

月球钻探模拟试验及技术展望

陈浩文¹, 冉恒谦², 王艳丽¹, 梁健¹, 许本冲¹, 王林清^{*1}

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000; 2. 中国地质科学院, 北京 100037)

摘要:月球一直以来是人类太空探测的主要对象。月球钻探是获取月球地层信息最为直观的方法,也是人类探测月球主要的手段之一。本文介绍了目前国内外月球钻探的技术现状,归纳出月球钻探的主要技术挑战,并以此针对性研制了月球钻探模拟试验台以及相关试验钻杆。通过开展针对不同螺距、钻压、转速、冲击频率等参数的钻探试验,总结出适用于月球钻探的工艺参数及适配钻杆。最后,本文结合模拟试验结果,对未来月球钻探技术的发展进行了思考,以期对相关研究提供有益的借鉴。

关键词:月球钻探;技术挑战;钻探工艺;模拟试验;技术展望

中图分类号:P634;P184 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)S1-0192-08

Lunar drilling simulation experiments and technical prospects

CHEN Haowen¹, RAN Hengqian², WANG Yanli¹, LIANG Jian¹, XU Benchong¹, WANG Linqing^{*1}

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;

2. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The moon has always been the main object of human space exploration. Lunar drilling is the most intuitive method for obtaining lunar geological information and one of the main means for human exploration of the moon. This article introduces the current technological status of lunar drilling both domestically and internationally, summarizes the main technical challenges of lunar drilling, and develops a lunar drilling simulation test bench and experimental drilling pipes based on this. The process parameters and suitable drilling pipes suitable for lunar drilling were summarized by conducting drilling experiments targeting different parameters such as pitch, drilling pressure, rotational speed, and impact frequency. Finally, the article considers the development of future lunar drilling technology based on simulation test results, in order to provide useful reference for related research.

Key words: lunar drilling; technical challenges; drilling technology; simulation experiments; technical prospects

0 引言

作为离地球最近的天体,月球自古以来一直是人类太空探测的目标。月球富含着人类所急需的矿藏,特别是月壤中蕴藏着丰富的氦-3,作为清洁能源对于未来资源匮乏的地球来说,是至关重要的^[1];通过对月球环境、月表矿物及地质构造等方面的研究,可以提供地球、月球乃至整个宇宙起源的

线索,这对人类探索宇宙具有重要的战略意义^[2];人类可以把月球作为探索深空的中继站,也是近期可探测的太空目标;此外,探月计划的实施必将带动一系列新技术的发明和革新,促进社会的进步。

1 月球钻探国内外现状

20世纪60—70年代,美国和苏联开始了军备竞

收稿日期:2023-07-08 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.S1.028

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“智能化岩心钻探装备升级与应用示范”(项目编号:DD20211421)

第一作者:陈浩文,男,汉族,1988年生,工程师,硕士,地质工程专业,主要从事钻探技术、设备及工艺的研发工作,河北省廊坊市金光道77号,409812829@qq.com。

通信作者:王林清,男,汉族,1993年生,硕士,地质工程专业,主要从事钻探新技术、新设备新工艺的研发工作,河北省廊坊市金光道77号, wanglinqingmail@163.com。

引用格式:陈浩文,冉恒谦,王艳丽,等.月球钻探模拟试验及技术展望[J].钻探工程,2023,50(S1):192-199.

CHEN Haowen, RAN Hengqian, WANG Yanli, et al. Lunar drilling simulation experiments and technical prospects[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 192-199.

赛,探月和登月是一个国家整体实力的象征,于是掀起了月球探测的高潮,此间催生和促进了一系列新技术的产生和应用。我国探月工程起步较晚,但随着近些年发展也取得了举世瞩目的成就。

1.1 美国 Apollo 系列探月计划

美国 Apollo 系列探月计划是 20 世纪 60 年代与苏联冷战时期为航空军备竞赛而开启的。Apollo-1 号于 1967 年首次发射升空,但因设计问题,不幸失火并导致 3 名宇航员牺牲。而后经过 2 年半的重新设计以及多次飞行试验, Apollo-11 号于 1969 年 7 月 16 日发射升空,于 7 月 20 日成功登月。这是人类历史上第一次登上月球^[3]。

