深空探测器同位素热源环境试验技术

胡宇鹏*, 鲁亮, 向延华, 李思忠, 胡文军, 胡绍全

(中国工程物理研究院总体工程研究所,绵阳 621999)

摘 要: 为保证应用于深空探测器的同位素热源的安全性和可靠性,开展了深空探测器同位素热源环境试验技术研究。通过对同位素热源全寿命周期内各任务剖面的系统分析,总结得出了同位素热源环境试验项目,并对这些项目进行了研究及模拟实验,具体包括: 高温-离心、高温-冲击、高温-振动等热-力复合环境试验技术,空气动力学加热、热冲击试验、发射场火灾事故地面模拟实验等异常环境安全性试验技术。通过以上研究建立了同位素热源鉴定级环境可靠性试验及 异常环境安全性试验能力,为深空探测器同位素热源研制任务提供了技术支撑。

关键词: 深空探测; 放射性同位素热源; 环境试验技术; 复合环境试验; 异常环境安全性试验

中图分类号: V442 文献标识码: A 文章编号: 2095-7777(2017)02-0138-05

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2017.02.006

引用格式:胡宇鹏,鲁亮,向延华,等.深空探测器同位素热源环境试验技术[J].深空探测学报,2017, 4(2):138-142.

Reference format: Hu Y P, Lu L, Xiang Y H, et al. Environment testing technology of radioisotope heat source for deep space exploration [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4 (2) : 138-142.

0 引 言

放射性同位素在衰变过程中会不断释放热能,利 用赛贝克效应(Seebeck Effect)可将同位素衰变释放 的热能转换成电能,将其作为热源或电源使用,具有 体积小、寿命长、不受环境影响、无需维护等特点。 因此,放射性同位素热源(Radioisotope Heat Unite, RHU)和放射性同位素电源(Radioisotope Thermoelectric Generator, RTG)已广泛应用于深空探测工程^[1-2]。自 20世纪60年代以来,美俄已在多个航天任务中成功应 用RHU和RTG,并在输出功率等功能性指标和设计寿 命等可靠性指标上不断提升^[3]。

我国正在积极实施月球探测工程,"嫦娥3号"探测器已使用3枚百瓦级大功率的²³⁸Pu同位素热源^[4]。"嫦娥3号"所携带的同位素,仅仅是作为热源使用,未来深空探测器或将安装²³⁸Pu同位素电源。为保证应用于深空探测器的RHU/RTG在应用过程中的可靠性和意外事件中的安全性,需要对RHU/RTG进行大量地面环境试验。

美国自1961年首次成功发射载有RTG的子午仪-4A 导航卫星开始,便对RHU/RTG的环境试验技术进行了 大量研究,并制定了严格的环境试验项目^[5]。俄罗斯对 火星-96所用的命名为Angel的²³⁸Pu RHU进行了包括模 拟样品和试验样品的地面环境试验,验证了其在实际运行和紧急事件情况下热源结构的安全性和可靠性^[4]。 然而,我国关于RHU/RTG的地面环境试验技术还十分 欠缺。

为保证应用于未来探测器的RHU/RTG的安全性和 可靠性,本文系统开展了针对应用于未来深空探测器 ²³⁸Pu RHU的环境试验技术研究,可为RHU/RTG成功应 用于我国深空探测工程提供重要支撑。

1 试件状态

RTG能够同时输出电能和热能,典型的RTG由 RHU、热电转换器和辐射散热器3部分组成,其中 RHU是其核心部件,也是环境试验重点考核部件。目 前,RHU的燃料芯块常选用²³⁸PuO₂,其运行温度常根 据所设计的发热功率、源盒材料等具体指标确定,一 般不能超过1500℃。另一方面,由于²³⁸PuO₂具有放射 性,在鉴定级环境试验考核中,常用模拟样品代替真 实产品进行试验。对于模拟样品,其本身不会像真实 产品那样具有内热源。因此,为了使模拟样品的结构 层(²³⁸PuO₂燃料芯块的包覆层)具有与真实产品结构 层同样的温度,在环境试验中,需要对模拟样品进行 适当的热加载。

收稿日期: 2017-02-20 修回日期: 2017-03-24

基金项目: 某同位素热源环境试验项目; 中国工程物理研究院总体工程研究所授权项目

在本文针对不同发热功率的RHU鉴定级环境试验 中,需要对模拟样品进行热加载。热加载时以其最外 层的温度为考核标准,根据发热功率大小确定标准试 件最外层的目标温度。

