

月球钻孔取心机具研制与试验

李大佛, 雷 艳, 许少宁

(中国地质大学长江钻头有限公司, 湖北 武汉 430074)

摘要:对月壤形成过程和物质组成进行了介绍,并将实际月壤基本物理力学指标与 CUG-1 型模拟月壤和普通干砂进行对比,认为在月球钻探取样过程中可能遇到具有一定胶结强度的硬质团块。我国探月工程三期的核心任务是实现月球钻探取样和返回,并明确要采用钻孔取样方式来获取能保持原始层理结构的较深层月壤样品。月表处于无水、高真空、微重力、日夜温差悬殊的极端环境,因此月球钻探取样采用的钻孔取心机具应结构简单,以减少钻进故障几率和拓宽对所钻月壤层的适应性。针对模拟月壤,分别对传统钻孔取心钻具、孔内取心钻具、孔外取心钻具、软袋翻转取心钻具、内外管联合(内管、外管)取心钻具进行了试验研究。试验研究结果表明,内外管联合取心钻具能更好地满足我国月球钻探取样返回的要求。

关键词:月球钻孔取心;钻孔取心机具;钻孔取样;月壤;硬质团块

中图分类号:P634.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2015)02-0001-07

Development of Lunar Coring Tools and the Experiment/LI Da-fu, LEI Yan, XU Shao-ning (Changjiang Bits Co., Ltd., China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: The formation process of lunar regolith and the material composition are introduced, by the comparison of basic physical and mechanical indexes of lunar regolith with stimulated CUG-1 lunar regolith and common dry sand, it is indicated that in the lunar sample drilling process, hard aggregate (briquettes) with certain cementing strength may be encountered. The core task of the third stage lunar exploration project of China is to realize lunar drilling and sampling as well as returning, and obtain lunar regolith samples in deep layer with original bedding structure. Because of the extreme environment of lunar surface, the structure of coring tools should be simple to reduce accident rate with broaden adaptability to regolith layer drilling. With the stimulated lunar regolith, the experimental research is respectively made on traditional borehole drilling, downhole coring tool, lunar surface sampling tool, soft bag overturning coring tool and double-tube (inner and outer tubes) coring tool, it shows the combined coring tool with inner and outer tubes can meet the requirements of China's lunar sample drilling and returning.

Key words: lunar core drilling; core drilling tool; sample drilling; lunar regolith; hard aggregate

我国探月工程三期的核心任务是实现月球钻探取样与返回,并明确要求采用钻孔取样方式来获取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,并且月表钻探取样无人操作,地表遥控^[1]。

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,实施月壤钻孔取心必须安全可靠、万无一失。

1 月壤基本情况^[1]

月壤成分、物理力学性质,以及月壤颗粒表面微观结构特征,是探讨月壤形成演化过程和推动月球科学研究的重要基础,对于实现月球资源开发利用目标具有重要意义。月壤特性是什么、可钻性如何,众说纷纭,没有具体描述,没有权威论证,这里介绍3种描述月壤特性的资料。

(1)月球像地球以及其他固态天体一样,表面覆盖着一层由疏松的颗粒状岩石构成的物质,通常被称为月壤层^[2]。地球的表土层是岩石在风、水、热、生物等因素共同作用下形成的,而月球表面的月壤层则是由于陨石撞击形成,并受微陨石轰击、宇宙

收稿日期:2015-01-09; 修回日期:2015-01-16

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(编号:20128Y101003)

作者简介:李大佛,男,汉族,1937年生,总经理,教授,我国低温电铸金刚石钻头领域的主要开拓者与带头人,从事机械钻探与电镀技术的教学与科研工作,湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号,ztgs@cug.edu.cn。

射线轰击以及由于较大昼夜温差导致的周期性热脉冲作用等后期空间风化作用的改造。其中陨石撞击所导致的挖掘、碾碎过程是月壤形成的主要作用过程,决定了月壤的基本组成与基岩保持一致。月壤与基岩一样,主要由橄榄石、斜长石、辉石、钛铁矿以及玻璃质组成,但月壤颗粒在经受后期的空间风化作用改造后会在成分和微观结构上产生变化,形成月壤的独特性质。由于月壤主要来源于陨石对下层基岩的挖掘和碾碎,因此可以判断月球的岩石类型主要包括斜长岩、玄武岩、克里普岩。斜长岩和玄武岩主要分别分布于高地和月海地区,而克里普岩则分布于风暴洋地区。

