

行星式球磨破碎 CLRS-1 模拟月壤的 粒度分布特征

张森森^{1,2}, 李雄耀¹, 冯俊明¹, 任刚³

1. 中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心, 贵阳 550002; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 新疆地质矿产勘查开发局第六地质大队, 哈密 839000

摘要:行星式球磨破碎 CLRS-1 模拟月壤可以获得与月尘粒度分布相似的模拟物质。该方法具有出料物颗粒直径十分细微、损耗率低、操作条件容易控制的特点。本文探讨了 CLRS-1 模拟月壤研磨后粒度分布受物料比、研磨时间和组分影响。物料比为 1:1:2 时, 细化程度最好; 随着球磨时间的延长, CLRS-1 模拟月壤的中值粒径下降速度减缓, 粒径分布范围不断缩小; 研磨时间达到 6 h, 物料达到最细, 中值粒径约 0.30 μm 。由于主要组分火山玻璃、斜长石和橄榄石之间在硬度方面存在明显差异, CLRS-1 模拟月壤经研磨后的粒度分布呈现双峰模式。

关键词: CLRS-1 模拟月壤; 行星式球磨; 粒度分布

中图分类号: P596; P618.31 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2802(2014)01-0065-06 **doi:** 10.3969/j.issn.1007-2802.2014.01.008

Particle Size Distribution Characteristics of CLRS-1 Lunar Soil Simulant Processed by a Planetary Ball Mill

ZHANG Sen-sen^{1,2}, LI Xiong-yao¹, FENG Jun-ming¹, REN Gang³

1. Lunar and Planetary Science Research Center, Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang 550002, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. NO. 6 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Hami 839000, China

Abstract: The particle size distribution of lunar dust can be simulated by using planetary ball mill on the CLRS-1 lunar soil simulant. Fine particles of milled product, low attrition rate and easy to control are the advantages of the planetary ball mill. The proportion of grinding balls, CLRS-1 lunar soil simulant and dispersant, grinding time and component are the major factors controlling the particle size distribution of the milled product. In our experiment, we used 50 mL grinding jars, 550 r/min rotation rate, 1 mm grinding balls, and alcohol as dispersant. We find that CLRS-1 is best refined at the proportion of 1:1:2, and that the median size of CLRS-1 rate is reduced and the particle distribution is narrow with the grinding time increasing, and that milling CLRS-1 for 6 h can make the finest size particles with a median 0.30 μm . Because of difference in hardness between volcanic glass, plagioclase and olivine, the size distribution of CLRS-1 after milled presents a bimodal pattern.

Key words: CLRS-1 Lunar soil simulant; planetary ball mill; particle size distribution

月壤广泛分布于月球表面, 是陨石或微陨石、太阳风以及宇宙射线等太空风化作用的产物, 粒径通常小于 1 cm。广义上, 月尘是指颗粒直径小于 1 mm 的月壤^[1,2], 随着月尘研究的逐步深入, 部分学

者和研究机构将月壤中粒径小于 20 μm 的颗粒定义为月尘^[2,3], 该部分颗粒平均直径小于 0.30 μm , 绝大部分颗粒直径小于 2 μm ^[4,5]。在历次月面探测活动中, 月尘严重干扰月面探测活动的正常实施, 是

收稿日期 2013-01-10 收到, 01-18 改回

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40803019); 中国科学院地球化学研究所前沿领域项目和探月工程资助项目(TY3Q20110029)

第一作者简介: 张森森(1985-), 男, 博士研究生。研究方向: 月球与行星。E-mail: zsgucas@sina.com

通讯作者: 李雄耀(1978-), 男, 博士, 研究方向: 月球与行星。E-mail: lixiongyao@vip.skleg.cn.

