

doi:10.3799/dqkx.2016.119

# 月球钻孔取心机具试验与钻进规程

李大佛<sup>1</sup>, 殷 参<sup>2</sup>, 雷 艳<sup>1</sup>, 许少宁<sup>1</sup>, 谭松成<sup>3</sup>

1. 中国地质大学长江钻头有限公司, 湖北武汉 430074
2. 北京卫星制造厂, 北京 100190
3. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

**摘要:**我国探月工程第 3 期工程的核心任务是实现月球钻探取样和返回, 明确采用钻取方式获取深 2 m 的月壤样品. 针对月表极端钻进环境, 提出一种内外管联合取心螺旋钻具, 即内管软袋提拉取心, 外管螺旋集输取心. 模拟月壤钻进试验结果表明, 该取心钻具能有效钻进可靠取心, 特别适合小于 0.6 m 浅层模拟月壤钻取. 试验研究了钻进规程对模拟月壤取心率和钻进功耗的影响规律, 得出了钻进转速、进给速度值域与功率值域的关联性, 对月球环境下取心钻具研制和钻进规程制定具有实际工程应用价值.

**关键词:**取心钻具; 取心试验; 钻进规程; 模拟月壤; 钻探.

**中图分类号:** P634

**文章编号:** 1000-2383(2016)09-1611-08

**收稿日期:** 2016-01-10

## Coring Tests of Core Drilling Tool and Analysis of Drilling Parameters

Li Dafo<sup>1</sup>, Yan Shen<sup>2</sup>, Lei Yan<sup>1</sup>, Xu Shaoning<sup>1</sup>, Tan Songcheng<sup>3</sup>

1. Changjiang Bits Co., Ltd., China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. Beijing Satellite Manufacturing Factory, Beijing 100190, China
3. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** The core task of the third stage of China's Lunar Exploration Program is to realize the lunar drilling and sampling and returning to the earth. 2-meter-deep lunar soil sampling is required through drilling method. Due to the extreme environment on the lunar surface, an auger core drilling tool with joint inner and outer pipe is proposed in this paper. The core in the inner pipe is obtained by pulling the soft bag, and the core in the outer pipe is transported to the collector by the helical blade. Drilling tests on the lunar soil simulant indicate that the auger drilling tool is reliable for coring, especially for the superficial lunar soil with depth less than 0.6 meters. The influences of drilling parameters on core recovery and drilling power consumption in the tests are studied. Relationships between rotation speed, the range of drilling footage speed and power are concluded, which can facilitate the development of core drilling tools and the determination of drilling parameters in the lunar environment.

**Key words:** Core drilling tool; coring test; drilling parameter; lunar soil simulant; drilling.

我国探月工程第 3 期的核心任务是实现月球钻探取样与返回, 明确要求采用钻孔取样方式来获取可能保持原始层理结构的较深层的月壤样品. 月表处于无水、高真空、微重力、日夜温差悬殊的极端环境(张森森等, 2013), 并且月表钻探取样在无人操作、地表遥控下进行.

要完成这个艰巨的任务, 笔者认为主要有 3 个问题必须仔细考虑与合理解决: 一是月表月壤的可钻性问题; 二是钻孔孔底热量排出问题; 三是因为月表钻探无人操作, 加之国家投资巨大, 实施月壤钻孔取样必须安全可靠、万无一失.

