

**编者按:**2004 年 2 月 13 日我国公布首次探月计划——嫦娥计划,计划分“绕”、“落”、“回”3 个发展阶段。目前,第一阶段已圆满完成。不久将实施“嫦娥 2 期”、“嫦娥 3 期”工程,实现月球探测器在月面软着陆并进行月面勘察,完成月球自动采样并返回。嫦娥计划令全球华人感到欢欣鼓舞,我们钻探工作者更是对月球钻探取样技术充满兴趣,跃跃欲试。为此,本刊约稿发表下文,以飨读者。

## 宇宙探索与钻探技术

鄢泰宁<sup>1</sup>, 冉恒谦<sup>2</sup>, 段新胜<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

**摘 要:**钻探技术已成为人类探索宇宙的首批技术之一。以月球钻探为例,论述了外星球钻探的特点和难点;介绍了美国、前苏联钻探专家与航天专家合作研制的轻便、高可靠性、全自动月表取样钻机及其钻进工艺的现状;分析了各种钻进方案的优缺点;结合我国将要实施的“嫦娥 3 期”工程,就月球自动采样并返回技术提出了设想。

**关键词:**宇宙探索;嫦娥工程;月球钻探;取样返回

**中图分类号:** P634      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-7428(2010)01-0003-05

**Universe Exploration and Drilling Technique/YAN Tai-ning<sup>1</sup>, RAN Heng-qian<sup>2</sup>, DUAN Xin-sheng<sup>1</sup>** (1. China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China; 2. The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

**Abstract:** Drilling has been one of the first batch of techniques for human universe exploration. Take the example of lunar drilling, the paper discussed the drilling characteristics and the difficulties in other celestial bodies; introduced the light, reliable and automatic lunar-surface sampling machine, which was developed by the drilling experts and aerospace experts of US and the former Soviet, and the status of drilling technology; analyzed the advantages and disadvantages of various drilling schemes and proposed some ideas to the auto sampling and returning technology for “the Third-phase of Chang’e Program”.

**Key words:** universe exploration; Chang’e Program; lunar drilling; sampling and returning

### 1 问题的提出

以前,人们仅强调钻探是地学研究、资源勘探开发、城镇建设、灾害防治的重要手段,对于它在宇宙探索中的意义却知之甚少。其实,早在 1969 ~ 1976 年,美、苏就先后在月球上完成了钻探取样并返回的壮举。2005 年,美国的“勇气”号、“机遇”号又登上了火星,自动钻成了深 2.7 mm、直径 45 mm 的人类火星第一钻。因此,钻探工程师们为自己的专业成为人类探索宇宙的首批技术之一感到非常自豪。

确切地说,钻探为宇宙探索服务并非从 1969 年才开始,而是可以追溯到 20 世纪初叶。值得一提的是,1908 年 6 月 30 日在西伯利亚地区曾发生陨石落地烧毁森林的事件。当时首批敢于走向恐怖森林去探险的勇敢者惊讶地发现,虽然在陨石落下的地方造成了巨大的灾难,但却找不到陨石本身的任何痕迹。于是他决定用钻探的办法继续向深部寻找。在 1929 年曾用 2 台手动钻机在陨石着陆点附近钻

了 3 个深度达 34 m 的钻孔。这是人类首次尝试用钻探的方法研究宇宙科学问题。

美国人也曾利用钻探手段来研究阿利樟陨石坑。有趣的是,钻探公司为了吸引资金曾放出陨石碎片中铂金含量很高的流言,并集资在主要陨石出露的地点钻了几个深度达 200 m 的钻孔。但随着铂金陨石预言的破灭,该股份公司最终也破产了。

了解其它行星内部的物质成分,行星的演化规律,解开生命起源的秘密已不仅是科学家们感兴趣的问题,而是与人类文明前途息息相关的重大课题。随着技术的进步,宇宙探索过程本身已表现出越来越明显的工程性质,其第一步就是取回天体的岩样,唯一的方法是钻探。也就是说,从 1969 年开始的月球钻探是钻探技术实质性用于深空探索的里程碑。

### 2 人类实现月球钻探的技术现状

#### 2.1 概述

收稿日期:2009-12-14

**作者简介:**鄢泰宁(1945-),男(汉族),江西南昌人,中国地质大学(武汉)教授、博导,俄罗斯自然科学院外籍院士,享受国务院特殊津贴,探矿工程专业,长期从事钻探工程教学与科研工作,湖北省武汉市鲁磨路 388 号,tnyan@cug.edu.cn。