Apollo-11 号登月成功后,通过人工钳、耙、铲、锤击等方法取得了 21.55 kg 样品^[4],如图 1 所示。此后的 Apollo-12 和 Apollo-14 的取土器由 Apollo-11 的内锥面改为外锥面,目的是避免月壤在内锥面下被压实、变形,保证月壤的层理关系,其它结构基本沿用了 Apollo-11 的钻探取样方案。

自 Apollo-15 开始,宇航员开始使用阿波罗月面钻机 ALSD (Apollo Lunar Surface Drill) 进行月面钻探试验(图 2)。ALSD 的采样系统主要包括:硬质合金钻头、螺旋岩心管、空心外螺旋钻杆、动力头、电池和附件,整个钻进过程需要宇航员手持操作,其极限

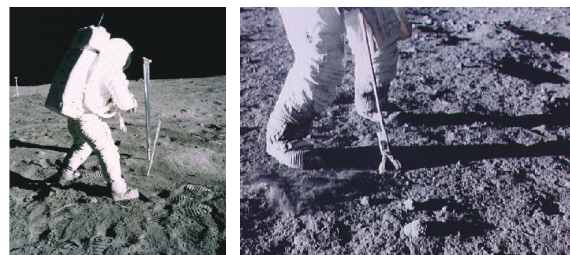


图 1 Apollo-11 号宇航员月表取样

取样量 940 cm^[3,5]。最终 Apollo-15 的实际钻深 236 cm,由于致密月壤在采样管膨胀的原因,月壤采样率为 103%。月壤取样管的封装过程也是由宇航员人工完成^[6]。Apollo-16 和 Apollo-17 也基本沿用了 Apollo-15 的钻探取样方案。Apollo-16 的实际钻深为 218 cm,采样率为 84%。Apollo-17 实际钻深 305 cm,采取率 96%。Apollo 系列采样技术指标见表 1。

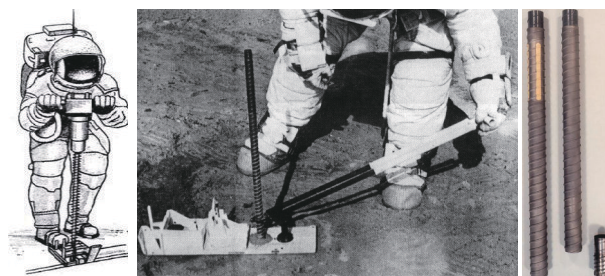


图 2 Apollo-15 号宇航员所用月壤取样及起拔工具

表 1 Apollo 系列采样技术指标

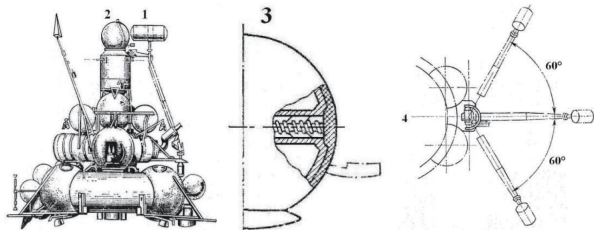
编号	实施时间	取样方式	取样重量/kg	取样直径/mm	钻机功率/W	钻杆转速/(r·min ⁻¹)	钻机自重/kg	钻进给进力/N	钻进速度/(mm·min ⁻¹)	样品成分
Apollo-11	1969年7月	人工	21.55	20						玄武岩、角砾岩、月壤、月尘
Apollo-12	1969年11月	钳、耙、铲、锤击取样	34.6	20						玄武岩、克里普岩、月壤
Apollo-14	1971年2月		42.6	20						复杂角砾岩
Apollo-15	1971年7月	人工操作	77.0	40						月海玄武岩和多种非月海玄武岩
Apollo-16	1972年4月	作回转钻取兼	95.0	40	456	280	13.4	重+人工给进	70~150	斜长岩、辉长岩受冲击形成的角砾岩
Apollo-17	1972年12月	手工取样	110.5	40						玄武岩、桔黄、灰色角砾岩