**基金项目:** 国家“十二五”重点攻关项目“月球三期工程”分支项目(No.20128Y101003).

**作者简介:** 李大佛(1937—2016), 男, 教授, 长期从事机械钻探与电镀技术的教学、科技及产品开发工作. E-mail: ztgs@cug.edu.cn

**引用格式:** 李大佛, 殷参, 雷艳, 等. 2016. 月球钻孔取心机具试验与钻进规程. 地球科学, 41(9): 1611—1618.

## 1 钻孔取心试验钻具

针对月壤物理力学性质,美国 APOLLO15、APOLLO16、APOLLO17 在月面进行钻取式采样

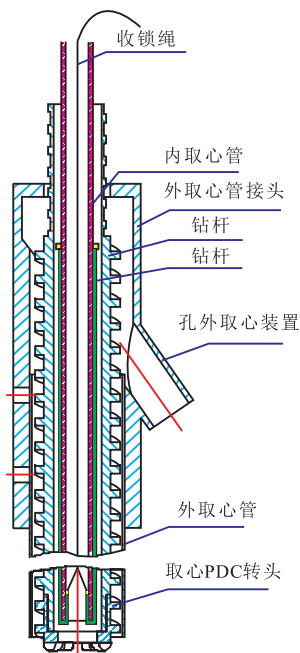


图 1 钻具结构示意图

Fig.1 Sketch of the coring device structure

(Cremers and Hsia, 1973; Houck, 1982), 采用空心螺旋钻获取几十个近 2.5 m 长的月壤样品, APOLLO 工程实现了月面人机联合作业.前苏联成功进行 3 次无人自主采样,其中 LUNA16、LUNA20 采用薄壁空心螺旋钻(Vinogradov, 1971; Ivanov *et al.*, 1973; Barsukov, 1977; 刘天乐等, 2015), LUNA24 采用软袋提拉+螺旋钻取心钻具方式作业,取心作业只有一个回次.我国探月 3 期采用无人操作、自主取样返回,取样技术风险较大,因此希望实现两次或

两次以上取样功能,李大佛等(2011, 2012, 2013)提出了外管螺旋集输与内管软袋提拉联合取心技术方案,内管软袋保证样品层理,外管可以多次选点取样,保证样品层序.取心钻具由钻头、外螺旋钻杆、内管、软袋等组成.联合取心钻进试验在此基础上多加了一根外管,钻具结构示意图如图 1 所示.

由图 1 可知,模拟月壤钻进用钻头与钻杆一样具有外螺旋,且其结构参数相同,从而有利于排出钻屑.软袋的直径比内管的外径稍大,平铺容纳在内管内径与钻头内径之间的间隙,软袋包覆内管外表面通过翻转运动包裹孔内模拟月壤样品.联合取心钻进试验时,外管内径与螺旋钻杆外径也有一定间隙,可保障模拟月壤通过外螺旋钻杆与外管而自动排出孔外.

## 2 钻孔取心试验用的模拟月壤

本试验所完成的钻孔取心试验都是以中国地质大学(武汉)肖龙教授提供的 CUG-1A 型模拟月壤为钻取用试验月壤(贺新星等, 2011),月壤经过击实处理,相对密度标定为 60%~70%,与月面 0.6 m 深度处密度一致(王世杰等, 2010).CUG-1A 型模拟月壤与 APOLLO14 采样点的月壤样品有着相似的化学成分、矿物组成和物理力学性质,是一种理想的低钛型月海模拟月壤样品(江磊等, 2010; 殷参等, 2012).CUG-1A 型模拟月壤的颗粒级配如表 1 所示,其主要物理力学性能参数与实际月壤的比较如表 2 所示.CUG-1A 月壤具有较好的等效性,可以作为钻取试验用模拟月壤.

## 3 内管取心钻进试验与分析

首先通过分析,笔者分解了试验矩阵螺旋钻具

表 1 CUG-1A 型模拟月壤颗粒级配分布

Table 1 Grain size distribution of the CUG-1A simulant lunar soil

粒径(mm)	>0.075	0.075~0.050	0.050~0.010	0.010~0.005	0.005~0.002	<0.002
含量(%)	20.0	40.3	12.5	17.4	2.5	7.3

表 2 CUG-1A 型模拟月壤与实际月壤的主要物理力学性能对比

Table 2 Comparison of the main physics and mechanics parameters between simulant and actual lunar soil

参数	密度(g/cm <sup>3</sup> )	相对密度(g/cm <sup>3</sup> )	内摩擦角(°)	内聚力(kPa)
实际月壤	1.60~1.80	2.90~3.20	25~50	0.20~1.80
模拟月壤	1.45~1.90	2.88	20~21	0.21~1.71

取心影响因素.为了便于理解,笔者将软袋取心定义为内管取心,螺旋集输取心定义为外管取心.相应地,将内管取心率定义为内管钻取样品的体积与钻头内径所钻样品体积之比;外管取心率定义为外管钻取样品的体积与钻头环状面积所钻样品体积之比;本机具取心率定义为内外管所钻样品的体积与钻孔体积之比.

### 3.1 试验目的与钻进规程

为了掌握不同转速对内管取心率的影响,笔者使用不同的转速,以同样的进给量在同一特征的模拟月壤中钻进,测量模拟月壤质量,得出取心率,从而测试取心率的变化,并采集相对应的功率.每种转速做3组试验,并求出内管取心率平均值.

### 3.2 试验结果及结论

试验得到24组取心率、功耗等参数,见表3.从上表的试验数据可以看出,软袋取心试验一共做了24组,平均取心质量为87.1g,平均取心率为58.0%.图2反映转速的变化对功率的影响.