月球是地球的近邻,它既是一个理想的深空探测中继站,又是具有重要战略意义的太空基地。月球上特有的矿产和能源是对地球资源的重要补充和储备。迄今人类已完成的月球取样情况如表 1 所示。

表 1 美国、前苏联曾实现的月球取样工程信息一览表

|     | 项 目     | 执行日期    | 取样方式         | 取样质量/kg | 取样深度/mm | 取样直径/mm | 取样动力/W | 钻杆转速/(r• min <sup>-1</sup> ) | 钻机自重/kg | 钻进给力/N    | 钻进速度/(mm• min <sup>-1</sup> ) |
|-----|---------|---------|--------------|---------|---------|---------|--------|------------------------------|---------|-----------|-------------------------------|
| 美国  | 阿波罗-11  | 1969.7  | 人工钳、耙、铲、锤击取样 | 22      | 月面      | 20~30   | 430    | 280                          | 13.4    | 钻机自重+人工给进 | 70~150                        |
|     | 阿波罗-12  | 1969.11 |              | 34.6    |         |         |        |                              |         |           |                               |
|     | 阿波罗-14  | 1971.2  |              | 42.6    |         |         |        |                              |         |           |                               |
|     | 阿波罗-15  | 1971.7  | 77           | 2360    |         |         |        |                              |         |           |                               |
|     | 阿波罗-16  | 1972.4  | 95           | 2180    |         |         |        |                              |         |           |                               |
|     | 阿波罗-17  | 1972.12 | 110.5        | 3050    |         |         |        |                              |         |           |                               |
| 前苏联 | Luna-16 | 1970.9  | 遥控回转钻取并自动封装  | 0.101   | 350     | 18      | 280    | 500                          | 13.6    | 120       | 57                            |
|     | Luna-20 | 1972.2  |              | 0.050   | 290     |         |        |                              |         |           |                               |
|     | Luna-24 | 1976.8  |              | 0.1701  | 2250    |         |        |                              |         |           |                               |

虽然人类已完成的 9 次月表取样工程是 33 ~ 40 年前完成的,但仍可看出以下特点。

(1) 每次取回的月球样品数量差别很大(0.05 ~ 110 kg)——体现的是无人登月和有人登月、纯钻探取样和“钻探取样+人工拾取”的差异。

(2) 无人登月的情况下每次登月只钻一个回次取样,仅靠从地球上遥控月表钻机自动钻进取样,不可能大幅度提高采集并返回的月壤样品数量。

(3) 无论无人或有人登月,航天器对月表钻机的自重都有严格限制。

(4) 月表钻机对功率消耗有严格限制,无人登月钻机动力为 280 W,有人登月为 430 W。

(5) 与地球钻探不同,在月球上打钻还将面临以下技术难点:

①月表 14 cm 以深的月壤很致密,但月表既无

空气又无水,如何及时排除岩粉和冷却钻头?

②足够的钻压是保证钻探速度的最重要因素,但月面的重力仅为地球的 1/6,靠钻机自重提供钻压的方案不可取,如何在月球条件下快速钻进?

③月表除极少数裸露的基岩外,月壤的内聚力小,结构松散,这类岩石在地球上也属于难取样范畴,在无人登月的情况下,如何能在保证采取率和月壤原生层状结构的前提下,自动封装、转移岩心,可靠地进入返回舱并安全返回地球?

2.2 美国的阿波罗计划

月球上的第一批取样孔是由美国“阿波罗-11”宇航员们于 1969 年钻成的。自“阿波罗-11”载人登月以来,共取回 379.8 kg 样品,各个探月阶段所用工具示于表 2。

“阿波罗-11”宇航员用地质锤把铝质管形取

表 2 美国阿波罗-11~17 探月所带的专用工具和设备一览表

| 编号     | 可控铲子 | 加长柄 | 钳子 | 耙子 | 取土器 | 取土器帽 | 月表取样钻机 | 带钻头的岩心管 | 无钻头的岩心管 | 自动记录贯入仪 |
|--------|------|-----|----|----|-----|------|--------|---------|---------|---------|
| 阿波罗-11 |      | 1   | 1  |    | 2   | 2    |        |         |         |         |
| 阿波罗-12 |      | 1   | 1  |    | 4   | 1    |        |         |         |         |
| 阿波罗-14 |      | 1   | 1  |    | 6   |      |        |         |         |         |
| 阿波罗-15 | 1    | 1   | 1  | 1  |     |      | 1      | 1       | 5       | 1       |
| 阿波罗-16 | 1    | 2   | 2  | 1  |     |      | 1      | 1       | 5       | 1       |
| 阿波罗-17 | 1    | 2   | 2  | 1  |     |      | 1      | 1       | 5       |         |

