

月球表面环境综合模拟系统的设想

石晓波, 李运泽, 黄勇, 王浚

(北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京 100083)

[摘要] 相比于环绕地球飞行的卫星或载人飞船, 探月航天器面临的太空环境更为复杂和严酷。月球表面的环境对登月飞船、月球车的环境适应性及可靠性提出了极为严格的要求。文章就月球表面综合环境模拟系统进行了初步的系统设计。该系统可实现月表尘埃、地形地貌、承载能力及摩擦效应、真空、温度交替变化等环境因素的综合模拟, 可为登月飞船及月球车的设计、优化以及最终的系统验证提供试验平台。

[关键词] 月球表面环境; 月球尘埃; 环境模拟

[中图分类号] V524.3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)11-0048-05

目前, 人造卫星、近地载人航天、月球及火星探测是全球航天技术的热点领域。尤其是月球上蕴含极其丰富的氦-3资源, 而且目前可控热核聚变系统的研究也取得了长足的进展, 有资料宣称可能在2020年前后建立实验电站。这两方面结合起来, 可能会对整个世界范围内的能源格局产生深远的影响。美国、日本、欧洲、俄罗斯、印度等国都在制定并开始实施各自的月球探测计划。在实现第一阶段载人航天任务后, 我国提出了“嫦娥”计划, 拟分三步完成探月: 2007年将探测卫星送入环绕月球的轨道; 2012年前后实施月球软着陆和自动巡视勘察; 2017年前后实施月球自动采样返回^[1]。目前一期绕月卫星已经进入正样星阶段。

过往的实践表明, 航天器故障的70%是由于空间环境的影响造成的, 为了验证设计的合理性, 充分的空间环境模拟试验是必不可少的。我国已初步具备发展载人航天和空间站技术所需空间环境模拟能力, 能够基本满足对飞船和小型空间站进行空间环境模拟试验的需要。月球表面环境的独特性和复杂性给空间环境模拟技术提出新的要求和任务。为了确保二、三期探月工程的顺利实施, 必须尽快

开展相关的研究工作。

1 月球表面环境概述

月球的质量只有地球的1/80, 体积仅为地球的1/50, 表面重力为地球的1/6。由于月球表面几乎没有大气层和大气活动, 白天与夜晚的温差很大, 白昼温度为130~150℃, 夜晚温度为-180~-160℃。随着表面温度的变化, 月表气压在 10^{-9} ~ 10^{-13} Pa范围内变化。在月球两极存在着常年不会受到太阳辐照的陨石撞击坑, 温度为40~50 K, 其中水冰含量为 $(66\sim 200)\times 10^8$ t。欧洲航天局的“斯马特1号”探测器在月球北极附近发现的一处地方是“终年阳光普照, 温度适宜”, 有望成为一个理想的人类宜居处所^[2-4]。

根据太阳系及其各天体演化理论, 月球在早期演化阶段存在比现在浓密得多的原始大气层。而现在的月球大气极为稀薄, 其主要组分为氦、氢、氩和氙。大部分的氦来自太阳风; 绝大多数的氩是以 ^{40}Ar 的形式存在, ^{40}Ar 是月球中的 ^{40}K 的衰变产物。由于没有大气层的保护, 月球表面完全暴露在宇宙射线、太阳质子、太阳风、紫外线的辐照之下, 流

[收稿日期] 2006-03-06; 修回日期 2006-06-18

[基金项目] 中国博士后科学基金资助项目(20060390393)

[作者简介] 石晓波(1977-), 男, 陕西铜川市人, 工学博士, 北京航空航天大学在站博士后

星也可毫无阻拦地轰击月球表面^[2-5]。

按照地形、地貌的区别，可将月球表面分为月海和高地。月海表面的地形相对平坦，表面的反照率比较低。在月海上还具有其他的地形特征，如月坑、山脊（ridge）、月面沟纹（rille）、圆丘（dome）、悬崖（scarp）等。相对而言，月球高地具有较高的反照率，布满了许多崎岖复杂的月坑^[6,7]。

