

月球探测工程中的月球环境问题

叶培建, 肖福根

(中国空间技术研究院, 北京100094)

摘要: 文章介绍了月球环境和国外两个典型月球探测器的环境试验。在月球环境对探测器的影响分析基础上, 根据我国月球探测工程的需求, 提出了有关环境研究的一些考虑。

关键词: 月球环境; 探月工程; 月球探测器; 环境模拟试验

中图分类号: V476.3; V524.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379(2006)01-0001-11

1 前言

1959年1月, 前苏联发射了第一个月球探测器——月球1号, 第一次拍摄了近距离的月球照片, 拉开了人类深空探测的序幕。此后, 前苏联从1959年1月至1976年8月先后共发射了47个无人月球探测器, 成功地进行了硬着陆探测、软着陆探测、巡视探测和自动采样返回。美国在此期间先后共发射过36个无人月球探测器。探测器分别对月球实现了硬着陆和软着陆, 发送回大量的照片和化学分析数据。1969年7月发射的“阿波罗-11”首次实现了载人登月, 此后, 又进行了5次载人登月飞行, 谱写了人类月球探测史上最绚丽的篇章。

美国在1972年完成了最后一次“阿波罗号”飞船登月飞行后, 便停止了登月活动。从此月球探测被冷落下来。直到20世纪90年代, 月球探测再一次热起来。

1994年1月25日, 美国成功发射了“克莱门汀”卫星。1998年1月7日, 美国“勘测者号”系列月球探测器中的最新成员在美国卡纳维拉尔肯尼迪航天中心发射上天。美国提出了“新盛世”计划, 欧洲航天局计划在21世纪初到2020年分4个阶段进行月球探测, 日本和印度也制订了21世纪初的探月计划。

21世纪, 人类已迎来第二个月球探测热潮。

目前, 我国月球探测工程已经启动, 正在实

施“绕”、“落”、“回”三步走的战略目标。绕月卫星“嫦娥一号”将于2007年奔赴月宫, 各大系统的研制正有序进行; 同时二、三期工程论证和关键技术的预先研究也在有条不紊的进行之中^[1]。

月球探测器在绕月飞行和月面探测过程中, 将遭遇到近月空间和月面的各种特殊环境, 而这些环境因素将对月球探测器的性能、可靠性和工作寿命产生影响。月球环境是研制月球探测器、软着陆器和月球车必须予以关注和重视的重大制约因素。

2 月球环境

月球环境主要包括月球重力场、磁场、辐射、大气、流星体、月面温度、月球尘及月壤、月面地形地貌等环境。这些环境, 又可分为近月空间环境和月表环境。近月空间环境包括辐射、大气和流星体等环境; 除了近月空间环境因素之外, 其余的环境因素为月表环境。

2.1 近月空间环境

2.1.1 辐射环境

月球辐射环境主要有3个带电粒子源: 太阳风、太阳宇宙射线和太阳系之外的高能银河宇宙射线^[2]。

(1) 太阳风

太阳风等离子体主要由氢和氦的核子组成,

收稿日期: 2006-01-16; 修回日期: 2006-01-19

作者简介: 叶培建(1945-), 1985年获瑞士NECHATAL大学科学博士学位, 中国科学院院士, 博士生导师。研究方向为飞行器总体、图像处理、模式识别。现为中国空间技术研究院“嫦娥一号”卫星总设计师兼总指挥。联系电话: (010) 68197053。肖福根(1965-), 1991年获飞行器设计专业硕士学位, 高级工程师。研究方向为空间环境、航天器总体专业技术的情报研究。联系电话: (010) 68746785。

是月球大气的主要来源。太阳风粒子到达月面速度约为400 km/s。

(2) 太阳宇宙射线

太阳宇宙射线主要由氢、氦的核子组成,也包括少量的重核子。太阳宇宙射线发生在太阳耀斑强烈爆发期间,太阳宇宙射线的强度随耀斑活动(太阳耀斑活动周期为11年)变化而变化。

(3) 银河宇宙射线

银河宇宙射线带电粒子主要由能量极高的原子核粒子组成,来自太阳系之外,但是粒子的通量远小于太阳宇宙射线。

表1列出了3种辐射类型的能量、通量和穿透深度的数据。

表1 月球环境中3种辐射类型的特性
Table 1 Some properties of three kinds of the lunar radiation

辐射种类	太阳风	太阳宇宙射线	银河宇宙射线
核子能量	0.3~3 keV/u	1~100 MeV/u	0.1~10 GeV/u
电子能量	1~100 eV	0.1~1 MeV	0.1~10 GeV/u
通量数 (质子/cm ² ·s)	~3×10E8	0~10E6	2~4
穿透深度(cm)	10 ⁻⁶	1~10 ⁻³	1~10 ³

注: eV/u为每个核子的电子伏特数

2.1.2 大气环境

由于在近月空间和月表环境中的大气密度只有地球上的1/10¹²,所以月球大气环境也称为真空环境。月球环境的真空度比地球轨道的真空度还高(约高2个数量级)。

2.1.3 流星体环境

月球表面受到流星体和微流星体的轰击,撞击速度范围2.4~72 km/s。直径小于1 mm的流星体为微流星体。

美国用月球地震测量网络完成了质量大于100 g粒子通量的直接测量,对所测量的结果进行数理统计分析,得到的通量(present-day flux)可用下列式子表示:

$$\lg N = -1.62 - 1.16 \lg m,$$

式中: N 为撞击次数, $1/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$; m 为质量(大于100 g)。

