

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0112

HE Chengdan, LI Yasheng, WEN Zhi, et al. Study on physical and mechanical properties of frozen simulated lunar soil in lunar polar region [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(6):1773-1781. [何成旦, 李亚胜, 温智, 等. 月球极区冻结模拟月壤物理力学特性研究 [J]. 冰川冻土, 2021, 43(6):1773-1781.]

## 月球极区冻结模拟月壤物理力学特性研究

何成旦<sup>1</sup>, 李亚胜<sup>2,3</sup>, 温智<sup>2</sup>, 王永瑞<sup>2,3</sup>, 张霄<sup>1</sup>,  
金龙<sup>1</sup>, 殷子涵<sup>1</sup>, 权素君<sup>1</sup>

(1. 兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 近年来越来越多的探测结果表明, 月球极区永久阴影区月壤中存在水冰。水是人类赖以生存的化学物质, 也是理解月球独特的形成与演化过程的关键环节。因此, 各航天大国均将月球极区作为探月工程的重要目标。冻结月壤的导热系数和单轴抗压强度是月球极区原位探测取样的基础和关键参数。本研究采用低温试验研究了冻结模拟月壤的导热系数和单轴抗压强度。结果表明: 冻结模拟月壤导热系数随含水率增大而线性增大, 冻结模拟月壤的导热系数为  $0.2 \sim 1.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。冻结模拟月壤单轴压缩过程中发生脆性破坏, 5% 含水率冻结模拟月壤单轴抗压强度约为 5 MPa, 10% 含水率冻结模拟月壤单轴抗压强度约为 13 MPa。在初始加载阶段, 干密度相同、含水率不同的冻结模拟月壤试样因微裂纹压密导致的应变基本相同; 在线弹性阶段, 冻结模拟月壤有效弹性模量随含水率增大而增大, 其主要原因是含水率增大使得月壤颗粒间的冻结强度增大; 在破坏阶段, 含水率较高的冻结模拟月壤表现出脆性破坏特征, 含水率较低的冻结模拟月壤表现出更显著的塑性特征。研究结果将为月球永久阴影区水冰探测方案制定、探测器研制等提供基础的科学数据支撑。

**关键词:** 冻结模拟月壤; 导热系数; 含水率; 单轴抗压强度

**中图分类号:** P642.14; P184.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)06-1773-09

### 0 引言

月球极区永久阴影区的温度极低<sup>[1]</sup>, 低温使水分子无法通过热运动逃逸<sup>[2-4]</sup>, 一直被认为是最有可能赋存水冰的区域<sup>[5-7]</sup>, 并推测水冰赋存于冻结月壤中<sup>[8]</sup>。水是人类赖以生存的化学物质, 月球上的水资源可以便利未来的星际航行, 未来月球基地建设、与月球资源开发也都需要充足的水源补给。同时, 水是理解月球独特的形成与演化过程的关键环节。因此, 各航天大国均将月球极区探测作为探月工程的重要目标, 月球极区和水冰探测已成为航天大国竞相抢占的战略制高点<sup>[9]</sup>。

月表覆盖着的一层由岩石碎屑、粉末、角砾、冲

击熔融玻璃等组成的“土壤”, 月球探测器着陆、月面移动、取样等探测任务均主要发生在月壤层, 月壤的物理力学特性是月球极区原位探测的基础和关键。各国科学家对月壤的物理力学特性已开展了许多研究。郑永春等<sup>[10]</sup>对月壤的物理和力学性质进行了综述性总结, 较为详实全面的对真实干燥月壤的物理和机械性质进行了研究, 但其中没有涉及含水(冰)月壤的研究成果。张宇等<sup>[11]</sup>对无水CAS-1模拟月壤的动剪切模量与阻尼比的研究表明, 在应力水平很低、孔隙比较大的真实月面环境条件下, 动剪切模量  $G$  较小, 阻尼比较大。Atkinson等<sup>[12]</sup>在 77 K 温度条件下冻结模拟月壤穿透试验表明, 当冻结模拟月壤含水率低于饱和含水率时, 穿

收稿日期: 2021-10-12; 修订日期: 2021-12-08

基金项目: 真空技术与物理重点实验室基金项目(6142207200201); 国家自然科学基金项目(41771073; 41871061; 41971087); 国家自然科学基金国际交流合作项目(42011530084)资助

作者简介: 何成旦, 研究员, 主要从事航天器结构材料加工、先进制造技术、航天器新材料应用、卫星安全防护、月球极区水冰赋存和资源利用技术等研究. E-mail: hecd8132@sina.com

透阻力和弛豫效应均对含冰量敏感,高于冻结模拟月壤饱和含水率后,穿透阻力和弛豫效应变化不显著。Ivanov对火星冻土强度进行了总结罗列<sup>[13]</sup>,并认为当冻土温度高于 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,冻土抗拉强度随温度降低而增大,当冻土温度低于 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,温度对其单轴抗压及抗拉强度基本没有影响。不过,由于月表环境和火星差异很大,火星环境下的冻土抗压强度随温度变化规律并不适用月球极区。目前,对 $-30\sim-230\text{ }^{\circ}\text{C}$ 月球极区温度范围内冻结月壤力学性质的研究很少,常规冻土力学研究的温度大多高于 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相关研究结果不能直接应用于月球极区。

