

# 月壤的物理和机械性质

郑永春<sup>1,2</sup>, 欧阳自远<sup>1</sup>, 王世杰<sup>1</sup>, 邹永廖<sup>3</sup>

1. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002;  
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;  
3. 中国科学院国家天文台, 北京 100012

**【摘要】** 月壤是在 O<sub>2</sub>、水、风和生命活动都不存在的情况下, 由陨石和微陨石撞击、宇宙射线和太阳风轰击、月表温差导致岩石热胀冷缩破碎等因素的共同作用下形成的。月壤独特的形成过程, 加上独特的月表环境, 使月壤在粒度分布、颗粒形态、颗粒比重、孔隙比和孔隙率、电性和电磁性质、压缩性、抗剪性、承载力等方面均与地球土壤存在较大差异, 这些参数的平均值和最佳估计值, 可以作为月表机械设计和操作、宇航员装备设计、月球着陆场选址的主要依据, 对月球资源开发和利用以及月球基地建设具有极其重要的意义。

**【关键词】** 月壤; 物理性质; 机械性质; 最佳估计值

中图分类号: P185.15 文献标识码: A

文章编号: 1001-6872(2004)04-0014-06

## 0 引言

迄今以来, 人类利用地基天文望远镜对月观测、太空望远镜和环月卫星的遥感探测、无人驾驶月球车以及 Apollo 宇航员的月表巡视获得大量的图像和数据资料, 所有结果都显示, 整个月球表面除了极少数非常陡峭的山脉、撞击坑和火山通道的峭壁(这些区域可能有基岩出露)外, 都覆盖着一层厚度不等的月壤。月海区月壤平均厚约 4 m~5 m, 高地区平均厚约 10 m~20 m。

与地球土壤的形成过程相反, 月壤的形成是在 O<sub>2</sub>、水、风和生命活动都不存在的情况下, 由大大小小的陨石和微陨石撞击、宇宙射线和太阳风持续不

断轰击、月表大幅度温差变化导致月球岩石热胀冷缩破碎等因素的共同作用下形成的。因此, 月壤的形成基本上是机械破碎作用主导的。

月壤的基本组成颗粒包括: 矿物碎屑(这里定义为含某种矿物 80% 以上的颗粒, 主要为橄榄石、斜长石、辉石、钛铁矿、尖晶石等)、原始结晶岩碎屑(玄武岩、斜长岩、橄榄岩、苏长岩等)、角砾岩碎屑、各种玻璃(熔融岩、微角砾岩、撞击玻璃、黄色或黑色火成碎屑玻璃)、独特的月壤组分——粘合集块岩、陨石碎片等。因此, 月壤的化学成分、岩石类型和矿物组成非常复杂, 几乎每个月壤样品都包括多种岩石和矿物, 仅月海玄武岩的就包括极低钛、低钛、高钛、极高钛四种,  $w(\text{TiO}_2)$  从 0.5%~13% 不等。

月球遥感探测的目的除了回答有关月球整体的

收稿日期: 2004-09-10; 改回日期: 2004-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(No. 40473036); 中国科学知识创新工程项目(编号: KZCX2-115); 863-703 项目(No. 2004AA735020)

作者简介: 郑永春, 男, 27 岁, 博士生、天体化学专业, 研究方向: 地球物理、月球与行星科学。

科学问题外,还包括选择合适的月表着陆场,为机器人和宇航员登陆月表创造条件,其最终目的是建立月球基地,并以月球为跳板,再载人登陆火星。在机器人和月球车月表巡视、载人登月和宇航员月表行走阶段,对月表月壤物理和机械性质的详细了解可以避免不必要的风险,保障航天任务的安全性,意义十分重要<sup>[1]</sup>。在开发和利用月球资源、建立月球基地阶段,需要在月球上进行规模宏大的资源开发和工程建设,结构松散、易于开采的月壤层就成为首选目标,而这些工作的顺利开展必须建立在对月壤的物理和机械性质的详细研究的基础上。

## 1 月壤的物理和机械性质研究历史

对月壤的物理和机械性质研究最早始于第一次近月飞行之前,研究手段包括地基对月射电望远镜观测<sup>[2]</sup>,利用与月壤具有相似光学、热学和电学性质的地球物质进行物理和机械性质的测试与研究,这些数据后来被作为无人月球探测器设计的基础。此后,无人月球探测器在月球表面的安全着陆,使人类第一次得到了关于月壤的物理和机械性质的第一手资料。结果发现,强烈火山活动带附近的新鲜火山沉积物与月表月壤十分相似<sup>[3]</sup>。根据这些资料,研制出化学成分、矿物组成、粒度分布等许多方面与月壤十分接近的模拟月壤<sup>[4,11]</sup>。