月壤承载强度在离月面最初的几毫米深度里，随深度的变化而剧烈变化。在最初 1 mm 的深度上，承载强度小于 0.1 N/cm²（根据小碎片所滚出的痕迹）；从 1~2 mm 深度上，承载强度增加到 0.2 N/cm²（根据 Alpha 散射仪传感头所留下的痕迹）；2 cm 深度上的承载强度为 1.8 N/cm²，5 cm 深度上所获得的承载强度介于 4.2~5.5 N/cm² 之间（根据 Surveyor 的实测）。月壤的粘度为 0.049 N/cm²^[8]。

与地球土壤的形成过程不同，月球土壤是在氧气、水、风和生命活动都不存在的环境下，由流星的撞击、宇宙射线和太阳风辐照、大幅度温度变化导致的月球岩石热胀冷缩破碎等因素的共同作用下形成的。月球土壤的基本组成颗粒包括：矿物碎屑、原始结晶岩碎屑、角砾岩碎屑、各种玻璃、独特的月球土壤组分——粘合集块岩、陨石碎片等。月球土壤的粒径很小，其中 1 mm 以下的颗粒占总质量的 95% 以上，60 μm 以下的颗粒质量份额约为 50%，10 μm 以下的颗粒约占 10%；比表面积很大，约为 0.5 m²/g^[3,9]。

月球土壤（尘埃）具有极强的表面粘附能力、材料磨损能力和穿透能力，目前一般认为这些现象和如下因素有关：由于风化过程以机械作用为主，所以月壤颗粒形状高度不规则，经常为锋利或带钩的形状，并且彼此之间相互勾连；根据 Hardy 表面润滑理论（surface lubrication theory），高真空环境下，物面没有吸附层，清洁度（surface cleanliness）极高，清洁表面之间摩擦系数很大，并且易于发生黏着、冷焊；来自空间的粒子束，尤其是太阳风之质子和 α 粒子的辐照会使表层月壤颗粒具备较强的表面活性，与其他表面接触后，易于形成稳定的化学键互相连接^[3,9-14]。

月球土壤电导率极低，所以易于带电，并可以在相当长的时间内保持带电。因此，月壤颗粒在光电效应、太阳风辐照作用下带电之后，可以长时间漂浮并移动。此外，飞船降落、人员走动、月球车行走等人为因素也会造成尘埃飞扬^[3,9,11]。

月表独特的环境对航天器的可靠性提出了极为苛刻的要求。关于粒子辐照、太阳辐射、温度交变、高真空、冷黑等空间环境因素的影响在相关的学术专著中已经进行了充分而系统地总结^[15]。根据 Apollo 宇航员的纪录，飞舞的月球尘埃及月表土壤颗粒会很快附着在与其接触的各类表面上，无法清除干净，而且会进一步引起热控系统性能下降、机械机构卡死、密封失效、光学系统灵敏度下降、部件磨损等一系列故障，在设计探月航天器和月球车时必须给予充分的考虑^[9,11]。

2 国外研究现状

为了配合 Apollo 探月计划，美国在上世纪 60 年代设计并建造了空间环境模拟试验室（space environment simulation laboratory, SESL）。该系统位于休斯敦的约翰逊航天中心，由两个实验舱组成，按照设计目标，具备太阳辐射、真空、冷黑环境的综合模拟能力，月球尘埃、地形地貌等环境因素未被考虑。后来为了评估月球车的交通能力，月尘对系统热辐射性能的影响，开展了一些小规模的环境模拟试验^[9]。