月表钻探取样过程中,钻具与月壤摩擦生热,摩擦热在月壤中的传递散热对钻具安全至关重要,而且冻结月壤的导热特性与钻取过程中样品的温度变化密切相关,这事关取样任务的成败。此外,月球探测器与月壤直接接触过程中,月壤的导热能力将会影响探测器的温度状态,超限的温度变化可能导致探测器失效。月面物质导热系数测试一般采用原位测量和实验室测量两种。Langseth等<sup>[14]</sup>根据阿波罗15和17任务中的原位热流测量实验数据,分析得出月表以下1~2.36 m深度范围内的导热系数在 $0.015\sim0.03\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 之间变化。Creemers等<sup>[15]</sup>在实验室内测量了不同密度和温度条件下的阿波罗月球样品导热系数,发现样品密度 $1.10\sim1.95\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、温度在 $-160\sim160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,样品的导热系数约在 $5\times10^{-4}\sim4\times10^{-3}\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 之间变化,且导热系数随在几十厘米的深度内是呈现明显增加的,出现这种趋势的主要原因是由于月壤自身随深度变化而引起的密度变化<sup>[16-17]</sup>,得出密度对热导率存在一定的影响。目前,对月壤导热系数的试验研究均针对干燥无水的月壤,没有针对月球极区含水(冰)月壤的测试研究。

本研究利用吉林大学研制的模拟极区玄武质月壤为基材,通过液态水混合法制备冻结模拟月壤,研究了冻结模拟月壤的导热系数和 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度条件下冻结模拟月壤单轴压缩应力-应变特征,以期为月球极区探测器及钻具设计提供必要的参数,服务国家探月工程。

## 1 试验方法

### 1.1 模拟月壤与试样制备

月壤物理力学性质主要受月壤颗粒矿物成分、密实度、颗粒级配、月壤颗粒形貌等多种因素控制。

由于月壤极其稀少,使用模拟月壤作为试验材料进行宏观规律研究是目前的通行做法。本研究利用吉林大学研制的模拟月球极区的月壤为基材开展试验。表1为本研究中的模拟月壤与真实月壤矿物成分对比。由表1可以看出,本模拟月壤矿物成分与真实月壤较为相似,其微小差异在于月壤含有氧化亚铁,而本模拟月壤含有氧化铁;月壤含有少量硫,本模拟月壤不含硫。由模拟月壤与真实月壤的矿物成分对比可以看出,模拟月壤与真实月壤相似性较高。

表1 模拟月壤与真实月壤矿物成分对比

Table 1 Comparison of mineral composition between the simulated lunar soil and the real lunar soil

矿物成分	模拟月壤/%	真实月壤平均/%
$\text{SiO}_2$	47.83	44.77
$\text{Al}_2\text{O}_3$	16.18	18.25
$\text{CaO}$	6.95	12.53
$\text{FeO}$	—	11.72
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	12.43	—
$\text{MgO}$	6.88	9.22
$\text{TiO}_2$	1.08	2.45
$\text{Na}_2\text{O}$	5.37	0.44
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	—	0.33
$\text{MnO}$	0.32	0.21
$\text{K}_2\text{O}$	2.47	0.18
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.40	0.16
S	—	0.09

另一方面,本模拟月壤颗粒大部分呈玻璃态,真实月壤玻璃态成分也较高,这一方面也具有相似性。Apollo计划取得的月壤样品微观扫描结果表明,月壤中含有大量不规则的玻璃态颗粒<sup>[18]</sup>,月壤覆盖层的颗粒磨圆度普遍较低,图1为本模拟月壤的电镜扫描图。由图1中可以看出,本研究使用的模拟月壤颗粒磨圆度低,具有显著的棱角特征。图2为本研究用模拟月壤颗粒级配与真实月壤颗粒级配曲线。由图2可知,模拟月壤颗粒级配与真实月壤的上限级配曲线较为接近,模拟月壤最大颗粒粒径为 $500\text{ }\mu\text{m}$ 且模拟月壤颗粒级配较好,可见研究中采用的模拟月壤可以作为月壤代替物进行相关的物理力学试验。

在含水模拟月壤制备方面,常用的方法有蒸汽吸附法和混合法,但上述制样方法无法均匀制备低含水率试样,且制样周期长,无法保证试样的水分分布均匀。现有研究表明,极区月壤和水冰是以“脏



