

模拟月壤研制的初步设想^{*}

郑永春^{1,2} 王世杰¹ 刘建忠³ 李泳泉^{1,2} 邹永廖³

¹(中国科学院地球化学研究所 贵阳 550002)

²(中国科学院研究生院)

³(中国科学院国家天文台)

摘 要 模拟月壤是月球样品的地球化学复制品。作者总结世界上已有的 5 种模拟月壤 JSC-1, MLS-1, MLS-2, MKS-1 和 FJS-1 的研制过程、方法与基本理化性质。认为系列化模拟月壤研制对中国首次月球探测有重要意义。在此基础上, 作者提出系列化模拟月壤研制的基本思路。

关键词 系列化模拟月壤; 月球探测; 登月点平均成分

中图法分类号 P 184

A Review and Prospect for Developing of Lunar Soil Simulants

ZHENG Yongchun^{1,2} WANG Shijie¹ LIU Jianzhong³ LI Yongquan^{1,2} ZOU Yongliao³

¹(Institute of Geochemistry, The Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002)

²(Graduate School, The Chinese Academy of Sciences)

³(National Astronomical Observatories, The Chinese Academy of Sciences)

Abstract Lunar soil simulants are geochemical copycats of lunar sample. They have similar chemical composition, mineralogy, particle size distribution, and engineering properties with lunar sample. Simulants of lunar rocks and soils have been developed to satisfy the requirements of a variety of scientific and engineering investigations. They are essential to meet the system requirements for lunar exploration and in support of future human activities on the Moon. Such studies include material handling, construction, excavation, and transportation. The simulants is also appropriate for research on dust control, spacesuit durability, and agriculture.

Five lunar soil simulants, JSC-1, MLS-1, MLS-2, MKS-1, FJS-1 are reviewed in the paper. Their starting materials, preparation, and characterization (chemical composition, mineralogy, particle size distribution, specific gravity, angle of internal friction, and cohesion) are also listed.

China will realize the first lunar exploration before 2007. So it is an essential and pressing task to develop lunar soil simulants series corresponding to average chemical and mineral composition of lunar sample at Apollo and Luna landing sites. The tentative ideas of developing new lunar simulants series based on geologic investigations were brought forward in the end.

Key words Lunar soil stimulant series, Chinese lunar exploration, Average composition at lunar landing sites

^{*} 国家自然科学基金项目 (40473036, 40373037) 和中国科学院知识创新工程项目 (KZCX2-115) 共同资助
2004-06-10 收到原稿, 2004-10-20 收到修定稿

1 引言

地基和空基对月遥感及 Apollo 和 Luna 计划执行期间登月调查的结果均表明, 整个月球表面覆盖着一层由岩石碎屑、粉末、角砾、撞击熔融玻璃等物质组成的、结构松散的风化层——月壤 (lunar regolith)。月壤的平均粒度一般为 $40\text{--}100\text{ }\mu\text{m}$, 颗粒直径大于 1 cm 的物质在月球样品分类时当做岩石处理^[1], 也有直径数米左右的岩石埋、卧在月壤中。月海月壤的平均厚度一般为 $4\text{--}5\text{ m}$, 高地月壤一般为 $10\text{--}15\text{ m}$ ^{[2],[3]}。因此, Apollo 计划载人登月和 Luna 计划机器人登月采集的月球样品都来自月壤层。所有的月球实验也都是在月壤层上进行的。月球遥感探测的 X 射线光谱、紫外光谱、 γ 射线光谱的信号实际上都来自于月壤层最上部, 感应深度分别不会超过 $20\text{ }\mu\text{m}$, 1 mm , 20 cm ^{[4]–[6]}。这些方法的分辨率都大于 1 km^2 。在此分辨率下, 全部月球表面被月壤层所覆盖, 因此, 所有的遥感化学数据也来自于月壤层。也就是说, 月壤层实际上是人类对月球所有信息的来源。

真正的月球样品 (除月球陨石外的月球样品) 极其珍贵, 国内只有中国科学院地球化学研究所等极少数单位曾经利用美国政府赠送给我国的 1 g 月球样品中的 0.5 g 做过分析。即使是拥有 381.7 kg 月球样品的美国 (前苏联仅有 0.321 kg 月球样品), 对月球样品的使用也是非常严格和慎重的。

