

月球浅层月壤螺旋钻具进芯机制设计

庞勇¹, 王国欣¹, 汤滨², 王书超¹, 赵忠贤¹

(1. 北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094; 2. 北京大学 工学院, 北京 100871)

摘要: 基于“嫦娥五号”(Chang'E-5, CE-5)月面无人采样返回钻取子系统, 针对浅层松散剖面月壤取样难点, 开展了钻取实验研究, 实验结果表明钻进参数控制的钻压力是影响进样效果的关键特征量; 建立了钻具与月壤相互作用有限元模型, 通过对钻具周边的月壤应力场分析厚壁螺旋钻具进芯机制, 发现排粉压力与进芯阻力之间的博弈关系是控制螺旋钻具进样的关键因素。对月壤与钻具之间的相互作用机理得到进一步认识, 可为“嫦娥六号”及未来深空探测任务中采样作业规程提供技术支撑。

关键词: 螺旋钻具; 月壤; 应力场; 有限元; 进芯

中图分类号: TH122, V476.3

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2021)03-0252-07

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2021.20210019

引用格式: 庞勇, 王国欣, 汤滨, 等. “嫦娥五号”螺旋钻具进芯机制分析[J]. 深空探测学报(中英文), 2021, 8(3): 252-258.

Reference format: PANG Y, WANG G X, TANG B, et al. Study of coring dynamics with Chang'E-5 auger drill[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8(3): 252-258.

引言

月球、火星、小行星等^[1-3]地外天体表层都由一层厚度不等的星壤或岩石组成。其中, 最上层的星壤受太阳风的影响, 记录星球性质的信息严重缺失; 次表层星壤较好地保存着星球形成早期的重要信息。这些记录的信息对人类具有如下重要的意义^[4]: 了解地外天体的形成、演化过程; 获得太阳系形成初期的环境; 探索宇宙中存在的新物质; 了解生命的起源。因此, 针对地外天体星壤次表层采样探测具有极高的科学研究价值。

深空次表层采样探测任务从20世纪60年代开始, 美国和前苏联都成功地实施了月球采样任务。“嫦娥五号”(Chang'E-5, CE-5)于2020年12月1日成功着陆在月球风暴洋吕姆克山区, 并实现了我国首次月壤岩本无人采样。钻取采样的目标是为获取月表以下一定深度原位层剖面月壤, 样品的年龄将有助于填补大约10~30亿年前的月球历史知识空白, 提供月球和太阳系其它物体的历史信息。

“嫦娥五号”钻取子系统采用了螺旋钻具方案实现月壤钻进取芯, 主要原因: 螺旋钻具的排粉能力适合在地外天体缺少辅助排粉介质时工作; 钻具回转切削

星壤可保证样品层理特性的同时有效适应低重力环境下的低反力要求; 螺旋钻具可适应无水星壤、含水星壤、岩石等多种工况。

针对月壤钻取过程中动力学行为的研究是解决螺旋钻具进芯困难的关键。目前对螺旋钻具与月壤相互作用动力学过程的仿真研究方法主要为DEM方法^[5-6]和连续介质力学模型方法^[7-8]。连续介质方法将月壤等效为弹塑模型, 其中塑性屈服准则一般采用摩尔-库伦屈服准则。采用有限元方法或解析方法引入该模型可以有效得到应力场或钻具的力载特性; 采用DEM方法开展全局分析, 能反映流动过程中星壤的颗粒动力学性质, 可将钻进力载、取芯效果与钻进参数关联; 但目前DEM方法无法反映实际颗粒的多棱角等复杂特性, 且尚未关联应力场演化过程, 仿真结果与试验结果差别较大。相关文献并没有与螺旋钻具进芯效果分析, 导致目前对螺旋钻具控制方法仅仅聚焦在钻进速度稳定性^[9]或钻进能力^[10]的研究中, 而没有与取芯效果的关联。因此开展螺旋钻具月壤钻取过程中的进芯机制及关键因素分析具有重要意义。

