

TJ-1 模拟月壤颗粒几何特性

林呈祥, 凌道盛, 钟世英, 蒋祝金

(浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058)

摘 要: 颗粒几何特性是颗粒材料的一个重要物理性质, 是决定颗粒材料力学性质的一个重要因素. 针对软着陆模型试验所用的 TJ-1 模拟月壤颗粒进行了体视显微镜扫描, 获取数字图像后用图形处理软件对各粒径组的颗粒进行了几何特性各指标参数的量化统计, 获得了模拟月壤颗粒在延伸度、圆度和凹凸度等的具体数值, 为进一步研究 TJ-1 模拟月壤物理力学性质与颗粒几何特性的关系提供了相关试验数据. 试验结果表明: TJ-1 模拟月壤颗粒具有棱角、钩角、锯齿等不规则结构, 表面相对凹凸, 大粒径颗粒具有明显的蜂窝状气孔结构; 颗粒形状各异, 主要形状有长条状、类三角形和类四边形. 最后对 TJ-1 模拟月壤颗粒和真实月壤颗粒在几何特性方面进行了对比分析.

关 键 词: 月壤; 模拟月壤; 颗粒; 几何特性; 统计分析

中图分类号: TU 44 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2016)03-0451-06

Geometric Characteristics of TJ-1 Lunar Soil Simulant Particles

LIN Cheng-xiang, LING Dao-sheng, ZHONG Shi-ying, JIANG Zhu-jin

(MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geo-environmental Engineering of Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China. Corresponding author: LIN Cheng-xiang, E-mail: tonylin1988@163.com)

Abstract: The geometric characteristics of particle is an important physical property of granular material, as well as a principal aspect in determining their mechanical properties. The TJ-1 lunar soil simulant particles used in soft landing model tests were scanned and photographed by using a stereo microscope. Then, a digital imaging processing software was used to statistically analyze the geometric characteristics of particles of each grain size group, and aspect ratio, circularity and roundness of particles were obtained to provide the experimental data for further research of the relationship between geometric characteristics of particles and soil physical and mechanical properties. The research results show that the TJ-1 lunar soil simulant particles have irregular structures of corners, cheicers and sawtooth. Consequently, the surface of particles is relatively rough. Big size particles have obvious honeycomb-like pore structure. The shape of particles differs from each other, the main shapes are long striped, quasi-triangle and quasi-quadrangle. Finally, the geometric characteristics of TJ-1 lunar soil simulant particles is compared to the one of real lunar soil particles.

Key words: lunar soil; simulant lunar soil; particle; geometric characteristics; statistical analysis

月球作为距离地球最近的天然太空试验基地, 是探索太空的重要中转站, 对月球的探测研究是人类发展太空工程的首要任务^[1]. 月壤是探月工程相关研究的主要对象和载体, 对月壤基本物理力学性质的研究是世界各国优先开展的课题, 具有重要的科学价值和工程意义^[2].

已有的研究表明: 月壤的形成主要有三个影响因素: 陨石和微陨石的撞击, 宇宙射线和太阳风粒子的持续轰击, 以及大幅度昼夜温差导致岩石热胀冷缩从而破碎^[3]. 月壤在不断熟化的过程中主要受机械破碎的影响, 陨石和微陨石的撞击也起着主导作用^[4]. 月壤颗粒形态各异, 从球形到

收稿日期: 2014-07-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278451); 浙江省自然科学基金资助项目(LZ12E09001).

作者简介: 林呈祥(1988-), 男, 浙江台州人, 浙江大学博士研究生; 凌道盛(1968-), 男, 安徽黄山人, 浙江大学教授, 博士生导师.

尖锐棱角状都有分布变化,主要形状则有:棱角状、次棱角状和长条状等^[5];颗粒属多棱角、多气孔结构,颗粒表面凹凸不平,具有很强的啮合作用^[6].

颗粒大小及其几何形状是影响颗粒材料摩擦性和流动性的两大重要因素^[7]. 砂土试验研究已表明:颗粒的几何特性对砂土的内摩擦角有一定影响:颗粒形状越不规则,砂土的内摩擦角越大^[8];砂土的压缩性、孔隙比、抗剪强度等物理力学性质与颗粒的几何特性亦密切相关^[9]. 颗粒的几何特性是月壤的一个基本物理性质,也是影响其力学性质的一个重要因素^[10].