从图2中可以看出,随着转速的增高,功率递增.功率是通过钻具的扭矩与转速相乘所得,反映摩擦阻力矩变化较小,功率与回转转速成正比.因此,单纯从节省钻进功耗方面考虑时,在取心率能满足

钻进试验需求的前提下,应尽可能选择较低的转速钻进.

### 3.3 转速对内管取心效果的影响试验

内管软袋取心钻进试验时,为掌握不同转速对取心率的影响,使用不同的转速(40 r/min、80 r/min、120 r/min、160 r/min、200 r/min、240 r/min、280 r/min、320 r/min),以同样的进给量(100 mm/min)在同一特征的模拟月壤里钻进.试验通过测量软袋内模拟月壤的质量,求得内管取心率,从而测试取心率的变化,并采集相对应的功率.每种转速做3组试验,并求出内管取心率的平均值.钻进过程中,扭矩、转速和功率都可以由模拟月壤钻进试验监控平台直接获取.钻进试验所得转速与取心率之间的关系如图3所示.

由图3可知,内管取心钻进时,平均取心率为50.0%~70.0%,由于跟进外管抑制了模拟月壤的流动,使孔底的离心效应影响较弱,转速的变化与内管取心率之间并无显著关联.由表3可知,单次试验中转速为40 r/min时,取心率高达为96.7%(取样质量125g,钻进深度750mm),但在相同钻进条件下,取心率具有离散性,由于钻具结构采用了内管软袋翻转取心方式,内管径长比大,钻具组合很难保证

表3 内管取心试验数据

Table 3 Test data of the inner tube coring

序号	转速(r/min)	进给量(mm/min)	进尺(mm)	模拟月壤质量(g)	内管取心率(%)	功率(W)
1	40	100	750	31	23.9	
2	40	100	750	92	71.1	17
3	40	100	750	125	96.7	
4	80	100	730	58	44.8	
5	80	100	710	103	79.6	35
6	80	100	720	74	57.2	
7	120	100	690	52	60.1	
8	120	100	800	88	63.8	53
9	120	100	780	106	78.8	
10	160	100	790	42	30.8	
11	160	100	990	131	76.7	79
12	160	100	990	139	81.4	
13	200	100	990	0	0	
14	200	100	990	143	83.8	100
15	200	100	990	120	70.3	
16	240	100	1 000	134	77.2	
17	240	100	990	32	18.7	120
18	240	100	990	131	76.7	
19	280	100	990	133	77.9	
20	280	100	990	144	84.3	145
21	280	100	900	76	48.9	
22	320	100	900	28	18.0	
23	320	100	900	13	10.9	170
24	320	100	900	97	62.5	
平均				87.1	58.0	

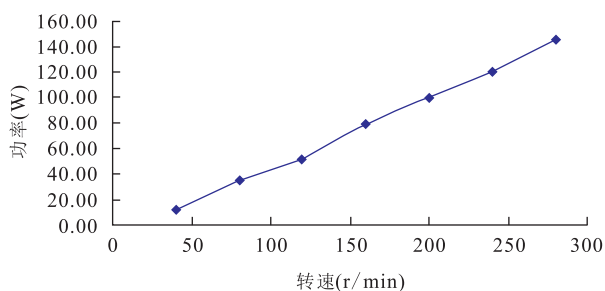


图 2 不同转速的变化对功率的影响

Fig.2 Influence of rotational speed to drilling power

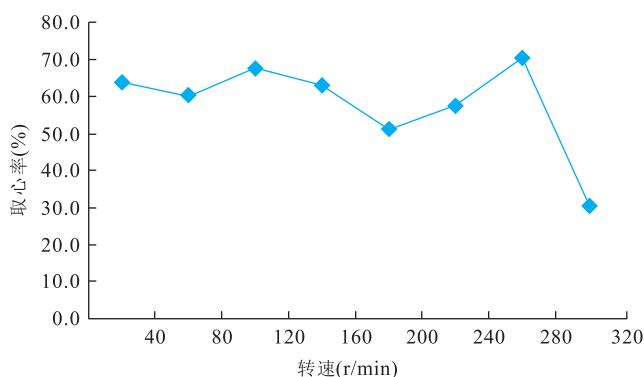


图 3 转速对取心率的影响关系

Fig.3 Influence of rotation speed to coring recovery rate

内管与钻杆、钻头的同心度,容易产生内管与钻杆壁碰撞与摩擦,造成进样通道变化,影响取心率。

内管取心率控制在相对比较稳定的范围,较小密实度(相对密实度为 60%~70%)的模拟月壤流动性强,易于钻进,由于钻头扰动进一步减小了密实度,取心率为 50.0%~70.0%。