(2)月球表面由月壤、月海玄武岩、高地斜长岩和克里普岩等组成^[3]。Apollo 15 钻取的 243 cm 的月壤岩心钻孔分析结果表明,月壤分为 42 层不同结构单元,每个单元从几毫米到 13 cm 不等,这是由于长期受陨石及微陨石冲击及其溅射物的堆积所造成的。月壤中的角砾、岩屑、细粉尘、玻璃等由于来源不同,矿物和化学成分也有很大的差异。角砾是由岩屑、玻璃和粉尘混合胶结而成。

可见,在月表钻探取样时,除了考虑月壤的松散性外,下伏月壳岩石岩性的多样性也给钻探工艺提出了要求。

(3)月壤力学性能指标。

根据美国 Apollo 系列和前苏联 Luna 系列所取回的月壤样品,月壤的主要物理力学性能参数(Heiken,1991;Gromov,1992)为:中值粒径 40~130 μm,孔隙率 40%~173%,密度 870~1930 kg/m³,相对密度 2.9~3.24,粘聚力 0.26~1.8 kPa,内摩擦角 25°~45°。将月壤性能参数与普通干砂,以及中国地质大学(武汉)肖龙教授等^[4]研制的 CUG-1 型模拟月壤进行对比,其相关参数如表 1 所示。CUG-1 型模拟月壤的粒径分布如表 2 所示。

表 1 模拟月壤、普通干砂和实际月壤的主要物理力学参数比较				
参数指标	密度/(g·cm ⁻³)	相对密度	内摩擦角/(°)	粘聚力/kPa
模拟月壤	1.45~1.90	2.88	20~21	2.1~1.71
实际月壤	1.6~1.8	2.9~3.2	25~50	0.2~1.8
普通砂子	1.45~1.90	2.68	16.5~18.2	2.0~13.7

前面所述月壤的 6 个主要物理力学性能参数是基于月面测试和返样测试,以及模拟月壤测试一般经验提出的。从钻孔取心的角度分析,从安全

表 2 CUG-1 型模拟月壤粒度分布						%
样品 编号	粒径/mm					
	>0.075	0.075~ 0.05	0.05~ 0.01	0.01~ 0.005	0.005~ 0.002	<0.002
A(25)	20.0	40.3	12.5	17.4	2.5	7.3
B(45)	6.6	53.6	15.6	9.6	7.7	6.9

可靠的观点出发,笔者认为可提出以下假设:在月球表面之下某个层位,例如 1 或 2 m 深处可能出现因某种原因使松散月壤颗粒胶结成团、成块、而且具有一定的胶结强度的现象,或出现还没有风化改造好的月球基岩,例如玄武岩等。

2 月球钻孔取心机具研制与试验

在充分了解国内外取样实践和我们在试验取样研究的基础上,我们不断研制月表取样钻具,采用钻孔取样方式来获取能保持层理结构的较深层的月壤样品。目前,研制了在大气环境下回转钻进取心的钻头、钻具和取心装置的设计方案,并进行了大量的实践试验和不断的机具改进,历经 4 年,进行了上千次试验,获得了较好的效果。

2.1 传统钻孔取心钻具研制及试验

试验用的钻头为自主研发生产的小尺寸低温电镀金刚石取心式钻头(见图 1)。钻头胎体成分为镍钴,胎体硬度 HRC25,水口数 4 个。钻头型号参数分别为:外径 33.5 mm,内径 25.5 mm,钻头长度 346 mm,金刚石镀层高度为 5 mm。

