



含冰模拟月壤切削负载试验研究

赵宇, 季节, 田野, 段张庆, 张伟伟

Experimental Study on Cutting Load of Simulated Lunar Soil Containing Ice

ZHAO Yu, JI Jie, TIAN Ye, DUAN Zhangqing, and ZHANG Weiwei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20220078>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

月球极区钻取采样技术

Research of Drilling and Sampling Technique for Lunar Polar Region Exploration

深空探测学报(中英文) . 2020, 7(3): 278-289

月球极区水冰资源原位开发利用研究进展

Research Prospects of Lunar Polar Water Ice Resource In-Situ Utilization

深空探测学报(中英文) . 2020, 7(3): 241-247

月球极区探测的主要科学与技术问题研究

Research on the Main Scientific and Technological Issues on Lunar Polar Exploration

深空探测学报(中英文) . 2020, 7(3): 223-231

无轴螺旋式模拟月壤主动填充装置研制

Development of Platform for Active Filling Lunar Soil Simulants

深空探测学报(中英文) . 2019, 6(1): 57-62

深层月壤钻取冗余绕组电机控制方法

Control Method of Redundant Winding BLDC for Deep Lunar Soil Drilling

深空探测学报(中英文) . 2021, 8(3): 259-268

多器联合月球极区探测通信系统设计

Analysis and Design of the Communication System for Multi-Probes Joint Lunar Polar Exploration

深空探测学报(中英文) . 2020, 7(4): 384-390



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

含冰模拟月壤切削负载试验研究

赵宇¹, 季节², 田野¹, 段张庆¹, 张伟伟³

(1. 哈尔滨商业大学 轻工学院, 哈尔滨 150028; 2. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094;
3. 哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘要: “探月工程四期”计划前往月球南极永久阴影区开展月壤水冰钻探任务, 获取深低温环境下月壤水冰的机-壤力学作用特性对探月机具的研制具有重要的意义。面向月壤水冰这一新研究对象, 制备了与极区月壤水冰具有矿物组分、粒径级配相似性的切削试验用模拟月壤, 首创并研制了液氮浴切削力载测试平台, 建立了深低温月壤水冰模拟物的切削试验条件, 在此基础上开展了月壤水冰模拟物的切削力载测试试验, 并初步获得了不同切深、不同样本温度、不同样本含水率工况下的切削负载数据, 可为钻进采样机具的研制提供参考依据。

关键词: 月球极区; 含冰模拟月壤; 低温平台; 切削试验

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2022)06-0606-11

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20220078

引用格式: 赵宇, 季节, 田野, 等. 含冰模拟月壤切削负载试验研究[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(6): 606-616.

Reference format: ZHAO Y, JI J, TIAN Y, et al. Experimental study on cutting load of simulated lunar soil containing ice[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(6): 606-616.

引言

目前, 地外天体探测器通过雷达、中子谱、光谱等遥感手段证实了月球极区存在水冰^[1-2], 水不仅可以揭示生命的起源和物质的演化, 还是深空探测的重要补给物资, 也关系到未来月球科研基地的选址和建设。中国“探月工程四期”计划前往月球极区进行月壤水冰的探月任务, 拟用钻孔的方法依托钻具回转切削对月壤水冰破坏后采集。但迄今为止对月球极区的探测信息都是基于遥感手段获得, 并未直接获取月壤水冰的相关物理力学特性^[3-5]。因此, 面向“探月工程四期”月球极区月壤水冰采样勘测任务, 需开展地面含冰模拟月壤切削的解耦性试验对月球极区钻进采样工况模拟, 获得含冰月壤在钻具切削作用下的力学特性, 为钻进采样装置的设计提供依据。

月壤水冰是未来研究的新对象, 其切削力载特性和影响因素具有未知的不确定性, 前期国内外学者就地外天体星壤物质的钻进切削问题开展了诸多研究, Li等^[6]通过模拟月岩切削试验总结出了切削刃与月岩相互作用的模型、破碎行为和力载特性, 并设计了一种高效能取芯钻头, 提升了钻进的可靠性; Dagrain等^[7]将岩石切削过程分成几个阶段, 得出切削力载随切削

深度增加而增加的结论并且钻具会表现出不同的力载形式; 唐均跃等^[8]分析了钻具作用下月壤的失效形式和运移状态, 建立了两种典型工况下的钻进力载模型; 赵德明等^[9]通过钻具与月壤之间的相互作用机理与排屑模型, 给出了不同粒径级配颗粒对钻具的力学作用关系; 崔建国等^[10]通过临界尺度颗粒运移特性总结出钻进采样过程孔壁置入和孔底置出机理, 为钻进工况识别提出了理论依据; 谭松成等^[11]通过钻进过程中临界速度的概念, 对钻进过程中的可持续钻进性以及功耗做出合理设置, 以保证持续的钻进过程, 上述研究的对象是面向月岩和干性月壤展开, 研究对象与月壤水冰存在较大差别, 不足以论证月壤水冰的相关切削力学特性, Liu等^[12]通过对极区模拟月壤单轴抗压强度测试试验, 给出了含水量、温度和干密度对单轴抗压强度的影响, 为水冰探测装备的设计提供了参考依据。刘德赟等^[13]通过冻土类模拟月壤的钻进试验研究, 总结出冻土类月壤黏结性强, 所需钻进力载大的钻进特性, 但目前尚未有相关研究在拟实低温的条件下对月壤水冰模拟物的含水率、温度和切削参数等因素对切削力载特性的影响进行分析。

本文开展了含冰模拟月壤切削力载试验, 首先根据调研制备了含冰模拟月壤样本, 研制了含冰模拟月

壤样本的降温控温装置,而后对含冰模拟月壤切削,初步给出了不同切削深度、不同样本温度和不同样本含水率对切削力载的影响情况,为月壤水冰采样钻具的设计提供参考。

1 含冰模拟月壤制备方法

1.1 极区月壤物性参数

极区月壤与高地月壤成分相近,主要为斜长石矿物,根据美国国家航空航天局(National Aeronautics Space and Administration, NASA)返回的“阿波罗16号”(Apollo16)高地样本数据作为极区模拟月壤的标准配比,由Basu计算的Apollo16样本数据平均矿物组成(表1)作为依据,其中斜长石矿物占比约70%^[14],因此按照矿物组分的成分含量和比例关系,本文选用的模拟月壤原料采用不同粒径级配的斜长岩和玄武岩按照7:3比例混合配置而成,可使斜长石矿物成分近似为70%。对所配置模拟月壤样本的颗粒原料采用高倍电子显微镜成像,微观形貌如图1所示。模拟样本颗粒呈现出棱角状和次棱角状,与已知真实月壤颗粒形貌相似。