随着重返月球口号的提出，上世纪 90 年代，美国新墨西哥大学提出一项宏伟的计划，拟建设一个面积为 1 英亩（4 047 m²）的月表环境模拟系统，地表铺设几英尺厚的月壤模拟材料模拟月表地形地貌，配备太阳模拟器和冷却系统模拟高低温，采用吊丝实现 1/6 重力，室内压力设计值为（10⁻⁴ ~ 10⁻⁵）× 133.3 Pa；此外，他们还计划在其中建设模拟的月球基地、月球工厂、月球实验室、通信设备、月球车、挖掘机等设施^[16]。

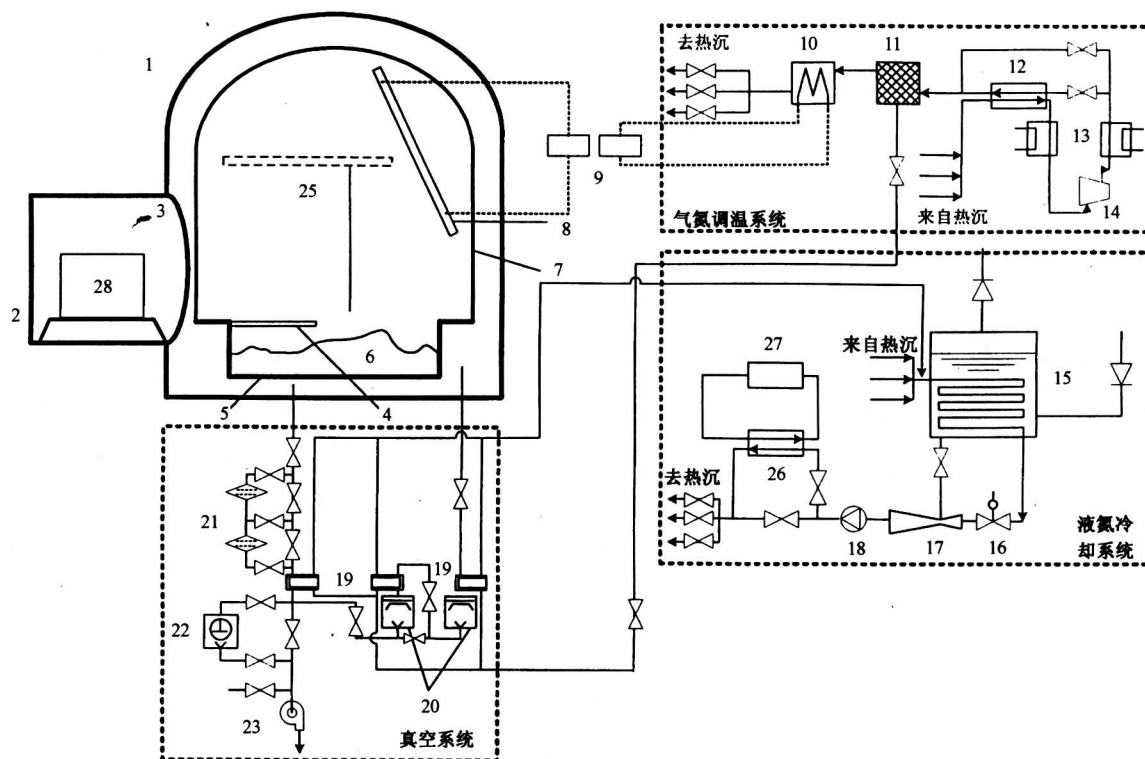
近年来，关于月尘的研究成为热点，1990 年，NASA Lewis 研究中心启动了名为“lunar particle adhesion program”的研究计划^[14]。2004 年 NASA 斥资 14 M 美元资助专项研究，该项目由科罗拉多矿业学院、田纳西大学、纽约州立大学、肯尼迪航天中心、格伦（Glenn）研究中心以及一些企业共同承担，一个月表尘埃环境模拟系统（容积 3 m³，真空度 10⁻⁹ Pa）目前处于设计中^[17]。

