

嫦娥三号APXS月夜生存装置 设计与验证

陈灯意^{1,2,3†} 伍 健^{1,2} 胡一鸣^{1,2,3‡} 常 进^{1,2} 官一忠^{1,2}

蔡明生^{1,2} 王焕玉⁴ 张家宇⁴ 崔兴柱⁴ 汪锦州⁴

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

(2 中国科学院暗物质与空间天文重点实验室 南京 210008)

(3 中国科学院大学 北京 100049)

(4 中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 粒子激发X射线谱仪(APXS)是我国嫦娥三号任务巡视器上4个有效载荷之一,它通过携带的主动激发源激发月岩或月壤中的元素,并探测其产生的特征X射线,从而获得月球元素的种类及含量信息.根据APXS所处的极端温度环境,在有限的资源约束下,进行了月夜生存装置RHU的设计分析并开展了相应的结构力学、月夜生存摸底试验.最后,介绍了发射塔架RHU换装的情况与在轨初步探测结果.

关键词 仪器: 探测器, 方法: 解析, 行星和卫星: 探测

中图分类号: P171; 文献标识码: A

1 引言

嫦娥工程是我国自主研发启动的第1个探月工程,共分为“探”、“登”、“驻”3大步.嫦娥三号(CE-3)是嫦娥工程3部曲中第2步的重头戏,通过发射月球软着陆器/巡视器,降落到月表,释放1个月球车.在嫦娥二号卫星的绕月探测任务已有成果的基础上(为 γ 射线谱仪,累计探测到9种月表元素^[1]),对月球表面有开发利用和研究价值的元素的含量与分布进行更精确的探测,从而鉴别新的岩石类型,对月球的组成、月球地质历史和撞击历史等进行深入研究(详细参见网址<http://zh.wikipedia.org/wiki/中国探月工程>).

粒子激发X射线谱仪(APXS)是嫦娥三号巡视器上的4个科学载荷之一,也是机械臂上唯一的载荷.它通过携带的主动激发源激发月岩或月壤中的元素,并探测其产生的特征X射线,从而获得月球元素的种类及含量信息,为月球地质化学过程和形成演化研究提供重要依据.

2015-03-27收到原稿, 2015-04-22收到修改稿

[†]dychen@pmo.ac.cn

[‡]huyiming@pmo.ac.cn

APXS由探头、在轨标定装置、月夜生存装置RHU、电子学与软件及电缆组成, 系统结构如图1(图中SDD为Silicon Drift Detector缩写, TH为Telemetry Head缩写, CAN为Controller Area Network缩写).

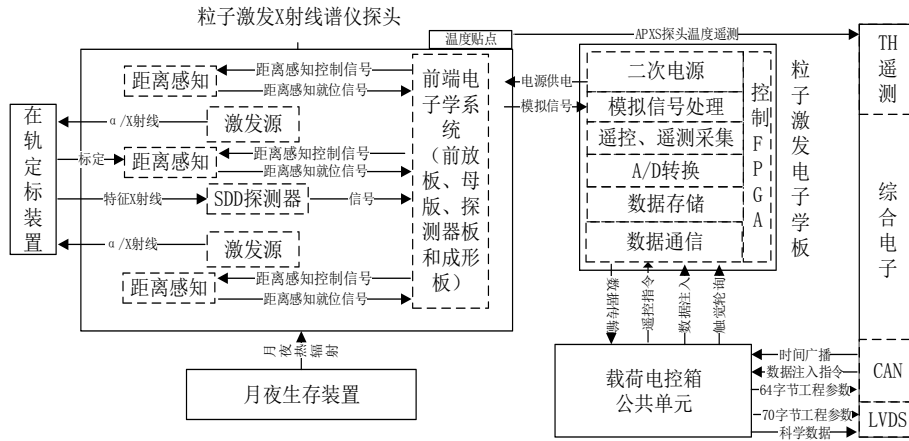


图1 APXS探测器系统结构设计

Fig. 1 The framework of the APXS detector system

月球表面为准真空环境, 没有适度的大气, 因而月昼和月夜差别极大. 根据设计, CE-3 将首选着陆于虹湾地区, 位于月球北纬43°左右, 月夜阶段月表最低温度接近-180°C, 且周期长达14个地球日^[2-3]. 为保障APXS探头及前端电子学在长时间处于低温工况的安全存储, 必须采用合适的温控手段, 我们设计了以放射性同位素²³⁸Pu作为燃料的同位素加热单元作为核心的月夜生存装置, 来保证探头在月夜低温工况安全.

