

钻具结构与钻进参数对月壤采样率的影响规律

黄科, 李谦*, 刘鹏, 谢兰兰

(成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059)

摘要:“嫦娥五号”探月工程任务的圆满完成,标志着我国对月球采样的开始。为了获得月表地质信息,在月球的低重力和无循环介质等特殊环境条件下,螺旋钻具有着较好的钻进采样效果。为了获得更好的采样效果,提高钻进采样率,本文结合转速和钻速2个钻进参数,以及钻具长度、钻具内径、螺距和螺旋翼高度4个钻具结构参数,采用正交试验,进行模拟月壤钻进采样试验。同时采用极差分析和方差分析法对采样率和密度变化率2个试验指标结果进行分析,获得以下结论:(1)分别获得采样率和密度变化率指标下的各因素影响程度排序。(2)分别获得各因素对采样率和密度变化率的影响趋势。(3)分别获得采样率和密度变化率2个试验指标下的参数优化组合。

关键词:月球钻探;螺旋钻具;钻探工艺;月壤采样率;月壤密度变化

中图分类号:P634;P184 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)S1-0199-08

The effect of drilling tool structure and drilling parameters on lunar soil sampling rate

HUANG Ke, LI Qian*, LIU Peng, XIE Lanlan

(College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China)

Abstract: The successful completion of the Chang'e-5 lunar exploration mission marks the beginning of China's lunar sampling efforts. To obtain lunar surface geological information and adapt to the unique environmental conditions of the Moon, such as low gravity and the absence of a circulating medium, helical drill tools demonstrate good performance in drilling and sampling. To achieve better sampling results and improve the drilling and sampling rate, this study combines two drilling parameters-rotational speed and drilling speed and four drill tool structural parameters-drill tool length, inner diameter, pitch, and helix height-totaling six parameters. Using the orthogonal experiments, the research conducted simulated lunar soil drilling and sampling tests. At the same time, the range analysis and analysis of variance were used to analyze the results of the two test indexes of sampling rate and density change rate, and the following conclusions were obtained: (1) the influence degree of each factor under the indexes of sampling rate and density change rate was obtained respectively. (2) The influence trends of each factor on sampling rate and density change rate were obtained. (3) The optimal combination of parameters under the two test indexes of sampling rate and density change rate was obtained.

Key words: lunar drilling; screw drill; drilling technology; sampling rate of lunar soil; density change of lunar soil

0 引言

月球富含氦-3等多种矿藏,嫦娥工程的实施促

进深空探测发展与科技创新,月球探测如嫦娥五号

和嫦娥六号工程中的钻进采样技术必不可少,提高

收稿日期:2025-06-15;修回日期:2025-08-07 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.S1.030

基金项目:国家自然科学基金面上项目“量化月壤扰动特征的模块化月球钻进力学模型研究”(编号:42072344);国家自然科学基金青年科学基金项目“月球钻进与月-地运输对月壤样品特征的扰动机理研究”(编号:42302356)、“模拟月球表层采样机土耦合力学模型研究”(编号:11502034)

第一作者:黄科,男,汉族,2001年生,硕士研究生,地质工程专业,研究方向为月球钻进过程中机具和月壤耦合作用,四川省成都市成华区二仙桥东三路1号,hk1728707487@163.com。

通信作者:李谦,男,汉族,1987年生,副教授,硕士生导师,地质资源与地质工程专业,博士,从事钻井智能化分析与应用研究工作,四川省成都市成华区二仙桥东三路1号,liqian2014@cdut.edu.cn。

引用格式:黄科,李谦,刘鹏,等.钻具结构与钻进参数对月壤采样率的影响规律[J].钻探工程,2025,52(S1):199-206.

HUANG Ke, LI Qian, LIU Peng, et al. The effect of drilling tool structure and drilling parameters on lunar soil sampling rate[J]. Drilling Engineering, 2025,52(S1):199-206.