在真实月壤很稀少的情况下,与月壤具有相似矿物组成成分和基本力学性质的模拟月壤便成为相关模型试验研究的主要载体^[11]. 主要模拟月壤有:美国分别根据 Apollo-11 和 Apollo-14 月壤样品研制出来的 MLS-1 和 JSC-1^[12-13];日本根据 Apollo-14 月壤样品研制的 FJS-1, FJK-1^[14];中国科学院地球化学研究所和国家天文台合作研制的 CAS-1^[15],以及同济大学研制的

TJ-1^[16]. 随着探月工程的进一步发展,新的模拟月壤也正在不断地被研制出来,如NAO-1^[17]和NU-LHT-2M^[18].

直剪试验表明:密实条件下,TJ-1 模拟月壤呈现软化现象,内摩擦角和黏聚力的值都相对较大^[19],这和颗粒的不规则形状以及棱角、气孔等非常规结构有着很大的关联. 为深入研究 TJ-1 模拟月壤的力学性质与颗粒几何特性之间的关系,需先对 TJ-1 模拟月壤颗粒的几何特性进行研究.

1 模拟月壤配制及试验分析方法

1.1 模拟月壤配制

本文研究所用的模拟月壤,配制原料采集于吉林省靖宇县的龙岗火山群,主要矿物结晶有橄榄石、辉石和斜长石等,其中玻璃体质量分数大于 30 %^[20]. 图 1 为所配制的 TJ-1 模拟月壤现场照片及颗粒粒径对比图. TJ-1 模拟月壤和其他模拟月壤及真实月壤的基本物理性质对比见表 1.

表 1 月壤和模拟月壤的基本物理性质
Table 1 Basic physical properties of lunar soil and simulant lunar soil

文献	样本	中值粒径 μm	密度 g·cm ⁻³	颗粒相对密度	孔隙比	含水率 %
本文	TJ-1	300	1.02~1.64	2.70	0.65~1.65	0.12
[13]	JSC-1	119.7	1.33~1.80	2.90	0.61~1.18	2.7±0.3
[14]	MLS-1	99.8	1.56~2.20	3.20	0.45~1.05	
[15]	CAS-1	85.9	0.96~1.50	2.74	0.82~1.85	0.0
[21]	JD	97.4	1.32~1.57	2.90	0.72~1.00	1.9±0.9
[2]	Apollo 11	148~105	1.36~1.80	3.01	0.67~1.20	
	Apollo 14	75~802	0.89~1.55	2.90	0.87~2.26	0.0
	Apollo 15	51~108	1.1~1.89	3.24	0.71~1.94	

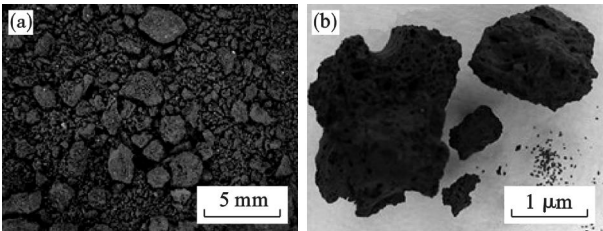


图 1 模拟月壤及颗粒粒径对比图
Fig. 1 TJ-1 simulant lunar soil and its particles size
(a)—模拟月壤;(b)—粒径对比图.

1.2 颗粒几何特性分析方法

颗粒几何特性可以从颗粒平面投影的几何形态和形状特征以及颗粒的纹理构造这三个方面来进行描述^[22],本文主要分析模拟月壤颗粒的几何

形态和形状特征. 颗粒在投影后形成一个平面区域,其几何形态参数包括面积 A 、周长 p 和费雷特直径 F_d ,形状特征参数包括圆度 c 、延伸度 a_r 和凹凸度 r_d . 表 2 列出了各参数及其定义描述.