2 月夜生存装置

2.1 设计约束

受运载发射资源限制, 月夜生存装置设计重量仅390 g, 本体尺寸为70 mm×58 mm×85 mm. 由于CE-3号任务需要经历发射、轨道转移、着陆、两器分离及巡视探测等工况, 需要考虑设备在相关过程中经历的振动及力学环境, 按照卫星要求, 设备需要完成加速度试验、冲击试验、正弦振动与随机振动等环境试验.

由于该装置的核心部分为放射性同位素²³⁸Pu, 为保证操作人员的安全性, 根据放射性辐射防护3原则: 屏蔽、加大距离、减少时间, 我们将设备设计成易拆装的结构, 保证操作过程中, 操作人员接触时间尽量短.

由于探头不能与月夜生存装置接触, 只能通过辐射方式对探头实现加热, 而同位素加热单元的热功率只有4 W, 因此, 在设计上需要考虑如何将大部分热量由面向探头的加热面输出.

2.2 结构设计

根据以上设计约束, 对月夜生存装置进行了以下设计, 详见图2所示, 说明如下:

(1) 红色部分为RHU同位素加热源, 采用国际上广泛使用的²³⁸Pu, 原因是其半衰期

为87.7 yr, 比功率为0.55 W/g, 衰变种类几乎为100%的 α 衰变, 是最为理想的天然放射性加热源^[4]. APXS使用的RHU加热源的外包络尺寸直径为 $\varphi 40$ mm, 高为60 mm, 总重量为180 g, RHU热源的功耗为4 W, 四周均有热量散出;

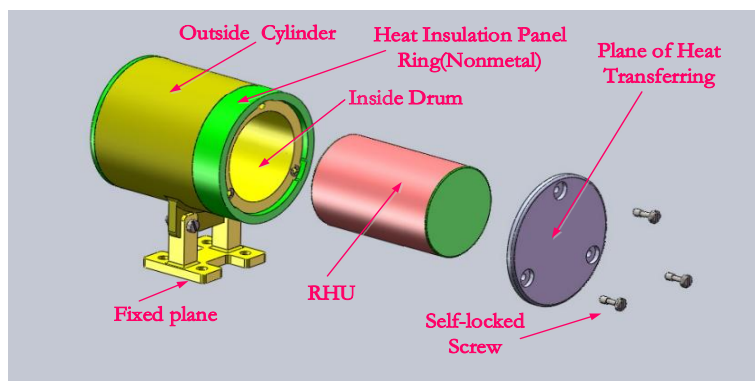


图 2 月夜生存装置示意图

Fig. 2 The exploded view of the moon-night survival device

(2) 最右端顶部为月夜生存装置的加热装置, 即加热面. 在月夜环境下, 加热面将与APXS 探头部分进行同心非接触配合, 对探头进行辐射加热; 在内外套筒之间, 将装入铝合金多层材料, 起到隔热作用, 使RHU 热源4 W的热量绝大部分从加热面散出, 减少不必要的损耗;

(3) 绿色部分为非金属融热环, 材料为聚酰亚胺, 在设计中主要作为隔热材料使用, 同时有一定机械承载要求; 黄色部分则为内外套筒等结构件, 材料为2A12铝合金, 主要起到承载作用, 同时也能将RHU四周的热量传递到顶部的散热面; 下部为月夜生存装置的支架, 并提供与巡视器之间的安装接口.

(4) 顶部加热盖采用3-M3螺纹设计, 与内套筒采用M3防脱螺钉紧固; 加热盖内侧增加限位凸台, 方便安装时的初步限位; 外边缘采用滚花设计, 方便换装时取下加热盖.

