

# TJ-1 模拟月壤的研制

蒋明镜<sup>1,2</sup>, 李立青<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘要:** 以吉林省靖宇县境内的红色火山灰为原材料, 将其烘干、粉碎、筛分后通过调整级配, 力学试验成功研制出了 Tongji-1 (简称 TJ-1) 模拟月壤。测试了 TJ-1 模拟月壤的矿物成分、颗粒形态、比重、内摩擦角、黏聚力、压缩指数、动剪模量、阻尼比及吸湿性能等, 并将 TJ-1 模拟月壤与月壤以及国际上已有模拟月壤的物理力学特性进行了对比分析。结果表明: TJ-1 模拟月壤的物理力学特性在月壤的范围之内, 可模拟月壤的基本力学特性; 且与其他模拟月壤相比, 具有级配稳定, 较大孔隙比时抗剪强度高的特点。

**关键词:** 月壤; TJ-1 模拟月壤; 火山灰; 物理力学性能

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)02-0209-06

**作者简介:** 蒋明镜(1965-), 男, 特聘教授, 博士生导师, 主要从事天然结构性黏土、砂土、非饱和土、太空土、深海能源土的宏、微观试验, 本构模型和数值分析方面的研究以及土体逐渐破坏分析。E-mail: mingjing.jiang@mail.tongji.edu.cn.

## Development of TJ-1 lunar soil simulant

JIANG Ming-jing<sup>1,2</sup>, LI Li-qing<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, 2. Dept. of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Tongji-1 lunar soil simulant (TJ-1 for short), which is originated from red volcanic ashes from Jingyu County, Jilin Province, was recently invented by drying, crushing, sieving and adjusting the gradation. Physical and mechanical properties of TJ-1 lunar soil simulant (e.g., mineralogy composition, shape of particles, density, specific gravity, internal friction angle, cohesion, compression index, dynamic shear modulus, damping ratio and moisture absorption properties) are measured. TJ-1 demonstrates certain similarity to lunar regolith in terms of physical and mechanical properties, and it is an ideal substitute of lunar regolith located from 0 to 30 cm below the lunar surface in the mare region on the moon. Compared with other simulants introduced in the literatures, TJ-1 has an internal friction angle as high as 45° and hence is advantageous over other simulants when high shear strength is desired.

**Key words:** lunar regolith; TJ-1 lunar soil simulant; volcano ash; physical and mechanical property

## 0 引言

国防科工委(现国防科工局)于2004年正式批准启动的月球探测一期工程——绕月探测工程已以嫦娥一号卫星的成功发射而顺利结束。目前正在进行以月球软着陆探测与月球车巡视勘察为目标的月球探测二期工程<sup>[1]</sup>, 其中月球着陆器、月球车及其它宇航设备与月壤间的相互作用, 无疑是二期工程的重点研究内容之一。但月壤样品极其珍贵, 即使是拥有381.7 kg月壤样品的美国, 对其使用也是非常严格和慎重的。因此, 研制能够代替月壤进行月球探测相关试验的模拟月壤是非常必要的。

模拟月壤是具有与月壤相似的矿物组成、化学成分和物理力学性质的地球物质, 基本可代替月壤在地球上进行与探月工程相关的模拟试验。目前国外应用

较为广泛的模拟月壤包括美国国家宇航局约翰逊空间中心主持研制的JSC-1模拟月壤<sup>[2-6]</sup>、美国明尼苏达大学研制的MLS-1模拟月壤<sup>[2,6]</sup>以及日本Shimizu Corporation的空间和机器人系统部研制的FJS-1模拟月壤<sup>[7-8]</sup>等; 国内的模拟月壤主要有中国科学院主持研制的CAS-1、NAO-1模拟月壤<sup>[9-11]</sup>, 以及文献[12, 13]中阐述的模拟月壤, 但上述模拟月壤的内摩擦角、黏聚力均不能同时满足月球表面月海区域0~30 cm深度月壤的最佳估计值范围(对应的月壤孔隙比为0.9~1.0), 不能应用于着陆冲击试验。本文结合郑永春、樊世超等<sup>[12, 14]</sup>的研究, 以吉林省靖宇县境内的红色火山灰为原料, 通过烘干、粉碎、筛分等工序, 针对不

基金项目: 国家自然科学基金项目(10972158); 国家自然科学基金杰出青年基金项目(51025932)

