

# 模拟月壤螺旋钻进力载特性分析

谭松成<sup>1,2</sup>, 段隆臣<sup>3</sup>, 黄帆<sup>3</sup>, 高辉<sup>3</sup>

(1. 渤海钻探工程有限公司, 天津 300457; 2. 西南石油大学, 四川 成都 610500; 3. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074)

**摘要:**月球钻探取样具有钻进对象松散、钻机功率小、质量轻、钻进过程无冲洗介质等难点,螺旋钻进因其连续排屑和干式回转钻进的能力,成为最具可行性的月球钻探取样方式之一。为确保在设备能力和月表环境限制下实现深层月壤钻探取样目的,针对月壤/模拟月壤物理力学特性,对螺旋钻探取样过程进行力载特性分析。分析表明,月球钻探具有螺旋叶片宽度窄、回转速度高的特点,可采用钻屑颗粒模式求得临界回转速度,然后选择合理的钻进工艺。螺旋钻进功耗包括钻头切削月壤的功耗和钻进排屑功耗,可根据功耗模型研究各变量对功率的影响规律,从而为钻具结构优化和钻进参数优选提供理论指导。

**关键词:**月球钻探;螺旋钻具;动力学分析;功耗模型

**中图分类号:**P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2014)09-0081-04

**Mechanics and Power Analysis of Auger Drilling Based on Simulated Lunar Soil/TAN Song-cheng<sup>1,2</sup>, DUAN Long-chen<sup>3</sup>, HUANG Fan<sup>3</sup>, GAO Hui<sup>3</sup>** (1. CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Tianjin 300457, China; 2. South-west Petroleum University, Chengdu Sichuan 610500, China; 3. China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

**Abstract:** Lunar sampling drilling has difficulties of loose drilling object, small power and light quality of drilling tools, as well as no flushing medium during drilling process. Since auger drilling has the characteristics of discharge cuttings continuously and drilling without drilling fluid, it becomes one of the most practicable methods for lunar drilling. To carry out the deep lunar sampling drilling under limited capacity of drilling tools and specific environment of lunar surface, the mechanics and power models during auger sampling drilling are studied, focused on the physical and mechanics characteristics of lunar soil (and its simulation). Analysis indicates that, auger driller for lunar sampling has comparatively narrow blade width and high rotational speed, thus the Cuttings Grain model should be employed to compute its critical rotational speed, and select reasonable drilling technology. Auger drilling power includes two parts, which are power for bit cutting lunar soil, and power for cuttings discharge. According to the drilling power model, effects of each variable on total power during lunar sampling drilling can be obtained, so as to provide theoretical guides for optimization of drilling parameters and drilling tools' structure.

**Key words:** Lunar drilling; auger driller; dynamic analysis; mechanics and power model

## 0 前言

随着现代航天技术与空间科学的迅速发展,空间活动已成为人类科学、技术、经济、军事和社会活动的又一个重要领地。人造地球卫星、载人航天和深空探测是航天活动的三大领域,而月球是距离地球最近的天体,因此月球探测是人类跨出地球摇篮、实现深空探测的第一步<sup>[1]</sup>。我国从2004年开启月球探测项目,共分为“绕、落、回”三个阶段,目前已经成功实现月球探测器在月表软着陆。月球探测第三阶段的核心任务是实现月面自动采样与返回,具

体为着陆器登陆月球以后采用表取方式获得月表松散月壤和月岩样品,采用钻取手段获得月表以下样品并返回。

月球表面具有高真空、低重应力、强辐射、昼夜温差悬殊,以及地形环境复杂等特点,相对地球钻探而言主要存在以下难点<sup>[2]</sup>:(1)受火箭搭载能力的影响,钻具所能提供的功率和扭矩小;(2)月表无法提供地面正常钻进所需的冲洗介质;(3)月表处于低重应力环境,需考虑额外钻进压力;(4)需要考虑如何实现松散地层钻进取心和返回。因此,根据月

收稿日期:2014-06-30

基金项目:国家自然科学基金项目“模拟月壤物理力学特性对钻进过程的影响机理研究”(51204151)

作者简介:谭松成(1986-),男(汉族),湖南衡阳人,渤海钻探工程有限公司博士后工作站,地质工程专业,博士,从事钻头破岩与钻井工艺相关的工作,天津市滨海新区大港油田红旗路128号渤海钻探第一钻井公司,wstansongcheng@163.com;段隆臣(1967-),男(汉族),江西九江人,中国地质大学(武汉)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。