也有人对面平均每年累计流星体进行了统计,得出了相应的统计模型:

$$\lg N = -14.597 - 1.2131 \lg m \quad (10^{-6} < m < 10^6),$$

$$\lg N = -14.566 - 1.5841 \lg m - 0.063 (\lg m)^2 \quad (10^{-12} < m < 10^{-6}),$$

式中, m 为质量, g; N 为撞击月面次数, $1/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

2.2 月表环境

2.2.1 月球重力场环境

月球重力加速度为地球重力加速度的1/6,即 $(1/6)g$ 。

2.2.2 月球磁场环境

整个月球没有一个完整的偶极磁场(地球有南北两个磁极),但是,经探测,月球表面存在很弱的磁场,出现最大磁场的区域为古老高地区域(指最早形成的)。表面磁场强度的范围为 $(6 \sim 313) \times 10^{-9} \text{T}$ 。

2.2.3 月面温度

月面温度环境也称之为月球热环境,包括太阳直接辐照、月球反照、月面红外辐射等因素。在月球白天期间太阳辐照度高达 1358 W/m^2 。在月球轨道上,从黎明到黄昏太阳辐照度的变化约为1%;而在月球午夜,太阳辐照降至0。到达月球上的太阳辐照能,只有不到10%又反射进入空间。月球的黑夜极限温度可达 -180°C ,月面在受到太阳直接照射时的极限温度可达 150°C [2,3]。

2.2.4 月壤和月球尘

(1) 月壤

在月面上有一层直径小于1 mm的精细、具有粘性的粒子层(其中散布了很少的岩石块),称其为风化层,这层风化层就是月壤[2]。

月壤粒子大小分布如图1所示。

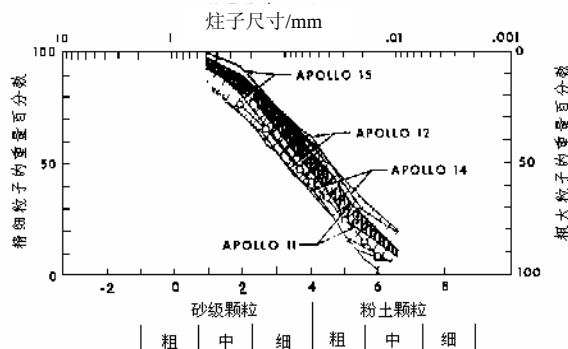


图1 阿波罗任务所采回的土壤样品的亚毫米粒子分布
Fig.1 Sub-millimeter grains distribution of the lunar soil sampled by Apollo missions

月壤粒子的机械性能与地球可比粒子的土壤相似。表2列出了月壤的一些机械性能。

表2 月壤的机械性能

Table 2 Some mechanical properties of lunar soil

月球土壤参数	数 据	备 注
密 度	接近1 g/cm ³	表 面
	1.5~2.0 g/cm ³	表面下10~20 cm深度下
内部摩擦角	30°~50°	多孔性越低,则摩擦角越大
多 孔 性	4.3%±2.8%	所有APOLLO着陆场的上面15 cm土壤
粘 度	0.03~0.3 N/cm ²	粘度的增加是由于密度增加(0.99~1.87 g/cm ³)所导致
承载强度	0.02~0.04 N/cm ²	密度为1.15 g/cm ³
	30~100 N/cm ²	密度为1.9 g/cm ³

(2) 月球尘

月球尘可以认为是运动的月壤,携带着静电荷,具有很强的粘接性。当月球的明暗界限(月球白天和黑夜的交替界限)交替时,由于太阳紫外辐照对月球尘的充电影响,使月球尘周期性地升起,离开月面仅半米高。在着陆器的推进器点火和月球车行走时,也会扬起大量的月球尘。由于月球表面为真空环境,悬浮粒子会很快回落到月面上^[2]。

2.2.5 月面地形地貌

月面地形比较复杂。月面地貌从整体来看,有月坑、高地、月海、悬崖和沟壑等;从局部来看,有松软的月壤、斜坡、小坑和团块物体(如石头)等。

月表的高山、悬崖,以及撞击坑内侧的陡坡,一般大于30°;撞击坑的外侧,坡度比较缓,一般小于25°;月表的高地地区,地形起伏,平均坡度小于30°;月海地区,地势平坦,最大坡度可达17°^[3]。

月球表面裸露着大量的岩石碎块,这些岩石碎块的直径一般小于25 cm。

3 国外月球探测器的环境试验

3.1 “阿波罗号”航天器(Apollo)试验计划

3.1.1 大型空间环境模拟试验设备

“阿波罗号”工程系统级(或舱段)的研制试验(包括鉴定和验收试验)基本都是在休斯敦载人航天中心(MSC)建造的两台大型空间环境

模拟器(即模拟器A和模拟器B)上完成。

模拟器A的内腔尺寸为:直径16.764 m、高度27.432 m,极限真空为 1.33×10^{-4} Pa,热沉温度达到-173.3℃,太阳模拟器(有两个碳弧灯阵:一个在模拟室的侧壁上,另一个在模拟室的顶部),月球模拟器(可承担试件的最大质量6 8040 kg,最大旋转角度为180°)。