月壤的物理和机械性质研究最重要的阶段是在月球样品返回地面后,对实际月壤样品进行全面细致研究的基础上得到的;Lunokhod 1、Lunokhod 2 无人驾驶月球车和 Apollo 宇航员驾驶月球车的月表巡视也对月壤的物理和机械性质进行了大量研究。这些研究主要包括:(1)月壤性质的实验室测试,以揭示月壤的物理和机械性质的变化规律以及与月壤密度的关系<sup>[5~7]</sup>;(2)研究月表原位月壤的物理和机械性质以及与地形、地貌条件的关系<sup>[8,9]</sup>;(3)利用模拟月壤进行月表月壤物理和机械性质的研究和测试<sup>[2,10,11]</sup>。

## 2 月壤的颗粒组成

月壤的颗粒组成,包括颗粒形态和粒度分布,是决定月壤的物理和机械性质的主要参数之一。

①郑永春,王世杰,刘建忠等.模拟月壤研制的初步设想.空间科学学报,待刊。

### 2.1 粒度分布特征

月壤的分选性普遍较差,粒度与淤沙相似,但分布范围很宽,颗粒直径以小于 1 mm 为主,绝大部分颗粒直径在 30  $\mu\text{m}$ ~1 mm 之间,中值粒径在 40  $\mu\text{m}$ ~130  $\mu\text{m}$  之间,平均为 70  $\mu\text{m}$ 。也就是说,近半数月壤颗粒的直径小于肉眼的分辨能力,约 10%~20% 的颗粒直径小于 20  $\mu\text{m}$ ,因此易于漂浮,并附着在宇航服、机械设备或望远镜和摄像机镜头上。

月球不同单元的月壤暴露于月表的时间有长有短,遭受空间风化(space weathering,主要是陨石和微陨石撞击、太阳风和高能宇宙射线轰击)的程度和成熟度也各不相同,成熟度的差异导致月壤粒度各异。月壤成熟度越高,平均粒度越细,一定体积月壤中大块岩石的含量就越少。这些岩石有平卧出露月表的,也有半埋或隐伏于浮土中的,甚至于直径大于 1 m 的转石在登月舱附近也常可见到。考虑到月球基地建设和资源提取工艺的复杂性,成熟月壤区是登月舱着陆场和月球基地的理想选址。

表 1 为 Apollo 11~17 各次登月点典型月壤样品中 >1 cm, 4 mm~10 mm, 2 mm~4 mm, 1 mm~2 mm, <1 mm 部分的颗粒重量,以及颗粒直径 <1 cm 部分和 <1 mm 部分的平均粒径。

表 1 代表性月壤样品各粒径范围内的颗粒重量与平均粒径<sup>[12]</sup>。

Table 1 Weight of lunar regolith grain in different particle size range for representative lunar regolith sample and their average particle size

| 样品<br>编号 | 各粒径/mm 范围内的颗粒重量/g |       |       |       |         | 平均粒径/ $\mu\text{m}$ |       |
|----------|-------------------|-------|-------|-------|---------|---------------------|-------|
|          | >10               | 4~10  | 2~4   | 1~2   | <1      | <1 cm               | <1 mm |
| 10002    | 18.5              | 7.6   | 11.0  | 14.7  | 424.5   | —                   | 52    |
| 12001    | —                 | —     | —     | —     | —       | —                   | 60    |
| 14003    | 23.0              | 33.0  | 31.8  | 42.1  | 947.9   | 129                 | 99    |
| 14141    | 0.0               | 7.4   | 6.7   | 5.4   | 28.5    | 616                 | 123   |
| 14163    | 0.0               | 196.5 | 197.1 | 288.7 | 41444.0 | 76                  | 56    |
| 15220    | 0.0               | 7.0   | 5.8   | 2.4   | 290.0   | —                   | 43    |
| 15270    | 0.0               | 4.4   | 13.7  | 20.7  | 798.3   | —                   | 94    |
| 15400    | 513.1             | 7.9   | 6.1   | 4.8   | 86.4    | 330                 | 61    |
| 61180    | 0.0               | 6.1   | 6.2   | 9.4   | 156.2   | 94                  | 64    |
| 61220    | 5.1               | 10.6  | 9.6   | 6.4   | 61.0    | 216                 | 68    |
| 62280    | 12.0              | 14.3  | 13.1  | 21.7  | 218.5   | 134                 | 70    |
| 64500    | 31.2              | 24.2  | 24.1  | 28.4  | 495.7   | 104                 | 65    |
| 68500    | 1.3               | 17.3  | 25.1  | 37.8  | 521.1   | 106                 | 68    |
| 70180    | 466.6             | 1.7   | 3.1   | 4.6   | 157.1   | 67                  | 58    |
| 71500    | 52.3              | 13.1  | 17.6  | 22.7  | 600.9   | 83                  | 65    |
| 72140    | 1.3               | 2.7   | 1.9   | 5.3   | 225.9   | 57                  | 50    |
| 72500    | 3.1               | 8.0   | 12.9  | 24.1  | 687.2   | 67                  | 57    |
| 73240    | 1.6               | 22.3  | 14.4  | 14.9  | 192.7   | 127                 | 51    |
| 74220    | 0.0               | 0.98  | 0.17  | 0.68  | 7.77    | —                   | 41    |
| 78220    | 0.0               | 1.5   | 2.7   | 5.2   | 227.1   | 50                  | 45    |
| 78500    | 109.3             | 19.2  | 16.1  | 21.4  | 718.7   | 46                  | 41    |