收稿日期: 2009-09-18

同颗粒级配组合,测试相应级配下火山灰的力学性能,经过十余次尝试研制出力学特性基本满足上述最佳估计值范围,研制成功了Tongji-1(简称TJ-1)模拟月壤,可为月球着陆冲击试验模拟月壤的选取提供参考。

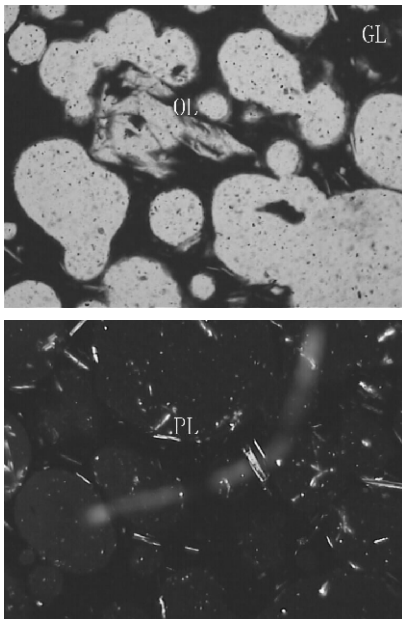
## 1 TJ-1 模拟月壤

### 1.1 TJ-1 模拟月壤的目标值

根据影响月球着陆冲击试验关键参数并结合文献[1, 17]的研究,以月球表面月海区域0~30 cm深度月壤的内摩擦角、黏聚力的最佳估计值为主要控制指标来研制模拟月壤。需研制模拟月壤的主要物理力学指标如下:大部分颗粒直径为30~1000  $\mu\text{m}$ ;颗粒形态以长条状、次棱角状和棱角状为主;含有橄榄石、辉石、长石、钛铁矿、尖晶石等矿物,玻璃体含量相对较高;密度范围为1.55~1.65  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,比重为2.90~3.51(推荐值为3.1),孔隙比为0.9~1.0;内摩擦角为 $44^\circ \sim 47^\circ$ ,黏聚力为0.74~1.1 kPa, 12.5~100 kPa范围内中密实程度下的压缩指数为0.01~0.11。

### 1.2 TJ-1 模拟月壤的制备及物理力学特性

根据樊世超等<sup>[12]</sup>、郑永春<sup>[14]</sup>报道,并利用同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室带有LEICA Qwin显示系统的图像分析系统测得吉林省靖宇县境内的红色火山灰为低钛碱性橄榄玄武岩,主要矿物成份是橄榄石、辉石、长石等,并含有30%以上的玻璃体(图1);与Apollo14登陆点采集的月壤矿物组成<sup>[17]</sup>比较接近,可以作为制备模拟月壤的主体原料。



GL: 玻璃(glass); PL: 长石(plagioclase); OL: 橄榄石(olivine)

图1 利用图像分析系统分析红色火山灰矿物成份

Fig. 1 Mineral components of red volcanic ashes

室内制备模拟月壤时先将原材料烘干、粉碎、筛分,而在文献[18, 19]提供的部分月壤样品的级配

曲线范围内根据设定的级配曲线按一定比例混合,再针对不同级配样本进行相应的力学特性测试。经过十余次的级配调整(颗粒级配是决定模拟月壤物理力学特性的主要因素之一<sup>[15-16]</sup>),研制出基本符合上述目标值的TJ-1模拟月壤。

粉碎后的火山灰试样没有经历长期水力、风力的磨圆作用,颗粒形态以稍长条状、次棱角状为主(图2),与月壤的颗粒形态较为相似<sup>[17]</sup>。TJ-1模拟月壤中粒径大于等于0.075 mm的颗粒用筛析法测试,小于0.075 mm的颗粒分布用密度计法测试,颗粒级配曲线见图3。TJ-1模拟月壤孔隙比 $e=1.0$ 时对应的密度为1.36  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,比重为2.72;内摩擦角为 $47.6^\circ$ ,黏聚力为0.86 kPa, 12.5~100 kPa范围内中密实程度下的压缩指数为0.086。TJ-1模拟月壤的物理力学参数与目标值的符合情况用符合度表示,即若该物理力学参数在相应目标值上、下限范围之内,其符合度为100%;否则用该参数与最接近的上限或者下限的比值表示。表1为TJ-1模拟月壤物理力学性能与目标值的符合情况。