月壤采样率对月球钻探有效获得地质信息、月球地质演化和火山活动资料起着重要作用^[1-7]。

采样率是衡量月球钻探任务效能的核心指标,直接决定样本的代表性、数据的完整性和工程任务的可靠性。由于月壤的颗粒特性,其在进行钻进过程中会呈现一定的流动性,进而导致采样量减小和层理信息丢失,提高月壤钻进采样率对保证样品量和层理信息至关重要^[8]。例如,得益于Apollo17号的高采样率,获得了3 m的连续岩心样品,为月球火山活动序列的研究提供了信息支撑^[9-11]。月球环境与地球环境差异大,月球钻取采样工况复杂,需要通过模拟钻进试验对钻进与钻具结构参数进行优化设计,进而提高月壤采样率和采样质量^[12]。

月球环境条件复杂,月表风化层密度高,月壤颗粒粒径和形态差异大,月球钻探工作影响显著,例如因颗粒间互锁作用导致钻压升高^[13-17]。得益于嫦娥工程,中国研发出TY II、JLU、CAS等系列模拟月壤,美国在其探月过程中也研发了JSC-1A、JSC-1B、JSC-1C、MLS-1和MLS-2等模拟月壤^[18-22]。

目前已知各国主要的钻进取样设备可以归纳为5类:外螺旋钻进采样、外螺旋内中空取心采样、外部钻进排屑钻头与内部软袋取心采样的双层结构、外部钻进排屑钻头与内部钢管取心采样的双层结构、鼯鼠式钻进采样^[23-24]。

在各国的月球探测任务中,前苏联是首位成功完成钻进采样返回任务的国家,具体包括:外螺旋内中空取心采样的Luna-16探测器、进行了钻具结构优化的Luna-20探测器、使用长螺旋无滑差软袋取心采样的Luna-24探测器^[25-26]。美国则成功完成了载人登月任务,其中Apollo-15任务中使用月面钻机(ALSD)进行了钻头试验,由于ALSD钻进阻力和功耗更低,且得益于载人登月任务中航天员可目视选择月球钻进地点,有效提高效率 and 成功率^[27-29]。随着我国探月工程的进行,国内也获得许多成果,如外螺旋内中空的MRDD取样钻具,以及对测试平台和无滑差软袋取心钻具的重点研发^[30-33]。

目前已有的研究主要是关于月钻工程样机的小口径钻具。为了探究更大口径范围内的钻具结构参数与钻进参数对采样率的影响规律,本文围绕不同的钻进参数(转速和钻速)和钻具结构参数(钻

具长度、钻具内径、螺距和螺旋翼高度),基于模拟月壤钻进采样试验,通过正交试验探究不同参数对螺旋钻具取心采样率和采样月壤密度变化率2个试验指标的影响,并得到各试验指标下的参数优化组合。

1 参数设置与试验方案

1.1 模拟钻进试验台

本试验使用的设备与材料如图1所示,试验台由机械臂提供钻进速度,由回转电机提供回转扭矩和指定回转速度。在螺旋钻具的下方放置有月壤容器并盛装指定密度的模拟月壤,其中螺旋钻具使用ABS材料通过3D打印加工。

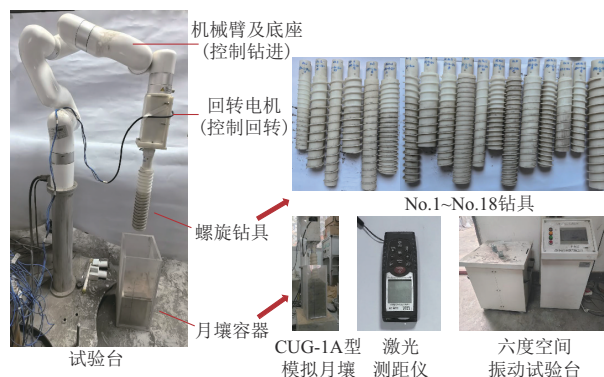


图1 试验设备与材料

试验过程中,通过程序控制机械臂端部竖直向下的运动速度以控制钻进速度,在钻速均匀一致的情况下,钻压在机械臂负荷范围内自适应变化。月壤容器的内部尺寸为120 mm×120 mm×350 mm,并在其正面一侧设置上下抽拉式活动门,以便清除钻头周围月壤,便于取心样品的取出与测量,见图2。此外激光测距仪通过连接件对钻具内部采样高度进行测量,测量精度为±1 mm。

