

DOI: 10.11779/CJGE2023S10039

磁性高钛模拟月壤 IRSM-1 的研制及其性质研究

周宁希^{1,2}, 陈 健^{*1,2,3,4}, 黄珏皓^{1,2}, 田 宁^{1,2}, 吴 鹏^{1,2}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 湖北省环境岩土工程重点实验室, 湖北 武汉 430071; 4. 中国-巴基斯坦地球科学研究中心, 伊斯兰堡)

摘要: 对月球的探测已进入以月球原位资源利用 (ISRU) 为主的新阶段, 系统掌握月壤特殊的力学响应与工程特性对月球资源开发利用具有重要意义。迄今为止, 绝大多数针对月壤及模拟月壤性质的试验研究都是在地球上开展的, 忽略了月面环境, 尤其是低重力环境对这些性质的影响。地质力学磁力模型试验可以结合磁性相似材料模拟月面 $g/6$ 的低重力环境。由于目前已有的模拟月壤磁性极弱, 无法满足磁力模型试验的要求。因此, 研制了一种具有一定磁性的高钛模拟月壤 IRSM-1 并测试了该模拟月壤的成分及性质。将测试结果与部分月壤及模拟月壤的性质进行了对比分析。结果表明: IRSM-1 模拟月壤的化学矿物成分与高钛月壤相似, 其物理力学特性在月壤的范围之内, 较好地还原了真实月壤的基本特性。此外, IRSM-1 还具有一定的磁性, 可以作为磁力模型试验的相似材料。

关键词: 月球原位资源利用; 月壤; 地质力学磁力模型试验; IRSM-1 模拟月壤

中图分类号: TU43; U45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)S1-0110-04

作者简介: 周宁希(1999—), 男, 博士研究生, 主要从事月壤及模拟月壤力学性质方面的研究工作。E-mail: zhouningxi20@mails.ucas.ac.cn。

Development and properties of a magnetic high-titanium lunar regolith simulant IRSM-1

ZHOU Ningxi^{1,2}, CHEN Jian^{1,2,3,4}, HUANG Juehao^{1,2}, TIAN Ning^{1,2}, WU Peng^{1,2}

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Hubei Key Laboratory of Geo-Environmental Engineering, Wuhan 430071, China; 4. China-Pakistan Joint Research Center on Earth Sciences, Islamabad, Pakistan)

Abstract: The moon exploration has progressed into the stage of in-situ resource utilization (ISRU). Systematically understanding the unique mechanical response and engineering characteristics of the lunar regolith is crucial for the development and exploitation of lunar resources. Most experimental studies on the properties of lunar regolith and its simulants have been conducted on Earth, disregarding the impact of lunar environment, particularly the low gravity, on these properties. The geomechanical magnetic model test, which uses magnetic similar materials, can simulate the low-gravity environment of the lunar surface. However, the existing lunar regolith simulants have weak magnetism and cannot meet the requirements of the magnetic model tests. Thus, a high-titanium lunar simulant IRSM-1 with magnetic properties is introduced, and its composition and properties are tested. The test results are then compared with those of some lunar regolith and existing simulants. The findings reveal that the chemical and mineral compositions of the IRSM-1 simulant is similar to those of the high-titanium lunar regolith, and their physical and mechanical properties are within the range of lunar regolith, which accurately replicates the fundamental characteristics of the real lunar regolith. Moreover, the IRSM-1 simulant has certain magnetism and can be employed as a similar material for magnetic model tests.

Key words: in-situ resource utilization; lunar regolith; geomechanical magnetic model test; IRSM-1 lunar regolith simulant

0 引言

21 世纪以来, 月球在经济、军事和科研方面的战略价值日益凸显, 人类正迎来月球探测复兴潮。美国国家宇航局在 2019 年提出了“Artemis”项目, 计划在 2028 年建立月球基地。2021 年, 中国和俄罗斯正

式启动了国际月球科研站 (ILRS) 建设项目的合作。

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFF0500301); 国家自然科学基金项目 (52079135, 51909259)

收稿日期: 2023-07-06

*通信作者 (E-mail: jchen@whrsm.ac.cn)

