

月球冻土模拟与剪切强度试验分析

季 节¹, 王晓光¹, 肖俊孝², 肖 涛³, 张伟伟², 王 储¹,
马继楠¹, 刘雅芳¹, 孙 京⁴, 姜生元²

(1. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094; 2. 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;
3. 中国空间技术研究院 遥感卫星总体部, 北京 100094; 4. 中国卫通集团股份有限公司, 北京 100190)

摘要: 为获得月球永久阴影区冻土的剪切强度特性, 分析了月球冻土的矿物成分、粒径分布、干密度、含水率、赋存温度等物理特性, 提出了月球冻土的模拟物制备与参数检测方法。基于变角剪切试验 (Variable-Angle Shear Test, VAST) 方法, 开展了斜长质和玄武质原料混配、干密度 1.71 g/cm^3 (相对密度100%)、含水率3.7~9.5 wt%、温度低于 -180°C 的模拟月球冻土剪切强度测试。试验结果表明: 模拟月球冻土在低围压下的剪切破坏模式以剪断面上的脆性断裂为主, 随围压升高, 模拟月球冻土的脆性降低、延性增加, 破坏模式转变为整体压剪破坏, 表观剪切强度下降; 按直线型莫尔-库伦准则对模拟月球冻土在低围压下的剪切强度参数计算, 结果显示其内聚力随含水率增加而近似线性增加, 内摩擦角基本不随含水率变化, 取值在 $50^\circ\sim 53^\circ$ 。

关键词: 月球冻土 (ILR); 模拟月壤 (LRS); 变角剪切试验 (VAST); 剪切强度; 莫尔-库伦理论

中图分类号: V416.5

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2023)02-0199-12

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2023.20230006

引用格式: 季节, 王晓光, 肖俊孝, 等. 月球冻土模拟与剪切强度试验分析[J]. 深空探测学报(中英文), 2023, 10(2): 199-210.

Reference format: JI J, WANG X G, XIAO J X, et al. Simulation of icy lunar regolith and experiment on its shear strength[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2023, 10(2): 199-210.

引 言

月球水冰已被证实存在于月球两极永久阴影坑内, 但仍缺乏直接的测量证据, 并没有解决水冰的赋存状态、含量、分布、来源等问题^[1]。对月球极区水资源的精细就位探测与勘查, 可为月球的起源与演化等科学问题提供重要证据; 对水冰的开采、提取与原位利用, 也可以促进人类未来月球活动的可持续性发展。水冰因此成为当前国际月球探测的热点, 包括美国VIPER (Volatiles Investigating Polar Exploration Rover)、俄罗斯“月球25/27号”(Luna 25/27)、中国“嫦娥七号”(CE-7)在内的多个任务旨在通过钻孔形式对月球南极含有水冰的月壤样品进行采集和分析。

对月球水冰的开采需要建立在对其物理力学特性充分了解的基础上, 对其力学特性认识的正确与否将影响开采工具设计的成败。水冰与月壤的结合形态是一个尚未明确的问题, 当前假说可以归纳为: ①水冰以离散颗粒的形态与月壤颗粒掺杂在一起; ②水冰将月壤颗粒冻结在一起形成冰壤胶结物, 强度与岩石接

近, 本文“月球冻土”一词特指这种形态; ③介于前2种形态之间的半胶结形态^[2]。其中, 月球冻土由于机械强度最高, 对于开采装备的性能考核最严格, 且与这种赋存形态相应的地面模拟物可用水壤混合后冻结的方法制备, 难度与成本较低, 适合大规模试验, 在相关开采装备的测试中被广泛采用。

月球冻土主要赋存于月球两极的永久阴影坑内, 坑内年平均温度可低至 $20\sim 40 \text{ K}$, 最高不超过 110 K (-163°C)^[3], 远低于地球极端低温的下限。因此月球冻土是一种不存在地面天然类似物的新材料, 需要开展地面等效模拟及深低温下的力学性能测试才能获知其力学特性。在月球冻土的模拟与力学测试方面, 前人已开展了许多探索性工作。Gertsch等^[4]以JSC-1模拟月壤为原料, 采用水壤混合后冻结的方法制备模拟月球冻土试样, 开展单轴抗压强度 (Uniaxial Compressive Strength, UCS) 试验, 结果显示随温度降低, 试样强度增加; 当温度低于 -100°C 时, 试样破坏从黏塑性破坏逐渐转变为脆性破坏。Atkinson等^[5]使

用JSC-1A月海月壤模拟物制备了3%、5%、12% 3种含水率的试样,并在-196.15℃、-20.15℃ 2种温度下开展了单轴抗压强度测试。Pitcher等^[6]使用NU-LHT-2M高地月壤模拟物制备样品,并对样品进行了-20℃条件下的贯入阻力测试和单轴抗压强度测试。Liu等^[7]通过不同比例的斜长质与玄武质模拟月壤混配模拟月球高地月壤的矿物成分,对模拟月球冻土的单轴抗压强度及其影响因素进行了比较系统的研究,含水率范围覆盖5~25 wt%,温度范围-10~-230℃,密度范围1.48~1.84 g/cm³,并对矿物成分、含水率、温度、密度4个因素对试样单轴抗压强度的影响进行了多元回归分析,建立了强度预测模型。

上述研究主要关注模拟月球冻土的单轴抗压强度,但在单轴压缩试验中,冻土的破坏并非由压应力直接导致,而是试样内部次生的切应力和拉应力综合的结果,因此单轴压缩试验虽能反映材料的强度,但无法在更细观的层面上给出材料抵抗拉和剪破坏能力。在钻孔形式实现对月球水冰的开采过程中,钻头对月壤进行回转切削破碎,引起破坏的力学原因是剪应力主导^[8-9]。在月球冻土的剪切破坏研究方面已有的文献报道较少,刘君巍等^[10]使用纯玄武岩质模拟月壤制备月球冻土模拟试样,在含水率11.1 wt%、干密度1.76 g/cm³、温度-80~-160℃区间内的条件下开展了模拟月球冻土的直剪试验,研究了剪切强度随温度变化的关系。

对月球冻土力学特性的研究还尚不充分,月球冻土的模拟和制备过程也缺乏统一的标准。为进一步研究月球冻土的剪切破坏特性,本文详细讨论了月球冻土的模拟要素、取值依据、控制与检测方法,包括矿物成分、粒径分布、密度、含水率、温度等要素,保证了模拟方法的合理性和测试数据的质量;利用变角剪切试验方法开展了模拟月球冻土试样的剪切强度试验,获得了内聚力、内摩擦角随含水率的变化关系。本文获得的测试数据为进一步研究月球冻土的力学本构提供了基础,为钻孔开采过程中月球冻土切削破坏模型的开发提供了依据。

1 月球冻土模拟与样本制备方法

对月球冻土进行模拟目的是获得供地面试验使用的等效替代材料。月球冻土的强度与其矿物成分、粒径分布、密度、含水率、温度等因素有关,特别是受密度和含水率变化的显著影响。因此,需要通过对比极区月球冻土组构参数的估计制定模拟标准,保证模拟样本与月球冻土的相似性和等效性。另一方面,相比

单轴抗压和抗拉强度(巴西劈裂)试验,测量冻土的剪切强度要求在多个正应力水平下分别进行多次测试,以获得材料在 τ - σ 空间内的极限应力分布,从而拟合出材料抗剪强度包络线。在需要试样数量较多的情况下,通过对试样参数的控制与测量,保证批量制备的样本参数的均一性,减少试样离散性造成的剪切强度误差,是提高试验数据质量、获得准确剪切强度参数的关键。因此,本节将介绍模拟月球冻土试样的制备方法以及各个样本控制参数的选取依据、控制与检测方法。