3 月表环境综合模拟系统设计方案

月表环境十分复杂，百分之百的准确模拟是不可能的，也是没有必要的。太阳风、太阳质子、宇宙射线、微流星环境的模拟成本太高，目前专用的

试验设施辐照面积也不超过 1 m^2 ^[17], 无法与其他环境因素综合考虑。因此将环境模拟的重点放在真空、冷黑、太阳辐射、月球表面地形、地貌、承载能力、摩擦效应、尘埃环境等方面。其中, 月球尘埃环境模拟需要 10^{-9} Pa 以上的真空度, 在大型试

验舱中实现起来难度高, 投资大, 因此同时设计了大舱和小舱, 其中大舱侧重于月表综合环境模拟, 真空度要求可适当放宽; 小舱专门用于月尘环境的模拟试验。大舱可作为小舱的气闸舱, 二者共用一套真空系统, 如图 1 所示。



1—主容器; 2—大门; 3—气闸舱; 4—月壤模拟物质容器; 5—双层卷闸; 6—月壤模拟物质; 7—热沉; 8—太阳模拟器; 9—调功器; 10—电加热器; 11—液氮喷射器; 12—换热器; 13—水冷却器; 14—风机; 15—液氮储槽; 16—控制阀; 17—文丘利管; 18—液氮泵; 19—液氮冷阱; 20—油扩散泵; 21—除尘器; 22—罗茨泵; 23—机械泵; 25—吊丝配重系统; 26—液氮过热器; 27—氮制冷系统; 28—月尘环境模拟试验舱

图 1 月球表面综合环境模拟系统

Fig.1 Lunar surface environment simulation system

大舱对于月表环境因素的模拟有如下几个方面:

3.1 月表地理特征

采取月壤模拟物质铺设地面, 并采取适当的工艺流程对模拟物质进行处理, 以模拟不同深度月壤土的力学性能 (包括承载能力、抗剪能力、摩擦角等), 从而实现月表地形、地貌、摩擦效应、承载能力、对光的吸收、反射以及自身的红外辐射特性的模拟。月壤模拟物质放在专用容器之中, 容器顶部配备双层卷闸, 上层为密封层, 可用耐高低温的特种橡胶材料制作, 下层为颗粒过滤层。为了防止月壤颗粒损坏风机, 抽真空时先将卷闸关闭, 随着舱内压力下降, 颗粒沉降速度越来越大, 可逐渐

打开密封层, 并进一步打开过滤层。进行复压之前应首先关闭双层卷闸, 防止产生的气溶胶被人员吸入。

3.2 真空

将整个实验系统置于密封容器之内, 并配备抽气系统, 实现真空的模拟。采用油扩散泵串联罗茨泵, 再串联机械泵的真空系统, 该系统可实现超高真空度, 并且可靠性高, 投资相对较低^[18]。每次试验之前, 要对月壤模拟物质进行彻底脱气, 因此应设计月壤模拟物质加热系统。因为加热过程中不允许出现模拟物质的熔化、烧结, 所以必须在相关数据确定后, 才能进行设计 (该部分在图 1 中未画出)。

3.3 高低温

月表最低温度为 100 K 以下，因此热沉温度必须能达到 80~85 K 以下。采用液氮制冷系统和气氮调温系统串联组合实现热沉温度调控，用气氮将液氮进一步冷却至 70 K；在 150~400 K 温度范围内，采用气氮调温系统控制热沉温度。采用太阳辐射模拟器模拟太阳光谱、热流量、高度角，同时作为部分热源。为了加速出气操作而设计的月壤模拟物质加热系统也可作为辅助加热系统，参与温度控制。

