

模拟月壤研究进展及CUG-1A 模拟月壤

贺新星^a, 肖龙^{a,b}, 黄俊^a, 何琦^a, 高睿^a, 杨刚^a

(中国地质大学a·地球科学学院; b·行星科学研究所, 武汉 430074)

摘要:利用我国东北部吉林省辉南县新生代火山岩为初始原料,初步研制了模拟月壤CUG-1A。在研究CUG-1A的化学性质的同时,重点研究了其物理力学性质。数据分析表明,CUG-1A与Apollo 14采样点的月壤样品有着相似的化学成分、矿物组成和物理力学性质,是一种理想的低钛型月海月壤的模拟样品。

关键词:模拟月壤; CUG-1A; 化学性质; 物理力学性质

中图分类号: P184

文献标志码: A

文章编号: 1000-7849(2011)04-0137-06

月壤是指分布于月球表面的一层厚达几米至几十米的松散的颗粒状、粉末状风化物,也包括少许直径较大的岩石,主要由岩石碎屑、矿物碎屑、玻璃质颗粒、角砾岩和黏合集块岩组成^[1]。月壤样品根据岩石类型可分为低钛月壤玄武岩、高钛月壤玄武岩、高地斜长岩和克里普玄武岩四大类。由于月表基岩的成分不均一性,使得不同区域的月壤组成具有明显差异。例如在月海地区,主要是玄武质高钛和低钛月壤;在月球高地地区则为斜长岩质月壤。月壤的厚度在不同的区域也有明显的差异,例如月海月壤的厚度一般为4~5 m,月球高地月壤厚度一般为10~15 m^[1-3]。月壤的颗粒粒度变化很大,从几微米到几十毫米不等,一般50%以上的颗粒粒径小于0.1 mm。月壤的形成主要受空间风化作用控制,其中陨石和微陨石的撞击起主导作用。由于月壤本身缺乏生物和化学作用,因此属于典型的无黏性土壤。月壤的这些特殊性质是地球表面任何物质所不具备的。

月壤是登月探测活动中最先接触的月球物质,它对着陆器、宇航员和所有在月面工作的仪器设备都有重要的影响。所以,开展探月活动的重要任务之一就是了解月壤的物理、化学和力学性质等,从而避免不必要的风险,保障航天任务的安全性^[3]。同时月壤也是月球科学研究的重要对象,因为它记录了月球的物质成分信息、月球撞击构造历史和太阳风作用的历史,并且月壤中含有丰富的稀有气体、钛铁矿、超微金属铁资源等,因此也是未来月表资源开发利用的主要对象^[1]。然而,由于实际月壤的稀

缺性和特殊性,研制模拟月壤并开展相关科学研究成为探月活动的重要工程需求之一。目前,世界上仅日本和美国拥有模拟月壤样品,而且美国在20世纪90年代初期就利用模拟月壤进行了大量的工程和机械试验,至今可供使用的模拟月壤数量不多。日本的模拟月壤样品在谱学和电学方面与实际月壤还存在较大的差异,很难满足月球遥感卫星有效载荷科学定标的需要。因此,大量的、能够应用到更多的具体科学目标试验中的、具有代表性的模拟月壤样品的研制成为了科学研究月球的关键。

我们研制了模拟月壤CUG-1A。在其化学组成类似于实际月壤的情况下,着重研究了模拟月壤CUG-1A的物理力学性质,使其更加接近于实际月壤,旨在为大量的工程性试验提供实验材料。鉴于月球表面取样返回是我国探月工程的重要目标,现阶段CUG-1A模拟月壤主要应用在月球表面钻机取样的模拟实验中,用于检验钻机在实际取样过程中的可靠性和稳定性,从而提高取样的成功性。因此,CUG-1A模拟月壤具有现实的意义。

1 模拟月壤的研制思路及现状

1.1 模拟月壤的研制思路与方法

模拟月壤是实际月壤的地球复制品。通过对Apollo Lunar 返回样品的研究可知,月壤样品的岩性主要有玄武岩、斜长岩、克里普岩3种;月壤中的矿物主要有斜长石、辉石、橄榄石、钛铁矿等,并且月壤中还含有大量玻璃质以及微陨石撞击熔融胶结所

