



## 月壤水冰组构模拟及力学特性测试分析

刘君巍, 汪恩良, 田野, 刘兴超, 唐亮, 崔江磊, 陶立军, 葛坦龙, 卢孜筱, 张伟伟, 唐钧跃, 姜生元

### Fabric Simulation and Mechanical Characteristics Test and Analysis of Icy Lunar Regolith

LIU Junwei, WANG Enliang, TIAN Ye, LIU Xingchao, TANG Liang, CUI Jianglei, TAO Lijun, GE Tanlong, LU Zixiao, ZHANG Weiwei, TANG Junyue, and JIANG Shengyuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20210153>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 着陆器足垫冲击月壤动态行为离散元仿真分析

Simulation Analysis of Dynamic Behavior of Lander Footpad Impact on Lunar Regolith

深空探测学报(中英文) . 2020, 7(2): 171-177

#### 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

#### 月球水冰探测

Lunar Water-Ice Exploration

深空探测学报(中英文) . 2020, 7(3): 290-296

#### 基于颗粒单向流动效应的手持式月壤取心装置设计

Design of Handheld Corer for Lunar Regolith Based on Particle Directional Flow Method

深空探测学报(中英文) . 2020, 7(2): 164-170

#### 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

#### 月球浅层月壤螺旋钻具进芯机制设计

Design of Coring Dynamics with Shallow Loose Lunar Regolith

深空探测学报(中英文) . 2021, 8(3): 252-258



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

# 月壤水冰组构模拟及力学特性测试分析

刘君巍<sup>1</sup>, 汪恩良<sup>2</sup>, 田野<sup>3</sup>, 刘兴超<sup>2</sup>, 唐亮<sup>4</sup>, 崔江磊<sup>1</sup>, 陶立军<sup>1</sup>, 葛坦龙<sup>3</sup>, 卢孜筱<sup>5</sup>,  
张伟伟<sup>1</sup>, 唐钧跃<sup>1</sup>, 姜生元<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨 150001; 2. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150001;  
3. 哈尔滨商业大学轻工学院, 哈尔滨 150001; 4. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 哈尔滨 150001; 5. 国家纳米科学中心, 北京 100190)

**摘要:** 针对月球遥感探测无法获知月壤水冰物理力学特性的定量信息, 分析了月壤水冰采样探测与原位利用的技术难点, 提出一种基于“相似性、等效性、均一性与覆盖性”的月壤水冰组构模拟方法, 并在月面极区拟实温度环境下开展抗剪强度与泊松比测试, 获得温度与含水率对月壤水冰力学特性的影响规律, 得到了在特定条件下月壤水冰抗剪强度与泊松比的包络范围, 可为月壤水冰原位探测与利用相关载荷的研发提供设计依据。

**关键词:** 月壤水冰; 组构模拟; 模拟准则; 抗剪强度; 泊松比

**中图分类号:** V476.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-9287(2022)02-0134-07

**DOI:** 10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20210153

**引用格式:** 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.

**Reference format:** LIU J W, WANG E L, TIAN Y, et al. Fabric simulation and mechanical characteristics test and analysis of icy lunar regolith[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(2): 134-140.

## 引言

自1961年Watson等<sup>[1]</sup>首次提出月球上存在水冰的可能性以来, 美国国家航空航天局(National Aeronautics Space and Administration, NASA)、欧洲航天局(European Space Agency, ESA)、日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace eXploration Agency, JAXA)等通过地基遥感、星载遥感和探地雷达等多种手段开展了月球水冰物质的科学探测, 对月球水冰物质的来源、赋存状态、存在环境及广域分布情况有了初步的认知<sup>[2]</sup>。但受遥感探测原理制约及表层星壤对信号的干扰和损耗等因素的影响, 采用光谱仪、中子谱仪、雷达等遥感探测等手段获得的水冰分布和储量估算数据误差较大, 且无法准确获得水冰物质纵深剖面的分布特性, 因此目前人们对月球水冰物质的认知还只是“冰山一角”<sup>[3]</sup>。为进一步了解月球水冰的纵深剖面分布特性, 目前各国科研机构正积极开展月壤水冰的纵深剖面潜入式探测的预先研究工作。