另一方面, RHU月夜生存保障装置热设计也采用两种不同表面处理工艺设计: 首先, RHU 月夜生存装置加热面采用喷白漆工艺处理, 其余部分则进行镀金工艺处理. 通过对加热面喷白漆的工艺处理, 可以极大提高其发射率, 从而提高热辐射效率; 其他零件镀金处理, 则减少了月夜生存保障装置对加热面发出热量的吸收.

设计完成后, 月夜生存装置外包络尺寸70.10 mm $\times$ 57.96 mm $\times$ 85.10 mm(实测值), 重量382 g (含RHU 热源), 均满足总体要求.

2.3 仿真分析

由于卫星发射过程中需要经历极其严苛与恶劣的加速度、振动等力学环境, 对月夜生存装置进行结构有限元分析具有重要参考意义^[5]. 本文利用SolidWorks 软件建立月夜生存装置的3维模型, 再将其导入Ansys Workbench 有限元分析软件中, 根据卫星给定的环境试验规范进行了模态与静力学分析. 有限元分析过程中, 对月夜生存装置的安装面进行固定约束, 静力学分析时加载18g加速度载荷(同时考虑地球重力加速度 g 影响). 模态分析结果如表1与图3.

表 1 月夜生存装置模态分析结果

Table 1 The modal analysis of the moon-night survival device

Mode	1	2	3	4	5	6
Frequency/Hz	220	463	605	1326	1484	2517

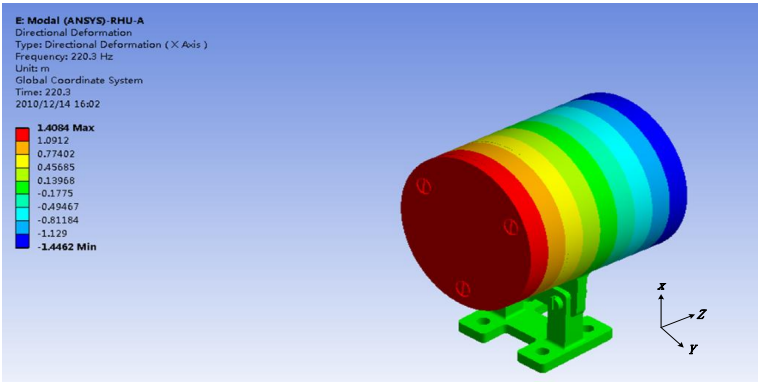


图 3 月夜生存装置1阶模态振型(基频: 220 Hz)

Fig. 3 The map of the first modal shape of the moon-night survival device (natural frequency: 220 Hz)

- (1) 模态分析1阶基频为220 Hz、1阶模态振型为垂直于巡视器安装面的弯曲(图中Z方向弯曲), 满足总体对月夜生存装置一阶基频高于100 Hz的要求.
- (2) 静力学分析过程中, 月夜生存装置的最大等效应力出现在Y方向(本坐标系仅在本分析中使用)的加载过程中, 其最大等效应力为15.76 MPa, 最大位移变化量为0.015 mm, 分别如图4与图5所示. 分析所用材料性质如表2, 硬铝材料2A12的屈服强度约为275 MPa, 聚酰亚胺材料的极限抗拉强度为120 MPa, 说明月夜生存装置结构设计安全且有较大余量.

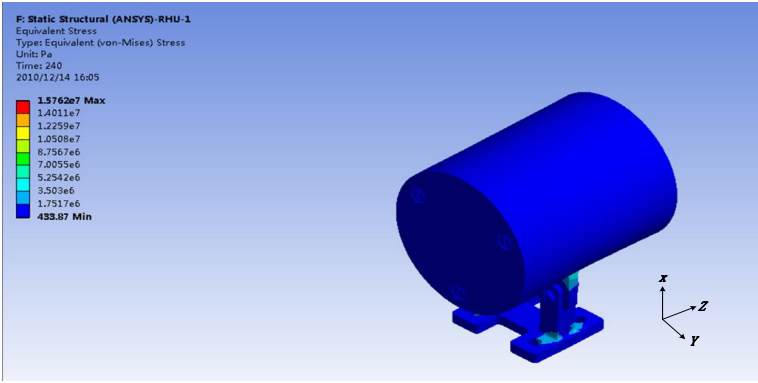


图 4 月夜生存装置等效应力图

Fig. 4 The equivalent stress of the moon-night survival device via FEM (Finite Element Method)