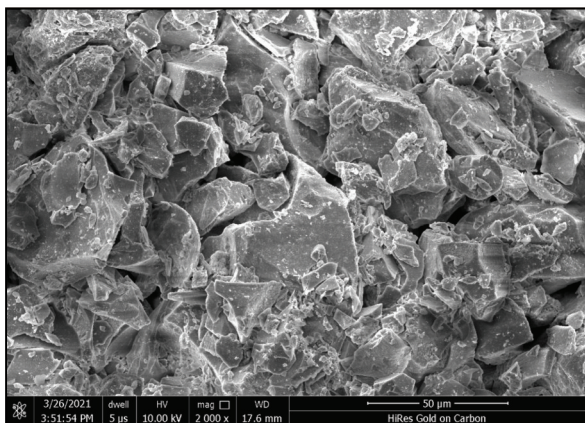


图1 模拟月壤颗粒扫描电镜图

Fig. 1 SEM image of simulated lunar soil particles

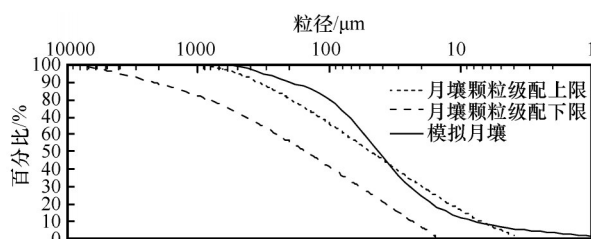


图2 模拟月壤颗粒级配与真实月壤颗粒级配曲线

Fig. 2 Particle grading curve of simulated lunar soil and real lunar soil

冰”的形式存在,即冰颗粒与月壤颗粒混合的形式存在<sup>[19]</sup>,为了较为真实地实现月壤与冰颗粒混杂,本研究中采用液态水混合法制备冻结模拟月壤。

导热系数测试试样高度为 60 mm,直径为 70 mm。制样时,首先分别配制了 1%~24% 含水率试样,将试样以  $1.42 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  的干密度分层装入试样

盒中,在  $-20^\circ\text{C}$  的温度条件下快速冻结,以最大程度减小模拟月壤冻结时引发的水分分布不均匀,然后在  $-20^\circ\text{C}$  环境持续冻结 24 h,最后根据测试要求将试样控温至目标温度。单轴抗压强度测试试样高度 80 mm,直径为 39.1 mm,长径比约为 2,试样干密度为  $1.42 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,采用双端静压法制样<sup>[20]</sup>。对制备好的试样分段干密度和含水率测试表明,液态水混合法制备冻结模拟月壤试样的水分分布均匀,试样整体均匀度较好,可以满足试验要求。

## 1.2 测试仪器与测试方法

本研究中使用冻土工程国家重点实验室的 ISOMET 2114 热性能分析仪测试冻结模拟月壤导热系数。图 3(a)为热性能分析仪主体。测试时,首先将测试探头与冻结模拟月壤表面接触,如图 3(b)所示,待测试探头温度与试样温度稳定后,对冻结模拟月壤导热系数进行测试。图 3(c)为测试完成后试样外观照片,由图 3(c)可以看出,测试完成后试样表面仍保持平整,表明传感器在试验过程中与试样紧密贴合,测试精度较高。本研究测试了 6 种含水率模拟月壤在  $-5^\circ\text{C}$ 、 $-10^\circ\text{C}$ 、 $-14^\circ\text{C}$ 、 $-19^\circ\text{C}$  时的导热系数,具体见表 2。

冻结模拟月壤单轴抗压强度测试在冻土工程国家重点实验室的可控温万能加载试验机上进行,该仪器荷载控制精度为  $\pm 0.0001 \text{ N}$ ,位移控制精度为  $\pm 0.001 \text{ mm}$ 。试验过程中发现试样呈脆性破坏,试样长径比为 2:1,以减小试样端部约束对测试结果的影响。为减小试样控温难度,制备  $\Phi 39.1 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$  的标准试样进行力学测试。



(a) 热性能分析仪



(b) 导热系数测试



(c) 试样外观照片

图3 模拟月壤导热系数测试过程

Fig. 3 Test process of thermal conductivity with simulated lunar soil

由于极区阴影区温度极低,常规的控温手段无法达到模拟极区环境温度要求,本研究使用液氮冷却法实现  $-196^\circ\text{C}$  的试验环境温度。具体操作方法

为:将试样在  $-20^\circ\text{C}$  快速冻结并恒温 12 h,后将试样浸入液氮中,同时将埋有热电偶温度传感器的相同含水率、相同干密度的同尺寸试样置入同一个液氮

表2 导热系数测试试样制备  
Table 2 Sample list of thermal conductivity test.

样本规格	试样干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	含水率/%	试样温度/℃	装样器	陪样传感
Φ70 mm×60 mm	1.42	1		树脂试样盒	热电偶温度传感器
		4	-19		
		9	-14		
		14	-10		
		19	-5		
		24			

槽中作为陪样,对陪样温度实时监测以确定加载试样温度。待试样温度在-196℃保持稳定后对试样加载,加载过程中保持测试样完全被液氮浸没;为减小偶然误差,每一加载条件测试点同时同批次制备3个测试样,2个备用样;加载过程中先对3个测试样依次进行加载并及时处理数据,若3个试样测试结果差异较大,则对2个备用试样进行测试,若2个备用试样测试结果与3个试样中的1个数据较为接近,则使用3个接近的试样数据作为真值;若3个试样测试结果中的2个数据较为接近,则依次对备用试样进行加载测试,直到出现3个试样的测试结果较为相似为止,若每一测试点5个试样的测试结果差异均较大,则对该测试点重新制样、测试。

2 试验结果与分析

2.1 冻结模拟月壤导热系数变化

2.1.1 含水率对导热系数的影响

为了探究冻结月壤导热系数随含水率的变化规律,对同一温度条件下不同含水率冻结模拟月壤导热系数进行测试。由图4可以看出,冻结模拟月壤导热系数随含水率增大而增大,本试验测试的温