根据现有的探测结果可知, 月壤水冰大概率是在极端低温、真空条件下月壤基质与水冰物质组成的冰-壤胶结态组构, 其物理力学特性与月壤矿物成分、含

水率、温度及密度等参数具有强相关特征。月壤水冰物质主要存在于月表一定深度下<sup>[4-7]</sup>, 若想实现原位探测, 探测机具须具备与之相适应的剖面潜入能力, 且具有良好的剖面潜入作业性能和地面可验证条件<sup>[8]</sup>。在潜入探测机具设计阶段, 月壤水冰物质的物理力学特性是一项重要的设计准则。在潜入机具地面试验验证阶段, 具有与真实月壤水冰高度拟实的模拟样本这一试验对象是该阶段的必要条件。

NASA和ESA在开展相关研究时, 大多以地面冻土的制备方法制备月壤水冰试验样本<sup>[8-13]</sup>, 但因月壤水冰物质的形成与演化机制与地面冻土存在明显的差异, 在月壤水冰模拟样本制备的过程中, 很难保证预制的样本与真实月壤水冰的矿物类别及化学组分的相似性、力热电等综合物性的等效性, 同时也很难保证模拟物中水分分布的均一性<sup>[14-16]</sup>。然而模拟样本与真实月壤水冰的相似度与等效度直接影响潜入机具设计校核与地面试验验证的可信度, 甚至决定着探测任务的成败。本文首先开展了月壤水冰组构模拟, 随后以月壤水冰的抗剪强度与泊松比作为切入点探究月壤水冰的力学特性。

# 1 月壤水冰组构模拟

## 1.1 模拟准则与要素

月壤水冰赋存于极端低温和真空的条件下，其物理形态大概率率为月壤颗粒与冰膜组成的胶结态组构。在地面环境下对真实月壤水冰进行模拟，难点和关键点：①月壤基材矿物和形态的相似性；②冰壤胶结状态的相似性；③极端低温（30 ~ 40 K）条件的覆盖性；④短时加速制冷过程组构裂纹等缺陷的合理防控及无效样本甄别。针对以上难点与关键点，面向月球极区探测的工程需求，本文提出“相似性、等效性、覆盖性与均一性”的制备准则，并从基础原料、样本参数及环境特征3个维度确定组构模拟的基本要素，如图1所示。

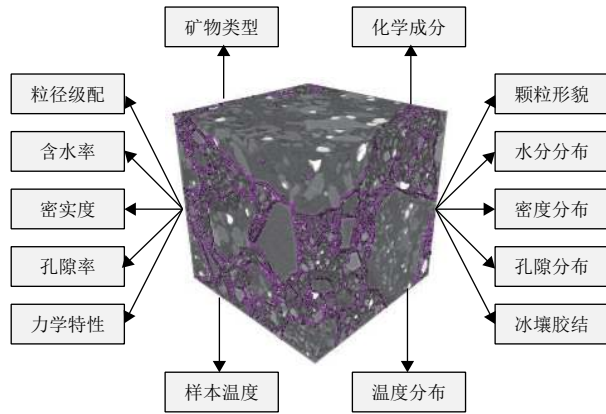


图 1 月壤水冰组构模拟基本要素

Fig. 1 The basic elements of lunar icy regolith fabric simulation

相似性指月壤水冰模拟物与真实物之间在赋存环境温度、冰-壤粘聚状态、月壤基材矿物和颗粒特性方面要有较好的相似性，需在制备方案和工艺路线中予以保证。等效性指月壤水冰模拟样本的力学、热学、电学等基础物性与真实月壤水冰的相关特性具有等效性，需要在组构、环境、测试方法方面予以保证。覆盖性指真实月壤水冰特性虽具有可预判性，但其矿物组分、颗粒形态、密实度、含水率等方面均具有随机性和离散性。为此，月壤水冰模拟样本在制备过程中，矿物类别、颗粒形态、含水率、密实度、温度等均需按照多组元、多参数方式进行工况规划，以获得力学苛刻度最上限和物性包络参数。均一性主要针对样本的组构而言，包括含水率、密度、温度等参数在样本宏观尺度上的均一。针对“相似性、等效性、覆盖性与均一性”制备准则提出具体量化评价指标，可参照表1所示。