土器打入月壤,取出了第一批 15 cm 深的样品(直径 20 mm)。但无论怎样用力打击,取土器都无法达到更大的深度。宇航员认为,1965 年设计的取土器管靴结构与该深度月壤的强度不适应,土样在取土器内锥面下被压实、变形。为此,“阿波罗-12”采用改进型外锥面取土器,但 3 名宇航员仍要花费 35 ~ 40 min 来取样。再次改进的取土器可以较小的力打入月壤中并方便起出。最终这种取土器分别从深度 35 和 70 cm 处取出了两份月壤样品。

“阿波罗-15”~“阿波罗-17”使用了由宇航员操作的电动取样钻机,采用“螺旋钻杆+螺旋岩心管和取心装置+硬质合金钻头”的组合式取心钻进方法,靠岩心管与钻杆的外螺旋来清洁孔底,取得了成功(参见图 1)。

从原理上讲这种钻进方法远非新技术,它早在 20 世纪 50 年代就用于工程地质勘测。只是美国人对钻机的质量、强度特性和发动机类型提出了特殊要求。该钻机用电池供电,可连续冲击回转作业 40

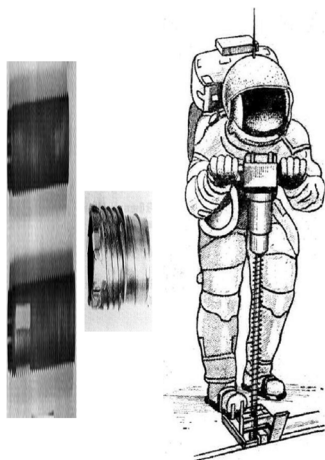


图1 “阿波罗-15”采用的螺旋钻杆、硬质合金钻头和宇航员操作电钻取样示意图

min。用直径 26.2 mm 的硬质合金钻头,钻进深度 2.8 m。在凸轮型冲击机构给出 4.6 J 冲击能量、冲击频率 2270 次/min、转速 300 r/min 的条件下,反扭矩为 27.4 N·m。钻机自重(地球质量)11.8 kg,钻压来自钻机自重和宇航员的体重。每节钻杆长约 0.7 m,理论钻速在玄武岩中为 25.4 mm/min,在疏松玄武岩中为 127 mm/min,而实际钻速小于上述指标。

月球钻渣的质量仅为地球的 1/6,对于钻进是个有利因素。因为在环状间隙中,只有离心力使钻渣与孔壁的摩擦力足够大,钻渣才会沿钻杆螺旋上移。也就是说,钻杆回转速度必须达临界值。而在重力明显小于地球的行星上,该临界值较小。为提高螺旋的输送效率,还可通过减少外螺旋与孔壁的摩擦和降低螺旋与孔壁接触面积的办法来帮助钻渣上移。但随着钻孔加深,螺旋的输送效率将下降,且来自月表的冲击力也会逐渐失效。

阿波罗计划执行过程中出现过“阿波罗-15”钻至 150 cm 后扭矩剧增,“阿波罗-16”在 72~80 cm 段无样品,80~120 cm 段样品断断续续,“阿波罗-17”在 38~40 cm 和 71~80 cm 段无样品等问题。

螺旋钻具在钻机自重和宇航员给进力共同作用下,钻入月壤并不困难(有如木螺钉),但钻达设计深度后往往从月壤中起拔岩心管很困难。于是美国人专门设计了从孔内撬出钻杆和岩心管的工具(图 2)。但在无人登月的情况下,则必须考虑如何解决起拔岩心管的问题。