壤/模拟月壤特性,对钻探取样过程进行力载特性分析,对确保在设备能力有限的条件下实现深层钻探取样目的,具有理论参考价值。

## 1 月壤基本特性

月壤是在氧气、水、风和生物活动都不存在的条件下,通过陨石和微陨石撞击、宇宙射线和太阳风持续轰击,以及大幅度昼夜温差导致岩石热胀冷缩破碎等共同作用于月球表面而形成的<sup>[1]</sup>。已有成果表明,除了极少数陡峭的山脉、撞击坑和火山通道的峭壁之外,整个月球表面几乎都覆盖着一层厚度不均的月壤层。月壤层的厚度大致与月表年龄呈线性关系,年龄越老则通常月壤层越厚,如月海区的平均厚度约为4 m,而高地区的平均厚度约为12 m<sup>[3]</sup>。月壤的主要物理力学性质包括月壤颗粒的粒径和形貌、月壤密度、孔隙度,以及粘聚力和内摩擦角等。月壤颗粒的粒度分布广,分选性差,其物理力学性质主要是由颗粒的尺寸和形貌所决定的<sup>[4]</sup>,月壤的主要物理力学性质指标为:中值粒径40~130 μm,平均粒径70 μm,密度1300~2290 kg/m<sup>3</sup>,相对密度2.85~3.29 kg/m<sup>3</sup>,孔隙比0.67~2.37,粘聚力0.26~1.8 kPa,内摩擦角25°~45°,承载力7~55 kPa。由此可见,月壤是一种松散、低粘性、中~高压缩性的粉细颗粒材料。

实际的月壤样品是非常珍贵的,为进行月球探测相关的科研活动,必须在模拟月壤的基础上开展。中国地质大学(武汉)肖龙教授等人研制的CUG-1A型模拟月壤主要服务于我国探月三期深层钻探取样试样和表层挖取等取样试验。CUG-1A型模拟月壤采用产自吉林省辉南县的玄武质火山渣作为原料,经过烘干、粉碎、过筛分级,并以实际月壤物理力学性能为目标,进行模拟月壤配置与调整而成<sup>[5]</sup>,其化学组分与Apollo系列所采样品大致相似。CUG-1A型模拟月壤的粒径主要为0.01~0.075 mm,而月壤的孔隙率受重力环境的影响有随着深度增加而减小的趋势,即深度越大,模拟月壤的密实程度越高。CUG-1A模拟月壤主要物理力学参数与实际月壤和普通砂的比较如表1所示。

表1 CUG-1A型模拟月壤与实际月壤和普通砂的主要物理力学参数对比

土壤名称	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	相对密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	内摩擦角/(°)	粘聚力/kPa
模拟月壤	1.45~1.90	2.77	26.06~27.55	0.21~1.71
实际月壤	1.30~2.29	2.85~3.29	25.00~45.00	0.26~1.80
普通砂	1.45~1.90	2.68	16.50~18.20	2.00~13.70

## 2 螺旋钻进力载特性分析

### 2.1 螺旋钻进在月球钻探中的应用

由于具有连续输土,施工效率高等优点,螺旋钻进在太空钻探取样中也被认为是最可行的钻进方法之一<sup>[6]</sup>。已实现的月球探测钻探取样任务中,美国宇航员在Apollo15、16和17中操作月表钻机进行深层取样时,采用的钻机组合均为“外螺旋岩心管和取样装置+硬质合金钻头”<sup>[7]</sup>,其中钻杆材料为钛合金,钻头材料为低合金高强度钢,且钎焊有碳化钨刀片;前苏联Luna16、20和24月球探测自动钻探取样任务中,所采用的钻具组合为“空心外螺旋钻具及其配合装置+硬质合金钻头”<sup>[8]</sup>。我国在研的月球探测钻探取样相关研究中,哈尔滨工业大学和北京航空航天大学的研究者均以空心外螺旋钻具为前提,对钻取试验装置和试验平台等进行了研究<sup>[9,10]</sup>。中国空间技术研究院的研究者在分析月表环境和现有钻探技术的前提下,确定了采用外螺旋钻杆进行排屑,并采用软袋进行样品自动回收的干式回转钻进工艺<sup>[11]</sup>。