收稿日期: 2010-09-11 编辑: 杨勇

基金项目: 国家自然科学基金项目(41072045)

作者简介: 贺新星(1987—),男,现正攻读矿物学、岩石学、矿床学专业硕士学位,主要从事岩石地球化学研究。E-mail: hxx_king01@163.com

通信作者: 肖龙(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事岩石学研究。E-mail: longxiao@cug.edu.cn

形成的黏结集块岩^[9]。因此,可以根据月壤的成分特征,在地球上寻找类似的岩石或者利用人工合成的矿物,按照一定的比率配制成与实际月壤类似的模拟样品。

目前,月壤模拟主要有两种常见的方法:一种为全岩样品的模拟,即在地球上寻找与月壤类似的岩石,通过对岩石进行粉碎,添加特定矿物,然后按照一定的比率配成与月壤类似的样品。由于月壤样品中含有大量的玻璃质,因此,全岩样品多来自于地球上强烈火山带附近的新鲜火山沉积物,这些沉积物与月壤物质十分相似,其中也含有大量的玻璃质,可以作为月壤模拟样品的原材料^[9]。此外,还可以利用ISSP(in flight sustained shock wave plasma reactor)对与月壤类似的地球岩石样品进行加热熔融,从而形成大量的玻璃质成分。另一种模拟方法为单矿物的模拟。月壤样品的平均矿物组成如表1所示,因此,可以利用一些从火成岩中分离出来或者人工合成的单矿物,按照实际月壤的平均组成配制成相应的模拟月壤样品。考虑到人工合成矿物需要大量的资金及先进的技术支持,目前月壤样品的全岩模拟方法较为普遍。

表1 Apollo 登月月壤平均矿物组成^[9]

Table 1 Mineral composition of average lunar soils at Apollo landing sites %/ %

样品	长石	橄榄石	辉石	不透明矿物
Apollo 11	26.7	3.2	53.7	16.3
Apollo 12	23.0	8.7	63.4	4.9
Apollo 14	49.7	1.8	47.0	1.5
Apollo 15	37.9	8.4	52.2	1.5
Apollo 16	69.0	2.6	28.2	0.1
Apollo 17	35.5	5.5	56.3	2.7

全岩模拟方法的主要程序如下:首先,将采集的原始样品烘干去湿(实际月壤中水的含量很少可忽略不计),并对样品进行粉碎筛分,粉碎的过程中应注意尽量减少外来物质的混染;接着将筛分后的不同粒度等级的颗粒继续进行干燥处理;然后,根据实际月壤粒度分布的特点^[6-10],将干燥后的不同粒度等级的颗粒按照一定的比率进行混合,使得混合后的样品颗粒粒径分布接近于实际月壤;同时,可向混

合物中加入一些特定的颗粒(如钛铁矿、磁铁矿、玻璃质等),使得混合物的化学成分和矿物组成与实际月壤更为接近;最后将这些样品装入密封的热封层塑料袋中,避免样品的泄露和污染。

1.2 模拟月壤的研制过程中需要注意的问题

模拟月壤样品不仅要在化学性质上与实际月壤类似,更要在物理力学性质上与实际月壤接近^[11]。因此,模拟样品在满足化学成分、矿物组成与实际月壤类似的同时,还要在密度、颗粒形态、颗粒组成、抗压抗剪性以及电磁性质等方面与实际月壤接近。实际月壤中含有大量的粉尘物质,因此在模拟样品的研制过程中还要避免有毒物质的产生和吸入。此外,由于月壤中的铁元素呈单质Fe或FeO形式存在,而地球岩石中的Fe多呈Fe³⁺或Fe²⁺形式存在,因此,在利用模拟月壤进行高温试验从而模拟月壤表面环境时应保持在真空条件下,并且还要控制氧逸度^[11]。