2 模拟月壤的研制意义

模拟月壤具有与月球样品相似的矿物组成和化学成分, 相似的颗粒粒度、机械强度、孔隙度、密度和电学性质是月球样品的地球化学复制品^[7]。在国外, 关于月球资源利用和工程研究的项目 (如材料合成、生命必需物质合成、资源性矿物提炼工艺等) 一般都采用模拟月壤来代替, 提出新的分析测试方法的研究项目大多先采用模拟月壤进行, 陨石撞击月表过程的模拟、太阳风和宇宙射线轰击月表的效应研究、月尘带电漂浮过程的实验模拟等许多消耗样品量较多的实验都是采用模拟月壤来进行的^{[8]–[19]}。目前, 国外仅美国和日本拥有模拟月壤, 而且美国利用模拟月壤进行大规模机械和工程研究主要是在 20 世纪 90 年代之前, 现在已接近尾声,

所以可供使用的模拟月壤数量不多。日本的模拟月壤是由日本 Shimizu 公司的空间和机器人系统部研制的, 主要用于月球资源利用技术和工程领域的研究, 在谱学表现、电学性质方面与月球样品之间存在较大差异, 难以满足月球遥感卫星有效载荷科学定标的需要。现有的模拟月壤基本上只模拟 Apollo 11、14 两个登月采样点的月壤组成平均, Apollo 和 Luna 其他采样地区的月球物质还没有模拟月壤提出, 不能满足研究工作多样化的需要。

新一轮世界性“重返月球”热潮的兴起, 主要目的是开发和利用月球资源, 特别是开发的相对较容易月壤中的资源, 进而为建立月球基地、将月球作为进一步进行深空探测的平台奠定基础。我国月球探测计划一期工程已正式进入实施阶段, 主要是利用 CCD 相机、激光高度计、 γ 谱仪、微波辐射计等有效载荷对月球地形地貌和地质构造、月表元素分布和月壤厚度等进行遥感探测。这些有效载荷的科学定标工作需要利用模拟月壤来进行。通过模拟月壤的矿物组成、化学成分、谱学性质、电学性质等与有效载荷输出信号 (包括漫反射谱、紫外-可见-近红外光谱、二次 X 射线荧光、微波辐射等) 之间的仔细比较, 建立起遥感信号与月球物质各种性质之间的定性定量关系, 从而应用于遥感数据的反演。在以月面软着陆和取样返回为目标的我国月球探测计划第二、三期工程中, 登月舱、月球车、月球机器人、月球钻探取样工具等的研制将成为工作重点。这些设备的研制过程和研制成功后对设备进行可靠性、灵活性、适应性的检验, 都需要在模拟月壤铺设的月面实验场进行反复试验。同时, 模拟月壤还是进行月球资源开发利用技术和月球科学研究的重要实验材料。因此, 模拟月壤是开展月球探测、开发利用月球资源乃至建立月球基地相关研究工作所必须的。

3 模拟月壤研制现状与分析

据公开发表的文献统计, 迄今为止, 世界上已经有美国的 JSC-1, MLS-1, MLS-2 和日本的 MKS-1, FJK-1 共 5 种模拟月壤 (其主要化学组成见表 1), 分别模拟 Apollo 11 登月点的高钛月海月壤、Apollo 14 登月点的低钛月海月壤和高地月壤。

表 1 模拟月壤与对应的月球样品的化学组成对比
Table 1 Major element compositions of lunar soil simulants
and corresponding lunar sample

	14163	A11	A14	JSC-1	MLS-1	10084	FJS-1	MKS-1
SiO ₂	47.3	42.2	48.1	47.71	43.86	42.55	49.14	52.69
TiO ₂	1.6	7.8	1.7	1.59	6.32	7.71	1.91	1.01
Al ₂ O ₃	17.8	13.6	17.4	15.02	13.68	13.47	16.23	15.91
Cr ₂ O ₃	0.2	0.3	0.23	—	—	—	—	—
FeO	10.5	15.3	10.4	7.35	13.40	15.16	8.3	7.5
Fe ₂ O ₃	—	—	—	3.44	2.60	—	4.77	4.78
MnO	0.1	0.2	0.14	0.18	0.20	0.21	0.19	0.22
MgO	9.6	7.8	9.4	9.01	6.68	7.98	3.84	5.41
CaO	11.4	11.9	10.7	10.42	10.13	11.99	9.13	9.36
Na ₂ O	0.7	0.47	0.7	2.7	2.12	0.45	2.75	1.9
K ₂ O	0.6	0.16	0.55	0.82	0.28	0.15	1.01	0.58
P ₂ O ₅	—	0.05	0.51	0.66	0.20	0.14	0.44	0.14
LOI	—	0.12	—	0.111	0.0015	—	0.43	0.5
合计	99.8	99.9	99.83	99.65	99.47	99.80	98.14	100

