模拟月面环境钻进过程热特性研究

赖小明^{1,2}, 白书欣¹, 赵曾², 庞勇², 殷参²

(1. 中国人民解放军国防科学技术大学 航天与材料工程学院,长沙 410037; 2. 北京卫星制造厂,北京 100094)

摘 要: 根据实际月面采样任务需求,月壤钻取采样器须在真空条件下,实现无辅助冷却介质的连续钻进取心工作, 这极易导致钻头温度快速升高,影响采样任务的可靠进行。因此,为深入研究钻进过程的热特性,通过分析钻头切削具与 孔底月壤的切削和摩擦机理,建立钻头在钻进过程中的温升模型,归纳影响钻头温升的主要因素。根据月面真空条件下的 月壤环境,制备真空度低于10 Pa、钻进深度不少于 2 m的模拟月壤,并开展钻进过程热特性试验。试验结果表明钻头前端 切削具的温升与钻压力存在很强的正相关性,与钻头扭矩相关性较弱。基于试验结果对温升模型中的相关性系数进行修 正,拟合出钻头温升曲线,并与试验实测结果进行对比,实现了钻进过程热特性的定性分析。

关键词:月面环境;真空条件;钻进热特性;温升模型

中图分类号: V47 文献标识码: A 文章编号: 2095-7777(2016)02-0162-06

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2016.02.011

引用格式:赖小明,白书欣,赵曾,等.模拟月面环境钻进过程热特性研究[J].深空探测学报,2016,3(2):162-167.

Reference format: Lai X M, Bai S X, Zhao Z, et al. Research on the thermal features of the drilling process under the simulated lunar surface environment [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3 (2) : 162-167.

0 引 言

根据我国探月工程三期任务规划,近年将开展月 面自主采样返回任务,实现月面以下深2m的连续月壤 样品采集并返回地球。由于取样深度较大,且钻进过 程中无法通过注水等其他形式辅助散热,加之月面高 真空、月壤导热性极差和太阳辐射等各种恶劣的工作 环境^[1-2],使得取样过程中钻具有可能达到很高的温 度,致使结构件破坏甚至烧钻。此外,过高的温度也 会影响样品的品质^[3]。

纵观20世纪的月球探测活动,真正实现月面无人 采样返回的只有前苏联。前苏联在1976年实现了月表 深层钻取采样,钻进深度2.5 m,成功取回约170 g月壤 样品。据了解,前苏联采用的是大工程试验方法,将 研制出的采样钻机整体放入模拟的极端月球环境仓内 进行一定次数的工程试验,如果样机能顺利通过测 试,说明设计可靠,能达到使用要求。这种方法能够 提高效率,缩短研制周期,但并不是优化设计的方 法:首先,若样机不能很快通过大工程试验的验证, 将花费更多的时间与经费,因为进行这种试验耗资巨 大;其次,该方法不适合深入研究。如果能够精确实 现实时测量钻具端部温度变化情况,将在设计的初期

收稿日期: 2015-03-01; 修回日期: 2015-04-01

为机构优化提供技术支撑。

我国月面钻取采样正处于初步实施阶段,多方面 的研究正在有序进行中,但用于钻取采样过程钻具的 热特性测试系统在国内处于探索阶段。由于地面钻探 一般带有水冷装置,地面针对钻探钻具的实时高精度 测温技术的研究几乎没有开展,因此,进行取样钻具 钻进过程温度在线测试系统的研制具有一定难度,特 别是用于导热率极低的月壤取样。有关钻进过程温度 测量的技术研究,主要集中于金属钻削加工领域,金 属加工领域钻头温度测量的原理与方法对本文具有较 大的指导作用。

本文针对月面钻取采样的工程需求,通过钻头切 削具与孔底月壤间的切削和摩擦机理分析,开展了对 钻进月壤过程中取样钻具的热特性研究,建立钻头在 钻进过程中的温升模型,归纳影响钻头温升的主要因 素,并通过模拟月面真空的钻进过程热特性试验,测 试在典型工况下钻具的温升特性与变化规律,修正钻 头温升模型。

1 钻进过程热特性建模

钻具在回转与进尺的驱动下,依靠切削与排粉的 作用实现对月壤的有效钻进。在钻进过程中,钻头切 削具与孔底月壤始终处于摩擦状态,从而产生大量热能,这是钻头温升的主要根源⁽⁴⁾。因此,从摩擦学角度 出发,基于能量转化守恒定律,建立钻头温升的理论 模型。