将颗粒清除杂质后放置在白底玻璃器皿内,用 OLYMPUS 体视显微镜 SZX 16 同时配备数码相机对其拍照并保存数字图像;再用图形处理软件 Image J 对颗粒图像进行二值黑白处理,即可得到颗粒的二值黑白图和边缘轮廓图(见图 2). 最后用图形处理软件中的“颗粒分析”功能对各颗粒的边缘轮廓图进行几何特性参数量化统计并分析.

表 2 颗粒几何特性参数及其定义
Table 2 Parameters of particle geometric characteristics and their definition

参数	符号	定义
颗粒面积	A	平面投影中,颗粒所占区域的面积
颗粒周长	p	平面投影中,颗粒所占区域的周长
费雷特直径	F_d	平面投影中,颗粒边缘轮廓上最远两点间的距离
相似椭圆	f_e	颗粒平面投影边界最接近的椭圆,长轴 l_a 、短轴 l_i
延伸度	a_r	颗粒平面投影的整体延展程度,用 l_a/l_i 表示
圆度	c	颗粒轮廓边界线接近圆形的程度,用 $4\pi(A/p^2)$ 表示
凹凸度	r_d	颗粒轮廓边界线的突起程度,用 $4A/(\pi l_a^2)$ 表示

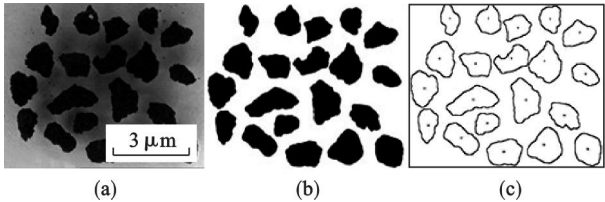


图 2 颗粒的图像、二值黑白图及边缘轮廓图
Fig. 2 Image, binary image and contour image of particles

(a)—图像; (b)—二值黑白图; (c)—边缘轮廓图.

表 3 模拟月壤各粒径组及百分含量
Table 3 Groups of lunar soil simulant particles size and their weight percentage

粒组	一	二	三	四	五	六	七
粒径/mm	2.00 ~ 5.00	1.00 ~ 2.00	0.50 ~ 1.00	0.25 ~ 0.50	0.10 ~ 0.25	0.075 ~ 0.10	<0.075
质量分数/%	15.00	10.00	11.50	16.00	10.00	17.50	20.00

中可以看出:同一粒径组中,颗粒形状差别很大,从长条状到接近圆形都有分布;颗粒多数存在棱角、钩角、锯齿等不规则结构,颗粒表面凹凸不平、较为粗糙,少有薄片状颗粒存在.

第一粒组到第四粒组的颗粒都带有蜂窝状气孔结构,前三个粒组的颗粒尤为明显;气孔结构从第五粒组开始明显减少,第六粒组的颗粒则基本不存在气孔结构,第七粒组的颗粒则完全没有气孔结构,仅由细小的火山灰颗粒组成.

2.2 颗粒几何特性分析

对每组 100 个颗粒的图像进行几何特性分析,并统计各参数值.表 4 给出了 TJ-1 模拟月壤颗粒三个几何形态参数:面积、周长和费雷特直径的统计结果,对统计值的简要分析见表 5.

从最大值和最小值的比值来看,第一粒组

2 试验分析结果

2.1 试验分组及颗粒图像

模拟月壤具有:粒径分布范围广、不同粒径的颗粒形状差别大等特点,本文根据粒径的大小把 TJ-1 模拟月壤颗粒分为 7 组(见表 3),在每个粒组中随机选取 100 个颗粒进行几何特性研究.