本文开展了“嫦娥五号”钻取子系统月面次表层月壤取芯行为研究。首先采用聚焦月表浅层变密实度剖面, 开展了力载实验规律分析, 提炼了表征月壤进芯

状态的关键物理参数；而后利用有限元分析方法以钻具周边月壤应力场为切入点，研究了厚壁螺旋钻具进芯机制。

1 “嫦娥五号”任务目标采样区域

“嫦娥五号”探测器目标采样区域^[1]（图1）位于月球风暴洋北部，处于北纬41°~45°，西经45°~69°区

域，东西长约450 km，南北宽约120 km，总面积约为5.5万 km²。拟着陆区东西两侧均为高地物质，南部为吕姆克山，与“嫦娥三号”（Chang'E-3，CE-3）着陆的雨海隔侏罗山相望。该区域分为两个地质单元，位于左侧部分地质年龄约3 Ga，代表较老的玄武岩活动；位于右侧部分的地质年龄约1.5 Ga，代表了风暴洋地区最年轻的岩浆活动。

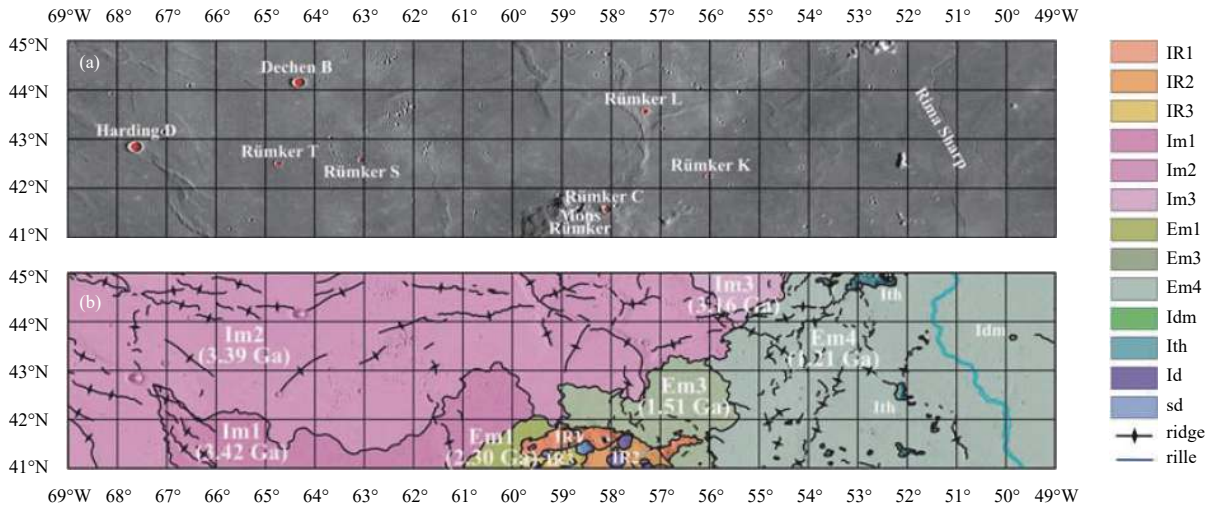


图1 “嫦娥五号”着陆区域
Fig. 1 Map of Chang'E-5 landing region

“嫦娥五号”探测器由4部分组成：着陆器，上升器，轨道器，返回器。“嫦娥五号”钻取子系统（图2）搭载在着陆器和上升器之间，包括取芯钻具、钻进机构、加载机构、整形机构、展开机构、支撑结构及钻取控制单元。其中取芯机构执行钻进取芯功能，钻进机构和加载机构在钻取控制单元控制下驱动取芯钻具运动，整形机构实现样品整形及传送样品入封装装置，展开机构实现钻取采样系统与上升器分离。

为实现月面米级无人钻进取芯任务，“嫦娥五号”钻取子系统设计了带取芯机构的螺旋钻具，其具体工作原理如下（图3），螺旋钻具由钻头、钻杆、取芯机

表 1 实验用模拟月壤相对密度度

Table 1 The relative density of lunar soil simulant		
深度/mm	模拟月壤/%	实际月面/%
0~150	73	65±3
150~300	83	83±3
300~500	92	92±3

