

重大工程装备

国外空间核反应堆地面试验能力进展综述

赵丰鹏^{1,2}, 林柯^{1,2}, 魏强^{1,2}, 李继承^{1,2*}, 范宣华^{1,2}, 陈军红^{1,2}, 胡文军^{1,2}(1. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳, 621999;
2. 工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室, 四川 绵阳, 621999)

摘要: 针对国外空间核反应堆的发展历程、地面试验以及地面试验设施等进行详细调研, 涵盖非核试验和涉核试验等方面, 系统总结了国外空间核反应堆的地面试验能力, 并给出该领域今后相关研究的展望和建议。相关工作总结可为国内空间核反应堆地面试验能力建设提供参考。

关键词: 空间核反应堆; 发展历程; 地面试验; 试验内容; 试验流程; 试验设施

中图分类号: V57 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9242(2025)01-0152-18

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.01.016

Research Advance on Foreign Ground Test Capability for Space Nuclear Reactor

ZHAO Fengpeng^{1,2}, LIN Ke^{1,2}, WEI Qiang^{1,2}, LI Jicheng^{1,2,*}, FAN Xuanhua^{1,2}, CHEN Junhong^{1,2}, HU Wenjun^{1,2}

(1. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Sichuan Mianyang 621999, China; 2. Shock and Vibration of Engineering Materials and Structures Key Laboratory of Sichuan Province, Sichuan Mianyang 621999, China)

ABSTRACT: In this paper, the research advance on the foreign ground test capability for space nuclear reactors is reviewed comprehensively, including the development history of foreign space nuclear reactors, the ground test approaches and related test facilities, etc., and both non-nuclear and nuclear tests are involved. Besides, some prospect and suggestions on the future research in this field are given integrated with related analysis. Related overview is beneficial to provide guidance for the development of ground test for space nuclear reactors in China.

KEY WORDS: space nuclear reactor; development history; ground test; test content; test procedure; test facility

空间电源是维持航天器正常运转的动力, 主要有化学能、太阳能和核能等, 不同空间电源的适用功率范围及适用任务周期互不相同。几种主要电源的适用范围分别为^[1]: 1) 化学电池可提供高达 6 000 kW 的电功率, 通常服务于短期任务, 如执行短期任务的返回式卫星; 2) 太阳能电池在 10~50 kW 功率量级

最为高效, 具有较长的使用寿命, 但不适用于提供瞬间大功率输出, 通常服务于光照条件良好、中等功率水平的长期任务, 例如目前绝大多数地球轨道航天器; 3) 放射性同位素电池输出功率较小 (千瓦以下), 可长周期连续提供电力, 适用于光照不足、功率需求不太高的长周期无人深空探测任务以及星

收稿日期: 2024-08-10; 修订日期: 2024-10-15

Received: 2024-08-10; Revised: 2024-10-15

基金项目: 国家国防科技工业局科研专项项目 (KJSP2023020304); 四川省自然科学基金杰出青年科学基金 (2023NSFSC1913)

Fund: Scientific Research Special Project of State Administration of Science, Technology and Industry for National Defence, PRC (KJSP2023020304); Outstanding Young Scientist Foundation of Sichuan Province of China (2023NSFSC1913)

引文格式: 赵丰鹏, 林柯, 魏强, 等. 国外空间核反应堆地面试验能力进展综述[J]. 装备环境工程, 2025, 22(1): 152-169.

ZHAO Fengpeng, LIN Ke, WEI Qiang, et al. Research Advance on Foreign Ground Test Capability for Space Nuclear Reactor[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(1): 152-169.