钻头底面摩擦力为

$$\boldsymbol{F}_{\rm di} = \mu_1 \boldsymbol{F} \tag{1}$$

钻头侧面摩擦力为

$$\boldsymbol{F}_{ce} = \mu_2 \boldsymbol{P}_{ce} = \mu_2 \boldsymbol{M} / 2\boldsymbol{R}_2 \tag{2}$$

其中: μ_1 为钻头底面与月壤的摩擦系数;**F**为钻头底 面压力,即轴向钻压力; μ_2 为钻头侧面与月壤的摩擦 系数;**P**_{ce}为钻头侧面压力;**M**为钻头扭矩;**R**₂为钻头 侧面摩擦当量半径。

钻头摩擦所作的功为

$$W_F = \boldsymbol{F}_{di}\boldsymbol{V}_1t + \boldsymbol{F}_{ce}\boldsymbol{V}_2t = 2\pi R_1\mu_1\boldsymbol{F}\boldsymbol{N} + \pi\mu_2\boldsymbol{M}\boldsymbol{N} \quad (3)$$

其中钻头的回转切向速度为

$$v_1 = 2\pi R_1 N, v_2 = 2\pi R_2 N \tag{4}$$

根据能量守恒定律,钻头摩擦所作的功转化为钻 头与月壤的热量,得出以下关系

$$W_F = W_{\text{zuan}} + W_{\text{yue}} \tag{5}$$

钻头吸收的热量为

$$W_{\rm zuan} = c_{\rm zuan} m \,\Delta T J \tag{6}$$

根据式 (3)、 (5)、 (6), 钻头温升为

$$\Delta T = \frac{2\pi R_1 \mu_1 F N + \pi \mu_2 M N - W_{yue}}{c_{ruan} m J}$$
(7)

其中: W_F 为钻头摩擦所作的功; W_{zuan} 为月壤吸收的 热量; R_1 为钻头底面摩擦当量半径;N为回转转速; c_{zuan} 为钻头的比热; ΔT 为钻头的温升;J为热功当量 系数:m为钻头的质量。

在真空无水的月球钻进环境下,月壤的热导率极低,因此月壤吸收的热量可以忽略,即*Wyue*=0,则 理论模型可以简化为

$$\Delta T = \frac{2\pi R_1 \mu_1 F N + \pi \mu_2 M N}{c_{\text{zuan}} m J}$$
(8)

从温升理论模型中可以看出,钻头底面摩擦当量 半径R₁、钻头的比热c_{zuan}、钻头的质量m均为可测常 量,回转转速N、钻头扭矩M、钻压力F、钻头底面与 月壤的摩擦系数µ1、钻头侧面与月壤的摩擦系数µ2、 热功当量系数J为影响钻头温升的主要因素,其中N、 M、F为钻进过程中监测量,与钻头的温升正相关, µ1、µ2、J为试验修正量,因此需要开展真空环境下模 拟月壤钻进过程热特性试验,修正上述模型中的待定 系数,完善钻头钻进温升的预测模型。

2 钻进过程热特性试验

2.1 试验条件

1) 钻进过程热特性试验系统

钻进过程热特性试验系统的主要功能为同时实现 月球表面真空环境和月面钻进负载的模拟,并进行钻 取试验^[3]。在钻进过程中,通过控制钻进规程参数,进 行钻进参数和钻进温度实时监测、采集和分析,确定 钻具的温度分布和最高极限温度,从而修正钻具的热 特性理论模型。

钻进过程热特性试验系统主要由真空系统、钻进 驱动装置、钻具试验件和钻进负载组成,试验系统如 图 1所示。其中钻具试验件上安装有磁流体密封件和 温度采集模块,可实现钻进过程真空密封和钻头处温 度采集。钻进过程热特性试验系统可实现2m模拟月壤 的真空钻进,空载真空度优于1×10⁻³ Pa,模拟月壤带 载真空度优于10 Pa。



图 1 钻进过程热特性试验系统 Fig. 1 Test system of thermal characteristics in drilling process