人类重返月球必须解决的关键问题之一^[6~8]。研究表明,月尘的粘结性和生物毒性是月尘影响月面探测的主要原因,而颗粒直径是影响月尘粘结性和生物毒性的重要因素之一^[9,10]。月尘粘结力主要作用力为静电力,颗粒直径和静电力存在密切联系^[11],而不同粒级的月尘颗粒对人体的影响机理也有明显差异^[12,13]。同时,月尘作为太空风化过程的重要产物,微观结构、纳米铁以及光谱特性等是深入认识太空风化历史的重要线索,对解决月球表面物质演化过程等科学问题具有重要意义^[14~16]。但是,月尘样品的匮乏严重制约了这些科学问题的深入研究,也阻碍了相应工程试验的进行,解决这一问题的有效途径就是利用地球物质加工获得具有较高相似度的模拟月尘。

迄今国际上仅有美国约翰逊空间中心研制的 JSC-1A-vf 一种模拟月尘,是在初步研磨 JSC-1A 模拟月壤后,利用粒度分级技术提取的颗粒直径不大于 20 μm 的部分^[17]。JSC-1A-vf 模拟月尘的中值粒径范围为 0.60~0.70 μm ,由于其颗粒直径偏大,因而在月尘毒性和粘结性的研究工作中具有局限性^[4]。随着中国月球探测工程的进一步深入,探月工程二期将实现无人月面巡视探测,对巡视探测器开展月面尘埃环境条件试验已经迫在眉睫。但是,国内至今尚未研制出与月尘具有较好相似性的模拟物质,所开展的实验通常还是利用模拟月壤进行。由于模拟月壤和月尘在粒度特征方面存在本质差异^[4,18],实验的准确性难以估计。

目前,模拟月尘研制技术是采用粒度分级的方法提取物理破碎后的模拟月壤细颗粒部分^[17,19,20]。现行应用广泛的物理破碎方法有高速气流破碎、超声波破碎和球磨破碎 3 种^[21,22]。高速气流破碎利用高速气流使物料加速获得足够的动能,在混合、加速的过程中,分散于湍流中的物料相互碰撞、摩擦,从而达到破碎物料的目的^[23,24]。如果颗粒直径非常细微,特别是当粉体小于 1 μm 时,由于粉体的表面积增大,表面活性不断增加,分级器无法筛分该粒径范围内细颗粒物质,而且一部分细颗粒物质随引风机气流发生逃逸,造成细颗粒物质的流失^[24,25]。超声波破碎利用超声波的空化作用使液体中的固体颗粒破碎^[26,27]。对于极细小的颗粒,超声波使颗粒共振加速运动,颗粒碰撞的能量增加,有可能导致颗粒团聚现象,从而不能进一步减小破碎物料的颗粒直径,直接影响破碎效果^[28,29]。因此,超声波破碎通常作为辅助手段增强其他物理破碎方法的破碎效果^[30,31]。球磨利用物料和研磨球在分散剂中剧烈

的翻滚、碰撞不断细化物料,普通球磨破碎矿物最低可以获得微米级物质^[32,33]。行星式球磨是一种新型的在原理上和普通球磨有明显不同的物理破碎方法。普通球磨机的研磨罐体是滚筒式,筒内装有若干磨球,当电机旋转时,带动滚筒旋转,筒内磨球和材料在作竖直圆周运动过程中,互相撞击,研磨材料,在高转速条件下,由于离心力的作用,磨球和材料均贴在滚筒内壁上跟随旋转,失去相互之间的碰撞;行星球磨机中的物料和磨球是在一个二维旋转空间作高能运动,当转盘旋转时(公转),球磨罐围绕各自的中心轴作旋转(自转),罐中磨球在高速运动中研磨样品。由于公转与自转两个离心力同时作用在磨球和物料上,而且合力的方向在不断变化,这就使得磨球与物料在球磨罐中的运动轨迹是杂乱无序的,这样,在高转速条件下,磨球与材料获取的碰撞能量更大,在特定的研磨条件下,颗粒直径可达到纳米级^[34,35]。和高速气流破碎相比,行星式球磨破碎的出料物更细微,物料在封闭空间内研磨,损耗率更低;和超声波破碎相比,行星式球磨更有利于细化由辉石、橄榄石等硬度较高的矿物组成的 CLRS-1 模拟月壤^[18]。和普通球磨相比,行星式球磨破碎的出料物颗粒直径更细微;综合比较而言,行星式球磨是制备模拟月尘的最佳手段。行星式球磨条件对出料物粒径大小和粒度分布特征的影响研究较少,因此为了更好地开展月尘的相关科学研究和工程实验,针对粒度问题,实验利用行星球磨破碎 CLRS-1 模拟月壤,围绕 CLRS-1 模拟月壤的破碎特征进行系统分析,为研制模拟月尘提供技术参考。