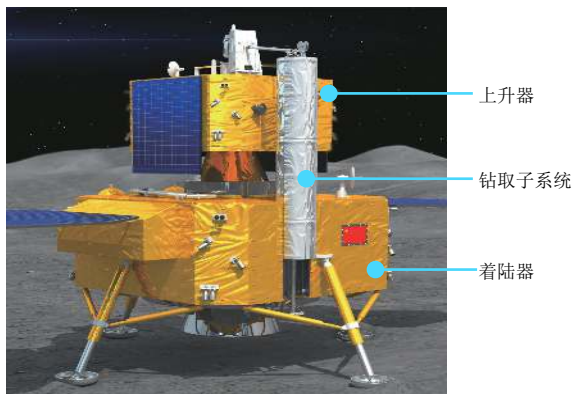


图2 “嫦娥五号”钻取子系统的位置
Fig. 2 The location of the Chang'E-5 drilling system

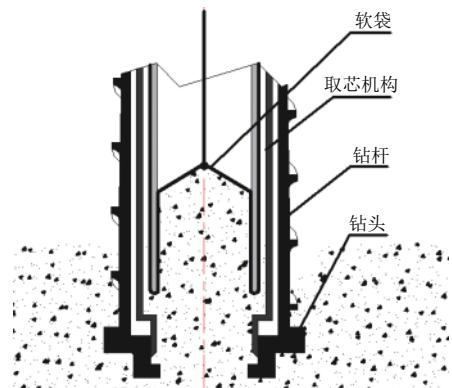


图3 螺旋钻具示意图
Fig. 3 Schematic diagram of auger drill

构组成。取芯机构和钻杆同轴并保持固定,不随钻杆一起转动,只随钻杆沿轴向方向运动。当钻头和钻杆进入月壤时,月壤突破钻头进芯口到取芯机构最下端的阻力进入取芯机构后,由软袋内翻包裹并跟随软袋向上运动。在钻进取芯完成后,整形机构可将软袋提出缠绕,去掉钻具长度的约束,实现返回物体积和质量最小化。

该取芯钻具与地面及前期空间常用钻具有一定区别。通常地面上采用薄壁钻开展月壤钻进取芯作业,可以降低月壤切削量,实现切削功耗的最小化。空间采样探测任务中,美国“阿波罗”(Applo)系列和前苏联的“月球16号”(Luna 16)、“月球20号”(Luna 20)均采用薄壁钻^[12]。但该方法无法直接应用于米级深度无人采样返回任务。Applo系列将薄壁钻具分成多段,人工辅助拼接,取样后再拆开保存,可以降低体积;Luna 16和Lunar 20在无人参与条件下只能将钻具整段返回,钻进深度只能达到30 cm。

“嫦娥五号”取芯钻具采用了与“月球24号”(Luna 24)类似的钻具方案,两者任务也具有相似性。带取芯机构的螺旋钻具方案虽然具有较多优点,但取芯机构厚度导致切削面增加,有效取芯直径减少,带来取芯风险。在Luna 24采样任务中,发现0.5~0.6 m以上区域未取到样品^[13]且不知道具体的原因,需要挖掘螺旋钻具的进芯机理。

2 月壤进芯行为实验研究

螺旋钻具的进芯状态显然与进芯通道及钻具周边月壤的应力相关联。在月壤钻进取芯过程中,钻头周边应力越大,对钻具施加的力载也需要越大。因此采用“嫦娥五号”钻取系统实验件开展不同钻进参数和进芯通道状态下钻进取芯实验(图4),测量钻进力载和取样量,可有效分析进芯影响因素。

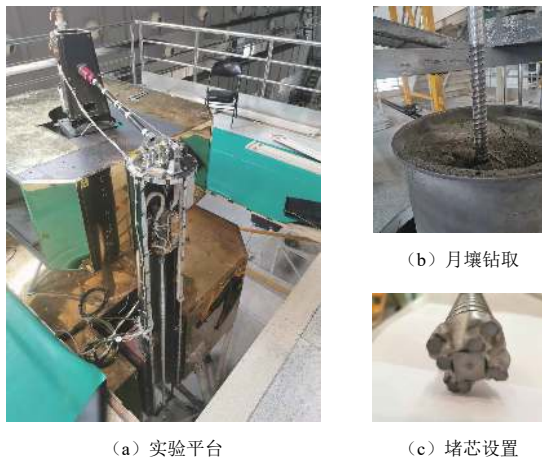


图4 钻取试验系统

Fig. 4 The experimental system of coring dynamics

由于Luna 24在浅层未取到月壤,本论文重点对0~0.5 m深度月壤开展了钻进取芯性能研究。其中模拟月壤状态参考实际月面为变密实度剖面^[12],根据“嫦娥五号”着陆区域月壤光谱数据^[11],中值粒径为50~79 μm 。本实验所采用模拟月壤相对密实度(表1)及级配(表2)状态如下所示。