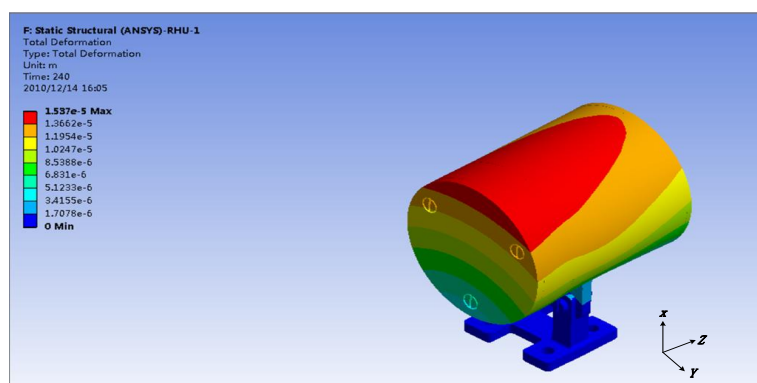


图 5 月夜生存装置位移图

Fig. 5 The displacement of the moon-night survival device via FEM

表 2 分析主要采用的材料特性表

Table 2 The properties of mainly materials used in FEM

Material	Thermal conductivity $/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	Specific heat capacity $/(kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	Density $/(kg \cdot m^{-3})$	Young's modulus $/GPa$	Poisson's ratio
2A12	117	0.921	2780	72	0.33

图6则为APXS处于月夜关机模式时(APXS与机械臂连接头的开口端面靠近RHU的辐射端面,通过RHU的热辐射来实现对APXS的加热),选取RHU端面热功耗3 W,月球环境温度取 $-180^{\circ}C$ 时的热分析的仿真结果截图。

从图中可以看到,利用端面热辐射为4 W的RHU来给APXS加热,能够满足APXS存储温度要求。

3 试验验证

3.1 环境试验验证

月夜生存装置研制完成后进行了一系列的环境试验考核,包括加速度试验、正弦振动与随机振动试验等,本文重点讲述了加速度试验情况。

加速度试验的目的是验证组件承受主动段加速度环境的能力及适应月面着陆缓冲力学环境的能力。月夜生存装置总共进行了两项加速度试验,分别是针对项目1主动段加速度考核与项目2探测器着陆缓冲力学环境考核。考核条件如表3(表中纵向即为着陆器+X方向,巡视器-Z方向, g 为重力加速度,加载时间自达到最大后开始计算),试验曲线如图7。

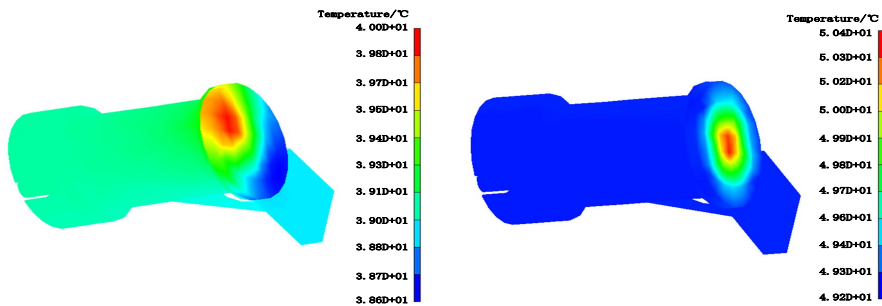


图 6 月夜关机模式下APXS的热仿真结果(左图为RHU偏心20 mm, 右图RHU不偏心, RHU功耗设置为3 W)

Fig. 6 Thermal simulation analysis results of APXS during moon-night (APXS is turned off, and the moon-night survival device power is set as 3 W. Left: above two instruments eccentricity is 20 mm; Right: concentric)