### 2.2 模拟月壤钻进动力学分析

在螺旋钻进应用领域,关于钻屑的运移存在一个“临界转速”的概念,即只要钻具转速大于该“临界转速”就可以实现钻屑的自动运移,反之则会出现钻屑运移不畅,甚至卡钻事故使钻进被迫终止的情况。现有关于“临界转速”的计算模型包括钻屑颗粒式模型、钻屑整体组合式模型、将钻屑沿螺旋叶片径向分成无限层模型,以及将钻屑沿螺旋叶片径向分为内外层模型四种。文献[12]对有关于临界转速的文献进行总结分析,认为太空钻探取样过程中,外螺旋钻杆的螺旋叶片宽度相对较窄,尤其是螺旋叶片宽度与钻孔直径之比很小,而转速很高(如前苏联的Luna16和Luna20所采用的螺旋钻具外径即为28 mm,转速最高可达500 r/min<sup>[13]</sup>),因此可采用临界转速经典模型进行研究。

在经典模型条件下,将钻屑看作是单个的颗粒,受离心力作用运动到接触孔壁后,经钻屑颗粒与孔壁间的摩擦驱动力排出孔外,与其他模拟月壤颗粒无关<sup>[14]</sup>。当垂直钻进速度为零的情况下,钻屑在螺旋叶片上随螺旋钻杆作水平圆周运动,同时受到孔壁的摩擦驱动力、螺旋叶片的支撑力和摩擦阻力,以及重力这几个作用力而处于极限平衡状态。经典模式下螺旋钻进的临界转速 $n_r$ 和临界角速度 $\omega$ ,如式(1)、(2)所示。

$$n_r = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g(\sin\alpha + f_2 \cos\alpha)}{f_1 R_5 (\cos\alpha - f_2 \sin\alpha)}} \quad (\text{r/min}) \quad (1)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{g(\sin\alpha + f_2 \cos\alpha)}{f_1 R_5 (\cos\alpha - f_2 \sin\alpha)}} \quad (\text{rad/s}) \quad (2)$$

式中:  $g$ ——重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;  $\alpha$ ——钻杆的螺旋叶片升角, ( $^\circ$ );  $f_1$ ——模拟月壤与模拟月壤之间的摩擦系数,  $f_1 = \tan\varphi$ ;  $f_2$ ——模拟月壤与螺旋钻具之间的摩擦系数;  $\varphi$ ——模拟月壤的内摩擦角, ( $^\circ$ );  $R_5$ ——螺旋叶片外半径, 即钻具外半径,  $\text{m}$ 。

### 3 模拟月壤钻进功耗模型

螺旋钻进功耗  $N$  包括: 钻头钻进模拟月壤功耗  $N_1$ ; 钻屑上返所需功耗  $N_2$ 。

$$N = N_1 + N_2 \quad (3)$$

#### 3.1 钻头钻进模拟月壤功耗

目前的计算模型源于土方机械设计, 单个切削刃上的受力计算<sup>[13]</sup>:

$$P_0 = P_1 + f_2 P_2 \quad (4)$$

式中:  $P_0$ ——钻头切削齿单位长度上的阻力,  $\text{N/m}$ ;  $P_1$ ——钻头切削齿单位长度上的切削阻力,  $\text{N/m}$ ;  $P_2$ ——钻具在钻头切削齿单位长度上产生的压力,  $\text{N/m}$ 。

$$P_1 = K\Delta h = K(60v)/(nn_b)$$

$$K = \gamma H N_q + c N_c$$

$$N_q = \tan^2(45 + \varphi/2) e^{\pi \tan\varphi}$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot\varphi$$

式中:  $K$ ——切削比阻力,  $\text{N/m}^2$ , 对于松散无胶结的模拟月壤, 可以取  $K$  为模拟月壤的极限承载力;  $\gamma$ ——模拟月壤的重度,  $\text{N/m}^3$ ,  $\gamma = \rho g$ ;  $\rho$ ——模拟月壤密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $H$ ——钻头切削处的钻孔深度,  $\text{m}$ ,  $H = vt$ ;  $N_q$ 、 $N_c$ ——承载力系数, 是材料内摩擦角的函数;  $c$ ——模拟月壤粘聚力,  $\text{Pa}$ ;  $v$ ——钻头的垂直向下给进速度,  $\text{m/s}$ ;  $t$ ——钻进时间,  $\text{s}$ ;  $\Delta h$ ——钻头每旋转一周, 单个切削齿的切削深度,  $\text{m}$ ;  $n$ ——钻杆转速,  $\text{r/min}$ ;  $n_b$ ——钻头同一环向上的切削齿组数。