表1 “阿波罗16号”登月点月壤矿物平均组成
Table 1 Mean mineral composition of lunar soil at Apollo 16 lunar landing site

mol%				
来源	长石	辉石	橄欖石	不透明矿物
Apollo16	69.0	28.2	2.6	0.1

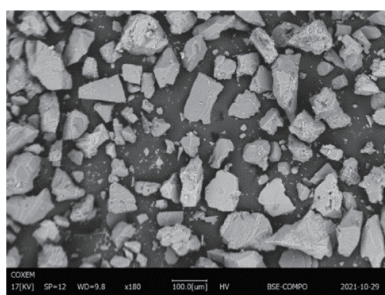


图1 模拟月壤颗粒微观形貌

Fig. 1 Micromorphology of simulated lunar soil particles

本文模拟月壤粒径级配主要参考的是NASA研制的NU-LHT-2M型^[15]高地模拟月壤经激光粒度分析仪检测,获得的粒度累计曲线如图2所示。经对比,制备的模拟月壤粒径级配与NU-LHT-2M型模拟月壤接近,并落在月壤均值加减1倍标准差范围内。

模拟月壤的干密度决定其剪切性质,月壤样本干密度采用相对密度试验仪测得,其中样本的最大干密度和最小干密度测量值如表2所示。

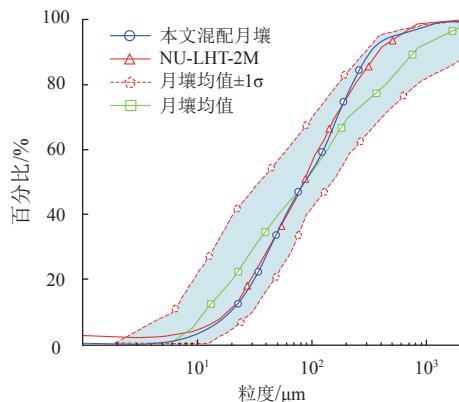


图2 模拟月壤粒度累计曲线

Fig. 2 Particle size accumulative curve of simulated lunar soil

表2 样本干密度测试参数

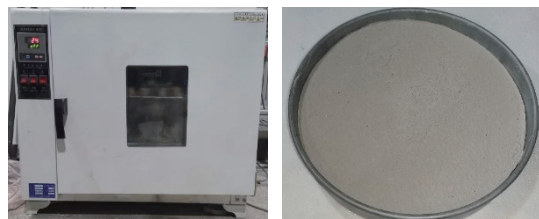
Table 2 Sample dry density test parameters

测量值	最大干密度	最小干密度
单位/(g·cm ⁻³)	1.88	1.26

1.2 模拟样本制备方法

模拟月壤样本的制备过程决定其力学特性,本文采用水-壤混合制备方案完成样本制备,如图3所示。该制备方法操作简单、制作周期短、可循环次数多、样本力学强度高,是目前作为极区模拟月壤制备的主要方法之一^[16],其制备流程为如下几个步骤。

1) 烘干去水:为精确控制样本的含水率,需要对样本原料烘干去除原始水分。将样本原料放入烘箱内,在110℃环境温度下烘干8h以上直至样本质量达到恒重,然后等待样本冷却至室温时取出。



(a) 热风烘箱

(b) 干燥样本

图3 模拟月壤样本原料

Fig. 3 Simulated lunar soil sample materials

2) 物料混合:根据所需制备样本的含水率及干燥的样本量计算出所需水的质量,将干燥模拟月壤与计算质量后的水均匀混合,然后放入密封袋中静置均化8h,利用毛细作用使样本中的水分迁移均匀。

3) 样本含水率检测:对均化后的样本进行含水率检测,为防止因水分配比不均匀而导致的力学性质差异,对均化后的样品多点取样,然后采用热重法烘干检测,通过烘干前后两次样本质量差计算含水率值,

如果测量含水率与目标含水率的相对误差小于 $\pm 5\%$, 则样本制备完毕, 否则重新配置。

4) 密度计算: 根据样本模具体积和样本的目标实度计算出所需含水模拟月壤的质量, 其中样本相对密度计算式为

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} = \frac{\rho_{\max}(\rho - \rho_{\min})}{\rho(\rho_{\max} - \rho_{\min})} \quad (1)$$

其中: D_r 为相对密度; e_{\max} 为最大孔隙比; e_{\min} 为最小孔隙比; ρ_{\max} 为最大干密度; ρ_{\min} 为最小干密度。

月壤密度是指月壤在月球表面处于自然堆积状态下的密度, 根据Heiken^[17]给出的月壤剖面深度与密度的关系, 月壤的原位相对密度在顶部150 mm处约为65%, 在300 mm以下增加到90%以上, 此后随深度增加其宏观体密度几乎不发生较大变化, 如图4所示。鉴于钻取采样属于机械方式获取月壤样本, 而高密度月壤力学特性与其本构特性息息相关, 因此本文采用干密度 1.79 g/cm^3 的高密度模拟月壤样本做为试验对象, 该相对密度条件下样本具备较高的力学强度, 对含冰月壤切削力载测试具有较好的覆盖性。

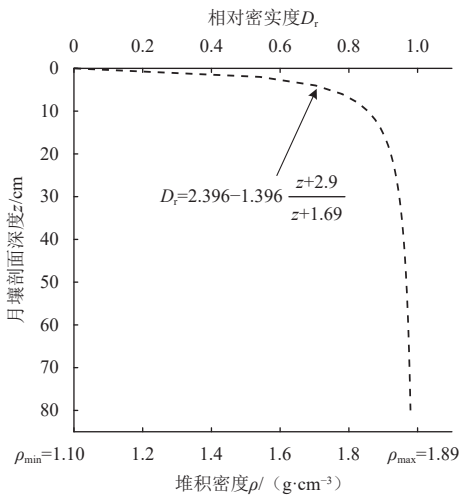


图4 月球剖面深度-体积密度
Fig. 4 Depth-volume density of lunar profile

5) 常温制样: 将所需配置的模拟月壤样本称量后均匀分成两份, 分批将样本放入模具中压实, 保证分层压制时各层样本的密度相近, 并在首次压实后对样本表面做刮毛处理, 以增强样本之间的黏结力, 保证样本整体的均一性, 如图5所示。压制完毕后用保鲜膜包裹样本, 防止与外界水分发生交换。

6) 冷冻封存: 为避免快速冻结导致样本发生的冻胀破坏, 将常温制备后的样本放入恒温冰箱($-80\text{ }^{\circ}\text{C}$)缓慢冷冻保存, 待试验时取出。

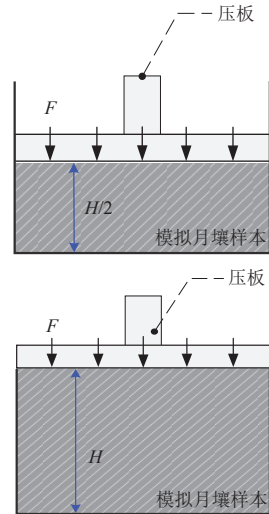


图5 样本分层压实方法
Fig. 5 Compaction of sample in two layers

2 低温切削试验平台设计

月球极区月壤受低温真空环境影响具有机械强度高、受力、热扰动易挥发、水冰分布具有随机性等特点, 并且永久阴影区无能量输入等多方面因素的制约, 对实际采样作业要求极为严苛。因此, 为模拟月球极区极端的采样工况, 需搭建一套容易调整的切削规程, 可改变切削参数的试验系统, 保证样本在切削试验过程中保持相对稳定的形态。