表2 实验用模拟月壤颗粒级配
Table 2 The grading of lunar soil simulant

粒径大小/mm	比例
<0.01	6.75
0.01~0.05	12.50
0.05~0.01	56.80
0.1~1.00	16.45
1~4	4.25
4~13	3.25

表3为4种工况得到的取样结果,对比工况1和2可以发现,同样120 r/min回转速度钻进下,进尺速度越高,进样效果越好;对比工况2和3可以发现,同样的进尺速度下,回转速度越低,进样效果越好,对比进转比与取样量,进转比越高,则取样量越高。

表3 实验工况及取样量
Table 3 The grading of lunar soil simulant

工况编号	钻进状态设置			取样量/g
	回转/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	进尺/($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	进转比 进芯口	
1	120	100	0.830 通畅	63
2	120	50	0.415 通畅	0
3	40	50	1.250 通畅	136
4	40	50	1.250 封堵	0

图5是4种工况下钻进过程拉力和回转电流曲线,可以发现:①4种工况下,回转电流与回转速度关联较大,而与进尺速度关系不大,说明浅层中低密度月壤回转扭矩较低,不同进尺速度导致的切削扭矩差异较小;②同样在120 r/min的回转速度下,拉力较高时取样较好,说明钻头周边所产生的较大应力有助于进样;③根据表3可知,在回转40 r/min,进尺50mm/min进样工作的良好参数下,堵芯下力载和不堵芯工况下,差别并不大,说明中低密度工况下进芯通道阻力对整体力载贡献较小。

综合上面的力载曲线和取样结果,可以发现:①钻进过程中钻进拉力增加,则预示着进样,钻进拉力越大,则进样越好;②进转比越高,则取样越好,进转比太低时有取不到样的风险;③若进芯口被堵住,浅层中低密度月壤钻取过程力载变化不明显。因此钻具周边月壤应力边界是控制螺旋钻具进芯的关键量。