表 1 月壤水冰模拟样本评价指标参数表

Table 1 Evaluation index parameters of the simulated samples of icy lunar regolith

评价维度	评价指标	指标符号
U <sub>1</sub> : 相似度	u <sub>11</sub> : 矿物化学组分	C <sub>m</sub>
	u <sub>12</sub> : 颗粒形貌	M <sub>p</sub>
	u <sub>13</sub> : 颗粒密度	D <sub>p</sub>
	u <sub>14</sub> : 粒径分布	D <sub>s</sub>
	u <sub>15</sub> : 样本温度	T <sub>s</sub>
	u <sub>16</sub> : 样本密度	D <sub>s</sub>
	u <sub>17</sub> : 样本孔隙比	e <sub>s</sub>
	u <sub>18</sub> : 样本含水率	wt%
	u <sub>19</sub> : 冰-壤粘聚状态	S <sub>c</sub>
U <sub>2</sub> : 等效度	u <sub>21</sub> : 力学特性	P <sub>m</sub>
	u <sub>22</sub> : 热学特性	P <sub>t</sub>
	u <sub>23</sub> : 电学特性	P <sub>e</sub>
U <sub>3</sub> : 均一度	U <sub>31</sub> : 温度分布	D <sub>T</sub>
	U <sub>32</sub> : 密度分布	D <sub>d</sub>
	U <sub>33</sub> : 水分分布	D <sub>w</sub>
	U <sub>34</sub> : 孔隙分布	D <sub>h</sub>
	U <sub>35</sub> : 粒度分布	D <sub>φ</sub>
U <sub>4</sub> : 覆盖度	U <sub>41</sub> : 含水率范围	R <sub>w</sub>
	U <sub>42</sub> : 温度范围	R <sub>T</sub>
	U <sub>43</sub> : 密度范围	R <sub>D</sub>
	U <sub>44</sub> : 孔隙范围	R <sub>h</sub>

## 1.2 模拟方法

本文继承了团队在“嫦娥五号”月壤钻探任务中模拟月壤制备方面的研究基础，借鉴地面冻土模拟样本制备的经验，充分考虑月壤水冰的形成演化机制及其与地面冻土在来源和组成上的差异，从组构混配、胚样制备和低温样本制备3个阶段展开样本组构模拟研究。

### 1) 组构混配

开始组构混配前，先对月壤水冰科学探测数据计算，并对月壤水冰目标特性、地-月差异、物性影响因素进行分析，结合地面工程条件，确定月壤水冰模拟物的制备准则。根据组构相似性、参数覆盖性、结构均一性的制备准则，筛选不同化学组分、矿物类别、颗粒形貌、粒径大小、级配关系的模拟月壤基础原料和不同纯净度的水、冰沙或蒸汽。将基础原料与不同颗粒粒径的水（液态、固态或气态）在特定环境下按比例配制。配比完成后，采用机械物理搅拌、温控驱动等方式保证样本原料的混合均匀。具体选用何种方

式及工艺参数进行组构混配, 需要根据目标物的参数进行甄选与动态调控。本文主要以未饱和与饱和样本为研究对象, 采用液态水与干燥模拟月壤混合的方式进行混配。针对少量样本, 分批次向自封袋中加入烘干后的模拟月壤, 并利用喷水壶分批向其均匀喷水。完成每批次的工作后, 将自封袋封好, 将袋内的模拟月壤和水充分混合, 直至模拟月壤颜色比较均匀且无结块, 样品全部混合完成后将自封袋密封好。针对样本量大的特点, 采用分批次分层铺洒的方式, 利用喷水壶将水喷洒在箱子中的模拟月壤上, 借助搅拌器充分搅拌, 直至模拟月壤的颜色分布比较均匀且无结块。随后将样品置于室温条件下静置24 h, 利用水分自由迁移扩散的原理, 保证样品中水分均匀分布。