1.1 模拟月球冻土试样制备流程

模拟月球冻土试样的制备流程如图1所示,主要步骤包括:①原料混配:将不同粒径范围的斜长岩质模拟月壤原料和玄武岩质模拟月壤原料按7:3的矿物成分质量比和所需的粒径级配质量比混合均匀,实现对月壤矿物成分和粒径分布的模拟;②粒度检测:对混配好的模拟月壤取样进行激光粒度测试,若与设定的粒径级配目标相近则通过测试;③土样烘干:将混配的模拟月壤放入烘箱,温度105℃烘干8h,除去天然水分;④水分配置:按设定的含水率指标向烘干的模拟月壤中加入工业蒸馏水,充分搅拌均匀后装入密封袋,在室温下避光保存静置一昼夜使水分充分扩散均匀;⑤试样压制:按设定的密度指标将含水模拟月壤分两次加入制样模具,压实后脱模称重,并用保鲜膜密封保存;⑥梯度冷冻:为防止试样在迅速降温中冻裂,分别利用冰箱和液氮浴对试样进行梯度制冷,达到试验所需的目标温度。

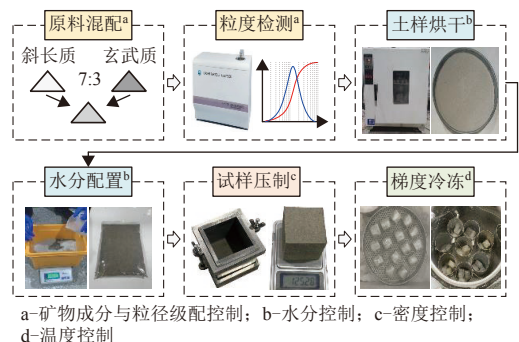


图1 模拟月球冻土试样制备流程

Fig. 1 Preparation process of simulated ILR sample

1.2 模拟月壤原料矿物成分

根据月壤的形成机制,月球高地月壤主要来源于斜长岩基岩的风化,但由于陨石撞击事件的溅射与混合作用,少部分月海玄武岩质月壤也会混入以斜长岩为主的高地月壤中。纯斜长岩中斜长石矿物的含量超

过90%，而根据Basu等^[11]给出的历次Apollo任务着陆区月壤的矿物模式分布，位于高地的“阿波罗16号”（Apollo 16）着陆区月壤中斜长石平均含量73.4%，混入了部分玄武质月壤；与之相比，位于月海的“阿波罗14号”（Apollo 14）着陆区月壤中斜长石含量仅占49.6%。

除了影响颗粒比重以外，矿物成分对无水月壤的力学特性影响不大，但有可能因矿物亲水性的差别影响含水月球冻土的冻结强度^[7]，因此矿物成分的模拟是本文月球冻土模拟的目标之一。采用斜长岩、玄武岩2种原料粉碎后混合的方法模拟高地月壤的矿物成分，其中斜长质模拟月壤选取吉林大学研制的JLU-H型高地模拟月壤，其原料开采自河北承德大庙斜长岩体，是一种纯斜长岩质的月壤力学模拟物^[12]；玄武质模拟月壤选取吉林辉南的金川玄武岩火山渣，其平均矿物成分与Apollo 14月壤样品相似，已在中国探月工程中作为月海玄武质月壤的模拟物（JLU-B、CUG-1A）而广泛应用^[13-14]。将斜长质与玄武质原料以7：3的质量比混配作为本研究使用的模拟月壤，具有与高地月壤相似的矿物成分。根据原料化学成分计算的混配月壤化学组成以及与Apollo 16月壤的对比如表1所示，二者的主要差别是由月球斜长石富钙引起，而地球斜长石中通常钙长石的相对含量偏低。

表 1 混配模拟月壤与Apollo 16样品化学成分对比
Table 1 Comparison of chemical composition of mixed LRS and Apollo 16 sample

成分	Apollo 16	JLU-H	CUG-1A	7:3混配
SiO ₂	45.10	65.15	48.32	60.10
Al ₂ O ₃	26.80	19.28	16.01	18.30
CaO	15.60	6.45	7.39	6.73
FeO	5.40	—	12.50	3.75
Fe ₂ O ₃	—	1.31	—	0.92
MgO	0.60	0.06	6.95	2.13
TiO ₂	0.60	0.04	2.38	0.74
MnO	0.22	0.01	0.15	0.05
Na ₂ O	0.43	4.95	0.19	3.52
K ₂ O	0.14	2.74	2.12	2.55
P ₂ O ₅	0.10	0.01	0.54	0.17
LOI	0.00	0.77	0.19	0.60

使用比重瓶法测量了所采用的斜长质、玄武质2种模拟月壤原料的颗粒比重，根据混合比例计算出混配后模拟月壤的平均颗粒比重为2.75 g/cm³，结果如表2所示。

表 2 模拟月壤原料及混配后颗粒比重
Table 2 Specific gravity of LRS raw materials and mixed LRS

参数	值
斜长质颗粒比重/(g·cm ⁻³)	2.69
玄武质颗粒比重/(g·cm ⁻³)	2.89
混配后斜长质月壤含量	70 wt% (71.5 vol%)
混配后平均颗粒比重/(g·cm ⁻³)	2.75

1.3 模拟月壤原料粒径分布

月球极区的地质类型主要属于月球高地类型，各方研究中多参照Apollo 16任务获得的月壤样品粒径测量数据配置极区模拟月壤。NASA主导研制的NU-LHT系列模拟月壤已在月球极区相关作业装置的试验测试中得到了广泛使用^[15]，因此本研究采用的模拟月壤粒径分布主要参照NU-LHT-2M模拟月壤配置。将不同粒径的模拟月壤原料混配后，经激光粒径测试得到的混配模拟月壤粒径累积分布曲线如图2所示（曲线点的含义为小于此粒径的颗粒占总体的质量分数），其质量中值粒径D₅₀=81 μm，D₁₀=19 μm，D₉₀=304 μm。由图2可见本文所配置的模拟月壤粒径分布与NU-LHT-2M较为接近，同时其粒径累积分布曲线也在Bulter等^[16]给出的19份Apollo 16月壤样品粒径分布曲线的包络范围内，可以较好地模拟极区月壤的粒径分布。

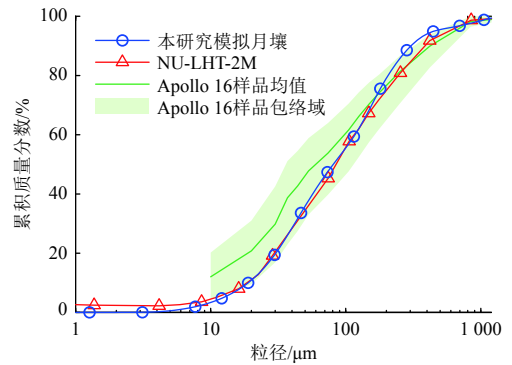


图 2 模拟月壤粒径累积分布曲线
Fig. 2 Particle size distribution of the LRS used

1.4 试样密度控制

无水时的月壤是一种散体物质，由月壤颗粒及颗粒间的孔隙组成，它的宏观力学性质受到月壤颗粒间的接触关系影响，与月壤的密实程度显著相关，因此需要考虑对月壤密实度的模拟。对于含水月壤，在干密度相同时，由于含水率的区别会具有不同的湿密度。为了将颗粒骨架密实程度与含水率的影响进行解耦，本研究的试样统一以干密度为控制标准。