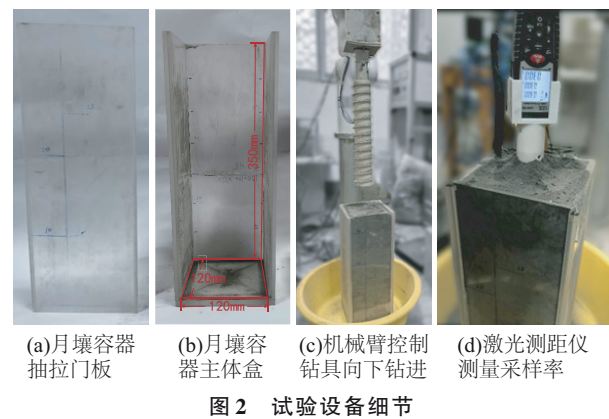
采样率 K 的计算过程如下:

$$L_{\text{钻}} = L - 100 \quad (1)$$

$$H_{\text{采}} = (L + h_{\text{结构}}) - H_{\text{测}} \quad (2)$$

$$K = \frac{H_{\text{采}}}{L_{\text{钻}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $L_{\text{钻}}$ ——实际钻进深度,为了满足钻进速度的均匀性,实际试验减少了100 mm的钻进深度,mm; L ——每个钻具对应的钻具长度,mm; $H_{\text{采}}$ ——钻具内实际取心采样高度,mm; $h_{\text{结构}}$ ——钻具和结构件



的材料壁厚,mm; $H_{测}$ ——平均测量距离,通过多次

激光测距仪测量获得的平均值,mm; K ——模拟月壤钻进试验的采样率。

本试验均使用同一试验台进行钻进模拟试验,此外使用 18 种不同结构参数组合的外螺旋内取心钻具。使用的模拟月壤型号为 CUG-1A,该型号的模拟月壤在化学、矿物组成和物理力学性质方面与实际月壤比较相似^[34],尤其是与 Apollo 14 登陆点的月壤样品更为相似。通过六度空间振动试验台,控制模拟月壤的密度,模拟月壤和 Apollo 部分实际样品主要性能参数如表 1 所示。通过激光测距仪和电子秤分别测得钻进后螺旋钻具内的月壤高度和质量,最后计算月壤样品的采样率和密度变化率。

表 1 CUG-1A 模拟月壤与 Apollo 实际样品的主要性能参数

样 品	物理性质指标				力学性质指标		颗 粒 分 析	
	密度/(g·cm ⁻³)		孔隙比	孔隙率/%	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	中值粒径范围/ um	颗 粒 形 态
	松散	紧实						
CUG-1A	1.4	1.9	0.33~1.40	29~48	0.21~1.71	18.22~29.38	70	棱角状和次棱角状为主,少量次圆状颗粒
Apollo11	1.36	1.8	0.67~1.21				48~105	
Apollo12	1.15	1.93			0.26~1.80	25~50	42~94	棱角状为主,少部分球形
Apollo14	0.89	1.55	0.89~2.26				75~802	椭球形
Apollo15	1.1	1.89	0.71~1.94				51~108	

1.2 试验参数与正交试验方案

基于试验设备和材料,本试验参数包含有回转速度和钻进速度 2 个钻进参数,以及钻具内径 D 、钻具长度 $L_{钻}$ 、螺距 S 和螺旋翼高度 h 4 个结构参数,如图 3 所示,参数与水平设置如表 2 所示。

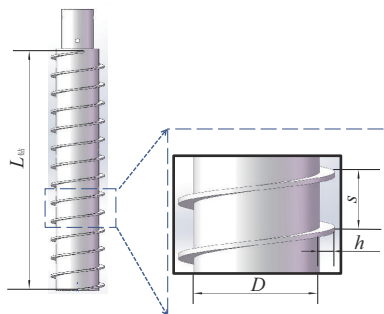


图 3 钻具结构参数

采用正交试验,总计六因素和三水平,得到 $L_{18}(6^3)$ 正交试验,试验结果如表 3 所示。其中密度变化率均为负值,表示采样获得的模拟月壤密度比初始模拟月壤密度小。

表 2 试验因素与水平设定

试 验 因 素		水 平		
钻进参数	转速/(r·min ⁻¹)	60	90	120
	钻速/(mm·min ⁻¹)	120	180	240
	钻具内径/mm	30	37	45
螺旋钻具结构参数	钻具长度/mm	200	250	300
	螺距/mm	13	18	23
	螺旋翼高度/mm	2	4	6