注: “—”表示含量低于检测限或未分析, A11, A14 指 Apollo 11 号和 14 号登月采样点月壤的平均化学组成, 14163, 10084 分别指 Apollo 14 号和 Apollo 11 号宇航员采集的编号为 14163, 10084 的月球样品, LOI 指烧失量

JSC-1 模拟月壤^{[10],[11]}的研制需求最早是模拟月球物质工作组在 Space 92 会议上提出的,而后由美国国家宇航局 (NASA) 约翰逊空间中心 (JSC) 主持研制。JSC-1 是一种富含玻璃的玄武质火山灰,经简单加工研制而成,颗粒平均比重为 2.9^{[11],[20]}。主要结晶相是长石、辉石和橄榄石,副矿物包括钛铁矿、铬铁矿和痕量粘土,玄武质玻璃含量大约占 50% (体积比)。其化学成分、矿物组成、粒度分布和物理机械性质 (压缩系数, 内聚力 c , 内摩擦角 φ 等) 与 Apollo 14 登月点的低钛月海月壤相似^[11],特别是与月球样品 14163 的化学成分非常近似。JSC-1 模拟月壤的初始物质为旧金山 Flagstaff 附近 Merriam 火山喷发的厚达数米的黑色 (局部红色) 火山灰和火山砾沉积, 附近火山口玄武岩流的 K-Ar 年龄为 $0.15 \pm 0.03 \text{ Ma}$ ^[21]。JSC-1 是特别为大尺度和中等尺度的工程研究而生产的, 是对 MLS-1 模拟月壤的补充^[22], 目的是支持未来月球基地的人类活动。这些研究包括材料处理、建筑、挖掘、运输、生命必需物质 (氧气、水等) 生产、灰尘控制、辐射防护、宇航服耐用性和月球农业等。JSC-1 模拟月壤成本低廉, 可满足科学和工程研究的多种需求。

MLS-1 模拟月壤 (Minnesota Lunar Simulant-1)^[22] 由美国明尼苏达大学研制, 与 Apollo 11 采集的

高钛月海月壤具有相似的组成和性质, 尤其是化学成分与月球样品 10084 十分相似。平均粒度与较粗的月海月壤相似, 但可能由于重结晶的原因, 粒度更均一^[22]。MLS-1 模拟月壤的初始物质为穿越德卢司 (Duluth, 属明尼苏达州) 北美中大陆断裂系 (Mid-Continent Rift) 的苏必利尔湖 (Lake Superior) 北岸年龄为 10 亿年左右的富钛结晶质玄武岩露头。经粉碎磨细成粒度小于 1 mm 或更小的颗粒, 一部分经 ISSP (In-flight Sustained Shockwave Plasma reactor) 处理以模拟月表陨石撞击过程, 最终生成玻璃物质。将玻璃物质与玄武岩粉末以 1:3 (质量比) 混合, 配制成的 MLS-1 模拟月壤含有 25% (重量百分比, 也可根据需要配制玻璃物质含量) 的玻璃, 可与月壤 10%—80%^{[23],[24]} 的玻璃含量相比拟。

MLS-2 模拟月壤 (Minnesota Lunar Simulant-2)^[22] 是一种月球高地月壤模拟物质, 为德卢斯北美中大陆断裂系的斜长岩经粉碎、研磨过筛制成, 主要矿物相为 An=80 的斜长石, 含有极少量含水矿物。MLS-2 比 MLS-1 含有更多的 SiO₂ 和更低的 Ti, 同时含有大量的 Al。

