

文章编号: 1000-7598 (2012) 01-0031-04

# 月壤及模拟月壤微观结构的研究

李丽华<sup>1,2</sup>, 唐辉明<sup>2</sup>, 刘数华<sup>3</sup>

(1. 湖北工业大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430068; 2. 中国地质大学 工程学院, 武汉 430074;  
3. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

**摘要:** 为了对比研究月壤与模拟月壤的微观结构, 介绍了月壤的形成作用过程和 5 种基本颗粒类型; 通过真实月壤照片, 对月壤微观结构进行了分析; 利用火山灰为模拟月壤主体材料, 对其成分进行了检测; 对模拟月壤的火山灰颗粒进行了显微图像分析试验。结果表明, 月壤存在胶结物微观颗粒, 胶结物颗粒具有分支的组织形态和封闭的气泡, 并且有金属铁珠存在; 火山灰所含的主要成分及含量与月壤相似, 经过粉碎的火山灰试样棱角较为明显, 其纵横比峰值略小, 稍显长条状, 但与月壤比较相近, 而复杂度因子则略有欠缺, 说明颗粒还不够粗糙和多棱。

**关键词:** 月壤; 模拟月壤; 微观结构; 胶结物

**中图分类号:** TU 411

**文献标识码:** A

## Microstructure of lunar soil and lunar soil simulant

LI Li-hua<sup>1,2</sup>, TANG Hui-ming<sup>2</sup>, LIU Shu-hua<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

2. Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

3. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** In order to compare microstructure of lunar soil and lunar soil stimulant, formative processes and five grain type of lunar soil are introduced. We analyze microstructure of lunar soil through lunar soil photos. There is a composition test on pozzolan that is taken as main materials of lunar soil simulant. Microscopic image analysis tests on pozzolan have been done. Test and analysis results show that there are agglutinates in lunar soil. Agglutinate grains take on branching form of organization and closed cell and have metallic iron globules. Main component content of pozzolan is similar to that of lunar soil. Pozzolan crushed show obvious angular, slightly rod-like and little peak value of aspect ratio, which are similar to lunar soil. But complexity factors have little deficiency, which account for pozzolan as simulant materials have not enough coarse and angular.

**Key words:** lunar soil; lunar soil simulant; microstructure; agglutinate

## 1 月壤的演化及成分

月表的岩石受到小天体频繁撞击、破碎、溅射和太阳的辐射, 形成 3~20 m 厚覆盖月表的月壤层。月壤是由月岩组成, 直径小于 1 cm, 所有大于等于 1 cm 的称为岩石<sup>[1]</sup>。月球表面没有地球大气层保护, 直接面对的是超速陨星的撞击, 导致了月表岩石的分裂破碎, 并有一定程度的熔合、聚变、气化蒸发、粉碎, 使得月壤颗粒尺寸逐渐变细。当小体积的月壤在微陨星撞击中被附近矿物熔化合并形成较大颗粒(称为胶结物)时, 分裂破碎得以平衡。粉碎和胶合是月壤演变过程中在构造上的两大动力学过

程。探月活动和试验研究必须用到大量的模拟月壤, 因为真实月壤样品极其珍贵<sup>[2-6]</sup>。以火山灰为模拟月壤主体材料, 其元素质量百分比含量与真实月壤样品的对照如表 1 所示。由表可知, 以火山灰为主体材料模拟真实月壤成分, 其氧、硅、铁、铝等主要成分含量基本相似, 从一种月表区域到另一种月表区域, 月壤成分有一些变化。月表低海区域覆盖有玄武岩, 其中铁的含量很高; 而高地处却有更多的钙长石, 其中铝和钙含量很高。

## 2 月壤颗粒类型

月球的表面覆盖着表层岩, 表层岩是未固结的

收稿日期: 2010-04-23

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(No. 20090461002); 中国博士后科学基金特别资助项目(No. 201003503)。

第一作者简介: 李丽华, 女, 博士后, 副教授, 主要从事环境岩土方面的研究工作。E-mail: lilihua466@163.com

残余物或迁移的物质。月壤指的是月球表面表层岩的细颗粒部分（小于 1 cm）。月壤不同于地球上任何自然产生的物质，月壤的形成主要有两个作用过程：①简单的分散或岩石的破裂，矿物产品分解成小颗粒；②凝结过程，由于小陨星体的撞击使得岩石和矿物碎片熔接在一起。月壤具有黏性，颗粒非常细小，是由玄武岩和辉长石演变而来的松散颗粒，平均粒径为 40~800  $\mu\text{m}$ 。月壤有 5 种基本的颗粒类型：矿物碎片、原始结晶岩碎片、角砾岩碎片、不同种类的玻璃体和胶结物。