*通信作者 (Corresponding author)

球表面探测任务; 4) 空间核反应堆电源几乎可以为任何寿命周期的任务提供无限制的电力供给, 但是考虑到其综合能效比, 通常应用中高功率 (大于 10 kWe) 需求的航天任务。

空间核动力主要包括核热源、核电源和核推进^[2]。其中, 核热源主要为同位素热源。核电源分为功率最大仅数百瓦的放射性同位素电源和可达数千瓦到兆瓦的反应堆电源。核推进分为核热推进与核电推进, 核热推进是用热能直接加速推进工质; 而核电推进是把热能转换为电能, 用电能加速推进工质。截至 2018 年 12 月, 人类共发射了 74 个核动力航天器^[3] (美国 32 个, 俄罗斯 40 个, 中国 2 个), 其中 39 个为同位素电源, 35 个为核反应堆电源。针对空间核动力源的设计和安全性研究也取得了长足进展^[3-16]。

自 20 世纪 50 年代以来, 美俄等航天大国对空间核反应堆电源开展了全面深入的研究设计、地面试验和在轨应用。空间核反应堆电源的研制离不开地面试验, 从材料/组件到子系统再到系统, 每一步都需要不断地通过地面试验来进行验证和改进。空间核反应堆的安全性至关重要, 发射前需要通过地面试验进行安全性鉴定。目前已有工作对同位素热源等空间核动力相关环境试验技术进行了梳理^[17], 但仍鲜见针对空间核反应堆地面试验研究进展的系统性总结。因此, 本文针对国外 (主要是美国和苏联/俄罗斯) 空间核反应堆发展历程、空间核反应堆的地面试验及相应地面试验设施等进行详细调研, 包括地面试验内容、试验顺序和试验设施等, 系统总结了国外空间核反应堆的地面试验能力, 为国内相关能力建设提供参考。

1 国外空间核反应堆研发情况

1.1 发展历程

不同空间电源的适用功率范围及适用任务周期如图 1 所示^[18]。其中, 空间核反应堆电源通过持续的链式裂变反应产生热量, 由冷却剂将热量带出至热电转换系统进行发电, 为航天器或星球表面基地 (如图 2 所示) 提供电能。其优点在于不依赖太阳、能量自主产生、能量密度高等, 可突破太阳能电池功率上限 50 kWe 的瓶颈。

自 20 世纪 50 年代以来, 美国和苏联/俄罗斯对空间核反应堆电源开展了全面深入的研究设计、地面试验和在轨应用^[19], 其发展脉络如图 3 所示。从 1965 年到 1988 年, 入轨的空间核反应堆电源共计 35 个, 见表 1^[1], 均为低功率 (最大 5 kWe) 和短寿命 (1 a 以内) 电源, 主要用于卫星。1988 年以后, 由于太阳能电池技术迅速发展, 空间核反应堆不再发射入轨, 但美苏仍持续投入研究, 发展了反应堆工程、热

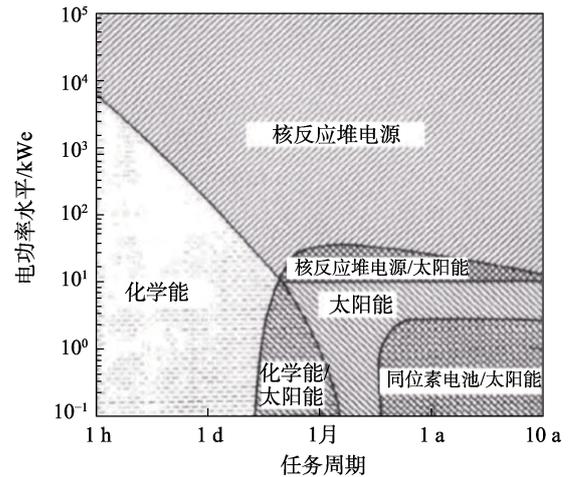


图 1 空间能源类型及适应的功率和寿命范围^[18]

Fig.1 Space energy types as well as corresponding ranges of power and lifespan^[18]



图 2 基于空间核反应堆的星球表面科研站^[19]

Fig.2 Research station based on space nuclear reactors on planetary surface^[19]

电转换、传散热等关键技术。苏联解体后, 美国从俄罗斯引进了当时最先进的 6 套 TOPAZ-II 型空间核反应堆电源, 加速其新型空间核反应堆电源研究进展。21 世纪以来, 太阳能已无法有效满足星球表面科研站等深空探索和 100 kWe 以上功率需求, 空间核反应堆的研发再次得到快速发展。