2 钻具结构与钻进参数对采样率的影响分析

2.1 极差分析

通过极差分析,可以获得各因素对应的 R 值,如表 4 所示,通过 R 值大小判断各因素对采样率指标的影响程度。由采样率试验指标下各因素的 R 值柱状图可以更加直观地比较各个因素的 R 值大小,如图 4 所示。各因素对采样率的影响程度:钻具长度>螺旋翼高度>转速>钻具内径>钻速>螺距。

表3 正交试验结果

编号	转速/(r·min ⁻¹)	钻速/(mm·min ⁻¹)	钻具内径/ mm	钻具长度/ mm	螺距/ mm	螺旋翼高度/ mm	采样率/%	密度变化率/%
1	60	120	30	200	13	2	66.17	—12.28
2	60	120	37	250	23	6	37.26	—15.26
3	60	180	30	300	23	4	40.00	—13.42
4	60	180	45	200	18	6	66.61	—11.55
5	60	240	37	300	18	2	58.14	—7.62
6	60	240	45	250	13	4	73.48	—8.80
7	90	120	30	300	18	6	23.53	—9.83
8	90	120	45	200	23	4	59.22	—13.94
9	90	180	37	250	18	4	42.70	—17.26
10	90	180	45	300	13	2	65.14	—3.62
11	90	240	30	250	23	2	56.67	—14.94
12	90	240	37	200	13	6	61.83	—11.41
13	120	120	37	300	13	4	26.08	—17.38
14	120	120	45	250	18	2	49.19	—14.70
15	120	180	30	250	13	6	28.78	—19.74
16	120	180	37	200	23	2	69.39	—10.61
17	120	240	30	200	18	4	52.72	—16.67
18	120	240	45	300	23	6	32.67	—20.33

表4 采样率各因素K值与R值极差分析结果

项	水平	转速	钻速	内径	长度	螺距	螺旋翼高度
K值	1	341.66	261.45	267.87	375.94	321.48	364.70
	2	309.09	312.62	295.40	288.08	292.89	294.20
	3	258.83	335.51	346.31	245.56	295.21	250.68
最佳水平		1	3	3	1	1	1
R值		13.81	12.34	13.07	21.73	4.77	19

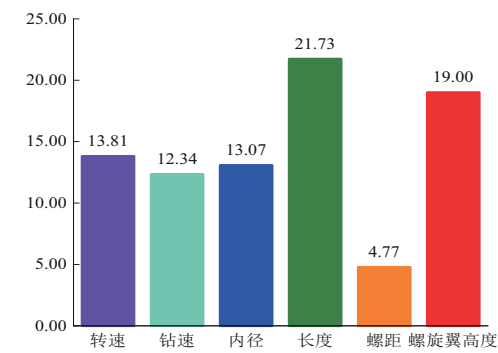


图4 采样率各因素R值柱状图

其中对采样率的影响因素中,螺距的影响相对较小,其余五个因素影响相对较大,且长度和螺旋翼高度影响更为明显。

2.2 方差分析

通过各因素方差分析对采样率极差分析结果进行验证,方差分析结果见表5。由表5可知,长度和螺旋翼高度对采样率有极其显著影响, $R^2=0.972$;转速、钻速和内径对采样率有一般显著影响, $R^2=0.972$;而螺距对采样率的影响不显著,其分析结果与极差分析一致。

2.3 单因素影响趋势与优化参数组合

通过极差分析得到的K值,绘制各单因素对采样率的影响趋势图,如图5所示。

通过图5可知:对于转速的影响,采样率随着转速的增加而逐渐减小,并且当转速超过90 r/min时采样率的下降趋势有所增大。整体采样率从56.94%下降至43.14%,整体下降幅度为13.80%。

表5 采样率各因素方差分析结果

因素名称	平方和	df	均方	F	p	显著性
转速	580.427	2	290.213	11.836	0.013	一般显著
钻速	479.289	2	239.645	9.773	0.019	一般显著
内径	527.92	2	263.96	10.765	0.015	一般显著
长度	1473.682	2	736.841	30.051	0.002	极其显著
螺距	84.049	2	42.025	1.714	0.271	
螺旋翼高度	1103.6	2	551.8	22.504	0.003	极其显著
残差	122.6	5	24.52			