对钻进试验过程进行观察发现,试验过程中容易出现因软袋末端封口不够紧而漏样、软袋与内管之间的摩擦力较大造成软袋难以拔出,以及由于钻具可能存在偏心导致钻进过程中出现摆动等问题。以上都是造成钻进试验取心率不稳定的可能因素,因此月球钻探取样机具应具备结构简单、操作方便、可靠性高等优点(鄢泰宁等,2010)。

## 4 内外管联合取心钻进试验分析

根据以上试验数据和 Luna 24 的实际取样结果(钻进深度 2 250 mm,取样质量 170.1 g,取心率 53.0%),笔者认为:(1)内管软袋翻转取心方式取心效率和取心质量很难保证有较高的指标;(2)探测器着陆点若出现复杂月层(胶结力较强的硬质团块),该方式软袋封口

的功能就很难实现,因而无法保证取心质量。

### 4.1 试验目的

基于上述原因,取心机具采用内、外管同时取心这一作业方式,以提高取心率和取心质量,且力求机具结构简单,减少钻进故障几率,拓宽其适应性,即使遇到胶结比较牢固的硬质团块,通过内外取心装置的各自特性取长补短,考虑机械臂提供柔性运动包络(段隆臣等,2014;凌云等,2014),安全可靠地完成取心任务。

### 4.2 钻进规程

试验采用了内外管同时取心,以不同的转速(40 r/min、80 r/min、120 r/min、160 r/min、200 r/min、240 r/min、280 r/min、320 r/min)和同样的进给量(100 mm/min)在同一特征的模拟月壤里钻进,测量内外管采样质量,测出取心率,并采集相对应的功耗。每种转速做 3 组试验,并求出内管取心率平均值。

### 4.3 取心钻具工作原理

内外管联合取心装置的结构设计如图 1 所示。从结构组成上分为钻头、内管和软袋以及螺旋钻杆,从整体上考虑还包括钻具总质量,以及钻具与模拟月壤之间的摩擦系数等。未钻进状态下,软袋套在内取心管外壁上,末端弹性收紧环套在内取心管外壁;模拟月壤取心钻进过程中,内、外管均保持相对静止,只有钻头和钻杆旋转钻进。

在内管取心时,钻头向下运动过程中,钻头切削和挤压模拟月壤,钻头中心部位的模拟月壤沿着钻头内壁进入翻转在内取心管壁上的软袋。随着钻头不断向下运动,软袋将从内取心管的外壁被翻入到内取心管的内部,并同时包裹住进入内取心管的模拟月壤。钻进完成之后,弹性收紧环脱离外壁,切断月壤实现封口,完成内取心管取心任务。

外管取心过程中,钻头底唇面处被切削的模拟月壤会沿着钻头排屑槽进入钻杆和外管之间的螺旋槽,在离心力以及与外管内壁的摩擦力作用下,该部分模拟月壤会沿着螺旋槽逐渐向上运移至孔外取心装置出口处流出钻具外,从而完成外管取心任务。由于内外管联合取心方式互不干扰,因而能更好地保证钻进取心目的。

### 4.4 联合取心钻进试验结果与分析

内外管联合取心钻进试验参数与结果如表 4 所示,其中内管软袋取心率、外管取心率以及本机具取心率与转速的关系如图 4 所示,钻进所需总功率与转速的关系如图 5 所示。

表 4 联合取心钻进试验参数与结果

Table 4 Drilling parameters and test results of the combined inner and outer tube coring method