表 3 加速度试验条件
Table 3 The conditions of acceleration test

Item	Direction	Condition/ <i>g</i>	Loading time/min	Loading speed/(<i>g</i> ·min ⁻¹)
Item 1	vertical	9	5	≤5
Item 2	vertical	18	1	≤5

月夜生存装置完成加速度试验后, 也进行了正弦、随机振动及冲击试验考核. 包括加速度试验在内的月夜生存装置所有力学试验均一次性通过, 各项试验完成后对其进行了外观与螺钉检查, 试件完好, 螺钉紧固状态良好, 说明月夜生存装置能够满足卫星力学环境的要求(详见粒子激发X射线谱仪月夜生存装置产品质量履历书, 文件号为CEY402-3-X CL16).

由于RHU使用²³⁸Pu放射源, 具有一定的放射性, 在卫星正式发射上天前, 采用的是模拟热源对APXS的热设计(低温工况下使用RHU模拟热源辐射供热)做初步试验验证. 试验条件如下: 当真空度和环境温度达到要求后, 模拟月夜低温保持阶段的试验时间需大于336 h, 模拟低太阳高度角低温保持阶段的试验时间需大于144 h. APXS热控件与RHU 模拟热源相对位置关系按照实际的APXS月夜存储模式位置关系摆放. 试验结果如图8, 从图中可以看到, 月夜生存装置开始加热后(环境温度-173℃), APXS升至稳态-47℃, 说明月夜生存装置能够实现了对APXS的有效加热.

3.2 RHU发射塔架换装

发射区塔架为54.5 m平台, 安装RHU热源及加热顶盖操作前, 月夜生存装置安装在巡视器舱外, 套有红色防尘袋; 周围安装有机械手臂、APXS探头、在轨定标装置等设备. 因此, 工艺人员编制了如图9所示的换装工艺流程图, 操作人员按照该流程多次在模拟平台上进行了演练.

RHU热源正式换装之前, 操作人员提前在发射场某厂房拆除了RHU热源模拟工艺件, 套上红色防尘袋. 2013年11月20日, 相关操作人员登上发射区平台, 按流程顺利进行了RHU 的安装与复核, 整个过程用时仅5 min, 且进行了拍照记录, 验证了防脱螺钉换装结构设计的有效性, 减少了操作人员的辐射曝光时间, 保证了他们的安全.

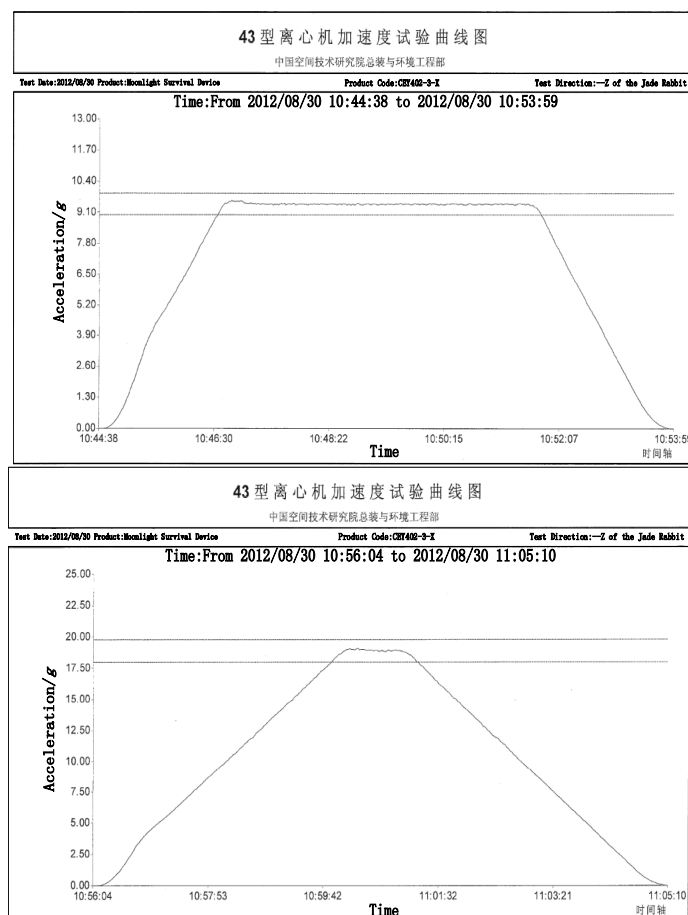


图 7 月夜生存装置项目1(上)与项目2(下)的试验曲线

Fig. 7 The acceleration test curve of moon-night survival device (Top: item 1; Bottom: item 2)

