元,沈毅,吴湘,等.月面广义资源探测及其原位利用技术构想[J].深空探测学报,2015(4):291-301.
JIANG Shengyuan, SHEN Yi, WU Xiang, et al. Technical schemes of investigation and in-situ utilization for lunar surface generalized resources [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2015(4):291-301.
- [9] TAYLOR G J, WARREN P, RYDER G, et al. Lunar source book: A user's guide to the moon[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
- [10] 谢开钰.钛铁矿及月壤仿真样提取金属及制备氧气[D].沈阳:东北大学,2016.
XIE Kaiyu. Extracting of metal and oxygen from ilmenite and lunar soil simulant composite oxides[D]. Shenyang: Northeastern University, 2016.
- [11] MAGNANI P, RE E, SENESE S, et al. Different drill tool concepts[J]. Acta Astronautica, 2006,59:1014-1019.
- [12] ZACNY K, COOPER G. Strategies for drilling on Mars[J]. Journal of Geophysical Research, 2005,1(1):1-10.
- [13] ANTTILA M. Concept evaluation of Mars drilling and sampling instrument[D]. Helsinki: Helsinki University of Technology Laboratory of Space Technology, 2005.
- [14] 李谦.模拟月壤表层采样理论模型及其应用研究[D].武汉:中国地质大学(武汉),2014.
LI Qian. Research and application on surface sampling theoretical model based on lunar soil simulant[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2014.
- [15] KING R H, Van SUSANTE P, GEFREH M A. Analytical models and laboratory measurements of the soil-tool interaction force to push a narrow tool through JSC-1A lunar simulant and Ottawa sand at different cutting depths[J]. Journal of Terramechanics, 2011,48(1):85-95.
- [16] 科万科B.B.,卢斯秋克H.Г.,科米斯萨尔丘克A.A.月壤特性与开发技术[M].北京:国防工业出版社,2013.
KOVANKE B. B., Г. LUSTYUK H., KOMISSARCHUK A. A. Lunar soil characteristics and development technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- [17] 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,2004,24(4):14-19.
ZHENG Yongchun, OUYANG Ziyuan, WANG Shijie, et al. Physical and mechanical properties of lunar regolith[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2004,24(4):14-19.
- [18] CARRIER W. Particle size distribution of lunar soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003,129:956-959.
- [19] KATAGIRI J, MATSUSHIMA T, YAMADA Y, et al. In-