1.2 功率水平

2015 年美国 NASA 发布了空间核动力技术路线图, 基于满足相关任务架构的要求, 将空间核反应堆电源分为 3 个功率水平 (1~10 kWe, 10~100 kWe, 1~5 MWe), 分别用于科学探索、载人星体/载人小行星探索、载人火星探索任务。其中, 1~10 kWe 级的主要代表包括美国的 SNAP-10A 和 KiloPower、苏联的 BUK 和 TOPAZ^[20-22]; 10~100 kWe 级的主要代表包括美国的 SP-100^[23]、冰覆木卫轨道飞行器 JIMO (Jupiter IceMoon Orbiter)^[24-25] 和星体表面裂变反应堆电源 FSP (Fission Surface Power) 项目^[26]; 1~5 MWe 级尚处于探索阶段, 美国、俄罗斯和欧盟都开展了对兆瓦级空间核反应堆电源的探索研究^[27-31]。不同功率水平空间核反应堆电源的相关参数见表 2, 结构如图 4~6 所示。

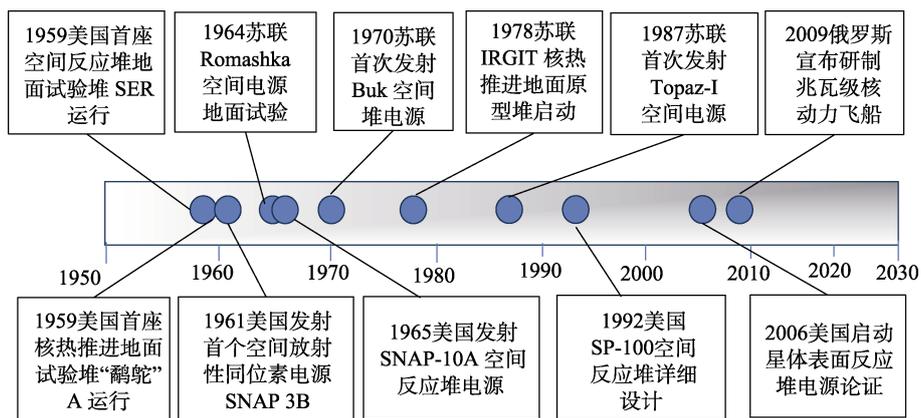


图3 美国和苏联/俄罗斯空间核动力发展脉络

Fig.3 Development history of space nuclear power in the United States and the Soviet Union/Russia

表1 空间核反应堆电源应用情况^[1]

Tab.1 Application of power supply in space nuclear reactors^[1]

序号	国别	发射日期	航天器	电源型号	寿命
1	美国	1965/4/3	Snapshot	SNAP-10A	43 d
2	苏联	1970/10/3	“宇宙”367	BUK	110 min
3	苏联	1971/4/1	“宇宙”402	BUK	<3 h
4	苏联	1971/12/25	“宇宙”469	BUK	9 d
5	苏联	1972/8/21	“宇宙”516	BUK	32 d
6	苏联	1973/12/27	“宇宙”626	BUK	45 d
7	苏联	1974/5/15	“宇宙”651	BUK	71 d
8	苏联	1974/5/17	“宇宙”654	BUK	74 d
9	苏联	1975/4/2	“宇宙”723	BUK	43 d
10	苏联	1975/4/7	“宇宙”724	BUK	65 d
11	苏联	1975/12/12	“宇宙”785	BUK	<3 h
12	苏联	1976/10/17	“宇宙”860	BUK	24 d
13	苏联	1976/10/21	“宇宙”861	BUK	60 d
14	苏联	1977/9/16	“宇宙”952	BUK	21 d
15	苏联	1977/9/18	“宇宙”954	BUK	43 d
16	苏联	1980/4/29	“宇宙”1176	BUK	134 d
17	苏联	1981/3/5	“宇宙”1249	BUK	105 d
18	苏联	1981/4/21	“宇宙”1266	BUK	8 d
19	苏联	1981/8/24	“宇宙”1299	BUK	12 d
20	苏联	1982/5/14	“宇宙”1365	BUK	135 d
21	苏联	1982/6/1	“宇宙”1372	BUK	70 d
22	苏联	1982/8/30	“宇宙”1402	BUK	120 d
23	苏联	1982/10/2	“宇宙”1412	BUK	39 d
24	苏联	1984/6/29	“宇宙”1579	BUK	90 d
25	苏联	1984/10/31	“宇宙”1607	BUK	93 d
26	苏联	1985/8/1	“宇宙”1670	BUK	83 d
27	苏联	1985/8/23	“宇宙”1677	BUK	60 d
28	苏联	1986/3/21	“宇宙”1736	BUK	92 d
29	苏联	1986/8/20	“宇宙”1771	BUK	56 d
30	苏联	1987/2/1	“宇宙”1818	TOPAZ-I	142 d
31	苏联	1987/6/18	“宇宙”1860	BUK	40 d
32	苏联	1987/7/10	“宇宙”1867	TOPAZ-I	342 d
33	苏联	1987/12/12	“宇宙”1900	BUK	124 d
34	苏联	1988/3/14	“宇宙”1932	BUK	66 d
35	苏联	1988/3/15	“宇宙”1933	BUK	60 d