模拟器B:直径为7.62 m、高度7.925 m,主要用于载人航天器环境试验及航天员的环境适应性试验。除了航天员环境适应性试验要求之外,其它试验条件与模拟器A的条件相似。

3.1.2 环境试验条件

尽管设计环境已经知道,但制订航天器鉴定试验条件是一个漫长和迭代的过程,需要考虑很多因素,如硬件的结构形式、在航天器上的位置、所暴露在某一特定环境中的预计持续时间和该硬件在进行环境试验之前、之中及之后是否工作等因素,进行逐项审查以确定需要试验的项目(包括环境试验项目、环境水平和持续时间等)。在考虑环境试验水平时应该有一个恰当的余量(即比飞行期间所预计的最恶劣环境还严重)^[2]。

Apollo航天器系统级的环境试验水平:

- 振动试验: 0.015~0.04 g²/Hz;
- 噪声试验: 67~165 dB;
- 加速度试验: ≤ 20 g;
- 冲击试验: ≤ 178 g;
- 热真空试验: 温度为-184~132℃,真空度

为优于 1.33×10^{-3} Pa。

3.1.3 环境试验

“阿波罗号”航天器做了大量环境试验,主要有:热环境试验、噪声冲击试验、飞船结构强度试验和电磁兼容试验。在材料评价试验方面主要有紫外/粒子综合辐照环境试验、真空环境下材料性能试验、加速寿命试验等。

“阿波罗号”舱外活动单元的热真空鉴定试验:月面停留期间最大太阳升角的热效应为热工况,被地球遮挡而处于深度阴影时为冷工况;进行了54 h的太阳模拟器热浸工况后,接着是15 h的冷浸工况,最后进行了15 h的太阳模拟器热浸工况。

除了上述基本试验之外,还开展了大量的航天员操作适应性试验、(1/6) g 重力环境下热真空试验、以及月球尘粘附在探测器表面对其表面热特性影响的评价试验。

3.2 “克莱门汀”(CLEMENTINE)任务试验计划

“克莱门汀”是一个绕月飞行卫星,发射进入月球轨道后对月球进行2个月的拍照。

“克莱门汀”卫星采用了钹块储热技术和热管技术。在热设计中,关键问题是传感器工作台,汇集了多个传感器载荷,具有很宽的瞬变热流环境(包括传感器的热耗散、太阳直接辐照、月球红外辐射等),而工作温度范围要求很窄。

3.2.1 航天器热试验

(1) 试验方法

采用了用于鉴定试验的航天器工程模型(EM)和传感器模型。工程模型为飞行航天器的全比例模型,用于航天器热设计的验证。

(2) 热真空试验

试验时间18 d,完成了5个试验工况,具体如下:转移轨道的冷工况试验;通往Geographos小行星轨道的热工况试验;月球轨道热极限条件下瞬变热流试验;2 h月食的瞬变热流加热试验;月球轨道的传感器工作台热平衡试验。

(3) 其它试验

传感器本身的热设计验证试验,在温度极限工况下传感器的机械光学系统的校准试验,1 g 重力条件下4种热管性能的验证试验(不同工况和热载荷条件下)。

3.2.2 航天器系统级力学试验

(1) 航天器发射环境

运载火箭为一次性“大力神 IIG”型火箭;发射环境载荷:轴向载荷11.0 Gpk,侧向载荷3.5 Gpk,以及振动噪声载荷;利用恒星37FM固体火箭发动机(Star 37FM SRM)将航天器送入超月球轨道。此时,轴向加速载荷为12.5 Gpk。

(2) 试验方法

“克莱门汀”卫星为C级卫星,采用鉴定/原型飞行综合试验方法,即采用工程模型(EM)和飞行航天器(FM)的试验方法,工程模型进行鉴

定级试验,飞行航天器进行原型飞行验收级试验。只安装了飞行设备的部件进行原型飞行验收试验;而既安装了工作样机装置又有飞行设备的部件,样机装置做鉴定试验,飞行设备做原型飞行验收试验。

(3) 试验水平

- 试验载荷以一次性“大力神 IIG”型火箭和“恒星37FM”固体火箭发动机为主。

- 鉴定试验水平定义为最大飞行载荷水平+6 dB,持续时间2 min;原型飞行试验水平定义为最大飞行载荷水平+3 dB,持续时间1 min。

- 静态有效载荷试验水平为飞行载荷的1.05倍,结构试验水平最小为飞行载荷的1.10倍。

(4) 力学试验

- 工程模型模态分析试验;
- 工程模型的轴向振动噪声试验:频带宽度为20~100 Hz;

- 飞行航天器结构的轴向振动噪声试验;
- 部件随机振动试验:功率频谱密度响应应该涵盖部件所有的频谱;

- 静态载荷试验:在轴向上载荷为12.0 Gpk,频率为18 Hz;在侧向上载荷为3.5 Gpk,频率为10 Hz;

- 工程模型爆炸分离冲击试验;
- 飞行航天器爆炸分离冲击试验;
- 微小颤动试验:主要评估航天器上自身的振动源对航天器上传感器测量的影响。

4 我国月球探测器的环境问题考虑

一段时间以来,我国从事深空探测的工程技术人员与空间科学方面的专家或独立、或联合工作,对当前在探测工程中考虑到的一些问题进行了调研,开展了一些研究。

4.1 月球环境的影响效应

4.1.1 辐射环境

(1) 太阳风

太阳风粒子以约400 km/s的速度对月球表面进行溅射轰击,使月面逐渐变得光滑。虽然高速溅射会使物体被侵蚀掉,但是溅射过程对月球表面的设备带来的危害非常小,如一块直径只有