2.1 切削测试平台系统组成

1) 平台结构

试验使用的单刃直线切削力载测试平台^[18]功能为: 切削驱动机构推动切削刃沿水平向做直线切削进给运动; 进尺驱动机构通过磁栅尺调整切削刃沿竖直向的切削深度; 冲击驱动机构施加一定频率和能量的冲击功作用在切削刃具上, 增加其切削能力; 6维力传感器连接模具, 监测切削力载; 低温环境箱填充液氮使模拟月壤样本保持冷却, 单刃切削试验台模型如图6所示。试验所用切削刃为直切刃^[19], 尺寸构型如图7

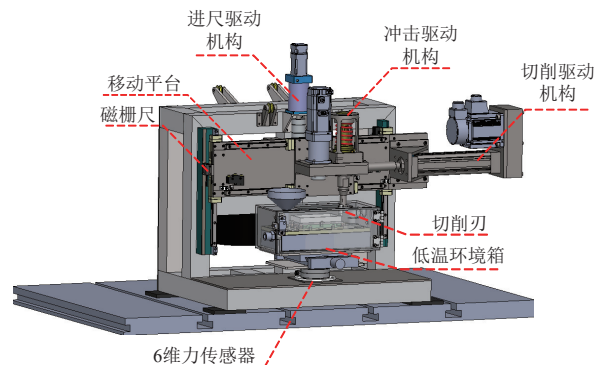


图6 单刃直线切削力载测试平台
Fig. 6 Single-edge straight-line cutting load test platform

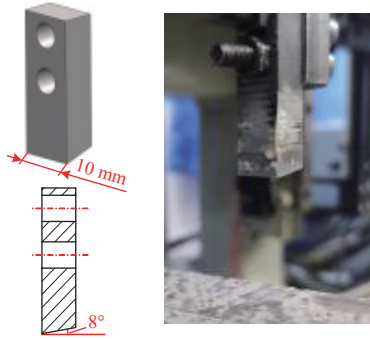


图 7 切削刀具尺寸构型

Fig. 7 Dimensional configuration of cutting tool

所示。

2) 伺服控制系统组成

伺服控制系统对整个试验台起驱动输出调控作用, 其中切削规程基于仿真软件模块编译调控, 切削速度由驱动器转译反馈, 切削深度由磁栅尺测量定位, 切削力载由6维力传感器采集读取。试验过程中将试验测试规程数据导入仿真模块中作为输入, 通过上下位机执行反馈完成试验台各组成部分的自动控制输出和数据采集。其原理简图如图8所示。

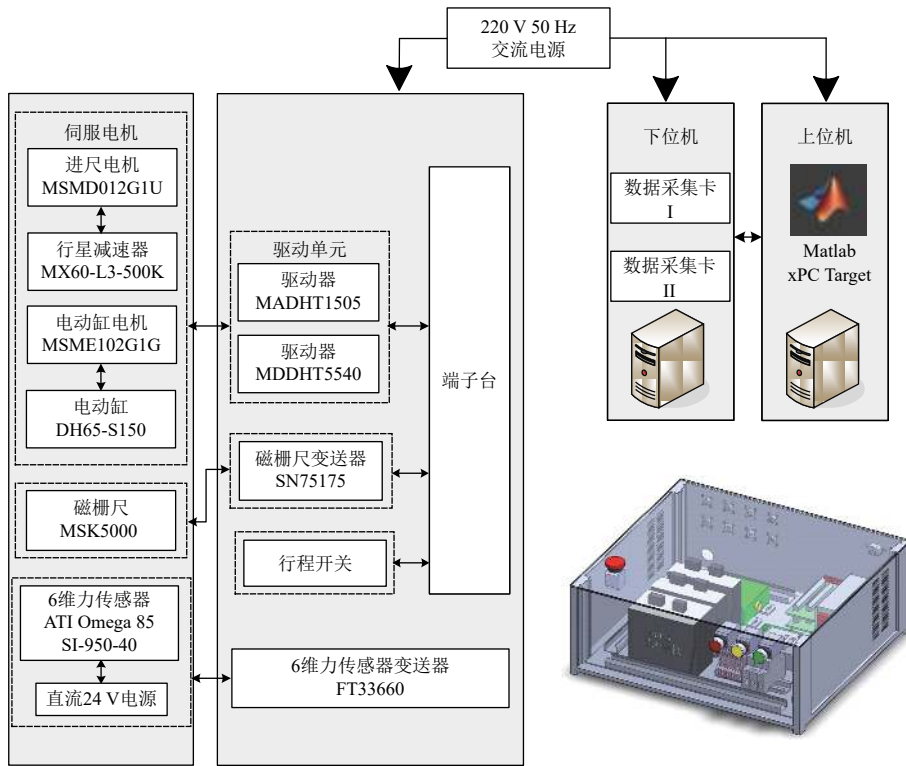


图 8 单刃直线切削力载测试平台控制系统

Fig. 8 Single-edge straight-line cutting load test platform control system

3) 力载监测系统组成

力载监测系统直接反馈切削负载测试结果, 采用将6维力传感器与样本模具相连的结构设计, 通过刀具与样本之间的相互作用关系获取力载。根据含冰模拟月壤的高机械强度属性, 样本自身的阻尼也可降低滤波的扰动, 将6维力传感器安装在样本模具底部可直观的检测出切削力载的变化情况, 力载监测模型如图9所示, 6维力传感器测量参数如表3所示。

试验过程中首先将切削参数输入上位机的仿真模块中执行编译, 然后通过进尺驱动机构对切削深度调整, 调整过程中由磁栅尺触发行程开关精确定位, 切削深度确定后由切削驱动机构水平切削。切削过程中

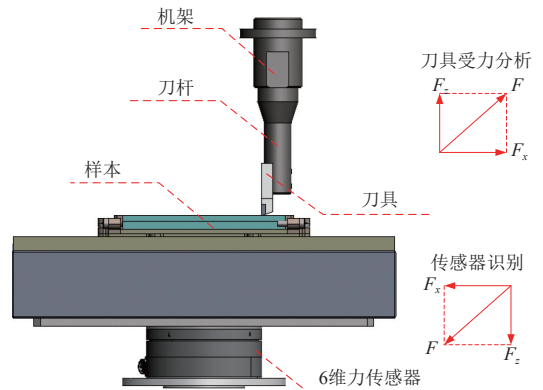


图 9 单刃直线切削力载测试平台力载监测系统

Fig. 9 Force load monitoring system of single-edge straight-line cutting load testing platform

切削速度由驱动器反馈,实时力载由连接样本模具下的6维力传感器监测,并通过下位机读取力载波动实况同时将数据记录保存。单刃直线切削力载测试平台整体系统通过程序调控各部分之间的动作来执行试验的测试规程,完成数据记录,表4为单刃直线切削力载测试平台总体功能参数。

表3 6维力传感器测量参数

Table 3 Six-dimensional force sensor measurement parameters

条目	参数
水平力 (F_x, F_y) 量程/N	± 1900
竖力 (F_z) 量程/N	± 3800
力矩 (T_x, T_y) 量程/(N·m)	± 80
最大测量频率/Hz	1500