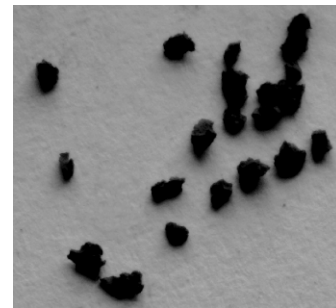


图2 TJ-1 模拟月壤的颗粒形态

Fig. 2 Particle shape of TJ-1 lunar soil simulant

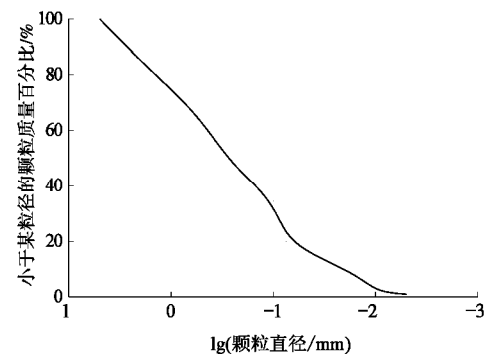


图3 TJ-1 模拟月壤的颗粒级配曲线

Fig. 3 Gradation curve for TJ-1 lunar soil simulant

表1 TJ-1 模拟月壤部分物理力学参数与目标值

Table 1 Comparison between TJ-1 and target values

物理参数	目标值	TJ-1 模拟月壤	与目标值的 符合度/%
孔隙比	0.9~1.0	1.000	100.0
内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	44~47	47.600	98.7
黏聚力 $c/\text{kPa}$	0.74~1.1	0.860	100.0
压缩指数	0.01~0.11	0.086	100.0

TJ-1 模拟月壤动力特性(动剪模量  $G_d$ 、阻尼比  $D$ )

采用 V. P. Drnevich 共振柱仪测定。因初始动剪模量  $G_0$  与动剪应变  $g_d=10^{-6}$  时的动剪模量之差一般不大于 3%，故将孔隙比为 0.9, 1.0 的模拟月壤试样在围压为 50 kPa,  $g_d=10^{-6}$  时测得的动剪模量值 24.77, 22.22 MPa 作为初始动剪模量；试验所得  $G_d/G_0-g_d$ 、 $D-g_d$  关系曲线如图 4 所示。

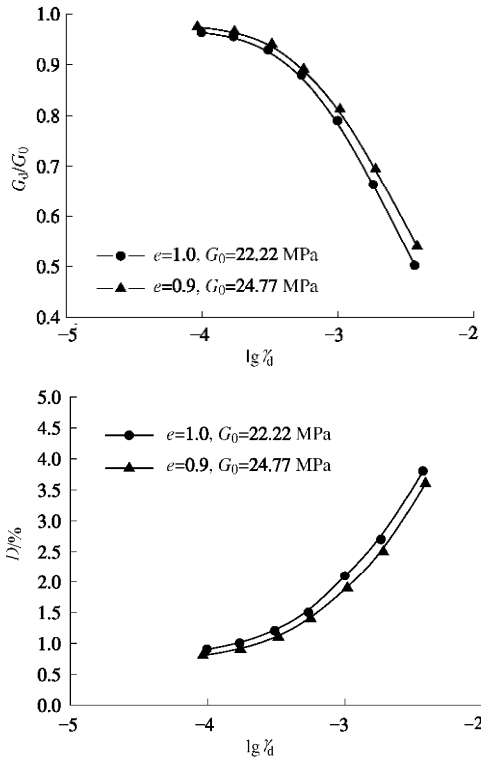


图 4 TJ-1 模拟月壤的动力特性 ( $\sigma_{3c}=50$  kPa)

Fig. 4 Dynamic characteristics of TJ-1 when  $\sigma_{3c}=50$  kPa

此外, TJ-1 模拟月壤具有吸湿性<sup>[21]</sup>, 很难长期在露天潮湿的试验环境中保持零含水率; 且含水率的变化可能导致 TJ-1 模拟月壤力学性能的改变<sup>[22]</sup>, 故进行了 TJ-1 模拟月壤的吸湿试验。称取 300 g 的模拟月壤试样, 放置于温度为 20℃, 湿度为 71% 的养护槽中, 间隔一定时间测试其吸湿含水率的变化 (计算公式与含水率相同), 试验结果见图 5。分析可知 TJ-1 模拟月壤前期吸水泛潮较快; 2 d 后吸湿含水率变化很小, 逐渐趋于稳定, 12.5 d 模拟月壤的吸湿含水率约为 2.8%。因此, 建议制备 TJ-1 模拟月壤时应加强防潮、防雨措施, 尽量保持其干燥。