10^{-6}m 大小的岩石侵蚀寿命预计为 10^5a ^[2]。

(2) 太阳宇宙射线

因为没有屏蔽大气,太阳宇宙射线中高能粒子毫无阻力地直接到达月球表面,并穿透月球表面材料达1 cm的深度。

(3) 银河宇宙射线

银河宇宙射线带电粒子对月球表面的穿透深度超过1 m。

月球车在月面执行探测任务期间,会遭遇到这种严厉的粒子辐照环境。撞击到月球车上最多的粒子是太阳风,但由于其能量比较低,与银河宇宙射线和太阳耀斑粒子相比,引起的关注较少。太阳耀斑每年发生多次,喷射出大量的高能粒子(1~100 MeV),耀斑事件能持续数小时甚至几天,这些高能粒子撞击到月球车上聚集很高的电势,可对电子器件构成伤害,甚至对月球车表面和结构也构成伤害。这些高能质子使光学材料电离,从而引起这些材料的表面产生缺陷。因此,在选择结构材料和组件的布置时,必须考虑到这些辐射的影响。

银河宇宙射线发生撞击的概率虽然不高(约4 质子/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$),但其能量很高,对电子器件可能造成损伤,如单粒子翻转^[3]。

除了离子辐照之外,还有软X射线和紫外线。软X射线和紫外线也会影响表面涂层和光学器件。太阳紫外和软X射线的光子使光学材料退化(即暗化效应)^[2]。

4.1.2 大气环境

由于月球超高真空环境,使探测器材料产生放气作用,也会引起环境和探测器表面的温度剧烈变化。

挥发性材料不适合在月球环境中使用,如塑料、橡胶等。有机聚合物、有机金属聚合物和有机硅烷聚合物(和共聚物)由于反应完全,具有很低的蒸汽压。虽然这些材料具有很低的蒸汽压,但仍要求这些材料由于太阳辐照所升高的温度维持在这些材料的“玻璃”相过渡区上,以保证它们的光学和机械特性的稳定性,才可以用于月球探测任务。有些聚合物虽然在LEO环境下进行了试验鉴定,但是这些材料是否适用于月球的超高

真空环境,仍需要开展试验评价研究。另外,月球车为运动部件,有许多运动机构、运动副,而这些运动机构材料机械特性需要有很好的真空低温稳定性,运动副需要良好润滑。润滑材料在极限环境条件下不会因为温度高而挥发,也不会因为温度低而凝固,致使润滑油失效^[2]。

因此,制造月球车的材料必须能防止在超高真空环境下在放气,在超高真空和极限温度循环下保持材料特性的稳定性。

4.1.3 流星体环境

流量体在每个平方厘米上的撞击概率是:在一百万年里,撞击坑的直径在500 μm 以上的次数为1.1~50。质量为1 g的陨石可以形成cm级的或稍小一点深度的撞击坑,这样的陨石在月球上击中航天员的机会非常之小,每年约 10^{-6} ~ 10^{-8} 次。质量为 10^{-6}g 的陨石可以在月球上形成直径为500 m的撞击坑,其撞击坑深度都相当或小于其直径;然而,脆性材料的破碎作用可以撞击得更深一些^[2~3]。

流星体环境对航天器或航天员将构成撞击损伤,但撞击损伤概率很小,发生灾难性的撞击更小。对于短期月球探测任务,流星体可在设计中不作为重点考虑,但在未来长期任务中需要加以考虑和研究。

4.1.4 月球重力场环境

月球重力场环境是一个重点考虑的环境参数。所有物体(包括人)从地球运送到月球上,则其重量将降低至1/6的地球重量,对人的操作和运动机械的动力性能造成影响。如人进行某项操作,其手臂的力量输出不会受重力环境影响,假设人手臂输出的力量一定,当人的体重降低至1/6,则人会感觉到有力却使不上,会有“脚跟浅”的感觉。因为人对某个物体进行操作,这个力量是通过人的脚与地面的作用力来实现,人的体重降低了5/6,则脚与地面的接触力同样降低了5/6。

动力机械在地球上作业与在月面上作业所需的动力是不一样的。如果动力机械按地球上作业所需的动力设计,而动力机械又不具备自适应性(即适应月球重力场要求),则肯定会产生“过冲”问题,严重时导致设备故障或破坏。如果仅仅考核月球车运动性能(或整个运动机构的传动

性能),甚至可以选择在地球沙漠上行走。但如果要评价传动设备的动力性能,则需要进行地球重力场和模拟月球重力场中的评价试验,开展对比研究,修正设计(包括自适应设计)。

4.1.5 月球磁场环境

月球磁场环境可不作重点考虑,却是月球探测任务中的一个探测环境对象。

4.1.6 月面温度

照射到月球车的太阳辐照能和被反射进入空间的能量,与月球车的方位密切相关。月球车受到这些辐射的加热,极限温度可达 150°C 。没有受到阳光照射的部位,温度为 $-130\sim-160^{\circ}\text{C}$ 。月球车内探测仪器的温度一般为 $-40\sim+40^{\circ}\text{C}$,为保证探测仪器的正常工作,月球车必须采用温控装置,使用可移调的太阳遮掩物、热隔离系统、覆盖层等被动温控装置;或采用自动调温器、热发生器等主动温控装置,以保证月球车及其探测仪器正常工作^[3]。