注:74220号样品的为桔黄色月壤,这虽然不是典型月壤,但可能代表由熔岩喷出形成的月壤

多个研究者按不同分析样品数统计得到的 Apollo 11~17 和 Luna 16,20 采集的月壤样品的平

均粒径和中值粒径(表 2);Gromov 也估算了 Apollo 和 Luna 月壤样品的各种粒度参数的平均值(表 3)。两者基本一致,因而这些参数可以作为 Apollo 和 Luna 计划采样区月壤粒度分布的典型值,作为月表机械设计和操作的参考依据。

表 2 Apollo 和 Luna 计划采样区月壤中值粒径的和平均粒径

Table 2 Medium and average particle size of lunar regolith at Apollo and Luna landing sites

| 样号  | 样品数 | 中值粒径   | 资料来源 |
|-----|-----|--|------|
| A11 | 13  | 4.40 $\phi$ (48 $\mu\text{m}$ )~3.25 $\phi$ (105 $\mu\text{m}$ )   | [14] |
| A12 | 55  | 4.58 $\phi$ (42 $\mu\text{m}$ )~3.40 $\phi$ (94 $\mu\text{m}$ )    | [14] |
| A14 | 8   | 3.74 $\phi$ (75 $\mu\text{m}$ )~0.32 $\phi$ (802 $\mu\text{m}$ )   | [15] |
| A15 | 19  | 4.3 $\phi$ (51 $\mu\text{m}$ )~3.22 $\phi$ (108 $\mu\text{m}$ )    | [14] |
| A16 | 14  | 3.29 $\phi$ (101 $\mu\text{m}$ )~1.89 $\phi$ (268 $\mu\text{m}$ )  | [18] |
| A17 | 42  | 4.59 $\phi$ (41.5 $\mu\text{m}$ )~2.59 $\phi$ (166 $\mu\text{m}$ ) | [19] |
| L16 | 4   | 3.8 $\phi$ (70 $\mu\text{m}$ )~3.05 $\phi$ (120 $\mu\text{m}$ )    | [16] |
| L20 |     | 约 3.8 $\phi$ (70 $\mu\text{m}$ )~3.62 $\phi$ (80 $\mu\text{m}$ )   | [17] |

注:A16,A17 为平均粒径

表 3 Apollo 和 Luna 计划采样区月壤的平均粒度参数<sup>[1]</sup>

Table 3 Average particle size parameters of lunar regolith at Apollo and Luna landing sites

| 样品编号      | 平均粒径              |          | 粒径标准偏差<br>(对数单位) | 有效粒径<br>$d_e/\mu\text{m}$ | 不均一性<br>$K=d_a/d_e$ |
|-----------|-------------------|----------|------------------|---------------------------|---------------------|
|           | $d_a/\mu\text{m}$ | $\log d$ |                  |                           |                     |
| Luna 16   | 85                | -1.071   | 0.623            | 30.3                      | 2.81                |
| Luna 20   | 77                | -1.113   | 0.816            | 13.2                      | 5.83                |
| Apollo 11 | 98                | -1.008   | 0.620            | 35.4                      | 2.77                |
| Apollo 12 | 118               | -0.928   | 0.586            | 47.4                      | 2.49                |
| Apollo 14 | 138               | -0.860   | 0.677            | 40.9                      | 3.38                |
| Apollo 15 | 61                | -1.215   | 0.536            | 28.4                      | 2.15                |
| Apollo 16 | 153               | -0.815   | 0.885            | 19.2                      | 7.97                |
| Apollo 17 | 79                | -1.102   | 0.747            | 17.9                      | 4.41                |

注:有效粒径的定义见参考文献[19]

研究表明,月壤平均粒径随采样深度的增加似乎有所增加(表 4),但规律性并不明显,这与月壤的月表暴露时间有关。由于陨石撞击造成月壤翻腾,表层月壤的月表暴露时间并不一定大于次表层月壤。

表 4 Apollo 16 岩心样品中不同深度的月壤颗粒分布

Table 4 Particle size distribution of lunar regolith at different depth of Apollo 16 cores sample

| 颗粒直径/ $\mu\text{m}$ | 不同深度/cm 颗粒的重量百分含量/% |      |      |      |      |      |
|---------------------|---------------------|------|------|------|------|------|
|                     | 33.5                | 41.2 | 43.0 | 48.5 | 54.5 | 61.5 |
| >1 000              | 6.7                 | 7.9  | 9.3  | 3.5  | 14.7 | 11.3 |
| 500~1 000           | 8.1                 | 7.5  | 6.6  | 5.4  | 5.4  | 7.1  |
| 250~500             | 10.4                | 9.5  | 8.6  | 8.1  | 8.1  | 11.3 |
| 150~250             | 9.3                 | 9.4  | 8.3  | 7.4  | 6.8  | 8.3  |
| 90~150              | 10.8                | 9.8  | 9.9  | 9.2  | 8.1  | 9.4  |
| <90                 | 54.2                | 56.6 | 57.1 | 66.3 | 56.8 | 52.7 |