TJ-1 模拟月壤的比重与目标值相比有一定的差距, 为此根据文献[12]的报道, 在 TJ-1 模拟月壤中添加一定比例的金刚砂配制成比重为 2.90 的 TJ-2 模拟月壤。但通过试验测得 TJ-1、TJ-2 模拟月壤的力学特性没有明显差别 (表 2)。同时按市场价计算金刚砂是火山灰价格的 6 倍, 因此考虑到工程造价, 不建议采用金刚砂的 TJ-2 模拟月壤。

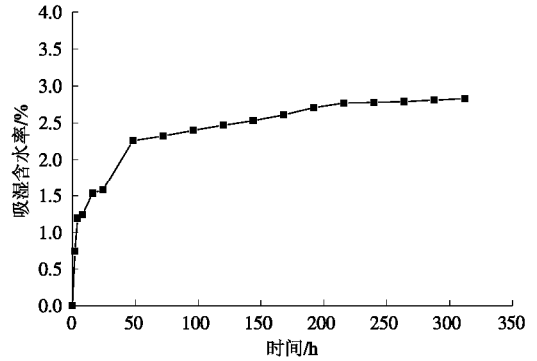


图 5 TJ-1 模拟月壤吸湿试验

Fig. 5 Hygroscopic characteristics of TJ-1

表 2 TJ-1、TJ-2 模拟月壤部分物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical properties of TJ-1 and TJ-2

模拟月壤	密度 / (g·cm <sup>-3</sup> )	比重	孔隙比	内摩擦角 $\varphi$ / (°)	黏聚力 c / kPa	压缩指数
TJ-1	1.36	2.72	1.0	47.6	0.86	0.086
TJ-2	1.45	2.90	1.0	46.9	1.03	—

## 2 TJ-1 模拟月壤与月壤性能的对比分析

文献[18, 19]中 Apollo11、Apollo12、Apollo14 登月点月壤样品及 TJ-1 模拟月壤的颗粒级配见图 6。由图 6 可知 TJ-1 模拟月壤在月壤的颗粒级配范围之内; TJ-1 模拟月壤的中值粒径为 260  $\mu\text{m}$ , 与 Apollo 登月点月壤样品的中值粒径或平均粒径 (表 3)<sup>[17]</sup>较为相似。

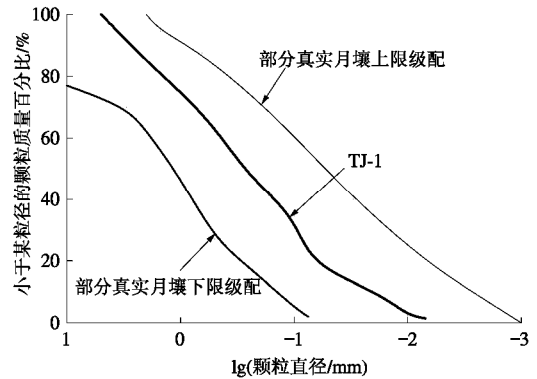


图 6 TJ-1 模拟月壤及部分月壤的级配曲线

Fig. 6 Gradations of TJ-1 and lunar regolith

表 3 部分月壤样品及 TJ-1 模拟月壤的平均粒径和中值粒径

Table 3 Average and medium values of particle sizes

样品	粒径范围/ $\mu\text{m}$
Apollo 11 (中值粒径)	48~105
Apollo 12 (中值粒径)	42~94
Apollo 14 (中值粒径)	75~802
Apollo 15 (中值粒径)	51~108
Apollo 16 (平均粒径)	101~268
Apollo17 (平均粒径)	42~166
TJ-1(中值粒径)	260

注: 表中中值粒径为该样品颗粒级配曲线上  $d_{50}$  所对应的颗粒直径; 平均粒径的计算公式为  $M_z=(d_{16}+d_{50}+d_{84})/3$ 。