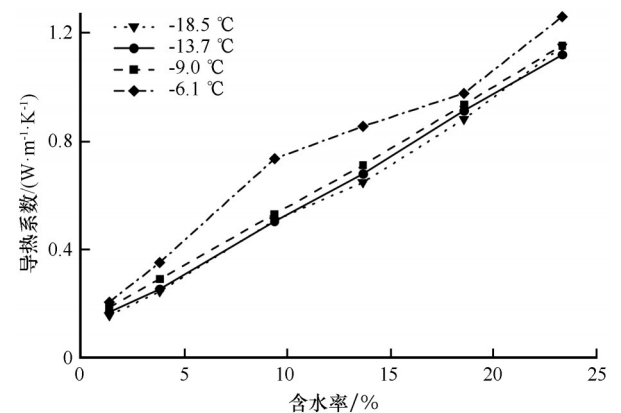


图4 不同温度模拟月壤导热系数随含水率变化  
Fig. 4 Variation of thermal conductivity of different temperature lunar soil with with water content

度范围内试样的导热系数均随着含水率线性增大。固体材料的导热系数一般为干密度、含水(冰)量和温度的函数,并与材料的矿物成分密切相关。冻结月壤是由固体颗粒、冰、液态水和气体四种基本成分组成的非均质、各项异性的四相复合物,每一种成分的性质以及它们之间的比例关系和相互作用决定着冻结月壤的热学性质。冻结模拟月壤导热系数对含水率变化极其敏感,由图4中可以看出24%含水率试样的导热系数约为3%含水率试样的4倍。

理论上,冻结月壤中基质颗粒-水-冰-气四组分处于如图5(a)所示的分布状态。随着试样含水率的增大,试样中气态部分减少,而液态水和固体冰增多。由于冰和液态水的导热系数约为气态组分的几十倍,冻结月壤的导热系数迅速增大。当含水率较小时,月壤通过颗粒间点接触传热。随着月壤含水率增大,包裹月壤的未冻水膜厚度增大,月壤颗粒接触范围增大,形成图5(b)所示的颈缩区,增大了月壤颗粒间的传热能力。

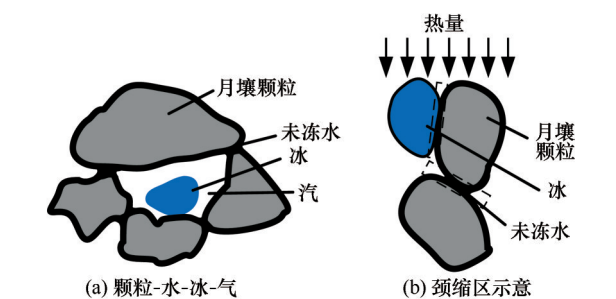


图5 冻结月壤中组分分布及热传导示意图  
Fig. 5 Schematic diagram of component distribution and heat conduction in frozen lunar soil

2.1.2 温度对导热系数的影响

本研究中模拟月壤干密度为1.42 g·cm<sup>-3</sup>,试样饱和含水率约为24%,测试过程中试样最低温度为-18.5℃。通常,冻土导热系数具有显著的温度



依赖性,冰的导热系数约为水的4倍,随着温度降低,冻土中未冻水逐渐相变成冰,冰含量增大使冻土导热系数增大。和常规冻土导热系数的变化规律不同,如图6所示,模拟月壤导热系数随温度降低反而减小,与冻结模拟月壤中的冰晶含量呈现负相关变化规律。造成这种现象的原因在于,冻结月壤可视为包裹未冻水膜的固体颗粒部分与固体颗粒接触点的颈缩区串联而成的传热体,如图5(b)所示;随着冻结月壤温度降低,月壤中未冻水发生重分布,分布于月壤颗粒与冰颗粒表面的未冻水含量减少,造成颈缩区未冻水含量减小,颗粒与颗粒间接触面积减少,热传导能力由此减小;虽然温度降低形成更多的孔隙冰晶,但孔隙冰与固体颗粒接触点增多引发的导热能力增加有限,最终由此导致冻结月壤导热系数随温度降低而减小。

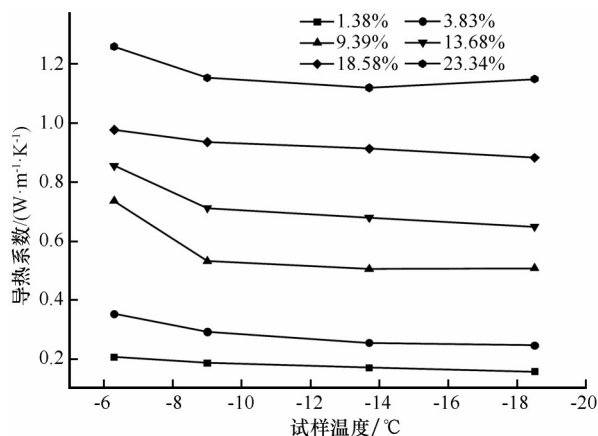


图6 不同含水率冻结模拟月壤导热系数随温度变化  
Fig. 6 The thermal conductivity of simulated lunar soil with different water content changes with temperature