表 1 模拟月壤与月壤元素成分对比

Table 1 Component comparison of lunar soil and pozzolan

元素	模拟月壤（火山灰）质量百分比/%	月壤质量百分比/%	
		高地	月海
O	49.00	45.00	45.00
Si	20.00	21.00	21.00
Fe	7.00	6.00	15.00
Al	7.00	13.00	5.00
C	4.00		
Ca	4.00	10.00	8.00
Na	2.30	<1.00	<1.00
Mg	2.30	5.50	5.50
K	1.50		
Ti	1.10	<1.00	<1.00
P	0.20		
Mn	0.10		
Ba	0.07		
Sr	0.07		

当陨星撞击时，月壤熔化形成了胶结物、角砾岩碎片及混杂的玻璃体。单个的月壤颗粒大多是玻璃聚合物加上不同的岩石和矿物碎片。

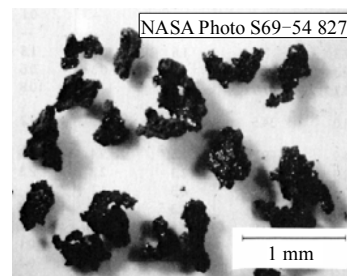
### 3 月壤胶结物颗粒微观结构

目前的模拟月壤是由地球岩石或矿物碾磨而成，并参考真实月壤指标得到预期的颗粒分布情况。这种生产过程对于研制生产有尖角的模拟月壤颗粒是有效的，但不适宜于生产圆形或球形，含有不规则形态胶结物的模拟月壤。即使是目前国际上最广泛使用的模拟月壤 JSC-1 几乎都不含有与月壤胶结物形态相匹配的颗粒，也缺乏月壤中存在的铁珠。由于这些胶结颗粒的缺乏，使得这些模拟月壤无法精确、逼真地模拟真实月壤的力学特性和热物理特性。而胶结物是月壤重要的组成部分，在月壤中大量存在，特别是在成熟的月壤中，体积可以占到 65%。胶结物是一些矿物颗粒、玻璃体甚至老的胶结物联结起来的独特颗粒，是由于月球表面微陨星体连续不断地轰击而产生的，其分布量随着时间的增加而增加，并且直接与累计暴露的龄期成比例。

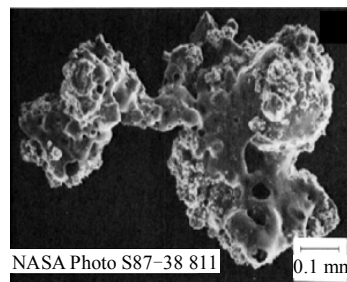
月壤中胶结物的百分量是标志其成熟度最有效的指标之一。胶结物中金属铁珠的存在影响月壤的一些物理特性，铁珠承担着月球表层岩具有磁性化的特性，并且有助于微波能量的吸收。胶结物的碎片构成了月尘颗粒的主要部分（70%~90%）。胶结颗粒的存在对月壤力学特性也有很重要的影响，受胶结物影响最大的是抗剪强度和压缩性。颗粒的形状和内部的孔隙率对月壤抗剪强度有很大的影响。在低侧限压力下，极不规则形状的胶结颗粒容易联结起来产生高的抗剪强度。月壤由于胶结颗粒的挤压，比一般测试材料更具有压缩性。因此，月壤的力学特性由于加载历史的不同差别会很大。月壤胶结物具有独一无二的特性，包括：

- (1) 高度不规则的形状（经常有分支的组织形态）；
- (2) 太阳风气的封闭气泡存在，当胶结物被压碎时，气泡会释放；
- (3) 多相组成，非均质的；
- (4) 铁金属小球的存在，颗粒非常细小。

Apollo11 月壤胶结物的照片如图 1 所示<sup>[7]</sup>。截面较薄时，胶结物通常是多相非均质的，外表有不同比率的玻璃、岩石和矿物碎片的混合物，多数胶结物存在大量气泡，胶结物含有太阳风气，包括氮氢。图 2 显示了 Apollo11 月壤样品胶结物表面背散射照片<sup>[7]</sup>。明亮圆形部分是金属铁珠的图片。月壤胶结物中大约 99% 的金属铁珠直径为 1  $\mu\text{m}$  或更小，胶结物中大多金属铁珠尺寸为 10~20 nm。