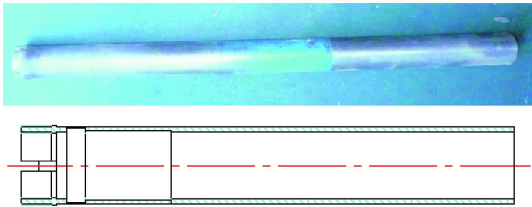


图 1 低温电镀金刚石取心式钻头

钻取对象为松散的干河砂,在不同的转速和不同的给进量以及其它相同的试验参数下,在同一性质的干河砂上进行多次取心钻进试验,试验结果见表 3。

由于是无循环水和循环空气的连续钻进,无法冷却钻头和排出岩屑,重复切屑砂样造成钻头发热,而导致松散的砂样变成块状,堵死取心管(见图 2)。试验中最大进尺为 290 mm,采取率最高为 18.2%。这套钻孔取样方案,说明了传统的钻孔取样方式在

表 3 传统钻具试验部分数据

转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	进给量/ ($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)	纯钻 速间 /min	进 尺/ mm	岩心 长度/ mm	岩心 质量/ g	岩心 采取 率/%
25	4	73	290	50	29.7	17.2
25	10	28	290	50	29.7	17.2
25	15	22	290	60	36	20.6
63	4	67	290	45	28	15.5
63	10	27	290	45	28	15.5
63	15.75	17	290	45	28	15.5
160	6.4	44	290	50	29.7	17.2
160	9.6	28	290	48	29.2	16.5
160	15.75	16	290	38	23.2	13.1
25	4	73	290	35	20.5	12
25	10	27	290	50	29.7	17.2
25	15	17	290	53	31.5	18.2
63	4	67	290	24	15	8.2
63	10	27	290	37	23	12.7
63	15	16	290	37	23	12.7
160	10(9.6)	28	290	34	20.3	11.7
160	16	19	290	42	26.5	14.4

注:岩心采取率是按岩心质量计算的采取率,下文同。



图 2 传统方式取心堵心照片

钻取松散砂样时采取率不高。

2.2 孔内取心钻具研制与试验

孔内取心钻具具有能保持层理信息、便于整型、采取率高的特点。这套装置采用螺杆钻头钻进,利用螺杆钻头的螺旋槽,当砂样在螺旋叶片表面和螺旋叶片一起作圆周运动时,由于圆周力和离心力的作用使砂样沿径向方向不断地被抛起,而在钻头外面加一个比螺旋钻头大的静止取心管,由于模拟月壤与取心管之间产生摩擦,在螺旋钻头旋转离心力和轴向推力的作用下,沿取心管内壁和螺旋槽上升,从而使砂样连续不断地向上输送,当砂样上升到一定设计高度时流入取心装置,从而达到取心的目的(该装置各部件示意图见图 3),达到保持层理信息和采取率高的效果。

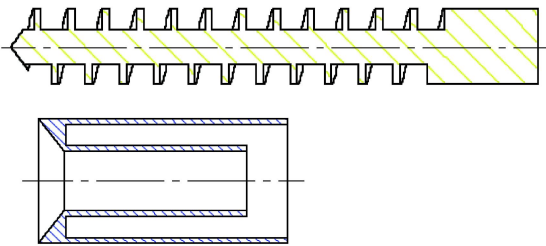


图 3 孔内取心钻具示意

钻取对象为模拟月壤,在不同的转速和不同的给进量以及其它相同的试验参数下,在同一性质的模拟月壤上进行多次取心钻进试验。在钻取模拟月壤试验中,最大取心深度为 2.0 m,取心质量 3510.6 g,采取率为 109.3%。此方式能够满足取心要求,但必须从孔内提取岩心样品(部分数据见表 4)。

表 4 孔内取心钻具试验部分数据

砂样	转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	进给量/ ($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)	纯钻 时间 /min	进 尺/ mm	岩心质 量/g (装满)	采取 率/%
模拟月壤	200	12	43	515	1012	99.0
模拟月壤	200	12	45	533	1023	96.6
模拟月壤	200	12	46	545	1023	94.5
模拟月壤	200	26	22	570	1055	93.2
模拟月壤	200	26	20	512	990	97.4
模拟月壤	200	26	21	525	995	95.4
模拟月壤	200	50	11	535	993	93.4
模拟月壤	200	50	11	512	980	96.4
模拟月壤	200	50	11	539	1034	96.6

