

CLDS-i 模拟月尘的基本性质及应用前景

唐红¹, 张森森^{1,2}, 李雄耀^{1*}, 王世杰³, 刘建忠¹, 李世杰¹, 李阳¹, 吴焱学^{1,4}

(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 550081; 2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙 410000; 3. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 月尘对航天器、航天服性能和航天员的健康存在的危害迫切需要解决, 在月尘样品稀缺的条件下, 具有很高相似性的 CLDS-i 模拟月尘是开展尘埃防护技术攻关和毒性机理研究的重要基础。CLDS-i 模拟月尘含 75% 玻璃组分和少量纳米金属铁颗粒, 中值粒径为 500 ~ 600 nm, 具有复杂粒形和锋利棱角, 其基本性质与实际月尘相似, 可应用于月尘科学研究、月尘治理技术、月尘毒理学研究等诸多领域。

关键词: CLDS-i 模拟月尘; 纳米金属铁; 性质

中图分类号: V254.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5825(2017)01-0118-05

DOI:10.16329/j.cnki.zrht.2017.01.020

Basic Properties and Potential Application of CLDS-i Lunar Dust Simulant

TANG Hong¹, ZHANG Sensen^{1,2}, LI Xiongyao^{1*}, WANG Shijie³,
LIU Jianzhong¹, LI Shijie¹, LI Yang¹, WU Yanxue^{1,4}

(1. Center for Lunar and Planetary Science, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410000, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Lunar dust can make serious damages to the space probe, the space suit, and the health of astronaut, which is one of the key challenges faced in the manned lunar exploration. Due to the rareness of the lunar dust samples, CLDS-i lunar dust simulant with high similarity to the real lunar dust is an important basis for the study of the lunar dust protection and dust toxicity. The CLDS-i lunar dust simulant developed by the Institute of Geochemistry of CAS contains 75% glass and a little nanophase Fe⁰, and has a median particle size about 500 ~ 600 nm. The CLDS-i lunar simulant particles also have complicated shapes and sharp edges similar to those of the lunar dust which make the CLDS-i applicable to many fields such as the scientific research, the treatment technology and toxicological study of the lunar dust.

Key words: CLDS-i lunar dust simulant; nanophase Fe⁰; properties

1 前言

月尘对航天器和航天员的危害已成为月球探测尤其是载人月球探测迫切需要解决的重要问

题, Apollo 载人月球探测已很好地证实了月球表面弥漫的尘埃颗粒会造成视觉阻碍、仪表读数错误、月尘的附着和污染、表面打滑、机械阻塞、表面磨损、热控问题、密封失效、月尘吸入和生理刺激

收稿日期: 2015-09-28; 修回日期: 2016-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(41403057, 41572037); 载人航天预先研究项目(060402); 澳门科学技术发展基金(020/2014/A1)

第一作者: 唐红, 女, 博士, 副研究员, 研究方向为月球与行星科学。E-mail: dongtianzhixing@163.com

* 通讯作者: 李雄耀, 男, 博士, 研究员, 研究方向为月球与行星科学。E-mail: lixiongyao@vip.skleg.cn

等等,对航天器的性能安全和航天员的生命健康造成危害^[1-3]。我国的玉兔月球车在经历一个昼夜的巡视探测后出现了机械故障,也有可能是由于月尘的粘附阻塞造成。随着月球探测的不断深入,载人月球探测也将提上日程,这就更加迫切地要求更好地认识月尘的特性,解决月尘的危害问题。