文献[1, 17]中部分月壤的密度、孔隙比、比重最佳估计值与 TJ-1 模拟月壤实测值见表 4。对比分析可知 TJ-1 模拟月壤的密度、孔隙比均在月壤的变化范围之内;但其比重稍低。月壤的内摩擦角  $\varphi$  为  $25^\circ \sim 50^\circ$ , 黏聚力  $c$  为  $0.26 \sim 1.8$  kPa, 在法向压力为  $12.5 \sim 100$  kPa 范围内中密实程度情况下压缩指数为  $0.01 \sim 0.11$ [17]。多次测量 TJ-1 模拟月壤在孔隙比  $e=1.0$  时的内摩擦角为  $47.6^\circ$ , 黏聚力为  $0.86$  kPa, 相应压力范围内压缩指数为  $0.086$ , 可见其与月壤的主要力学特性相似。

表 4 部分月壤与 TJ-1 模拟月壤密度、孔隙比、比重

Table 4 Density, void ratio, specific gravity of lunar regolith and

TJ-1 lunar soil simulant			
样品	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙比	比重
TJ-1	1.36	1.0	2.72
Apollo 11	1.36~1.80	0.67~1.21	3.01
Apollo 12	1.15~1.93	—	—
Apollo 14	0.89~1.55	0.87~2.26	2.90
Apollo 14	0.87~1.51	0.94~2.37	2.93
Apollo 15	1.10~1.89	0.71~1.94	3.24
Luna 16	1.115~1.793	0.673~1.69	3.00
Luna 20	1.040~1.798	0.673~1.88	3.00

### 3 TJ-1 与其它模拟月壤性能的比较

#### 3.1 TJ-1 模拟月壤与国外模拟月壤性能的比较

TJ-1 模拟月壤与国外应用较为广泛的 JSC-1、FJS-1、MLS-1 等模拟月壤的颗粒级配曲线见图 7, 相应的粒度分布特征见表 5。分析可知, 所有模拟月壤的级配良好; 但与其他模拟月壤相比, TJ-1 模拟月壤大颗粒含量较多, 直径为  $2 \sim 5$  mm 颗粒含量达到 15%。

表 6 为 TJ-1 模拟月壤与 JSC-1、MLS-1、FJS-1 模拟月壤的物理力学特性对比情况。对比分析可知, JSC-1、FJS-1 模拟月壤的主要矿物成份与 TJ-1 模拟月壤相近, 但 FJS-1 模拟月壤以火山灰为主体原料, 加入了适量钛铁矿; 而 MLS-1 模拟月壤则是由玻璃物质与玄武岩粉末以 1:3 质量比混合而成的, 其中玻璃物质是由富钛结晶质玄武岩经 ISSP(In-flight Sustained Shockwave

表 6 TJ-1、JSC-1、MSL-1、FJS-1 模拟月壤的物理力学特性

Table 6 Physical and mechanical properties of TJ-1 and other simulants

名称	研制单位	主要矿物成分	颗粒形态	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙比	内摩擦角/( $^\circ$ )	黏聚力/kPa	比重
TJ-1	同济大学	橄榄石、长石、辉石、火山玻璃	稍长条状、次棱角状	1.36	1.00	47.6	0.86	2.72
JSC-1	Johnson Space Center(美国)	斜长石、橄榄石、辉石	从棱角状到次椭圆状	1.62	0.79	44.4	3.9	2.90
				1.72	0.69	49.5	6.2	
				1.81	0.60	53.6	14.4	
MSL-1	Universitu of Minnesota(美国)	斜长石、辉石、橄榄石、钛铁矿	棱角状	1.92	0.67	37.0	0.9	3.21
FJS-1	Shimizu Corporation(日本)	玄武岩、钛铁矿、橄榄石	形状不规则	1.55	0.90	32.5~39.4	3~8	2.95

Plasma reactor)处理以模拟月表陨石撞击过程中产生的, 玄武岩粉末则是玄武岩经粉碎磨细成粒度小于 1 mm 或者更小的颗粒组成[20]。TJ-1 模拟月壤在孔隙比  $e=1.0$  时测得的内摩擦角较大, 则是由于 TJ-1 模拟月壤的颗粒棱角分明, 大颗粒被细颗粒填充饱满, 啮合良好的缘故; JSC-1 模拟月壤的内摩擦角较大则是因为其孔隙比较小。TJ-1、MLS-1 模拟月壤的黏聚力均在月壤的范围 ( $0.26 \sim 1.8$  kPa) 之内, 而 JSC-1、FJS-1 模拟月壤的黏聚力则超出此范围。此外, 上述国外模拟月壤的压缩性能均未见报道。