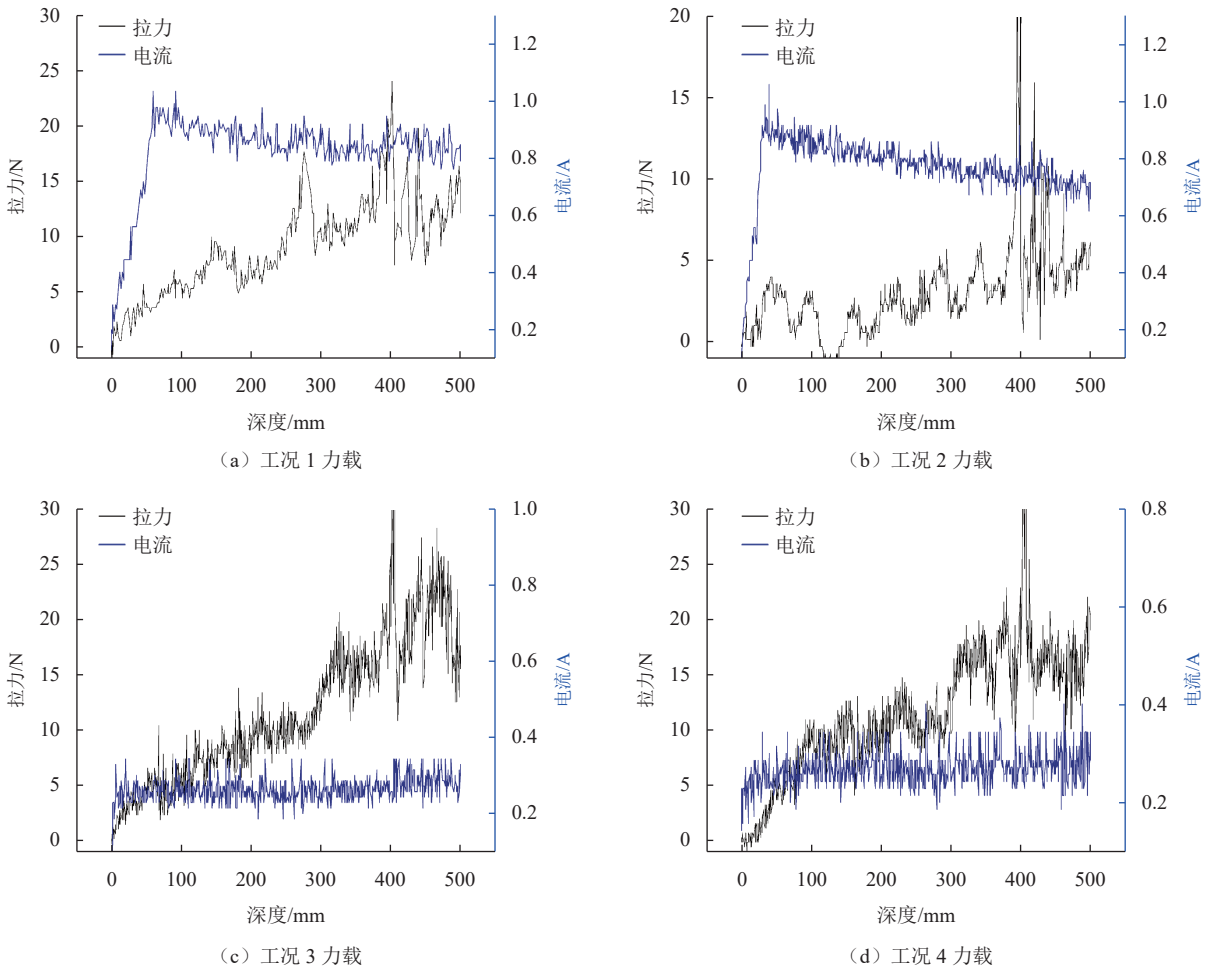


图5 不同工况下钻进力载曲线
 Fig. 5 The load in coring dynamics

3 月壤钻进取芯分析

从以上不同工况下的实验可以看出，钻头下方的应力场是造成进芯状态变化的关键因素。有限元方法虽然不能全局描述螺旋钻具钻取行为，但可以通过合理设定边界条件，分析螺旋钻具的月壤进芯行为。本文采用Abaqus软件分析钻具与月壤相互作用行为，月壤采用欧拉网格模型，Mohr-Coulomb屈服准则，其计算参数如表4所示。

表4 月壤参数设置

Table 4 The parameters of lunar soil in FEM model

密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	弹性模 量/Mpa	泊松 比	摩擦角/ ($^{\circ}$)	内聚力/ kPa	剪胀角/ ($^{\circ}$)
1.9	10	0.42	40	3	5

钻具与月壤之间相互作用的关系：①螺旋钻杆通过旋转运输月壤，该部分无法采用有限元描述，但可以根据上面的试验现象合理假设边界条件，设为边界一；②钻头通过旋转切削使月壤局部发生塑性改变引起月壤的局部的流动，该部分可以采用有限元分析；

③月壤通过钻头的挤压作用进入进芯通道，该部分可以通过假定合理的边界条件，设为边界二。通过以上假设，可以解耦钻进参数对月壤钻取过程的影响，从而重点研究钻具周边月壤应力边界对进芯效果影响。

钻具模型及边界设置如图6所示。钻头尺寸与图实验一致，直径38 mm。钻具周边边界条件设置如下：边界一为力边界条件，有垂直于界面方向的正压力，压力分布与排粉情况和重力引起的外压力场相关；边界二为力边界条件，压力为均匀压力，是进芯阻力的体现。因为计算模拟的范围是有限的，所以会产生远离钻底区域的侧面和底面边界。这两个边界因为远离钻头区域受钻进影响较小，其月壤基本保持原有运动状态和力学状态，故设定其为恒定力学边界条件。对于钻头，其主要的边界条件为运动学边界条件，分别为沿轴向方向向下的进尺速度 u 和绕轴转动的角速度 ω 。钻头在钻进过程中，按照其运动学边界条件钻动，同时与月壤发生切削挤压等相互作用是其主要的物理过程。

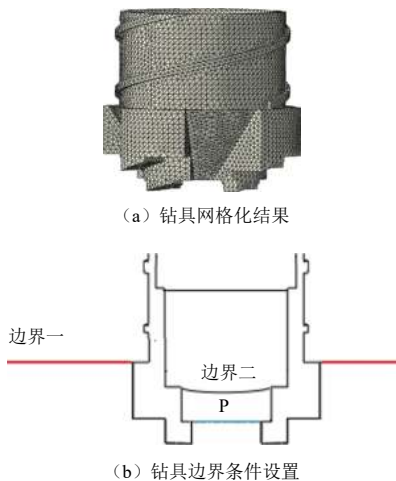


图6 钻具有限元模型及边界条件

Fig. 6 The Finite element model and boundary condition setting in coring dynamics