MKS-1 和 FJS-1 模拟月壤^{[25],[26]} 由日本 Shimizu Corporation 的空间和机器人系统部研制, 初始物质为玄武质熔岩, 经加工后分别与 Apollo 11 和 Apollo

14 采样点月壤具有相似的化学成分、粒度分布和机械性质。研制这两种模拟月壤的主要目的是为了满足不同月球资源利用技术和工程研究的需要,但在谱学性质、电学性质等方面与月球样品之间存在较大差别。

虽然到目前为止,总共研制有 5 种模拟月壤,但实际上研制过程比较规范,应用研究较多的仍只有 JSC-1 和 MLS-1 模拟月壤。而且,现有模拟月壤大多模拟 Apollo 11 号和 14 号采样点的月壤平均组成,其他 Apollo 和 Luna 计划采样点还没有任何模拟月壤提出。鉴于这些采样点的月球物质代表不同的月表构造单元和不同的形成背景,其组成和理化性质也存在很大差别,研制与 Apollo 和 Luna 计划采样点平均组成相似的一系列代表月表不同地貌单元和地质背景的月球物质的模拟月壤,将是对世界上已有模拟月壤的重要补充。也有利于节约月球探

测经费,规范月球科学试验数据。

4 系列化模拟月壤研制的基本思路

Apollo 11, 12, 15, 17 和 Luna 16, 24 采样点均位于月海,其中 Apollo 15, 17 采样点临近月球高地,只有 Apollo 16 和 Luna 20 采样点完全位于月球高地^[29]。据此,可将月壤分为月海玄武岩起源、月球高地起源以及月海和高地混合源三种类型。Apollo 和 Luna 各次登月采样点月壤的平均化学组成^{[3],[30]–[33]}(见表 2)和平均矿物和玻璃组成^{[30],[32],[34],[35]}(见表 3)可作为系列化模拟月壤研制的标准。

模拟月壤研制可分为两种途径,一种为全岩样品的研制。月壤样品以岩石类型分大致可分为:低

表 2 Apollo 和 Luna 登陆点月壤平均化学成分
Table 2 Chemical compositions (wt.%) of average soils at lunar landing sites
and in selected regions at the Apollo 15, Apollo 16, Apollo 17,
Luna 16, Luna 20, Luna 24 sites

	11	12	14	15a	15b	15c	15	16a	16b	16c	16	17a	17b	17c	17d	17	L16	L20	L24
TiO ₂	7.8	3	1.7	1.7	1.4	1	1.4	0.56	0.47	0.6	0.54	8.4	1.7	3.4	3.5	4.2	3.4	0.55	1.3
Al ₂ O ₃	13.6	12.9	17.4	13.2	17.1	13.4	14.6	27.1	28	26.8	27.3	12	20.7	18	17.4	17.1	15.3	22.3	12.5
Cr ₂ O ₃	0.3	0.34	0.23	0.44	0.27	0.37	0.36	0.34	0.54	0.11	0.33	0.45	0.25	0.28	0.32	0.33	0.28		0.32
FeO	15.3	15.1	10.4	16.3	11.7	14.9	14.3	5.2	4.7	5.4	5.1	16.7	8.8	10.9	12.2	12.2	16.7	7	19.8
MnO	0.2	0.22	0.14	0.21	0.16	0.19	0.19	0.41	0.27	0.22	0.3	0.23	0.12	0.16	0.16	0.17	0.23	0.13	0.25
MgO	7.8	9.3	9.4	10.9	10.5	13	11.5	5.8	5.6	5.7	5.7	9.9	9.8	10.7	11.1	10.4	8.8	9.8	9.4
CaO	11.9	10.7	10.7	10.4	11.6	10.3	10.8	15.8	15.7	15.6	15.7	10.9	12.8	12.12	11.3	11.8	12.5	15.1	12.3
Na ₂ O	0.47	0.54	0.7	0.38	0.45	0.33	0.39	0.46	0.5	0.43	0.46	0.35	0.42	0.42	0.42	0.4	0.34	0.5	0.31
K ₂ O	0.16	0.31	0.55	0.23	0.2	0.19	0.21	0.13	0.23	0.14	0.17	0.16	0.16	0.12	0.09	0.13	0.1	0.1	0.04
P ₂ O	0.05	0.4	0.51	0.16	0.19	0.19	0.18	0.13	0.1	0.1	0.11	0.14	0.15	0.09	0.08	0.12	0.12	0.16	0.11
S	0.12			0.07	0.08	0.04	0.06	0.07	0.05	0.09	0.07	0.12	0.09	0.07	0.09	0.09	0.21	0.08	0.14
合计	99.9	99.6	99.8	100.6	100.2	100.9	100.8	100.9	100.9	100.4	100.8	100.1	100	99.8	99.9	100.5	99.7	100.8	100.4
Sc	60	38	23	30	22	24	25.3	9	8	9	8.7	63	17	31	37	37	37	16	34
U	0.5	1.7	1.5	1.3		0.9	0.73	0.53	0.45	0.61	0.53	0.29	0.9	0.44		0.41	0.25	0.29	0.26
Th	1.9	6.4	6.7	3.8		3	2.3	1.9	1.4	2.8	2	0.53	2.7	2.7	1.5	1.9	0.8	0.85	1.1
La	16	39	70	23	32	24	26.3	11	8	13	10.7	8	15	11		8.5	13	5	5