月壤的密实状态由相对密实度D_r表征，其物理意

义为月壤的密实状态在最疏松和最密实两个极端状态之间的相对密实程度。月壤的相对密度由极限孔隙比 e (孔隙体积与颗粒体积的比值)定义,在已知颗粒平均比重的情况下也可换算为密度定义

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

其中: D_r 为相对密度; e 为月壤当前状态下的孔隙比; e_{\max} 和 e_{\min} 分别为月壤最疏松和最密实状态下的孔隙比; ρ 为月壤当前密度; ρ_{\min} 和 ρ_{\max} 分别为月壤最小和最大干密度(容重)。

地球岩土工程领域通常采用相对密度试验测得一种土样的最大、最小容重,据此计算相对密度。但在讨论地面制备的模拟月壤与原位月壤的等效性时,由于矿物原料的区别使得模拟月壤与月壤的颗粒比重不同,无法简单以容重为标准建立密实程度的对应关系;另外,地球重力场的强度是月球的6倍,通过地面土工试验测得的土样最大、最小干密度结果会高估其在月球重力场下能够达到的密实程度。Heiken等^[17]给出的月壤平均比重最佳估计值为 3.1 g/cm^3 ,最小、最大干密度的最佳估计值分别为 1.30 g/cm^3 和 1.92 g/cm^3 ,由此可以计算月壤的最大和最小孔隙比分别为1.38和0.61。本研究模拟月壤的实测结果如表3所示,其最大、最小孔隙比分别为1.15和0.46,二者都小于月壤的估计值,表明在地面重力场下获得了更高的密实程度。因此,本研究以原位月壤的极限孔隙比为标准,以月壤的最大、最小孔隙比定义模拟月壤的极限孔隙比,并根据颗粒比重计算出其极限干密度,从而可以定义模拟月壤的相对密度。对应月壤极限孔隙比,模拟月壤最小、最大干密度分别为 1.15 g/cm^3 ,和 1.71 g/cm^3 。

表3 月壤与模拟月壤的相对密度定义参数

Table 3 Parameters for defining D_r of lunar regolith and LRS

参数	原位月壤估计值	模拟原料实测值	模拟月壤定义值
颗粒比重 $\rho_s / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	3.10	2.75	2.75
最小干密度 $\rho_{\min} / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1.30	1.28	1.15
最大孔隙比 e_{\max}	1.38	1.15	1.38
最大干密度 $\rho_{\max} / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1.92	1.88	1.71
最小孔隙比 e_{\min}	0.61	0.46	0.61

月壤的相对密度随深度变化,在浅表层迅速增加,在35 cm以下即超过95%^[17],而中国、美国与俄罗斯等国任务面向月球冻土的采样深度目标均为1 m左右^[8]。

因此,在月球冻土的开采作业中有必要考虑高密实度情况下月球冻土的力学参数,为考虑对力学强度上限的覆盖性,选取根据表3定义的模拟月壤100%相对密实度 1.71 g/cm^3 作为试样干密度的控制参数。

试样压制过程中,为降低“粮仓效应”造成的试样密度不均匀性,分2次将目标质量的含水模拟月壤原料倒入制样模具中,并采用击锤敲击压块的方法压制试样,利用压块的限位控制试样的体积和密度,如图3所示。在2次压制中间,对第1次压制后的土体表面进行刮毛,增大两层土体之间的结合性;进行变角剪切试验时,将试样的分层面与剪断面正交放置,减小结构面对剪切强度的影响。

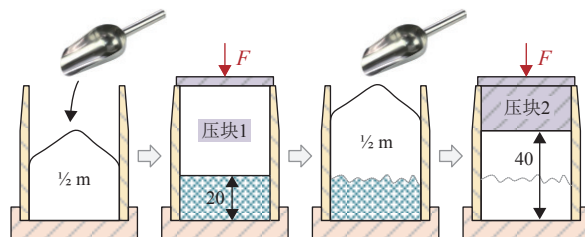


图3 试样分层压实方法

Fig. 3 Compaction of the sample in two layers

1.5 试样含水率控制

模拟月壤冻土试样的含水率定义为水分质量占模拟月壤干质量的百分比(wt%),在其它因素一定时,试样的含水率会显著影响其冻结强度。根据现有探测数据,极区永久阴影坑内月壤的含水率一般低于饱和点,目前为止对月壤含水率最精确的测量结果来自美国“月球陨坑观测与遥感卫星”(Lunar Crater Observation and Sensing Satellite, LCROSS)任务,其给出的月球南极凯布斯(Cabeus)坑内撞击点的含水率 $5.6 \pm 2.9\%$ ^[19],考虑一定的覆盖性和制样的便利性,本文设置4 wt%、6 wt%、8 wt%、10wt% 4个试样含水率等级(2 wt%及以下试样在冻结前容易破碎)。

试样含水率的控制主要涉及到水分均匀性的控制和减少试样水分挥发损失。在烘干的模拟月壤中加入所需质量的工业蒸馏水,充分混合后按《GB/T 50123—2019 土工方法试验标准》在密封袋中避光保存静置一昼夜,使水分在颗粒孔隙间充分扩散,并在取用前再次充分搅拌混合。试样压制脱模后,迅速用保鲜膜包裹密封,并移入冰箱中冷冻。

在试验全过程中设置了多个含水率测量节点,分别为干壤水分配时、湿壤制样取用时、试样压制成型时,以及试样破坏后收集碎块测量含水率。经测试发现,制样过程中含水模拟月壤在空气中暴露时会有

少量水分挥发损失; 另外在试样冷冻过程中虽然已经用保鲜膜密封, 但冷冻过程中试样内外的温度梯度会引起水分迁移并在表面(冷端)析出形成片状冰晶, 引起试样内部含水率降低, 上述原因共同造成试样最终破坏时含水率较水分配置时偏低0.3~0.5 wt%。因此, 最终选择在试样破坏后迅速收集试样碎块密封保存, 待其融化后混合均匀取样, 使用热重法检测含水率(如图4所示), 并将此时测得的含水率作为试样的真实含水率指标。



图 4 试样含水率检测方法
Fig. 4 Measurement method of samples' water content

1.6 试样温度控制

在月球高真空环境下, 月球水冰主要存在于两极永久阴影坑内的冷阱中。研究表明真空下纯冰的升华速度随温度升高而加快, 不存在恒定的相变温度^[20], 但目前普遍以110 K (-163 °C) 作为月球水冰能够长期稳定赋存的上限温度^[21]; 另一方面, Liu等^[7]的研究表明当模拟月球冻土试样的温度降低到一定水平时, 其单轴抗压强度将逐渐趋于稳定值, -180 °C与-230 °C 2种温度条件下的试样强度相差不大。因此, 为模拟原位环境下月球冻土的强度特性, 要求将模拟月球冻土试样在破坏时的温度控制在低于-160 °C, 但不必要达到低于-200 °C的深低温。本文采用液氮(沸点-196 °C) 作为冷媒制冷, 在满足温度指标要求的同时兼顾试验的经济性。

在试样破坏温度控制方面, 采用了“二级梯度制冷+试样快速破坏”的方法。水冻结为冰时体积膨胀, 如果从室温开始直接使用液氮制冷, 试样迅速降温过程中颗粒孔隙中的水分无法重新迁移即原位冻结膨胀, 试样内部的预应力无法释放从而产生大量微裂纹和缺陷, 影响试样的强度。因此, 本文采用二级梯度冷冻方法, 试样冻结过程的温度历程如图5所示。将室温下压制成型的含水试样先放入-80 °C超低温冰箱缓慢冷冻, 使试样内部的未冻水全部冻结; 随后转移至液氮浴容器中进行二级冷冻, 直至试样达到接近-196 °C的热平衡状态。另外, 由于采用的试验机不具备-196 °C样本的保温功能, 试样从液氮浴中取出后温度即开始