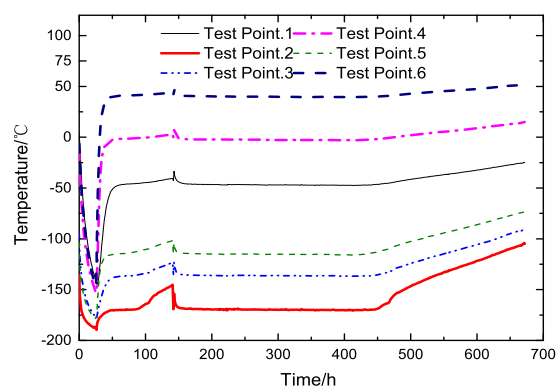


图 8 月夜生存摸底试验温度变化情况

Fig. 8 The thermal test results for APXS with the moon-night survival device

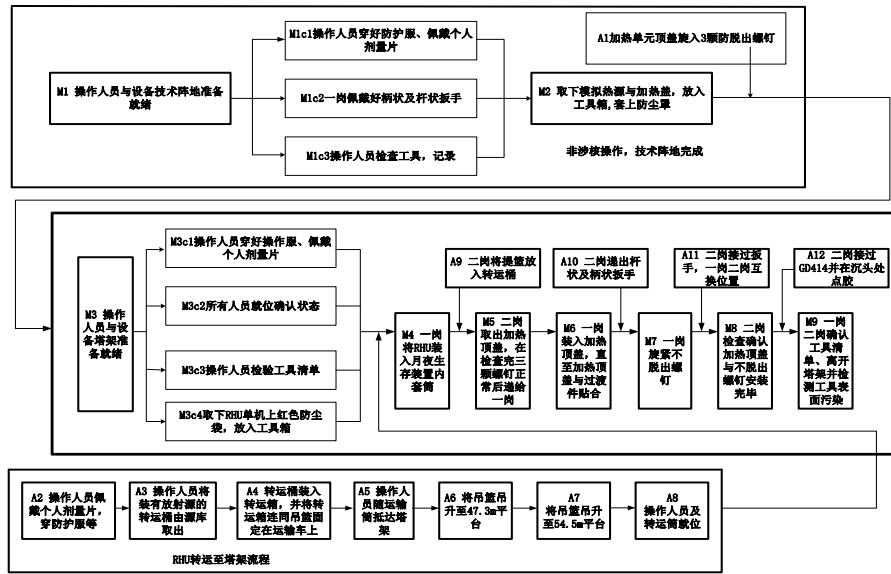


图9 RHU发射区换装工艺流程

Fig.9 The procedure of RHU installation in launching site

3.3 APXS在轨工作情况

CE-3成功发射入轨后, APXS在轨工作情况简介如下:

- (1) 2013年12月23日, 高分辨元素探测谱仪完成了首次在轨标定工作, 整个标定过程中探测谱仪工作正常, 遥测参数正常, 性能指标满足任务要求, 成功获取了在轨标定能谱;
- (2) 2013年12月25日, 高分辨元素探测谱仪分别完成了2个探测点的测试工作, 整个测试过程中探测谱仪工作正常, 距离感知可以成功触发, 遥测参数正常, 性能指标满足任务要求, 成功获取了月表元素的在轨探测能谱;
- (3) 2014年1月12日, 高分辨元素探测谱仪在度过1个极低温度月夜后, 成功加电, 完成第2次在轨标定工作, 整个工作过程中遥测参数正常, 成功获取标定能谱, 能谱分辨率、能量线性均无明显变化, 在轨测试能谱如图10;
- (4) 2014年1月14日, 高分辨元素探测谱仪完成月面车辙的探测工作, 测试过程中APXS工作正常, 距离感知可以成功触发, 遥测及在轨能谱均正常.