月尘有别于月壤,通常指月壤中颗粒极小的部分,粒径小于 20 μm ,具有更特殊的性质,广泛分布于月球表面最表层 2 cm 范围,约占整个月壤的 20wt%,主要形成于月球表面后期的太空风化作用过程^[4-5]。Apollo 和 Luna 月球样品的分析表明,月尘的化学成分与月壤比较相近,其中 SiO_2 变化不大,但月尘中的 Al_2O_3 、 CaO 和 Na_2O 更高,而 FeO 、 MgO 和 TiO_2 相对更低^[6-7]。月尘的物相组成主要为胶结质玻璃,一般为 50% 以上,并含有斜长石、辉石、钛铁矿、橄榄石和纳米金属铁等矿物^[8-9]。纳米金属铁作为月球表面的独特组成,广泛分布于月尘颗粒中,其中存在于月尘颗粒表面非晶质环带中的纳米金属铁呈球状,粒径一般为几个纳米到十几个纳米,主要是由微陨石轰击蒸发沉积作用形成的^[10-11]。月尘颗粒非常细小,约 95% 的颗粒粒径小于 2.5 μm ,大部分颗粒粒径位于 100 ~ 300 nm 之间,并且颗粒形态复杂,具有锋利的棱角^[12-14]。

随着月球探测的不断发展和月球科学研究的不断深入,许多工程试验和科学研究的关键问题解决都需要大量的月尘样品,但是真实的月尘样品非常稀少珍贵,无法满足工程试验和科学研究的大量需求,利用具有相似性质的模拟月尘样品替代真实月尘样品开展研究是一个现实可行的重要途径。

2 CLDS-i 模拟月尘的研制

目前世界上已报道的模拟月尘样品主要有以下三种: 1) JSC-1A_vf 是美国国家宇航局下属的约翰逊空间中心利用模拟月壤 JSC-1A 进行研磨并筛选出粒径小于 20 μm 部分研制而成,平均粒径约 700 nm,不含纳米金属铁^[7]; 2) 北京卫星环境工程研究所和北京航空航天大学模拟月尘是参考月壤的标准研制的,其矿物组成与化学组成等均与 CLRS-1 模拟月壤相似,其平均粒径 70 μm ,

远大于月尘的平均粒径,同样不含纳米金属铁^[15]; 3) 中国科学院地球化学研究所前期研制的 CLDS-1 模拟月尘在矿物组成、化学成分和粒度分布上与真实月尘相似,但是在粒形和纳米金属铁特征方面仍具有较大的差异^[16]。为了使模拟月尘样品与真实月尘具有更高相似性,满足月球探测的工程试验和科学研究的需求,中国科学院地球化学研究所依据实际月球样品中小于 20 μm 的颗粒性质,以月尘的物相组成、化学成分、粒度粒形和纳米金属铁作为模拟月尘研制的四个标准,结合工程需要,在 CLRS-1/2 系列模拟月壤国家标准样品基础上,经过玻璃组分富集、球磨、超声破碎、冷冻干燥和溅射包裹等处理得到了 CLDS-i 模拟月尘。首先将 CLRS-1 模拟月壤进行初步球磨破碎,在高强度磁场下对破碎后的 CLRS-1 模拟月壤进行磁法筛选,将其分选为强磁性样品和弱磁性样品两个部分。弱磁性样品以玻璃质为主,矿物与化学组成与月尘接近。随后对弱磁性样品进行行星式球磨破碎和超声波破碎,获得粒径粒形特征与月尘相似的样品。再经快速冷却凝冻,在冷冻条件下进行干燥得到未含纳米颗粒金属铁的模拟月尘样品。最后利用脉冲激光器在低压无氧环境下依次对金属铁靶材和玄武岩靶材进行轰击溅射,实现模拟月尘颗粒表面覆盖有一层包裹纳米金属铁的非晶质硅酸盐膜,从而获得物相组成、化学成分、粒度粒形和纳米金属铁性质均与月尘十分接近的 CLDS-i 模拟月尘(图 1)。



图1 模拟月尘 CLDS-i
Fig. 1 The CLDS-i lunar dust simulant

3 CLDS-i 模拟月尘的基本性质

3.1 物相组成

利用光学显微镜、X 射线粉晶衍射仪(XRD)