1.2 前苏联 Luna 系列探月计划

在 20 世纪 60—70 年代冷战时期,苏联总共进行了 29 次的探月试验,其中 Luna-16、Luna-20、Luna-24 成功无人月表取样并返回。

Luna-16 于 1970 年 9 月 12 日发射,是苏联第一次成功取回月壤样本的月球探测器。如图 3 所示,钻取采样装置安装在探测器侧面机械臂末端的圆柱形密封套内。整个钻取设备由回转动力系统,进给

系统、螺旋钻具以及辅助装置组成。钻取采样装置具体参数如下:钻机重 13.6 kg;螺旋钻杆回转动力及动力头进给动力分别由 2 个 140 W 电机驱动;钻机钻深 350 mm;额定转速 500 r/min;给进钻压 120 N;螺旋钻杆长 400 mm、钻头外径 26 mm;取样直径 16 mm^[7-8]。Luna-20 于 1972 年 2 月 14 日发射,其采样装置与 Luna-16 的结构基本相似,都是采用了机械臂支撑钻机取样的形式,只是在钻具的细节上进行了优化,钻探耗时 16 min,最终钻探完孔深度为 350 mm^[9]。



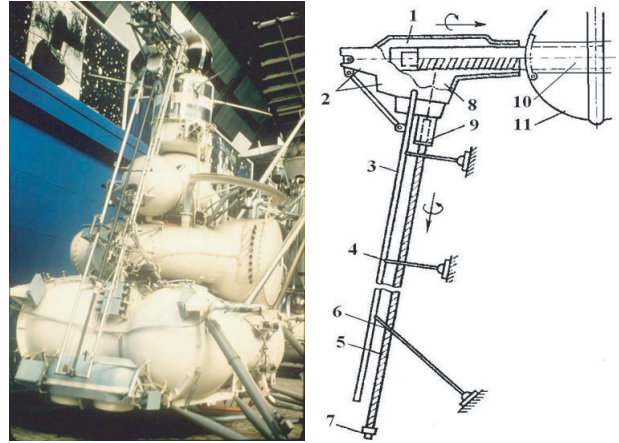
1—钻机;2—返回舱;3—月壤样品与岩心管密封示意;
4—机械臂水平摆动示意

图3 Luna-16月球钻机

Luna-24 于 1976 年 8 月 9 号发射,其钻探采样装置与 Luna-16 和 Luna-20 的差别很大。如图 4 所示为 Luna-24 月球钻机,侧面安装 2 条平行倾斜的导轨代替了 Luna-16/20 上面的机械臂,钻机的动力头安装在 2 条导轨上。在 2 条导轨中间为一根长螺旋钻杆,其与动力头相连,下端接钻头,螺旋钻杆内部采用无滑差软袋取心方式来提取月壤^[10]。在动力头上方为带螺旋槽的转鼓,主要作用为收集取样样品。Luna 系列采样技术指标如表 2 所示。

1.3 国内月表探测采样技术研究现状

我国探月方面的研究起步较晚,于 2004 年正式开展并命名为“嫦娥工程”。嫦娥工程分为“无人月



1—带螺旋槽的转鼓;2—外壳和驱动机构;3—导轨;
4、6—支架;5—螺旋取心钻杆;7—钻头;8—拉绳;9—回转器;
10—样品舱;11—返回舱

图4 Luna-24月球钻机

球探测”“载人登月”和“建立月球基地”3 个阶段,目前探月研究处于第一阶段“无人月球探测”。嫦娥工程第一阶段又分为“绕”、“落”、“回”3 步,其中 2020 年发射的“嫦娥五号”,完成第三部“回”。嫦娥五号的成功实施,使中国成为继美国 Apollo 计划和苏联 Luna 计划后成功实现了月球钻探采样的第三个国家,实现了月面无人采样^[11]。

钻探系统(图 5)是嫦娥五号任务的重要组成部分,旨在获取月球表面下深度约 2 m 的土壤样本。嫦娥五号搭载了一台钻探机械臂,可以在月球表面进行钻探操作,采集土壤样本并装入样品舱。钻探机械臂由 2 个机械手臂和 1 个旋转钻头组成,可以进行旋转和伸缩操作,以适应不同深度的钻探需求。钻探取心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。嫦娥五号