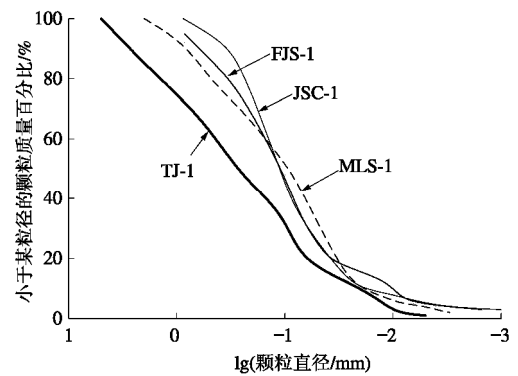


图 7 TJ-1、JSC-1、MLS-1、FJS-1 模拟月壤的级配曲线

Fig. 7 Gradations of lunar soil simulants

表 5 TJ-1、JSC-1、MLS-1、FJS-1 模拟月壤的粒度特征

Table 5 Characters of grain size distribution of lunar soil simulants

名称	有效粒径 $d_{10}/\mu\text{m}$	中值粒径 $d_{50}/\mu\text{m}$	限制粒径 $d_{60}/\mu\text{m}$	不均匀系数	曲率系数
TJ-1	20	260	431	21.5	0.94
JSC-1	20	120	150	7.5	1.20
MLS-1	20	91	170	8.5	0.65
FJS-1	10	120	160	16.0	2.25

注: 不均匀系数  $C_u=d_{60}/d_{10}$ , 曲率系数  $C_c=(d_{30})^2/(d_{10} \cdot d_{60})$ 。

#### 3.2 TJ-1 模拟月壤与国内模拟月壤性能的比较

TJ-1 模拟月壤与 CAS-1、NAO-1 及文献[13]中所述模拟月壤的颗粒级配曲线见图 8, 相应的粒度分布特征见表 7。

对比分析可知, 所有模拟月壤的级配良好, CAS-1 及文献[13]的级配曲线相对较陡, 颗粒较为均匀; 而

表 7 模拟月壤的粒度特征

Table 7 Characters of grain size distribution of simulants

名称	有效粒径 $d_{10}/\mu\text{m}$	中值粒径 $d_{50}/\mu\text{m}$	限制粒径 $d_{60}/\mu\text{m}$	不均匀系数	曲率系数
TJ-1	20	260	431	21.5	0.94
CAS-1	14	86	110	7.9	1.12
NAO-1	4	52	75	18.8	1.92
文献[13]	25	97	129	5.2	0.94

注: 文献[13]的颗粒级配指原文中粒径分布为A, 编号为2的试样。

TJ-1及NAO-1模拟月壤的粒度分布范围较大, 且TJ-1模拟月壤大颗粒含量相对较高。

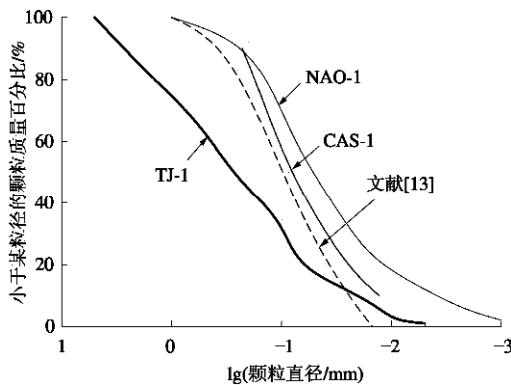


图 8 TJ-1 与国内部分模拟月壤的级配曲线

Fig. 8 Gradations of lunar soil simulants

表8为TJ-1模拟月壤与CAS-1、NAO-1以及文献[12, 13]中所述模拟月壤的物理力学特性对比情况。由表8可知, 所有模拟月壤的主要矿物成分均与月壤较为接近。TJ-1、CAS-1模拟月壤以及文献[12, 13]所述的模拟月壤的主要原材料为比重较小的火山灰, 文献[12, 13]为使模拟月壤的比重在月壤比重的范围内分别加入适量的赤铁矿、金刚砂; 而以辉长岩为原料的NAO-1模拟月壤比重则在月壤的范围内。TJ-1模拟月壤的内摩擦角较大, 且内摩擦角及黏聚力基本都在月球表面月海区域0~30 cm深度月壤的内摩擦角、黏聚