表4 单刃直线切削力载测试平台试验参数

Table 4 Single-edge straight-line cutting load test platform test parameters

条目	指标
功能	能实现单切削刃的水平切削、垂直进尺
切削力/N	≥ 1500
切压力/N	≥ 1000
切削速度	0~220 mm/s (相当于直径20 mm钻头的回转转速为0~200 r/min)
进尺速率	0~20 ± 0.1 mm/min
样本尺寸	高度不小于30 mm, 宽度不小于60 mm
工作行程	240 mm \times 120 mm (水平 \times 垂直)

2.2 低温冷却方法

本试验采用液氮浴的方式制冷以保证试验所需的温度环境,液氮具有低沸点(-196 °C)、环境友好等优点,是作为降温传热的首选介质。在试验开始前,将样本从冰箱取出并载入样本模具中,随后填充液氮浸泡使样本降温,在切削过程中,低温环境装置将样本包裹,防止外界水分侵入,同时有效地降低样本与外界的热量交换,为内部样本创建低温干燥环境,减缓样本的温升。

样本低温环境装置如图10所示,低温环境箱采用亚克力透明板材,起环境隔热、隔绝外界水分的同时监测内部切削状态的作用;进氮口连接液氮罐,通过液相阀实现液氮的连续供给或间断供给控制样本温度;挥发的液氮由切削槽口排出,同时排出环境箱中可能存在的空气与水分,保证样本不受环境水汽侵扰;液氮槽保温层采用泡沫棉材质,降低样本与外界环境的换热效率。

为实时监控样本温度,避免上升过高,模拟月壤

在整备过程中,其样本内部插入多只Pt 100温度传感器对温度变化实时监测,同时样本表层贴置环境温度传感器,对样本低温装置环境内温度监测以保证样本和周围环境温差稳定,实时温度变化由无纸记录仪读取,样本温控系统如图11所示。

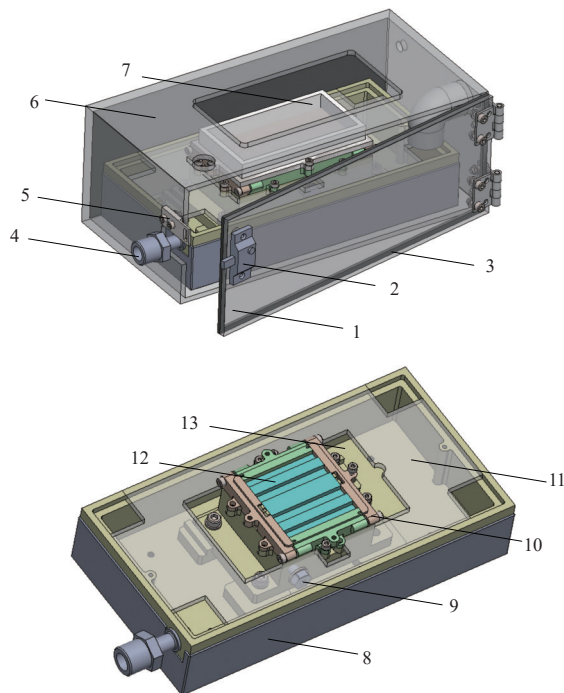


图10 样本温控装置

Fig. 10 Sample temperature control device

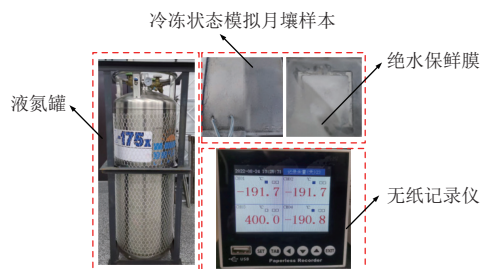


图11 样本温控系统

Fig. 11 Sample temperature control system

2.3 传热仿真分析

低温装置内样本降温及温度保持情况,采用多物理场仿真模拟的方法进行数值模拟分析,为样本真实情况下的降温过程和温度保持过程提供参考依据。

仿真边界条件设置:样本从冰箱取出后,将其放入低温环境箱中,然后填充液氮制冷。液氮在填充过程中会升温挥发,不能完全填满样本模具,因此根据液氮填充所达到的实际高度设定样本模具的液氮浴边

界(恒温边界 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$), 而未被液氮浸泡的部分则通过已冷却部分进行样本内部之间的固体传热。液氮浴边界以外部分为样本模具与环境箱空气直接接触部分, 将其设定为对流换热边界, 通过空气传热。样本从冰箱中拿出之后应迅速浸泡在液氮中, 可以保证很好的冷冻状态, 因此样本初始温度也设定为冰箱温度($-75\sim-80\text{ }^{\circ}\text{C}$), 样本边界条件设定如图12所示。

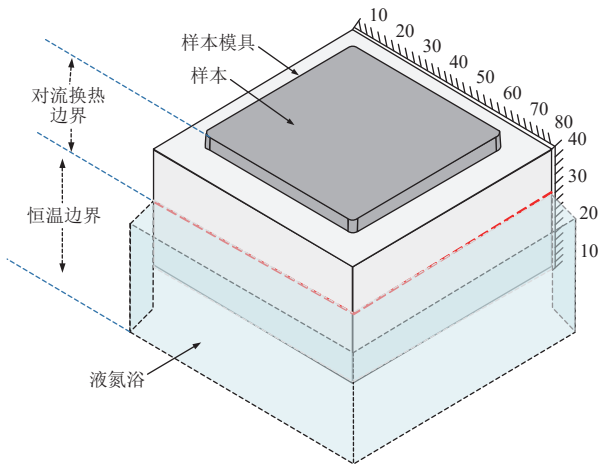


图 12 传热仿真边界条件设置

Fig. 12 Setting of boundary conditions for heat transfer simulation

样本参数设置: 仿真分析过程中使用的样本和环境参数值如表5所示, 其中含冰模拟月壤样本的密度与上文设定值相同。考虑含水率对传热的影响, 含水率低传热效果差, 因此本文采用较低值(5 wt%)进行覆盖性验证, 样本的比热容、导热系数通过瞬态热线法测量获得。

表 5 仿真参数表

Table 5 Simulation parameters

条目	数值	来源
含水率/wt%	5.000	样品制备控制参数
湿密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.900	样品制备控制参数
比热容/ $[\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}]$	228.950	试验测量参数
导热系数/ $[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}]$	0.861	试验测量参数
环境温度/K	293.150	—
环境压强/kPa	101.325	—
样本初始温度/K	198.150	超低温冰箱制冷温度

样本仿真降温曲线如图13所示, 可知在经过1 600 s液氮传热后, 样本逐渐达到热平衡, 此时样本表面温度稳定约为 $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$, 可以说明样本在液氮浸泡的环境下, 整体温度可以保持在低温水平, 同时能够保证样本温度不至于上升过快。样本在进行切削试验时, 样本上表面最高温度可在 $-165\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下, 说明低温装置具有降温、控温的可行性。