钻进过程中，预应力计算采用Abaqus/standard的静态计算模块，材料和计算模型与动力学计算基本一致。不同之处是去掉了接触边界条件，近似地将月壤与钻头接触部分的边界条件设置为仅垂直方向自由，其余固定的近似边界条件。

进样效果可以通过观察进芯通道内月壤的运动状态来确定。针对同一种月壤材料，进芯通道内的月壤的运动状态主要由两部分的作用所决定，其一是进芯阻力的影响，其二是钻底压力的影响。当月壤沿竖直向下的运动趋势时，可以认为此时进芯困难；反之，进芯容易。为了描述进芯通道内月壤的运动趋势，以边界二面P2作为进芯通道参考面。图7为相关仿真结果。图7(a)为调整边界一面压强P1时进芯平面的平均变化速度。对比各工况数据，随着P1的增加，平均速度的斜率增加，相应的速度值也增大，但增加幅度在逐渐减小，可以看出，当P1到20 KPa和25 KPa算例时，平均速度变化曲线基本保持一致。这表明随着外压的增加，进芯效果会更好，但增加的趋势会逐渐减弱。图7(b)是调整P2值的进芯平面的平均变化速度。随着P2的增加，平均速度的斜率相对地变小，相应的速度值也在减小，同时减弱幅度也在逐渐减小。这表明随着进芯阻力的增加，进芯效果会变差，当P2接近200 kPa时，进入动态稳定状态后的平均速度基本不变，可认为此时进芯通道内月壤不具备进芯的运动趋势，此时为进芯困难状态。

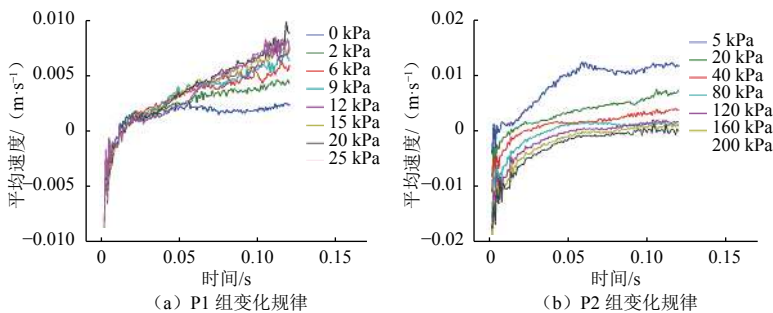


图7 进芯平面平均速度随着时间的变化关系

Fig. 7 The average coring speed vs. time

图8是P1组分别为12 kPa和20 kPa工况的算例等效压力场云图。从图8中可以看出，对于钻底区域的月壤，可以分为两个部分，第1部分是进芯通道下方的区

域，第2部分是钻头底部和月壤接触的区域。随着P1的变化，进芯通道下方区域的应力状态基本不发生改变，而相对应地，进芯通道外侧钻底月壤区域的应力

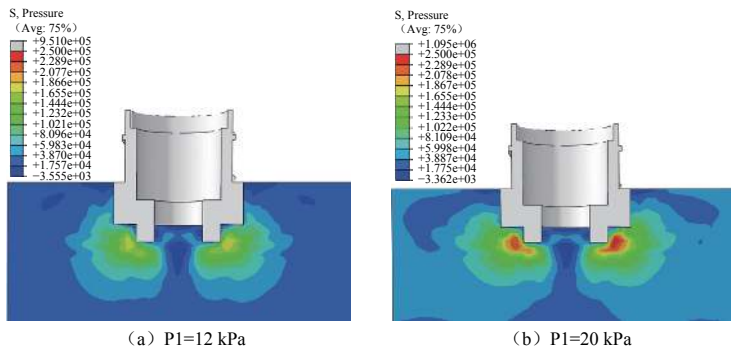
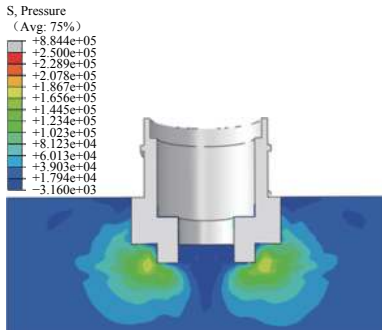