上升, 因此采用较快的10 mm/min加载速率, 在1 min内快速完成单个试样的剪切试验以降低试样破坏时的温度变化。

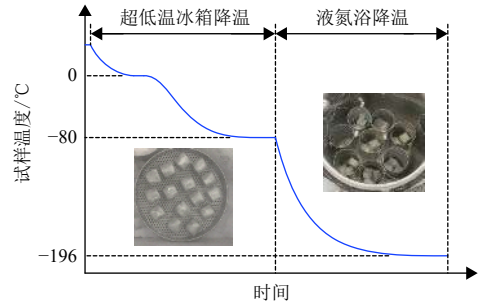


图 5 试样二级梯度冷冻过程温度历程示意
Fig. 5 Temperature course of the two-stage freezing process

对于试样温度的检测, 采用“陪样标定温升曲线+试样破坏时间对应”的方法。在试样内部置入温度传感器会影响试样的强度, 而红外热像等传统非接触测温方法难以测量试验所涉及的极端低温。制备与试样相同的陪样, 并保持陪样与试样始终处于同一环境下, 通过陪样中置入的温度传感器测温来反映试样的温度变化, 如图6所示。标定温升曲线时, 将陪样安装在剪切模具中静置, 从陪样离开液氮浴时刻起连续记录温度变化。对不同含水率的陪样各采用3个陪样标定, 获得的平均温升-时间曲线如图7所示。试验中试样从取出液氮浴至破坏的平均时间约为40 s, 即试样的破坏温度约在-186~-180 °C之间。

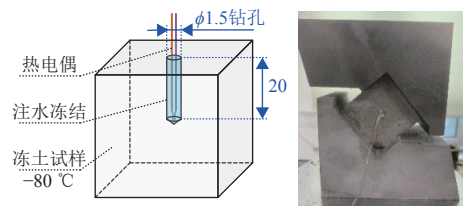


图 6 陪样传感预置与温升标定
Fig. 6 Sensor preset and temperature rise calibration by companion samples

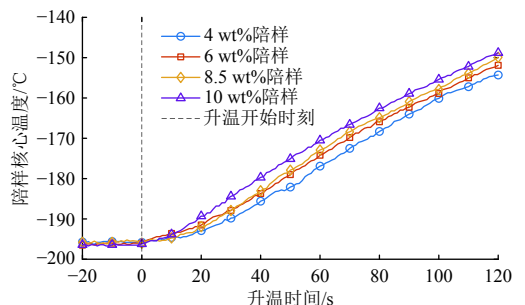


图 7 试样温升-时间曲线标定结果
Fig. 7 Calibration results of temperature rise-time curve of the samples

2 变角剪切试验

2.1 变角剪切试验

变角剪切试验是岩土研究中测量材料剪切强度的一种常用试验方法,另外也常用直接剪切试验方法。2种方法都是通过对测试材料施加不同大小的正应力,测量材料在正应力作用下抵抗切应力的能力。研究表明,使用模具倾角 α 小于 45° 的变角剪切试验获得的试验数据在用于计算岩石的抗剪强度参数(内聚力、内摩擦角)时更为合理^[22]。

变角剪切试验的原理如图8所示,通常采用立方块体试样,放置在一对带有倾角 α 的剪切模具中,上、下模具各自与试样上、下表面的一半接触。对上模施加压力 P 时,由于模具倾角的作用,压力 P 的两个分力分别在试样剪断面上形成正应力 σ 和剪切应力 τ ,从而实现试样的压剪破坏。通过改变剪切模具的倾角便可以调节剪断面上正应力和切应力的相对大小,实现不同等级正应力的加载。试样破坏时刻剪断面上的正应力和切应力为

$$\begin{cases} \sigma = \frac{P \sin \alpha}{A} \\ \tau = \frac{P \cos \alpha}{A} \end{cases} \quad (2)$$

其中: P 为破坏载荷; α 为模具角度; A 为剪断面截面积; σ 、 τ 为试样剪断面上的正应力和切应力。

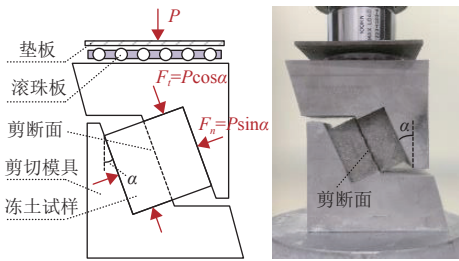


图8 变角剪切试验方法

Fig. 8 Variable-Angle Shear Test (VAST) method

按DZ/T 0276.25标准及TB 10115标准,按图8标注定义的模具倾角 α 通常在 $20^\circ \sim 45^\circ$ 范围内取3~5个角度,每个角度多次重复试验。变角剪切试验的应力数据分布特点如图9所示,在 τ - σ 图中,不同倾角 α_1 、 α_2 、 α_3 分别对应过原点的直线 l_1 、 l_2 、 l_3 。试样在加载破坏过程中,正应力和切应力同时沿此直线加载,同一个倾角的强度应力数据均沿对应的直线分布,因此变角剪切试验应力数据的不确定度是倾斜分布的,在 σ 和 τ 两轴上具有线性相关性。

对于变角剪切试验获得的剪切强度应力数据,DZ/T 0276.25标准和TB 10115标准推荐采用对所有数

据点进行普通最小二乘直线拟合的方法,获得试样的内聚力和内摩擦角。内聚力 c 和内摩擦角 φ 的计算公式分别为

$$c = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 \sum_{i=1}^n \tau_i - \sum_{i=1}^n \sigma_i \sum_{i=1}^n \sigma_i \tau_i}{n \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \sigma_i \right)^2} \quad (3)$$

$$\varphi = \arctan \left[\frac{n \sum_{i=1}^n \sigma_i \tau_i - \sum_{i=1}^n \sigma_i \sum_{i=1}^n \tau_i}{n \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \sigma_i \right)^2} \right] \quad (4)$$

其中: n 为试样数量; σ_i 和 τ_i 分别为第 i 个试样破坏时剪断面上的正应力和切应力; c 为内聚力; φ 为内摩擦角。

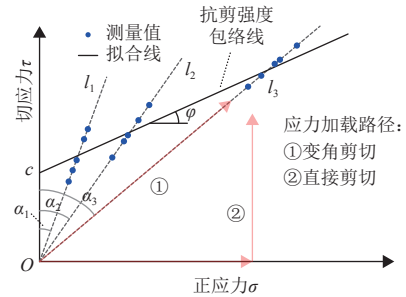


图9 变角剪切试验的应力数据分布

Fig. 9 Stress data pattern of the variable-angle shear test

2.2 试验流程

变角剪切试验的完整流程及试样物理参数的检测方法如图10所示。试样制备部分已在前文介绍,其中在完成试样压制后,称量试样的含水质量用以计算湿密度。在剪切试验开始前,先将变角剪切模具在液氮浴中预冷,使模具达到与试样相同的初温,随后将模具和试样安装在试验机上并迅速开始试验,记录试样破坏时的形态、破坏载荷以及试样从取出液氮浴到破坏的时间。取下破坏后的试样,用游标卡尺测量试样剪断面两边长的尺寸,然后装入密封袋暂存。对于测温陪样,同样经模具预冷、模具与试样安装,使陪样与试样处在相同的热环境下,随后静置2 min并连续记录陪样温度数据。试验完成后,待收集的试样碎块融化,将其捣碎并混合均匀取样,通过热重法测量试样的含水率。