2) 测温点布置

钻具部位一共布置7个测温传感器,距离钻头切削 具最前端的距离依次为1,11,20,70,170,220, 270 mm,其中1号传感器测量的是最前端钻头切削具 切削钻进对象处的温度,反应的是钻头切削具刃尖位 置最极限的温升情况,后面的传感器监测温度的传递 与分布情况,如图2所示。



Fig. 2 Sensor arrangement in drilling tool

3) 钻进对象

钻进过程热特性试验的钻进工况主要分为两种, 即高密实度模拟月壤和预设模拟月岩的模拟月壤。分 别以月海区月壤、月球多孔玄武岩为模拟对象^[5-6],研 制如表 1所示的试验钻进对象,以覆盖月球采样过程 中可能遇到的基本工况。

4) 试验等效性

本试验拟在最大程度上模拟月面真空环境,并对 多种工况的密实月壤和月岩进行了钻进,获得取芯钻 具的热特性。由于地面试验与月面实际钻进工况相比 存在一些差异,因此需开展钻进过程热特性试验的等

表 1 钻进过程热特性试验钻进对象

Table 1The objective of the drilling test

序号	名称	对象描述	模拟 目标	实物照片
1	高密实 度深层 模拟月 壤	 1) 导热率不大于1.0 W/mK、内聚力0.5~ 1.8 kPa、内摩擦角 不小于40^{ol7.81} 2) 含水率小于0.1%, 密实度100% 3) 粒径分布:参照 Apollo月壤样品 制备^[9] 	月海区 月壤	O
2	预设模 拟月岩 的模拟 月壤	人造大理石: 可钻性6.4级, 地矿部标准	月球多 孔玄武 岩	

效性分析。

(1) 真空度影响

在月面钻进条件下,热传导和热辐射为热量传递的两种主要方式。由于真空度直接影响月壤的热导率,从而影响取芯钻具的热特性试验结果。月面环境的气压近似为10⁻¹⁰ Pa,根据前期试验研究结果知,带有100%密实度模拟月壤的真空罐内极限真空度在1~10 Pa范围内,很难再降低。

美国国家航天局对Apollo系列月壤样品进行热导率试验测量表明,当气压低于10 Pa(约为0.75×10⁻¹ Torr)时,随着气压的降低,月壤的热导率变化很小^[10],如 图3所示。



图 3 月壤热导率与气压变化曲线 Fig. 3 Thermal conductivity and pressure change curve of lunar soil

因此与月面实际钻进环境相比,在真空度小于10 Pa 的试验环境下,真空度对热传导的传热效率影响很 小,对热特性试验结果影响不大。 (2)月壤工况影响 根据NASA公布的关于月海区月壤物理特性及其 组成成分可知,本次试验的钻进对象充分覆盖了月海 区采样过程中可能遇到的基本工况,对真实月壤的化 学成分、颗粒形态、颗粒级配以及超高密实度、大摩 擦角、高内聚力、高剪胀性等物理力学特性进行了模 拟,从而保证钻进过程热特性试验的钻进对象与实际 月壤具有较高等效性。

基于以上2个方面的分析可以得出,本试验模拟的 月面环境能够覆盖月面实际工况,从而包络月面苛刻 钻进工况下的热特性结果。

2.2 钻进过程中钻具温升分析

钻进过程热特性试验共进行了4次,第1次试验是

针对预设模拟月岩的深层月壤进行钻进,钻进至1850mm 左右深度时遇到预设岩石(可钻性6.4级),钻进时长 为24.55min; 第2、3、4次试验是针对高密实度模拟月 壤进行钻进,其中第2次试验在钻进至1.3m深度时遇 到40mm左右的岩块阻隔,持续15min后钻进至1428mm, 第3、4次试验均达到2m的钻进深度。

试验过程中通过对钻具各测温传感器的数据监测 表明,钻头是钻进过程中主要的生热部件,钻头前端 切削具温升最高。针对钻头温度数据变化进行统计与 分析,绘制如图4所示的温度变化曲线。



Fig. 4 Curves of bit temperature varied with time

通过对以上的最高温升结果和温升曲线进行分 析,可以得出以下结果。

1)试验1在钻进至深度1 850 mm左右遇到预设 岩石(可钻性6.4级),岩石钻进持续了5 min,产生 的温度最高达到136 ℃,温升达到112 ℃,表明钻头与 孔底的岩石不断切削与摩擦导致温度迅速上升,钻头 平均的温升速率高达27.3 ℃/min。