表 8 TJ-1 与国内模拟月壤的物理力学特性

Table 8 Physical and mechanical properties of TJ-1 and other simulants

名称	主要研制单位	原材料	主要矿物成分	颗粒形态	密度 $/(g\cdot\text{cm}^{-3})$	孔隙比	内摩擦角 $(^\circ)$	黏聚力 $/\text{kPa}$	比重
TJ-1	同济大学	火山灰	橄榄石、长石、辉石、火山玻璃	稍长条状、次棱角状	1.36	1.00	47.6	0.86	2.72
CAS-1	中国科学院	火山灰	橄榄石、辉石、玻璃物质	尖锐棱角状	1.14~1.46	—	33.3	1.00	2.74
NAO-1	中国科学院	辉长岩	辉石、长石、角闪石、玻璃体	—	1.93	0.51	46.6	95.3**	2.92
文献[12]	北京卫星环境工程研究所	火山灰, 金刚砂	橄榄石、辉石、长石、玻璃体、金刚砂	稍长条状、次棱角状	1.50 1.46	0.83 0.87	40.8 40.0	0 0	2.90
文献[13]	吉林大学	火山灰, 赤铁矿	橄榄石、长石、火山玻璃、赤铁矿砂	有明显的研磨痕迹, 形态变化较大	1.47	1.07	32.8	1.80	2.90

注: \*\*为文献[11]作者经过三轴试验测得 NAO-1 模拟月壤的黏聚力为 95.3 kPa, 但原文作者估计其应为 0 kPa。

力的最佳估计值范围之内; 而CAS-1以及文献[12, 13]中模拟月壤的黏聚力虽与(0.26~1.8 kPa)相差不大, 甚至在其范围之内, 但内摩擦角均与最佳估计值(44°~47°)差别显著; NAO-1模拟月壤的内摩擦角在上述最佳估计值范围内, 但其相应的孔隙比仅为0.51, 该孔隙比在月球表面出现的几率很小<sup>[1, 17]</sup>。此外, TJ-1模拟月壤的压缩系数为0.28, 文献[13]中模拟月壤的为0.20, 均在月壤的范围之内; 其他模拟月壤则未做此类研究。

## 4 结 语

采用吉林省靖宇县境内的红色火山灰为主体材料, 未添加大比重矿物, 仅通过调整火山灰的颗粒级配研制出了TJ-1模拟月壤, 可为着陆冲击试验模拟月壤的选取提供参考; 且其物理力学参数基本在月球表面月海区域0~30 cm深度月壤相应参数的最佳估计值变化范围之内。与国内外其它模拟月壤的相比, TJ-1模拟月壤具有级配更加稳定, 较大空隙比时抗剪强度高特点。TJ-1模拟月壤的密度为1.36 g/cm<sup>3</sup>, 比重为2.72; 有效粒径 $d_{10}$ 为20 μm, 中值粒径 $d_{50}$ 为260 μm, 不均匀系数 $C_u$ 为21.5, 曲率系数 $C_c < 0.94$ ; 孔隙比为1.0时内摩擦角为47.6°, 黏聚力为0.86 kPa, 12.5~100 kPa法向压力范围内中密实程度下的压缩指数为0.086。

致 谢: 同济大学贾敏才博士指导了现场采样并参与部分试验; 刘芳博士在论文修改过程中给予很大帮助, 美国 University of Massachusetts Amherst 的 Chang C S 教授在试验初期提供有益的建议并在文献查询过程中给予帮助; 孙渝刚、胡海军、王富周、肖俞、郑敏等研究生在试验工作中给予了支持和帮助。在此一并表示衷心感谢。