- vestigation of 3D grain shape characteristics of lunar soil retrieved in Apollo 16 using image-based discrete-element modeling [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2014, 28 (4): 4014092.
- [20] PITCHER C. Advancing the dual reciprocating drill design for efficient planetary subsurface exploration[D]. Surrey: University of Surrey, 2016.
- [21] Planetary Simulant Database[EB/OL]. [2020.3.11]. <https://sciences.ucf.edu/class/planetary-simulant-database/>.
- [22] GREEN A, MELZER K. Performance of boeing LRV wheels in a lunar soil simulant; Effect of wheel design and soil, M-71-10 [R]. Army Engineering Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 1971.
- [23] TANG H, LI X, ZHANG S, et al. A lunar dust simulant: CLDS-i[J]. *Advances in Space Research*, 2016, 59(4): 1156-1160.
- [24] 樊世超, 贾阳, 向树红, 等. 月面地形地貌环境模拟初步研究[J]. *航天器环境工程*, 2007, 24(1): 15-20.
FAN Shichao, JIA Yang, XIANG Shuhong, et al. A preliminary study on simulation of lunar surface terrain[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2007, 24(1): 15-20.
- [25] 江磊, 苏波, 王长科, 等. LBD模拟月壤研究[C]//中国宇航学会深空探测技术专业委员会第七届学术年会. 哈尔滨, 2010.
JIANG Lei, SU Bo, WANG Changke, et al. Study on LBD soil simulant [C]//The 7th Annual Conference of the Deep Space Exploration Technology Professional Committee of Chinese Astronautical Society. Harbin, 2010.
- [26] 李建桥, 邹猛, 贾阳, 等. 用于月面车辆力学试验的模拟月壤研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(6): 1557-1561.
LI Jianqiao, ZOU Meng, JIA Yang, et al. Lunar soil simulant for vehicle-terramechanics research in labtory [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(6): 1557-1561.
- [27] 刘德赞, 王露斯, 孙启臣, 等. 月球极区冻土模拟月壤钻进试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(25): 256-261.
LIU Deyun, WANG Lusi, SUN Qichen, et al. Drilling experiment of simulated icy soil of lunar polar region [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(25): 256-261.
- [28] 邹维列, 陈轮, 张俊峰, 等. 低围压水平下QH-E模拟月壤三轴试验技术与力学特性[J]. *岩土工程学报*, 2015(8): 1418-1425.
ZOU Weilie, CHEN Lun, ZHANG Junfeng, et al. Techniques for triaxial compression tests on simulant lunar soil QH-E and its mechanical behaviors under low confining stress[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015(8): 1418-1425.
- [29] BRUNSKILL C, LAPPAS V. The effect of relative soil density on microrover trafficability under low ground pressure conditions [C]//Proceedings of the 2009 International Society for Terrain and Vehicle Systems (ISTVS) European Conference, 2009.
- [30] 赵德明. 月壤钻进排屑模型与曲面螺旋式取心钻具研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- ZHAO Deming. Research on lunar soil chip removing model and lunar subsurface coring drill[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [31] ZHANG T, XU K, YAO Z, et al. The progress of extraterrestrial regolith-sampling robots[J]. *Nature Astronomy*, 2019, 3(6): 487-497.
- [32] BADESCU V, ZACNY K. Outer solar system: Prospective energy and material resources[M]. Springer, 2018.
- [33] PIKE W, STAUFER U, HECHT M, et al. Quantification of the dry history of the Martian soil inferred from in situ microscopy[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38: L24201.
- [34] GAO Y. Contemporary planetary robotics: An approach toward autonomous systems[M]. John Wiley & Sons, 2016: 1-410.
- [35] ZHANG T, ZHANG W, WANG K, et al. Drilling, sampling, and sample-handling system for China's asteroid exploration mission[J]. *Acta Astronautica*, 2017, 137: 192-204.
- [36] 丁希仑, 李可佳, 尹忠旺. 面向月壤采集的多杆深层采样器[J]. *宇航学报*, 2009, 30(3): 1189-1194.
DING Xilun, LI Kejia, YIN Zhongwang. Multi-rod deep drill-er for lunar subsurface sampling [J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(3): 1189-1194.
- [37] BONITZ R, SHIRAISHI L, ROBINSON M, et al. NASA Mars 2007 Phoenix lander robotic arm and icy soil acquisition device[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: E1A.
- [38] PAULSEN G, ZACNY K, MCKAY C, et al. Rotary-percussive deep drill for planetary applications[C]//Earth and Space 2010: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments, 2010.
- [39] GROTZINGER J, CRISP J, VASAVADA A, et al. Mars science laboratory mission and science investigation[J]. *Space Science Reviews*, 2012, 170: 5-56.
- [40] ANDERSON R, JANDURA L, OKON A, et al. Collecting samples in gale crater, Mars: An overview of the Mars science laboratory sample acquisition, sample processing and handling system[J]. *Space Science Reviews*, 2012, 170: 57-75.
- [41] MCKAY C, STOKER C, GLASS B, et al. The Icebreaker life mission to Mars: A Search for biomolecular evidence for life [J]. *Astrobiology*, 2013, 13(4): 334-353.
- [42] ZACNY K, PAULSEN G, MCKAY C P, et al. Reaching 1m deep on Mars: The Icebreaker drill[J]. *Astrobiology*, 2013, 13: 1166-1198.
- [43] GLASS B, LEE P, HUFFMAN S, et al. Testing of Mars-prototype drills at an analog site [C]//Earth and Space 2014: Engineering for Extreme Environments, 2014.
- [44] ZACNY K, PAULSEN G, KLEINHENZ J, et al. Development and testing of a lunar prospecting drill (LPD) to search for water-ice[C]//Earth and Space 2014: Engineering for Extreme Environments, 2014.