在月球的黑夜,太阳电池已不能工作。携带的蓄电池难以维持能源的需要,月球车上绝大部分仪器设备停止工作,处于休眠状态。为此,必须采取特殊的措施。国外采用过 ^{238}Pu 、 ^{210}Po 等原子能电池提供能源使月球车过夜^[3]。

月球热环境对在月面行走的探测器的影响极大。为了适应月面热环境,探测器除了特殊的热设计之外,还需要对这些热设计的性能和可靠性进行地面严格的环境试验验证。

4.1.7 月壤和月球尘

月壤的物理力学特性对月球车运动影响很大。在进行月球车轮设计时,需要充分考虑月壤的承载能力。月球车的牵引力是通过车轮的接触力来实现的。前面已分析,由于月球重力场的影响,车轮的接触力也受影响。月壤的结合力,尤其在月面斜坡上月壤的结合力,对接触力的影响很大。考虑到月壤对接触力的影响以及月球车本身行走的稳定性、自主能力和越障能力的需要,要求月球车行走速度比较缓慢。

另外,月壤的热特性对月球探测器的温度影响也很大。

月球尘对轴承、齿轮和其它机械机构具有很强的腐蚀能力。月球尘携带了静电荷,很容易粘接到没有接地的导电表面上。月球尘粘接到航天员的衣服上很难清除,用毛掸子也不能很好除去(Apollo 12任务中遇到这些问题)。月球尘聚积在光学镜子和辐冷器上,对它们也会造成严重的影响。同样少量的月球尘聚积在折射镜子的表面上,也会严重地增加光的散射。在辐冷器表面上累积较厚的一层月球尘会使其性能退化,从而影响月球探测任务的工作寿命。仪器表面被覆尘埃会影响仪器的性能^[2, 3]。

月球尘环境是月面行走探测任务不可避免的环境,其对航天器的影响也是显而易见的。在航天器总体设计时应充分考虑对月球尘的防护措施,如降低月球车行走的速度和设计仪器外层防尘罩等。

4.1.8 月面地形地貌

了解月面的地形地貌,对保证月球车在月面上的顺利行走和完成探测任务至关重要。它有助于选择着陆场和规划月球探测行走路线。了解月面某个局部的地形特征(如斜坡及其角度)和障碍物的分布,有助于在地球上建立月面形貌模拟实验室,以评价月球车的爬坡能力、自适应能力和障碍物的自主规避能力。

根据Apollo 11着陆场的数据,美国在地球上建立了月坑和石头分布的模拟场地,如大于半米的月坑和大于 $1/4\text{ m}$ 的石头^[2]。

美国和前苏联实现了月面行走和采样返回。有经验表明,为了使月球车能够适应月球表面大部分地区行走并能够进行科学探测,月球车的爬坡能力应考虑为 $25\sim 30^{\circ}$ 为宜;月球车还应具有翻越 25 cm 高度障碍物的能力;对于大于 25 cm 的岩石裸露,月球车应具有自主规避的导航能力^[3]。

4.2 月球探测器的环境试验研究

经过上述诸环境影响效应的分析,从影响探测器的材料、结构、机构、仪器设备和部件的性能与可靠性的角度来看,我国在月球探测器环境问题中应重点做好月面的热、真空、真空/高低温协和、粒子辐射、地形地貌(含月壤)、重力场和月球尘等环境的研究;同时做好发射动力上升段、

空间重大变轨转移中的动力学环境研究, 以及月面行走时自身振动源对测量影响的评价试验研究。

4.2.1 月球探测器热环境试验

4.2.1.1 “嫦娥一号”的热环境试验

需考虑的约束条件为:

- 在近月轨道空间太阳辐照为 $1\ 358\ \text{W/m}^2$ (与地球轨道基本一样, 变化不到1%);
- 由月面反照不到10% (即 $1\ 358 \times 10\% = 135.8\ \text{W/m}^2$, 与地球反照强度接近);
- 月球本身的热辐射比地球大, 在晌午时, 月面温度高达 $150\ ^\circ\text{C}$, 而地球表面温度最高 $40 \sim 50\ ^\circ\text{C}$;
- 卫星要经历长达4h以上月食阶段。

由于月球红外热流波动很大, 整星没有相对稳定的散热面, 使得散热面布局困难; 由于卫星上设备较多, 如氢镍蓄电池组、激光高度计、CCD相机、定向天线等, 对热控要求高, 设计余量小; 因此, 卫星热设计难度大。基于这样一些因素, 对卫星及其设备的热设计需进行充分的试验验证和预示分析。

在进行热环境试验时, 要尽可能地考虑月球本身的热辐射影响, 其试验方法一方面参照地球轨道卫星的热试验方法 (也可参照美国“克莱门汀”卫星的热试验方法), 另一方面对试验也进行了必要的修正 (这种修正包括两方面: 一是卫星本身的热设计修正, 二是试验水平的修正)。“嫦娥一号”已完成初样阶段的热环境试验, 包括整星级、电源舱和载荷舱等。利用已建立的月球环境外热流模型, 进行了预示验证和比对分析。