2.3 孔外取心钻具研制与试验

由于在月球上无人操作,从孔内提取岩心样品有一定的难度,因此我们研制了孔外取心钻具(见图 4),便于整型、回收、封装与返回。



图 4 孔外取心钻具照片

钻取对象为模拟月壤,在不同的转速和不同的给进量以及其它相同的试验参数下,在同一性质的模拟月壤上进行多次取心钻进试验。孔外取心钻具试验部分数据见表 5。

在钻取模拟月壤试验中,平均取心质量为 1710.2 g,平均取心率为 103.4%。孔外取心钻具试验情况见图 5。

2.4 保持月壤层理信息试验

表 5 孔外取心钻具试验部分数据

砂样	转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	进给量/ ($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)	纯钻 时间 /min	进 尺/ mm	岩心 质量/ g	采取 率/ %
模拟月壤	200	12	122	1458	3038	129.8
模拟月壤	200	12	120	1434	2707	117.6
模拟月壤	200	12	122	1454	2863	122.7
模拟月壤	200	26	56	1439	2697	116.8
模拟月壤	200	26	56	1449	2378	102.2
模拟月壤	200	26	51	1330	2971	139.2
模拟月壤	200	50	30	1452	2595	111.3
模拟月壤	200	50	29	1439	2484	107.5
模拟月壤	200	50	29	1429	2837	123.7



图 5 孔外取心钻具试验钻进照片

针对研制的钻具,在钻孔取样过程中,是否能保证月壤样品的层理信息,我们采用不同颜色的模拟月壤进行钻进试验。

把要钻取的模拟月壤染为红、兰、黄、黑 4 种颜色,装在同一个容器里(如图 6 所示)。在 250 r/min,进给量为 50 mm/min,以及其他相同的试验参数下钻进试验。结果,钻取的月壤样品能保持原始的颜色顺序不变,验证了这套钻具在取心过程中,保证了原始的月壤结构层序不变(见表 6、图 7)。

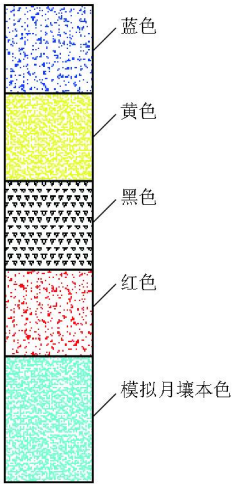


图 6 保持月壤层理信息试验示意

表 6 保持月壤层理信息试验部分数据

试验 次数	兰色			黄色			黑色			红色		
	出砂时所钻 的深度/mm	砂样质 量/g	采取 率/%	出砂时所钻 的深度/mm	砂样质 量/g	采取 率/%	出砂时所钻 的深度/mm	砂样质 量/g	采取 率/%	出砂时所钻 的深度/mm	砂样质 量/g	采取 率/%
1	226 ~ 376	327	135.6	376 ~ 526	340	141	526 ~ 680	367	147.9	680 ~ 840	370	143.4
2	211 ~ 354	322	140	354 ~ 487	307	143	487 ~ 628	330	145	628 ~ 788	385	149.2
3	163 ~ 323	421	163	323 ~ 473	405	168	473 ~ 638	420	157.8	638 ~ 795	413	163.2



图 7 保持月壤层理信息试验照片

2.5 软袋翻转取心试验

参照前苏联 Luna 系列在月球钻孔取心的方式(见图 8、表 7),钻取对象为模拟月壤,在不同的转速和不同的给进量以及其它相同的试验参数下,在同一性质的模拟月壤上进行多次取心钻进试验。试验结果见表 7;平均取心质量为 81.7 g,平均取心率为 58%。文献[5]中介绍了前苏联 Luna 16(1970 年)、Luna 20(1972 年)和 Luna 24(1976 年)分别在月球上取心质量为 101、50 和 170.1 g。其中以取心效果最好的一次取心质量为 170.1 g,其取心率若按长度比为 71%,若按体积(质量)比为 53%(说明软袋内岩心样品没装满,有不少空洞)。