序号	转速 (r/min)	进给量 (mm/min)	进尺 (mm)	内管取样量 (g)	内管取心率 (%)	外管取样量 (g)	外管取心率 (%)	本机具取心率 (%)	功率 (W)
1	40	100	800	77	55.8	580	86.2	81.0	
2	40	100	800	87	63.1	602	89.5	85.0	13
3	40	100	800	100	72.5	590	87.7	85.1	
4	80	100	800	97	70.3	640	95.1	90.1	
5	80	100	800	118	85.5	655	97.3	95.3	31
6	80	100	800	123	89.2	601	89.3	89.2	
7	120	100	800	128	92.8	652	96.8	96.2	
8	120	100	800	126	91.3	705	104.7	102.3	61
9	120	100	800	120	87.0	580	86.2	86.3	
10	160	100	800	130	94.2	715	106.2	104.2	
11	160	100	800	71	51.4	715	106.2	97.0	70
12	160	100	740	91	71.3	767	123.2	114.4	
13	200	100	720	106	85.4	609	100.5	97.9	
14	200	100	800	124	89.8	743	110.5	107.0	90
15	200	100	800	109	79.0	600	89.1	87.5	
16	240	100	800	103	74.6	700	104.0	99.0	
17	240	100	800	85	91.6	802	119.2	109.3	120
18	240	100	800	116	84.1	745	110.7	106.2	
19	280	100	680	100	85.2	623	108.9	104.8	
20	280	100	720	108	87.0	685	113.1	108.6	130
21	280	100	800	117	84.8	741	110.1	103.8	
22	320	100	800	131	95.0	789	117.2	113.5	
23	320	100	710	75	61.5	685	114.7	105.6	150
24	320	100	800	124	89.5	687	102.1	100.0	
平均				106.9	80.4	675.4	102.8	98.7	

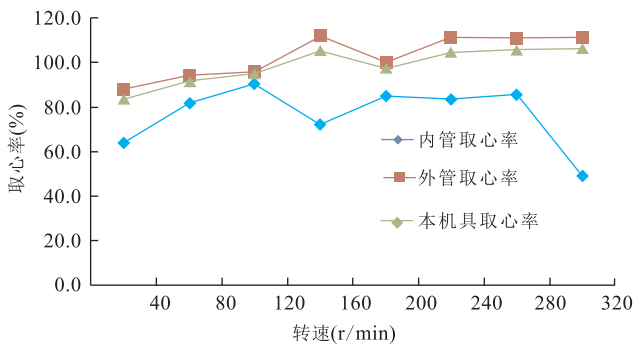


图 4 转速对 3 种取心率的影响关系

Fig.4 Influences of rotation speed to the three kinds of coring recovery rates

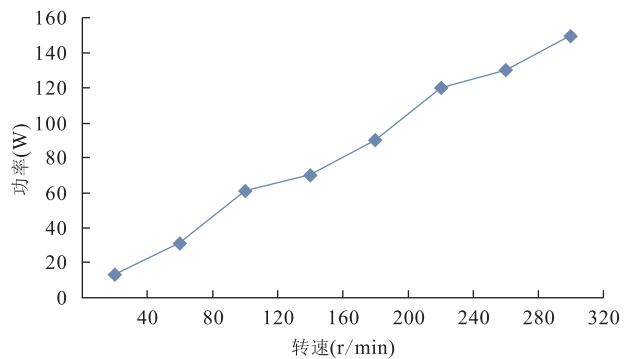


图 5 转速对功率的影响关系

Fig.5 Influence of rotation speed to drilling power

由表 4 可知,软袋与外管联合取心钻进时,取心效果较好,软袋的平均取心质量为 106.9 g,平均取心率为 80.4%;外管的平均取心质量为 675.4 g,平均取心率为 102.8%;本机具的平均取心率为 98.7%,可以较好地满足月球钻探取样要求。

由图 4 可知,采用软袋与外管联合取心钻进时,钻进过程中的干扰因素相对较多,软袋内管取心率仍出现波动,其取心率为 49.2%~90.37%。外管取

心则始终能保持非常高的取心率,其中有部分取心率超过 100%,是由于转速过高之后对模拟月壤的扰动较大,而模拟月壤流动性强,且外管的直径比钻头外径大,从而使得部分钻头外的模拟月壤进入到螺旋钻杆与外管之间被输送出取心装置之外。

采用内管和外管联合进行模拟月壤取心钻进试验时,一方面内管取心能获得具有完整层理信息的模拟月壤样品,而外管取心方式则能同时获得较多质量模拟月壤钻屑样品,通过外管取心方式获得的



模拟月壤样品属于被扰动样,但除了钻进过程中可能被卷入螺旋钻杆和外管之间的样品外,该方式同样能够保持一定的钻进对象层理信息,即模拟月壤表面的样品经外管被取出后位于收集装置的底端,而最深处的模拟月壤样品位于收集装置的顶端。

由图 5 可知,在同样模拟月壤取心钻进试验中,采用 CUG-1A 型均质模拟月壤,采用恒压钻进模式,添加外管后并不会过多地增大钻进所需功耗。因此,联合取心方式相比单一的软袋取心方式能更好地满足浅表层(小于 0.6 m)取样要求。