1 CLRS-1 模拟月壤

实验原料采用中国科学院地球化学研究所与中国科学院国家天文台共同研制的低钛玄武质模拟月壤国家标准样品(GSB 01-2186-2008)。CLRS-1 模拟月壤中玻璃质含量较高,主要矿物为斜长石和橄榄石^[18]。虽然在矿物成分和化学成分上,CLRS-1 模拟月壤与月尘具有很强的相似性,在粒度分布方面,二者具有明显差异。CLRS-1 模拟月壤平均粒径约为 100 μm ,1~0.1 mm 和小于 0.1 mm 的颗粒所占比重分别为 48%~50%和 50%~52%,粒径大于 1 mm 的颗粒为 0.5%~1%。月尘的中值粒径约 0.30 μm ,95%颗粒直径不大于 2 μm 。绝大部分月尘颗粒的直径远远小于 CLRSV1 模拟月壤^[2,3,18],粒度分布的差异直接限制了 CLRS-1 模拟月壤在月面尘埃环境模拟、月尘防护技术开发等诸多研究项目中的应用。

2 实验方法和流程

实验围绕行星磨破碎 CLRS-1 模拟月壤的 3 个主要影响因素:研磨时间、物料配比和组分影响进行分析。实验使用 PM-100 行星磨仪对 CLRSV1 模拟月壤进行研磨,选用 50 mL 氧化锆研磨罐、1 mm 氧化锆研磨球。由于湿法球磨分散剂性能和转动速度与物料的细化程度呈正相关关系^[33,34],参照月尘的粒径要求已经接近球磨极限,依据 PM 100 行星磨机仪器参数,实验选用无水乙醇作为分散剂,转速设定为 550 r/min。仪器要求研磨球、分散剂和研磨物料的总容积最高不超过 45 mL,并按照体积比将三者充分混合(经测定:室内温度 25 °C 条件下,1 mm 研磨球堆积密度为 3.51 g/cm³,CLRS-1 模拟月壤堆积密度为 0.82 g/cm³),确定行星磨破碎 CLRS-1 模拟月壤的最佳物料配比;其次在最佳物料配比下对 CLRS-1 模拟月壤进行破碎,探讨不同研磨时间下的 CLRS-1 模拟月壤粒度分布变化。显微镜下挑选 CLRS-1 模拟月壤的单矿物,并在最佳物料配比下对单一矿物进行研磨,分析 CLRS-1 模拟月壤的粒度分布特征的主要影响因素(图 1)。实验过程中采用 Master 2000 粒度分析仪测定不同研磨条件下出料物的粒度分布数据,探讨研磨条件和物质组分对粒度分布特征的影响。

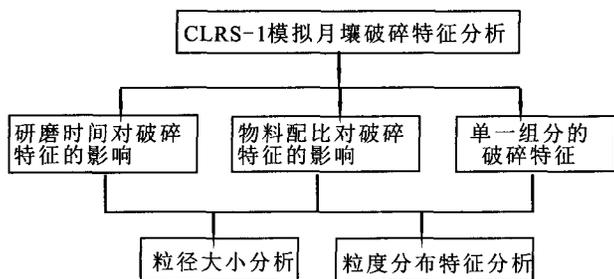


图 1 CLRS-1 模拟月壤破碎特征分析示意图

Fig. 1 Schematically chart of broken CLRS-1 lunar soil simulant

3 实验结果

3.1 不同物料比破碎特征

物料比指研磨球、物料和分散剂之间的比重,物料比对出料物粒度分布的影响相对复杂,这是由于在行星式球磨过程中,球磨过程中产生的大量热能使酒精迅速挥发,导致物料比随时间变化不断发生改变。表 1 显示了采用 50 mL 研磨罐、1 mm 研磨球,在 550 r/min 相同转速下,不同物料比研磨 3 h 后的物料的粒度分布特征。进料样 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 和