### 2.1.3 月球极区导热系数特征

总体上,冻结模拟月壤的导热系数较小,本次试验条件下试样导热系数在  $0.3 \sim 1.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  间,远小于相同含水率和干密度条件下冻土的导热系数。月表环境压力极低,液态水无法稳定存在,冻结月壤中的冰颗粒、固体颗粒间以接触方式传热,真实的月壤导热能力比模拟月壤更小。另外,月表仅可能在陨石撞击过程中短暂的存在过液态水<sup>[21]</sup>,月表环境下水分以汽态方式迁移,当水分子与月壤颗粒碰撞时可能被吸附,月壤颗粒间通过多层吸附形成的“霜状”冰胶结,导热能力比晶体冰要小得多。此外,由于月壤颗粒锐度高、磨圆性极差,颗粒间接触面积小,这也会导致月球极区冻结月壤的导热系数比地球土颗粒基质的导热系数要小

得多。

通过对冻结月壤导热系数随温度变化的“反常”表现可以看出,冻结月壤导热系数随温度变化的趋势与水分分布状态有关,在含水冻结月壤取样过程中应控制水分因月壤热状态改变而发生的水分重分布对冻结月壤中水分分布的影响,保证含水月壤试样“取真”的工程需求。

综合以上分析,一方面,极区月壤极差的导热性能导致钻探取样过程中摩擦热不易散失,更容易加速钻头的磨损和破坏;另一方面,冻结月壤中赋存的水分因钻具摩擦生热而导致赋存状态发生改变,可能存在“取不真”的工程问题。

## 2.2 冻结月壤抗压强度

### 2.2.1 冻结月壤的应力-应变曲线

本试验中使用柔性试验机进行加载测试,当试样荷载达到破坏强度,试样的承受能力下降,应变加速,储存在压机中的弹性能快速释放,使得试样破坏后发生猛烈的破坏,因此试样破坏后试验数据采集系统捕捉到的应力-应变曲线为应力迅速减小的竖向直线。

图7为冻结模拟月壤在  $-196^\circ\text{C}$  条件下单轴压缩试验过程中的应力-应变曲线。由图7可以看出,冻结模拟月壤单轴抗压强度随含水率增大而增大,5%含水率模拟月壤的单轴抗压强度约为5 MPa,10%含水率模拟月壤的单轴抗压强度约为13 MPa,可见冻结模拟月壤抗压强度受含水率影响显著。

由图7可以看出,对于冻结模拟月壤在试样加载的OA段和OA'段,应力增加应变增长速率逐渐减小,即冻结模拟月壤存在“做功硬化”阶段,在做功

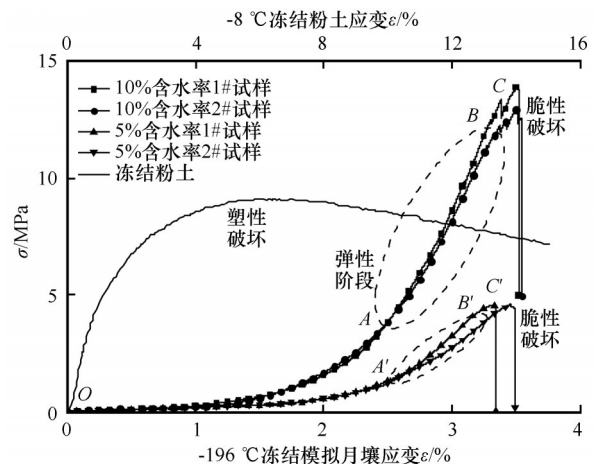


图7 冻结模拟月壤及冻结粉土应力-应变曲线  
Fig. 7 Stress-strain curve of frozen simulated lunar soil and frozen silt

硬化阶段,冻结模拟月壤中微裂纹在压应力作用下逐渐闭合。从 $OA$ 段和 $OA'$ 段的应变基本相等可以看出,不同含水率试样的微裂纹闭合所需应变基本相等,即含水率对冻结模拟月壤中微裂纹分布的影响较小;但10%含水率试样的硬化阶段所需应力显著大于5%含水率试样,可见含水率越高,冻结模拟月壤颗粒间的胶结强度越大。在 $AB$ 和 $A'B'$ 段,冻结模拟月壤应力-应变曲线接近线性,干密度相等条件下,10%含水率试样的有效杨氏模量显著大于5%含水率,且10%含水率试样线弹性阶段的应变增量略大于5%含水率试样,表明在 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温条件下,冻结模拟月壤颗粒间胶结作用随含水率增大而增大。在 $BC$ 和 $B'C'$ 段,冻结模拟月壤应力-应变曲线呈现下凹的特点,在 $C$ 点和 $C'$ 点下凹曲线达到最大,在该加载阶段,冻结模拟月壤呈现非弹性变形,应力-应变曲线斜率随着应力的增加逐渐减小到0,即冻结模拟月壤发生了“软化”,表现出塑性过程;在 $C$ 点以后,10%含水率的冻结模拟月壤出现快速跳跃形式的应力增加,随后迅速破坏,而在 $C'$ 点以后,5%含水率试样应力短暂减小、应变增加,后迅速破坏,可见5%含水率试样塑性略强于10%含水率试样。相应的冻结模拟月壤破坏照片如图8(a)所示,结合图7中冻结模拟月壤应力-应变曲线,冻结模拟月壤发生脆性破坏。