注: 表 2 中 11, 12, 14, 15, 16, 17 分别指 Apollo 11, 12, 14, 15, 16, 17 登月点月壤的平均化学组成; 15a, 15b, 15c 分别指 Apollo 15 登月点的月海月壤、亚平宁前缘月壤、富含绿色玻璃的月壤的平均化学组成; 16a, 16b, 16c 分别指 Apollo 16 登月点的凯莱平原月壤、北部辐射纹地区的月壤、Stone 山和南部辐射纹月壤的平均化学组成; 17a, 17b, 17c, 17d 分别指 Apollo 17 登月点的月海月壤、南部山丘 (South Massif) 和亮幔 (light mantle) 月壤、北部山丘月壤、刻纹山 (Sculptured Hill) 月壤的平均化学组成; L16, L20, L24 分别指 Luna 16, 20, 24 采样点月壤的平均化学组成 (俄罗斯的数据)。Sc, U, Th, La 的含量单位为 10⁻⁶g/g

钛月海玄武岩、高钛月海玄武岩、高地斜长岩、克里普玄武岩 4 大类。全岩样品的研制就是找到与月壤样品具有相似化学成分和矿物组成的地球物质,再经加工配制而成(包括研磨成一定粒度、添加某种缺少的单矿物、ISSP 烧制等)。月壤样品大多含有较高体积含量的玻璃,这种玻璃是在陨石冲击月面物质产生的高温高压作用下熔融冷却形成的。为使模拟月壤中也含有相当含量的玻璃,一种方法是从火山喷发物质中寻找模拟月壤的初始物质(如 JSC-1 模拟月壤的研制),另一种方法也可通过将化学成分与月壤样品相似的地球岩石经 ISSP 的瞬时加热熔融冷却后生成一定含量的玻璃(如 MLS-1 模拟月壤的研制)。

在无法寻找到与月壤样品具有相似矿物组成和化学成分的地球物质的情况下,可以采用另一种模拟月壤的配制方案,即矿物混合样品的配制。尽管已发现并得到确认的月球矿物有几十种之多,但主要的矿物却只有橄榄石、长石、辉石、钛铁矿、尖晶石等 5 种。通过从火成岩(最好与月球岩石为同类岩石)中筛选出这些单矿物,再根据月壤的平均化学成分按比例配制成模拟月壤。

表 3 Apollo 登月点月壤平均矿物组成
Table 3 Mineralogical compositions (wt. %) of average lunar soils at Apollo landing sites

	长石	橄榄石	辉石	不透明矿物
A 11	26.7	3.2	53.7	16.3
A 12	23.0	8.7	63.4	4.9
A 14	49.7	1.8	47.0	1.5
A 15	37.9	8.4	52.2	1.5
A 16	69.0	2.6	28.2	0.1
A 17	35.5	5.5	56.3	2.7