D_{100} 为 70.23、131.41、272.44 和 831.76 μm ,不同物料比影响 CLRS-1 模拟月壤的细化程度具有以下特点(如表 1),颗粒直径位于 0.15 μm 直径范围内的颗粒体积百分比一般在 10% 左右,不同物料比的中值粒径差异较大,物料比为 1:1:2 时 CLRS-1 模拟月壤研磨后的 $D_{50} \leq 0.40 \mu\text{m}$;物料配比在 2:1:1、1:1:1、1:2:2、2:1:2 和 2:2:1 时,CLRS-1 模拟月壤研磨后的 D_{50} 在 0.50~0.70 μm 之间;当物料配比为 1:2:1 时,CLRS-1 模拟月壤研磨后的 D_{50} 约为 1.00 μm 。

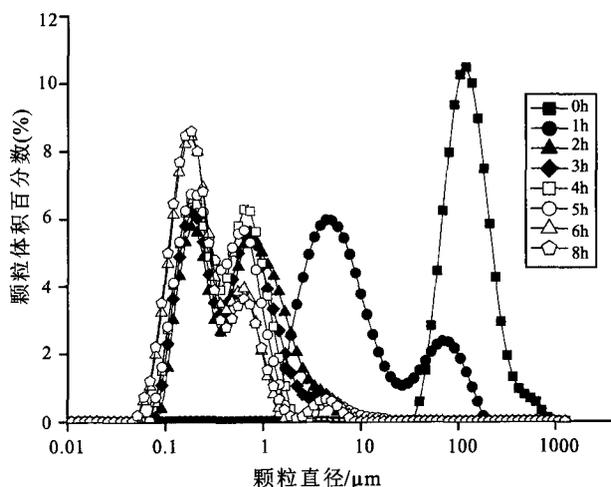
表 1 3 h 内物料配比对出料物粒度分布的影响

Table 1 Relation between the ratio of materials and the particle size in 3 h μm

粒径	原始物料	1:1:1	1:1:2	1:2:1	1:2:2	2:1:1	2:1:2	2:2:1
D_{10}	70.23	0.14	0.12	0.16	0.15	0.13	0.15	0.16
D_{50}	131.41	0.55	0.36	0.98	0.65	0.57	0.68	0.73
D_{90}	272.44	2.46	1.45	4.88	2.95	2.66	3.19	3.26
D_{100}	831.76	4.53	6.61	6.57	4.97	4.21	4.97	4.53

3.2 不同研磨时间破碎特征

由表 1 可知,3 h 的研磨时间内,当物料比为 1:1:2 时,CLRS-1 模拟月壤的细化程度最佳。在物料比 1:1:2,转速为 550 r/min 的条件下,CLRS-1 模拟月壤经研磨时间后的粒度分布变化如图 2 所示。入料物 D_{50} 为 131.41 μm ,在实验过程中,CLRS-1 模拟月壤研磨 3 h 后中值粒径下降为 1 μm ; CLRS-1 模拟月壤研磨 4 h 后中值粒径约为 0.60 μm ,最大



物料比为 1:1:2

图 2 粒度分布参数和研磨时间之间的关系

Fig. 2 Relation between size statistics and time in milling process

颗粒直径不大于 $20\mu\text{m}$; 研磨 5 h 后中值粒径约 $0.40\mu\text{m}$, 粒度分布范围明显减小, 最大颗粒直径不大于 $10\mu\text{m}$; 随着研磨时间的增加, CLRS-1 模拟月壤的细化速度不断降低; 研磨 6 h 后, 出料物中值粒径约在 $0.20\sim 0.30\mu\text{m}$ 之间, 最大颗粒直径不大于 $5.00\mu\text{m}$; 研磨时间大于 6 h 后, 出料物的粒度分布变化不大; 但经过 8 h 研磨后 CLRS-1 模拟月壤粒度呈现了反破碎现象。