表2 Luna系列采样技术指标

编号	实施时间	取样方式	取样重量/kg	取样直径/mm	钻机功率/W	钻杆转速/(r·min ⁻¹)	钻机自重/kg	钻进给进力/N	钻进速度/(mm·min ⁻¹)	样品成分
Luna-16	1970年9月	机械臂式钻探	0.101	16	280	500	13.6	120	57	玄武岩质火成岩碎屑、熔融玻璃状结构碎屑
Luna-20	1972年2月	取样	0.05	16	280	500	13.6	120	57	斜长岩碎片
Luna-24	1976年8月	平行滑轨式钻探	0.17	8	>100		27	钢绳驱动加压	80~240	分层的细粒月壤和月尘,长石颗粒

钻探系统共钻深0.9 m后出现卡钻被迫终止,采集的样本被存放在样品舱内。嫦娥五号最终完成深层钻取和浅层表取2项取样任务,并于2020年12月17日携带1731 g样品成功返回,为人类更深入地了解月球的物质组成和历史演化提供重要的数据支持^[12-13]。

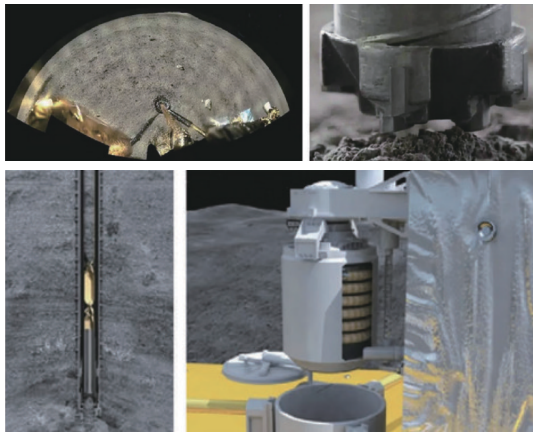


图5 “嫦娥五号”取样机具

2 月球钻探关键技术难点分析

纵观国内外月球钻探工程,月球钻探钻深较浅、获取的岩样少,主要是由于月表特殊的作业环境对钻探有诸多不利影响,具体如下:

(1)微重力:月球的质量为地球质量的1/80,体积为1/50,月表的重力加速度约为地球上的1/6。由于月表的微重力,在月表钻探所需钻压仅由钻机自重提供是远远不够的。

(2)无水:由于月表大气层无水,若按传统陆地钻探方法会无循环介质,造成孔底岩屑无法及时排出、钻头因温升过高而失效等问题^[14]。

(3)月表温度:由于月球几乎没有大气层,没有了大气热传导,导致月表的昼夜温差很大。在白天,太阳辐射直接照射在月表而导致其温度迅速升高,高温可达130~150℃;在夜晚,太阳辐射消失而导致月表温度降低,温度可达-180~-160℃。如此大的昼夜温差对钻探机械材料的性能是一个极大的考验^[15]。

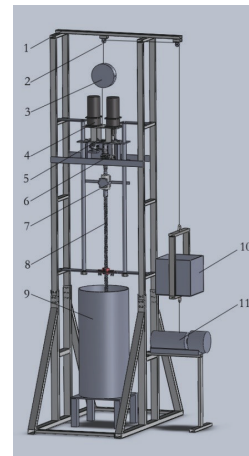
(4)月尘及碎石层:月球表面覆盖着一层细小的灰尘,在钻探过程中会受到扰动悬浮飘散,易造成钻探运动部件的卡阻或损坏;月壤下部碎石层,存在诸多小块孤石卡阻钻头,易造成钻头不进尺等事故。

3 月球钻探模拟试验

月球钻探模拟试验主要是通过模拟月表钻探工况对不同钻具及钻探工艺参数进行试验测试,通过试验结果以期优化钻具设计及钻探工艺参数的选择。开展月球钻探模拟试验主要包括试验台的搭建、试验钻具的研制及模拟试验等内容。

3.1 试验台架的搭建

为更好地模拟月球钻探实际工况,试验台架需具有多功能性、月表环境可模拟性和可靠稳定性。试验台如图6所示,具有回转钻进、冲击钻进及控压钻进等多工况模拟,同时具有转速、扭矩、钻时、钻压等参数检测,主要由试验台架、动力头、螺旋钻具、各类传感器、配重箱及土样筒等部件组成。