2 任务剖面环境试验技术

RHU在整个寿命周期可能经历的环境如图 1所示。主要包括:特殊类型放射性物质的匹配;储存时可能经历的温湿度、热循环等气候环境;运输时可能经历的大气压力变化以及陆、海、空的运输力学环境;之后在发射过程中经受的更为严苛的力学环境。



图 1 同位素热源环境试验 Fig. 1 Eualification environmental test of RHU

此外,空间核安全极易挑动人们敏感的神经,空 间核安全性问题已成为各国政府和民众关注的焦点。 RHU在全寿命周期活动涉及的包括发射场火灾、再入 空气动力热、撞击地面或水面等异常环境的安全性也 需严格考核。表 1列出了美俄安全性试验项目。从表 可知,美国对RHU安全性验证比较关注其在发射场事 故环境下的安全性,俄罗斯则更偏重再入阶段的安全 性验证。

本文重点研究RHU从储存、运输、发射、运行等 任务剖面的环境可靠性试验及各剖面下可能出现的异 常环境安全性试验技术。特殊类型放射性物质的匹配 试验按国家相关试验标准进行即可。

2.1 储存、运输环境试验

RHU储存状态下的温湿度和热循环气候环境试验 与一般产品并无较大差别。在RHU的转运过程中,可 能经历公路、铁路、轮船、飞机等常见的陆、海、空 运输方式,因此会经历大气压变化、线性过载、振动、冲击等运输力学环境。

表1	美俄同位素热源安全性试验项目

Table 1	RHU safety testing item of the USA and RUS
---------	--

国别	试验项目	模拟场景	
美国	爆炸超压试验	运载火箭爆炸导致的冲击波损伤	
	碎片射弹试验	运载火箭爆炸导致小碎片和射弹撞击	
	坠落试验	直升飞机坠落	
	无遮蔽包壳撞	燃料包壳和燃料与不同介质发生撞击	
	击试验	的反应	
	大碎片试验	运载火箭上的一块大碎片的撞击	
	飞板试验	板状大块碎片撞击	
	热冲击试验	热源重返大气层并随后经历对地撞击	
	固体/液体推进	发射场业定事故	
	剂燃烧试验	反别切八火争议	
俄罗斯	自由落体掉落	执源掉落地面冲击	
	试验		
	重锤撞击试验	操作工具坠落撞击热源	
	高速撞击试验	高速撞击障碍物	
	空气动力学	执师宣请五》拥家十月日	
	过热试验	然你同述 丹八 何孟入【法	
	火灾试验	发射场火灾事故	
	静压试验	热源掉入深海	
	海水腐蚀试验	掉入海水中	

考虑到发射过程中的力学环境条件比储运环境更 为严苛,为了试验的易实现性,在储运阶段暂不对模 拟样品进行热加载。因此,储运阶段的气候环境试验 和力学环境试验都属于单因素环境试验,都可在相应 的环境试验设备上进行,主要包括温湿度实验室、温 度-高度箱、冲击碰撞试验机、振动台和离心机。

2.2 发射、运行环境试验

RHU在发射及运行状态下经受的力学环境更为苛 刻,包括火箭发射诱发的瞬态力学环境;由火箭发动 机燃烧不均匀产生的振动环境;运载火箭在大气中飞 行,结构与大气相互作用产生的振动环境;火箭级间 分离和整流罩抛罩分离产生的高频冲击力学环境;入 轨后由轨道机动、姿态调整等事件产生的加速度环 境。概括起来,RHU在发射和空间运行时所经历的力 学环境大致可分为:准静态加速度环境、正弦振动环 境、随机振动环境及冲击环境。如前所述,在RHU鉴 定级发射、运行环境试验中,需对模拟样品进行热加 载。因此,该剖面下的环境试验属于热、力同时加载 的热–力复合环境试验。相比热或力的单因素环境试 验,热–力复合环境试验能暴露出单一因素试验不能发 现的问题^{167]}。目前,关于RHU的热–力复合环境试验技 术还未见报道。