3.3 不同组分破碎特征

CLRS-1 模拟月壤主要组分为火山玻璃、斜长石和橄榄石。从模拟月壤中选取橄榄石、斜长石和火山玻璃, 其中橄榄石和斜长石的颗粒粒径范围分别 $500\sim 800\mu\text{m}$ 和 $500\sim 700\mu\text{m}$, 火山玻璃的颗粒粒径分布范围较大, 为 $200\sim 800\mu\text{m}$ ^[18,36]。在 1:1:2 的物料比例下, 设定转速 550 r/min , 经过 6 h 研磨后, 单组分的粒度分布如图 3 所示, 单组分的粒度分布呈现单峰模式, 在相同的研磨条件下, 火山玻璃的中值粒径要小于斜长石, 斜长石中值粒径要小于橄榄石。

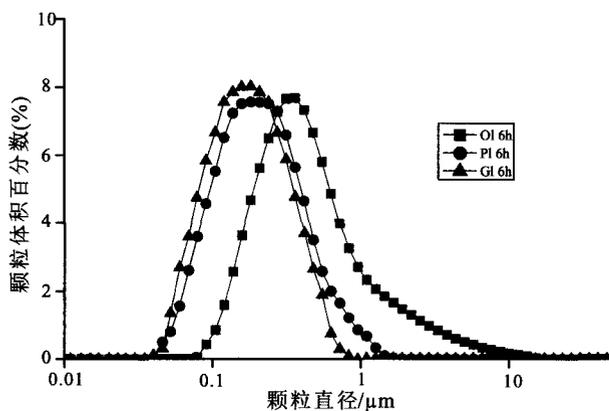


图 3 行星式球磨斜长石、橄榄石、火山玻璃的粒度分布特征
Fig. 3 Particle size distributions of plagioclase, olivine and volcanic glass

4 颗粒特征分析

4.1 粒径大小

通过上述实验发现, 在使用相同形状与大小研磨球, 相同的转速和分散剂的条件下, 物料比直接影响研磨球和物料之间的碰撞频率, 是出料物粒度分布变化的最主要原因。由表 1 可知, 使用 1 mm 氧化锆研磨球, 以酒精作为分散剂, 在 550 r/min 的均匀转速下, 研磨时间为 3 h 时, CLRS-1 模拟月壤经研磨后 D_{10} 的相差变化不大, 而 D_{50} 和 D_{90} 数值相差很大。其中当物料比为 1:1:2 时, CLRS-1 模拟月壤经研磨后其中值粒径均降低至 $0.30\sim 0.40\mu\text{m}$ 范

围内。当物料比为 1:1:2 时, CLRS-1 模拟月壤经研磨后其 D_{50} 为 $0.36\mu\text{m}$, D_{90} 为 $1.45\mu\text{m}$, 主要原因是由于在该比例条件下, 酒精的比重较大, CLRS-1 模拟月壤颗粒可以充分分散在酒精中, 增大了研磨球和 CLRS-1 模拟月壤之间的碰撞频率。需要指出的是, 当物料比为 2:1:1 时, 研磨球的比重较大, 短时间内研磨球和 CLRS-1 模拟月壤之间的碰撞频率也较大, 然而, 随着研磨时间增长, 研磨球高速运动产生了大量热能加速了酒精的挥发, 由于酒精量本身含量较低, 在 3 h 时, 酒精含量已经不足以使 CLRS-1 模拟月壤颗粒充分分散, 产生了粉末沉聚、结块现象, 严重影响了研磨效率与研磨效果。在其他的物料比例条件下, 由于碰撞频率相对较低, 因此细化程度也较差, 因此实验选择最佳的物料比为 1:1:2。