1.3 模拟月壤的研制与应用

据公开发表的论文统计,迄今为止,国外已经有美国的JSC-1^[12]、MLS-1与MLS-2^[13]和日本的FJS-1、MKS-1^[14-15]共5种模拟月壤样品,国内有CAS-1^[16]、NAO-1^[17]两种模拟样品。但这些样品分别只模拟了Apollo 14着陆点的低钛型月海月壤、Apollo 11着陆点的高钛型月海月壤以及高地月壤,其他着陆点的模拟样品并没有被研制出来。同时,这些模拟样品的物理化学性质(表2,3)在某种程度上与实际月壤还存在明显的差别,例如,MLS-1样品仅仅在化学成分上与Apollo 11着陆点的月壤成分相似,但是不含任何的玻璃质(利用ISSP处理后才含有玻璃质);MLS-2也仅仅是在化学成分上与高地月壤类似;而日本的两种模拟月壤FJS-1、MKS-1虽然在化学成分、颗粒组成、机械性质上分别与Apollo 11和Apollo 14着陆点的类似,但在谱学性质和电学性质方面与实际月壤差别较大;NAO-1在物理力学性质方面,如内聚力与实际月壤差别较大。目前,在整个模拟月壤样品的科学研究

表2 模拟月壤与对应的月壤样品的化学组成比较

Table 2 Major elements compositions of lunar soil simulants and comparison with lunar samples w_B/ %

样品	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO _T	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧失量	合计
Apollo 11 ^[9]	42.20	7.80	13.60	15.30	0.20	7.80	11.90	0.47	0.16	0.05	0.12	99.90
Apollo 14 ^[9]	48.10	1.70	17.40	10.40	0.14	9.40	10.70	0.70	0.55	0.51	—	99.83
Apollo 16 ^[9]	45.10	0.54	27.30	5.10	0.30	5.70	15.70	0.46	0.17	0.11	0.06	100.71
JSC-1 ^[12]	47.71	1.59	15.02	10.79	0.18	9.01	10.42	2.70	0.82	0.66	0.71	99.61
MLS-1 ^[13]	43.86	6.32	13.68	16.00	0.20	6.68	10.13	2.12	0.28	0.20	—	99.47
FJS-1 ^[14-15]	49.14	1.91	16.23	13.07	0.19	3.84	9.13	2.75	1.01	0.44	0.43	98.14
MKS-1 ^[14-15]	52.69	1.01	15.91	12.28	0.22	5.41	9.36	1.90	0.58	0.14	0.50	100.00
CAS-1 ^[16]	49.24	1.91	15.08	11.47	0.14	8.72	7.25	3.08	1.03	0.30	—	99.46
NAO-1 ^[17]	43.83	0.77	25.79	6.14	0.09	4.93	15.12	1.41	0.47	0.08	1.10	99.71
CUG-1A	48.32	2.38	16.01	12.50	0.15	6.95	7.39	0.19	2.12	0.54	0.19	99.80

表 3 模拟月壤物理力学性质与实际月壤比较

Table 3 Comparison of physical and engineering properties between lunar regolith simulants and root lunar samples

	粒度分布		密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	相对密度	内聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
	平均粒径/ μm	中值粒径/ μm				
Apollo 11	—	48~105	1.36~1.80	3.01	0.75~2.1	37~45
Apollo 14	—	75~802	0.89~1.55	2.90	<0.1	35~45
Apollo 16	101~268	—	1.40~1.80	—	0.6	46.5
CAS-1	—	85.938	1.14~1.46	—	1.0	33.3
NAO-1	53~81	41~61	—	2.92	95.3	46.57
JAS-1	98~117	81~105	—	2.90	1.0	45
MLS-1	—	—	1.50~2.20	3.20	0.52~?	41.4~49.8