## 参考文献:

- [1] 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 of lunar sciences[M]. Beijing: China Aerospace Publishing House, 2005. (in Chinese))
- [2] PERKINS S W, MADSON C R. Mechanical and load-settlement characteristics of two lunar soil simulants[J]. Journal of Aerospace Engineering, 1996, **9(1)**: 1 - 9.
- [3] KLOSKY J L, STURE S, KO H Y, et al. Geotechnical behavior of JSC-1 lunar soil simulant[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2000, **13(4)**: 133 - 138.
- [4] MCKAY D S, CARTER J L, BOLES W W, et al. JSC-1: A new lunar soil simulant[C]// Engineering, Construction, and Operations in Space IV, USA, 1994: 857 - 866.
- [5] WILLMAN B M, BOLES W W. Properties of lunar soil simulant JSC-1[J]. Journal of Aerospace Engineering, 1995, **8(2)**: 77 - 87.
- [6] WILLMAN B M, BOLES W W. Soil-tool interaction theories as they apply to lunar soil simulant[J]. Journal of Aerospace Engineering, 1995, **8(2/2)**: 88 - 99.
- [7] KANAMORI H, UDAGAWA S, YOSHIDA T, et al. Properties of lunar soil simulant manufactured in Japan[C]// Space 98 Proceedings of the Sixth International Conference and Exposition on Engineering, Construction, and Operations in Space, USA, 1998: 462 - 468.
- [8] BUI H H, KOBAYASHI T, FUKAGAWA R, et al. Numerical and experimental studies of gravity effect on the mechanism of lunar excavations[J]. Journal of Terramechanics, 2009, **46**: 115 - 124.
- [9] 郑永春, 王世杰, 冯俊明, 等. CAS-1 模拟月壤[J]. 矿物学报, 2007, **27(3/4)**: 571 - 578. (ZHENG Y C, WANG S J, FENG J M, et al. CAS-1 lunar soil simulant[J]. Acta Mineralogical Sinica. 2007, **27(3/4)**: 571 - 578. (in Chinese))
- [10] ZHENG Y C, WANG S J, OUYANG Z Y, et al. CAS-1 lunar soil simulant[J]. Advances in Space Research, 2009, **43**: 448 - 454.
- [11] 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(1)**: 53 - 57.
- [12] 樊世超, 贾 阳, 向树红, 等. 月面地形地貌环境模拟初步研究[J]. 航天器环境工程, 2007, **24(1)**: 15 - 20. (FAN S C, JIA Y, XIANG S H, et al. A preliminary study on simulation of lunar surface terrain[J]. Spacecraft Environment Engineering. 2007, **24(1)**: 15 - 20. (in Chinese))
- [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 stimulant for vehicle-terramechanics research in laboratory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29(6)**: 1557 - 1561. (in Chinese))
- [14] 郑永春. 模拟月壤研制与月壤的微波辐射特性研究[D]. 北京: 中国科学院, 2005. (ZHENG Y C. Development of lunar soil simulants and characteristic of microwave radiation of lunar regolith[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese))
- [15] JIANG M J, LEROUÉIL S, KONRAD J M. Insight into shear strength functions of unsaturated granulates by DEM analyses[J]. Computers and Geotechnics, 2004, **31**: 473 - 489.
- [16] 王淑云, 鲁晓兵, 时忠民. 颗粒级配和结构对粉砂力学性质的影响[J]. 岩土力学, 2006, **26(7)**: 1029 - 1032. (WANG S Y, LU X B, SHI Z M. Effects of grain size distribution and structure on mechanical behavior of silty sands [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **26(7)**: 1029 - 1032. (in Chinese))
- [17] CARRIER W D, OLHOEFT G R, MENDELL W. Physical properties of the lunar surface, in Lunarbook[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
- [18] CHANG C S, HICHER P Y. Model for granular materials with surface energy forces[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2009, **22(1)**: 43 - 52.
- [19] MITCHELL J K, BROMWELL L G, CARRIER W D, et al. Soil mechanical properties at the Appolo14 site[J]. Journal of Geophysical Research. 1972, **77(29)**: 5641 - 5665.
- [20] 郑永春, 王世杰, 刘建忠, 等. 模拟月壤研制的初步设想 [J]. 空间科学学报, 2005, **25(1)**: 70 - 75. (ZHENG Y C, WANG S J, LIU J Z, et al. A review and prospect for developing of lunar soil simulant[J]. Chin J Space Sci, 2005, **25(1)**: 70 - 75. (in Chinese))
- [21] 同济大学. 用于着陆冲击试验的月壤试验床方案[R]. 上海: 同济大学, 2009. (Tongji University. Schemes for impact tests on lunar soil[R]. Shanghai: Tongji University, 2009. (in Chinese))
- [22] 蒋明镜, 李立青, 刘 芳, 等. 含水率和颗粒级配对 TJ-1 模拟月壤力学性能影响的试验研究[J]. 岩土力学. (JIANG M J, LI L Q, LIU F, et al. SUN Y G. Effects of moisture content and gradation on the mechanical properties of TJ-1 lunar soil simulant[J]. Rock and Soil Mechanics. (in Chinese))