### 2.3 前苏联的 Luna 计划

如果说美国的月球钻探主要是靠“传统钻进方法+宇航员给进操作”,那么前苏联的月球钻机则实现了由地球上遥控的自动化钻进。世界上第一次

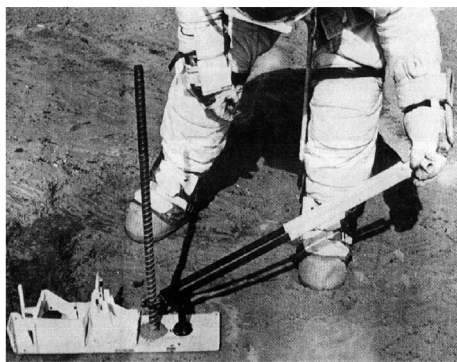


图2 宇航员利用脚踏板和撬杠将钻杆和岩心管从孔内撬出

月球自动钻探试验是“Luna-16”1970 年 9 月 20 日在月面丰海地区软着陆后开始的。其后又完成了“Luna-20”和“Luna-24”月球钻探。

“Luna-16”与“Luna-20”钻机的结构相同,装有螺旋给进机构和移动式回转器(图 3)。钻机的主要技术特性:硬质合金钻头直径 26 mm;钻孔深度 35 cm;直流电机驱动;钻机自重(地球质量)11.8 kg;给进方式为差动螺旋(可用于冲击作业);排屑方式为螺旋方法。钻机设计者们根据电动机的比功耗(破碎 1 cm<sup>3</sup> 月壤的焦耳数)和钻进速度来识别钻进过程是否正常。

“Luna-16”着陆后,机械臂将钻机置于月表,打开外保护罩,在传动装置和钻机自重作用下(70~80 N)沿与垂线成 15°的方向倾斜钻进,根据遥测的数据,钻进速度超过了计算值,平均达 6.1 cm/min。经过 6 min 14 s 孔深达 35 cm(达到设计深度),启动钻机的反向行程,冲击装置自动终止冲击。确认样品进入钻具后,机械臂将钻机摆起至返回舱附近,钻机旋转 180°,使钻具伸入返回舱内的样品箱,钻具接头自动脱开并密封样品箱,完成采样操作。“Luna-16”共取样 101 g,获得了 100% 的岩心,月壤样品保持了岩石的自然层序,很成功。

“Luna-20”与“Luna-16”的钻进参数完全相同,只是着陆点不同。“Luna-20”钻探过程持续了 16 min,但在钻至 90、150 和 340 mm 处出现三次断电保护,最终在 340 mm 处因电机自动断电而结束钻进。纯钻进时间为 4 min 35 s。钻进速度不均匀(在 46~240 mm/min 间摆动),平均钻速 75 mm/min,明显大于说明书给出的 60 mm/min。它与“Luna-16”钻进过程的明显区别表明,孔底岩石对岩心管表面的粘附力很不均匀,而且在螺旋通道的间隙中被压实了;钻进时螺旋机构不能及时排除岩屑,保证孔内清洁。最终返回地球的月壤只有 55 g。应该