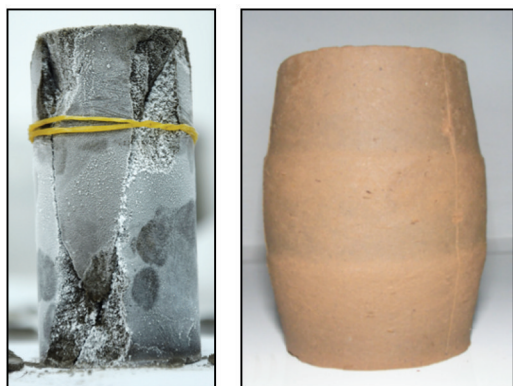


图8  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结模拟月壤及 $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结粉土破坏形貌<sup>[22]</sup>

Fig. 8 Damaged sample photos of frozen simulated lunar soil and frozen silt<sup>[22]</sup>

图7中冻结粉土应力-应变曲线为Yang等<sup>[22]</sup>在三轴试验仪中以围压1 MPa,试样 $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下进行加载的冻结粉土应力-应变曲线,由图7中可以看出, $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结粉土发生塑性破坏。相应的试样破坏照片如图8(b)所示,可见破坏后的冻结粉土试样呈

鼓形,且加载过程中冻结粉土表现出很强的塑性,而 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度条件下的冻结模拟月壤呈脆性破坏,可见低温冻结月壤与传统意义上的冻土破坏具有显著差异,现有冻土力学本构关系不能表征月表极区冻结月壤的力学行为。

## 2.2.2 冻结月壤单轴抗压强度

月表环境压力极低,水分以气态或固态的形式稳定存在,本研究通过将试样控温为 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 来减小未冻水对冻结模拟月壤抗压强度的影响,以最大程度模拟月表冻土真实的温度和水分状态。结果表明, $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度条件下,5%含水率冻结模拟月壤单轴抗压强度约为5 MPa,10%含水率冻结模拟月壤抗压强度约为13 MPa。显然,冻结模拟月壤抗压强度随含水率升高而增大,和冻结模拟月壤切削强度随含水率变化的规律相似<sup>[12,23]</sup>。结合图5冻结月壤中水的分布状态,我们认为,冻结月壤单轴抗压强度及切削强度随含水率增大的主要原因有以下3点:(1)含水率增大提高了月壤颗粒接触点的黏结强度;(2)含水率增大使冻结月壤中冰组分提高,使冰组分承担更多荷载;(3)含水率增大也提高了冰颗粒与土颗粒间的黏结强度。最终使冻结月壤强度随含水率增大而增大。

月表环境压力极低,液态水无法稳定存在,本研究中将试样稳定控温至 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,力求将模拟月壤中水分全部冻结,进而减小未冻水对冻结模拟月壤单轴抗压强度及应力-应变关系的影响。地表环境下,未冻结含水土壤的土颗粒表面分布有薄膜水,且土样抗剪强度随含水率增大而减小<sup>[24]</sup>,土体抗剪强度指标包括内摩擦角与黏聚力,胡昕等<sup>[25]</sup>对不同含水率煤系土抗剪强度测试表明,土体内摩擦角随含水率增大而先增大后减小,但变化值不大,土体黏聚力随含水率增大而大幅减小。由图1可以看出,本模拟月壤颗粒分明,与黏土矿物的薄片状土颗粒不同,与砂土更为相似,王海东等<sup>[26]</sup>对非饱和砂土的抗剪强度进行测试,认为非饱和砂土黏聚力先随含水率增大而增大后随含水率增大而迅速减小,内摩擦角随含水率增大而急剧减小;可见土体抗剪强度与土颗粒表面水膜厚度具有显著影响。沈言忠等<sup>[27-28]</sup>将压力作用导致的未冻水含量增加视为试样“温度”发生了改变,认为冻土中未冻水含量变化对冻土强度具有影响;晏长根等<sup>[29]</sup>对非饱和粉土在冻融过程的抗剪强度进行了研究,认为未冻水膜厚度影响了冰对土颗粒的胶结强度,冻融过程中



土颗粒表面未冻水膜厚度动态变化,冻土强度随温度变化。月表环境下冻土中不存在液态水,可见冻结月壤强度不因未冻水膜厚度变化而变化,因此在地面对冻结月壤强度的模拟研究中需避免冻土中未冻水对强度的影响。本研究将试样控温至 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,可认为试样中可能存在极微量的未冻水<sup>[30]</sup>,其对冻结模拟月壤抗压强度及应力-应变曲线的影响非常有限,本试验方法可对月表无未冻水条件下的冻结月壤抗压强度及应力-应变特征研究。

### 3 结论与展望

本研究对模拟月壤导热系数和抗压强度进行了测定,得出了快速降温冻结的模拟月壤在升温过程中的导热系数变化规律,并从冰水重分布的角度对出现的反常规律进行了阐释,得出了不同含水率条件下冻结模拟月壤的力学特性参数。主要得出以下结论:

(1)随着冻结模拟月壤含水率增大,导热系数逐渐增大;快速冻结后的模拟月壤升温过程中发生水分重分布,使得冻结模拟月壤导热系数随着温度降低而略微减小。

(2) $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下的冻结模拟月壤单轴抗压强度受含水率影响显著,10%含水率冻结模拟月壤单轴抗压强度显著大于5%含水率冻结模拟月壤;含水率越大,线弹性阶段的有效杨氏模量越大。

(3)干密度相同的条件下,10%含水率冻结模拟月壤与5%含水率冻结模拟月壤在加载初期因微裂纹闭合导致的应变基本相等,含水率对冻结模拟月壤中初始微裂纹分布基本不产生影响;在应变“软化”阶段,含水率高的冻结模拟月壤表现出更强的脆性破坏特征,含水率越低的冻结模拟月壤延性略强;与“传统”冻土不同, $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下的冻结模拟月壤表现出类似硬质岩石的破坏特征。

月表环境压力极低,冻结月壤中不含液态水,目前的冻结模拟月壤地面力学试验过程中,均没有考虑环境压力的影响,始终无法避免未冻水对冻结月壤的物理力学特性的影响,地面环境下冻结模拟月壤力学研究结果不可避免会和真实月表环境存在一定差异。本研究仅对冻结模拟月壤进行了单轴抗压试验,远不足以满足月球空间探测及含水月壤钻取需求,未来需对冻结月壤开展更为深入的切削、剪切以及复杂应力状态下的力学性质研究。

### 参考文献(References):

- [1] Lawrence D J. A tale of two poles: Toward understanding the presence, distribution, and origin of volatiles at the polar regions of the Moon and Mercury[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2017, 122(1): 21-52.
- [2] Vasavada A R, Paige D A, Wood S E. Near-surface temperatures on mercury and the Moon and the stability of polar ice deposits[J]. *Icarus*, 1999, 141(2): 179-193.
- [3] Rubanenko L, Venkatraman J, Paige D A. Thick ice deposits in shallow simple craters on the Moon and Mercury[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(8): 597-601.
- [4] Butler B J. The migration of volatiles on the surfaces of Mercury and the Moon[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1997, 102(E8): 19283-19291.
- [5] Bandfield J L, Poston M J, Klima R L, et al. Widespread distribution of OH/H<sub>2</sub>O on the lunar surface inferred from spectral data[J]. *Nat Geosci*, 2018, 11: 173-177.
- [6] Saal A E, Hauri E H, Cascio M L, et al. Volatile content of lunar volcanic glasses and the presence of water in the Moon's interior[J]. *Nature*, 2008, 454(7201): 192-195.
- [7] Feldman W C, Maurice S, Lawrence D J, et al. Evidence for water ice near the lunar poles[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2001, 106(E10): 23231-23251.
- [8] Greenwood J P, Itoh S, Sakamoto N, et al. Water in Apollo rock samples and the D/H of lunar apatite[C]//*Lunar and Planetary Science Conference*. 2010 (1533): 2439.
- [9] He Chengdan, Li Yasheng, Wen Zhi, et al. Research progress of lunar surface water ice detection and occurrence form[J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2021, 27(6): 589-600. [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.]
- [10] Zheng Yongchun, Ouyang Ziyuan, Wang Shijie, et al. Physical and mechanical properties of lunar regolith[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2004, 24(4): 14-19. [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.]
- [11] Zhang Yu, Yu Fei, Chen Shanxiong, et al. Experimental study of dynamic shear modulus and damping ratio of CAS-1 lunar soil simulant[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(1): 74-82. [张宇, 余飞, 陈善雄, 等. CAS-1模拟月壤动剪切模量与阻尼比的试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 74-82.]
- [12] Atkinson J, Prasad M, Abbud-Madrid A, et al. Penetration and relaxation behavior of JSC-1A lunar regolith simulant under cryogenic conditions[J]. *Icarus*, 2020, 346: 113812.
- [13] Ivanov B A. Martian upper crust strength estimates[R]. *Institute for Dynamics of Geospheres, Russian Academy of Science, Leninsky Prospect*, 2001: 38-39.
- [14] Langseth M G, Keihm S J, Peters K. Revised lunar heat-flow values [C]//*Lunar and planetary science conference proceedings*. 1976, 7: 3143-3171.
- [15] Birkebak R C, Cremers C J, Dawson J P. Thermal radiation properties and thermal conductivity of lunar material[J]. *Science*, 1970, 167(3918): 724-726.
- [16] Fountain J A, West E A. Thermal conductivity of particulate basalt as a function of density in simulated lunar and Martian environments[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, 75(20): 4063-4069.
- [17] Horai K. The effect of interstitial gaseous pressure on the ther-