(a) 光学显微镜照片



(b) 电镜扫描照片

图 1 月壤样品胶结物照片

Fig.1 Agglutinate photos of lunar soil

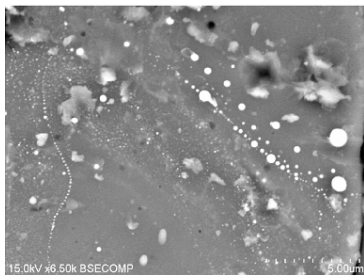


图 2 月壤胶结物表面背散射照片  
Fig.2 Backscattering photos of lunar soil agglutinates

### 4 显微图像分析

月壤颗粒形态高度变化，从球形到极端棱角状都有出现，但长条状、次棱角状和棱角状的颗粒形态相对更为常见，如表 2 所示。

火山灰显微图像分析法试验过程如下：取干燥试样（即纯火山灰）0.1 g，放入小烧杯中，再加入 25 mL 配置好的分散剂，搅拌 15 min，搅拌均匀后

用滴管吸出几滴浊液滴在显微镜的载玻片上。将显微镜光学捕捉镜头接入电脑，先调节显微镜粗调节螺旋，后调节细调节螺旋，直到土颗粒均匀，清楚地分散显示在电脑屏幕上，保存图像文件。移动载物台进行多次采样和拍照，得到 1 组图像（颗粒总数为 1 597 个）。校准 IPP 测量软件。将一根直径为 0.15 mm 的铜丝作为测量基准，放在显微镜下观察，分别横向和纵向放置，以校验纵横比，保存图像，并用 IPP 软件打开图像，校准刻度。用 IPP 软件测量符合要求的颗粒的待测指标。打开颗粒图像，进行前期预处理，使用校准后的刻度作为系统刻度，选择测量参数，自动测量、计数，后按颗粒大小分类并将测量结果保存。使用 IPP 软件自带的 DDE 导入功能，将测量结果导入 EXCEL，以进行后期数据分析。以火山灰为主体材料模拟月壤的显微图像如图 3 所示，而国际典型模拟月壤 JSC-1 的电镜照片如图 4 所示<sup>[8-9]</sup>。

表 2 月壤的颗粒形态

Table 2 Grain organization of lunar soil

纵横比		复杂度因子		长度直径比		圆度轮廓		体积系数		比表面积	
平均值	描述	平均值	描述	平均值	描述	平均值	描述	平均值	描述	平均值/(m <sup>2</sup> /g)	描述
0.70	稍长条状	1.15	次棱角状	0.55	稍长条状至中等长条状	0.22	次棱角状	0.30	长条状	0.50	不规则、凹角状

注：纵横比定义为颗粒等效椭圆的短轴与长轴之比；复杂度因子是度量颗粒棱角的指标，定义为颗粒周长与等效椭圆周长的比值；体积系数定义为颗粒体积与颗粒轮廓外切立方体的比值。

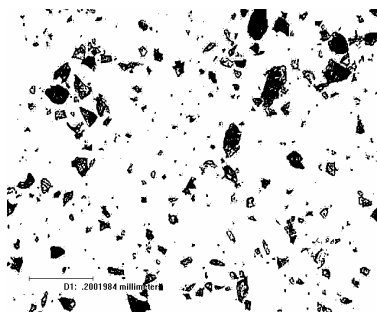


图 3 火山灰模拟月壤显微图像  
Fig.3 Microscopic image of pozzolan

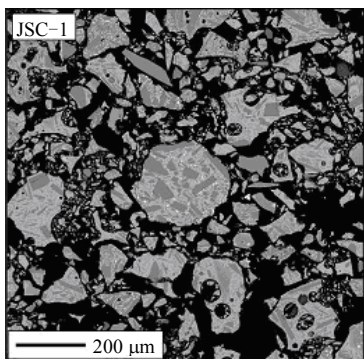


图 4 JSC-1 模拟月壤电镜照片  
Fig.4 SEM photos of JSC-1 lunar soil

经过粉碎的火山灰试样没有经历过长期水力、风力的磨圆作用，其颗粒形状并不固定，棱角较为明显，与月壤比较相近。显微图像分析法对火山灰细颗粒的形态分析统计数据如表 3 所示，火山灰试样颗粒纵横比对比图和复杂度因子对比图分别如图 5、6 所示。

表 3 火山灰颗粒分析数据

Table 3 Pozzolan grain analysis data

指标	纵横比	复杂度因子	长度直径比	圆度
最大值	0.98	2.39	1.09	12.0
最小值	0.01	0.23	0.50	1.0
平均值	0.58	1.04	0.68	2.1