图8 调整P1时等效压力场的分布云图对比

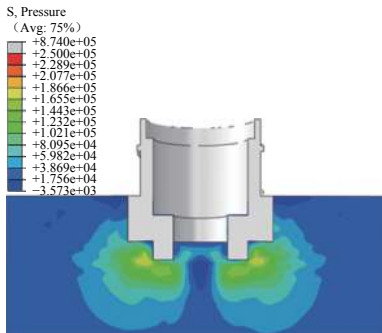
Fig. 8 The stress field inside lunar regolith varing with P1

会随着P1的增加而增加。

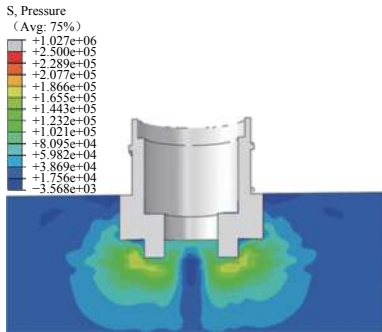
图9是P2组P2分别为5、40、80、160 kPa的等效压力场云图，从图9中可以看出，随着P2的变化，进芯通道外侧钻底月壤区域的应力状态基本不发生改变，



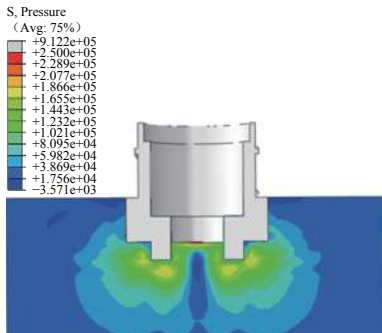
(a) P2=5 kPa



(b) P2=40 kPa



(c) P2=80 kPa



(d) P2=160 kPa

图9 调整P2时等效压力场云图对比

Fig. 9 The stress field inside lunar regolith varying with P2

而相对应地，进芯通道下方区域的应力会随时P2的增加而增加。

因此，可以得出，P1对进芯通道外侧钻底月壤区域的应力状态起主要作用，对进芯通道下方应力场影响较小；相对应地，P2对进芯通道下方应力场起主要作用，对进芯通道外侧钻底月壤区域的应力影响较小。该结论与图5实验得到力载现象符合。

4 结 论

本文主要通过试验和仿真分析，提炼了影响螺旋钻具钻进取芯效果的关键参量，采用有限元方法分析了钻头部位应力场规律，得到了如下结论：

- 1) 控制螺旋钻钻进取芯效果的两个关键控制量为钻具螺旋排粉槽在钻头上方形成的压力和进芯通道内部的阻力；
- 2) 只有排粉压力与进芯通道压力比值达到一定值才能实现正常进芯，因此提高进芯效果最有效的方式是降低进芯通道阻力，合理控制钻压范围。

“嫦娥五号”钻取子系统优化了钻具构型，设计了自适应钻进规程，在轨实现不同密实度月壤工况钻进参数自动调整，保证了钻进段良好取样；但钻进至约1 m深度，碰到碎石层阻碍了后序正常钻进取样。因此，本成果可有效应用于后续“嫦娥六号”等未来深空采样任务，同时针对碎石层干扰下螺旋钻钻进取芯机制还需要深入研究。

参 考 文 献

[1] 刘德赞,张焯,杨帅,等. 月球极区钻取采样技术[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(3): 278-289.
LIU D Y, ZHANG H, YANG S, et al. Research of drilling and sampling technique for lunar polar region exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(3): 278-289.

[2] 孟林智,董捷,许映乔,等. 无人火星取样返回任务关键环节分析[J]. 深空探测学报(中英文), 2016, 3(2): 114-120, 128.
MENG L Z, DONG J, XU Y Q, et al. Analysis of key technologies for unmanned Mars sample return mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(2): 114-120, 128.

[3] 刘德赞,赖小明,王露斯,等. 小天体表面采样技术综述[J]. 深空探测学报(中英文), 2018, 5(3): 246-261.
LIU D Y, LAI X M, WANG L S, et al. Summary of sampling technology for small celestial bodies[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(3): 246-261.