和透射电镜(TEM)对 CLDS-i 模拟月尘进行了详细的物相组成分析。图 2(a)和(b)为 CLRS-1 模拟月壤在光学和正交偏光镜下的图片,可以看出其颗粒较粗,而且大部分为结晶质物质;图 2(c)和(d)则为 CLDS-i 模拟月尘在光学和正交偏光镜下的图片,其颗粒明显更细,而且绝大部分为玻璃质物质。XRD 的分析结果表明 CLDS-i 模拟月尘以胶结质玻璃和斜长石为主,并含有少量橄榄石、辉石和钛铁矿。通过透射电镜能谱和电子衍射对 CLDS-i 模拟月尘中 500 个颗粒进行了分析,统计结果表明其中玻璃质可达 75%,其次为斜长石,约为 15%。与月尘的物相组成相比,CLDS-i 模拟月尘的物相组成和含量与月尘样品的特征相近。

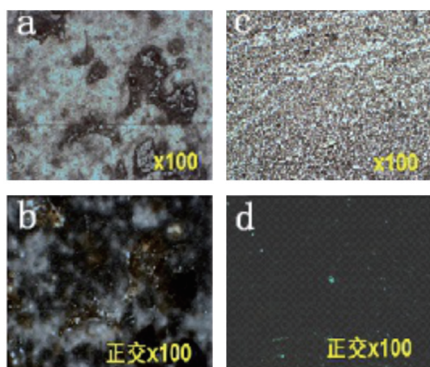


图 2 CLRS-1 模拟月壤和 CLDS-i 模拟月尘的光学图对比

Fig. 2 The comparison of optic images between CLRS-1 and CLDS-i

3.2 化学成分

利用 X 射线荧光光谱对 CLDS-i 模拟月尘的化学成分进行了分析,结果表明 CLDS-i 模拟月尘的化学成分与 Apollo 15 月海低 Ti 月尘的化学成分接近,其中 SiO_2 约为 50%, Al_2O_3 的含量约为 14%, TFeO 和 MgO 含量在 10% 左右, TiO_2 含量约为 1%, 但 CaO 含量相对偏低,这是由于地球上的斜长石主要为钠长石,而月球上的斜长石以钙长石为主(表 1)。

3.3 粒度粒形特征

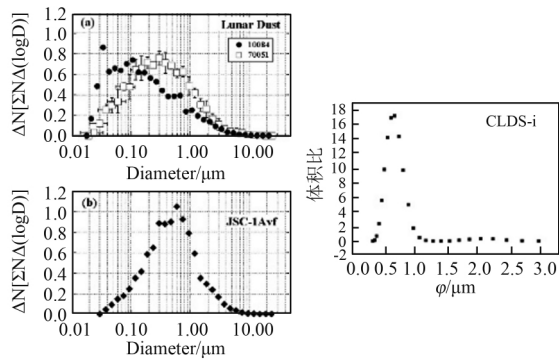
CLDS-i 模拟月尘的粒度分布如图 3 所示,绝大部分颗粒小于 $1\ \mu\text{m}$,其中值粒径集中在 $500\sim 600\ \text{nm}$ 之间,略高于月尘的中值粒径,但优于 JSC-1 Avf 的中值粒径 $600\sim 700\ \text{nm}$ 。

利用扫描电镜对 CLDS-i 模拟月尘颗粒形态的分析结果表明,CLDS-i 模拟月尘的颗粒形态与月尘颗粒相似,形态复杂多样,大部分都具有锋利的棱角(图 4)。对 CLDS-i 模拟月尘颗粒的复杂度因子(投影周长/内接椭圆周长)进行计算统计可知,颗粒的平均长轴长度为 $0.444\ \mu\text{m}$,平均短轴长度为 $0.327\ \mu\text{m}$,平均周长为 $1.800\ \mu\text{m}$,平均截面面积 $0.085\ \mu\text{m}^2$,平均圆度 0.408,圆度小于 0.5 的颗粒占 72.4%,其复杂度因子为 1.38(图 5),表明 CLDS-i 模拟月尘颗粒具有明显的棱角和锯齿状特征,其形态更为复杂,与月尘样品相似^[14]。

表 1 Apollo 15、CLRS-1 和 CLDS-i 化学组分特征
Table 1 The bulk chemistry of Apollo 15, CLRS-1 and CLDS-i