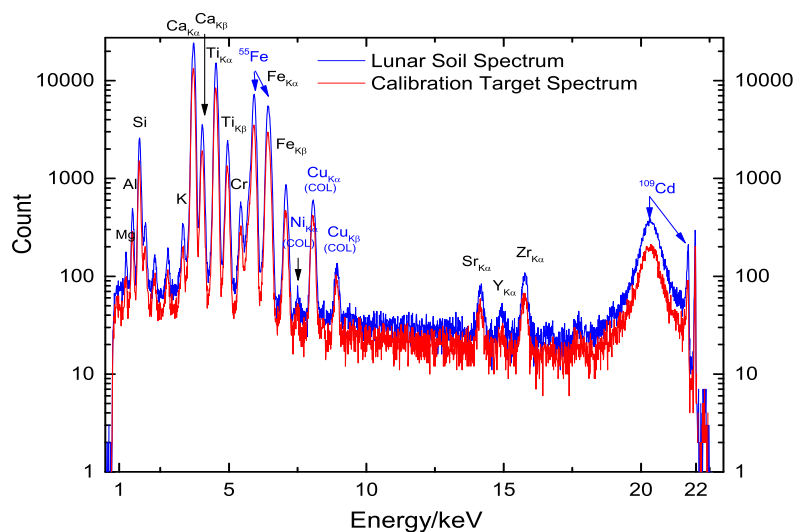


图 10 CE-3 APXS谱仪在轨测试能谱

Fig. 10 The energy spectrum of the APXS detector of CE-3 on orbit

4 结论

本文根据APXS月夜生存装置设计约束完成了月夜生存装置的设计, 经仿真分析、相关环境试验以及发射厂区换装操作, 证明APXS月夜生存装置满足设计要求. APXS在第2月昼成功加电, 完成标定及探测任务, 表明月夜生存装置设计上能够实现对探头的有效加热. 该设备成功保证了APXS探头在极低温度环境下的安全.

致谢 本文相关工作得到中国科学院紫金山天文台与高能物理研究所众多老师与同事的帮助, 在此一并表示感谢.

参考文献

- [1] 马涛, 常进, 张南, 等. 天文学报, 2013, 54: 291
- [2] 叶培建, 肖福根. 航天器环境工程, 2006, 23: 1
- [3] 张家宇, 王焕玉, 崔兴柱, 等. 宇航学报, 2014, 35: 115
- [4] 罗文宗, 张文清. 钪的分析化学. 北京: 原子能出版社, 1991: 1-2
- [5] 袁家军. 卫星结构设计与分析(上). 北京: 中国宇航出版社, 2004: 160-175

Design and Environmental Verification of Chang'E-3 Moon-night Survival Device for APXS

CHEN Deng-yi^{1,2,3} WU Jian^{1,2} HU Yi-ming^{1,2,3} CHANG Jin^{1,2}
GONG Yi-zhong^{1,2} CAI Ming-sheng^{1,2} WANG Huan-yu⁴ ZHANG Jia-yu⁴
CUI Xing-zhu⁴ WANG Jin-zhou⁴

(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

(2 Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

(4 Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

ABSTRACT The Active Particle X-ray Spectrum (APXS) is one of the 4 scientific payloads of Chang'E-3 (CE-3) Lunar Rover, of which the scientific object is to identify the elements of lunar soil and rock samples. In this paper, the moon-night temperature of the moon surface will be described, and due to the cold environment the APXS will undergo after its landing. Thus, a specialized instrument which is named the moon-night survival device using the Radioisotope Heat Unit (RHU) as its heater source is designed to ensure APXS storage temperature requirements with limited sources on the satellite. In the end, a series of environmental tests are performed, and the installation of RHU on the launch tower as well as the status of the APXS working on orbit is presented since its launching in 2013.

Key words instrumentation: detectors, methods: analytical, planets and satellites: detection