- [45] ZACNY K, PAULSEN G, SZCZESIAK M, et al. Lunar Vadder: Development and testing of lunar drill in vacuum chamber and in lunar analog site of antarctica[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2013,26:74-86.
- [46] GOREVAN S, MYRICK T, MUKHERJEE S, et al. Strategies for future Mars exploration: An infrastructure for the near and longer-term future exploration of the subsurface of Mars [C]//6th International Conference on Mars, 2003.
- [47] STOKER C, CANNON H, DUNAGAN S, et al. The 2005 MARTE robotic drilling experiment in Rio Tinto, Spain: objectives, approach, and results of a simulated mission to search for life in the Martian subsurface[J]. Astrobiology, 2008, 8: 921-945.
- [48] CANNON H, STOKER C, DUNAGAN S, et al. MARTE: Technology development and lessons learned from a Mars drilling mission simulation [J]. J. Field Robotics, 2007, 24: 877-905.
- [49] ZACNY K, MUELLER R, EBERT T, et al. MicroDrill sample acquisition system for small class exploration spacecrafts [C]//Earth and Space 2014: Engineering for Extreme Environments, 2014.
- [50] ZACNY K, CHU P, DAVIS K, et al. Mars 2020 sample acquisition and caching technologies and architectures[C]//2014 IEEE Aerospace Conference, 2014.
- [51] 张建斐. 月壤钻取采样钻具进给机构动力学仿真分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- ZHANG Jianfei. Dynamic simulation analysis of drill feeding mechanism for lunar soil sampling[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [52] 嫦娥五号月面作业什么最难?[EB/OL]. [2020-12-21]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/328689463>.
- What is the most difficult task for the lunar surface of Chang'e 5?[EB/OL]. [2020-12-21]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/328689463>.
- [53] 为了月球这抔土,嫦娥五号有多拼[EB/OL]. [2020-12-21]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_10248158.
- Chang'e 5 has more spells to squeeze the earth on the moon, [EB/OL]. [2020-12-21]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_10248158.
- [54] ZHANG T, DING X. Drilling forces model for lunar regolith exploration and experimental validation[J]. Acta Astronautica, 2016,131:190-203.
- [55] ZHANG T, DING X, LIU S, et al. Experimental technique for the measurement of temperature generated in deep lunar regolith drilling [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019,129:671-680.
- [56] CHEN T, ZHEN Z, SCHWARTZ S, et al. Invariance of conveying capacity for drilling into lunar soil simulant[J]. Advances in Space Research, 2019,64:1816-1824.
- [57] CHEN T, ZHEN Z, WANG Q, et al. Modeling and experimental investigation of drilling into lunar soils [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2019,40:153-166.
- [58] ZHAO Z, CHEN T, PANG Y. Optimum parameter matching obtained by experiments for coring drilling into lunar simulant [J]. Advances in Space Research, 2019,63:2239-2244.
- [59] QIQUAN Q, TANG J, YUAN F, et al. Drilling load modeling and validation based on the filling rate of auger flute in planetary sampling[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2016,30:434-446.
- [60] 吴森. 月壤钻探取心机构性能测试系统研制及试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- WU Miao. Development and experimental study of drilling & coring mechanism for lunar soil test system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [61] 王清川. 钻取采样参数测试平台研制及试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- WANG Qingchuan. Development and experimental study of drilling & sampling test-bed[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [62] 张禹. 滑轨式月壤钻取采样装置关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- ZHANG Yu. Research on the key technologies of drilling-sampling system of slide-type for lunar soil [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [63] 李大佛, 雷艳, 许少宁. 月球钻孔取心机具研制与试验[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2015, 42(2): 1-7.
- LI Dafo, LEI Yan, XU Shaoning. Development of lunar coring tools and the experiment [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015,42(2):1-7.
- [64] 柏德恩. 基于单刃切削模型的钻具与月壤相互作用特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- BAI Deen. Research of interaction between lunar regolith and drilling tool based on single-blade cutting model [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [65] 李操. 基于机械臂的月壤挖掘采样及力学参数辨识的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- LI Cao. Study of lunar soil excavation acquisition and mechanical parameters identification based on robot arm [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [66] 孟炜杰, 曾婷, 刘丽, 等. 用于深层月壤采样返回的软质取心袋的设计与测试验证[J]. 航天器环境工程, 2014, 31(1): 88-91.
- MENG Weijie, ZENG Ting, LIU Li, et al. Design and test verification of soft extraction bag used for deep lunar soil sampling and return [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2014,31(1):88-91.
- [67] 战庆欣. 月面钻进采样过程钻具热特性实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- ZHAN Qingxin. Experimental research on the drilling tool's thermal characteristics during lunar surface's drilling and sampling[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [68] 刘天喜, 魏承, 马亮, 等. 月壤钻采取样方式对样品层理的影响