基于上述流程,试样的破坏温度可由试样破坏时间计数从标定的温升曲线上读出;试样的含水率在试验后最终测得;试样的密度首先通过含水质量、尺寸测量获得湿密度,再结合含水率计算获得干密度,从而实现试样多维参数的准确测量。

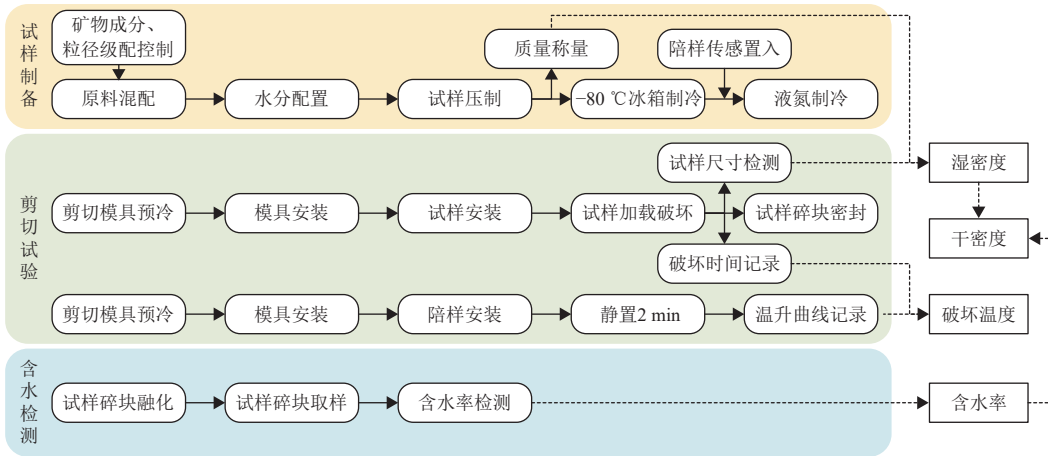


图 10 试验流程及试样参数检测方法

Fig. 10 Test process and measurement method of sample parameters

2.3 试验方案

本次试验将试样的干密度设置为 1.71 g/cm^3 , 试样尺寸取边长较小的 40 mm 立方体以方便控制密度的均匀性(由于试样冻胀, 实测尺寸稍微偏大); 试样含水率设定为 $4 \text{ wt}\%$ 、 $6 \text{ wt}\%$ 、 $8.5 \text{ wt}\%$ 、 $10 \text{ wt}\%$ 4种含水率以覆盖月球冻土最有可能的含水率范围; 试验机压头加载速率取较快的 10 mm/min 以减少试样取出液氮浴后的升温时间, 破坏温度以实测值为准, 尽量接近 $-196 \text{ }^\circ\text{C}$, 最高不高于 $-160 \text{ }^\circ\text{C}$; 剪切模具倾角取 20° 、 25° 、 30° 以拟合低正压力水平下的模拟月球冻土剪切强度参数, 另外设置 40° 倾角以测试高正压力水平下的剪切破坏行为。试验参数设定值及实测值汇总于表4, 其中试验控制参数的实测值以“平均值 ± 1 倍标准差”的形式给出。

表 4 试验参数设定值及实测值

Table 4 Set value and measured value of test parameters

参数	名义数值	实测数值
试样尺寸/mm	$40 \times 40 \times 40$	平均边长 40.7
含水率/wt%	4, 6, 8.5, 10	3.85 ± 0.26 , 5.73 ± 0.19 , 8.07 ± 0.17 , 9.47 ± 0.25
干密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1.71	1.714 ± 0.016
破坏温度/ $^\circ\text{C}$	低于 -160	$-186 \sim -180$
模具倾角/ $^\circ$	20, 25, 30, 40	—
加载速率/ $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	10	—

试验采用Instron5569电子万能试验机, 最大载荷 50 kN 。除去 $10 \text{ wt}\%$ 含水率试样在 40° 倾角模具下破坏载荷超出试验机量程而未进行试验外, 共开展了不同含水率和模具角度的15种组合工况试验, 每个工况重复 $8 \sim 10$ 个试样, 共获取137个试样的测试数据。

3 剪切试验结果分析

3.1 试样参数偏差敏感性分析

模拟月球冻土的强度受到含水率、密度、温度等因素的复杂非线性关系影响, 且试验过程中不一定能够保证上述参数符合正态分布。剪切试验所需要的试样数量较多, 如果试样参数的实际值与名义值之间的偏差过大, 可能因特定的数据分布特征而影响试验结果的表征。

本文试验的目标之一是尽量提高数据质量, 控制试样参数的偏差对试样的强度不构成显著影响, 因此分4种不同含水率组别对137个试样的破坏载荷与其模具倾角、含水率、干密度、破坏温度间的相关系数进行了计算。由于模具倾角与破坏温度参数不符合正态性分布假设, 采用Spearman相关系数进行计算, 结果如表5所示。

表 5 破坏载荷与试样参数的相关系数表

Table 5 Correlation coefficients between axial load and sample parameters

参数	名义含水率			
	4 wt%	6 wt%	8.5 wt%	10 wt%
模具倾角	0.887 1*	0.937 2*	0.967 2*	0.902 7*
含水率	0.403 3	0.354 5	0.078 4	0.449 9
干密度	0.107 3	0.273 8	0.156 9	0.141 0
破坏温度	0.624 8	-0.019 4	0.390 6	0.346 4

根据如表6所示的相关系数大小与相关性解释的经验法则^[23], 可以看出所制备的试样含水率、干密度参数在其偏差范围内与试样破坏载荷的相关性低。部分组别的破坏温度相关系数存在异常偏高的正相关性, 这主要是因为随模具倾角增大, 试样破坏所需的载荷增大, 且剪断面正应力增大导致模拟月球冻土的脆性降低、延性增加, 试样的破坏时间稍微增长, 即破坏

温度与模具倾角两项参数之间存在一定的共线性。但在模具倾角与破坏载荷之间存在极高相关性的情况下，破坏温度与破坏载荷间最高也仅达到了中等相关性

表 6 解释相关系数大小的经验法则

Table 6 Rule for interpreting the size of correlation coefficient

相关系数 r	解释
0.9~1.0	极高相关性
0.7~0.9	高相关性
0.5~0.7	中等相关性
0.3~0.5	低相关性
0.0~0.3	几乎不相关

性，一定程度上也可以说明本次试验试样破坏温度范围内的偏差对试样强度的影响较小。因此可以得出结论：文本试验对试样物理参数实现了较好的控制，在试样参数偏差范围内对模拟月球冻土试样的强度影响较小，冻土材料固有的离散性在强度变化中占主导原因。

3.2 试样破坏模式分析

变角剪切试验中，压力机压头在4种不同含水率试样下的典型载荷-位移曲线如图11所示，试样破坏时剪断面上的应力如图12所示，其中正应力 σ 与切应力 τ 由试样的破坏载荷和实测剪断面尺寸按式(2)计算得出。