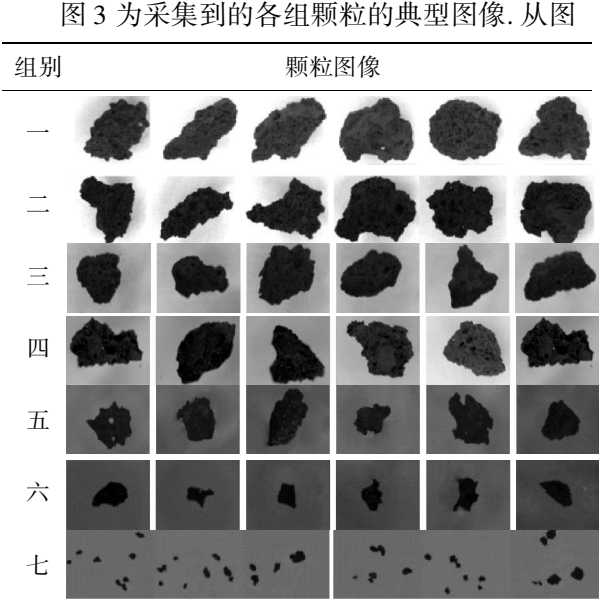


图 3 模拟月壤颗粒图像
Fig. 3 Images of lunar soil simulant particles

3 个几何形态参数的比值明显比其他各组要偏小,说明第一粒组的颗粒几何形态相对其他各组要相对均匀一些.第二,三,四粒组面积的比值很接近,从第五粒组开始比值开始剧增;周长的比值也呈现同样的趋势,费雷特直径的比值则从第六粒组开始剧增.说明粒径越小,同一个粒组里的颗粒几何形态越不规则,差异越大.从平均值来看,各组颗粒周长和费雷特直径的比值在 2.7 ~ 3.1 之间,并且随着粒径的减小,比值整体上呈现下降的趋势.

表 6 给出了 TJ-1 模拟月壤颗粒三个形状特征参数:延伸度、圆度和凹凸度的均值统计结果.从表中可以看出,随着粒径的减小,各组颗粒长轴和短轴的比值(即延伸度)的均值保持在 1.33 ~ 1.53 之间,相差不大.第七粒组颗粒的圆度均值

为 0.811,其他各组颗粒的圆度均值在 0.66 ~ 0.77 之间.对比图 4 可知:粒径最小的第七粒组颗粒最为接近圆形,其他粒组的颗粒形状则基本保持在正三角形和正四边形之间,且以接近正三角形为主.各组颗粒的凹凸度都在 0.7 左右,变化幅度不大,颗粒投影轮廓的凸起程度比较接近,都较为凹凸不平.

表 4 模拟月壤颗粒几何形态参数值统计
Table 4 Geometric morphological parameter statistics of lunar soil simulant particles

组别	几何形态参数	最大值	最小值	平均值
一	面积/ mm ²	44.830	18.710	30.140
	周长/ mm	30.030	18.600	23.530
	费雷特直径/ mm	10.820	5.910	7.620
二	面积/ mm ²	19.266	4.800	9.304
	周长/ mm	19.575	9.721	13.175
	费雷特直径/mm	6.278	2.981	4.337
三	面积/ mm ²	5.241	1.326	2.899
	周长/mm	10.866	4.514	7.053
	费雷特直径/mm	4.541	1.541	2.441
四	面积/ mm ²	1.960	0.439	0.920
	周长/mm	6.582	2.721	4.134
	费雷特直径/mm	2.395	0.917	1.418
五	面积/ mm ²	0.427	0.050	0.171
	周长/mm	2.955	0.950	1.731
	费雷特直径/mm	1.058	0.358	0.601
六	面积/ mm ²	0.070	0.002	0.024
	周长/ mm	1.116	0.137	0.601
	费雷特直径/ mm	0.393	0.051	0.218
七	面积/ mm ²	0.009	2.54E -05	0.004
	周长/ mm	0.421	0.014	0.248
	费雷特直径/ mm	0.173	0.007	0.091

表 5 模拟月壤颗粒几何形态参数值分析
Table 5 Geometric morphological parameter analysis of lunar soil simulant particles

组别	最大值/最小值			平均值
	面积	周长	费雷特直径	周长/费雷特直径
一	2.396	1.615	1.831	3.09
二	4.014	2.014	2.106	3.04
三	3.952	2.407	2.947	2.89
四	4.465	2.419	2.612	2.92
五	8.540	3.111	2.955	2.88
六	35.000	8.146	7.706	2.76
七	354.331	30.071	24.714	2.73

表 6 模拟月壤颗粒形状特征参数均值统计
Table 6 Shape characteristic parameters mean value statistics of lunar soil simulant particles