## 5 模拟月壤取心钻进试验规程分析

模拟月壤钻取试验分别进行了内管取心和内外管联合取心试验,将钻进总功率分为钻头切削月壤的功率  $N_1$ 、钻进排屑功率  $N_2$  和钻具系统空转功率  $N_3$  三个部分,对于同一种模拟月壤考察钻进规程对取心率和功耗的影响。

### 5.1 进给速度对功耗的影响

模拟月壤钻进过程中,要求钻具在各种工况下的输入功率不大于 350.00 W,在 2 m 进给条件下钻进时间不大于 1 h,因此平均进给速度不小于 33.33 mm/min,目前钻进试验中所采用的进给速度均为 100 mm/min。相关试验参数不变,取同样回转转速为 320 r/min,钻进深度为 2 000 mm,以进给速度作为单因素变量,在螺旋输送顺畅较宽参数范围内钻进功耗与进给速关联性弱,但当进给速度的增大到排粉出现塞流时,功耗会急剧上升(李谦等, 2013, 2014; 谭松成等, 2014)。顺畅螺旋输送下钻头切削功耗  $N_1$  由 39.24 W 增大到 39.26 W,排屑功耗  $N_2$  由 3.58 W 增大到 3.72 W,增幅都非常小。

### 5.2 回转转速对功耗的影响

相关试验参数不变,取进给速度为 100 mm/min,钻进深度为 2 000 mm,以回转速度为单因素变量,得出回转转速对钻进功耗的影响规律如图 6 所示。

钻进功耗的 3 个组成部分均随着回转转速的增大而显著增大。当转速由 40 r/min 增大到 320 r/min 时,钻头切削功耗  $N_1$  由 4.90 W 增大到 39.24 W,排屑功耗  $N_2$  由 0.53 W 增大到 3.64 W,钻具系统空转功耗由 5.60 W 增大到 130.00 W,钻进总功耗由 11.30 W 增大到 172.88 W。

### 5.3 钻压对功耗的影响

相关钻具和模拟月壤性质参数不变,取回转转速为 320 r/min,进给速度为 100 mm/min,钻进深

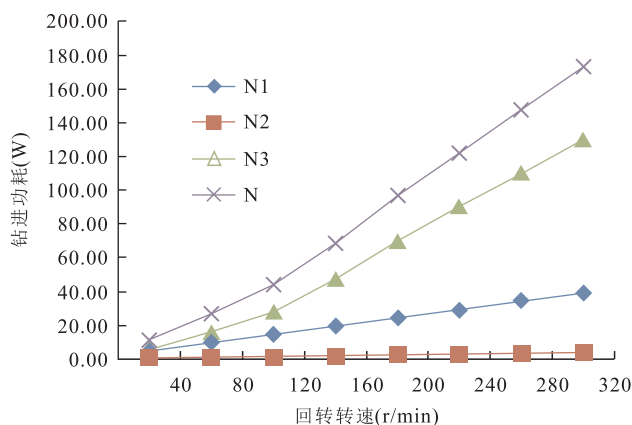


图 6 回转转速对钻进功耗的影响

Fig.6 Influences of rotation speed to the different components of drilling power

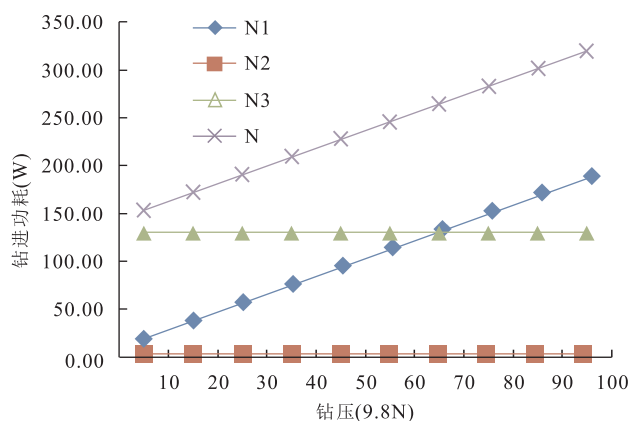


图 7 钻压对钻进功耗的影响

Fig.7 Influences of weight on bit to the different components of drilling power

度为 2 000 mm。因钻具采用自重加压的方式钻进,以钻具自重为单因素变量,得出钻压对钻进功耗的影响规律如图 7 所示。

随着钻压的增大,钻进功耗显著增大,但钻进排屑功耗和钻具系统空转功耗不变。当钻压由 100 N 增大到 1 000 N 时,钻头切削功耗由 19.77 W 增大到 186.68 W,增大幅度为钻进压力每增大 100 N 功耗增大 18.55 W,钻进总功耗由 153.42 W 增大到 320.33 W。