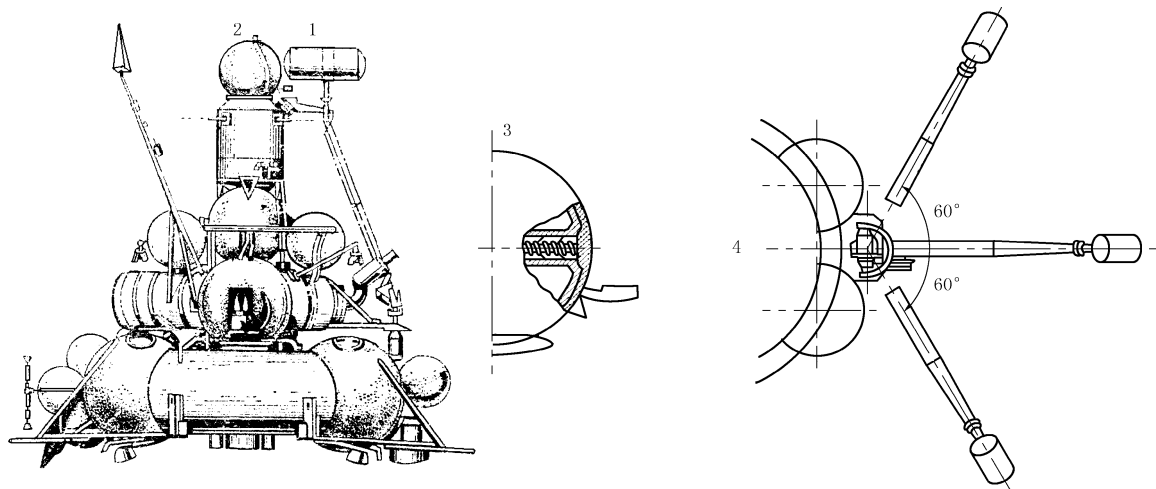


图3 “Luna-16”与“Luna-20”钻机结构示意图

说“Luna-20”并不很成功。

为了在月球上钻得更深并把样品带回来,必须解决2个问题:一是增大钻压,二是减小样品封装返回容器的尺寸。据此,前苏联钻探专家与航天专家合作设计了“Luna-24”新型钻机。

如图4所示,“Luna-24”新型钻机固定在登月舱外侧的倾斜滑道上,从而可借助登月舱的自重提供足够的钻压。钻机进入工作状态不必转动机械臂,而是让钻机沿着2个与月面垂线成 $30^\circ$ 的定向滑道向下滑动钻进斜孔。

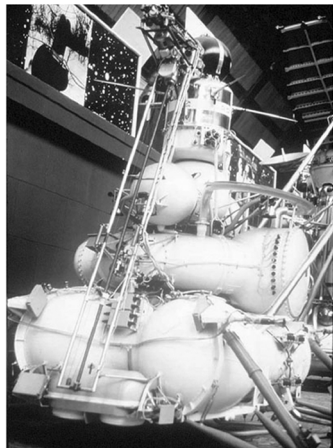


图4 “Luna-24”登月舱及其新型钻机外形图

图5为“Luna-24”钻机的结构示意图,其设计钻深2500 mm,实际钻深2250 mm。阶梯式硬质合金钻头直径为“Luna-20”的 $1/3$ ,可减少钻进能耗。采用三层管结构,直径8 mm的岩心装在柔性内管中。钻机用钢索提供给进力,钻进规程可根据岩石可钻性在回转与冲击回转钻进状态间自动转换。钻进过程中实时跟踪孔内工况,并具有事故报警功能,随时将遥测信息(取样起始时间,月壤强度和孔深等)

发往控制中心并向月表钻机发出指令。

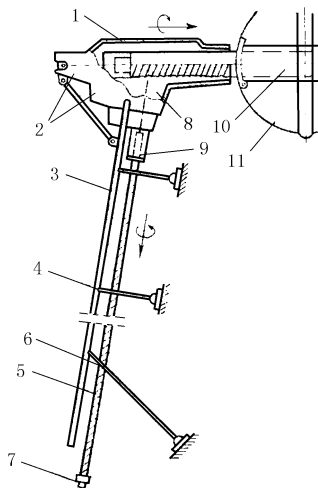


图5 “Luna-24”钻机结构示意图

1—带螺旋槽的卷鼓;2—外壳和驱动机构;3—导向杆;4、6—支架;5—螺旋钻杆;7—钻头;8—拉杆;9—回转器;10—样品舱;11—返回舱

1976年8月18日,“Luna-24”开始钻进时是很疏松的月壤。钻至孔深800 mm时月壤阻力增大,但仍可使用回转钻进方法。孔深1200 mm时月壤阻力快速增长,钻机自动转为冲击-回转钻进规程。从1600~2200 mm回转和冲击回转钻进规程轮流变换。此后,钻头切入致密地层,钻进自动停止在2200 mm处。全孔平均钻速15 cm/min,月表下约60 mm未取上岩心,实际岩心采取率71%。

进入返回行程后,装有岩心的柔管自动进入水平回转的卷鼓螺旋槽中,弹簧把卷鼓推入返回舱样品箱(图6)。然后引爆电燃药筒,炸断给进机构钢丝绳和支架上的固定端,使钻机向后仰并和登月舱一起留在月球上。返回舱起飞把月壤样品送回地球。



图6 带岩心的柔管在卷鼓上缠绕的实物图

### 3 我们的任务及对策

#### 3.1 任务

第一次月球探索发生在“冷战”时期,当时只有美国和前苏联两个超级大国参与竞争。现在新一轮的探月热潮已经在全世界兴起,美国航空航天局制定了《后阿波罗》月球探索规划。俄罗斯提出了重返月球的规划。日本、印度等国都发射了探月飞船,成为月球俱乐部的新贵。