### 2) 胚样制备

因为开展不同测试验证所需要的样本规格尺寸存在很大的差异, 所以在胚样制备阶段需要设计不同尺寸的制样模具和辅助工装, 以满足实际测试需要。为能够动态、准确地监测制备全流程月壤水冰模拟物的温度变化, 在制备测试样本时制备一个相同参数的模拟样本, 称为“陪件”, 并沿其径向和纵深方向布置温度传感器, 用陪件的温度数据表示待测试样本当前温度状态。传感器布置完成后, 选择分层制样或整体制样方式, 利用落锤冲击、三维振夯等方式实现样本密实度调控。

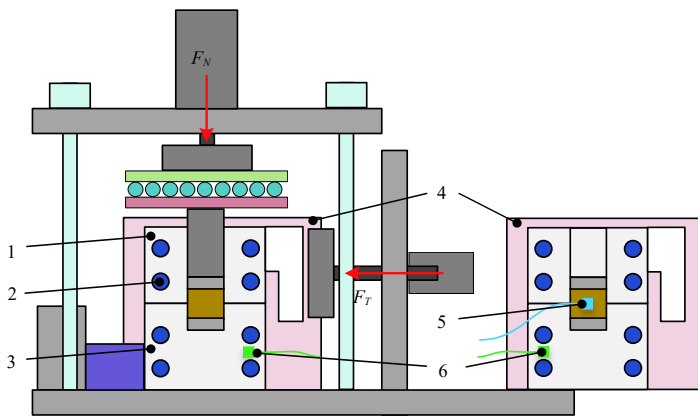
### 3) 低温样本制备

经过振夯压实后, 将测试样本与陪件一同转移至特定的冷冻工装中, 在冷冻工装中可以设定不同的目标温度、围压及边界约束。冷冻过程分为3步, 首先在

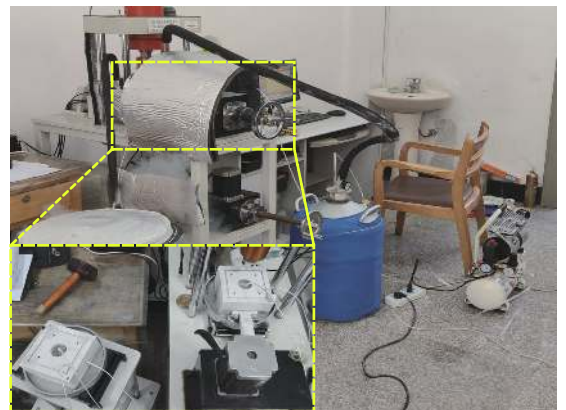
超低温冰箱中将样本由室温冷冻至 $-80^{\circ}\text{C}$ 并保温12 h; 随后利用液氮将样本从 $-80^{\circ}\text{C}$ 逐渐缓慢降温至 $-196^{\circ}\text{C}$ ; 最后利用液氮将样本从 $-196^{\circ}\text{C}$ 降温至 $-240^{\circ}\text{C}$ 。在样本冷冻的过程中, 需要实时调控深低温环境预置规程, 以期尽量降低冷冻过程对样本组构相似性和结构均一性带来的影响。最后, 将冷冻完成的样本转移至测试工位。在转运过程中, 要特别注意匹配真空、低温与气氛环境, 保证样本的组构特征不受破坏。

## 2 力学测试平台

根据库伦定律, 月壤水冰模拟样本的内摩擦力与剪切面上的法向压力成正比, 分别在不同的法向压力下, 沿固定的剪切面直接施加水平力, 当样本产生剪切破坏时, 剪应力是水平力与土样横截面积的比值, 即该样本的抗剪强度。剪切强度是月壤水冰模拟样本剪断时产生的极限强度, 反映了样本抗剪切滑动的能力。通过改变样本的温度、相对密实度和含水率等参数, 测得模拟样本的抗剪强度, 为探测机具的设计负载提供参考。本试验所用的仪器设备图2所示, 包括DSZ-20往复直剪仪、样本冷冻装置、PT100温度传感器与采集平台, 符合《土工试验方法标准》中122页“直接剪切试验”的有关要求, 可以进行常规和低温环境下的抗剪试验测试。DSZ-020往复直剪仪可用于测定试样的抗剪参数, 竖向加载液压机可对样本施加不同的竖向压力, 通过液压伺服控制匀速施加剪切应变进行土样剪切, 利用位移传感器与压力传感器进行试样的剪切位移与剪切应力的测量<sup>[13]</sup>。