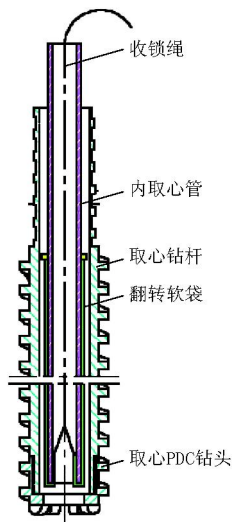


图 8 软袋翻转取心示意

表 7 软袋翻转取心试验部分数据

序号	转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	进给量/ ($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)	进尺/ mm	砂样质 量/g	采取 率/%	功率/ W
1	40	100	750	31	23.9	17
2	40	100	750	92	71.1	
3	40	100	750	125	96.7	
4	80	100	730	58	44.8	35
5	80	100	710	103	79.6	
6	80	100	720	74	57.2	
7	120	100	690	52	60.1	53
8	120	100	800	88	63.8	
9	120	100	780	106	78.8	
10	160	100	790	42	30.8	79
11	160	100	990	131	76.7	
12	160	100	990	139	81.4	
13	200	100	990	0	0	100
14	200	100	990	143	83.8	
15	200	100	990	120	70.3	
16	240	100	1000	134	77.2	120
17	240	100	990	32	18.7	
18	240	100	990	131	76.7	
19	280	100	990	133	77.9	145
20	280	100	990	144	84.3	
21	280	100	900	76	48.9	
22	320	100	900	28	18	170
23	320	100	900	13	10.9	
24	320	100	900	97	62.5	

2.6 内外管联合(内管、外管)取心钻具研制与试验

2.6.1 试验目的

软袋翻转取心方式存在以下不足:

(1)内管软袋翻转取心方式的取心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壤层(胶结力较强的硬质团块等),该方式软袋封口取心的功能就很难实现,因此要保证取心质量会有风险。

基于上述原因,我们采用内外管联合取心方式(见图 9),以求互补确保较高的取心率和取心质量,减少钻进故障几率,拓宽适应性,即使遇到胶结比较牢固的硬质团块等,通过内外取心装置的各自特性取长补短,安全可靠地完成取心任务。

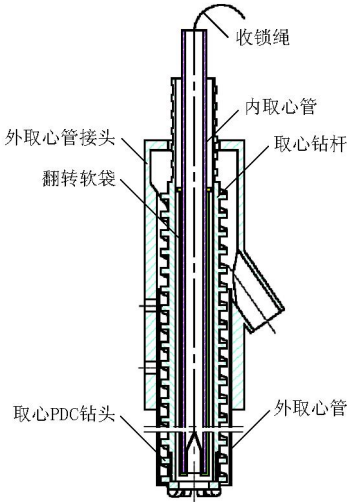


图 9 内外管联合取心示意

2.6.2 试验方案

采用了内外管同时取心,以不同的转速 40、80、120、160、200、240、280、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 次试验,并求出平均值,一共做了 24 次试验。

2.6.3 试验原理

内外管联合取心装置的结构设计如图 9 所示。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不动,只有钻头和钻杆旋转。

软袋取心过程中,当所取模拟月壤为干燥、松散的细砂颗粒时,钻头向下运动过程中,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,并同步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部位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移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 2 种取心方式互不干扰,因而能更好的保证钻进取心目的。

2.6.4 内外管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见表 8,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 10 所示,钻进所需总功率与转速的关系如图 11 所示。

表 8 内外管联合(内管、外管)取心钻具试验数据

序号	转速/ (r·min ⁻¹)	进给量/ (mm·min ⁻¹)	进尺/ mm	内管砂 样质 量/g	内管 采取 率/%	外管砂 样质 量/g	外管 采取 率/%	本机具 采取 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	

由表 5 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 106.9 g,平均取心率为 80.4%;外管取心平均质量为 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。