此外, 日本、印度、以色列等国家先后加入月球探测的行列, 月球正成为各国太空战略新的聚焦点。

月壤是在氧气、水、风都不存在的情况下, 经过陨石和微陨石撞击、太阳风粒子轰击、月岩热胀冷缩破裂这 3 个过程共同作用而形成的^[1-2]。特殊的形成过程导致月壤具有特殊的颗粒形态及性质, 使其物理力学特性与地球土壤具有显著不同。由于真实月壤样品十分珍贵稀少, 其数量难以满足岩土工程试验的需要。目前国内外大多采用模拟月壤代替真实月壤进行相关的试验研究。根据二氧化钛 (TiO_2) 的含量可以将模拟月壤分为低钛和高钛模拟月壤。其中, 低钛模拟月壤通常参照 Apollo14、15 号月壤样品制备而成, 如美国的 JSC-1^[3], 日本的 FJS-1^[3]、韩国的 KLS-1^[4]以及中国的 CAS-1^[3]、TJ-1^[5]等。高钛模拟月壤通常参照 Apollo11、17 号月壤样品制备而成, 如美国的 MLS-1, 中国的 NAO-3^[3]等。

目前针对月壤及模拟月壤性质的试验研究几乎都是在地球上开展的, 忽略了月面低重力环境对这些性质的影响。罗先启等^[6]提出了地质力学磁力模型试验方法, 结合磁性相似材料可以模拟非常规重力场环境。Li 等^[7]通过设计磁体结构及其附属模块, 实现了月面 $g/6$ 低重力场的模拟。目前的大部分模拟月壤磁性极弱, 无法满足地质力学磁力模型试验对相似材料磁性的要求。因此, 本文借鉴 Li 等^[7]制备模拟月壤的思路, 在已有制备工艺的基础上, 以火山灰和钛磁铁矿为原料, 经过高温烧结和机械破碎等工序制备了一种具有磁性的高钛模拟月壤 IRSM-1。测试了 IRSM-1 模拟月壤的成分以及物理力学特性, 并将测试结果与部分月壤及模拟月壤的相应特性进行了对比。结果表明 IRSM-1 模拟月壤较好地还原了真实月壤的成分及性质, 可以用于月壤的岩土工程性质研究。

1 IRSM-1 模拟月壤的制备

1.1 原材料

制备模拟月壤 IRSM-1 所使用的原材料为: 以玄武质火山灰作为主体原料, 钛磁铁矿为次要原料, 碳酸氢铵 (NH_4HCO_3) 作为造孔剂。

火山灰是广泛使用的制备模拟月壤的原材料; 此外, 由于钛磁铁矿具有较强的磁性, 且其成分与月壤类似, 因此作为次要原料。通过 X 射线衍射和荧光光谱分析获取了上述原料的成分, 分别见表 1, 2。

原料碳酸氢铵作为造孔剂, 它在高温下可以完全分解为二氧化碳、氨气和水蒸气挥发, 不会污染试样的同时还可以使制备的模拟月壤具备复杂的颗粒形状, 更好的还原真实月壤颗粒极不规则的形态。

表 1 原材料及月壤矿物成分

Table 1 Mineralogical compositions of materials and lunar regolith

名称	矿物成分
火山灰	斜长石、辉石、橄榄石等
钛磁铁矿	钛铁矿、磁铁矿、辉石等
IRSM-1	斜长石、辉石、钛铁矿、磁铁矿等
Apollo 17 样品 ^[2]	斜长石、辉石、钛铁矿、玻璃等

表 2 原材料及月壤化学成分

Table 2 Chemical compositions of raw materials and lunar regolith

化学成分	火山灰	钛磁铁矿 [*]	月壤样品 71, 061 ^[3]	Apollo 17a ^[2]	IRSM-1
SiO_2	49.41	11.99	40.09	41.2	40.24
TiO_2	3.24	24.73	9.32	8.40	8.95
Al_2O_3	18.00	4.82	10.70	12.0	14.89
FeO	13.39	41.42	17.85	16.7	23.19
MnO	0.18	0.33	0.24	0.23	0.27
MgO	3.38	8.89	9.92	9.90	3.53
CaO	6.70	3.23	10.59	10.9	6.26
Na_2O	2.14	0.21	0.36	0.35	—
K_2O	2.50	0.01	0.08	0.16	1.87
P_2O_5	0.62	0.03	0.07	0.14	0.30
S	0.14	4.05	0.13	0.12	1.31
总计	99.69	99.69	99.35	100.1	99.69

1.2 制备流程

磁性高钛模拟月壤 IRSM-1 的制备参考文献[7], 其流程如图 1 所示, 可以分为如下 6 步:

(1) 使用破碎机对原料火山渣与钛磁铁矿初步破碎后使用行星式球磨机将火山灰与磁铁矿粉末充分研磨, 直至其粒径小于 $75\ \mu m$ 。

(2) 研磨后的火山灰、磁铁矿粉末以及碳酸氢铵按照 $7:3:5$ 的质量比混合均匀。该比例是在 Li 等^[7]给出的比例的基础上, 经过多次试验确定的。

(3) 将上述原料混合物分层加入模具中并利用万能试验机压制成直径 $50\ mm$, 高度 $80\ mm$ 的圆柱体。

(4) 将成型的圆柱试样放入坩埚, 置于管式炉恒温区域, 在最高 $1100^\circ C$ 以及氩气气氛下高温烧结。

(5) 烧结完成后, 使用石工锤以及行星式球磨机对其进行破碎, 将破碎后的颗粒在振筛机上筛分成粒径不同的粒组。

(6) 将筛分后的各粒组按照月壤的级配曲线混合均匀, 在烘箱中干燥 $12\ h$ 后密封保存, 即可制得磁性高钛模拟月壤 IRSM-1。

2 IRSM-1 模拟月壤性质对比分析

2.1 化学矿物成分

通过 X 射线衍射和荧光光谱分析获取了 IRSM-1 模拟月壤的矿物和化学成分, 分别见表 1, 2。从表 1 可知, IRSM-1 的主要矿物成分为斜长石、辉石、钛铁矿、磁铁矿等。化学成分上, IRSM-1 主要由 SiO_2 、 Al_2O_3 、 FeO 、 TiO_2 等组成, 其中 TiO_2 的含量高达 9.69% 。可以发现, IRSM-1 模拟月壤与 Apollo11、17 号采样

点的高钛月壤具有相似的成分。

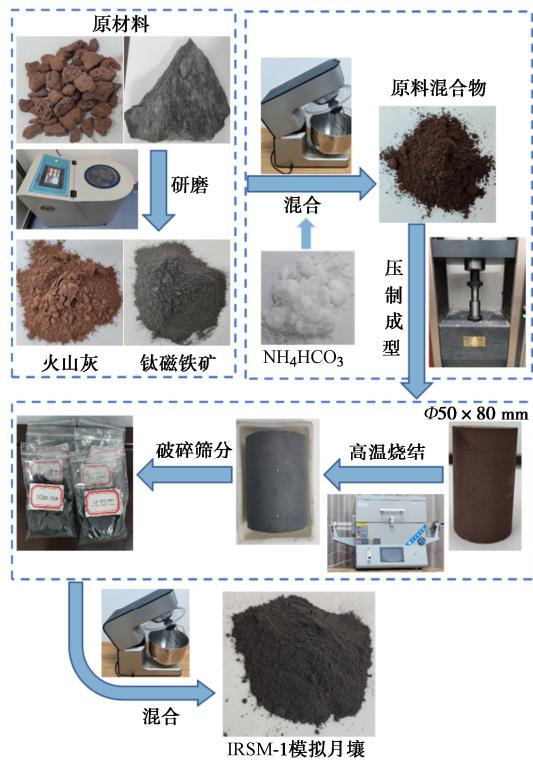


图 1 IRSM-1 模拟月壤制备流程

Fig. 1 Manufacture process of IRSM-1 lunar regolith simulant

2.2 颗粒形态与级配

图 2 给出了 IRSM-1 颗粒的扫描电镜图。可见, IRSM-1 具有复杂的颗粒形态, 除了长条状以及棱角状外, 还存在呈现凹凸、勾角状的熔融胶结异形颗粒, 较好地还原了真实月壤的颗粒形状。

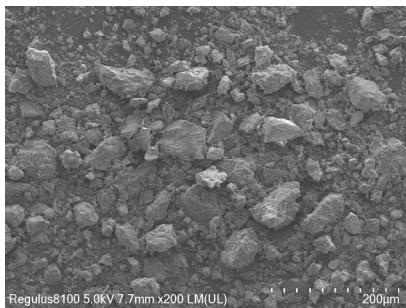


图 2 IRSM-1 颗粒扫描电镜图

Fig. 2 Scanning electron microscope images of IRSM-1 simulant

通过筛析法和密度计法测试了 IRSM-1 的颗粒级配, 级配曲线如图 3 所示。IRSM-1 模拟月壤的中值粒径、不均匀系数、曲率系数分别为 $70 \mu\text{m}$, 10.0 , 0.80 , 而月壤样的上述值分别为 $72 \mu\text{m}$, 16.0 , 1.20 ^[7]。可以发现 IRSM-1 可以较好地模拟月壤的级配特征。