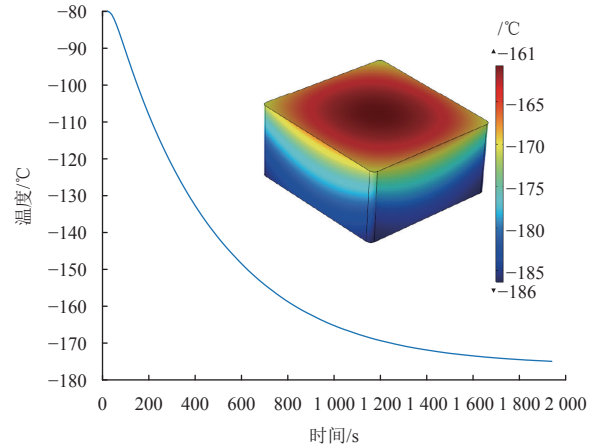


图 13 样本仿真降温曲线

Fig. 13 Sample simulation cooling curve

3 切削试验和结果分析

3.1 试验设置

在探究低温环境下含冰模拟月壤的切削力载特性时, 制备了不同含水率的模拟月壤样本, 测试了不同的切削深度, 并分别在不同温度环境下完成切削试验。试验参数见表6, 在部分试验参数处进行了多次重复试验, 其中试验测试过程如图14所示。将分别讨论各个因素对含冰模拟月壤样本切削力载特性的影响, 并且对不同工况下含冰模拟月壤样本的力载特性进行分析。

表 6 切削试验参数

Table 6 Cutting test parameters

条目	组别
温度/ $^{\circ}\text{C}$	-40 、 -80 、 -120
含水率/wt%	5、10
切削深度/mm	0.5、1、1.5、2、2.5、3

3.2 试验数据和处理方法

切削机具在切削过程中, 切削力载会因切削情况时刻发生波动, 并逐渐出现相对稳定的切削力载峰值波动区间。样本在切削过程中力载的波动是由于大块切屑不是连续生成, 切削力载峰值是在大块切屑形成前达到, 大块切屑崩碎后, 力载则会下降并产生周期性波动^[20-21], 切屑破碎生成过程如图15所示。因此当切削力载与切压力载同时出现并达到峰值, 说明此时的力载数值可以作为当前样本和切削规程下具有代表性的力载反馈结果。将波动区间所有力载峰值取出作为初选集合, 并取出最接近实际工况的峰值作为力载选择点。筛选方法如图16所示。

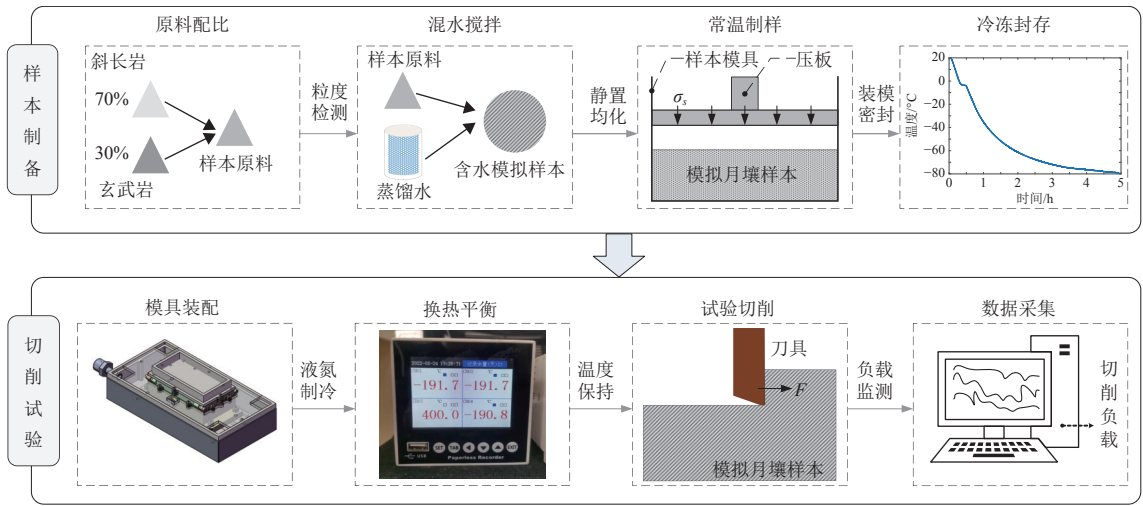


图 14 样本制备及切削力载试验流程

Fig. 14 Sample preparation and cutting force load test procedure

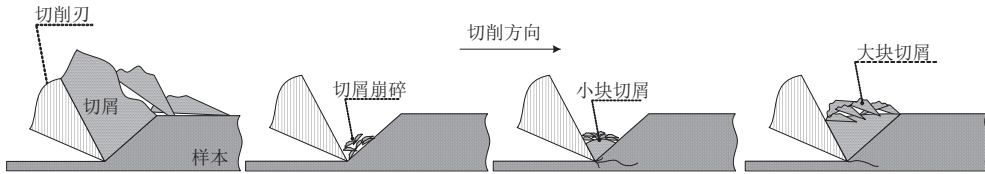


图 15 样本切屑破碎和产生过程

Fig. 15 Sample chip crushing and production process

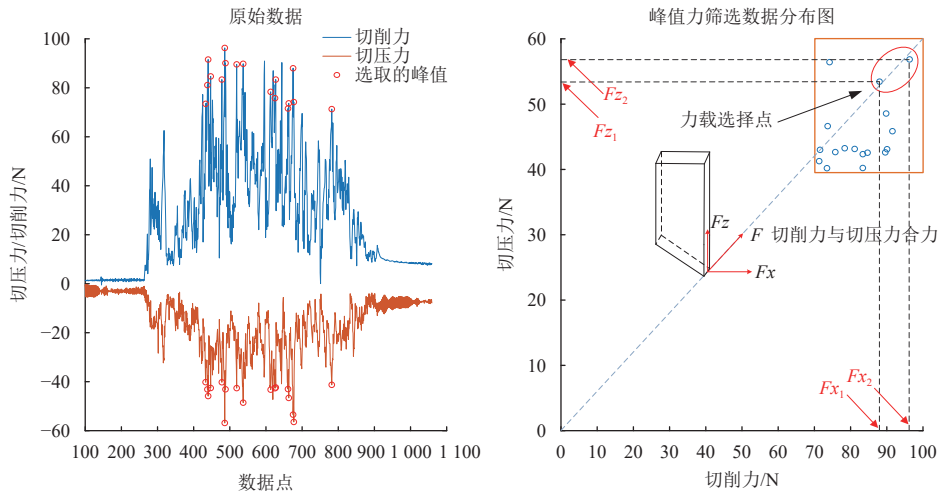


图 16 切削合力峰值力载筛选分布图

Fig. 16 Peak load screening distribution map

3.3 试验结果分析

1) 切削深度对切削力载的影响分析

为研究不同切深对切削力载的影响,对5 wt%的样本进行切削测试,试验过程中采用的切削速度300 mm/min,切削深度0.5~3.0 mm,共6组试验,每组试验重复多次取平均值,不同切削深度对应的切削力载如图17所示,可知试验过程中,随着切削深度的

增加,其切削力载近似呈线性规律增加,在1 mm切深的切削工况下,1 mm²平均受到切削力载15 N,平均切压力载9 N。

2) 温度对切削力载影响

为探究不同温度对切削力载的影响,本试验分别采用5 wt%的样本在-40 °C和-80 °C温度下进行切削试验,以及10 wt%的样本在-80 °C和-120 °C温度下进行