组别	长轴/mm	短轴/mm	延伸度	圆度	凹凸度
一	7.120	5.380	1.329	0.686	0.767
二	4.082	2.867	1.445	0.669	0.716
三	2.301	1.594	1.464	0.729	0.713
四	1.311	0.874	1.526	0.667	0.683
五	0.554	0.375	1.532	0.682	0.689
六	0.204	0.135	1.534	0.763	0.680
七	0.085	0.059	1.471	0.811	0.708

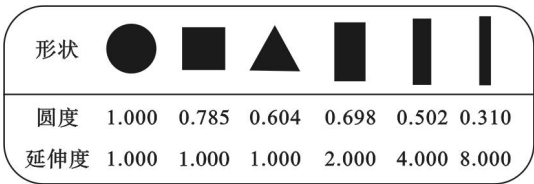


图 4 各种形状的圆度及延伸度值
Fig. 4 Circularity and aspect ratio of different shapes

3 与真实月壤颗粒对比

真实月壤颗粒的轮廓形状很不规则,颗粒表面多具棱角、尖角和钩角等结构,且部分颗粒内部存在贯穿孔洞,图 5 为少数带有尺寸标注的真实月壤颗粒图片^[23].

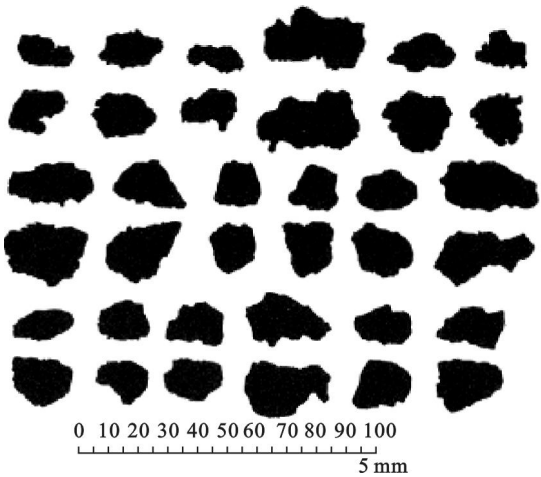


图 5 Apollo - 12 月壤样品颗粒图
Fig. 5 Particles image of Apollo-12 lunar soil

对图 5 中的 36 个月壤颗粒进行几何特性分析,表 7 为各参数值的统计结果.月壤颗粒的费雷特直径均值为 1.168 mm,比 TJ - 1 模拟月壤第四粒组颗粒的费雷特直径均值 1.418 mm 略小,故对这两组颗粒进行对比分析.

第四粒组颗粒的面积和周长都比月壤颗粒略大.从均值来看,月壤颗粒的延伸度为 1.57,而第

四粒组颗粒的延伸度 1.53,两者相近;两组颗粒的圆度皆在 0.66 左右;月壤颗粒的凹凸度为 0.67,与第四粒组颗粒的凹凸度 0.68 很接近,两种颗粒都较为凹凸.

表 7 Apollo - 12 月壤颗粒几何特性统计
Table 7 Geometric characteristics statistics of Apollo-12 lunar soil particles

统计值	面积 mm ²	周长 mm	费雷特 直径/mm	长轴 mm	短轴 mm	延伸度	圆度	凹凸度
最大值	1.246	5.445	1.729	1.732	0.976	2.423	0.808	0.972
最小值	0.308	2.583	0.886	0.779	0.402	1.032	0.517	0.414
均值	0.631	3.457	1.167	1.102	0.714	1.571	0.656	0.668

4 结 论

- 1) TJ - 1 模拟月壤颗粒都具有棱角、钩角、锯齿等不规则结构,表面相对凹凸,前三个粒组的颗粒尤为明显,少有薄片状颗粒存在.
- 2) 第一粒组到第四粒组的颗粒都带有明显的蜂窝状气孔结构,气孔结构从第五粒组开始明显减少;第六粒组颗粒则基本不存在气孔结构,第七粒组颗粒则仅由细小的火山灰颗粒组成.
- 3) 颗粒形状各异,主要形状有长条状、类三角形和类四边形. 第七粒组颗粒最为接近圆形,其他粒组的颗粒形状主要保持在正三角形和正四边形之间,且以接近正三角形为主.
- 4) 颗粒的延伸度均值在 1.33 ~ 1.53 之间,相差不大;颗粒的凹凸度均值基本都在 0.7 左右. 第七粒组颗粒的圆度均值为 0.811,其他各组颗粒的圆度均值在 0.66 ~ 0.77 之间.