1—试验台架;2—滑轮及钢丝绳;3—拉力计;4—驱动电机;5—激光转速传感器;6—动力头;7—扭矩传感器;8—螺旋钻具;9—土样筒;10—配重箱;11—卷扬

图6 试验台架总体方案

动力头及驱动电机主要提供钻具的回转运动,同时为解决月球微重力环境下钻压不足的情况,设计有冲击机构以此检测钻具在冲击运动下的钻进效果,如图7(a)及图7(b)所示;为模拟在微重力环境下,不同钻压对钻进效果的影响,设计配重箱部件,通过调整配重箱内的配置以此调整钻压;为解决月球钻探无循环介质的难题,设计螺旋钻具以此通过外螺旋连续排出钻进产生的岩屑,如图7(c)所示;为评价不同工况下钻具的钻进效果,设计有扭矩、转速及拉力等传感器,如图7(d)~(f)所示。

3.2 螺旋钻具设计

螺旋钻具(图8)可解决月球钻探无冲洗介质循环的难题,同时带出的岩屑起到冷却钻头的效果,延

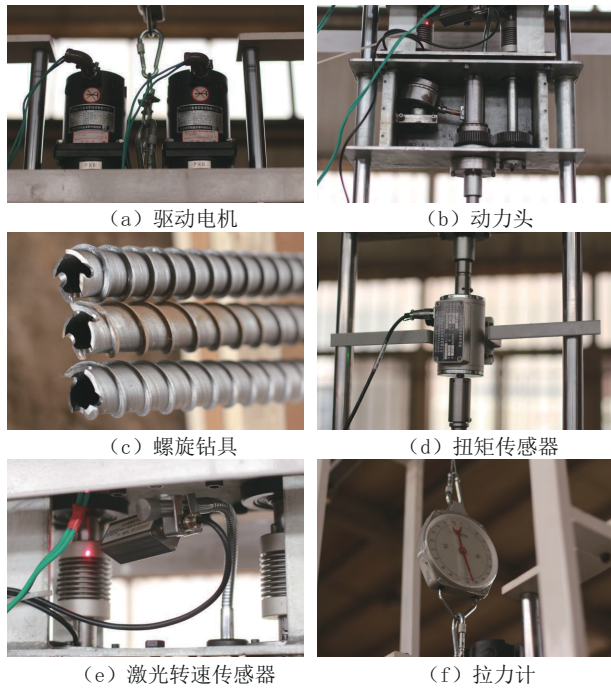


图7 试验台关键部件

长钻头寿命,因此也是目前月球钻探最为主要的钻具类型。其原理是孔底岩屑在重力、摩擦力及螺旋升力等多重力的作用下向上运动,螺旋钻具影响岩屑向上运移主要包括螺距及回转钻速两部分。

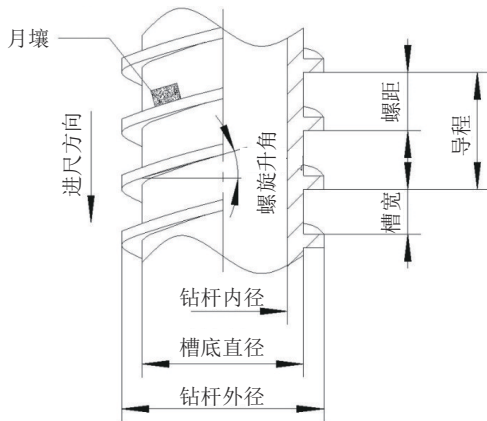


图8 螺旋钻杆结构示意图

3.2.1 螺距计算

由于我国月球钻探属于无人自主钻探,在此可参考我国嫦娥五号及苏联 Luna 系列月球钻探所使用螺旋钻杆的参数进行设计,如表 3 所示,在此初步选定试验用螺旋钻杆外径 30 mm,内径 19 mm。