2)试验2钻进总时长高达44 min,钻头最高温度 达到125 ℃,温升为101 ℃,这是由于钻进模拟月壤过 程中,遇到了较多的粒度在10~40 mm之间的岩石颗 粒,从而产生了持续较大的孔底钻压力。

 3)试验3、试验4钻进过程顺利,温升较为平缓, 分别为51 ℃和24 ℃。 以上4次试验钻头的温升区别较大,表明钻头温 升与孔底的实际状态存在较大关联,而在钻进过程中 孔底状态实时反映在钻压力和扭矩参数上。因此,钻 压力和扭矩参数与钻头温升理论上存在一定的相关 性,以温升最高的试验2为例,将试验2的温度曲线与 钻压力、扭矩曲线进行对比,如图5所示。

从以上曲线中可以分析得出,钻头温度与钻压力 的变化趋势保持一致,说明钻头前端切削具的温升与 钻压力存在很强的正相关性,这符合第1部分中的热特 性理论模型;钻头温度与扭矩的变化趋势存在一定的 正相关性,但相关性较弱,表明需要通过热特性试验 结果进一步修正理论模型。



图 5 钻进过程中钻头温度与力载随时间变化曲线 Fig. 5 Curves oftemperature and loads of bit with time variationin drilling process

3 热特性模型修正

根据第2部分的理论模型

$$\Delta T = \frac{2\pi R_1 \mu_1 F N + \pi \mu_2 M N - W_{yue}}{c_{zuan} m J}$$
(9)

其中: 钻头底面摩擦当量半径 R_1 = 0.014 m, 回转转速 N = 120 rpm, 钻头的质量m = 0.064 kg, 钻头的比热 c_{ruan} = 0.46×103 J/(kg·℃),则式(9)简化为

$$\Delta T = \frac{0.359\mu_1 F}{J} + \frac{12.8\mu_2 M}{J} \tag{10}$$

试验表明, 钻头与月壤的摩擦系数以及热功当量 系数J均与钻压力存在很强的正相关性, 因此设相关性 系数 $k_1 = 0.359\mu_1/J$, $k_2 = 12.8\mu_2/J$, 则式(10)表示为

$$\Delta T = k_1 F + k_2 F \tag{11}$$

温升是稳态积累的过程,*i*时刻的温度为*T_i*,并进行平均值滤波,即

$$T_i = \Delta T + T_{i-1} \tag{12}$$

$$T_{i} = \frac{\sum_{j=0}^{N-1} T_{i-j}}{N}$$
(13)

通过试验结果得出修正系数

$$k_{1} = \begin{cases} 0.144, & F < 100\\ 0.126, & 100 \leqslant F < 200\\ 0.24, & 200 \leqslant F < 300\\ 0.3, & 300 \leqslant F < 400\\ 0.336, & 400 \leqslant F < 500\\ 0.36, & 500 \leqslant F \end{cases}$$
(14)

平均值个数取N = 14,系数 k_2 = 0.5,根据式(11) ~ 式(13),可以通过钻压力F和扭矩M实时拟合出钻头 前端的温升曲线,如图6和图7所示。

从图6和图7中可以看出,2次试验的钻头实测温升 与温升模型拟合曲线变化趋势相同,在温升较低的区 间内偏差值不大于±10℃,模型基本准确。但在高温 升区间内偏差值较大,针对含有岩石颗粒的模拟月 壤,说明钻进温升预测模型的准确性与覆盖性需进一 步优化。



图 6 试验2钻头实测温升与温升模型拟合曲线对比





图 7 试验3钻头实测温升与温升模型拟合曲线对比 Fig. 7 Comparisoncurves of measured temperature rise and temperature rise model fitting curve in Test 3

4 结 论

本文通过分析钻头切削具与孔底月壤的切削摩擦 机理,建立了钻头在钻进过程中的温升模型,针对不 同钻进工况开展了钻进过程热特性试验,实现了真空 度低于10 Pa、深度2 m的月面真空月壤环境模拟,并 基于试验结果对温升预测模型中相关性系数进行修 正,最终拟合出钻头前端切削具的温升曲线。研究结 果表明:

 影响钻头温升的主要因素主要有:回转转速、 钻头扭矩、钻压力、钻头底面与月壤的摩擦系数、钻 头侧面与月壤的摩擦系数以及热功当量系数;