	15041 ₋₉₄		CLRS-1	CLDS-i
	10 ~ 20 μm	< 10 μm		
SiO_2	46.20	46.60	49.24	49.99
Al_2O_3	13.50	16.40	15.80	14.09
MgO	10.80	9.37	8.72	8.16
CaO	10.20	11.60	7.25	7.17
MnO	0.21	0.17	0.14	0.11
FeO/TFeO	14.40	11.00	11.47	11.53
Na_2O	0.41	0.49	3.08	2.78
K_2O	0.18	0.23	1.03	1.23
TiO_2	1.88	1.79	1.91	1.22
Total	97.78	97.65	98.64	96.28

注: Apollo 15 月尘样品的分析数据引自 [5]; CLRS-1 的分析数据引自 [17]; CLDS-i 分析数据来源于中国科学院地球化学研究所 X-荧光光谱实验室,标准偏差小于 0.05%。



月尘样品、JSC-1Avt 粒度分布数据引自[12]

图 3 粒度分布
Fig. 3 Particle size distributions

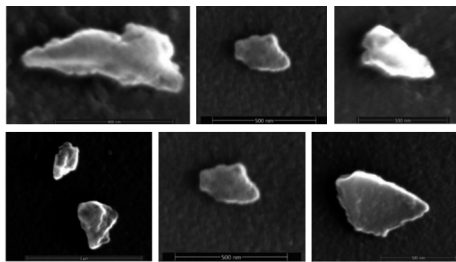


图 4 扫描电镜下的模拟月尘 CLDS-i 颗粒形态图片
Fig. 4 The morphology of CLDS-i in SEM images

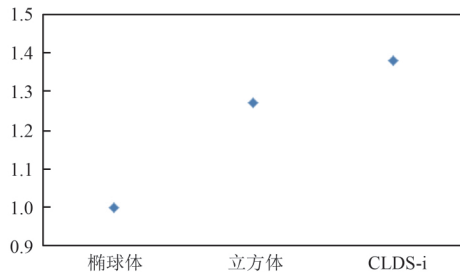


图 5 颗粒的复杂度因子
Fig. 5 The complexity factor of particles

3.4 纳米金属铁特征

利用高分辨率透射显微镜对 CLDS-i 模拟月尘颗粒进行分析表明,在大部分颗粒表层覆盖一层非晶质的硅酸盐膜,纳米金属铁被包裹在该非晶质层中,粒径约为 3~10 nm,呈球状分布(图 6a)。纳米金属铁颗粒(101)面的晶面间距测量值为 0.204 nm(图 6b),与 Fe(bcc)的晶面间距一致(0.203 nm)^[18],证实该纳米金属铁为体心立方结构的 α 相金属铁。