- [J].农业机械学报,2014,45(12):355-361.
- LIU Tianxi, WEI Cheng, MA Liang. Influence of coring methods on sample bedding in lunar soil drill-sampling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12):355-361.
- [69] 班海娟. Kevlar一体化拉绳-取芯软袋结构设计及紫外防护[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- BAN Haijuan. Structure design of integrated rope-coring soft bag and ultraviolet protection [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [70] 胡翔凯. 表镶CBN钻头研制及其岩石钻进负载特性实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- HU Xiangkai. Development of surface set CBN drilling bit and experimental study of rock drilling load characteristics [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [71] 史迎利,赵振. 关于月壤钻进的动力学特性研究[C]//第九届全国多体系统动力学暨第四届全国航天动力学与控制学术会议. 武汉,2015.
- SHI Yingli, ZHAO Zhen. Research on the dynamic characteristics of lunar soil drilling[C]//The 9th National Multibody System Dynamics and the 4th National Conference on Aerospace Dynamics and Control. Wuhan, 2015.
- [72] 马亮. 深层采样全过程月壤样品层理保持特性分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- MA Liang. Analysis on maintaining stratification retention characteristics in the entire sampling process for deep lunar regolith [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [73] 田野. 双螺旋阻隔式月壤取芯钻具设计及其性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- TIAN Ye. Study on performance and design of the double spiral auger and barrier-type lunar soil coring drill [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [74] 高阳. 月壤钻取采样装置加载机构设计与研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- GAO Yang. Design and research of lunar soil drilling load mechanism[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [75] 张小丹. 月壤钻取采样钻进导向机构设计与分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- ZHANG Xiaodan. Design and analysis of drilling guiding mechanism for drilling-sampling soil [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [76] 赵超. 取芯软袋内翻提拉过程的相关分析与实验[D]. 天津:天津工业大学,2016.
- ZHAO Chao. Correlation analysis and experiment of the inward pulling process of the cored soft bag[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2016.
- [77] 魏妹. 月壤样品袋整形缠绕过程动力学仿真[D]. 大连:大连理工大学,2017.
- WEI Mei. Dynamic simulation of lunar soil sample bag reshaping process [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [78] 张利新,刘天喜,张鼎,等. 月壤钻取与整形过程中样品层理保持特性分析[J]. 航天器工程,2017,26(2):45-52.
- ZHANG Lixin, LIU Tianxi, ZHANG Nai, et al. Analysis on stratification retention characteristics in lunar soil drilling and shaping process[J]. Spacecraft Engineering, 2017,26(2):45-52.
- [79] 李鹏. 月岩取芯钻头及其低作用力高效能钻进特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
- LI Peng. Research on efficient drilling characteristic of lunar regolith coring bit with low acting force[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [80] 马如奇,姜水清,刘宾,等. 月球采样机械臂系统设计及试验验证[J]. 宇航学报,2018,39(12):1315-1322.
- MA Ruqi, JIANG Shuiqing, LIU Bin, et al. Design and verification of a lunar sampling manipulator system[J]. Journal of Astronautics, 2018,39(12):1315-1322.
- [81] 刘德赞,王迎春,张鼎,等. 月壤钻进加载机构的研制与控制性能研究[J]. 电子测量技术,2018,41(17):7-14.
- LIU Deyun, WANG Yingchun, ZHANG Nai, et al. Development and control performance research of loading mechanism for lunar soil drilling[J]. Electronic Measurement Technology, 2018,41(17):7-14.
- [82] 丁作伟. 钻进取样用管状织物的成形及其回折抽拔行为的表征[D]. 上海:东华大学,2018.
- DING Zuowei. The formation of tubular fabrics for drilling and sampling and its characterization of pull-out behaviour [D]. Shanghai: Donghua University, 2018.
- [83] FINZI A, BERNELLI-ZAZZERA F, DAINESE C, et al. SD2—How to sample a comet [J]. Space Science Reviews, 2007,128:281-299.
- [84] RICHTER L, COSTE P, GROMOV V V, et al. Development and testing of subsurface sampling devices for the Beagle 2 Lander[J]. Planetary and Space Science, 2002,50:903-913.
- [85] LIU Y, WEINBERG B, MAVROIDIS C. Mechanical design and modelling of a robotic planetary drilling system[C]// ASME 2006 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2006.
- [86] NAGAOKA K, KUBOTA T, OTSUKI M, et al. Experimental analysis of a screw drilling mechanism for lunar robotic subsurface exploration[J]. Advanced Robotics, 2010,24:1127-1147.
- [87] 张伟伟. 蠕动掘进式潜器潜行特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- ZHANG Weiwei. Research on penetrating characteristics of a creepy-boring penetrator [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [88] BAR-COHEN Y, ZACNY K, BADESCU M, et al. The Auto-Gopher—A wireline rotary-percussive deep sampler [C]// Earth and Space 2016: Engineering for Extreme Environments, 2016.
- [89] BAR-COHEN Y, ZACNY K, BADESCU M, et al. Au-