注: Apollo 着陆点的月壤数据来源于文献 [18]。

中应用较多的只有美国的 JSC-1 和 MLS-1 两种。

当前,模拟月壤主要应用在大规模的工程力学性质研究中。通过对模拟月壤进行大量的物理力学性质研究,获得可靠的实际月壤的力学、工程学模拟参数,再利用模拟月壤进行钻探、挖掘、采样及交通运输等试验,从而对大量的着陆设备进行可靠性、灵活性和适应性的检验。同时,模拟月壤也可以应用到防尘、生氧、太空服装甚至农业生产等基本的人类月面活动中,从而为建立人类月球基地提供基本的技术保障。此外,通过对模拟月壤矿物组成、化学成分、谱学性质、电学性质与有效载荷输出信号之间的对比,建立起遥感信号与月球各种物质性质之间的定性定量关系和详细的遥感数据库,以用于遥感信号的反演。

然而,一种模拟月壤样品不可能代表月壤所有

的物理化学性质。鉴于现有的模拟月壤样品仅仅是模拟了 Apollo 11 和 Apollo 14 着陆点的月海月壤和 Apollo 16 着陆点的高地月壤,因此,研制出与 Apollo 和 Lunar 计划采样点平均组成相似的一系列代表月表不同地貌单元和地质背景的模拟月壤,将有助于更全面、更科学地研究月球。

2 模拟月壤 CUG-1A

模拟月壤原材料采自于吉林省辉南县大椅子山乡的大椅子火山(图 1)。该火山属于龙岗火山群,采样点具体位置为北纬 $42^\circ 23' 02''$,东经 $126^\circ 12' 32''$ 。自早更新世以来,龙岗火山群中的火山曾多次喷发,形成了范围广泛的熔岩被和数量众多的火山锥。大椅子山火山渣锥和火山碎屑席叠置在早更新世的玄

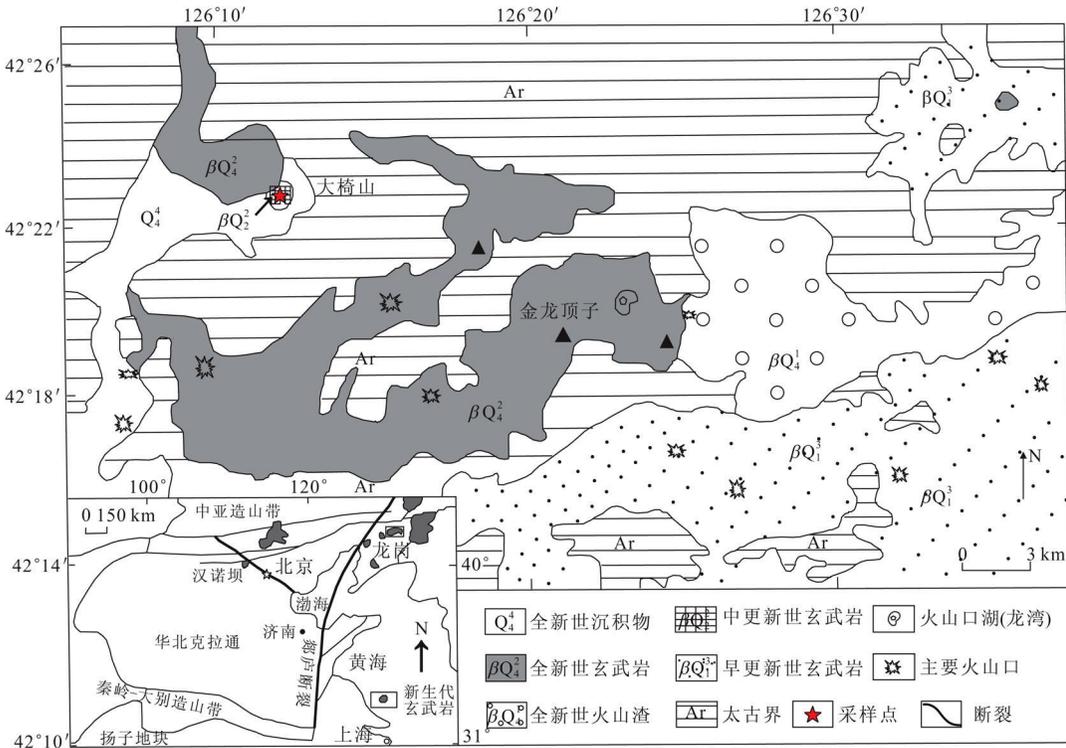


图 1 吉林省辉南县火山地质简图

Fig. 1 Volcanic geological sketch map of Huinan County, Jilin Province

武岩之上,是由中心式爆发形成的,其火山活动时代大致为早更新世晚期—中更新世早期^[19-20]。樊祺诚等^[21]利用K-Ar测年法测得大椅子火山年龄为(0.23±0.02)Ma,也属于中晚更新世。