物料比为 1:1:2 时, CLRS-1 模拟月壤经不同研磨时间后其颗粒粒度分布变化如图 1 所示。随着球磨时间的延长, CLRS-1 模拟月壤经研磨后其中值粒径下降速率减缓, 由于大颗粒不断被破碎, 颗粒分布范围不断缩小, 在 6 h 时 CLRS-1 模拟月壤细化程度达到了极限。此时 CLRS-1 模拟月壤经研磨后其中值粒径位于 $0.30\mu\text{m}$ 附近, 最大颗粒不大于 $1\mu\text{m}$ 。6 h 以后, 破碎后的 CLRS-1 模拟月壤的粒径分布变化不大, 而在 8 h 时, 样品粒度反而有所增大, 出现了反破碎现象。主要有 2 方面原因: ①随着球磨时间的延长, 酒精不断挥发, 当酒精含量过低时, 研磨球与 CLRS-1 模拟月壤颗粒不能够充分分散, 研磨球之间因相互激烈碰撞产生了一定量的损耗, 球磨 8 h 后, 研磨球的重量有了不同程度的降低; ②随着颗粒粒径的减小, 颗粒之间的静电吸引力、范德华力、毛细管力等微观相互作用力越来越显著, 形成了由于过度球磨造成的粉体团聚现象^[33~35]。从能量的角度来说, 随着粉末的细化, 颗粒单位体积表面自由能增加, 破碎大颗粒所需能量低于相同质量的小颗粒。当颗粒细化到一定程度时, 若要进一步细化, 需要更大的能量^[33]。经多次实验证明, 在同一条件下, CLRS-1 模拟月壤在不同时间段破碎后的粒度分布具有稳定性。需要指出的是, 行星式球磨破碎后不大于 $0.1\mu\text{m}$ 的颗粒比例仍明显低于月尘, 这说明月尘在形成过程中受到的太空风化作用的能量要高于行星式球磨^[37]。

4.2 双峰特征

双峰特征是行星式球磨破碎 CLRS-1 模拟月壤粒度分布的主要特征。如图 1 所示, 经行星式球磨 3 h 时, 样品的颗粒直径分别集中在 $0.16\mu\text{m}$ 和

0.63 μm 附近,而颗粒直径在 0.33 μm 时的颗粒数目明显少于粒径位于 0.16 μm 和 0.63 μm 粒级范围内的颗粒数目,因此,样品的粒度分布呈现了波浪形的双峰模式。随着球磨时间的延长,出料物的双峰特征不断减弱,虽然整体颗粒直径都在降低,但是颗粒直径在 0.50~0.60 μm 范围内的颗粒数目仍然高于颗粒直径位于 0.30~0.40 μm 之间的颗粒数目,而颗粒不大于 0.20 μm 范围内的颗粒数目明显增多。6 h 时,颗粒直径在 0.16 μm 和 0.63 μm 仍然存在两个峰值,矿物颗粒位于 0.16 μm 和 0.63 μm 附近的颗粒体积占整体体积的 9% 与 5%,颗粒直径位于 0.33 μm 附近的颗粒体积仅占整体体积的 2%~3%。这说明矿物颗粒直径一部分集中在 0.16 μm 附近,另一部分集中在 0.63 μm 附近,而矿物颗粒直径集中在 0.33 μm 附近的颗粒数目最少。在 6 h 以后,CLRS-1 模拟月壤的双峰特征比较稳定,行星式球磨 CLRS-1 模拟月壤细化程度达到了极限,粒度分布没有太大变化。

由图 3 可知,在相同条件下的行星式球磨过程中,模拟月壤主要组分的粒度分布差异很大,而且随着研磨时间的延长,当颗粒直径极其细微时,不同组分之间由于硬度差异而产生特征峰差异趋于明显。火山玻璃莫氏硬度为 5,在研磨过程中,火山玻璃呈现了明显的单峰模式,6 h 时,火山玻璃 D_{50} 为 0.18 μm ;斜长石莫氏硬度约为 6,在研磨过程中,斜长石呈现了明显的单峰模式,6 h 时,斜长石 D_{50} 为 0.22 μm ;橄榄石的莫氏硬度约为 7,在研磨过程中,橄榄石呈现了明显的单峰模式,6 h 时,橄榄石 D_{50} 为 0.55 μm 。整体来说,硬度低的火山玻璃、斜长石更容易被破碎,中值粒径小,粒度分布范围窄,硬度高的橄榄石细化程度低,中值粒径大,粒度分布范围较大。从粒度分布特征来看,单矿物球磨均呈现了单峰模式,斜长石和火山玻璃的细化程度最好,火山玻璃和斜长石的大部分颗粒位于 0.10~0.20 μm 的粒级范围内,橄榄石的细化程度较差,大部分颗粒位于 0.50~0.60 μm 的粒级范围内。