针对RHU的热-力复合环境试验需开展离心、冲击、振动环境下模拟样品的温度加载技术研究。经过

调研加热贴片、温度箱、辐射灯阵、加热炉等工程上 常见的加热装置的相关技术指标,并综合考虑试验易 操作性和试验效率,最终确定高温加热炉为热加载设 备。根据冲击碰撞试验机、振动台和离心机的设备特 点,进一步可确定采用敞口罩式高温加热炉用于高 温-振动和高温-冲击复合环境试验中的热加载:采用 闭口罩式高温加热炉用于高温-离心复合环境试验的热 加载。其中,敞口罩式高温加热炉内布置了管状加热 器进行辐射加热,炉顶部安置了风机,以加强炉内对 流传热,从而进一步增强炉内温度场的均匀性;闭口 罩式高温加热炉内部安置了裸露电阻丝进行直接辐射 加热即可。在高温-冲击、高温-振动复合环境试验 中, 敞口罩式高温加热炉悬挂于冲击碰撞试验机和振 动台上对模拟样品加热: 在高温-离心复合环境试验 中,闭口罩式高温加热炉则直接固定在离心机上对产 品加热。

在确定各类热-力复合环境试验的热加载方式后, 还需对试验夹具进行合理设计。对于高温-冲击和高 温-振动复合环境试验,相应的试验夹具固定在冲击 碰撞试验机和振动台的台面上,并伸向加热炉内部从 而将试验产品固定在炉内。值得注意的是,试验夹具 需考虑能将冲击碰撞试验机和振动台的力学载荷准 确传递给模拟样品,因而夹具不易过高。由于高温加 热炉固定在冲击碰撞试验机和振动台正上方,加热 炉又为敞口设计,冲击碰撞试验机和振动台的台面 受加热炉辐射和高温样品通过夹具的导热极易超过正 常工作温度,从而影响设备的正常工作,其至会导致 设备故障。因此,试验夹具的选材宜采用导热系数较 低的钛合金,夹具中段还需设计水箱进行主动水冷热 防护。对于高温-离心复合环境试验,试验夹具固定模 拟样品的安装盘局部可镂空,并使其厚度尽可能的 低,以扩大模拟样品直接受辐射的面积,以及降低夹 具热容。

在完成热-力复合环境热加载技术及试验夹具合理 设计的基础上,还需开展热-力复合环境测试技术的研 究。另外,还需根据模拟样品的材质、样品与加热炉 及夹具的相对位置、热载荷、力载荷条件等信息确定 温度传感器、高温加速度计等正确的安装方式。

2.3 异常环境安全性试验

安全性是研制同位素装置最为优先考虑的因素。 美俄在航天任务中应用RHU/RTG过程中均出现过3次 意外事故,且所有事故均发生在发射或再入阶段。虽 然这些事故没有造成较为严重的核泄漏,但美俄都制 定了严格的安全条件测试项目。因此,同位素热源需 进行异常环境安全性试验。主要包括:模拟发射场火 灾事故的火烧试验、模拟再入大气时的空气动力学加 热试验、模拟高速撞击障碍物的高速撞击试验、模拟 坠落入海面的热冲击试验、模拟坠落后长期浸没在海 底的压力试验。同样的,在进行异常环境安全性试验 时,需对RHU模拟样品进行热加载。

发射场火灾事故地面模拟试验根据火箭推进剂的 形态可分为液体推进剂和固体推进剂火烧试验。试验 前,采用高温加热炉对模拟样品进行预热,然后再将 其转入液体推进剂或固体推进剂火烧场进行试验。此 外,RHU在火箭发射过程的意外爆炸中可能会落入火 箭发动机内部,此时火焰温度近似于火焰绝热温度, 高达3 372 ℃,需采用电弧加热的方式模拟该场景。再 入过程的气动热试验和坠落入海面的热冲击试验仍然 可采用高温加热炉对样品进行加热。其中,在样品被 加热到目标温度后,迅速将其转移至人工海水槽内即 可完成热冲击试验。高速撞击试验在火炮内完成,并 根据炮筒尺寸设计相应的电加热弹托,在火炮动作前 上电加热至目标温度,然后断电后将其打出。海底压 力试验在海洋压力试验设备中完成即可。

3 任务剖面环境试验能力

结合前面分析,围绕RHU所经历的包括储存、运输、发射、空间运行以及可能遭遇到的异常事故等任务剖面,RHU环境试验种类归纳如表2所示。

表 2 同位素热源环境试验项目 Table 2 RHU environmental test item

Tuble 2			
任条剖面	试验项目	中国工程物理研	
11.77 时间	网络学校日	究院已开展工作	
体方	温湿度试验	\checkmark	
11月1十	热循环试验	\checkmark	
	大气压力试验	\checkmark	
テた	线性过载试验	\checkmark	
运制	振动试验	\checkmark	
	冲击试验	\checkmark	
	准静态加速度试验	\checkmark	
化的二亿	正弦振动试验	\checkmark	
反射运1]	随机振动试验	\checkmark	
	冲击试验	\checkmark	
	火烧试验	/	
	空气动力学加热试验	\checkmark	
异常事故	高速撞击试验	\checkmark	
	热冲击试验	\checkmark	
	压力试验	/	