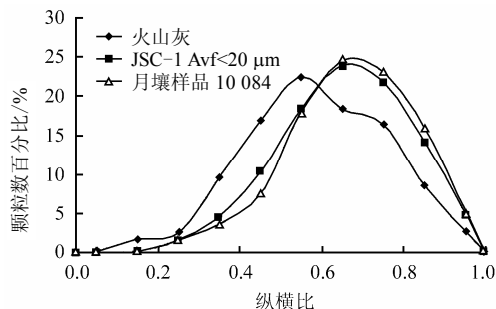


图 5 火山灰试样颗粒纵横比对比图  
Fig.5 Aspect ratio comparison of pozzolan and lunar soil

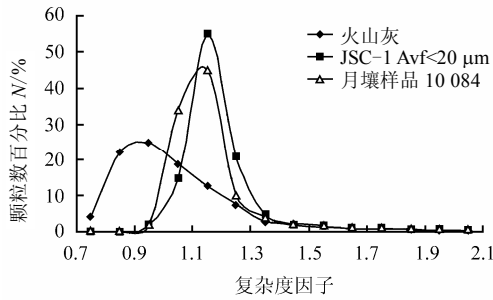


图 6 复杂度因子对比图

Fig.6 Complexity factors comparison

综上所述,月壤样品 10 084 和 JSC-1 Avf < 20  $\mu\text{m}$  (即 JSC-1 模拟月壤平均粒径小于 20  $\mu\text{m}$  的细颗粒部分)的颗粒纵横比峰值均出现在约 0.7 处,这也与其他月球样品相近。而此次试验的火山灰试样纵横比峰值略小,在约 0.5 处,表明用雷蒙磨研磨的火山灰颗粒比真实月壤略显长条状。大约有 14% 的颗粒其纵横比小于 0.4,这也与真实月壤略微有所差别(真实月壤约 3%~12%)。

JSC-1 Avf < 20  $\mu\text{m}$  模拟月壤的颗粒复杂度因子的峰值略微大于月壤平均值,这表明 JSC-1 模拟月壤要比月壤的平均状态更加粗糙,并且更加富有棱角。而本次试验的火山灰相反则显得不够粗糙和多棱,这应该与加工设备有关,加工设备对火山灰的研磨方式导致了其磨圆度较高,还没有达到月壤平均状态的粗糙度或复杂度,需要进一步改进。

## 5 结 论

(1) 以火山灰为主体材料模拟真实月壤成分,其氧、硅、铁、铝等主要成分和含量与真实月壤基本相似,月表高地处和低海处主要成分的含量也有一些不同。

(2) 真实月壤微观结构存在胶结物颗粒,这些颗粒是月壤重要的组成部分。胶结物颗粒具有分支的组织形态和封闭的气泡,并且有金属铁珠存在。

(3) 经过粉碎的火山灰试样棱角较为明显,略显长条状,但与月壤比较相近,其粗糙度或复杂度则略有欠缺。

## 参 考 文 献

- [1] 郑永春. 模拟月壤研制与月壤的微波辐射特性研究[博士学位论文 D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005.
- [2] HAYM B, LEONHARD B. Review engineering of lunar bases[J]. *Acta Astronautica*, 2008, 62(4-5): 277-299.
- [3] MATTHEW R E, NICHOLAS P. Preparation and handling large quantities of JSC-1A lunar regolith simulant for the 2007 regolith excavation challenge[J]. *Space Technology and Applications International Forum*, 2008, 2: 268-273.
- [4] 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 Yong-chun, WANG Shi-jie, FENG Jun-ming, et al. CAS-1 lunar soil stimulant[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2007, 27(3/4): 571-578.
- [5] LI Y Q, LIU J Z, YUE Z Y. NAO-1: Lunar highland soil stimulant developed in China[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2009, 22(1): 53-57.
- [6] 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 stimulants[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2005, 25(1): 70-75.
- [7] ROBERT J G, BRANT C W, MARTY A G. Development of a high fidelity lunar soil stimulant[J]. *Space Technology and Applications International Forum*, 2008, 6: 213-220.
- [8] NOREEN K M. The lunar environment: determining the health effects of exposure to moon dusts[J]. *Acta Astronautica*, 2008, 63(7-10): 1006-1014.
- [9] KLOSKY J L, STURE S, KO H Y, et al. Geotechnical behavior of JSC-1 lunar soil stimulant[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2000, 13(4): 133-138.