2.3 相对质量密度、密度及孔隙比

通过比重瓶法测试了 IRSM-1 模拟月壤的相对质量密度为 3.26 , 位于 $2.9\sim3.4$ ^[1] 的真实月壤相对质量密度范围内。IRSM-1 的最大、最小干密度分别为 1.99 ,

1.26 g/cm^3 。表 3 给出了 IRSM-1 与部分月壤的密度、孔隙比及相对质量密度的对比。从表 3 中可知, IRSM-1 模拟月壤的相对质量密度、最大和最小干密度以及孔隙比均位于真实月壤的范围之内。

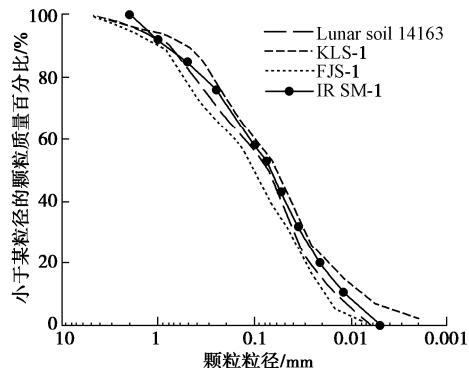


图 3 月壤样品及部分模拟月壤颗粒级配曲线

Fig. 3 Grain-size distribution curves of lunar regolith and its simulants

表 3 IRSM-1 与部分月壤的相对质量密度、密度和孔隙比
Table 3 Comparison of specific gravity, density and void ratio

名称	相对质量密度	密度/(g·m ⁻³)		孔隙比	
		ρ_{\min}	ρ_{\max}	e_{\min}	e_{\max}
IRSM-1	3.26	1.26	1.99	0.64	1.59
Apollo 11	3.10	1.36	1.80	0.67	1.39
Apollo 14	2.93	0.87	1.60	0.87	2.37
Apollo 15	3.24	1.10	1.93	0.71	1.94
Apollo 17		1.57	2.29		

2.4 力学特性

通过三轴压缩和固结试验研究了 IRSM-1 模拟月壤的抗剪强度和压缩性。三轴试样直径 38 mm , 高 76 mm , 相对密实度为 83% , 对应的干密度为 1.81 g/cm^3 。设置 30 , 50 , 100 , 150 kPa 四种围压。固结压缩试验通过固结仪完成, 试样直径 61.8 mm , 高 20 mm 。制备了相对密实度分别为 35% , 58% , 75% 的 3 组试样并在一系列高达 400 kPa 的固结压力下开展压缩试验。

图 4 给出了 IRSM-1 模拟月壤在三轴压缩条件下的应力-应变曲线。从图中可知, 当围压从 30 kPa 增加到 150 kPa 时, IRSM-1 模拟月壤的偏应力峰值从 189 kPa 增加到 713 kPa , 且在出现峰值偏应力后均表现出应变软化特性。根据 Mohr-Coulomb 强度准则绘制莫尔圆及强度包线后可得 IRSM-1 的黏聚力为 0.90 kPa , 内摩擦角为 44.34° 。图 5 给出了 IRSM-1 在不同相对密实度下孔隙比与固结压力之间的关系, 计算其压缩指数分别为 0.13 , 0.092 , 0.036 。

表 4 给出了部分月壤及模拟月壤的抗剪强度和压缩指数对比。可以看出, IRSM-1 较好地还原了真实月壤的力学特性, 可以用于月壤的岩土工程性质研究。

2.5 磁性

使用振动样品磁强计测试了 3 种不同四氧化三铁含量的 IRSM-1 样品的磁性, 如图 6 所示。当磁场强

度为 225 kA/m 时, Fe_3O_4 含量为 0%, 20%, 30% 的 IRSM-1 样品的比磁化强度分别为 11.0, 23.4, 30.5 $\text{A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ 。可以发现, IRSM-1 具有一定的磁性。

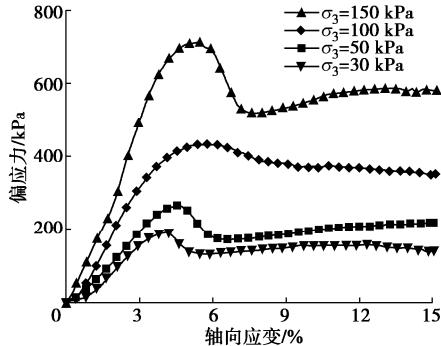


图 4 IRSM-1 模拟月壤三轴压缩条件下的应力应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of IRSM-1 under triaxial compression