本文研究的数据结果将为后续从细观结构上进一步揭示 TJ - 1 模拟月壤颗粒的力学性质奠定基础.

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 Zi-yuan. Introduction to lunar science [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2005.)

[2] Carrier W, Mitchell J K, Mahmood A. The nature of lunar soil [J]. *Journal of the Soil Mechanic and Foundations Division*, 1973, 99 (10): 813 - 832.

[3] Mckay D S, Heiken G H, Basu A, et al. The lunar regolith [C]// *Lunar Source Book*. Cambridge: Cambridge University Press, 1991: 285 - 356.

[4] Somrit C, Nakagawa M. Simulation of agglutinates formation [J]. *Earth and Space*, 2006, 188 (35): 1 - 7.

[5] 李丽华,唐辉明,刘数华. 月壤及模拟月壤微观结构的研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33 (1): 31 - 34.
(Li Li-hua, Tang Hui-ming, Liu Shu-hua. Microstructure of lunar soil and lunar soil simulant [J]. *Rock and Soil*

Mechanics, 2012, 33 (1): 31 - 34.)

[6] 孔亮,彭仁. 颗粒形状对砂类土力学性质影响的颗粒流模拟 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30 (10): 2112 - 2119.
(Kong Liang, Peng Ren. Particle flow simulation of influence of particle shape on mechanical properties of quasi-sands [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30 (10): 2112 - 2119.)

[7] Kunio S, Mikihiro O, Boris G. Effect of particle shape on angle of internal friction by tri-axial compression test [J]. *Powder Technology*, 2000, 107 (1/2): 131 - 136.

[8] Joseph A, Matthew K. Influence of particle shape on granular contact signatures and shear strength: new insights from simulations [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2004, 41 (21): 5863 - 5870.

[9] 陈海洋,汪稔,李建国,等. 钙质砂颗粒的形状分析 [J]. 岩土力学, 2005, 26 (9): 1289 - 1293.
(Chen Hai-yang, Wang Ren, Li Jian-guo, et al. Grain shape analysis of calcareous soil [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26 (9): 1289 - 1293.)

[10] Mitchell J K, Houston W N, Scott R F, et al. Mechanical properties of lunar soil; density, porosity, cohesion and angle of internal friction [C]// *Proceedings of the 3rd Lunar Science Conference*. Houston: MIT Press, 1972: 3235 - 3253.

[11] 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 Yong-chun, Wang Shi-jie, Liu Jian-zhong, et al. A review and prospect for developing of lunar soil simulants [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2005, 25 (1): 70 - 75.)

[12] David M, James C, Walter B, et al. JSC - 1: a new lunar soil simulant [C]// *Proceedings of the 4th International Conference on Engineering, Construction and Operations in Space*. New York: ASCE, 1994: 857 - 866.

[13] 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.

[14] Kanamori H, Udagawa S, Yoshida T, et al. Properties of lunar soil simulant manufactured in Japan [C]// *Proceedings of the 6th International Conference on Engineering, Construction and Operations in Space*. Albuquerque: ASCE, 1998: 462 - 468.

[15] Zheng Y C, Wang S J, Ouyang Z Y, et al. CAS - 1 lunar soil stimulant [J]. *Advance in Space Research*, 2009, 43 (3) :