在钻杆外径为定值时,螺距会随着螺旋升角 α 改变而改变。在螺旋排土过程中,月壤与螺旋叶片

表3 嫦娥五号及苏联 Luna 系列螺旋钻具参数

名称	钻杆外径/mm	钻杆内径/mm	取心直径/mm
Luna-16/20	26	18	16
Luna-24			8
嫦娥五号	32.7		15

的摩擦角必须要大于螺旋升角才能被顺利排出,即:

$$\tan^{-1} f_1 \geq \tan^{-1} (s/\pi d) \quad (1)$$

式中: f_1 ——叶片与月壤的摩擦系数,取 0.35; s ——螺距, mm; d ——槽底直径, mm。

计算得 $s \leq 26.4$ mm。

参考 Luna-24 螺距为 16 mm,初步暂定本试验用螺旋钻杆螺距分别为 14、16、18、20、22 mm 进行横向对比试验。

3.2.2 临界转速计算

螺旋输屑过程中,月壤会受到一个向上的力和随着螺旋钻杆旋转的运动。月壤旋转的速度还使其受到一个离心力,将其甩到孔壁使其与孔壁摩擦,此摩擦力阻碍了螺旋间月壤的向上运动。因此钻杆需要一定的转速来克服螺旋对月壤的反作用力和月壤与螺旋之间的摩擦力,此速度为临界转速,钻杆的转速要大于临界转速才能顺利地排土^[16]。

通过查阅文献,临界转速按如下计算公式计算:

$$n = 30 \sqrt{g(f_1 \cos \alpha + \sin \alpha) / [f_3 R (\cos \alpha - f_1 \sin \alpha)]} / \pi \quad (2)$$

式中: n ——临界转速, r/min; g ——重力加速度,取 9.8 m/s^2 ; f_1 ——叶片与月壤的摩擦系数,取 0.35; f_3 ——月壤与孔壁的摩擦系数, f_3 随月壤的密度 ρ 变化而改变,当 $\rho = 1 \sim 1.87 \text{ g/cm}^3$ 时, $f_3 = 0.23 \sim 1.48$; R 为钻孔半径,取 15 mm; α ——螺旋升角, ($^\circ$)。

3.2.3 螺旋钻具加工

本次试验用螺旋钻具分单、双螺旋两类,长度 1200 mm,根据前文确定螺距分别取 14、16、18、20 和 22 mm,共加工 10 根(图 9)。



图9 不同规格试验用螺旋钻杆

3.3 室内模拟试验

由于条件所限,本次钻探试验用月壤采用普通沙子代替。模拟月壤与普通沙子的主要物理力学参数如表 4 所示。试验钻进深度为 500 mm,见图 10。

表 4 模拟月壤与普通沙子的主要物理力学参数

参数指标	密度/(g·cm ⁻³)	内聚力/kPa	内摩擦角/(°)
模拟月壤	1.45~1.90	0.21~1.71	20~21
普通沙子	1.45~1.90	2.0~13.7	16.5~18.2



图 10 试验过程中起始与结束位置

3.3.1 试验不同转速、不同螺距的钻进效率

本组试验模拟月球钻机在月表微重力环境下靠

自重进行钻进的效率。动力头重力为 450 N,根据月表重力为地球重力的 1/6,调节配重至钻压为 75 N。根据式(2)计算各螺距钻杆的临界转速,如表 5 所示。

表 5 试验用钻杆临界转速

螺距/mm	螺纹升角/(°)	转速/(r·min ⁻¹)
14	8.5	118
16	9.6	119
18	10.8	123
20	12.0	125
22	13.1	128

本次试验依次选取螺距为 14、16、18、20 和 22 mm 的单、双螺旋钻杆开展,试验参数选取转速分别为 100、150、200、250、300 r/min 进行试验,试验结果数据如表 6 所示。