[4] 吴伟仁,刘旺旺,蒋宇平,等. 国外月球以远深空探测的发展及启示(下)[J]. 中国航天, 2011(8): 1-10.
WU W R, LIU W W, JIANG Y P, et al. The development and enlightenment of lunar deep space exploration abroad[J]. Aerospace China, 2011(8): 1-10.

[5] 赖小明,杜志豪,王国峰,等. 月壤取芯钻具热特性有限元分析[J]. 深

- 空探测学报(中英文), 2017, 4(6): 544-551.
- LAI X M, DU Z H, WANG G F, et al. The finite element analysis of thermal property for lunar soil-drilling sampler[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(6): 544-551.
- [6] 马超, 刘飞, 曾婷, 等. 无轴螺旋式模拟月壤主动填充装置研制[J]. 深空探测学报(中英文), 2019, 6(1): 57-62.
- MA C, LIU F, ZENG T, et al. Development of platform for active filling lunar soil simulants[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(1): 57-62.
- [7] 林云成, 李立森, 赵振家, 等. 着陆器足垫冲击月壤动态行为离散元仿真分析[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(2): 171-177.
- LIN Y C, LI L B, ZHAO Z J, et al. Simulation analysis of dynamic behavior of lander footpad impact on lunar regolith[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(2): 171-177.
- [8] 陈化智, 刘荣凯, 马超, 等. 基于颗粒单向流动效应的手持式月壤取心装置设计[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(2): 164-170.
- CHEN H Z, LIU R K, MA C, et al. Design of handheld corer for lunar regolith based on particle directional flow method[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(2): 164-170.
- [9] 郑燕红, 邓湘金, 赵志晖, 等. 月面回转钻进采样非脆弱鲁棒控制[J]. 深空探测学报(中英文), 2014, 1(4): 315-315.
- ZHENG Y H, DENG X J, ZHAO Z H, et al. Non-fragile robust control for lunar rotary-drill sampling technology[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2014, 1(4): 315-315.
- [10] 唐钧跃, 全齐全, 姜生元, 等. 一种基于可钻性在线辨识的月面钻进控制方法研究[J]. 深空探测学报(中英文), 2015, 2(4): 39-46.
- TANG J Y, QUAN Q Q, JIANG S Y, et al. Control method of lunar drilling based on online identification of drilling ability[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2015, 2(4): 39-46.
- [11] QIAN Y Q, XIAO L, ZHAO S Y, et al. Geology and scientific significance of the rümker region in northern oceanus procellarum: China's Chang'E-5 landing region[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2018, 123(6): 1407-1430.
- [12] HÖRZ F, GRIEVE R, HEIKEN G, et al. Lunar source book[M]. London: Cambridge University Press, 1991.
- [13] MEYER C. Lunar sample compendium[C]//41st Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands, TX: NASA, 2009.
- 作者简介:
庞勇(1982-), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 深空采样探测技术、多体动力学。
 通讯地址: 北京市海淀区友谊路104号中国空间技术研究院(100094)
 E-mail: py82@163.com
王国欣(1975-), 女, 研究员, 主要研究方向: 深空采样探测技术。**本文通讯作者**。
 通讯地址: 北京市海淀区友谊路104号中国空间技术研究院(100094)
 E-mail: 13651058138@163.com

Design of Coring Dynamics with Shallow Loose Lunar Regolith

PANG Yong¹, WANG Guoxin¹, TANG Bin², WANG Shuchao¹, ZHAO Zhongxian¹

(1. Beijing Spacecraft Manufacturing Factory Co., Ltd., Beijing 100094, China;

2. College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Based on the unmanned lunar surface sampling return mission of Chang'E-5 drilling subsystem, the coring dynamics of spiral drill in shallow loose lunar regolith were studied by experimental method and FEM. Research results are described as follow: the WOB (Weight Of Bit), which is controlled by drilling parameters, is a key parameter in coring dynamics and can influence the effect of coring; The relationship of powder discharge pressure and core resistance is a key factor controlling the sampling effect of auger. Our results improves our understanding of drilling dynamics, therefore will help the designing drilling system for chang'e-6 and other future deep space explorer project.

Keywords: auger drill; lunar regolith; stress field; FEM; coring dynamics

Highlights:

- The coring dynamics of Change'5 spiral drilling in low relative density lunar soil was studied.
- The key parameter influencing the sampling process in coring dynamics was found.
- The coring mechanism of spiral drill was clarified.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 刘勇]