$$P_2 = \frac{G + M_c g + M_d g}{(R_2 - R_1) n_b}$$

式中:  $G$ ——外载压力,  $\text{N}$ ;  $M_c$ ——钻具上的模拟月壤质量,  $\text{kg}$ ;  $M_d$ ——钻具总质量, 包括钻头、螺旋钻杆、内管和接头, 以及驱动电机,  $\text{kg}$ ;  $R_1$ ——钻头内半径,  $\text{m}$ ;  $R_2$ ——钻头外半径,  $\text{m}$ ;  $h_i$ ——螺旋叶片厚度,  $\text{m}$ ;  $S_p$ ——螺距,  $\text{m}$ 。

将  $P_1$ 、 $P_2$  代入式(4), 可得:

$$P_0 = K \frac{60v}{nn_b} + f_2 \frac{G + M_c g + M_d g}{(R_2 - R_1) n_b} \quad (\text{N/m})$$

由此求得钻头切削钻进过程中, 作用在整个钻头上的总阻力矩  $M_1$  和消耗的功率  $N_1$  分别为:

$$\begin{aligned} M_1 &= [P_0(R_2 - R_1)(R_1 + R_2)/2]n_b \\ &= K \frac{60v(R_2^2 - R_1^2)}{2n} + f_2 \frac{(G + M_c g + M_d g)(R_1 + R_2)}{2} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} N_1 &= M_1(2\pi n/60) \\ &= (\pi/60)[60Kv(R_2^2 - R_1^2) + f_2(G + M_c g + M_d g)(R_1 + R_2)n] \end{aligned} \quad (6)$$

#### 3.2 钻屑上返所需功耗

##### 3.2.1 正常排屑模式

当钻具处于正常排屑模式条件时, 将钻具上的所有钻屑作为一个整体来考虑, 则钻屑沿着螺旋叶片上升的受力分析如图 1 所示。

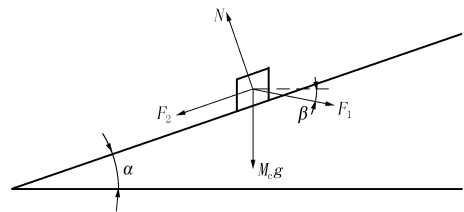


图 1 钻屑整体沿螺旋叶片上升受力分析

如图 1 所示,  $F_1$  为钻屑在离心力作用下与孔壁之间产生的摩擦驱动力,  $F_2$  为钻屑与螺旋叶片之间的摩擦阻力,  $M_c g$  为钻具上所有钻屑的重力,  $N$  为螺旋叶片对钻屑的支撑力,  $\beta$  为钻屑实际上升螺旋升角。对钻屑整体进行受力分析可得:

$$\begin{cases} F_1 = f_1 M_c \omega_r^2 R_5 = f_1 M_c (2\pi n_r/60)^2 R_5 \\ N = M_c g \cos\alpha + F_1 \sin(\alpha + \beta) \\ F_2 = f_2 N \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可知, 在正常排屑模式条件下, 钻屑上返功率主要由钻具上所包含的钻屑质量决定。  $V_{bc}$  为钻头在单位时间内产生的钻屑量,  $V_{dc}$  为钻具所能容纳的最大钻屑量。定义钻具空间的填充度为  $\Delta_c$ 。单位时间产生的钻屑量与钻具所能容纳的最大钻屑量之比, 且填充度的取值范围为  $[0, 1]$ , 则:

$$\Delta_c = V_{bc}/V_{dc} \quad (8)$$

由此可得钻进某一深度  $H$  时, 钻具上所存储的总钻屑质量  $M_c$  为:

$$M_c = \rho\pi(R_5^2 - R_4^2)H(h_{\max}/S_p)\Delta_c \quad (9)$$

式中:  $R_4$ ——螺旋叶片的内半径,  $\text{m}$ 。

取螺旋钻最底端某处钻屑作为研究对象, 钻屑

的绝对运动矢量为  $v_a$ , 因而该钻屑在单位时间内的实际上升高度为  $v_a \sin \beta$ ; 与此同时, 钻具以给进速度  $v$  垂直向下运动, 使得单位时间内钻头的实际位置向下延伸了  $v$  的高度。因此该钻屑与钻头之间的相对高度是两个运动结果的总和, 所以钻屑与螺旋叶片之间的总相对速度  $v_{cd}$  可表示为:

$$v_{cd} = (v_a \sin \beta + v) / \cos \alpha \quad (10)$$

综上所述, 可得钻屑与孔壁和螺旋叶片的摩擦功  $N_2'$  和  $N_2''$  分别为:

$$N_2' = F_1 (2\pi R_s n_r) = f_1 M_c (2\pi n_r / 60)^3 R_5^2 \quad (11)$$

$$N_2'' = F_2 v_{cd} \quad (12)$$

$$N_2 = N_2' + N_2'' \quad (13)$$

### 3.2.2 挤土排屑模式

当钻进处于挤土排屑模式时, 钻屑将填满钻具与孔壁间的所有空间。此时, 离心力引起的钻屑与孔壁间的摩擦驱动力不能完全将单位时间内产生的钻屑都排出孔外, 因而需要依靠钻具回转和进尺使得钻头部位新产生的钻屑对钻具上的已有钻屑产生一个推挤作用力  $F_c$ 。挤土排屑模式钻进时, 钻具上的钻屑质量为:

$$M_c = \rho \pi (R_5^2 - R_4^2) H (h_{\max} / S_p) \quad (14)$$

当钻具回转速度大于钻屑自动上升的临界转速时, 钻屑与孔壁间的相对速度即为临界转速。钻屑与螺旋叶片之间的相对速度跟正常排屑模式的方式一样, 为钻屑实际上升与钻具给进作用的综合, 而底层钻屑推挤已有钻屑沿螺旋叶片运动向上运动的速度则与推挤垂直上升速度  $v_v$  成正比关系。当钻具回转速度小于或等于钻屑自动上升的临界转速时, 钻屑与孔壁间的相对速度即为钻具回转速度, 其他速度关系不受回转转速的影响。

## 4 结语

(1) 月壤是一种松散、低粘性、中~高压缩性的粉细颗粒材料, 与常规岩心钻探的钻进对象存在较大差异, 因此其钻探取样方式也存在较大差异。

(2) 螺旋钻进因具有连续排屑和无冲洗介质回

转钻进的特点, 是最具可行性的月球钻探取样方式之一。

(3) 在螺旋钻探领域存在“临界转速”的概念, 钻进过程中应根据不同钻具的临界转速设置合理的钻进参数, 保证钻进过程持续进行。

(4) 螺旋钻进功耗包括钻头切削功率和排屑功率 2 个部分, 可基于功耗模型对各影响因素进行深入分析, 优化钻具结构和优选钻进参数。

## 参考文献:

- [1] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005.
- [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, (4): 12-14.
- [3] Shkuratov Y G, Bondarenko N V. Regolith layer thickness mapping of the Moon by radar and optical data [J]. Icarus, 2001, 149 (2): 329-338.
- [4] Gromov V. Physical and mechanical properties of lunar and planetary soils [J]. Earth, Moon, and Planets, 1998, 80(1): 51-72.
- [5] 贺新星, 肖龙, 黄俊, 等. 模拟月壤研究进展及 CUG-1A 模拟月壤 [J]. 地质科技情报, 2011, (4): 137-142.
- [6] Harkness P, Lucas M, Cardoni A. Architectures for ultrasonic planetary sample retrieval tools [J]. Ultrasonics, 2011, 51(8): 1026-1035.
- [7] Allton J H. Lunar Samples: Apollo Collection Tools, Curation Handling, Surveyor III and Soviet Luna Samples [R]. NASA Johnson Space Center; NASA Marshall Space Flight Center. JSC-17994, 9p, Mar 2009.
- [8] 沈进进. 多杆组接式月壤钻取采样技术研究 [D]. 黑龙江哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [9] 刘飞. 基于钻具-月壤相互作用模型的钻进取心性能研究 [D]. 黑龙江哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [10] 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, (3): 1189-1194.
- [11] 刘志全, 庞彧, 李新立. 深空探测自动采样机构的特点及应用 [J]. 航天器工程, 2011, (3): 120-125.
- [12] Tan S C, Duan L C, Tan S E, et al. Study on critical drilling parameters for auger drilling [J]. Advanced Materials Research, 2011, (243-247): 3331-3340.
- [13] 段新胜, 鄢泰宁, 顾湘, 等. 我国探月工程可采用的一种月球钻探取样方法的初步分析 [J]. 地质科技情报, 2009, (6): 125-127.
- [14] 皮齐宝. 长螺旋钻机主要参数的计算 [J]. 工程机械, 1981, (1): 38-39, 26.