切削试验。如图18可知, 样本初始温度处于24 °C左右的环境温度, 将其放在冰箱进行一级制冷约5 h达到热平衡(-80 °C), 试验开始前, 将样本回温(针对-40 °C切削试验)或将样本浸泡在液氮中二级制冷(针对-80 °C、

-120 °C切削试验), 其中样本升温段为样本与低温环境箱装配操作过程中产生的升温, 后续降温及温升的波动分别为切削试验过程中分次补加液氮制冷和液氮挥发完后回温的过程, 温度曲线如图19所示。

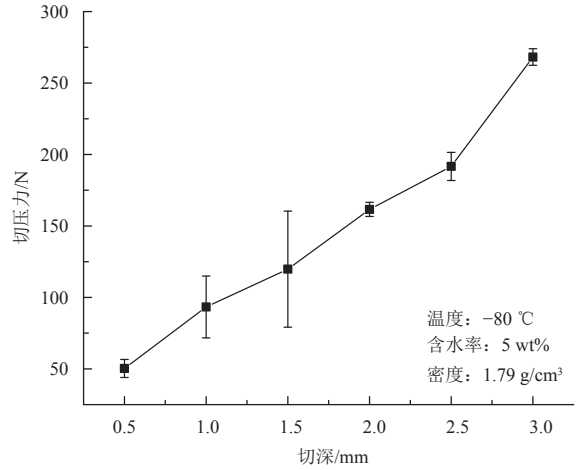
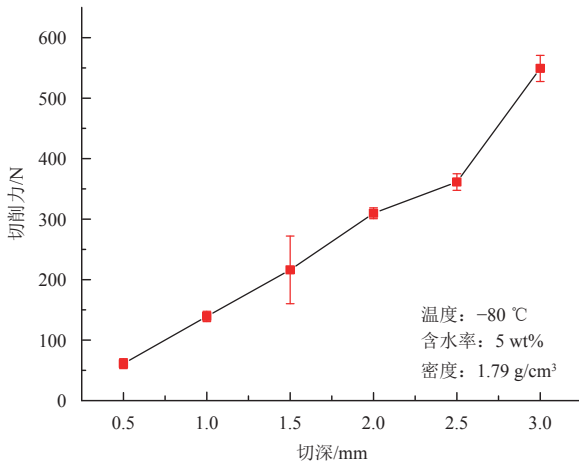
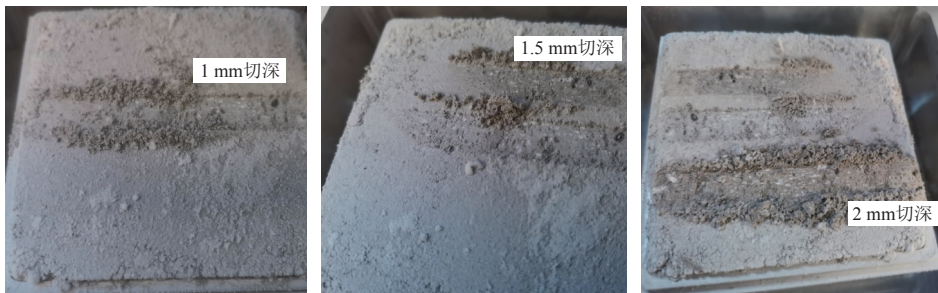


图 17 不同切深切削力载曲线

Fig. 17 Load curve of cutting with different cutting depths



(a) 1 mm切深

(b) 1.5 mm切深

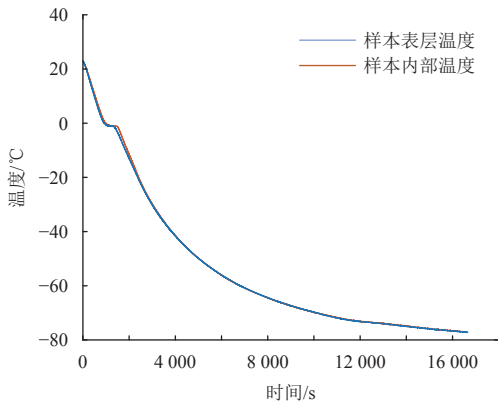
(c) 2 mm切深

图 18 不同切深的样本表面形态

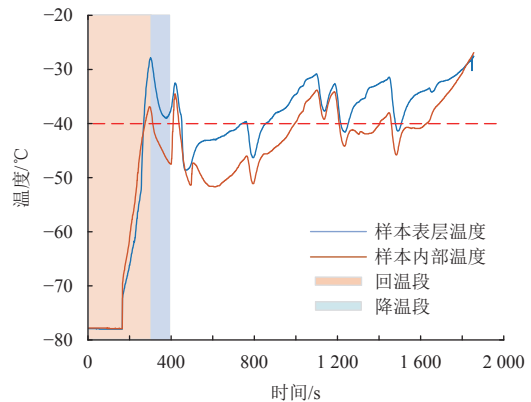
Fig. 18 Surface morphology of samples with different cutting depths

为更精准获得切削力载数据, 试验温度的选取是基于样本含水率对导热的影响, 在所选的温度区间, 样本可维持相对稳定的冻结状态, 并且温度曲线上下波动范围不存在交集, 避免了温度区间重合产生的干扰。试验过程中采用的切削速度300 mm/min, 每组试

验重复多次取平均值, 不同温度对应的切削力载如图20所示, 可知随着温度的降低, 切削力和切压力同步呈现增大的趋势。当在其他因素保持不变的情况下, 随着温度的降低, 样本的冰壤胶结强度增加, 抵抗切削破坏的能力增强, 也促使切削负载增加。