## 2.2 月壤颗粒形态

月壤的颗粒形态是高度变化的,从球形到极端棱角状都有出现(表 5)。但长条状、次棱角状和棱角状的颗粒形态相对更为常见。锯齿状粒形使得月壤颗粒之间互锁,相互滑行困难,这导致月表月壤在抵抗外物楔入方面几乎类似于固体岩石,岩心取样器和采样铲需要更大的压力才能顺利取样。

表 5 月壤的颗粒形态

Table 5 Particle shape of lunar regolith

| 参数    | 平均值                   | 描述         | 参考文献 |
|-------|-----------------------|------------|------|
| 延性    | 1.35                  | 稍长条状       | [20] |
| 长度直径比 | 0.55                  | 稍长条状至中等长条状 | [21] |
| 圆度轮廓  | 0.21                  | 次棱角状       | [21] |
| 平行光   | 0.22                  | 棱角状        |      |
| 体积系数  | 0.3                   | 长条状        | [20] |
| 比表面积  | 0.5 m <sup>2</sup> /g | 不规则、凹角状    | [22] |

## 3 月壤的容重、比重、孔隙比和孔隙率

### 3.1 容重

容重(bulk density,又称堆积密度)是指土壤的自然结构没有遭到破坏的前提下,单位体积内的土壤重量,以 g/cm<sup>3</sup> 表示。

Apollo 岩心样品是研究月壤容重随深度变化的最佳实物。研究表明,Apollo 各采样点的月壤容重略有差异(表 6),决定月壤容重的因素包括采样深度、物质成分、颗粒形态、颗粒直径等等。对同一采样点月壤而言,采样越深,容重越大(表 7),不同采样点的月壤容重则没有可比性。

表 6 Apollo 岩心样品容重<sup>[9]</sup>

Table 6 Bulk density of Apollo core sample

| Apollo | 样品编号  | 样品重量/g  | 样品长度/cm  | 样品容重/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 钻孔深度/cm            |
|--------|-------|---------|----------|----------------------------|--------------------|
| 11     | 10005 | 52      | 10       | 1.71                       | >25                |
|        | 10004 | 65.1    | 13.5     | 1.59                       | <32                |
|        | 12027 |         | 17.4     |                            | ~37                |
| 12     | 12025 | 56.1    | 9.3      | 1.98                       | 69                 |
|        | 12028 | 189.6   | 31.8     | 1.96                       | 69                 |
|        | 12026 | 102.9   | 19.4     | 1.74                       | 37                 |
| 14     | 14211 | 39.5    | 7.5      | 1.73                       | 64 <sup>1</sup>    |
|        | 14210 | 169.7   | 31.9     | 1.75                       |                    |
|        | 14220 | 80.7    | 16.5     | 1.6                        | <36 <sup>1</sup>   |
| 15     | 14230 | 76      | ~12.5    |                            | 23/45 <sup>2</sup> |
|        | 15008 | 510.1   | 28±1     | 1.36±0.05                  | 70.1               |
|        | 15007 | 768.7   | 33.9     | 1.69                       | 70.1               |
|        | 15009 | 622     | 36.2     | 1.3                        | 34.6               |
|        | 15011 | 660.7   | 29.5±0.5 | 1.69±0.03                  | 67.6               |
|        | 15010 | 740.4   | 32.9     | 1.91                       | 67.6               |
|        | 64002 | 584.1   | 31.7     | 1.4                        | 65±6               |
|        | 64001 | 752.3   | 33.9     | 1.66                       | 65±6               |
|        | 68002 | 583.5   | 27.4     | 1.59                       | 68.6±0.5           |
|        | 68001 | 840.7   | 34.9     | 1.8                        | 68.6±0.5           |
| 16     | 69001 | 558.4   |          |                            | 27.5±2             |
|        | 60010 | 635.3   | 32.3     | 1.47                       | 71±2               |
|        | 60009 | 759.8   | 33.1     | 1.72                       | 71±2               |
|        | 60014 | 570.3   | 28.8     | 1.48                       | 70.5±1             |
|        | 60013 | 757.2   | 34.7     | 1.63                       | 70.5±1             |
|        | 73002 | 429±4   | 21.8     | 1.60±0.10                  | 70.6±5             |
|        | 73001 | 809±4   | 34.9     | 1.73±0.01                  | 70.6±5             |
|        | 74002 | 910±4   | 33.3     | 2.04±0.01                  | 71±2               |
|        | 74001 | 1 071.4 | 34.9     | 2.29                       | 71±2               |
|        | 76001 | 711.6   | 34.5     | 1.57                       | 37.1±0.5           |
|        | 79002 | 409.4   | 19.4     | 1.67                       | 71±2               |
|        | 79001 | 743.3   | 31.9     | 1.74                       | 71±2               |
| 17     | 70012 | 434.8   | 18.4     | 1.77                       | 28±3               |