模拟月壤CUG-1A的初始物质为大椅子火山中的火山渣。火山渣为黑色、灰黑色、红褐色、紫灰色;多呈炉渣状、焦炭状、泡沫状或蜂窝状;尖棱角状,尖端锐利。该火山渣为玄武质火山渣,主要组成矿物为橄榄石、辉石和斜长石,还可见少量磁铁矿、磷灰石等矿物,与实际月壤组成比较类似(表1);火山渣中还可见一些超镁铁岩的包体。火山渣表面风化程度较小,保存新鲜,且该区及邻区火山渣储量巨大,因此是模拟月壤的理想原材料采集区。

将采集的火山渣放在烤箱(约200℃)中烘干去湿后,对这些原始样品进行粉碎。接着依次用孔径0.9(20目)、0.2(70目)、0.15(100目)、0.074mm(200目)的筛子将粉碎后的样品进行分级。然后,根据实际月壤的粒度分布,将这些不同粒级的颗粒按照如下标准进行重新混合:粒径>0.9mm约5%;0.2~0.9mm约15%;0.20~0.15mm约20%;0.15~0.074mm约30%;<0.074mm约30%。最后,把这些配制好的样品(即模拟月壤CUG-1A)装入密封的热封层塑料袋中,保证样品新鲜并防止其受到污染,对其进行相关的物理和化学性质测试。

2.1 CUG-1A 化学性质

CUG-1A模拟月壤的各主量元素组成以及与其他模拟样品和Apollo各着陆点的实际样品的化学组分比较见表2,可以看出CUG-1A在化学成分上总体与Apollo 14采样点月壤的平均化学成分较为相似。但与实际月壤相比,CUG-1A模拟月壤中的MgO、CaO质量分数低于实际月壤,而Na₂O、

K₂O质量分数却高于实际月壤。这与月球的自身演化具有密切的联系。月球内部的岩浆活动主要集中在月球形成后最初的15亿a(距今46亿~31亿a前)中,而在31亿a后,月球内部能量枯竭,岩浆活动也几乎停止^[22]。

所以,与地球相比,月球岩石的岩浆演化程度远远低于地球,因此月球上的岩石类型主要为超基性岩和基性岩,而地球上则存在超基性岩、基性岩、中性岩到酸性岩的一套完整的演化序列。因此,相比之下月球上的岩石更富Mg、Ca而贫Na和K。此外,由于月球表面处在一个高能量的还原环境中,因此,与地球岩石相比,月球岩石中Fe多以单质铁或FeO形式存在^[11]。

2.2 CUG-1A 模拟月壤的物理力学性质

本次实验由中国地质大学(武汉)工程学院岩土实验室完成,全部实验均按照中华人民共和国《土工试验方法标准》(GB/T 50123-1999)实施。在样品为天然风干土的状态下,实验总共完成了颗粒粒径分布、密度、相对密度、孔隙率、内聚力、内摩擦角6项指标的测量。各项指标数据见表4。

2.2.1 粒度分布

CUG-1A模拟样品的颗粒分析实验采用三道虹比重瓶法。各项数据见表4。CUG-1A的平均粒径约为60μm,与实际月壤的中值粒径分布较为接近(表3)。样品粒度分布曲线如图2,可以看出,CUG-1A模拟月壤的颗粒粒度分布与实际月壤比较接近。