4 应用与展望

CLDS-i 模拟月尘在物相组成、化学成分、粒度粒形和纳米金属铁特征方面与月尘十分相似,

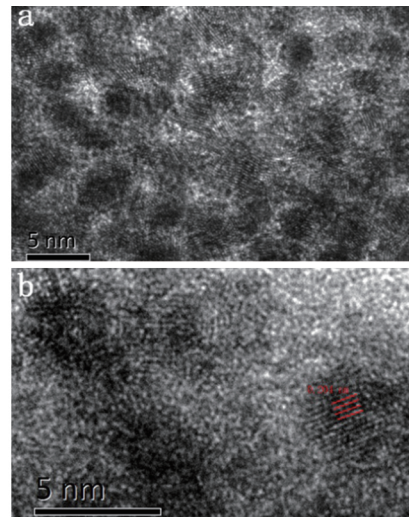


图 6 纳米金属铁的高分辨率透射显微镜图片
Fig. 6 The HRTEM images of nanophase Fe⁰

在工程试验和科学实验中都具有很好的应用前景,可以应用于航天器、航天服的工程测试,也可开展航天员生理健康问题的机理试验,对推动我国载人月球探测进展具有积极意义。

CLDS-i 模拟月尘可应用于航天器和航天服的尘埃防护技术攻关。月尘对航天器和航天服的危害主要是由粘附磨蚀引起,与月尘的粒度粒形、矿物与化学成分、电磁特性等密切相关。月尘颗粒的粘附力主要以静电力和磁力吸附为主,与其颗粒大小形态和电磁性质存在密切关系;而月尘颗粒对航天器和航天服的磨蚀主要与其硬度和具有锋利边缘的颗粒形态相关^[1]。CLDS-i 模拟月尘主要由不导电的硅酸盐物质组成,在模拟月表真空干燥强辐射的环境和各种接触、摩擦等作用下,其颗粒不断积累电荷,与航天器表面产生了静电吸附。带电颗粒与非导体表面接触时,静电力与颗粒介电性质、表面势能、静电场强度以及粒径都存在密切联系^[19]。由于 CLDS-i 模拟月尘颗粒细微,且其形态较为复杂,带电后颗粒的表面势能一般较大,可能表现出较强的静电吸附。而 CLDS-i 模拟月尘中有纳米金属铁的存在,使其具有显著的超顺磁性特征,在很弱的外加磁场作用下也能表现出很强的磁性,对于产生电磁场的电子元器件,磁力吸附是颗粒粘附性的另一个重要作用力。因此,开展 CLDS-i 模拟月尘对航天器和航天服的尘埃防护技术攻关的试验,研究 CLDS-i 模拟月尘的粒度和粒形、矿物组成与化学成分、电

磁特性对航天器和航天服的危害,有助于深入认识月尘的危害机理。

CLDS-i 模拟月尘可应用于航天员生理健康的尘埃危害机理研究。月尘的粒度粒形、成分、微观结构是影响月尘毒理学的重要影响因素,也是探讨航天员生理健康的尘埃危害机理的重要基础^[2]。CLDS-i 模拟月尘的颗粒细小,很容易被人体吸入。而颗粒物的直径越小,进入呼吸道的部位越深,因此大部分颗粒可随人的呼吸沉积于肺部,这些颗粒不但伤害上部通道如鼻咽喉的伤害,而且伤害气管、细支气管、肺部等器官,有可能使人体出现水肿、炎症和纤维症等症状^[20]。CLDS-i 模拟月尘中含有大量 SiO₂ 和 TiO₂ 组分,可能是诱发尘肺病、矽肺病等一系列严重疾病的重要因素^[21]。此外 CLDS-i 模拟月尘存在纳米金属铁,进入血液中可能会还原血红蛋白里的三价铁,使血红蛋白运输氧气的的能力降低,严重状况下会影响人体呼吸系统的正常运转^[12]。另一方面,CLDS-i 模拟月尘颗粒具有相对较大的比表面积和锋利的棱角,很有可能造成这些颗粒在肺部的沉淀,并损害肺泡巨噬细胞等细胞组织,也增加了其迁移到血液循环中的几率。因此,开展 CLDS-i 模拟月尘的毒理学实验,研究其物相组成、化学成分、粒度粒形、纳米金属铁等性质对航天员生理健康的尘埃危害机理研究,有助于深入认识月尘的毒理学机理和影响。

总的来说,CLDS-i 模拟月尘与真实月尘具有很高相似性,其相似的物相组成、化学成分、粒度粒形、纳米金属铁特征使其可以很好地应用于工程技术试验和科学机理实验研究,具有很好的应用价值。

参考文献(References)