注:①为宇航员估计的钻孔深度;②该钻孔共钻取两次;Apollo 11, 12, 14 的钻孔直径为 1.97 cm; Apollo 15, 16, 17 的钻孔直径为 4.13 cm

若采用简化函数关系来表达月壤容重随深度的变化,可用双曲线关系和指数关系两种表达式表

示<sup>[9,23]</sup>:

表 7 撞击坑内不同深度月壤平均容重的最佳估计值<sup>[9]</sup>

Table 7 Best estimates of bulk density for lunar regolith at different depth in the crater

| 深度/cm                         | 0~15      | 0~30      | 0~60      | 30~60     | 300 |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----|
| 平均容重<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 1.45~1.55 | 1.53~1.63 | 1.61~1.71 | 1.69~1.79 | 1.9 |

$\rho = 1.92[(z+12.2)/(z+18)]$  (月壤容重与深度成双曲线关系)

$= 1.39z^{0.056}$  (月壤容重与深度成指数关系)

式中: $\rho$ —一定深度的月壤容重/(g·cm<sup>-3</sup>), $z$ —该点所处的月壤深度/cm。

### 3.2 颗粒比重

颗粒比重是指颗粒质量与同体积的 4℃ 时纯水的质量之比,一般用 G 表示。实际上,月壤颗粒比重在数值上等于颗粒密度,但前者无量纲。

月壤颗粒的平均比重与其中不同颗粒类型(如玄武岩、矿物碎片、角砾岩、粘合集块岩、玻璃等)的相对含量有关。如,粘合集块岩和玻璃颗粒比重从 1.0~3.32 不等,玄武岩颗粒比重大多 > 3.32,角砾岩颗粒比重从 2.9~3.10<sup>[24]</sup>。相对于地球土壤的颗粒比重一般为 2.6~2.8,大部分月壤颗粒的比重从 2.3~3.2 不等,绝大部分在 2.9 以上(表 8),明显高于地球土壤的颗粒比重。

表 8 部分月壤颗粒和岩石碎片的比重

Table 8 Specific gravity of some lunar regolith particle and rock debris

| 样品编号        | 质量/g | 比重                | 样品编号      | 质量/g | 比重                   |
|-------------|------|-------------------|-----------|------|----------------------|
| 10001/10005 | 49.1 | 3.1 <sup>①</sup>  | 14259.3   | 1.26 | 2.93±0.05            |
| 10020.44    | 5.94 | 3.25 <sup>②</sup> | 14321.74  |      | 3.2±0.1 <sup>②</sup> |
| 10065.23    | 4.48 | 3.12 <sup>③</sup> | 14321.156 |      | 3.2±0.1 <sup>③</sup> |
| 10084       | 1.5  | 3.01              | 15015.29  |      | 3.0±0.1 <sup>③</sup> |
| Apollo 12   | 56.9 | 3.1 <sup>①</sup>  | 15101.68  |      | 3.1±0.1              |
| 12002.85    | 2.32 | 2.31 <sup>③</sup> | 15601.82  | 0.96 | 3.24±0.05            |
| 12029.8     | 1.10 | 2.9               | 70017.77  | 2.55 | 3.51 <sup>②</sup>    |
| 12057.72    |      | 2.9               | 70215.18  | 4.84 | 3.44 <sup>②</sup>    |
| 14163.111   | 0.65 | 2.9±1             | 72395.14  | 3.66 | 3.07 <sup>③</sup>    |
| 14163.148   | 0.97 | 2.90±0.05         | 77035.44  | 3.68 | 3.05 <sup>④</sup>    |

注:月壤比重的推荐值:3.1;①为月壤全样;②为单个玄武岩碎片;③为单个角砾岩碎片;未标志的为颗粒直径小于 1 mm 部分分析得到的数据

### 3.3 孔隙比和孔隙率

月壤的孔隙比 e 是指月壤中孔隙体积与颗粒体积之比,用小数表示。天然状态下月壤的孔隙比是一个重要的物理性指标,可以用来评价月壤的密实程度。一般 e < 0.6 的月壤是密实的低压缩性月壤,e > 1.0 的月壤是疏松的高压缩性月壤。