注：“宇宙”系列海洋雷达侦查卫星，用于监视美国的核潜艇在各大洋上的行踪。

表 2 空间核反应堆电源参数^[20-26]
Tab.2 Technology parameters of space nuclear reactors^[20-26]

功率水平/kWe	代号	电功率/ kWe	热功率/ kW	质量/ kg	尺寸	出口温 度/K	燃料和堆型	冷却剂	能量转换	寿命/a	国家
10	SNAP-10 A	0.5	40	432	长约 3.5 m, 直径约 1.3 m	833	U-ZrH 热堆	NaK-78	Si-Ge 温差	1	美国
	BUK	<3	<100	1 250	长约 5.8 m, 直径约 1.3 m	973	U-Mo 快堆	NaK	温差 Si-Ge	1	苏联
	TOPAZ-I	5~6	109	1 200	长约 4.7 m, 直径约 1.3 m	880	UO ₂ 超热堆	NaK-78	热离子	1	苏联
	TOPAZ-II	6	115	1 061	长约 3.9 m, 直径约 1.4 m	823	UO ₂ 超热堆	NaK-78	热离子	3	苏联
100	SP-100	100	2 400	4 460	发射尺寸长 6 m, 宽 4 m, 展开长 22.5 m	1 375	UN 快堆	液 Li	Si-Ge 温差	10	美国
	JIMO	200	1 000	3 309	—	1 150	UO ₂ 或 UN 气冷 快堆	He-Xe 惰 性气体	布雷顿	15~20	美国
	FSP	40	186	5 820	7 m×3 m×3 m, 2 个辐射翼每个展 开 16 m×4 m	850	UO ₂ 快堆	NaK-78	斯特林	8	美国