## 6 结论

(1) 试验数据表明,单纯采用内管软袋取心时,钻孔取心率在相同钻进参数条件下难以保持稳定,而内外管同时取心钻进时,改变了孔底流动形态,取

心质量明显提高;内管平均取心质量为 106.9 g,平均取心率为 80.4%;外管平均取心质量为 675.4 g,平均取心率为 102.8%;本机具平均取心率为 98.7%,实际月壤在 600 mm 深度内与目前密实度相当,取心结果具有较高置信度。

(2)模拟月壤钻进规程对功耗的影响分析表明,由于所采用的模拟月壤是相对密实度为 60%~70%的均质模拟月壤,由于密实度的原因,在较大进尺速度范围内钻进所需功耗变化较小,但高密实度下钻进所需功耗与进给速度密切相关。

(3)钻压和转速对钻进功耗的影响显著。当进给速度为 100 mm/min,钻进深度为 2 m,采用自重恒压钻进,转速由 40 r/min 增大到 320 r/min 时,钻进功耗由 11.30 W 增大到 172.88 W;当回转转速为 320 r/min,进给速度为 100 mm/min,钻进深度为 2 m,钻压由 100 N 增大到 1 000 N 时,钻进功耗由 153.42 W 增大到 320.33 W。

(4)钻孔取心试验结果与功耗计算理论模型表明,钻进所需功耗与转速呈近似线性增长的关系,但是转速的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钻进规程进行钻进。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。

(5)合理的取心钻具是有效钻进、可靠取心的基础,本文给出了可靠取心宽域参数钻进规程。针对所研究浅层模拟月壤,通过试验表明,取心率稳定,这套月壤钻孔取心钻具是可行的、实用的,可以实现可靠取心,组合钻具适应性强,与钻进规程匹配性强,但根据需求还需进一步优化,以求实现最佳组合方案,并使钻进规程设计更为合理。

## References

Barsukov, V. L., 1977. Preliminary Data for the Regolith Core Brought to Earth by the Automatic Lunar Station Luna 24. 8th Lunar Science Conference, Houston, 3303—3318.

Cremers, C. J., Hsia, H. S., 1973. Thermal Conductivity of Apollo 15 Fines at Low Density. Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference, Houston, (4): 164—166.

Duan, L. C., Li, Q., Zhang, D. W., et al., 2014. Experimental Research on Surface Sampling based on Lunar Soil Simulants. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 41(1): 3—8 (in Chinese with

English abstract).

Houck, K. J., 1982. Modal Petrology of Six Soils from Apollo 16 Double Drive Tube Core 64002. *Journal of Geophysical Research*, 87 (S1): A210. doi: 10. 1029/jb087is01p0a210

He, X. X., Xiao, L., Huang, J., et al., 2011. Lunar Soil Simulant Development and Lunar Soil Simulant CUG-1A. *Geological Science and Technology Information*, 30(4): 137—142 (in Chinese with English abstract).

Ivanov, A. V., Tarasov, L. S., Rode, O. D., et al., 1973. Comparative Characteristics of Regolith Samples Delivered from the Lunar Mare and Highland Regions by the Automatic Stations Luna-16 and Luna-20. Proceedings of the Lunar Science Conference, Houston, (1): 351—364.

Jiang, L., Su, B., Wang, C. K., et al., 2010. Study on LBD Lunar Soil Simulant. The 7th Annual Seminar Symposia of CDSET-CSA, Harbin, 192—198 (in Chinese).

Li, D. F., Lei, Y., Xu, S. N., 2013. Particular Coring Bit for Lunar Soil Drilling. *Earth Science*, 38 (Suppl.): 167—173 (in Chinese with English abstract).

Li, D. F., Li, T. M., Chen, H. J., et al., 2011. Coring Device for Shallow Lunar Soil Drilling. Chinese Patent, ZL200910272392.6 (in Chinese).

Li, D. F., Li, T. M., Chen, H. J., et al., 2012. Coring Device for Lunar Soil Drilling at Outer Hole. Chinese Patent, ZL201110043881.1 (in Chinese).