注:(1) $R^2=0.972$;(2) $p<0.05$ 表示因素影响一般显著, $p<0.01$ 表示因素影响极其显著。

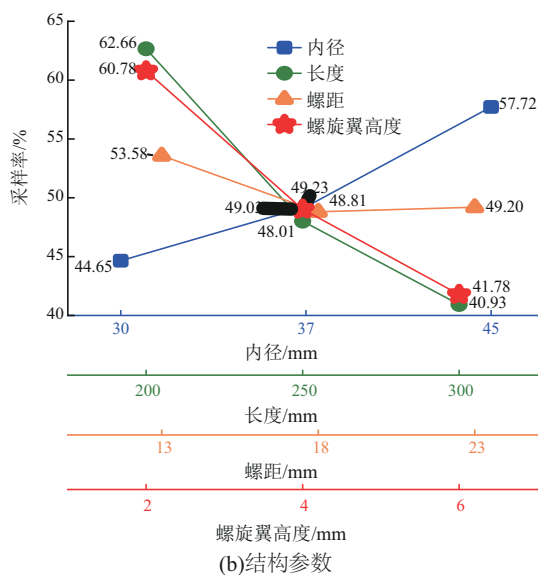
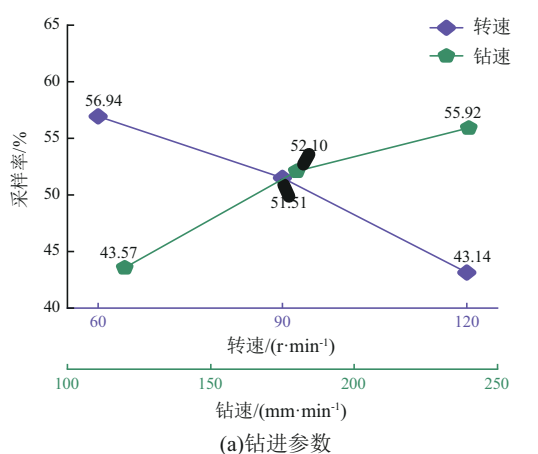


图5 各因素对采样率的影响趋势

对于钻速的影响,采样率随着钻速的增加而增加,并且当钻速超过180 mm/min时采样率的上升趋势有所变缓。整体采样率从43.57%增加至55.92%,

整体上升幅度为12.35%。对于钻具内径的影响,采样率随着钻具内径增加而增加,并且当钻具内径值超过37 mm时,采样率的上升速度有所增大。整体采样率从44.65%增加至57.72%,整体上升幅度为13.07%。对于钻具长度的影响,采样率随着钻具长度增加而减小,并且当钻具长度值超过250 mm时,采样率的下降速度有所变缓。整体采样率从62.66%减少至40.93%,整体下降幅度为21.73%。对于螺距的影响,采样率随着螺距的增加先减少后增加,谷值为48.81%,当螺距超过18 mm时,采样率变化出现拐点,其从下降趋势变为上升趋势,然而上升速度缓慢,近乎于不变。整体采样率变化幅度为4.77%。对于螺旋翼高度的影响,采样率随着螺旋翼高度增加而减小,并且当螺旋翼高度值超过4 mm时,采样率的下降速度有所变缓。整体采样率从60.78%减少至41.78%,整体下降幅度为19.00%。

总体来看,采样率与钻速和钻具内径呈正相关,与转速、钻具长度和螺旋翼高度呈负相关,此外,采样率随着螺距的增加有先减后增的趋势。为了提高月壤的采样率,对试验参数组合进行优化,以此最终优选出采样率指标下的优化参数组合,如表6所示。

表6 采样率优化参数组合

参数项	转速/ (r·min ⁻¹)	钻速/ (mm·min ⁻¹)	钻具 内径/ mm	钻具 长度/ mm	螺距/ mm	螺旋翼 高度/ mm
最佳水平	1	3	3	1	1	1
最佳水平对 应数值	60	240	45	200	13	2

3 钻具结构与钻进参数对密度变化率的影响分析

3.1 极差分析

通过极差分析,可以获得各因素对应的R值,如表7所示,通过R值大小判断各因素对密度变化率指标的影响程度,由密度变化率试验指标下各因素的R值柱状图可以更加直观地比较各个因素的R值大小,如图6所示。各因素对密度变化率的影响程度:转速>螺旋翼高度>钻具长度>螺距>钻具内径>钻速。