中国工程物理研究院总体工程研究所针对深空探测器RHU进行了同位素²³⁸Pu热源储运、运行及事故环境的环境试验技术研究,建立了相关环境试验能力,

并已开展了一系列相应的环境试验(见表 2)。 同位素热源环境可靠性试验部分试验场景见图 2。



(a) 高温-离心复合环境试验



(b) 高温-冲击(连续碰撞)复合环境试验



(c) 高温-振动复合环境试验

图 2 同位素热源环境可靠性试验场景 Fig. 2 Eualification environmental scenarios of RHU

同位素热源异常环境安全性试验部分试验场景见



图 3 同位素热源异常环境安全性试验场景 Fig. 3 Abnormal environmental scenarios of RHU

4 结 论

为保证未来深空探测器同位素热源的安全性和可 靠性,对同位素热源各任务剖面涉及的环境试验进行 了分析,研究了高温-离心、高温-冲击、高温-振动等 热-力复合环境试验技术,及发射场火灾事故地面模拟 试验、空气动力学加热试验、热冲击试验等异常环境 安全性试验技术,建立了同位素热源环境试验能力, 并进行了某些模拟环境试验,为探测器同位素热源研 制任务提供了技术支撑。

参考文献

[1] 王廷兰. 深空探测用同位素电源的研究进展 [J]. 电源技术,2015, 39(7):1576-1579.

Wang T L. Progress of radioisotope thermoelectric generator for deep space exploration [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2015, 39(7): 1576-1579.

- [2] 任德鹏,贾阳,刘强. 同位素温差电源辐射器的散热特性研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报,2009,41(11):165-168.
 Ren D P, Jia Y, Liu Q. Heat transfer performance of radiator for radioisotope thermoelectric generator [J]. Journal of Harbin institute of
- [3] 康海波. 同位素电源系统研究进展 [J]. 电源技术,2011,35(8):1031-1033.

technology, 2009, 41(11): 165-168.

Kang H B. Review of isotopic power system [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2011, 35(8): 1031-1033.

- [4] 吴伟仁,王倩,任保国,等. 放射性同位素热源/电源在航天任务中的应用 [J]. 航天器工程,2013,22(2):1-6.
 Wu W R, Wang Q, Ren B G, et al. Application of RHU/RTG in space Missions [J]. Spacecraft Engineering, 2013,22(2):1-6.
- [5] 侯欣宾,王立. 美国空间同位素能源装置发展现状[J]. 航天器工程, 2007,16(2):41-49.
 Hou X B, Wang L. Introduction of US space radioisotope power systems

[J]. Spacecraft Engineering, 2007, 16(2): 41-49.

[6] Zhang X L, Yu K P, Bai Y H, et al. Thermal vibration characteristics of fiber-reinforced mullite sandwich structure with ceramic foams core[J]. Composite Structures, 2015; 31(1):99-106 [7] 王智勇. 飞行器气动加热环境与结构响应耦合的热结构试验方法[J].强度与环境,2006,33(4):59-63.

Wang Z Y. Thermo-structural experiment coupling of aero heating environment and structural response of aerocraft[J]. Structure & Environment Engineering 2006, 33(4): 59-63. 作者简介:

胡字鹏(1987-),男,高级工程师,主要研究方向:环境试验技术。 通信地址:四川省绵阳市919信箱402分箱(621999) 电话:(0816)2482483 E-mail:hjhuyp@caep.cn

Environment Testing Technology of Radioisotope Heat Source for Deep Space Exploration

HU Yupeng*, LU Liang, XIANG Yanhua, LI Sizhong, HU Wenjun, HU Shaoquan

(Institute of System Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

Abstract: In order to ensure security and reliability of the radioisotope heat source for deep space exploration, the research on the environment testing technology of the radioisotope heat source is conducted. The test items are concluded by analyzing the mission profile during the whole life of the radioisotope heat source for deep space exploration. The high temperature-centrifuge, high temperature-impact, high temperature-vibration compound environment testing technologies are studied, and the technologies of ground simulation test for launch site fire accident, aerodynamic heating and thermal shock is also discussed in detail. The capacity of the environment reliability test and abnormal condition security test for the radioisotope heat source for deep space exploration.

Key words: deep space exploration; radioisotope heat source; environment testing technology; compound environment test; abnormal condition security test

[责任编辑:杨晓燕,英文审校:朱鲁青]