由上可知,在行星式球磨破碎 CLRS-1 模拟月壤的过程中,矿物硬度越小,越容易被破碎,矿物细化程度越高。在 CLRS-1 模拟月壤中,火山玻璃占整体组分的 40% 以上,斜长石和橄榄石一般各占整体含量的 20% 以上,上述主要组分总和约占整体组分的 80% 以上^[18,36],因此,在 CLRS-1 模拟月壤粒度分布呈现的双峰特征中,粒径较大的部分主要为橄榄石,而粒径较小的部分主要为斜长石和火山玻璃。而双峰特征的主要成因是橄榄石、斜长石和火

山玻璃等主要组分之间由于硬度差异形成了代表不同物质组分的单峰,不同的单峰组合形成了 CLRS-1 模拟月壤的双峰。大部分的火山玻璃和斜长石颗粒直径在 0.10~0.20 μm 范围内,两种矿物的总量占整体组分的一半以上,因此 CLRS-1 模拟月壤位于 0.10~0.20 μm 之间的颗粒数目最多,在 0.10~0.20 μm 处形成了第 1 个主要由火山玻璃和斜长石组成的特征单峰。CLRS-1 模拟月壤的另一主要组分橄榄石研磨程度达到最细时,中值粒径集中在 0.50~0.60 μm 范围,致使 CLRS-1 模拟月壤在 0.50~0.60 μm 粒级范围内出现了主要由橄榄石组成的特征单峰。

5 结论与展望

行星式球磨破碎 CLRS-1 模拟月壤是制备模拟月尘的一种有效手段,该方法物料损耗率低,细化效率高,粉碎效果好。当物料比为 1:1:2,研磨时间为 6 h 后,CLRS-1 模拟月壤经行星式球磨破碎后的粒度分布特征最接近月尘。由于模拟月壤主要物质组分之间的硬度差异,破碎后的 CLRS-1 模拟月壤具有明显的双峰特征,这与月尘的粒度特征存在一点点的差异,还需要采取合适的方法来解决这一问题。总之,利用行星式球磨破碎 CLRS-1 模拟月壤可获得与月尘粒度特征相似的模拟物质,在一定程度上可以作为月尘的替代品应用于月面探测工程试验和月球科学研究之中。

参考文献 (References):

- [1] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005.
- [2] McKay D, Heiken G, Basu A, Blanford G, Simon S, Reedy R, French B M, Papike J. The lunar regolith[A]. Heiken G, et al. Lunar sourcebook: A user's guide to the Moon[M]. New York: Cambridge University Press, 1991: 308-380.
- [3] Carrier W D. Particle size distribution of lunar soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(10): 956-959.
- [4] Park J S, Liu Y, Kihm K D, Taylor L A. Characterization of lunar dust for toxicological studies. I: Particle size distribution[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2008, 21: 266-271.
- [5] Liu Y, Taylor L A. Lunar dust: Chemistry and physical properties and implications for toxicity[J]. Lunar and Planetary Institute Contributions, 2008, 1415: 2072.
- [6] Noreen K M. The lunar environment: Determining the health effects of exposure to moon dusts[J]. Acta Astronautica, 2008, 63(7-10): 1006-1014.
- [7] Calle C I, Buhler C R, Mcfall J L, Snyder S J. Particle remov-