- 448-454.
- [16] 蒋明镜,李立青. TJ-1 模拟月壤的研制[J]. 岩土工程学报,2011,33(2):209-214.
(Jiang Ming-jing, Li Li-qing. Development of TJ-1 lunar soil simulant [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(2):209-214.)
- [17] Li Y Q, Liu J Z, Yue Z Y. NAO-1: lunar high land soil simulant developed in China [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2009, 22(1):53-57.
- [18] Zeng X W, He C M, Wilkinson A. Geotechnical properties of NU-LHT-2M lunar high land simulant [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2010, 23(4):213-218.
- [19] 钟世英,黄根清,戚顺超,等. 软着陆足垫与模拟月壤界面特性研究[J]. 岩土力学,2013,34(4):1058-1062.
(Zhong Shi-ying, Huang Gen-qing, Qi Shun-chao, et al. Interface property between soft landing foot pad and simulant lunar soil [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(4):1058-1062.)
- [20] 于红梅,许建东,林传勇,等. 吉林省龙岗火山群南龙湾第四纪火山碎屑颗粒特征研究[J]. 岩石学报,2008,24(11):2621-2630.
(Yu Hong-mei, Xu Jian-dong, Lin Chuan-yong, et al. Study on the characteristics of quaternary volcanic pyroclasts from Nanlongwan volcano, Longgang volcanic cluster, Jilin Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(11):2621-2630.)
- [21] 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 Jian-qiao, Zou Meng, Jia Yang, et al. Lunar soil simulant for vehicle-terra mechanics research in laboratory [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(6):1557-1561.)
- [22] 刘清秉,项伟, Budhu Muniram, 等. 砂土颗粒形状量化及其对力学指标的影响[J]. 岩土力学,2011,32(sup1):190-197.
(Liu Qing-bing, Xiang Wei, Budhu Muniram, et al. Study of particle shape quantification and effect on mechanical property of sand [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(sup1):190-197.)
- [23] Heywood H. Particle size and shape distribution for lunar fines sample 12057, 72 [C]// Proceedings of the 2nd Lunar Science Conference. Boston: MIT Press, 1971:1989-2001.

(上接第 450 页)

- [11] Chittleborough D J. Indices of weathering for soil and paleosols formed on silicate rocks [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 1991, 38(1):115-120.
- [12] Vogel D E. Precambrian weathering in acid metavolcanic rocks from the Superior Province, Villebon Township, South-Central Quebec [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1975, 12(12):2080-2085.
- [13] Ruxton B P. Measures of the degree of chemical weathering of rocks [J]. *Journal of Geology*, 1968, 76(5):518-527.
- [14] Topal T. Quantification of weathering depths in slightly weathered tuffs [J]. *Environmental Geology*, 2002, 42(6):632-641.
- [15] Sueoka T. Identification and classification of granite residual soils using chemical weathering index [C]// Proceeding of the 2nd International Conference on Geomechanics in Tropical Soils. Singapore, 1988:55-62.
- [16] Duzgoren-Aydin N S, Aydin A, Malpas J. Re-assessment of chemical weathering indices: case study on pyroclastic rocks of Hong Kong [J]. *Engineering Geology*, 2002, 63(1):99-119.
- [17] Iliev I G. An attempt to estimate the degree of weathering of intrusive rocks from their physico-mechanical properties [C]// Proceeding of the 1st Congress International Society of Rock Mechanics. Lisbon, 1966:109-114.
- [18] Abu-Hassanein Z S, Benson C H, Blotz L R. Electrical resistivity of compacted clays [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 122(5):397-406.
- [19] Yoon G L, Park J B. Sensitivity of leachate and fine contents on electrical resistivity variations of sandy soil [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2001(B84):147-161.
- [20] Delaney A J, Peapples P R, Arcone S A. Electrical resistivity of frozen and petroleum-contaminated fine-grained soil [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2001, 32(2):107-119.
- [21] Kaya A, Fang H Y. Identification of contaminated soils by dielectric constant and electrical conductivity [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1997, 123(2):169-177.
- [22] Archie G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics [J]. *Transactions of American Institute of Mining Metallurgical Engineers*, 1942, 146(1):54-62.
- [23] 董晓强,黄凤凤,苏楠楠,等. 非饱和黄土受压过程中交流电阻率特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1):189-197.
(Dong Xiao-qiang, Huang Feng-feng, Su Nan-nan, et al. Experimental study of AC electrical resistivity of unsaturated loess during compression [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(1):189-197.)
- [24] Fukue M, Minato T, Horibe H, et al. The micro-structures of clay given by resistivity measurements [J]. *Engineering Geology*, 1999, 54(1):43-53.