孔隙率 n 是指月壤中孔隙所占体积与总体积之比,用百分数表示。一般而言,地球上粘性土的孔隙率为 30%~60%,无粘性土为 25%~45%。不同深

度就位月壤平均孔隙率和孔隙比的最佳估计值见表 9<sup>[9]</sup>。

Carrier 等综合各个研究者的不同研究结论,给出月表不同采样点在松散和紧实两种状态下的月壤容重、孔隙比和颗粒比重的最佳估计值(表 10)。

表 9 就位月壤孔隙率和孔隙比的最佳估计值<sup>[9]</sup>

Table 9 Best estimates of porosity and void ratio of in-situ lunar regolith

| 深度/cm | 平均孔隙率 n/% | 平均孔隙比 e   | 平均容重/(g·cm <sup>-3</sup> ) |
|-------|-----------|-----------|----------------------------|
| 0~15  | 52±2      | 1.07±0.07 | 1.50±0.05                  |
| 0~30  | 49±2      | 0.96±0.07 | 1.58±0.05                  |
| 30~60 | 44±2      | 0.78±0.07 | 1.74±0.05                  |
| 0~60  | 46±2      | 0.87±0.07 | 1.66±0.05                  |

表 10 Apollo 11~15, Luna 16, 20 的月壤容重、孔隙比<sup>[9]</sup>

Table 10 Bulk density and porosity of lunar soil in Apollo 11~15 and Luna 16, 20 landing sites

| 月壤        | 容重/(g·cm <sup>-3</sup> ) |       | 孔隙比  |      | 比重   |
|-----------|--------------------------|-------|------|------|------|
|           | 松散                       | 紧实    | 松散   | 紧实   |      |
| Apollo 11 | 1.36                     | 1.8   | 1.21 | 0.67 | 3.01 |
| Apollo 12 | 1.15                     | 1.93  |      |      |      |
| Apollo 14 | 0.89                     | 1.55  | 2.26 | 0.87 | 2.9  |
|           | 0.87                     | 1.51  | 2.37 | 0.94 | 2.93 |
| Apollo 15 | 1.1                      | 1.89  | 1.94 | 0.71 | 3.24 |
| Luna 16   | 1.115                    | 1.793 | 1.69 | 0.67 | 3    |
| Luna 20   | 1.040                    | 1.798 | 1.88 | 0.67 | 3    |

## 4 电性和电磁性质

月壤的电性表现出典型硅酸盐矿物的特征,即极低的电导率和电损耗。月表物质在黑夜中的 DC 电导率从 10<sup>-14</sup> mho/m (粒径 < 1 mm 部分)到月岩的 10<sup>-9</sup> mho/m 不等;而在阳光照射下,月壤和月岩的电导率将增加 6 个数量级以上。

月壤的介电常数决定于容重,而与化学成分、矿物组成、频率(> 1 MHz)和温度(月表温度变化范围内)无关,即:

$$\epsilon' = 1.9^{\rho}$$

月壤的介电损耗正切与( $\omega\tau_{TiO_2} + \omega\tau_{FeO}$ )和容重有关,即:

$$\tan\delta = 10^{[0.038(\omega\tau_{TiO_2} + \omega\tau_{FeO}) + 0.312\rho - 3.260]}$$

月壤极低的电导率和损耗导致两个方面的结果。一方面,月球物质对电磁波几乎是透明的,无线电波可轻易穿透月壤厚达 10 m 左右;电磁波从月表某点传播到另一点并不需要这两点之间相互可视,电磁波可穿透障碍物传播。另一方面,极低的电导率和损耗使月球物质极易带电,并可以在相当长的时间内保持带电。因此,月球上日出和日落时巨大的光电效应使月壤颗粒带电飘浮并移动,这些飘浮颗粒附着在仪器设备表面将干扰这些设备的正常工作。

## 5 月壤的压缩性、抗剪性和承载力

### 5.1 月壤的压缩性

月壤在压力作用下体积缩小的特性称为压缩性。试验表明,在一般压力(100 kPa~600 kPa)作用下,月壤颗粒体积的压缩量远远小于月壤体积的总压缩量,完全可以忽略不计。因此,月壤的压缩实际上就是通过月壤颗粒位置调整与重新排列而减少孔隙的体积。静态压力条件下,不同孔隙比月壤样品的压缩系数如表 11 所示。

表 11 不同孔隙比月壤样品的平均压缩系数(静态压力条件下)

Table 11 Average coefficient of compressibility of lunar regolith with different void ratio (Static Pressure)

| 月壤参数        | 孔隙比  |         |         |      |
|-------------|------|---------|---------|------|
|             | >1.3 | 1.3~1.0 | 1.0~0.9 | <0.9 |
| 压缩系数(1/MPa) | >40  | 20      | 8       | <3   |

### 5.2 月壤的抗剪性和承载力

月壤是由固体颗粒组成的,颗粒间的连结强度远远小于颗粒本身的强度,故在外力作用下颗粒之间发生相互错动,引起月壤中的一部分相对另一部分产生滑动。月壤颗粒抵抗这种滑动的性能,称为月壤的抗剪性,由内摩擦角  $\varphi$  和内聚力  $c$  两个指标决定。内摩擦角  $\varphi$  的大小,体现月壤颗粒间摩擦力的强弱;内聚力  $c$  值的大小,体现颗粒间粘结力的强弱。表 12 表 13 分别列出月表不同位置、不同深度月壤的内摩擦角  $\varphi$  和内聚力  $c$  的最佳估计值。