借鉴 JSC-1 模拟月壤的研制经验,并结合我国新生代火山物质分布调查,完全可以在我国东北地区找到与低钛月海玄武岩起源的月壤样品具有相似矿物和化学组成的火山喷发物质。吉林省境内辉南-靖宇一带发育有众多大小不一的新生代火山,其喷出物为碱性橄榄玄武岩质到碧玄岩质熔岩与火山碎屑岩。尤其是其中的火山渣和火山灰中含有大量的玻璃物质,这一点正好与月表月壤中撞击熔融作用形成的冲击玻璃相似。初步的化学分析结果表明,其主量元素组成与 Apollo 14 登月点宇航员采集的月壤样品的平均化学组成^[27]相似,为低钛碱

性橄榄玄武岩。主要组成矿物为橄榄石、辉石、长石,并含有大量的火山玻璃(> 30 vol.%)。这种物质的产量极大,成本低廉,完全可以满足各种科学研究和工程试验的需要。

由于地球玄武岩与月球玄武岩的主要差别在于 TiO_2 和玻璃含量较低,月海月壤 TiO_2 含量从 0.5%—13% 不等,玻璃含量从 10%—80% 不等^[3],所以并不能保证在我国境内找到与高钛月海玄武岩起源的月壤相似的玄武质火山物质,但可以通过在中低钛地球玄武岩适当添加一定比例的钛铁矿和玻璃(可由玄武质火山灰中筛选)配制成高钛玄武岩起源的模拟月壤。而且初步调查发现,钛铁矿床附近的玄武质围岩可能含有较高含量的 TiO_2 。

月球高地起源月壤的模拟物可以通过粉碎、研磨过筛的斜长岩(河北承德地区出露的斜长岩)粉末中添加少量的玻璃物质(可由斜长岩经 ISSP 处理生成的斜长岩质玻璃^[22])配制而成。

调查还发现,地球上的金伯利岩与月球上的克里普岩一样含有较高含量的 K、REE、P,可考虑作为与克里普岩起源月壤相似的模拟月壤的初始物质。

参考文献

- [1] Vaniman D *et al.* Exploration, samples, and recent concepts of the Moon. In: Heiken G H, Vaniman D T, French B M ed. Lunar source book: A user's guide to the Moon, 1991, Cambridge Univ. Press: Cambridge. 5—26
- [2] Shkuratov Y G, Bondarenko N V. Regolith layer thickness mapping of the Moon by radar and optical data. *Icarus*, 2001, **149**(2):329—338
- [3] McKay D *et al.* The lunar regolith. In: Heiken G H, Vaniman D T, French B M ed. Lunar Source Book, New York: Cambridge Univ. Press, 1991. 285—356
- [4] Morris R V. Determination of optical penetration depth from reflectance and transmittance measurements on albite powders. In: Lunar and Planetary Science Conference XVI. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1985
- [5] Pieters C M. Strength of mineral absorption features in the transmitted component of near-infrared light: first results from RELAB. *J. Geophys. Res.*, 1983, **88**:9534—9544
- [6] Metzger A E *et al.* Lunar Surface Radioactivity: Preliminary Results of the Apollo 15 and 16 Gamma-Ray Spectrometer Experiments. *Science*, 1973, **179**(4975):800—803
- [7] Kirkici H, Rose M F, Chaloupka T. Experimental Study on Simulated Lunar Soil: High Voltage Breakdown and