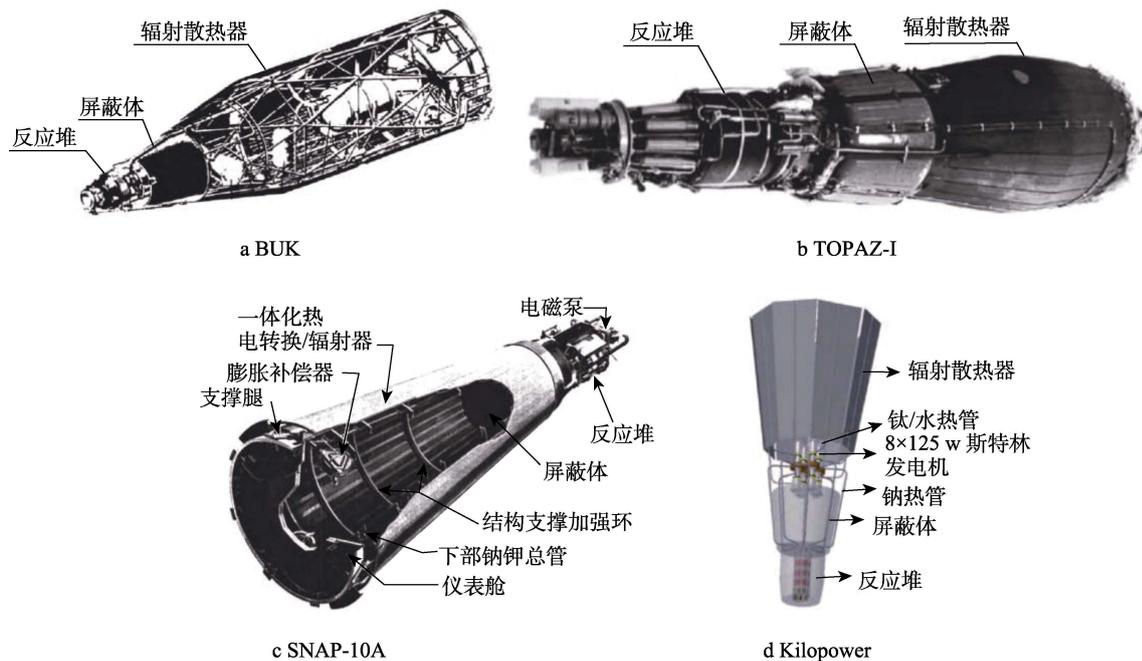


图 4 小功率空间核反应堆结构图^[20-22]
Fig.4 Structure of low-power space nuclear reactors^[20-22]

2 国外空间核反应堆地面试验

空间核反应堆与陆上核反应堆的环境明显不同^[6], 发射时反应堆要承受 10g 左右的加速度、数 g 的机械振动, 而进入轨道后又处于失重状态, 处于绝对零度低温环境以及高真空状态, 还需考虑潜在宇宙尘埃的冲击。因此, 对空间核反应堆的安全要求明显不同于陆上核反应堆, 主要体现在以下方面:

1) 确保反应堆在到达运行轨道前, 包括火箭爆炸、再入大气层、撞击到地面或水面、淹没在水中或

者水浸入堆芯等任何情况下都不会达到临界状态。

2) 核反应堆在发生事故或任务结束后必须停堆。

3) 核反应堆在裂变产物充分衰变到对人类无害水平所需时间内, 必须与人员隔离。若无条件进行隔离, 须将反应堆分散开(解体), 确保对放射性沉降区域人类安全。

为研制空间核反应堆, 美国和苏联/俄罗斯开展了大量的地面试验和分析^[32]。由于涉及的空间核反应堆原理不同, 堆型较多(如美国的 SNAP-10A、SNAP-2、SNAP-8、SNAP-50、SPAR 和 SP-100, 以