表 4 IRSM-1 及其它模拟月壤的力学特性

Table 4 Mechanical properties of IRSM-1 and other simulants

名称	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩指数 C_c
IRSM-1	0.90	44.34	0.036~0.13
月壤	0.3~2.1	35~47	0.05~0.3
TJ-1	0.86	47.6	0.086
KLS-1	1.85	44.91	0.29

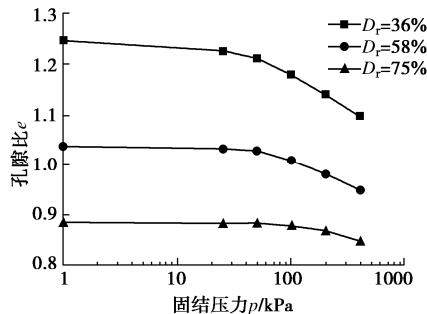


图 5 不同相对密实度下 IRSM-1 模拟月壤的压缩曲线

Fig. 5 Compression curves of IRSM-1 at different relative densities

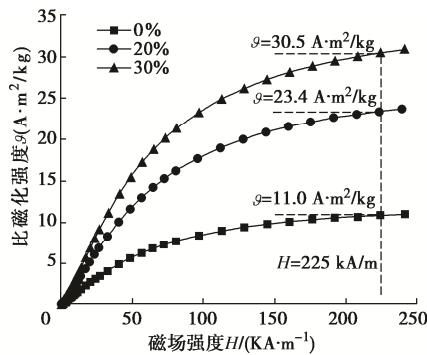


图 6 不同 Fe_3O_4 含量的 IRSM-1 模拟月壤磁化曲线

Fig. 6 Magnetization curves with different contents of Fe_3O_4

3 结 论

本文以火山灰及钛磁铁矿为原料, 经过高温烧结、碳酸氢铵造孔等工序制备了一种新型磁性高铁模拟月

壤 IRSM-1, 主要得出以下 3 点结论。

(1) IRSM-1 属于高铁模拟月壤, 其成分与 Apollo11、17 号采样点的高铁月壤相似。

(2) IRSM-1 模拟月壤的颗粒形态复杂, 含有长条状、棱角状以及熔融胶结颗粒, 其中值粒径、不均匀系数、曲率系数分别为 70 μm , 10.0, 0.80。其相对质量密度为 3.26, 最大、最小干密度分别为 1.99, 1.26 g/cm^3 。

(3) 相对密实度 83% 的 IRSM-1 模拟月壤黏聚力为 0.90 kPa, 内摩擦角为 44.34°。不同密实度下 IRSM-1 压缩指数分别为 0.13, 0.092, 0.036。

综上, IRSM-1 模拟月壤较好地还原了真实高铁月壤的化学及矿物成分、物理性质以及力学性质, 此外还具有一定的磁性, 可以结合磁力模型试验模拟月面 $g/6$ 的低重力环境。IRSM-1 可用于研究月壤的力学特性及工程响应, 为月球探测任务的顺利实施提供一定的参考及依据。

参 考 文 献:

- [1] HEIKEN G, VANIMAN D T, FRENCH B M. Lunar sourcebook: a user's guide to the moon[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
- [2] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005. (OUYANG Z Y. Introduction to lunar science[M]. Beijing: China Aerospace Publishing House, 2005. (in Chinese))
- [3] TOKLU Y C, AKPINAR P. Lunar soils, simulants and lunar construction materials: an overview[J]. Advances in Space Research, 2022, **70**(3): 762-779.
- [4] RYU B H, WANG C C, CHANG I. Development and geotechnical engineering properties of KLS-1 lunar simulant[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2018, **31**(1): 04017083.
- [5] JIANG M J, LI L Q, SUN Y G. Properties of TJ-1 lunar soil simulant[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2012, **25**(3): 463-469.
- [6] 罗先启, 毕金锋. 地质力学磁力模型试验原理及其在工程中的应用[J]. 岩土力学, 2018, **39**(1): 367-374. (LUO Xianqi, BI Jinfeng. Principle and engineering application of geomechanics magnetic model test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(1): 367-374. (in Chinese))
- [7] LI R L, ZHOU G Q, YAN K, et al. Preparation and characterization of a specialized lunar regolith simulant for use in lunar low gravity simulation[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2022, **32**(1): 1-15.

(编校: 孙振远)