(a) 结构示意图



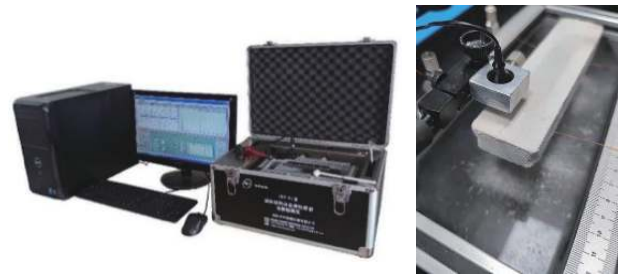
(b) 实物图

注: 1—上剪切盒; 2—温控循环管路; 3—下剪切盒; 4—保温装置; 5—陪件温度监测传感器; 6—测试环境温度监测传感器

图2 直剪试验方案及设备

Fig. 2 Direct shear test plan and equipment

泊松比是反映月壤水冰模拟样本横向变形特性的重要参数。本文基于脉冲激振法，利用动态弹性模量测量仪开展不同含水率、温度、密度的样本的泊松比测试。该平台包括弹性模量测量仪、样本冷冻装置、声表面波（Surface Acoustic Wave, SAW）温度测量与采集平台。采用IET型混凝土动态弹性模量测试仪，该试验装置如图3所示，通过对月壤水冰模拟样本施加机械敲击来激发样本，同时利用传感器获得样本的纵向或者弯曲振动时的固有共振频率，进而获得样本的杨氏模量、剪切模量及泊松比等力学特征信息。



(a) 弹性模量测试仪

(b) 测试样本及测试过程

图 3 泊松比测试平台

Fig. 3 Poisson's ratio test platform

### 3 力学特性测试与分析

#### 3.1 抗剪强度

待样本完成冷冻后，将测试样本、配件及剪切盒同时从液氮环境中取出并放置于测试平台上，快速装配剪切盒体与待测试样。同时将配件装入与试验台剪切盒一样的工装里面，保证配件与待测试样温度变化完全一致，以便准确获知测试样本的温度情况。快速设置试验方案和应力路径并将位移清零，施加垂直压力，立即拔去固定销。试验选用10 mm/min作为测试时的加载速率，记录试验过程中样本的变化，直至样本完成破坏记录试验数据。待试样开展直剪切试验被压溃后，选取样本的不同位置，利用烘干法测定样本的

含水率，检测样本含水率是否均一。

本文选用“嫦娥五号”地面钻取试验验证用模拟月壤为基础原料<sup>[17]</sup>，制备含水率11.1 wt%，干密度1.76 g/cm<sup>3</sup>，温度在-80°C ~ -160°C区间的月壤水冰模拟样本，并在不同垂直压力下对其开展抗剪强度测试。以抗剪强度为纵坐标，垂直压力为横坐标，绘制抗剪强度与垂直压力关系曲线，如图4所示。直线的倾角为月壤水冰模拟样本的内摩擦角，直线在纵坐标上的截距为样本的内聚力，汇总结果如表2所示。

根据表2的试验结果可知，含水率11.1 wt%，密度1.76 g/cm<sup>3</sup>的月壤水冰模拟样本，在-160°C ~ -80°C温度范围内，样本的内聚力大致在5 ~ 6.5 MPa之间，内摩擦角大致在35° ~ 39.5°之间。