试验与分析结果表明, 现有设备的能力基本上满足试验要求, “嫦娥一号”的热设计是合理的, 卫星可以经受工作期间各工况的热、真空环境。

4.2.1.2 二、三期探测任务的热环境试验的设想

月球探测器在月面就位探测, 月面巡视器要在月面上行走, 面临月面极大的温差环境 (最高达 $150\ ^\circ\text{C}$, 最低达 $-180\ ^\circ\text{C}$)。在月面, $150\ ^\circ\text{C}$ 的热环境对探测器的影响极大。航天器在热设计时必须充分考虑这个因素, 而在热环境试验时同样需要考虑这个因素。需要开展一些模拟方法和试验

方法的研究。

(1) 月球热流模拟方法的研究

- 开展月面热特性的研究 (热惯性、吸收率、发射率、反射率及方向效应等);
- 月面反照热流和辐射热流的模拟方法研究;
- 月面热流数值模型的研究。

此外, 低温状态的试验也要全面考虑, 以保证低温工况能达到所需的低温状态和保持时间。

(2) 太阳模拟器与月球热流模拟器的联合试验方法的研究

- 开展太阳模拟器和月面热流模拟器协同作用影响研究;
- 针对月球探测二、三期探测器试验任务的需要, 在KM6设备上开展太阳模拟器和月面热流模拟器联合试验的可行性研究;
- 联合试验方法研究。

(3) 月球车的热真空试验

月球车为运动部件, 有许多运动机构和运动副。运动机构对尺寸的稳定性要求很高。由于材料在高低温环境下的热胀冷缩作用, 可能会破坏月球车运动机构的尺寸精度要求, 严重时会造成运动机构失灵。

- 在热真空环境下月球车的行走试验: 验证运动副材料的匹配性, 验证热胀冷缩对运动机构传动及其稳定性的影响, 以及对整个车体的影响。

(4) $(1/6)g$ 重力条件和真空条件下着陆器/月球车的着陆撞击缓冲试验: 一是评价缓冲器对冲击的缓冲性能及可靠性, 二是观测着陆时冲击对着陆器/月球车的影响。尤其是第三期采样返回, 探测器携带了大量的燃料, 需要评价冲击对这些储箱的影响 (如泄漏问题)。与地球回收时的冲击情形不同, 此时航天器没有任何危险燃料气体。

(5) 在热真空条件下着陆器/月球车的展开试验: 评价分离时对月球车的冲击影响以及对燃料储箱的影响 (这个试验也可以与热真空环境下月球车的行走试验一起做)。

4.2.1.3 未来可能的载人登月任务的热环境试验需要

- (1) 航天员在热真空下的操作适应性试验;
- (2) 航天员身穿航天服的适应性评价试验;
- (3) 航天员在热真空环境下对各种设备的展开和操作试验;
- (4) 制订航天员在月球环境下的操作规范。

4.2.1.4 适应二、三期探测任务的热环境试验条件的研究

根据初样阶段的试验要求及内容,目前的试验能力基本满足“嫦娥一号”卫星的研制要求。但在“嫦娥一号”卫星研制试验中,也遇到一些问题,如由于“嫦娥一号”卫星飞行任务的特殊性,需经历较长时间的月食,在月食条件下,设备的温度较低,尤其是星表设备和太阳翼等部件,温度预示将降低到 -190°C ,目前的试验设备不能满足此温度条件下的热真空试验。针对二、三期探测任务的需要,拟开展下列热环境试验条件的研究工作:

- (1) 部组件试验设备的低温系统技术改造;
- (2) 月球热流模拟器的研制;
- (3) 太阳模拟器和月球热流模拟器联合试验设备的可行性研究;
- (4) 真空条件下的 $(1/6)g$ 重力模拟器研制;
- (5) 热真空条件下月球车行走试验装置的研制。

4.2.2 探测器动力学环境试验设想

4.2.2.1 “嫦娥一号”动力学环境试验

“嫦娥一号”卫星采用了某结构平台,但在结构上做了一些局部改动,如新增加了对月和背月4块隔板、在太阳翼基板上增加了较多的附加质量(电池片、电缆等),这些改动后的其承载能力,还需要进行试验验证。另外,还采用了定向天线,而定向天线作为攻关件,其结构设计是否合理也需要试验验证。在“嫦娥一号”卫星初样阶段,安排了下列试验:

- (1) 验证承力筒与隔板连接处局部强度的静力试验;
- (2) 太阳电池基板静载试验;
- (3) 太阳翼部件级噪声、正弦振动试验;
- (4) 定向天线力学摸底试验。

经过这些试验,“嫦娥一号”卫星平台结构的改动得到了相应验证。

4.2.2.2 二、三期探测任务的动力学环境试验的设想

二、三期月球探测器的平台结构将会是一个全新的结构。实现月球着陆和采样返回需要消耗大量的推进剂,对深空探测任务而言,推进剂已成为最重要的有效载荷之一。如何提高推进剂携带量,可以有多种考虑,如采用轻质材料、轻质有效载荷技术和平台结构优化等。平台结构可能采用桁架式结构。

需要开展的试验研究工作:

- (1) 桁架式平台结构的试验方法研究;
- (2) 二、三期月球探测器动力学环境剖面及环境试验水平的研究;
- (3) 月球车自身振动源对测量影响的试验评价研究;
- (4) 开展减振降噪措施的评价试验研究。