而根据 Luna 9,13;Surveyor;Lunokhod 1,2 月球车;Apollo 月球车和宇航员对就位月壤的物理和机械性质的数千次测试结果分析,可将就位月壤的机械性质归纳(表 14)为月表不同位置的月壤具有不同的孔隙比,而孔隙比的差异导致月壤承载力、压

表 12 月表不同位置月壤的内摩擦角  $\varphi$  和内聚力  $c$  的最佳估计值

Table 12 Best estimates of angle of internal friction  $\varphi$  and cohesion  $c$  of lunar regolith in different location of lunar surface

| 位置        | 内聚力 $c$ /kPa | 内摩擦角 $\varphi$ (°) |
|-----------|--------------|--------------------|
| 普遍值       | 0.1~1        | 30~50              |
| 撞击坑壁(坑内)  | 0.17~1.0     | 45~25              |
| 撞击坑坡部(坑外) | 0.52~2.7     | 45~25              |
| 平坦底部      | 0.34~1.8     | 45~25              |

表 13 月表不同深度月壤的内摩擦角  $\varphi$  和内聚力  $c$  的最佳估计值

Table 13 Best estimates of angle of internal friction  $\varphi$  and cohesion  $c$  of lunar regolith at different depth

| 深度<br>/cm | 内聚力 $c$ /kPa |         | 内摩擦角 $\varphi$ (°) |     | 孔隙比       |
|-----------|--------------|---------|--------------------|-----|-----------|
|           | 变化范围         | 平均值     | 变化范围               | 平均值 |           |
| 0~15      | 0.44~0.62    | 0.52    | 41~43              | 42  | 1.07+0.07 |
| 0~30      | 0.74~1.1     | 0.90    | 44~47              | 46  | 0.96+0.07 |
| 30~60     | 2.4~3.8      | 3.0     | 52~55              | 54  | 0.78+0.07 |
| 0~60      |              | 1.3~1.9 | 48~51              |     |           |

表 14 就位月壤的机械性质

Table 14 Mechanical properties of in-situ lunar regolith

| 月壤参数 | 承载力<br>/kPa | 内聚力<br>/kPa | 内摩擦角<br>/° | 月表典型位置 |                   |
|------|-------------|-------------|------------|--------|-------------------|
| 孔隙比  | >1.3        | <7          | <1.3       | <10    | 孤立的细颗粒物质层         |
|      | 1.3~1.0     | 7~25        | 1.3~2.2    | 10~18  | 新鲜小型撞击坑边缘、陡坡处     |
|      | 1.0~0.9     | 25~36       | 2.2~2.7    | 18~22  | 强烈侵蚀撞击坑单元         |
|      | 0.9~0.8     | 36~55       | 2.7~3.4    | 22~27  | 撞击坑交叠区域           |
|      | <0.8        | >55         | >3.4       | >27    | 新成的薄层月壤:类石建造,孤立石块 |

缩性和抗剪性的不同。也就是说,控制就位月壤机械性质的主要因素是其压实程度(用孔隙比衡量)。而对于月表分布面积最广的相对平缓均一地貌区,孔隙比为 0.8~1.0 是最经常出现的情形,更松散的月壤大多出现在具有较大坡度的地貌区。对相对平缓和撞击坑交叠区来说,承压力为 25 kPa~55 kPa 的出现频率最高,承压力小于 25 kPa 的情形多见于撞击坑环和坡度大于 10°的地区(Bazilevsky *et al.*,1984)。

## 参考文献

- [1] Gromov V. Physical and Mechanical Properties of Lunar and Planetary Soils[J]. *Earth Moon and Planets*1999,80:51-72.
- [2] Krotikov V D, Troitsky V S. Radio emission and the nature of the Moon[J]. *Usp Fiz Nauk*,1963,81:589-639.
- [3] Cherkasov I I, Gromov V V, *et al.* Soil Resistometer penetrometer of the Automatic Lunar Station Luna-13[J]. *Doklady AN USSR*,1967,179(4).
- [4] Houston W N, Namiq L I. Penetration resistance of lunar soils[J]. *Journal of Terramechanics*,1971,8(1):59-69.
- [5] Gromov V V, Leonovich A K, Lozhkin V A, *et al.* Mechanical properties of the lunar soil sample brought by the automatic station 'Luna-16'[J]. *Kosm Issled Moscow*,1971,9(5).
- [6] Carrier W III, Mitchell J K, Mahmood A. The nature of lunar soil[J]. *NASA STI/Recon Technical Report*. 1973, A75,12 424.
- [7] Gromov V V, Leonovich A K, Shvarev V V, *et al.* Results of investigations of the physico-mechanical properties of a lunar soil sample in a nitrogen atmosphere[A]. In: *Lunar Highland Soil*[C]. 1979,686-690.
- [8] Bazilevskiy A T, Grebennik N N, Gromov V V, *et al.* Florenskiy. Physical and mechanical properties of lunar soil as function of specifics of relief and processes in vicinity of operation of Lunokhod-2[J]. *USSR Report Space* 2,1984,65-66.
- [9] Carrier W D, Olhoeft G R, Mendell W. Physical properties of the lunar surface[A]. In: Heiken G H, Vaniman D T, French B M. eds, *Lunar*