Li, Q., Duan, L. C., Gao, H., 2014. Correction and Application of Lunar Soil Simulation Surface Sampling Based on Experiments. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 41(9): 75—80 (in Chinese with English abstract).

Li, Q., Duan, L. C., Zhang, D. W., et al., 2013. Experiment in Torque Model of Digging the Lunar Soil Simulant. *Earth Science*, 38(6): 1363—1370. (in Chinese with English abstract).

Ling, Y., Song, A. G., Lu, W., 2014. Dynamics Analysis of a Rigid-Flexible Combined Lunar Sampler. *Journal of Astronautics*, 35(7): 770—776 (in Chinese with English abstract).

Liu, T. L., Li, L. X., Jiang, G. S., et al., 2015. A New Drilling Fluid for Drilling in Marine Gas Hydrate Bearing Sediments. *Earth Science*, 40(11): 1913—1921 (in Chinese with English abstract).

Tan, S. C., Duan, L. C., Huang, F., et al., 2014. Mechanics and Power Analysis of Auger Drilling Based on Simulated Lunar Soil. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 41(9): 81—84 (in Chinese with English abstract).

- Vinogradov, A. P., 1971. Preliminary Data on Lunar Ground brought to Earth by Automatic Probe "Luna-16". Proceedings of the Second Lunar Science Conference, Houston, (1): 1-16.
- Wang, S. J., Li, X. Y., Tang, H., et al., 2010. Lunar Surface Environment and Properties of Lunar Soil: A Review. *Geochimica*, 39(1): 73-81 (in Chinese with English abstract).
- Yan, T. N., Ran, H. Q., Duan, X. S., 2010. Universe Exploration and Drilling Technique. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 37(1): 3-7 (in Chinese with English abstract).
- Yin, S., Chen, L., Dong, Z. F., 2012. Lunar Soil Simulant for Drilling Tool Research. *Geology and Exploration*, 48(1): 165-169 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. S., Wang, S. J., Li, X. Y., et al., 2013. Properties and Harmfulness of Lunar Dust: A Review. *Earth Science*, 38(2): 339-350 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 段隆臣, 李谦, 张大伟, 等, 2014. 基于模拟月壤的表层采样试验研究. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 41(1): 3-8.
- 贺新星, 肖龙, 黄俊, 等, 2011. 模拟月壤研究进展及 CUG-1A 型模拟月壤. *地质科技情报*, 30(4): 137-142.
- 江磊, 苏波, 王长科, 等, 2010. LBD 模拟月壤研究. 中国宇航学会深空探测技术专业委员会第七届学术年会论文集. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学.
- 李大佛, 雷艳, 许少宁, 2013. 月球钻探取心特种钻头研制与试验. *地球科学*, 38(增刊 1): 167-173.
- 李大佛, 李天明, 陈洪俊, 等, 2011. 月球月壤浅层钻孔取心钻具. 中国专利, ZL200910272392.6.
- 李大佛, 李天明, 陈洪俊, 等, 2012. 月球月壤钻孔孔外取芯装置. 中国专利, ZL201110043881.1.
- 李谦, 段隆臣, 高辉, 2014. 基于试验的模拟月壤表层取样理论修正及其应用. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 41(9): 75-80.
- 李谦, 段隆臣, 张大伟, 等, 2013. 基于模拟月壤挖取采样扭矩试验及建模. *地球科学*, 38(6): 1363-1370.
- 凌云, 宋爱国, 卢伟, 2014. 一种刚、柔机械臂组合的月壤取样器动力学分析. *宇航学报*, 35(7): 770-776.
- 刘天乐, 李丽霞, 蒋国胜, 等, 2015. 一种海洋水合物地层钻井用新型钻井液. *地球科学*, 40(11): 1913-1921.
- 谭松成, 段隆臣, 黄帆, 等, 2014. 模拟月壤螺旋钻进力载特性分析. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 41(9): 81-84.
- 王世杰, 李雄耀, 唐红, 等, 2010. 月面环境与月壤特性研究的主要问题探讨. *地球化学*, 39(1): 73-81.
- 鄢泰宁, 冉恒谦, 段新胜, 2010. 宇宙探索与钻探技术. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 37(1): 3-7.
- 殷参, 陈轮, 董志峰, 2012. 钻进取样试验用模拟月壤. *地质与勘探*, 48(1): 165-169.
- 张森森, 王世杰, 李雄耀, 等, 2013. 月尘的性质及危害评述. *地球科学*, 38(2): 339-350.