2.2.2 相对密度

采用量筒倒转法求最大孔隙比(或最小干密度),电动最小孔隙比仪法求最小孔隙比(或最大干密度)。在6种不同状态下,测得CUG-1A的相对密度平均值为2.661。

表4 CUG-1A 模拟月壤物理力学性质数据

Table 4 Data of engineering and physical experiments of lunar soil simulant CUG-1A

样品编号	物理性质指标						极限物理性质指标				力学性质指标			
	含水率 w _o /%	湿密度 ρ/(g·cm ⁻³)	干密度 ρ _d /(g·cm ⁻³)	相对密度	孔隙比 e	孔隙率 φ/%	极限干密度 ρ _d / (g·cm ⁻³)		极限孔隙比 e		压缩率 α ₁₋₂ / MPa ⁻¹	压缩模量 E _s / MPa	内聚力 c / kPa	内摩擦角 φ / (°)
							最大值	最小值	最大值	最小值				
1-1	0.240	1.400	1.397	2.661	0.905	48					0.17	11.21	0.21	18.22
1-2	0.240	1.500	1.496	2.661	0.778	44					0.14	12.70	0.69	20.22
1-3	0.240	1.600	1.596	2.661	0.667	40	2.000	1.111	1.395	0.331	0.12	13.89	0.77	23.30
1-4	0.240	1.700	1.696	2.661	0.569	36					0.09	17.43	1.36	24.36
1-5	0.240	1.800	1.796	2.661	0.482	33					0.05	29.64	1.61	29.35
1-6	0.240	1.900	1.895	2.661	0.404	29					0.04	35.10	1.71	29.38

颗粒分析指标及其特征

粒组/mm	粒组百分比/%	粒组/mm	粒组百分比/%	特殊粒组/mm	级配判别
2.0~1.0	1.2			控制粒组 d ₆₀	不均勻系数 (G _u) 曲率系数 (G _c)
1.0~0.5	3.2	0.01~0.005	24.1	平均粒组 d ₅₀	
0.50~0.25	5.6	0.005~0.002	3.0	特征粒组 d ₃₀	判别结果 不良级配 砂质粉土
0.25~0.075	28.8	<0.002	7.4	有效粒组 d ₁₀	
0.075~0.010	26.7				

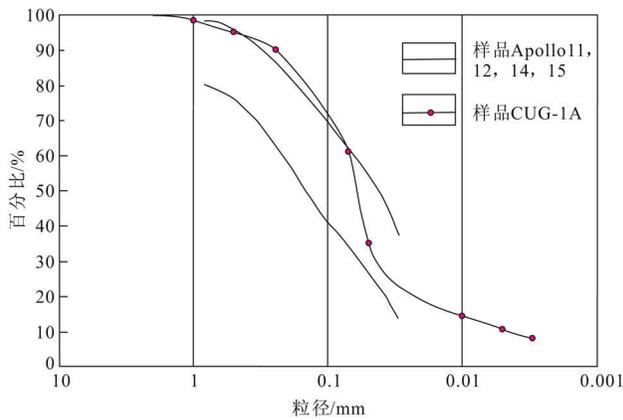


图 2 CUG-1A 模拟月壤颗粒粒径分布曲线

Fig. 2 Particle size distribution of CUG-1A

2.2.3 密度

利用环刀法测量样品的湿密度。首先计算单位体积密度的实验样品质量数,然后在电子天平上称取试验样品,填入环刀,与其体积保持一致,且均匀、压实,以控制其密度。实验测得样品的最大湿密度平均值为 1.900 g/cm^3 ,最小湿密度平均值为 1.400 g/cm^3 。

利用比重瓶法测量样品的干密度。首先在控制实验温度为 $105\sim 110^\circ\text{C}$ 下烘干实验样品和比重瓶,称比重瓶重和实验样品 15g 。加实验用蒸馏水为比重瓶的一半,再采用真空抽气达 2h 。装满瓶水后,称瓶水土重;同时,再称瓶水重。实验测得样品的最大干密度平均值为 1.895 g/cm^3 ,最小干密度平均值为 1.397 g/cm^3 。