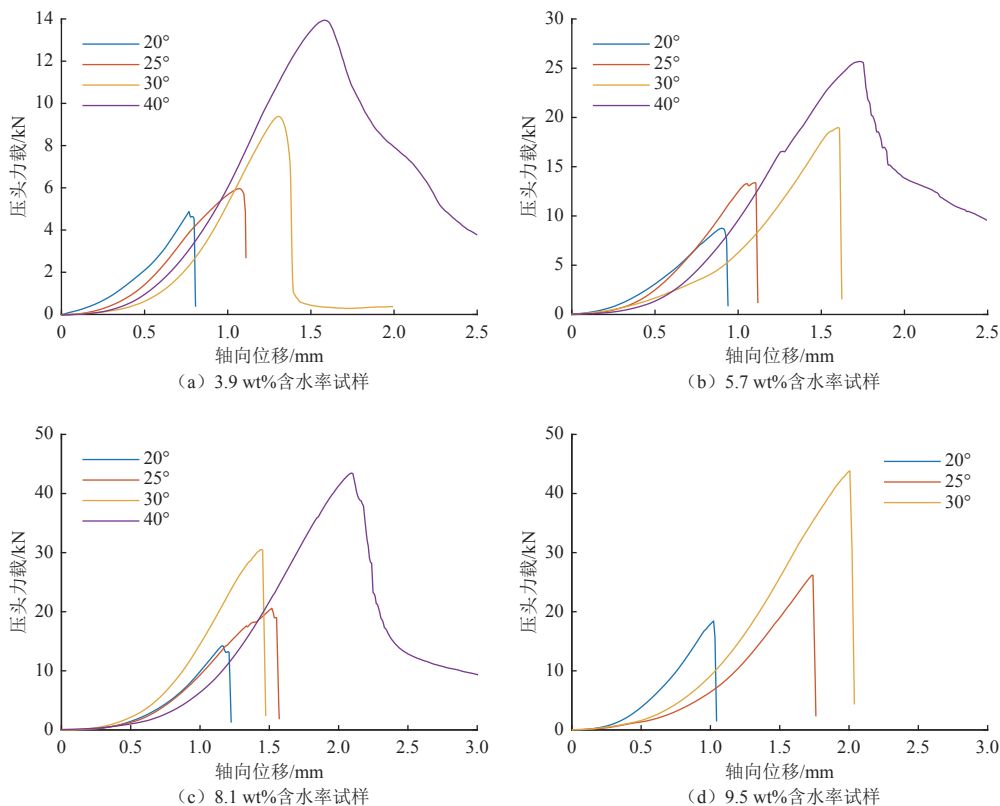
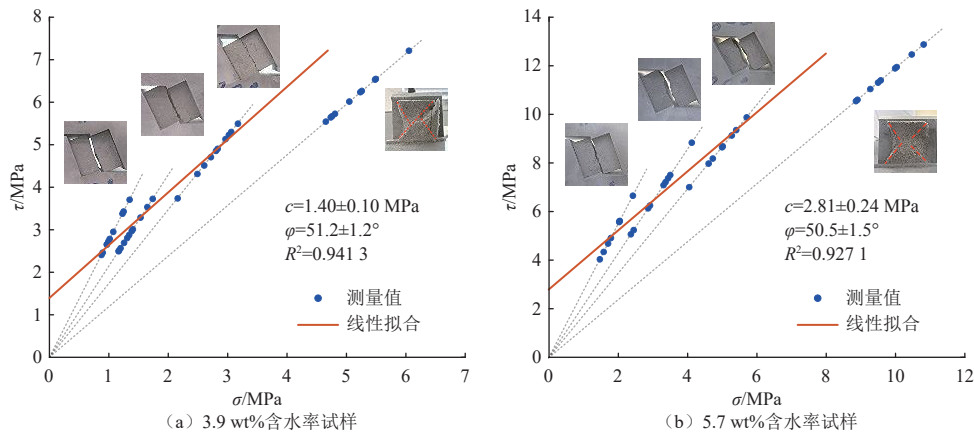


图 11 模拟月球冻土变角剪切试验载荷-位移曲线

Fig. 11 Load-displacement curve of ILR simulant in variable-angle shear test



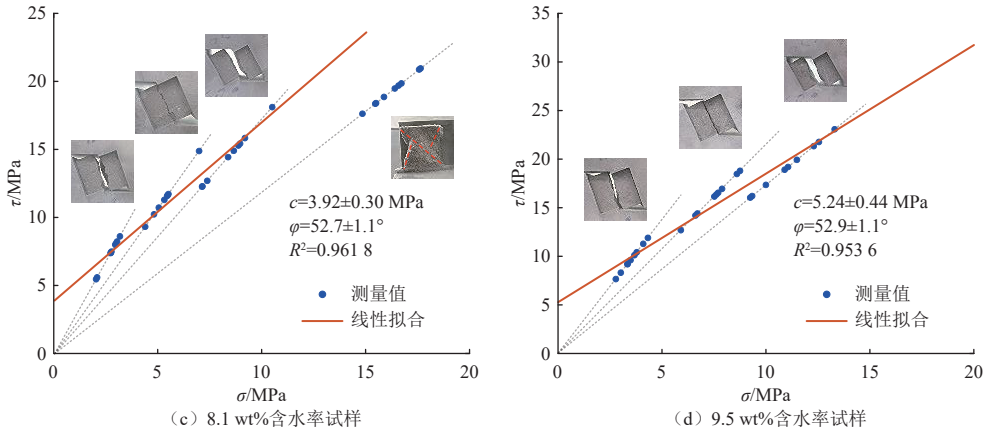


图 12 模拟月球冻土变角剪切试验破坏应力

Fig. 12 Damage stress of ILR simulant in variable-angle shear test

如图11所示, 4种含水率的模拟月球冻土试样在20°、25°、30° 3种模具倾角条件下的压头载荷-位移曲线均呈现显著的脆性断裂破坏特点, 在载荷峰值点以前力-位移曲线基本呈线性特点, 并在达到峰值点载荷后迅速降低, 试样完全剪断。根据试样的断口形态(如图12所示)分析, 试样均是沿预定的剪断面破坏, 断口平整, 符合剪切破坏的典型特征, 因此可以按式(2)计算剪断面上的正应力和剪应力, 从而按莫尔-库伦准则计算剪切强度参数。

而对于在40°倾角模具中破坏的试样, 其力-位移曲线的特征与小倾角模具情况下的曲线出现了明显区别, 在越过载荷峰值点后并未迅速降低, 而是出现了一定的残余强度, 说明此时试样的脆度降低、延性增加, 其破坏已不是完全的脆性断裂。试样的断口形态如图13所示, 试样的主要断面随主应力方向发生了偏转, 不再与设计的剪断面重合, 此外在压力载荷作用下还出现了典型的“X”形共轭破裂带, 导致试样两侧出现了四棱锥形状的剥离碎块, 呈现典型的压缩破坏特征, 说明加载方向上的压应力开始主导试样的破坏。此时冻土试样的破坏不再适合采用莫尔-库伦剪切破坏理论解释, 而应该改为采用三轴强度理论解释。

月球冻土在20°、25°、30° 3种模具倾角下破坏时, 剪断面上的正应力与切应力基本符合线性关系, 且拟合线与σ轴的夹角(即内摩擦角)都在50°左右, 这与40°倾角模具的应力加载路径线几乎平行。与前3种倾角的剪切强度数据相比, 40°倾角模具下的破坏切应力显著偏离拟合线, 这说明在较高正应力水平下, 模拟月球冻土的剪切强度降低。