(a) 样本超低温冰箱冷冻温度曲线



(b) -40 °C样本切削试验温度曲线

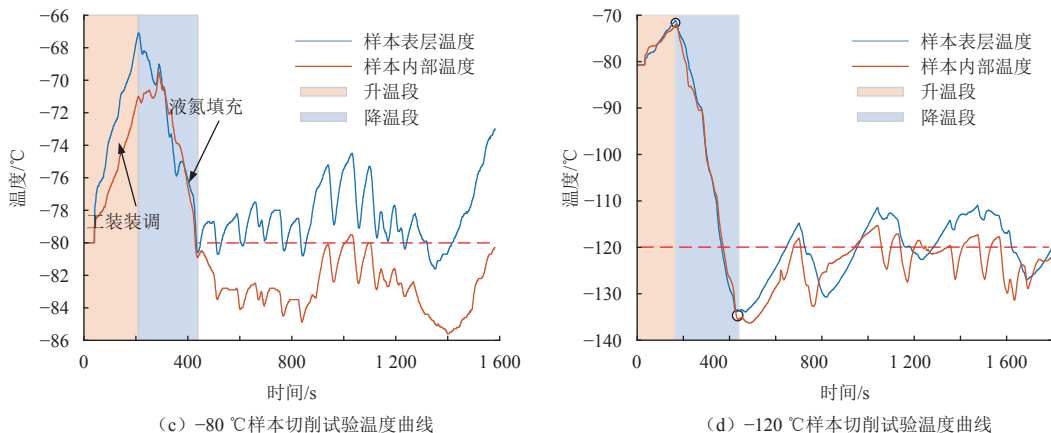


图 19 试验过程样本温度曲线
Fig. 19 Sample cooling process curve

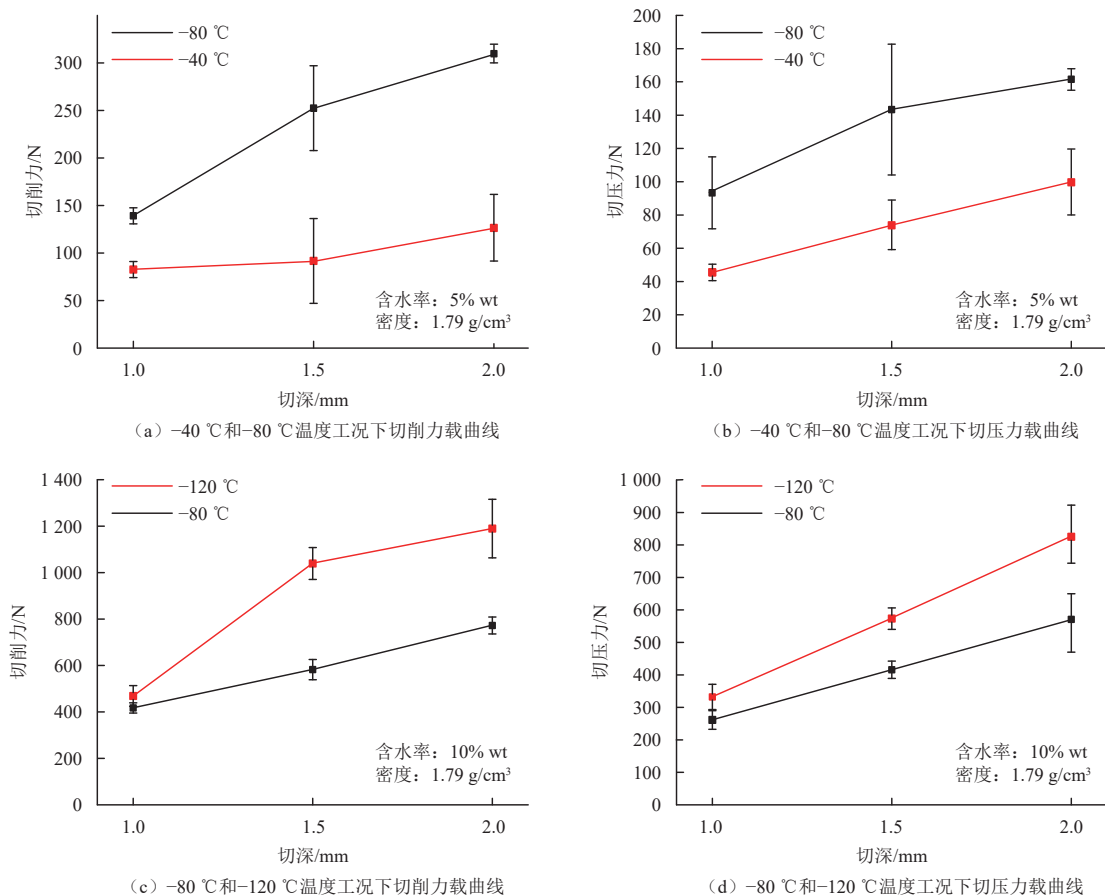


图 20 不同温度切削力载曲线
Fig. 20 Cutting load curves at different temperatures

3) 不同含水率对切削力载的影响分析

为探究不同含水率对切削力载的影响, 对5 wt%、10 wt%模拟月壤样本分别进行切削试验, 试验过程中采用的切削速度300 mm/min, 控制其余变量一致, 多次重复切削取平均值, 其切削力载曲线如

图21所示。由最终的试验结果曲线可知, 切削力载随含水率的增加而显著上升。含水率的增加使样本的冻结强度增加, 并表现出既抗剪又抗压的能力^[22], 因此在相同切削规程下, 切削力载呈现出显著增加的结果。

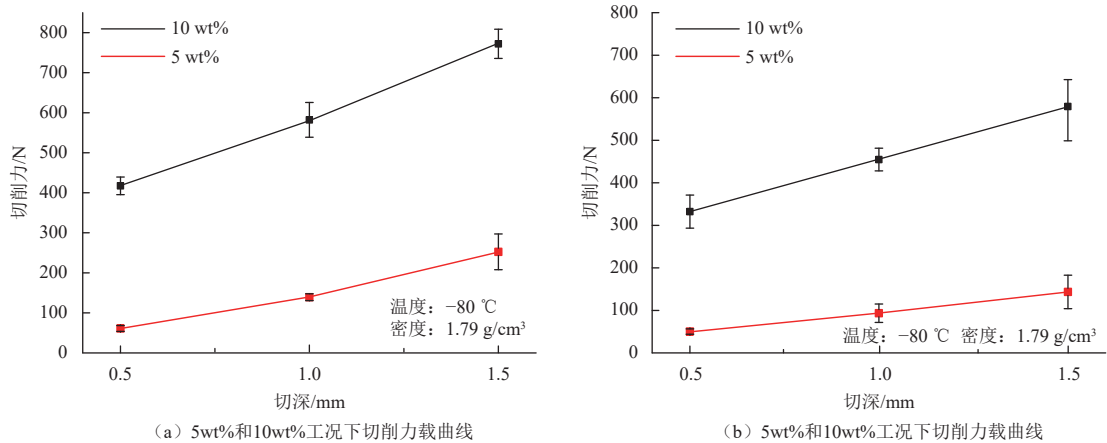


图21 不同含水率切削力载曲线

Fig. 21 Cutting load curves with different water content

4 结论

本文依据极区月壤的物理参数,从矿物成分、颗粒形貌、粒径级配和样本密度等多方面因素综合考虑进行拟实配制,根据月壤特性给出了含冰模拟月壤的制备工艺流程和方法并进行了样本制备;考虑极区深低温环境,首创了能获得深低温的样本切削力载测试装置,并初步开展了切削试验研究,获得如下结论:

1) 制备了与极区月壤具有相似性和等效性的模拟月壤,其原料由70%斜长质与30%玄武质的模拟月壤混配而成,与月球高地型月壤的矿物组分相近,并经激光粒度检测其粒度曲线与NU-LHT-2M型模拟月壤粒度曲线相近;

2) 所研制的低温装置经试验实测和数值仿真分析,可以使模拟月壤样本保持深低温冷却状态,表层温度最高可达 $-165\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,具有对比月球极区低温的可行性;

3) 通过低温切削测试平台开展了不同设置下的切削试验,对于样本的温度和含水率两种参量切削结果显示,相同工况下,随着温度的降低和含水率的增加,切削负载表现出现增大的趋势;对于样本不同切深的切削结果显示,相同工况下,随着切深的增加,同样会出现切削力载增大的趋势,其中单位切深对应的切削力载约15 N,平均切压力载约9 N。

参 考 文 献

- [1] 郑永春,王世杰,刘春茹,等.月球水冰探测进展[J].*地学前缘*,2004,11(2):573-578.
ZHENG Y C, WANG S J, LIU C R, et al. Advances in lunar water ice exploration[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(2): 573-578.
- [2] 何成旦,李亚胜,温智,等.月表水冰探测与赋存形态研究进展[J].*真空与低温*,2021,27(6):589-600.
HE C D, LI Y S, WEN Z, et al. Advances in detection and occurrence