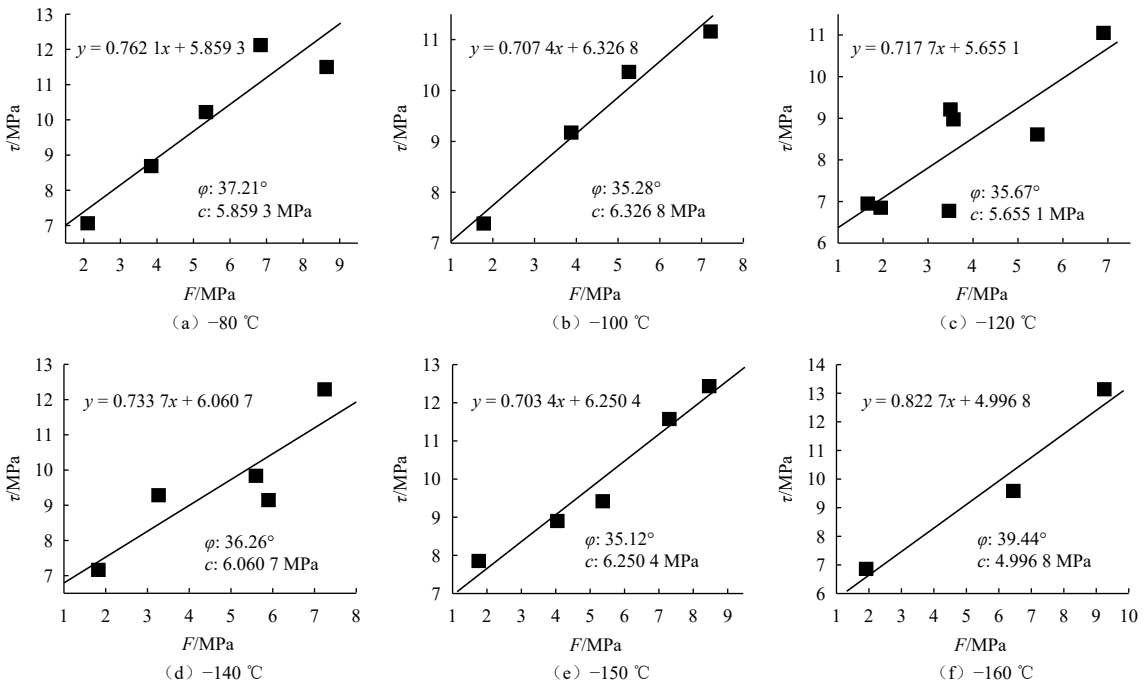


图 4 不同温度下抗剪强度与垂直压力的关系

Fig. 4 Shear strength and vertical pressure at different temperatures

表2 不同温度样本的抗剪强度参数

Table 2 Shear strength parameters of samples at different temperatures

样本温度 $T/^\circ\text{C}$	内聚力 $c/\text{MPa}$	内摩擦角 $\phi/^\circ$
-160	5.00	39.44
-150	6.25	35.12
-140	6.06	36.26
-120	5.66	35.67
-100	6.33	35.28
-80	5.86	37.21

### 3.2 泊松比

本文用于泊松比测试样本的尺寸为 $160\text{ mm}\times 40\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ , 样本参数如表3所示。根据试验结果对样本的泊松比进行影响因素分析, 并确定月壤水冰泊松比参数包络。

表3 泊松比测试试验参数表

Table 3 Poisson's ratio test experiment parameter table

名称	参数
基础原料	玄武岩质模拟月壤、斜长岩质模拟月壤及二者混配
相对密度/%	99、85、75
含水率/wt%	5、10及饱和
样本温度/ $^\circ\text{C}$	-180 ~ -80

在饱和含水率、99%相对密度条件下, 不同基础原料类别的样本的泊松比测试结果如图5所示。从图5中可以看出, 在该条件下, 基础原料类型对月壤水冰模拟样本的泊松比影响不大; 同时, 在该条件下, 月壤水冰模拟样本的泊松比在 $-180^\circ\text{C}\sim -80^\circ\text{C}$ 区间的变化不大, 均在 $0.165\sim 0.17$ 的范围内波动。

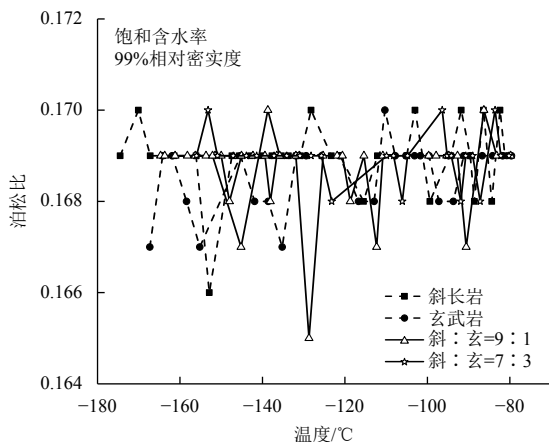


图5 月壤水冰模拟样本的泊松比随温度变化情况

Fig. 5 Changes of Poisson's ratio of lunar icy regolith simulated samples with temperature