许多学者曾对不同土质的地球冻土在不同围压状态提出过多种冻土三轴强度屈服准则, 如低围压下符合莫尔-库伦线性屈服准则, 中高围压下冻结砂土的强度随围压呈抛物线屈服准则^[24]。从试验结果来看, 处于-180 °C深低温条件下的模拟月球冻土也符合这一特征, 即低围压时近似符合直线型莫尔-库伦准则, 而高围压时强度包络线向下弯曲。但从剪切试验结果来看, 月球冻土在低围压下的破坏与地球冻土也存在两方面主要区别: ①在加载过程中, 月球冻土呈现明显的线弹性力-位移关系, 与地球冻土通常具有的弹塑性、黏弹性本构不同; ②在破坏时, 月球冻土存在强烈的脆性断裂特点, 与地球冻土延性脆性兼有的破坏模式不同。因此在后续对于月球冻土的切削、挖掘开采等研究中, 应重点关注其线弹性本构、硬脆性破坏的特点。

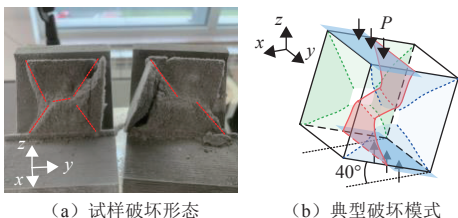


图 13 40°倾角模具中的试样破坏形态

Fig. 13 Failure morphology of specimen in a 40° mould

进一步分析不同模具角度下试样破坏的应力。如图12(a)~(c)所示, 3.9~8.1 wt%含水率的模拟

3.3 试样剪切强度分析

3.3.1 低围压下剪切强度参数拟合

由于40°模具倾角条件下, 试样发生了较为复杂的压剪复合破坏, 而非仅在剪断面上由面内正应力和切应力引起破坏。因此, 仅选取20°、25°、30° 3个角度的应力数据, 按直线型莫尔-库伦准则公式拟合模拟月球冻土的剪切强度包络线, 给出低围压下模拟月球冻土剪断面上的内聚力和摩擦角。分别按式(3)和式(4)对内聚力c和内摩擦角φ进行拟合, 结果汇总如表7

所示, 其中拟合结果以“最优拟合值 ± 1 倍标准差”的形式给出。

表 7 模拟月球冻土剪切强度拟合结果

含水率/wt%	内聚力/MPa	内摩擦角/($^{\circ}$)
3.9	1.40 \pm 0.10	51.2 \pm 1.2
5.7	2.81 \pm 0.24	50.5 \pm 1.5
8.1	3.92 \pm 0.30	52.7 \pm 1.1
9.5	5.24 \pm 0.44	52.9 \pm 1.1

3.3.2 剪切强度随含水率的变化关系

不同含水率试样剪切强度参数随含水率的变化关系如图14所示, 可见模拟月球冻土的内聚力随含水率基本呈线性变化关系, 而内摩擦角基本不随含水率变化, 这一规律与文献[25]对模拟月球冻土在 $-5\sim-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内获得的试验结果相似。

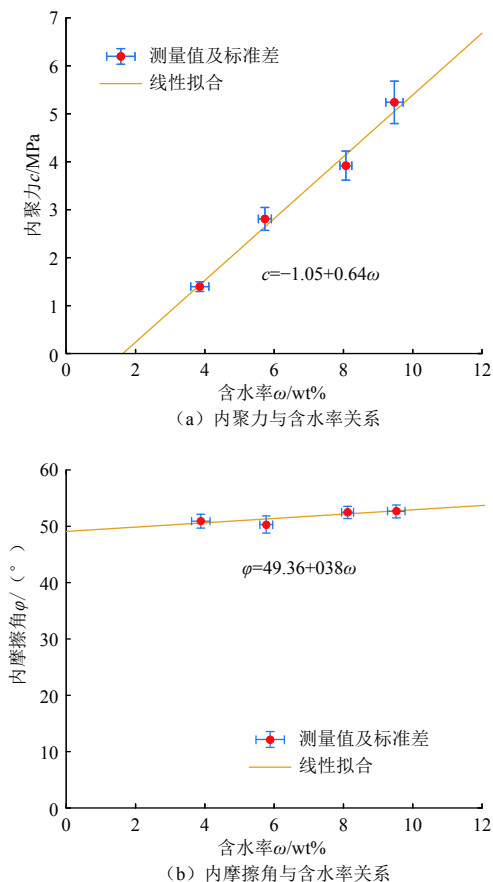


图 14 低正应力下模拟月球冻土剪切强度参数与含水率关系

Fig. 14 Relationship between shear strength parameters and water content of ILR simulant under low normal pressure

由于本文试验中不同试样间的含水率有一定偏差, 且内聚力、内摩擦角参数经拟合计算得出, 存在一定的不确定度。因此, 对两个剪切强度参数随含水

率的变化关系进行拟合时, 采用可以将自变量和因变量的不确定度都考虑在内的York线性回归算法, 将含水率、内聚力和内摩擦角的标准差作为各参数的不确定度计算得出拟合直线。在本文如表4所示参数的限定范围内, 内聚力 c 随含水率 ω 变化的关系可以按式(5)进行拟合

$$c \text{ (MPa)} = -1.05 + 0.64 \times \omega \text{ (wt\%)} \quad (5)$$

而内摩擦角 φ 可以按式(6)进行拟合

$$\varphi \text{ (}^{\circ}\text{)} = 49.36 + 0.38 \times \omega \text{ (wt\%)} \quad (6)$$

或可简单取 $\varphi = 50^{\circ} \sim 53^{\circ}$ 。

与文献[10]中近似工况的结果相比, 本文获得的模拟月球冻土内聚力大小相近, 但内摩擦角偏大, 这可能是由于本文使用的模拟月壤原料粒径级配更粗, 增大了颗粒间力链的相互闭锁导致[26]。另外, 内聚力与含水率关系的拟合直线与横轴的交点大约在含水率2 wt%附近, 即低于2 wt%含水率时模拟月球冻土的内聚力在MPa水平上将降低到接近于0, 这与制备含水率 ≤ 2 wt%的试样时, 试样难以成型的经验相符。此时模拟月壤中的含水过少, 水分难以在颗粒间形成液桥, 无法以胶结作用将颗粒冻结在一起。因此, 低于2 wt%含水率月壤的内聚力可以参考高密度无水月壤的内聚力取值, 大约在1~10 kPa量级[18]; 而内摩擦角可沿用 50° 左右的取值, 也在高密度无水月壤的内摩擦角取值范围内。

4 结论

本文为获取月球冻土的剪切强度特性, 从月球极区永久阴影区环境特性出发, 分析了月球冻土的矿物成分、粒径分布、干密度、含水率、温度等物理参数取值的选取依据、提出了月球冻土的模拟方法和试样物理参数检测方法; 以斜长质和玄武质2种模拟月壤按质量分数和粒径级配混合作为原料, 制备了干密度 1.71 g/cm^3 (相对密实度100%), 含水率3.7~9.5 wt%, 温度低于 $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的月球冻土模拟样本。采用变角剪切方法开展了模拟月球冻土的剪切强度试验, 获得以下结论:

1) 根据模拟月球冻土强度与试样物理参数的相关性分析, 本文提出的试样制备与检测方法能够实现试样物理参数的准确控制, 提高试验数据质量;

2) 模拟月球冻土在低围压下的剪切破坏模式以剪断面上的脆性断裂为主, 随围压升高, 模拟月球冻土的脆性降低、延性增加, 破坏模式转变为整体压剪破坏, 表观剪切强度下降;

3) 对4种含水率的模拟月球冻土在低围压下的内聚力、内摩擦角按直线型莫尔-库伦准则进行了拟合计算, 结果显示内聚力随含水率增加而近似线性增加, 内摩擦角基本不随含水率变化, 取值为 $50^{\circ}\sim 53^{\circ}$ 。