表7 密度变化率各因素K值与R值极差分析结果

项	水平	转速	钻速	内径	长度	螺距	螺旋翼高度
K值	1	−68.93	−83.39	−86.88	−76.46	−73.23	−63.77
	2	−71.00	−76.20	−79.54	−90.70	−77.63	−87.47
	3	−99.43	−79.77	−72.94	−72.20	−88.50	−88.12
最佳水平		1	2	3	3	1	1
R值		5.08	1.20	2.32	3.08	2.54	4.06

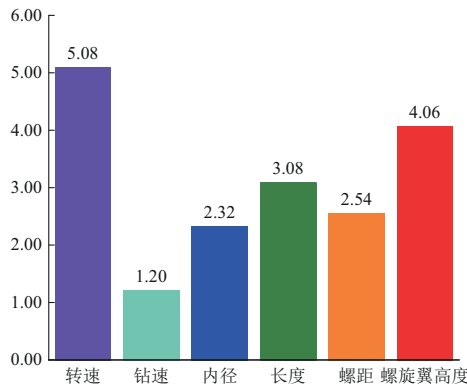


图6 密度变化率各因素R值柱状图

3.2 方差分析

通过各因素方差分析对密度变化率极差分析结果进行验证,方差分析结果见表8。由表8可知,虽然转速、钻速、内径、长度、螺距和螺旋翼高度共6个因素对于密度变化率的影响均不显著, $R^2=0.737$,但是其影响程度的大小排序与极差分析一致。

表8 密度变化率各因素方差分析结果

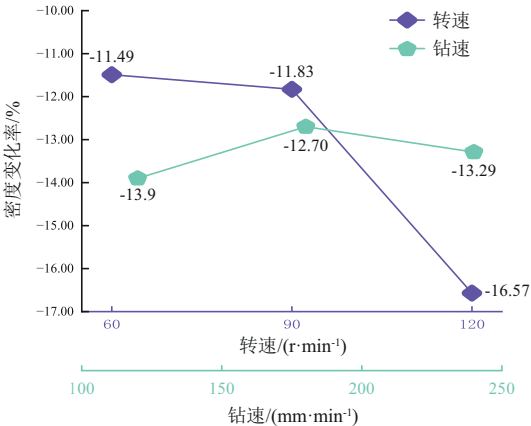
因素名称	平方和	df	均方	F	p	显著性
转速	96.822	2	48.411	2.907	0.145	
钻速	4.308	2	2.154	0.129	0.882	
内径	16.209	2	8.104	0.487	0.641	
长度	31.288	2	15.644	0.939	0.450	
螺距	20.594	2	10.297	0.618	0.576	
螺旋翼高度	64.169	2	32.084	1.926	0.240	
残差	83.272	5	16.654			

注:(1) $R^2=0.737$;(2) $p<0.05$ 表示因素影响一般显著, $p<0.01$ 表示因素影响极其显著。

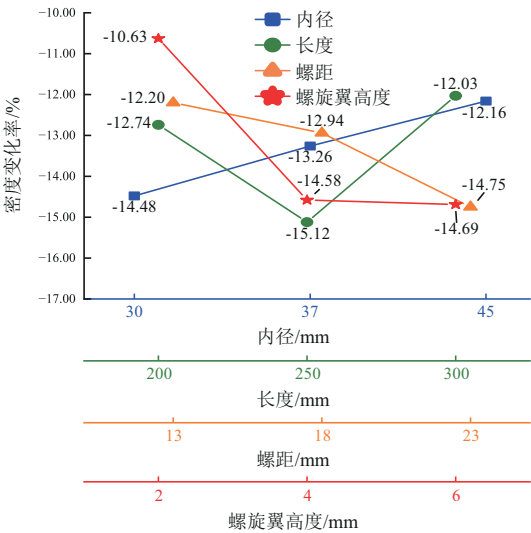
3.3 单因素影响趋势与优化参数组合

通过极差分析得到的K值,得到各单因素对密度变化率的影响趋势图,如图7所示。

通过图7可知:对于转速的影响,密度变化率随



(a)钻进参数



(b)结构参数

图7 各因素对密度变化率的影响趋势

着转速的增加而逐渐减小,且当转速超过90 r/min时密度变化率的下降趋势有所增大。整体密度变化率从−11.49%下降至−16.57%,整体下降幅度为5.08%。对于钻速的影响,密度变化率随着钻速的增加先增加后减小,峰值为−12.70%。并且当钻速为180 mm/min时密度变化率的变化出现拐点,整体密度变化率变化幅度为1.20%。对于钻具内径