- Electrical Insulation Characteristics. *IEEE Trans. Dielect. Electrical Insul.*, 1996, **3**:119—125
- [8] Willman B M *et al.* Properties of lunar soil simulant JSC-1. *J. Aeros. Eng.*, 1995, **8**(2):77—87
- [9] Willman B M, Boles W W. Soil-tool interaction theories as they apply to lunar soil simulant. *J. Aeros. Eng.*, 1995, **8**(2):88—99
- [10] McKay D S *et al.* JSC-1: A new lunar regolith simulant. In: Lunar and Planetary Science XXIV. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1993
- [11] McKay D S *et al.* JSC-1: A new lunar soil simulant. In: Engineering, Construction, and Operations in Space IV. American Society of Civil Engineers, 1994
- [12] Allen C C, McKay D S, Morris R V. Hydrogen reduction of lunar simulant glass. In: Lunar and Planetary Science XXIII. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1992
- [13] Allen C C, McKay D S, Morris R V. Lunar oxygen—the reduction of glass by hydrogen. In: Engineering, Construction, and Operations in Space III. New York: American Society of Civil Engineers, 1992
- [14] Allen C C *et al.* Sintering of lunar glass and basalt. In: Engineering, Construction, and Operations in Space III. New York: American Society of Civil Engineers, 1992
- [15] Desai C S, Girdner K. Structural materials from lunar simulants through thermal liquefaction. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Engineering, Construction, and Operations in Space III. New York: NY, 1992
- [16] Desai C S, Saadatmanesh H, Allen T. Behavior of compacted lunar simulants using new vacuum triaxial device. *J. Aeros. Eng.*, 1992, **5**(4):425—441
- [17] Hayes S, Hamlett H, Bustin R. Carbon reduction of iron oxides in lunar simulants. In: Proceedings the 1996 5th International Conference on Engineering, Construction, and Operations in Space. Part 2 (of 2). Albuquerque, NM, 1996
- [18] Horanyi M, Robertson S, Walch B. Electrostatic charging properties of simulated lunar dust simulants JSC-1 and MLS-1. *Geophys. Res. Lett.*, 1995, **22**:2079—2082
- [19] Horanyi M, Walch B, Robertson S. Electrostatic charging properties of Apollo-17 lunar dust. *JGR-Planets*, 1998, **103**(E4):8575—8580
- [20] Willman B M *et al.* Properties of lunar soil simulant JSC-1. *Int. J. Rock Mech. Mining Sci. Geomech.*, 1996, **33**(1):13A
- [21] Moore R B, Wolfe E W. Geologic Map of the East Part of the San Francisco Volcanic Field, North-Central Arizona. Washington DC: Geological Survey US, 1987
- [22] Weiblen P W, Murawa M J, Reid K J. Preparation of simulants for lunar surface materials. In: Eng., Const. Operat. Space II. New York: American Society of Civil Engineers, 1990
- [23] Papike J J *et al.* Mare Basalts: Crystal Chemistry, Mineralogy, and Petrology. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 1976, **14**(4):475—540
- [24] Weiblen P W, Gordon K. Characteristics of a simulant for lunar surface materials. *LPI Contributions*, 1988, **652**:252—254
- [25] Yoshida H *et al.* Experimental Study on Water Production by Hydrogen Reduction of Lunar Soil Simulant in a Fixed Bed Reactor. In: Abstract of Space Resources Roundtable II. Golden, USA, 2000
- [26] Kanamori H *et al.* Properties of lunar soil simulant manufactured in Japan. In: Proceedings of the 6th International Conference and Exposition on Engineering Construction, and Operations in Space. Albuquerque: ASCE, 1998
- [27] Basu A, Riegsecker S E. Reliability of Calculating Average Soil Composition of Apollo Landing Sites. In: Workshop on New Views of the Moon: Integrated Remotely Sensed, Geophysical, and Sample Datasets, 1998
- [28] Haskin L A, Warren P H, Lunar Chemistry. In: Heiken G H, Vaniman D T, French B M ed. Lunar Source-Book, New York: Cambridge Univ. Press, 1991. 367—474
- [29] Meyer C. Sampling the Moon, NASA Lunar petrographic Education Thin Section Set. 2003
- [30] Labotka T C *et al.* The lunar regolith — Comparative petrology of the Apollo sites. In: Lunar and Planetary Science Conference, 1980
- [31] Laul J C, Papike J J, Simon S B. The lunar regolith — Comparative studies of the Apollo and Luna sites. Chemistry of soils from Apollo 17, Luna 16, 20, and 24. In: Lunar and Planetary Science Conference. 1982
- [32] Simon S B, Papike J J, Laul J C. The lunar regolith — Comparative studies of the Apollo and Luna sites. Petrology of soils from Apollo 17, Luna 16, 20, and 24. In: Lunar and Planetary Science Conference. 1982
- [33] Laul J C, Papike J J. The lunar regolith: Comparative chemistry of the Apollo sites. In: Lunar and Planetary Science Conference. 1980
- [34] Papike J J, Taylor L A, Simon S. Lunar minerals. In: Heiken G, Vaniman D, French B M ed. Lunar Source-Book, Cambridge Univ. Press: Cambridge. 1991. 121—181
- [35] Papike J J, Simon S B, Laul J C. The lunar regolith: chemistry, mineralogy and petrology. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 1982. **20**:761—826