参 考 文 献

- [1] 吴伟仁, 于登云, 王赤, 等. 月球极区探测的主要科学与技术问题研究[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(3): 223-231.
WU W R, YU D Y, WANG C, et al. Research on the main scientific and technological issues on lunar polar exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(3): 223-231.
- [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. Research progress of lunar surface waterice detection and occurrence form[J]. Vacuum and Cryogenics, 2021, 27(6): 589-600.
- [3] WILLIAMS J P, GREENHAGEN B T, PAIGE D A, et al. Seasonal polar temperatures on the Moon[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2019, 124(10): 2505-2521.
- [4] GERTSCH L S, ROSTAMI J, GUSTAFSON R. Review of lunar regolith properties for design of low power lunar excavators[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. Arlington, VA: [s. n.]: 2008.
- [5] ATKINSON J, ZACNY K. Mechanical properties of icy lunar regolith: Application to ISRU on the moon and mars[C]//Proceedings of Earth and Space 2018: Engineering for Extreme Environments. Reston, VA: [s. n.]: 2018.
- [6] PITCHER C, KÖMLE N, LEIBNIZ O, et al. Investigation of the properties of icy lunar polar regolith simulants[J]. Advances in Space Research, 2016, 57(5): 1197-1208.
- [7] 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.
- [8] 李龙, 周琴, 张凯, 等. 冻土机械切削破碎机理的研究进展[J]. 冰川冻土, 2021, 43(2): 638-649.
LI L, ZHOU Q, ZHANG K, et al. Research progress on mechanical cutting fracture mechanism of frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(2): 638-649.
- [9] 郑国敬, 周琴, 张凯, 等. 单齿回转切削力学模型的研究进展[J]. 煤炭学报, 2018, 43(S2): 573-580.
ZHENG G J, ZHOU Q, ZHANG K, et al. Advances and trends in the study on rotary cutting mechanical model of single cutter[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(S2): 573-580.
- [10] 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, WANG E, 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.
- [11] 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.
- [12] SUN X, ZHANG R, LI X, et al. JLU-H: a novel lunar highland regolith simulant for use in large-scale engineering experiments[J]. Planetary and Space Science, 2022, 221: 105562.
- [13] 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.
LI J Q, ZOU M, JIA Y, et al. Lunar soil simulant for vehicle-terramechanics research in labtory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1557-1561.
- [14] HE X, XIAO L, HUANG J, et al. Lunar regolith simulant CUG-1A[C]//Proceedings of the 41st Annual Lunar and Planetary Science Conference. The Woodlands, Texas: [s. n.]: 2010.
- [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] BUTLER J C, GREENE G M, KING JR E A. Grain size frequency distributions and modal analyses of Apollo 16 fines[C]//Porceedings of the Fourth Lunar Science Conference (LSC 1973). Houston, Texas: 1973.
- [17] HEIKEN G H, VANIMAN D T, FRENCH B M. Lunar Sourcebook: a user's guide to the Moon[M]. Cambridge: Cambridge University Press. 1991.
- [18] 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. Overview of water ice sampling and detection techniques in the lunar polar region[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(2): 101-113.
- [19] COLAPRETE A, SCHULTZ P, HELDMANN J, et al. Detection of water in the LCROSS ejecta plume[J]. Science, 2010, 330(6003): 463-468.
- [20] ANDREAS E L. New estimates for the sublimation rate for ice on the Moon[J]. Icarus, 2007, 186(1): 24-30.
- [21] PAIGE D A, SIEGLER M A, ZHANG J A, et al. Diviner lunar radiometer observations of cold traps in the Moon's south polar region[J]. Science, 2010, 330(6003): 479-482.
- [22] DU K, LI X, WANG S, et al. Compression-shear failure properties and acoustic emission (AE) characteristics of rocks in variable angle shear and direct shear tests[J]. Measurement, 2021, 183: 109814.
- [23] ASUERO A G, SAYAGO A, GONZÁLEZ A G. The correlation coefficient: an overview[J]. Critical Reviews in Analytical Chemistry, 2006, 36(1): 41-59.
- [24] 朱志武, 宁建国, 马巍. 冻土屈服面与屈服准则的研究[J]. 固体力学学报, 2006(3): 307-310.
ZHU Z W, NING J G, MA W. Study on yield surface and yield criterion of frozen soil[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2006(3): 307-310.
- [25] 周兆曦, 马芹永. 负温下模拟月壤三轴压缩试验与分析[J]. 合肥学院学报(综合版), 2022, 39(2): 26-31.
ZHOU Z X, MA Q Y. Triaxial compression test and analysis of simulated lunar soil at negative temperature[J]. Journal of Hefei University (Comprehensive Edition). 2022, 39(2): 26-31.
- [26] WANG Y, FENG W K, LI C H, et al. An investigation into the effects of block size on the mechanical behaviors of bimsoils using variable-angle shear experiments[J]. Environmental Earth Sciences, 2020, 79(3): 1-13.

作者简介:

季节(1995-),男,博士研究生,主要研究方向:地外天体采样探测技术。

通信地址:北京市海淀区友谊路104号院(100094)

电话:(010)68745726

E-mail:jjjie2849@163.com

刘雅芳(1986-),女,高级工程师,主要研究方向:地外天体采样探测、星表智能作业机器人等。本文通信作者。

通信地址:北京市海淀区友谊路104号院(100094)

电话:(010)68746741

E-mail:234281099@qq.com

Simulation of Icy Lunar Regolith and Experiment on Its Shear Strength

JI Jie¹, WANG Xiaoguang¹, XIAO Junxiao², XIAO Tao³, ZHANG Weiwei², WANG Chu¹, MA Jinan¹,
LIU Yafang¹, SUN Jing⁴, JIANG Shengyuan²

(1. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;

2. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

3. Institute of Remote Sensing Satellite, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;

4. China Satellite Communications Co., Ltd., Beijing 100190, China)

Abstract: In order to obtain the shear strength of Icy Lunar Regolith (ILR) in the Permanently Shadowed Region (PSR) of the Moon, the physical properties of ILR such as mineral composition, particle size distribution, dry density, water content and deposition temperature were analyzed, and a method for ILR simulant preparing and parameters testing was proposed. Based on the Variable-Angle Shear Test (VAST) method, shear strength tests of ILR simulant were conducted with a mixed raw material made of anorthosite and basalt, dry density of 1.71g/cm^3 (i.e. 100% relative density), water content from 3.7 wt% to 9.5 wt%, and temperature below -180°C . The result shows that the shear damage mode of the ILR simulant under low confining pressure is dominated by brittle fracture on the shear surface, but with the increase of the confining pressure, the brittleness of the ILR decreases and the ductility increases. In this case, its damage mode changes to compression-shear damage, and the shear strength decreases. The shear strength parameters of the ILR simulant under low confining pressure were calculated according to the linear Mohr-Coulomb criterion. The results show that the cohesion increases linearly with the increase of water content, but the internal friction angle hardly varies with water content, with values between 50° and 53° .

Keywords: Icy Lunar Regolith (ILR); Lunar Regolith Simulant (LRS); Variable-Angle Shear Test (VAST); shear strength; Mohr-Coulomb theory

Highlights:

- A preparation method for simulant of icy lunar regolith is proposed.
- Shear strength tests of icy lunar regolith simulant under extreme low temperature are carried out.
- The cohesion of icy lunar regolith increases linearly with increasing water content, with an internal friction angle of $50^\circ\sim 53^\circ$.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]