- mal conductivity of a simulated Apollo 12 lunar soil sample [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1981, 27(1): 60-71.
- [18] Heiken G H, Vaniman D T, French B M. Lunar sourcebook, a user's guide to the Moon[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
- [19] Pommerol A, Jost B, Poch O, et al. Experimenting with mixtures of water ice and dust as analogues for icy planetary material[J]. *Space science reviews*, 2019, 215(5): 1-68.
- [20] Zheng Jianfeng, Ma Wei, Zhao Shuping, et al. Development of the specimen-preparing technique for remoulded soil samples [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(3): 494-500. [郑剑锋, 马巍, 赵淑萍, 等. 重塑土室内制样技术对比研究[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(3): 494-500.]
- [21] Stewart B D, Pierazzo E, Goldstein D B, et al. Simulations of a comet impact on the Moon and associated ice deposition in polar cold traps[J]. *Icarus*, 2011, 215(1): 1-16.
- [22] Yang Yugui, Gao Feng, Lai Yuanming, et al. Experimental and theoretical investigations on the mechanical behavior of frozen silt [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2016, 130: 59-65.
- [23] Atkinson J, Zacny K. Mechanical properties of icy lunar regolith: application to ISRU on the moon and mars[M]//*Earth and Space 2018: Engineering for Extreme Environments*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2018: 109-120.
- [24] Huang Kun, Wan Junwei, Chen Gang, et al. Testing study of relationship between water content and shear strength of unsaturated soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(9): 2600-2604. [黄琨, 万军伟, 陈刚, 等. 非饱和土的抗剪强度与含水率关系的试验研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(9): 2600-2604.]
- [25] Hu Xin, Hong Baoning, Du Qiang, et al. Influence of water contents on shear strength of coal-bearing soil [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(8): 2291-2294. [胡昕, 洪宝宁, 杜强, 等. 含水率对煤系土抗剪强度的影响[J]. *岩土力学*, 2009, 30(8): 2291-2294.]
- [26] Wang Haidong, Gao Changde, Liu Fangcheng. Experimental study of the influence of water content on the mechanical characteristics of unsaturated sandy soil [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2015, 42(1): 90-96. [王海东, 高昌德, 刘方成. 含水率对非饱和砂土力学特性影响的试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2015, 42(1): 90-96.]
- [27] Shen Zhongyan, Wu Ziwang. Basic form of the failure criteria of triaxial strength of frozen soils and its relativity to frozen water [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1999, 21(1): 22-26. [沈忠言, 吴紫汪. 冻土三轴强度破坏准则的基本形式及其与未冻水含量的相关性[J]. *冰川冻土*, 1999, 21(1): 22-26.]
- [28] Shen Zhongyan, Zhang Jiayi. Influence of confining pressure on dynamic characteristics of frozen silt [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1997, 19(3): 55-61. [沈忠言, 张家懿. 围压对冻结粉土动力特性的影响[J]. *冰川冻土*, 1997, 19(3): 55-61.]
- [29] Yan Changgen, Wang Ting, Jia Hailiang, et al. Influence of the unfrozen water content on the shear strength of unsaturated silt during freezing and thawing [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(6): 1252-1260. [晏长根, 王婷, 贾海梁, 等. 冻融过程中未冻水含量对非饱和粉土抗剪强度的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(6): 1252-1260.]
- [30] Tan Long, Wei Changfu, Tian Huihui, et al. Experimental study of unfrozen water content of frozen soils by low-field nuclear magnetic resonance [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(6): 1566-1572. [谭龙, 韦昌富, 田慧会, 等. 冻土未冻水含量的低场核磁共振试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(6): 1566-1572.]



## Study on physical and mechanical properties of frozen simulated lunar soil in lunar polar region

HE Chengdan<sup>1</sup>, LI Yasheng<sup>2,3</sup>, WEN Zhi<sup>2</sup>, WANG Yongrui<sup>2,3</sup>, ZHANG Xiao<sup>1</sup>,  
JIN Long<sup>1</sup>, YIN Zihan<sup>1</sup>, QUAN Sujun<sup>1</sup>

(1. Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China;

2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy

of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In recent years, more and more detection results show that there is water ice in the lunar soil in the permanent shadow area of the lunar polar region. Water is not only a chemical substance for human survival, but also a key link to understand the unique formation and evolution of the Moon. Therefore, all space powers regard the lunar polar region as an important goal of lunar exploration projects. The thermal conductivity and uniaxial compressive strength of frozen lunar soil are the basis and key parameters of in-situ exploration and sampling in the lunar polar region. The thermal conductivity and uniaxial compressive strength of frozen simulated lunar soil were studied by low temperature test. The results show that the thermal conductivity of frozen lunar soil increases linearly with the increasing of water content. The thermal conductivity of frozen simulated lunar soil is  $0.2 \sim 1.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . Brittle failure occurs during uniaxial compression of frozen lunar soil. The uniaxial compressive strength of frozen simulated lunar soil with 5% moisture content is about 5 MPa, and that of frozen simulated lunar soil with 10% moisture content is about 13 MPa. In the initial loading stage, the strain caused by micro crack compaction of frozen simulated lunar soil samples with the same dry density and different moisture content is basically the same; In the online elastic stage, the effective elastic modulus of frozen lunar soil increases with the increasing of water content, which is mainly because the water content increase the freezing strength between lunar soil particles; In the failure stage, the frozen simulated lunar soil with high moisture content shows brittle failure characteristics, and the frozen simulated lunar soil with low moisture content shows more significant plastic characteristics. The results will provide basic scientific data support for the formulation of water ice detection scheme and the development of detector in the permanent shadow area of the Moon.

**Key words:** frozen simulated lunar soil; thermal conductivity; moisture content; uniaxial compressive strength

(责任编辑: 刘建坤; 编辑: 周成林)