的影响,密度变化率随着钻具内径的增加而增加,整体密度变化率从 -14.48% 上升至 -12.16% ,密度变化率增加幅度为 2.32% 。对于钻具长度的影响,密度变化率随着钻具长度的增加先减小后增加,谷值为 -15.12% 。并且当钻具长度为 250 mm 时密度变化率的变化出现拐点,整体密度变化率变化幅度为 3.09% 。对于螺距的影响,密度变化率随着螺距的增加而逐渐减小,并且当螺距超过 18 mm 时密度变化率的下降趋势有所增大。整体密度变化率从 -12.20% 下降至 -14.75% ,整体下降幅度为 2.55% 。对于螺旋翼高度的影响,密度变化率随着螺旋翼高度的增加而逐渐减小,并且当螺旋翼高度超过 4 mm 时密度变化率的下降趋势有所变缓,而且趋近于不变。整体密度变化率从 -10.63% 下降至 -14.69% ,整体下降幅度为 4.06% 。

总体来看,密度变化率与钻具内径呈正相关,与转速、螺距和螺旋翼高度呈负相关,此外,密度变化率随着钻速增加有先增后减的趋势,随着钻具长度的增加有先减后增的趋势。

为了减小钻进采样时对样品密度的扰动程度,即为了获得较低的月壤密度变化程度,对试验参数组合进行优化,以此最终优选出密度变化率指标下的优化参数组合,如表9所示。

表9 密度变化率优化参数组合

参数项	转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	钻速/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	钻具 内径/ mm	钻具 长度/ mm	螺 距/ mm	螺旋翼 高度/ mm
最佳水平	1	2	3	3	1	1
最佳水平对 应数值	60	180	45	300	13	2

4 结论

本文通过不同钻进参数和钻具结构参数的组合,进行模拟钻进采样试验,分析采样率和密度变化率2个试验指标结果,得到以下结论:

(1)通过极差分析与方差分析,获得的各试验指标下单因素的影响程度排序一致。采样率试验指标下:钻具长度 $>$ 螺旋翼高度 $>$ 转速 $>$ 钻具内径 $>$ 钻速 $>$ 螺距。密度变化率指标下:转速 $>$ 螺旋翼高度 $>$ 钻具长度 $>$ 螺距 $>$ 钻具内径 $>$ 钻速。

(2)分别获得各因素对采样率和密度变化率试

验指标的影响趋势。采样率指标下:采样率与钻速和钻具内径呈正相关,与转速、钻具长度和螺旋翼高度呈负相关,此外,采样率与随着螺距的增加有先减后增的趋势。密度变化率指标下:密度变化率与钻具内径呈正相关,与转速、螺距和螺旋翼高度呈负相关,此外,密度变化率随着钻速增加有先增后减的趋势,随着钻具长度的增加有先减后增的趋势。

(3)分别得到采样率指标下和密度变化率指标下的优化参数组合。采样率指标下,优化参数的水平值为:转速 60 r/min 、钻速 240 mm/min 、钻具内径 45 mm 、钻具长度 200 mm 、螺距 13 mm 、螺旋翼高度 2 mm 。密度变化率指标下,优化参数的水平值为:转速 60 r/min 、钻速 180 mm/min 、钻具内径 45 mm 、钻具长度 300 mm 、螺距 13 mm 、螺旋翼高度 2 mm 。

参考文献:

- [1] 欧阳自远,邹永廖,李春来,等.月球某些资源的开发利用前景[J].地球科学,2002,27(5):498-503.
- [2] 谢开钰.钛铁矿及月壤仿真样提取金属及制备氧气[D].沈阳:东北大学,2016.
- [3] 鄢泰宁,朴家武,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.
- [4] 尹怀勤,王洪鹏.飞向月球——嫦娥工程[J].军事文摘,2016,(22):34-37.
- [5] Zacny K, Paulsen G, Szczesiak M, et al. LunarVader: Development and testing of lunar drill in vacuum chamber and in lunar analog site of antarctica[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2013,26(1): 74-86.
- [6] Pieters C M, Noble S K. Space weathering on airless bodies.[J]. Journal of geophysical research. Planets, 2016,121(10): 1865-1884.
- [7] 刘守偲,周琴,李秋立,等.嫦娥五号样品揭示月球20亿年前火山活动及源区性质[J].中国科学:地球科学,2021,51(12): 2048-2055.
- [8] 全齐全,史晓萌,唐德威,等.模拟月壤钻进取样量影响因素分析及试验研究[J].北京航空航天大学学报,2015,41(11): 2052-2060.
- [9] 周诚,李浩然,韩文彬,等.面向原位建造的月壤采集技术研究进展及展望[J].华中科技大学学报(自然科学版),2024,52(8):65-75,90.
- [10] 肖龙,钱煜奇,乔乐,等.月球火山活动及热演化历史研究进展[J].中国科学基金,2022,36(6):841-850.
- [11] Jaumann R, Hiesinger H, Anand M, et al. Geology, geochemistry, and geophysics of the Moon: Status of current understanding [J]. Planetary and Space Science, 2012, 74 (1): 15-41.
- [12] 李大佛,殷参,雷艳,等.月球钻孔取心机具试验与钻进规程[J].地球科学,2016,41(9):1611-1618.

- [13] 叶培建,肖福根.月球探测工程中的月球环境问题[J].航天器环境工程,2006,23(1):1-11.
- [14] Hapke B, Sato H. The porosity of the upper lunar regolith[J]. Icarus, 2016,273: 75-83.
- [15] Fa W, Liu T, Zhu M H, et al. Regolith thickness over Sinus Iridum: Results from morphology and size-frequency distribution of small impact craters[J]. Journal of Geophysical Research Planets, 2014,119(8): 1914-1935.
- [16] 杨瑞洪,谷渊涛,耿焕,等.月壤的粒径和成分特征及其分类研究[J].南京大学学报(自然科学),2021,57(06):934-943.
- [17] 郑永春,欧阳自远,王世杰,等.月壤的物理和机械性质[J].矿物岩石,2004,24(4):14-19.
- [18] 李建桥,邹猛,贾阳,等.用于月面车辆力学试验的模拟月壤研究[J].岩土力学,2008,29(6):1557-1561.
- [19] 樊世超,贾阳,向树红,等.月面地形地貌环境模拟初步研究[J].航天器环境工程,2007,24(1):15-20.
- [20] 邹猛,李建桥,刘国敏,等.模拟月壤地面力学性质试验研究[J].岩土力学,2011,32(4):1057-1061.
- [21] Zheng Y C, Wang S J, Ouyang Z Y, et al. CAS-1 lunar soil simulant[J]. Advances in Space Research, 2009,43: 448-454.
- [22] 李谦,高辉,谢兰兰,等.月球钻探取样技术研究进展[J].钻探工程,2021,48(1):15-34.
- [23] Zhang T, Xu K, Yao Z, et al. The progress of extraterrestrial regolith-sampling robots[J]. Nature Astronomy, 2019, 3(6): 487-497.
- [24] Zhang T, Zhang W, Wang K, et al. Drilling, sampling, and sample-handling system for China's asteroid exploration mission[J]. Acta Astronautica, 2017, 137: 192-204.
- [25] Shkuratov Y, Starukhina L, Hoffmann H, et al. A model of spectral albedo of particulate surfaces: Implications for optical properties of the Moon[J]. Icarus, 1999, 137(2): 235-246.
- [26] 杨帅,孙京,殷参,等.地外星体土壤取样机构技术[J].航天器工程,2011,20(4):137-146.
- [27] 鄢泰宁,冉恒谦,段新胜.宇宙探索与钻探技术[J].钻探工程,2010,37(1):3-7.
- [28] 陈浩文,冉恒谦,王艳丽,等.月球钻探模拟试验及技术展望[J].钻探工程,2023,50(S1):192-199.
- [29] Center L B J S. Apollo 17: Preliminary Science Report[M]. Scientific and Technical Information Office, National Aeronautics and Space Administration, 1973.
- [30] 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,2009,30(3):1189-1194.
- [31] 王清川.钻取采样参数测试平台研制及试验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [32] 张禹.滑轨式月壤钻取采样装置关键技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- [33] 李大佛,雷艳,许少宁.月球钻孔取心机具研制与试验[J].钻探工程,2015,42(2):1-7.
- [34] 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,2011,30(4):137-142.

(编辑 王跃伟)