- to-Gopher-2—Wireline deep sampler driven by percussive piezoelectric actuator and rotary EM motors[J]. Advances in Science and Technology, 2016,100:207-212.
- [90] ZHAO D, TANG D, XUYAN H, et al. Soil chip convey of lunar subsurface auger drill[J]. Advances in Space Research, 2016,57:2196-2203.
- [91] FULFORD P, JESSEN S, HARRIS C, et al. Sample acquisition, processing and handling systems for future Mars missions[J]. Acta Astronautica, 2007,61:1061-1065.
- [92] ZACNY K, COOPER G. Considerations, constraints and strategies for drilling on Mars[J]. Planetary and Space Science, 2006,54:345-356.
- [93] ZACNY K, BAR-COHEN Y, BRENNAN M, et al. Drilling systems for extraterrestrial subsurface exploration[J]. Astrobiology, 2008,8:665-706.
- [94] 李大佛,殷参,雷艳,等.月球钻孔取心机具试验与钻进规程[J].地球科学,2016(9):1611-1618.
LI Dafo, YIN Shen, LEI Yan, et al. Coring tests of core drilling tool and analysis of drilling parameters[J]. Earth Science, 2016,41(9):1611-1618.
- [95] 谭松成.基于模拟月壤的螺旋钻进机理研究与事故分析[D].武汉:中国地质大学(武汉),2013.
TAN Songcheng. Study of auger drilling mechanism and failure analysis based on simulated lunar soil[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2013.
- [96] TAN S, DUAN L, GUO Z, et al. Theoretical derivation of the cuttings transportation trajectory for lunar sampling auger drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016,86:204-209.
- [97] DUAN L, TAN S, GAO H. Study on auger drilling technology for sampling drilling in the lunar simulants[J]. Procedia Engineering, 2014,73:212-217.
- [98] 谭松成,段隆臣,黄帆,等.模拟月壤螺旋钻进力载特性分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(9):81-84.
TAN Songcheng, DUAN Longchen, HUANG Fan, et al. Mechanics and power analysis of auger drilling based on simulated lunar soil[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014,41(9):81-84.

(编辑 周红军)

2020年度《探矿工程(岩土钻掘工程)》期刊高影响力学术论文

本刊讯 基于论文被引和下载数量,编辑部对本刊2018—2020年刊登的论文进行统计打分,评选出了“2020年度《探矿工程(岩土钻掘工程)》期刊高影响力学术论文”(TOP10),名单如下:

论文题目	作者	年,卷(期)	作者单位
地质钻探工程的发展历程与展望——回顾探矿工程事业70年	王达,赵国隆,左汝强,孙建华,周红军,张林霞,李艺	2019,46(9)	中国地质调查局;自然资源部;中国地质科学院勘探技术研究所;《探矿工程(岩土钻掘工程)》编辑部;中国地质学会探矿工程专业委员会
深部地质钻探钻孔结构与施工分析	杨芳,陈师逊	2019,46(11)	山东省第三地质矿产勘察院
我国实施大洋钻探工程的初步设想	叶建良,张伟,谢文卫	2019,46(2)	中国地质调查局广州海洋地质调查局;中国地质调查局;中国地质科学院勘探技术研究所
页岩气储层脆性评价方法研究现状	张宜	2019,46(7)	建材成都地质工程勘察院有限公司
4000 m交流变频电驱岩心钻机的研制及其在地热井的工程应用	刘凡柏,高鹏举,任启伟,沈怀浦,臧臣坤,李文秀,汤小仁,伍晓龙,高明帅	2018,45(10)	中国地质科学院勘探技术研究所;中国地质装备集团有限公司
水平定向钻进虚拟仿真培训系统研究	彭博,胡远彪	2019,46(1)	中国地质大学(北京)工程技术学院;国土资源部深部地质钻探技术重点实验室
智能化自动化钻探技术与装备发展概述	薛倩冰,张金昌	2020,47(4)	中国地质科学院勘探技术研究所
恶性漏失地层堵漏技术研究	李锦峰	2019,46(5)	中石化江汉石油工程公司钻井二公司
聚合物凝胶堵漏剂在大裂隙溶洞地层中的研究及应用	左文贵,朱林,吴兵良,廖光明	2018,45(9)	有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室;有色资源与地质灾害探查湖南省重点实验室;中南大学地球科学与信息物理学院;湖南煤田地质第一勘探队
国内外冰碛湖溃决研究进展	刘建康,周路旭	2018,45(8)	中国地质科学院探矿工艺研究所;中国地质调查局地质灾害防治技术中心

请获奖作者尽快与编辑部联系,提供联系地址和联系电话,编辑部将免费邮寄证书。

联系电话:0316-2096324 E-mail:396981878@qq.com。