- forms of lunar surface water ice[J]. *Vacuum and Low Temperature*, 2021, 27(6): 589-600.
- [3] NOZETTES, LICHTENBERG L, SPUDIS P, et al. The Clementine bistatic radar experiment[J]. *Science*, 1996, 274(5292): 1495-1498.
- [4] FELDMAN W C, MAURICE S, BINDER A B, et al. Fluxes of fast and epithermal neutrons from Lunar prospector: evidence for water ice at the lunar poles[J]. *Science*, 1998, 281(5382): 1496-500.
- [5] 季节,张伟伟,杨旭,等.月球极区水冰采样探测技术综述[J].*深空探测学报(中英文)*,2022,9(2):101-113.
JI J, ZHANG W W, YANG X, et al. Review of water ice sampling and detection technology in lunar polar region[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2022, 9(2): 101-113.
- [6] LI P, JIANG S Y, TANG D W, et al. Design and testing of coring bits on drilling lunar rock simulant[J]. *Advances in Space Research*, 2017, 59(4): 1057-1076.
- [7] QUICKELBERGHE V F, DAGRAIN F, TSHIBANGU J P, et al. A new procedure to analyse the wear of cutting elements[C]//Eurock 2006: Multiphysics Coupling and Long Term Behaviour in Rock Mechanics. Belgium: [s. n], 2006.
- [8] 唐钧跃,全齐全,姜生元,等.模拟月壤钻进力载建模及试验验证[J].*机械工程学报*,2017,53(7):85-93.
TANG J Y, QUAN Q Q, JIANG S Y, et al. Modeling and experimental verification of drilling load in lunar soil simulation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(7): 85-93.
- [9] 赵德明,姜生元,唐德威,等.月球次表层回环取样钻头构型设计[J].*吉林大学学报(工学版)*,2017,47(4):1149-1158.
ZHAO D M, JIANG S Y, TANG D W, et al. Design of lunar subsurface rotary sampling bit configuration[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2017, 47(4): 1149-1158.
- [10] 崔建国,田野,刘君巍,等.月壤临界尺度颗粒运移特性对钻采阻力影响研究[J].*岩土工程学报*,2021,43(9):1715-1723.
CUI J G, TIAN Y, LIU J W, et al. Influence of particle transport characteristics on drilling resistance of lunar soil at critical Scale[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(9): 1715-1723.
- [11] 谭松成,段隆臣,黄帆,等.模拟月壤螺旋钻进力载特性分析[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2014,41(9):81-84.
TAN S C, DUAN L C, HUANG F, et al. Analysis on load characteristics of simulated lunar soil by auger drilling[J]. *Prospecting Engineering (Rock and Soil Drilling Engineering)*, 2014, 41(9): 81-84.

- [12] LIU J, ZHANG W, TIAN Y, et al. Analysis and prediction of uniaxial compressive strength of icy lunar regolith under extreme temperature[J]. *Advances in Space Research*, 2022, 69(12): 4391-4407.
- [13] 刘德赞, 王露斯, 孙启臣, 等. 月球极区冻土模拟月壤钻进试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(25): 256-261.
LIU D Y, WANG L S, SUN Q C, et al. Research on drilling test of simulated lunar soil in frozen soil of lunar Polar region[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(25): 256-261.
- [14] BASU A, RIEGSECKER S. Modal mineralogic distribution in the regolith at Apollo landing sites[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2000, 105(E2): 4361-4368.
- [15] ZENG X, HE C, WILKINSON A. Geotechnical properties of NT-LHT-2M lunar highland simulant[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2010, 23(4): 213-218.
- [16] 葛坦龙. 极区局部月壤剖面模拟及力学特性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2022.
GE T L. Profile simulation and mechanical characteristics analysis of local lunar soil in polar region[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2022.
- [17] HEIKEN G, VANIMAN D S, FRENCH B M, et al. Lunar sourcebook: a user's guide to the Moon[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
- [18] 李鹏. 月岩取心钻头及其低作用力高效能钻进特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
LI P. Research on moon-rock core bit and its low force and high performance drilling characteristics[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [19] 丁严昊. 螺旋型取芯钻头岩石钻进力载特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
DING Y H. Research on rock drilling load characteristics of helical coring bit[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [20] 史晓萌, 节德刚, 全齐全, 等. 模拟月壤钻进力载分析与试验研究[J]. *宇航学报*, 2014, 35(6): 648-656.
SHI X M, JIE D G, QUAN Q Q, et al. Analysis and experimental study on drilling load of lunar soil simulation[J]. *Acta Astronautica Sinica*, 2014, 35(6): 648-656.
- [21] 刘君巍, 汪恩良, 田野, 等. 月壤水冰组构模拟及力学特性测试分析[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2022, 9(2): 134-140.
LIU J W, WANG E L, TIAN Y, et al. Simulation and mechanical analysis of lunar soil water ice[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2022, 9(2): 134-140.
- [22] 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, 9(11): 2052-2060.
QUAN Q Q, SHI X M, TANG D W, et al. Simulation on soil drilling sampling quantity influence factors analysis and experimental study[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 9(11): 2052-2060.

作者简介:

赵宇(1998-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 地外天体采样探测。

通讯地址: 哈尔滨市松北区学海街1号(150028)

E-mail: zy544927297@163.com

张伟伟(1988-), 男, 副研究员, 主要研究方向: 星球采样探测机构设计与操控, 星壤物质原位物性触探技术。本文通讯作者。

通讯地址: 哈尔滨市南岗区一匡街2号哈尔滨工业大学科学园科创大厦(150001)

E-mail: zweier@hit.edu.cn

Experimental Study on Cutting Load of Simulated Lunar Soil Containing Ice

ZHAO Yu¹, JI Jie², TIAN Ye¹, DUAN Zhangqing¹, ZHANG Weiwei³

(1. Light Industry College of Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China;

2. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;

3. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The fourth phase of the lunar exploration project is planning to carry out lunar soil water ice drilling mission in the permanently shadowed area of the south pole of the Moon. It is of great significance to obtain the mechanical-soil mechanical properties of soil water ice in the deep low temperature environment for the development of mining and exploration tools. Facing the new research object of lunar soil water ice, simulated lunar soil with similar mineral composition and particle size to polar lunar soil water ice was prepared in this paper for cutting test. The liquid nitrogen bath cutting load test platform was first developed and the cutting test conditions of deep-low temperature lunar soil water ice simulators were established. On this basis, the cutting load tests of lunar soil water ice simulators were carried out. The cutting load data under different cutting depth, different sample temperatures and different sample water content were obtained, which can provide reference for the development of drilling sampling machine.

Keywords: lunar polar region; simulated lunar soil containing ice; low temperature platform; cutting test

Highlights:

- The simulated lunar soil of highland type in lunar polar region was developed.
- A straight-line cutting platform for lunar soil containing ice in low temperature environment in polar region was developed.
- The cutting tests under different working conditions were carried out and the load characteristics of cutting force were obtained.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 宋利辉]