- al by electrostatic and dielectrophoretic forces for dust control during lunar exploration missions[J]. *Journal of Electrostatics*, 2009, 67(2-3): 89-92.
- [8] Gaier J R. The effects of lunar dust on eva systems during the apollo missions[R]. NASA/TM-2005-213610.
- [9] Buhler C R, Calle C R, Clements J S, Nantovani J G, Ritz M L. Test method for in situ electrostatic characterization of lunar dust[J]. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2007, 2: 1-19.
- [10] Guthrie G D. Mineral properties and their contribution to particle toxicity[J]. *Environment Health Perspect*, 1997, 5: 1003-1011.
- [11] Otis R W. Adhesion of lunar dust[R]. 2007, NASA/CR-2007-214685.
- [12] Lam C W, James J T, Latch J N, Hamilton R F, Holian Jr A. Pulmonary toxicity of simulated lunar and martian dusts in mice; II. Biomarkers of acute responses after intratracheal instillation[J]. *Inhalation Toxicology*, 2002, 14: 917-928.
- [13] Lam C W, James J T, McCluskey R, Cowper S, Balis J, Muro-Cacho C. Pulmonary toxicity of simulated lunar and martian dusts in mice; I. Histopathology 7 and 90 days after intratracheal instillation[J]. *Inhalation Toxicology*, 2002, 14: 901-916.
- [14] Hapke B W. Space weathering from mercury to the asteroid belt[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106: 10039-10073.
- [15] Noble S K, Pieters C M, Taylor L A, Morris R V, Allen C C, McKay D S, Keller L P. The optical properties of the finest fraction of lunar soil; implication for space weathering [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2001, 36: 31-42.
- [16] Taylor L A, Cahill J T, Patchen A, Pieter C, Morris R V, Keller L P, McKay D S. Mineralogical and chemical characterization of lunar high-land regolith; lessons learned from mare soils[A]. In: 32th Lunar and Planetary Science Conference[C]. 2001: 2196.
- [17] Wallace W T, Taylor L A, Yang L, Cooper B L, McKay D S, Chen B, Jeevarajan A S. Lunar dust and lunar simulant activation and monitoring[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2009, 44: 961-970.
- [18] Zheng Y C, Wang S J, Ouyang Z Y, Zou Y L, Liu J Z, Li C L, Li X Y, Feng J M. CAS-1 lunar soil simulant[J]. *Advances in Space Research*, 2009, 43: 448-454.
- [19] McKay D S, Carter J L, Boles W W, Allen C C, Allton J H. JSC-1: A new lunar soil simulant[J]. *American Society of Civil Engineers*, 1994: 857-866.
- [20] Klosky J L, Sture S, Ko H Y, Barnes F. Mechanical properties of JSC-1 lunar regolith simulant[J]. *American Society of Civil Engineers*, 1996: 680-688.
- [21] 卢春慈. 粉体加工技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1999.
- [22] 陶珍东, 郑少华. 粉体工程与设备[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [23] 盖国胜, 马正先, 胡小芳. 超细粉碎与分级设备进展[J]. *金属矿山*, 2000, 5: 30-41.
- [24] 蒋新民, 王新功, 左金. 超细气流破碎机研制与应用[J]. *非金属矿*, 1999, 22: 22-24.
- [25] 杨云川, 李国康. 超细粉体气流粉碎技术探析[J]. *化工矿物与加工*, 2002, (6): 23-26.
- [26] 熊大民. 声化学的研究与应用现状[J]. *昆明理工大学学报*, 2001, (1): 83-89.
- [27] 赵晓兵, 陈志刚. 纳米复合材料及其制备技术综述[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2002, 23(4): 51-56.
- [28] 肖锋, 叶建东, 王迎军. 超声技术在无机材料合成与制备中的应用[J]. *硅酸盐学报*, 2002, 30: 615-619.
- [29] Lorimer J P, Mason T J. Sonochemistry: The uses of ultrasound in chemistry[A]. *Cambridge: Royal Society of Chemistry*, 1990: 66.
- [30] 李春喜, 王子镛. 超声技术在纳米材料制备中的应用[J]. *化学通报*, 2000, (5): 268-271.
- [31] 肖廷. 超声波固液反应球磨研究[D]. 长沙: 湖南大学硕士学位论文, 2010.
- [32] 刘银, 王静, 张明旭, 秦晓英. 机械球磨法制备纳米材料的研究进展[J]. *材料导报*, 2003, (7): 20-22.
- [33] 李江, 陈彩凤, 陈志刚. 纳米粉体及其制备方法[J]. *陶瓷工程*, 2001, 35: 1-5.
- [34] 黄智勇, 王翔, 刘学建, 黄莉萍, 张培志, 陈晓阳. 氮化硅粉体的行星式球磨工艺研究[J]. *陶瓷科学与艺术*, 2003, (6): 21-25.
- [35] 赵广慧, 居毅, 郭绍义. 高能球磨制备 NdFeB 纳米晶粉末[J]. *浙江工程学院学报*, 2004, 21(4): 296-299.
- [36] 郑永春. 模拟月壤研制与月壤的微波辐射特性研究[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2005.
- [37] Keller L P, McKay D S. Discovery of vapor deposits in the lunar regolith[J]. *Science*, 1993, 261: 1305-1307.