3.4 微重力

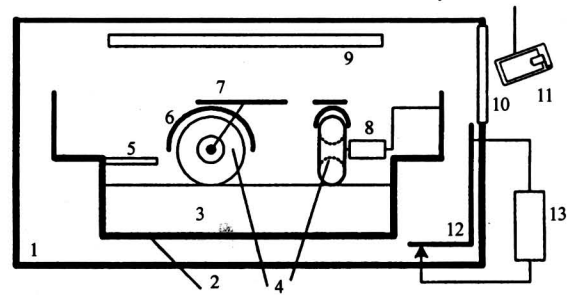
可采用吊丝配重系统实现。

月表独特的土壤/尘埃环境对月球车的设计提出了很高的要求，因此必须开展如下研究：**a.** Apollo14 进行的实验表明，人为因素（包括飞船起降、人员走动、月球车行驶）是造成尘埃飞扬的主要原因，因此必研究不同行走机构（包括轮式、履带式、螺旋驱动式等^[19]）工作时尘埃的摩擦起电行为及运动特性，据此选择合适的行走机构，确定允许的最高速度，并进一步设计动力装置和巡游路线；**b.** 研究尘埃运动的轨迹，得出电磁力影响的统计规律，建立数学模型，然后外推至 $g/6$ 的情况；**c.** 选取不易被尘埃附着、抗磨损的材料；**d.** 改进机械机构设计，减小被尘埃卡死的可能性；**e.** 选用适当的除尘、防尘方法。

以上 5 个方面都需要进行实验研究或者试验验证，这正是设计专用月尘环境模拟试验舱（小舱）的出发点。将小舱放在大舱的气闸舱内，每次对小舱内的月尘试验舱进行彻底的出气操作后，可进行多组试验。大舱和小舱共用一套真空系统，由于小舱对于真空度的要求非常高，所以还需要加上深冷泵（20 K 氮冷板，与制冷系统共用氮制冷系统）。

月尘试验舱的设计如图 2 所示。在目前技术水平之下，小型土壤/尘埃环境模拟设备可采取如下技术思路：**a.** 在试验舱内安装漫游行走机构，该系统可在月壤模拟物质所构成的地面上沿圆周形轨道运动，模拟月球车行驶所产生的效应（暂时假定月球车行走机构为车轮式，为了清晰表达，图中同时画出了车轮及挡泥板的正视图和侧视图）；**b.** 月壤独特的物理、化学性质可通过开发适当的模拟物质来实现，目前中国科学院已经开始了相关的研究工作；**c.** 要求试验舱内真空度至少达到 10^{-9} Pa，以模拟“清洁表面效应”；在适当的位置安装

一定的器械，模拟月球车上的各种表面，以研究月球车行驶过程中表面尘埃覆盖率随时间的变化；**d.** 尘埃会在紫外线作用下发生光电效应，因此需要配备全光谱太阳模拟器；**e.** 颗粒带电后会在月表形成电磁场，电磁场会反过来影响尘埃的运动，因此需要外加电磁场来模拟月表的真实情形；**f.** 需要研究等效模拟手段，模拟尘埃在太阳风作用下的带电行为。



1—主容器；2—月壤模拟物质容器；3—月壤模拟物质；4—车轮；5—双层卷闸；6—挡泥板；7—模拟表面；8—电机；9—太阳模拟器；10—观察窗；11—光学测量系统；12—深冷泵；13—氮制冷系统

图 2 月尘环境模拟试验舱

Fig.2 The test cabin for environment simulation of lunar dust

通过大舱、小舱的配合，该系统可完成如下研究任务：通过小舱内的实验研究，可建立月尘行为的数学模型，评估航天器降落、起飞过程中月尘的影响；月尘环境对月球车损伤机理的初步研究；月球车在月表环境（包括月表反射、辐射及尘埃附着的影响）综合作用下的外热流仿真试验；月球车的综合环境试验；为未来的载人探月工程提供人员训练平台。

4 结论

月球表面独特而复杂的环境对航天器的可靠性提出了极为严格的要求。为了保证我国月球软着陆、自动巡查勘探、月球采样自动返回计划的顺利实施，必须尽快研制月球表面综合环境模拟设备，为探月航天器、月球车的设计、验证提供必要的试验平台。