2.2.4 孔隙比和孔隙率

本次实验所获得的 CUG-1A 最大松散孔隙比为 1.40 ,最小紧密孔隙比为 0.33 (表 5);所测得的孔隙率为 $29\%\sim 48\%$ (表 4)。

CUG-1A 模拟月壤在孔隙比、密度、相对密度等方面数据与实际月壤较为接近(表 5)。

表 5 CUG-1A 模拟月壤样品的月壤密度、相对密度和孔隙比之间以及与 Apollo 实际样品的对比

Table 5 Density, specific gravity and porosity of lunar soil simulant CUG-1A and comparison with lunar samples

样品	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$		孔隙比		相对密度
	松散	紧实	松散	紧实	
Apollo 11	1.36	1.80	1.21	0.67	3.01
Apollo 12	1.15	1.93	—	—	—
Apollo 14	0.89	1.55	2.26	0.87	2.93
Apollo 15	1.10	1.89	1.94	0.71	3.24
CUG-1A	1.40	1.90	1.40	0.33	2.661

注: Apollo 数据来源于文献 [18]。

2.2.5 抗剪性和压缩性

样品的剪切实验采用等应变直接剪切仪和测微量表等装置完成,实验边界条件为等应变直接剪切,实验以 6r/min 的速率剪切(为不固结不排水剪切),直到量表显示剪切位移出现最大恒值时为止。加载等级按 $50, 100, 150, 200, 300, 400\text{ kPa}$ 六级砝码加载。样品的内摩擦角为 $18.22^\circ\sim 29.38^\circ$,内聚力为 $0.21\sim 1.71\text{ kPa}$;而实际月壤的内摩擦角为 $25^\circ\sim 50^\circ$,内聚力为 $0.26\sim 1.80\text{ kPa}$ [19],二者之间比较接近。

样品的压缩实验采用杠杆式三联固结仪和测微量表等装置完成,实验边界条件为垂直受力方向;水平向侧限;上下排水。加载等级按 $50, 100, 200, 300, 400\text{ kPa}$ 五级砝码加载。压缩稳定标准以 24h 量表值为准。样品的压缩率为 $0.04\sim 0.17\text{ MPa}^{-1}$,压缩模量为 $11.21\sim 35.10\text{ MPa}$ 。

综上所述,CUG-1A 模拟月壤样品在化学性质、矿物组成和物理力学性质方面与实际月壤比较相似,尤其是与 Apollo 14 登陆点的月壤样品更为相似。目前,关于 CUG-1A 的电学性质、磁学性质、反射光谱特性等还在研究当中。

吉林省辉南县地质矿产局在野外采样过程中给予了大量的支持,主量元素测试工作由中国科学院广州地球化学研究所完成,中国地质大学(武汉)工程学院的聂良佐老师帮助完成了样品的物理力学性质测试,在此向他们表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] Heiken G H, Vaniman D T, French B M. Lunar sourcebook: A user's guide to the Moon[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991; 285-356.
- [2] Shkuratov Y G, Bondarenko N V. Regolith layer thickness mapping of the Moon by radar and optical data[J]. Icarus, 2001, 149(2): 329-338.
- [3] Gromov V. Physical and mechanical properties of Lunar and planetary soils[J]. Earth, Moon, and Planets, 1998, 80(1): 51-72.
- [4] Cherkasov I I, Gromov V V. Soil resistometer of the Automatic Lunar Station Luna-16[J]. Doklady AN USSR, 1967, 179(4): 3-5.
- [5] Basu A, Riegsecker S E. Reliability of calculating average soil composition of Apollo landing sites[C] // Anon. Workshop on new views of the Moon: Integrated remotely sensed, geophysical, and sample datasets [S 1.] [s. n.], 1998: 20.
- [6] McKay D S, Heiken G H, Taylor R M, et al. Apollo 14 soils: Size distribution and particle types[C] // Anon. Proceedings of third Lunar science conference [S 1.]; The M. L. I. Press, 1972: 983-985.
- [7] King E A, Butler J C, Carman M F. The Lunar regolith as sampled by Apollo 11 and Apollo 12: Grain size analyses, modal analyses, and origins of particles[C] // Anon. Proceeding of the Second Lunar Science Conference, [S 1.]; The M. L. I.