在99%相对密度条件下, 由斜长岩模拟月壤制备的不同含水率样本的泊松比随温度的变化如图6所

示。从图6中可以看出, 在该条件下, 泊松比随含水率的升高而降低; 在含水率为5 wt%和10 wt%条件下, 泊松比随温度的升高而下降。

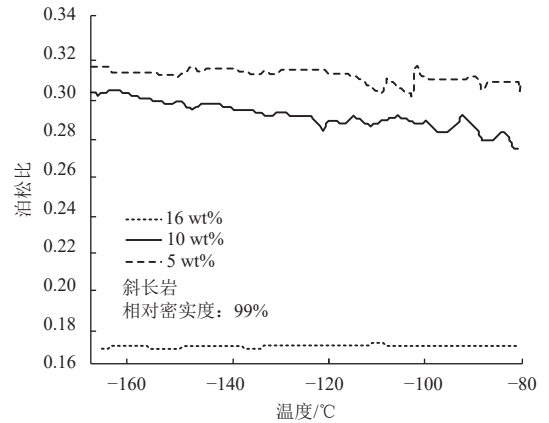


图6 不同含水率模拟样本的泊松比随温度的变化

Fig. 6 Poisson's ratio of simulated samples with different moisture content changes with temperature

通过以上分析可知, 基础原料类型对月壤水冰模拟样本的泊松比影响不大, 泊松比随着含水率的升高而减小。由斜长岩模拟月壤制备的相对密度99%的月壤水冰模拟样本的泊松比范围在 $0.16\sim 0.32$ 之间。

## 4 结论

本文通过对月壤水冰组构模拟已有技术案例的调研分析, 提出了一种以“相似性、等效性、均一性和覆盖性”为目标的模拟准则, 并给出样本制备各阶段应注意的核心问题与难点。以抗剪强度与泊松比为切入点, 开展了月壤水冰模拟样本力学特性测试研究。获得了月壤水冰模拟样本的内聚力、内摩擦角及泊松比的参数包络范围及这些参数随样本温度的变化规律, 可为月壤水冰原位潜入式探测机具的设计提供依据。

## 参考文献

- [1] WATSON K, BRUCE C M, BROWN H. The behavior of volatiles on the lunar surface[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1961, 66(9): 3033-3045.
- [2] 陈丰, 李雄耀, 唐红, 等. 水(冰): 宇宙矿物[J]. *矿物学报*, 2015, 35(2): 255-266.  
CHEN F, LI X Y, TANG H, et al. Water ice: cosmic mineral[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2015, 35(2): 255-266.
- [3] LI S, LUCEY P G, MILLIKEN R E, et al. Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(36): 8907-8912.
- [4] ANAND M. Lunar water: a brief review[J]. *Earth, Moon, and Planets*, 2010, 107(1): 65-73.