表 6 不同螺距、转速试验所需时间及功耗

螺距/mm	类型	试验参数	转速/(r·min ⁻¹)				
			100	150	200	250	300
14	单螺旋	时间/s	71	39	38	38.5	39.5
		功耗/J	930.4	584.75	757.67	799.3	424.68
	双螺旋	时间/s	47.5	36.5	35	39	39
		功耗/J	655.4	574.7	415.5	389.4	228.52
16	单螺旋	时间/s	76.5	45	45.5	36	39
		功耗/J	1062.37	1347.67	562.48	698.1	276
	双螺旋	时间/s	53	46.5	35	22	22
		功耗/J	510.3	453	514.6	452.8	465.1
18	单螺旋	时间/s	67.5	56	36	34	33.5
		功耗/J	684.7	564.3	551	374.6	249.78
	双螺旋	时间(s)	58	40	29.5	31.5	22
		功耗/J	546	653.4	508.6	368.5	214.5
20	单螺旋	时间/s	66	57	44.5	32	25
		功耗/J	810.79	542.6	329.18	328.36	399.71
	双螺旋	时间/s	59	48.5	40.5	30	22.5
		功耗/J	740	669.6	389.5	499.4	329.7
22	单螺旋	时间/s	69.5	50	35	32.5	24
		功耗/J	899	534.7	716.5	452.5	305.4
	双螺旋	时间/s	46.5	36	34	32	21
		功耗/J	756	412	451.9	358.2	214.6

通过本次试验可得:

(1)钻进所用时间随回转速度增大而减少,因此在功耗允许情况下尽可能增加转速。

(2)对比相同螺距单、双螺旋钻杆,在转速一定情况下,双螺旋钻杆比单螺旋钻杆钻进所用时间短,消耗的功少,因此后续的试验钻杆选定为双螺旋类型。

(3)钻进时间及功耗随转速增加而减少,但当转速提高到300 r/min出现因进尺过快导致卡钻等现象,结合试验台架本身能力及试验的平稳性,选定250 r/min作为后续试验的最佳回转速度。

(4)对比不同螺距在初始转速为250 r/min时钻探所用的时间和耗能,当螺距 ≥ 18 mm时数据差异不大,在此选定螺距18 mm钻杆用于后续试验。

3.3.2 冲击频率对钻进效果的影响

根据上述试验结论,螺旋钻杆选用螺距为18 mm双螺旋钻杆、钻压75 N、转速250 r/min。试验冲击频率分别为2.5、3、3.5、4、4.5 Hz,每个冲击频率试验2次,试验数据如表7所示

表7 不同冲击频率钻进所需时间

类型	冲击频率/Hz	耗时/s	
		t_1	t_2
冲击	2.5	22.5	21.5
	3.0	19.1	18.6
	3.5	18.3	18.1
	4.0	18.0	17.9
	4.5	18.2	17.8
不冲击		27.2	

通过本次试验可得:

(1)有冲击运动钻探耗时明显比无冲击运动钻探耗时短;当冲击频率上升到3.5 Hz以后,钻探耗时趋于平稳,无明显减小。

(2)相比无冲击纯回转钻探过程,在有冲击运动钻探试验过程中,钻杆回转速度变化幅值不大,无明显速度衰减,整个钻探过程流畅无明显卡滞。

(3)冲击钻探过程中,后半段所用时间明显多于前半段,这是因为随着钻进深度的增加,钻孔对钻杆的阻力也随之增加,钻杆的冲击效果也越来越弱。

3.3.3 钻压对钻进效果的影响

根据试验结论,螺旋钻杆选用螺距为18 mm双

螺旋钻杆;转速250 r/min。试验钻压分别为45、75、105和135 N,共做2组试验进行对比,试验结果如表8所示。

表8 不同钻压钻进所需时间

钻压/N	耗时/s	
	t_1	t_2
45	58.6	53.5
75	27.1	27.1
105	20.7	19.2
135	15.2	14.4

通过本次试验可得:

(1)随着钻压的增大,钻进所耗时间逐步减少;

(2)在试验中观察,钻压为45 N和75 N下钻进速度与回转扭矩波动较为平稳,但当钻压增加至105 N和135 N时,两参数的波动幅度开始增大,这是由于随着钻压的增加钻机输出扭矩不足所造成的。

4 未来月球钻探的思考与展望

月球在深空探测中的地位无可撼动,目前对于月球钻探的最大钻深仅为3.05 m,这对于人类了解月球内部结构,揭示月球形成和演化过程乃至后期的资源勘探开发及人类居住基地建设是远远不够的,因此,未来我国无人月球钻探向深部进军势在必行,对此有如下思考与展望:

(1)月球钻探最为主要的是取心作业,随着未来钻深的增加,无论是美国Apollo系列的人工提钻取心以及我国嫦娥五号和苏联Luna系列无人单回次翻袋式取心方式均不适用。在此可借鉴目前陆地钻探成熟的绳索取心工艺,既能提高取心作业效率,还能实现取心钻杆留在孔内起到护壁效果。

(2)我国嫦娥五号和苏联Luna系列月球钻机是固定于登陆器之上,随登陆器落后后只能在固定的位置进行钻探作业,存在诸多不确定因素;对月未来的月球深钻,可考虑将钻机及月球车结合,利用月球车的可移动性,通过雷达进行物探选址后再针对性开展钻探作业。

(3)通过本文模拟试验结果,对于未来月球深钻,需在微重力环境下尽可能加大钻压以提高钻进效率,在此可考虑在钻机加装锚固装置以提高抓地

力;同时在保证钻机功耗及取心质量前提下,提高转速也有益于钻进效率的提高;最后,冲击运动有助于钻进过程的效率及平稳性,但动力头冲击效果随着钻深的加大而衰减,可考虑利用孔底动力来提供冲击运动。

(4)螺旋干钻是解决月球钻探无循环介质输屑最为主要的方法,但是随着未来钻深的加大,其全孔输屑摩阻也随之加大,这对于低功耗月球钻机是巨大的挑战。因此需研究新的工艺方法以解决全孔螺旋输屑摩阻大的难题。

参考文献:

- [1] 欧阳自远,邹永廖,李春来,等.月球某些资源的开发利用前景[J].中国地质大学学报,2002,27(5):498-503.
- [2] 鄢泰宁,补家武,吴翔,等.试论月球表面钻探取样的难点与关键技术[J].地质科技情报,2004,23(4):12-14.
- [3] Kim Dismukes. The Apollo 11 mission[N]. 2009-07-01[2014-11-15]. <http://spaceflight1.nasa.gov/history/apollo/apollo11/index.html>.
- [4] Beattie, Donald A. Taking Science to the Moon[M]. Johns Hopkins University Press, 2003:107-124.
- [5] Zacny K, Paulsen G, Szczesiak M, et al. LunarVader: Development and testing of lunar drill in Vacuum Chamber and in Lunar Analog Site of Antarctica[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2012,26(1):74-86.
- [6] 鄢泰宁,冉恒谦,段新胜.宇宙探索与钻探技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(1):3-7.
- [7] Shkuratov Y, Starukhina L, Hoffmann H, et al. A model of spectral albedo of particulate surfaces: Implications for optical properties of the Moon. Icaru, 1999,137(2):235-246.
- [8] Robert Christy FBIS. The Mission of Luna 1[N]. [2010-06-10]. <http://www.zarya.info/Diaries/Luna/Luna16.php>.
- [9] Taylor G J, Drake M J, Wood J A, et al. The Luna 20 lithic fragments, and the composition and origin of the lunar highlands[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1973, 37(4): 1087-1106.
- [10] 高兴文,殷参,赖小明.月壤钻探取心机构的多方案比较与分析[C]//中国宇航学会深空探测技术专业委员会第九届学术年会论文集,2013,87-995.
- [11] 陈浩文.月球取样钻探平台的研制及模拟试验研究[D].北京:中国地质大学(北京),2015.
- [12] 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.
- [13] 姜生元,梁杰能,赖小明,等.嫦娥五号月壤剖面钻进取芯状态分析与解译[J].机械工程学报,2022,58(10):348-360.
- [14] 邹永廖,欧阳自远,徐琳,等.月球表面的环境特征[J].第四纪研究,2002,22(6):533-539.
- [15] 石晓波,李运泽,黄勇,等.月球表面环境综合模拟系统的设想[J].中国工程科学,2006,8(11):48-52.
- [16] 魏德胜.长螺旋钻孔机钻进理论研究与实践[J].建筑机械,1991(6):33-35.
- [17] 贺新星,肖龙,黄俊,等.模拟月壤研究进展及CUG-1A模拟月壤.地质科技情报,2011,30(4):137-142.

(编辑 王文)