- T. Press, 1971; 737-746.
- [8] Carrier W, Mitchell J K, Mahmood A. The nature of Lunar soil[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1973, 99(10); 813-832.
- [9] Duke M B, Woo C C, Bird M L, et al. Lunar soil: Size distribution and mineralogical constituents[J]. Science, 1970, 167; 648.
- [10] Basu A, Wentworth S J, McKay D S. Submillimeter grain size distribution of Apollo 11 soil 10084[J]. Meteoritics & Planetary Science, 2001, 36(1); 177-181.
- [11] Carpenter P. Characterization strategies and requirements for Lunar regolith simulant materials[C] // Anon. The Lunar regolith simulant materials workshop [S.l.]; Marshall Institute, 2005; 14-15.
- [12] McKay D S, Carter J L, Boles W W, et al. JSC-1: A new lunar soil simulant[C] // Anon. Engineering, construction, and operations in Space IV. Albuquerque: American Society of Civil Engineers, 1994; 857-866.
- [13] Weiblen P W, Murawa M J, Reid K J. Preparation of simulants for lunar surface materials[C] // Anon. Engineering, construction, and operations in space II. New York: American Society of Civil Engineers, 1990; 98-106.
- [14] Kana mori H, Udagawa S, Yoshida T, et al. Properties of Lunar soil simulant manufactured in Japan[C] // Rodney G. Proceeding of the sixth international conference and exposition on engineering construction, and operations in space. Albuquerque: American Society of Civil Engineers, 1998; 462.
- [15] Yoshida H, Watanabe T, Kanamon H, et al. Experimental study on water production by hydrogen reduction of Lunar soil simulant in a Fixed Bed Reactor[C] // Anon. Space resources roundtable II. Golden, USA [s.l.]; 2000; 1-4.
- [16] Zheng Y Q, Wang S J, Ouyang Z Y, et al. CAS-11 lunar soil simulant[J]. Advances in Space Research, 2009, 43(3); 448-454.
- [17] Li Y Q, Liu J Z, Yue Z Y. NAO-1: Lunar highland soil simulant developed in China[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2009, 22; 53-57.
- [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; 475-521.
- [19] 刘嘉麟. 中国东北地区新生代火山岩[J]. 岩石学报, 1988, 14(1); 1-10.
- [20] 刘祥, 王锡魁. 吉林省辉南县大龙湾火山基浪(base surge)堆积物的发现[J]. 地质评论, 1987, 33(6); 557-582.
- [21] 樊祺诚, 随建立, 刘若新, 等. 吉林龙岗第四纪火山活动分期[J]. 岩石学报, 2002, 18(4); 495-500.
- [22] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005; 248-249.

Lunar Soil Simulant Development and Lunar Soil Simulant CUG-1A

HE Xin xing^a, XIAO Long^{a,b}, HUANG Jun^a, HE Qi^a, GAO Rui^a, YANG Gang^a

(a. Faculty of Earth Sciences; b. Planetary Science Institute, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Lunar soil simulant is a terrestrial reproduction of lunar regolith, and the stimulant soil has similar mineralogical, chemical and physical properties with the real lunar soil. Based on the overview of the previous studies, this paper has concluded the basic methods for developing the lunar regolith simulant, and also briefly introduced the current status about the research on lunar soil simulant at home and abroad. Meanwhile, a new simulant, CUG-1A, derived from a low titanium basalt from Huinan County, Jilin Province, has been developed in China University of Geosciences in Wuhan. CUG-1A was developed specifically for engineering and physical studies on lunar surface in support of exploratory boring and material handling. The physical and chemical properties of CUG-1A were determined, and the results show that these properties of lunar regolith simulant CUG-1A are similar to those of Apollo 14 soil. Therefore, it is an ideal duplicate for low-titanium lunar soil.

Key words: lunar regolith simulant; CUG-1A; chemical property; engineering and physical properties