参考文献

- [1] Sun H X, Dai S W. Mission objectives and payloads for the first lunar exploration of China [J]. Acta Astronautica, 2005, 57: 561~565

- [2] Vaniman D, Reedy R, Heiken G, et al. The lunar environment [A]. Heiken G, Vaniman D, French B M (eds). Lunar source book: A user's guide to the Moon [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991. 27 ~ 60
- [3] Duke M B. The lunar environment [A]. Eckart P (ed). The Lunar Base Handbook: An Introduction to Lunar Base Design, Development and Operations [M]. New York: McGraw-Hill Companies: USA, 1999. 105 ~ 152
- [4] 邹永廖, 欧阳自远, 徐琳, 等. 月球表面环境特征 [J]. 第四纪研究. 2002, 22(6): 533 ~ 539
- [5] 欧阳自远, 邹永廖, 李春来, 等. 月球某些资源开发利用前景 [J]. 地球科学——中国地质大学学报. 2002, 27(9): 498 ~ 503
- [6] 郑永春, 欧阳自远, 王世界, 等. 月壤的物理和机械性质 [J]. 矿物岩石. 2004, 24(12): 14 ~ 19
- [7] 郑永春, 王世杰, 刘春茹, 等. 月球水冰研究进展 [J]. 地质前缘, 2004, 11(2): 573 ~ 578
- [8] Gaier J R. The effects of lunar dust on EVA systems during the Apollo missions [R]. NASA/TM-205-213610
- [9] Perko H A. Effects of surface cleanliness on lunar regolith mechanics [R]. AIAA 96-0015
- [10] Creel R A. The effects of lunar dust on advanced EVA systems: lesions from Apollo [A]. Lunar Regolith Simulant Materials Workshop [M]. Madison: Marshall Space Flight Center, 2005
- [11] Taylor L A, Schmitt H H, Nakagawa M. The lunar dust problem: from liability to assets [R]. AIAA 2005 ~ 2510
- [12] Makey D S. Evolution of the lunar regolith [A]. Lunar Regolith Simulant Materials Workshop [M]. Madison: Marshall Space Flight Center, 2005
- [13] Lee L H. Adhesion and cohesion mechanisms of lunar dust on the moon's surface [J]. Polymer Preprints, Division of Polymer Chemistry, 1993, 34(2): 324 ~ 325
- [14] 黄本诚, 马有礼. 航天器空间环境试验技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002
- [15] Leigh G G. Centre for extraterrestrial engineering and construction [R]. NASA92-33327
- [16] Masami Nakagawa, Agui J H, Angel H, et al. The moon as a beach of fine powders [A]. Lunar Regolith Simulant Materials Workshop [M]. Madison: Marshall Space Flight Center, 2005
- [17] 黄本诚, 陈金明. 空间真空环境与真空技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005
- [18] Schmitt H H. The lunar surface vehicles [A]. Eckart P (ed). The Lunar Base Handbook: An Introduction to Lunar Base Design, Development and Operations [M]. New York: McGraw-Hill Companies, 1999. 271 ~ 606

The Conceptual Design of Lunar Surface Environment Simulation System

Shi Xiaobo, Li Yunze, Huang Yong, Wang Jun

(School of Aeronautics Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

[Abstract] Compared with the satellites and manned spaceships circling the earth, the spacecraft for lunar exploration has to endure more complex and more rigorous environment. Especially, the lunar surface environment may cause very severe problems, thus should be considered carefully in the design of spacecrafts and lunar rovers. A conceptual design of lunar surface environment simulation system was proposed. Most of the environmental factors, including lunar dust, geography, the compressibility and frictional effect of lunar regolith, hard vacuum, temperature variation, can be simulated simultaneously. The system may serve as the test facility of spacecraft and rover design, optimization and verification.

[Key words] lunar surface environment; lunar dust; environment simulation