我国月球探测大约分为3个阶段,第一阶段为不载人月球探测,第二阶段是载人月球探测,第三阶段是建立月球基地。第一阶段又称为“嫦娥工程”,可概括为“绕”、“落”、“回”三期工程,其中,“嫦娥1期”“绕”的任务已圆满完成,即将实施的“嫦娥2期”将实现探测器月面软着陆并进行月面勘察,“嫦娥3期”的重点是月球钻探取样并返回,为将来实现载人登月和建设月球基地积累经验。

#### 3.2 设计指导思想

(1)在吸收美、苏当年探月经验的基础上,在现有技术、经济条件下,研制简单可靠的月球样品采集、封装及转移系统,保证返回地球的月壤样品数量和质量尽可能满足月球科学研究的要求。

(2)借鉴前苏联“Luna-24”的结构,保留其可借助登月舱自重提供足够钻压,取样深度大,样品封装返回尺寸小等优点,但不能照搬。因为“Luna-24”毕竟是1976年完成的,我们在33年之后应该在此基础上有所创新。

(3)克服“Luna-24”方案的缺点。其岩心直径为8 mm,实际钻深2250 mm,岩心长度1600 mm,样品重170 g。如果按长度计算岩心采取率为71%,而按样品容积计算岩心采取率仅为53%。这表明,装岩心的柔性内管约有一半没有充满。我们耗巨资进行月壤钻探,如果有近一半的内管容积是空的,将是极大的浪费。出现这种结果的主要原因是柔性内管缠绕在小直径卷鼓上必然会变扁(参见图6),使

月壤颗粒往下被挤掉。同时,使样品不能保持月壤的原状结构。

(4)为了取回更多的深部月球样品,必须采用双层管或三层管(硬管或柔管)取心结构,不仅要求长度采样率,还要保证较高的容积采取率,并较好地保持月壤的原状结构。最终仅带回样品内管,把钻头和外螺旋钻杆留在月壤内,既可减轻返回舱质量,又不必考虑进尺过快起拔外管困难的问题。

(5)优化设计专用螺旋钻头、螺旋外管的螺距、螺宽和螺旋角——以利于排屑。针对松散月壤设计专用卡取装置,既保证采取率,又不增加回转扭矩。

(6)贯彻“技术上可实现,经济上可承受,代表国家水平”的“嫦娥3期”工程指导思想,在制定钻探技术方案的过程中,必须遵循:可靠性与经济性优先原则、广泛借鉴与自主创新相结合原则、满足探测器系统约束的原则。

#### 3.3 展望

外星球钻探难度最大的当数金星钻探。原则上可利用月球取样装置,但金星表面很坚硬,要用重型钻机;而且表面温度很高,需要增加冷却装置、结实的密封舱和自适应操作程序。所以,真正实现金星钻探还很遥远。

当务之急是国内钻探界要把“嫦娥工程”月球钻探取样当作份内的事,如果我们不发出声音,不拿出预研究的成果,那么整个以钻探为职业的群体将很难在国家重大工程中发挥作用。所以我们衷心希望广大青年钻探专家投身这项国家标志性工程,为国家和钻探事业做出贡献。

#### 参考文献:

- [1] 编辑部. 俄罗斯专家谈前苏联探月计划[J]. 世界科学, 2005, (5): 13-16.
- [2] В. Г. Кардыш. сборник очерков «Геология – жизнь моя» (вып. 1) [М]. Москва: 2000.
- [3] Ю. Н. Стрелков. О влиянии свойств лунного грунта на характер процесса отбора пробы (По материалам АЛС «ЛУНА – 20») [J]. КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, 1976, 14(1).
- [4] A. K. Leonovich, V. V. Gromov et al. Investigation of the physical and mechanical properties of lunar sample brought by Luna-20 and along the route of motion of Lunochod 2[C]. Report present at the 24 th IAF Congress[A]. Baku, USSR: 1973.
- [5] L. D. Jaffe. Shear strength of lunar soil from Oceanus procelarum [J]. The Moon, 1973, (8): 58-72.
- [6] Б. И. Воздвинжеский. В космос[М]. М., Наука: 1984.
- [7] 鄢泰宁, 等. 月球表面钻探取样——中国钻探界面临的新任务展望[J]. 探矿工程, 2003, (1): 9-11.
- [8] 鄢泰宁, 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, (4): 12-14.