4.2.2.3 适应二、三期探测任务的动力学环境试验条件研究

月球探测器在向月球发射过程中,所遭遇的最大动力学环境仍然是地面发射动力上升段;而现有的大型动力学试验设备的能力如混响室($2\ 163\text{ m}^3$)、振动台(400 kN)基本能满足月球探测工程任务发展的需要。

探测器自身振动问题是一个弱振动环境问题,但对探测器的影响也是不容忽视,这可能是二、三期探测任务中需要加强的工作。这种弱振动环境多为低频低能的振动。应考虑扩展部组件振动设备在低频低能的能力,满足探测器自身振动问题的评价研究要求。

4.2.3 真空/高低温循环条件下的各种评价试验

非金属柔性材料在地球轨道上长期运行,即微重力环境下,也不会出现材料强度方面的问题。然而月球环境除了是低重力环境以外,同时也是超高真空和高低温变化的环境,如果月球车长期在月面行走,则一些非金属柔性材料可能会导致

强度方面的问题。

一些重要的非金属材料必须在模拟月球真空和高低温循环条件下进行试验评价,以保证月球车所用材料性能的稳定性。

月球车上有许多运动机构,而这些运动机构的材料不仅有强度方面的问题,而且对尺寸的稳定性要求更高。另外,运动机构中的运动副在超高真空/高低温循环环境下,容易发生摩擦冷焊现象,从而导致运动机构被卡死。

这是一项重要的工作,也是当务之急的工作。

4.2.3.1 主要研究工作

- (1) 运动机构材料的评价试验;
- (2) 各种运动副材料及运动副结构的评价试验;
- (3) 润滑材料的评价试验;
- (4) 结构承力材料及结构的评价试验;
- (5) 绝热材料的评价试验;
- (6) 功能材料的评价试验。

4.2.3.2 适应二、三期探测任务的真空/高低温循环评价试验条件分析

目前,用于摩擦冷焊研究的真空/温度循环设备,其真空条件可达到 10^{-7} Pa量级,但与月面真空度相比至少差两个数量级。而现有设备的循环温度条件也不能满足月面温度的变化要求。

为了更真实地模拟月面环境条件进行材料及运动机构的试验评价,有必要建立相关的试验评价设备。

4.2.4 粒子辐射综合环境评价试验

这也是一项基础性的研究工作,对于提高探测器的可靠性和工作寿命具有重要意义。

4.2.4.1 主要研究工作

- (1) 功能材料(如表面涂层、光学材料)的退化机理研究;
- (2) 探测器表面的充放电机理研究;
- (3) 防护材料及措施的评价试验;
- (4) 其它功能材料及器件的抗辐射评价试验。

4.2.4.2 适应二、三期探测任务的粒子辐射综合环境评价试验条件分析

在“嫦娥一号”卫星整个任务阶段(地月转移轨道、环月轨道)对空间辐射环境进行了预示,也进行了分析复核。预示的结果表明:

- 卫星充放电效应在环月轨道运行期间,相对于地球同步轨道卫星较温和;但是在转移轨道上,卫星会穿越地球辐射带,此种情况需要考虑卫星充放电效应及其防护措施;
- 在卫星寿命期,相同屏蔽条件下,材料和元器件吸收的总剂量低于我国地球同步轨道卫星和资源卫星的材料和元器件吸收剂量;
- 受位移损伤效应影响较大的太阳电池和光电器件与我国地球同步轨道卫星和资源卫星所受的粒子辐射量比较,在相同屏蔽条件下,位移损伤较小;
- 由于月球无磁场屏蔽作用,银河宇宙射线、太阳耀斑爆发产生的太阳宇宙射线,会直接作用到环月飞行的卫星上,这种情况比地球卫星环境恶劣。银河宇宙射线和太阳宇宙射线可能会引发单粒子事件,所以在卫星设计上需要重点对单粒子效应进行防护。

我国已拥有空间低能综合环境模拟试验设备和空间中能综合环境模拟试验设备,这些设备既可以用于地球轨道卫星的评价试验,也可以用于月球探测器的评价试验。这些设备基本能满足充放电效应、总剂量及受位移损伤效应的评价研究。但是,不能满足由银河宇宙射线和太阳宇宙射线所引发的单粒子效应防护评价研究。

我国目前没有空间高能综合环境模拟试验设备。针对由银河宇宙射线和太阳宇宙射线所引发的单粒子效应防护评价研究,需要研制或引进空间高能综合环境模拟试验设备。

4.2.5 月球车月面行走能力及自适应性的评价试验

在设计或评价月球车时,月球车在月面的交通能力是一个非常重要的问题,需要充分考虑月壤与月球车的相互作用。在月球重力场环境中,

月壤结合力的影响很大。尤其在月面斜坡上,月壤结合力对月球车的性能影响较大。在角度较大的斜坡上,由于它的摩擦特性将消失,实际上主要靠月壤结合力来支撑月球车载荷。

4.2.5.1 主要研究工作

(1) 开展在 $1/6g$ 重力环境和真空条件下月壤承载能力的试验评价研究;

(2) 开展月球车爬坡和下坡能力的评价试验;

(3) 开展月球车越障和自主规避障碍物能力的评价试验;

(4) 开展月球车在真实月面上爬坡能力的修正研究;