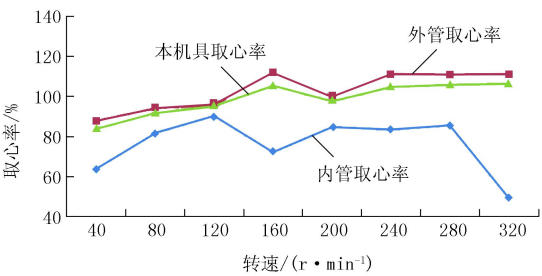


图 10 转速对 3 种取心率的影响

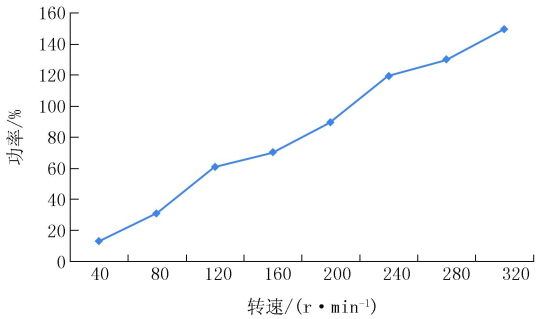


图 11 转速对功率的影响

由图 10 可知,采用软袋与外管联合取心钻进时,软袋取心仍然难以保证稳定的取心率,其取心率为 49.2% ~ 90.37%,且钻进过程中的干扰因素相对较多。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。

同时采用内管和外管联合进行模拟月壤取心钻进试验时,一方面软袋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 11 可知,在自然堆积的模拟月壤取心钻进试验中,添加外管后并不会过多的增大钻进所需功耗。因此,联合取心方式相比单纯的软袋取心方式能安全可靠的满足我国月球钻探取样返回的要求。

(注:内管取心率指内管所钻取样品的体积与钻头内径所钻样品体积之比;外管取心率指外管所

钻取样品的体积与钻头环状面积所钻样品体积之比;本机具取心率指内外管所钻样品的体积与钻孔体积之比。以上的取心率按质量之比算。)

3 结论

(1)对被钻对象月壤进行了调研分析,提出了被钻对象月壤的可钻性范围,为钻具的研制提供了基础。

(2)从试验数据可以看出内外管同时取心效果较好,内管(软袋翻转取心)平均取心质量 106.9 g,平均取心率为 80.4%;外管(螺旋通道输送)取心平均质量为 675.4 g,平均取心率为 102.8%;本机具(内外管联合)平均取心质量为 782.3 g,平均取心率为 98.7%。

(3)在内外管联合(内管、外管)取心钻进试验中,添加外管后并不会过多地增大钻进所需功耗。因此,内外管联合取心方式相比单纯的软袋取心方式能安全可靠的满足我国月球钻探取样返回的要求。

(4)经过大量的实践试验和不断的机具改进,证明我们研制的这套钻具可钻取 6 级(含 6 级)以下的任何月壤层,按照航天科技集团指南要求,能够安全可靠地完成月球钻孔取心任务。

参考文献:

- [1] 李大佛,雷艳,许少宁.月球钻探取心特种钻头研制与试验.地球科学,2013,38(1):167-173.
- [2] 王世杰,李雄耀,唐红,等.月面环境与月壤特性研究的主要问题探讨.地球化学,2010,39(1):77-79.
- [3] 江磊,苏波,王长科,等. LBD 模拟月壤研究[A].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[C].黑龙江哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- [4] 贺新星,肖龙,黄俊,等.模拟月壤研究进展及 CUG-1A 型模拟月壤[J].地质科技情报,2011,30(4):137-142.
- [5] 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.
- [6] 李大佛,屠厚泽,李天明.金刚石、PDC 钻头与工艺学[M].北京:地质出版社,2008:302-306.
- [7] 李谦,段隆臣,高辉.基于试验的模拟月壤表层取样理论修正及其应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(9):75-80.
- [8] 凌云,宋爱国,卢伟.一种刚、柔机械臂组合的月壤取样器动力学分析[J].宇航学报,2014,(7):770-776.
- [9] 殷参,陈轮,董志峰.钻进取样试验用模拟月壤[J].地质与勘探,2012,48(1):165-169.
- [10] 段隆臣,李谦,张大伟,等.基于模拟月壤的表层采样试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(1):3-8.
- [11] 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.
- [12] 李大佛,李天明,陈洪俊,等.月球月壤浅层钻孔取心钻具:中国,ZL 200910272392.6[P].2011-09-14.
- [13] 李大佛,李天明,陈洪俊,等.月球月壤钻孔孔外取芯装置:中国,ZL 201110043881.1[P].2012-08-22.