- nar Source book[C]. Cambridge Univ. Press. New York. 1991,475-594.
- [10] Cherkasov I I, Shvarev V V, Ishlinskii A Y. Lunar soil science. Physicomechanical properties of lunar soils[J]. **NASA STI/Recon Technical Report N**, 1975, 76, 20 049.
- [11] Gromov V V, Carrier W D I. Mechanical properties of lunar soil and simulants[A]. In: **Proceedings of the 3rd International Conference on Engineering, Construction, and Operations in Space III**[C]. Publ by ASCE, New York, NY, USA, Denver, CO, USA, 1992, May 31-Jun 4: 518-527.
- [12] Morris R V, *et al.* Handbook of Lunar Soils[J]. **NASA Johnson Space Center**, 1983, 914.
- [13] Carrier W D, III, Lunar Soil Grain Size Distribution[J]. **Moon** 6, 1973: 250.
- [14] McKay D S, Heiken G H, Taylor R M, *et al.* Apollo 14 soils: size distribution and particle types[A]. in: **Proc Lunar Sci Conf 3rd**[C] . 1972, 983-995.
- [15] Vinogradov A P. Preliminary Data on Lunar Ground Brought to Earth by Automatic Probe 'Luna-16'[J]. **Geochimica et Cosmochimica Acta (Proc. of 2nd Lunar Science Conf. )**, 1971, 1(Suppl. 2): 1-16.
- [16] Vinogradov A P. Preliminary data on lunar soil collected by the Luna 20 unmanned spacecraft1[J]. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, 1973, 37(4): 721-722.
- [17] Heiken G H, McKay D S, Frulard R M. Apollo 16 Soils; Grain Size Analyses and Petrography[J]. **Geochimica et Cosmochimica Acta (Proc. of 4th Lunar Science Conf. )**, 1973, 1(Suppl. 4): 251-265.
- [18] McKay D S, Fruland R M, Heiken G H. Grain size and the evolution of lunar soils[A]. In: **Lunar Science Conference, 5th** 1[C]. 1974, 887-906.
- [19] Nordin C. F. Application of Engelund Hansen Sediment Transport Equation in Mathematical Models[A]. In: **Fourth International Symposium on River Sedimentation**[C]. 1989, 611-616.
- [20] Heywood H. Particle size and shape distribution for lunar fines sample 12057, 72[A]. In: **Proc 2nd Lunar Science Conf**[C]. MIT Press. 1971, 1 989-2 00.
- [21] Mahmood A, Mitchell J K, Carrier W D, III, Grain orientation in lunar soil[A]. In: **Lunar and Planetary Science Conference 5**[C]. 1974, 2 347-2 354.
- [22] Cadenhead D A, Brown M G, Rice D K, *et al.* Some surface area and porosity characterizations of lunar soils[A]. In: **Lunar and Planetary Science Conference 8**[C]. 1977, 1 291-1 303.
- [23] 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.
- [24] Duke M B, Woo C C, Sellers G A, *et al.* Finkelman, Genesis of lunar soil at Tranquillity Base[A]. In: **Proc. Apollo 11 Lunar Science Conf**[C]. Pergamon, New York, 1970, 347-361.

## PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF LUNAR REGOLITH

ZHENG Yong-chun<sup>1,2</sup>, OUYANG Zi-yuan<sup>1</sup>, WANG Shi-jie<sup>1</sup>, ZOU Yong-liao<sup>3</sup>

1. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

**Abstract:** The lunar surface is almost completely covered by a dark gray layer of debris, lunar regolith, with thicknesses in the range of 2 meters to 20 meters. It is created by meteorite and micrometeorite impacts, high diurnal (day/night) temperature difference, solar wind and cosmic ray bombardment. The surface layer consists of crushed bedrock, fine-grained rock and mineral fragments, meteorite residuals, polymict regolith breccias, and fused glass. Thus the loose regolith layer is ready-to-excavate mineral product, which is not necessary to drill and blast. The special formation process of lunar regolith leads to different properties from soils on the earth. This paper listed the average and best estimated value of physical and mechanical parameters at Luna and Apollo landing sites. These parameters are particle size distribution, particle shape, specific gravity, porosity and void ratio, electric conductivity and electromagnetic parameters, coefficient of compressibility, bearing capacity and shear strength. These parameters are significant for the design and operation of engineering equipment, lunar base siting and construction, and resource utilization.

**Key words:** lunar regolith; physical property; mechanical properties; best estimated value

ISSN 1001-6872(2004)04-0014-06; CODEN: KUYAE2

**Synopsis of the first author:** Zheng Yongchun, male, 27 years old, a Ph D of astrochemistry. Now he is engaged in lunar and planetary sciences.