- [5] BARNES J J, TARTÈSE R, MAHESH ANAND M, et al. The origin of water in the primitive Moon as revealed by the lunar highlands samples[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 390: 244-252.
- [6] HURLEY D, BLEWETT D T, CAHILL J, et al. Mission to characterize volatiles in old, cold, permanently shadowed regions on the Moon[J]. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 2021, 53(4): 365.
- [7] JOSHI D, EUSTES A W, ROSTAMI J, et al. Material characterization while drilling on the Moon: comparing the atmospheric and cryogenic drilling data[C]//51st Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands, Texas: LPI, 2020.
- [8] CRAIG P, NOTBERT K, OTTO L, et al. Investigation of the properties of icy lunar polar regolith simulants[J]. *Advances in Space Research*, 2016, 57(5): 1197-1208.
- [9] KLEINHENZ J, LINNE D. Preparation of a frozen regolith simulant bed for ISRU component testing in a vacuum chamber[C]//51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Cleveland, Ohio: AIAA, 2013.
- [10] GERTSCH L S, ROSTAMI J, GUSTAFSON R. Review of lunar regolith properties for design of low power lunar excavators[C]//6th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. Arlington, VA: Missouri University of Science and Technology, 2008.
- [11] ATKINSON J, ZACNY K. Mechanical properties of icy lunar regolith: application to ISRU on the Moon and Mars[C]//Earth and Space 2018: Engineering for Extreme Environments. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2018.
- [12] FISACKERLY R, CARPENTER J, VISENTIN G, et al. Accessing, drilling and operating at the lunar south pole: Status of European plans and activities[C]//Earth and Space 2014. Missouri: American Society of Civil Engineers, 2014.
- [13] 聂众. 冻融循环作用下膨胀土长期性能试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.  
NIE Z. Experimental investigation on the long-term properties of expansive soils subjected to freeze-thaw cycling[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [14] JUST G H, JOY K H, ROY M J, et al. Geotechnical characterisation of two new low-fidelity lunar regolith analogues (UoM-B and UoM-W) for use in large-scale engineering experiments[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 173: 414-424.
- [15] ANBAZHAGAN S, VENUGOPAL I, ARIVAZHAGAN S, et al. A lunar soil simulant (LSS-ISAC-1) for the lunar exploration programme of the Indian space research organisation[J]. *Icarus*, 2021, 366: 114511.
- [16] VENUGOPAL I, PRABU T, MUTHUKKUMARAN K, et al. Development of a novel lunar highland soil simulant (LSS-ISAC-1) and its geotechnical properties for Chandrayaan missions[J]. *Planetary and Space*, 2020, 194: 105116.
- [17] QUAN Q Q, TANG J Y, YUAN F P, et al. Drilling load modeling and validation based on the filling rate of auger flute in planetary sampling[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2017, 30(1): 434-446.

作者简介:

**刘君巍**(1996-), 男, 博士生, 主要研究方向: 月壤水冰模拟及其宏观力学特性分析。

通讯地址: 哈尔滨工业大学科学园科创大厦(150001)

电话: 18603662382

E-mail: 18603662382@163.com

**姜生元**(1969-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 地外天体采样探测、星表智能作业机器人、宇航空间机构及控制。**本文通讯作者。**

通讯地址: 哈尔滨工业大学科学园科创大厦(150001)

电话: 13796621169

E-mail: jiangshy@hit.edu.cn

## Fabric Simulation and Mechanical Characteristics Test and Analysis of Icy Lunar Regolith

LIU Junwei<sup>1</sup>, WANG Enliang<sup>2</sup>, TIAN Ye<sup>3</sup>, LIU Xingchao<sup>2</sup>, TANG Liang<sup>4</sup>, CUI Jianglei<sup>1</sup>, TAO Lijun<sup>1</sup>,  
GE Tanlong<sup>3</sup>, LU Zixiao<sup>5</sup>, ZHANG Weiwei<sup>1</sup>, TANG Junyue<sup>1</sup>, JIANG Shengyuan<sup>1</sup>

(1. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150001, China;

3. Light Industry College, Harbin University of Commerce, Harbin 150001, China;

4. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

5. The National Center for Nanoscience and Technology, Beijing 100190, China)

**Abstract:** The remote sensing of the moon proved that water ice exists in its permanently shadowed regions, which further stimulated people's enthusiasm for the construction of lunar bases and in-situ resource utilization. However, remote sensing detection cannot obtain quantitative information about the physical and mechanical properties of icy lunar regolith, which brings challenges to the development of water ice sampling and detection and in-situ utilization. Aiming at this problem, this paper proposes a method to simulate the structure of icy lunar regolith based on "similarity, equivalence, homogeneity and coverage". Tests of shear strength and Poisson's ratio were carried out under realistic temperature environment in polar regions to obtain the influence of temperature and water content on the mechanical properties of icy regolith. At the same time, the envelope range of icy regolith shear strength and Poisson's ratio is obtained under specific conditions. The results provide an basis for designing lunar water ice in-situ submerged detection equipment.

**Keywords:** icy lunar regolith; fabric simulation; simulation criterion; shear strength; Poisson's ratio

### Highlights:

- The paper proposes a highly realistic simulation method of lunar soil water ice fabric.
- We carry out the mechanical characteristics test of the icy lunar regolith simulant in the extremely low temperature environment.
- Obtain the range and change law of mechanical parameters such as the shear characteristics and Poisson's ratio of the sample icy lunar regolith.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 刘勇]