(5) 开展月球车月面行走的数值仿真研究。

4.2.5.2 适应二、三期探测任务的评价试验条件分析

(1) 建一个室内月面模拟场

由于受到空间限制,室内月面模拟场不可能模拟月面的显著特征(如较大斜坡、月坑、以及月岩的分布等),室内月面模拟场主要模拟月壤特性(包括斜坡月壤特性),开展月球车轮与月壤相互作用的研究,对月球车轮提出设计修正。

可以考虑 $1/6g$ 重力模拟器集成到室内月面模拟场中,开展月球车的输出动力特性的修正研究。

(2) 建立一个室外月面地形地貌(含月壤)模拟场

为了全面地对月球车的行走能力(包括爬坡、越障和自主规避等)做出评价,需要在地面建立一个室外月面形貌模拟场,来比较真实地模拟月面斜坡、月坑、岩石分布等显著特征。另外,可以利用室外月面形貌模拟场,开展月球车上照相机的视场研究。

(3) 集真空、 $1/6g$ 重力条件的室内月面模拟场的建设可行性研究。

月球探测器着陆、空间发动机工作或月球车行走等都会引起月球尘的扬起。研究扬尘的扩散机理,并对探测器的影响做出评价,通过机理研究,提出修正月球上操作的要求或建议。

在开展这项研究工作之前,需要环境专家与

总体专家就这项工作的必要性进行沟通协调,需要环境专家就一些技术问题进行深入分析研究。

- 室内月面模拟场(主要是月壤)的真空获得技术;

- 月壤扬起的测量技术;

- 缩比模拟技术(包括 $1/6g$ 重力场下缩比模型的着陆撞击试验);

- 月壤扬起的数值仿真技术。

4.2.6 月球尘环境模拟试验研究

4.2.6.1 主要研究工作

(1) 月球尘静电吸附机理的试验研究;

(2) 月球尘主动防护技术的有效性试验评价研究;

(3) 吸附了月球尘后的月球车对热设计影响的评价试验研究。

4.2.6.2 试验条件分析

由于在地球轨道环境上不存在月球尘,所以对我们来说,它是一个特殊环境。关于它的静电吸附机理未曾研究过。如果在探测器的传感器、太阳能电池阵、辐冷器以及月球车等外露表面被吸附了月球尘,则对这些功能表面产生影响,也影响月球车的热性能,因此有必要建立相关的效应评价设备,开展机理研究和防护措施的有效性评价等。

5 结束语

月球探测是深空探测的基础,也是深空探测工作的第一步。对这一新的领域,需要突破的环节很多,核心是能力建设,如月球探测器总体设计技术、轨道与姿控技术、通信与测控技术、推进技术和运载技术等等。而作为基础条件的环境问题,为验证和提高探测器的性能、可靠性和工作寿命提供保证。从现在起,就应对相关的环境工程投入较多的注意,下面几条是必不可少的。

(1) 着眼于我国月球探测工程的二、三期以及未来发展的要求,配合总体论证的需要,环境专家应进行广泛的调研和深入的分析,制定月球探测工程的环境问题研究路线图;

(2) 根据月球探测工程研制工作的需要,在月球探测的诸多环境中,建议列出需要优先研究的环境问题,如月球的热、真空和高低温的协和、粒子辐射、月球重力场以及月球尘等环境;

(3) 综合考虑探测器的总体尺寸、总质量、载荷情况、环境试验水平和试验工况、以及任务的其它特殊要求(如运动、展开操作要求, 及航天员适应性试验等), 对现有设备的试验能力做出综合评价, 决定是否需要建设新的大型空间环境试验设备;

(4) 目前, 我国环境效应试验评价设备基本系列化, 能基本涵盖在月球探测中所遇到的绝大部分环境, 但是在月球探测中, 月球尘是一个特殊环境, 需要对月球尘的静电吸附特性机理开展研究, 并开展材料、元器件、运动副、小型功能装置等为试验对象的评价试验;

(5) 从工程角度, 环境问题研究需要开展的工作包括: 月球热流模拟器的研制, 太阳模拟器

与月球热流模拟器的联合试验方法的研究, 真空环境下1/6g重力模拟器的研制, 月面形貌(含月壤)模拟实验室(包括室内、室外月面模拟场)等。在大型试验中, 是否建造月球运动模拟器, 还需要环境专家做出深入研究。

参考文献 (References)

- [1] 叶培建, 张焱, 饶炜. 积极应对深空探测的技术挑战 [A]. 2005年深空探测学术会[C][Ye Peijian, Zhang He, Rao Wei. A active response to some technical challenges of the deep space exploration[A]. 2005 Academic Conference of the Deep Space Exploration[C]]
- [2] 肖福根. 月球探测工程情报文集[M]. 2005-12[Xiao Fugen. A collection of information research papers of lunar exploration project[M]. 2005-12]
- [3] 欧阳自远. 月球科学概论 [M]. 中国宇航出版社 [Ouyang Ziyuan. The generality of the lunar science[M]. China Aerospace Press]

Lunar Environmental Issues of Lunar Exploration Project

YE Peijian, XIAO Fugen

(China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Lunar environments are briefed at first, and then the environmental tests of two foreign classic lunar surveyors are introduced. On the basis of effects analysis of lunar environments on the surveyors, some considerations of lunar environmental studies are suggested according to the program of China Lunar Exploration Project.

Key words: lunar environments; lunar exploration project; lunar surveyor; environmental simulation tests