2)钻头温度与钻压力的变化趋势保持一致,说明 钻头前端切削具的温升与钻压力存在很强的正相关 性,而钻头温度与扭矩相关性较弱;

3)钻头温升模型能定性反应模拟月壤钻进过程中的温升情况,但在高温升区间内偏差值较大,说明针对含有岩石颗粒的模拟月壤,钻进温升预测模型的准确性与覆盖性需进一步优化。

参考文献

 [1] 欧阳自远. 我国月球探测的总体科学目标与发展战略[J]. 地球科学 进展, 2004, 19(3): 351-358.

Ouyong Z Y. Scientific objectives of Chinese lunar exploration project and development strategy[J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 19 (3) : 351-358.

[2] Wood J A. Petrology of the lunar soil and geophysical implications[J].

Journal of Geophysical Research, 1970, 75 (32): 6497-6513.

- [3] Zhao Z, Hou X Y, Yin S, et al. Research of thermal characteristics in core sampler of lunar soil with vacuum environment[C].// The 64th International Astronautical Congress. Beijing: [s.n.], 2013.
- [4] 赵建康,曲敬信,邓福铭.孕镶金刚石钻头工作温升的理论分析
 [J].煤田地质与勘探,2004,32(4):57-59.
 Zhao J K, Qu J X, Deng F M. Theoretical study on temperature rising of the diamond bit[J]. Coal Geology & Exploration, 2004, 32(4):57-59.
- [5] Grant H, David V, Bevan M F. Lunar sourcebook: a user's guide to the Moon[M]. Cambridge, UK: CUP Archive, 1991.
- [6] McKay D S, Heiken G, Basu A, et al. The lunar regolith[M]. Lunar sourcebook. Cambridge, UK: CUP Archive, 1991: 285-356.
- [7] Carrier III W D. Particle size distribution of lunar soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129 (10): 956-959.
- [8] Carrier W D. Soviet rover systems[C]//AIAA, Space Programs and Technologies Conference. Huntsville, AL, USA: AIAA, 1992, 1-8.
- Carrier III W D. Lunar soil simulation and trafficability parameters[J]. Lunar Geological Institute, 2006, 1-16.
- [10] Tien C L, Nayak A L. 1975. Analytical models for lunar soil thermal conductivity[C]//AIAA Tenth Thermophysics Conference. Denver, Colorado: AIAA, 1975: 1-8.

作者简介:

赖小明(1969-),男,研究员,主要研究方向:地外天体采样操 控作业系统设计、型号产品研制及其地面验证。 通信地址:北京市海淀区友谊路104号院(100094) 电话:(010)68114400 E-mail:aml010@vip.sina.com

Research on the Thermal Features of the Drilling Process Under the Simulated Lunar Surface Environment

LAI Xiaoming^{1,2}, BAI Shuxin¹, ZHAO Zeng², PANG Yong², YIN Shen²

Astronautical and Material Engineering Institute, National University of Defense Technology, Changsha 410037, China;
 Beijing Satellite Manufacturing Factory, Beijing 100081, China)

Abstract: According to the requirements of the lunar surface sampling task, The lunar regolith sampler need to drill under vacuum conditions, and realize the continuous drilling without aided-cooling medium. It is very easy to cause a rapid temperature rise on bit, which resulted in making effect on the reliability of the sampling task. Thus, in order to study on the thermal characteristics of the bit in drilling process, the cutting and friction mechanism between blade on bit and the lunar soil is analyzed in this paper. A temperature rise model of bit is established, and the main factors that influence the temperature rise of the drill bit are obtained. According to the lunar vacuum environment, the 2 m drilling depth lunar soil simulant is prepared, and its vacuum degree below 10 Pa, simultaneously, the thermal feature drilling tests are performed. The experimental results show that there is a strong positive correlation between the temperature rise and the weight on bit at the front of the drill bit, and the correlation on bit torque is weak. The correlation coefficient of the model of the temperature rise prediction is modified based on the test results. The fitting curve of the temperature rise is obtained, and the comparison of the results between fitting and test has been carried out. The qualitative analysis of the thermal characteristics of the bit in drilling process is acquired.

Key words: lunar environment; vacuum condition; drilling thermal feature; temperature rise model