- [1] Stubbs T J, Vondrak R R, Farrell W M. Impact of dust on lunar exploration [M]. Workshop on Dust in Planetary Systems: Special Publications, 2007: 239-243.
- [2] Cain J R. Lunar dust: the hazard and astronaut exposure risks [J]. Earth Moon and Planets, 2010, 107(1): 107-125.
- [3] Khan-Mayberry N. The lunar environment: determining the health effects of exposure to moon dust [J]. Acta Astronautica, 2008, 63(7): 1006-1014.
- [4] Taylor L A, Liu Y, Zhang A. Shape and size relationship of several lunar dusts: preliminary results [C]//40th Lunar and Planetary Science Conference, 2009, Abstract #2106.
- [5] Taylor L A, Pieters C M, Keller L P, et al. Lunar mare soils: space weathering and the major effects of surface-correlated nanophase Fe [J]. Journal of Geophysical Research, 2001a, 106(E11): 27,985-999.
- [6] Taylor L A, Pieters C, Keller L, et al. The effects of space weathering on Apollo 17 mare soils: petrographic and chemical characterization [J]. Meteoritics and Planetary Science, 2001b, 36(2): 285-299.
- [7] Wallace W T, Taylor L A, Liu Y, et al. Lunar dust and lunar stimulant activation and monitoring [J]. Meteoritics & Planetary Science, 2009, 44(7): 961-970.
- [8] Taylor L A, Pieters C, Patchen A, et al. Mineralogical characterization of lunar highland soils [C]//Lunar and Planetary Science XXXIV, 2003, Abstract #1774.
- [9] Liu Y, Taylor L A. Characterization of lunar dust and a synopsis of available lunar stimulants [J]. Planetary and Space Science, 2011, 59(14): 1769-1783.
- [10] Hapke B, Cassidy W, Wells E. Effects of vapor-phase deposition processes on the optical, chemical, and magnetic properties of the lunar regolith [J]. The Moon, 1975, 13(1-3): 339-353.
- [11] Keller L P, McKay D S. Discovery of vapor deposits in the lunar regolith [J]. Science, 1993, 261(5126): 1305-1307.
- [12] Liu Y, Taylor L A. Lunar dust: chemistry and physical properties and implications for toxicity [C]//NLSI Lunar Science Conference, 2008, Abstract #2072.
- [13] Park J, Liu Y, Kihm K, et al. Characterization of lunar dust for toxicological studies. I: particle size distribution [J]. Journal of Aerospace engineering, 2008, 21(4): 266-271.
- [14] Liu Y, Park J, Schnare D, et al. Characterization of lunar dust for toxicological studies. II: texture and shape characteristics [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2008, 21(4): 272-279.
- [15] 李蔓,童靖宇,沈志刚,等. 模拟月尘制备及其物理和力学性质研究 [J]. 航天器环境工程, 2012, 29(5): 532-535. Li Man, Tong Jingyu, Shen Zhigang, et al. Preparation and mechanical properties of lunar dust simulant [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2012, 29(5): 532-535. (in Chinese)
- [16] 张森森,王世杰,李雄耀. CLDS-I 模拟月尘的基本特性 [C]//第十届全国月球科学与比较行星学陨石学与天体化学学术研讨会会议论文集. 2012. Zhang Sensen, Wang Shijie, Li Xiongyao. Characterization of CLDS-I lunar dust simulant [C]//The 10th Chinese Conference of lunar Science, Comparative Planetology, Meteorites and Cosmochemistry, 2012. (in Chinese)
- [17] Zheng Y C, Wang S J, Ouyang Z Y, et al. CAS-I lunar soil simulant [J]. Advances in Space Research, 2009, 43(3): 448-454.
- [18] Thompson M S, Zega T J, Keane J T, et al. The oxidation state of Fe nanoparticles in lunar soil: implications for space weathering processes [C]//46th Lunar and Planetary Science Conference, 2015, Abstract #2932.
- [19] 孙浩,沈志刚,张晓静,等. 月尘特性与模拟月尘研制现状 [J]. 载人航天, 2015, 21(6): 642-652. Sun Hao, Shen Zhigang, Zhang Xiaojing, et al., Properties of lunar dust and research status of its simulants [J]. Manned Spaceflight, 2015, 21(6): 642-652. (in Chinese)
- [20] Lam C, Scully R R, Zhang Y, et al. Toxicity of lunar dust assessed in inhalation-exposed rats [J]. Inhal Toxicol, 2013, 25(12): 661-678.
- [21] Cain J R. Respirable crystalline silica—a failure to control exposure [C]//Journal of Physics Conference Series 151, 2009.