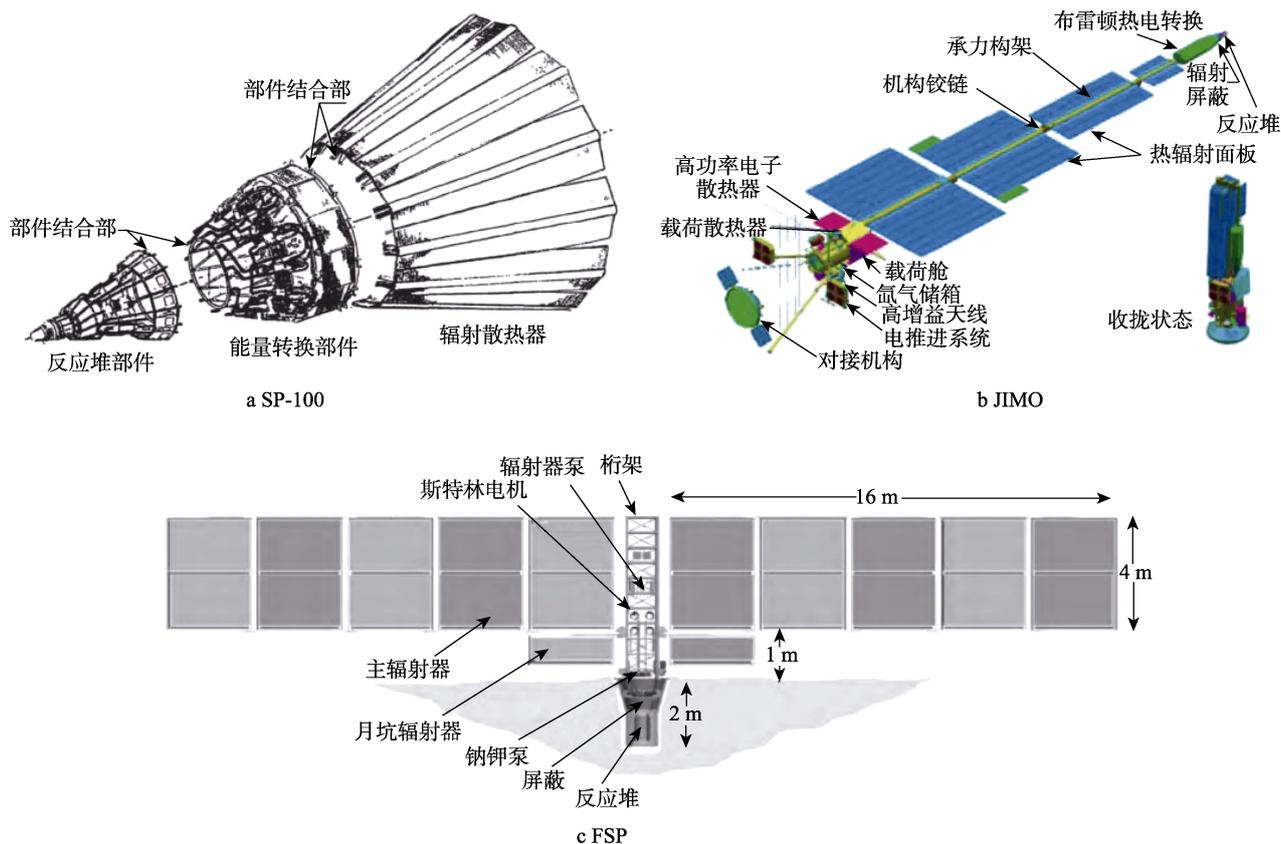


图5 大功率空间核反应堆结构^[23-26]
Fig.5 Structure of high-power space nuclear reactors^[23-26]

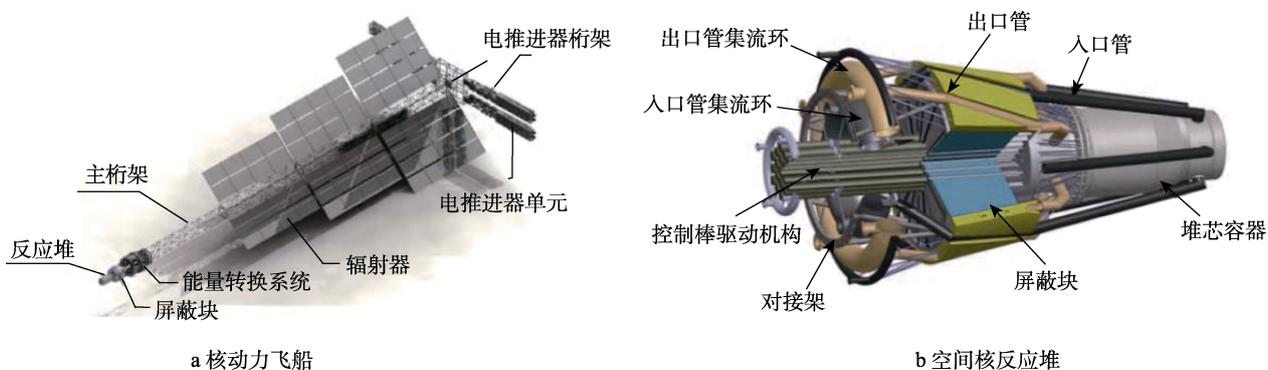


图6 俄罗斯兆瓦级核动力飞船及其空间核反应堆^[28]
Fig.6 Structure of Russian megawatt-class nuclear powered spacecraft and corresponding space nuclear reactor^[28]:
a) nuclear powered spacecraft; b) space nuclear reactor

及苏联/俄罗斯的 TOPAZ-I、TOPAZ-II、BUK 系列空间核反应堆^[33]，其地面试验的内容和项目也存在差异，以下将对主要空间核反应堆型号的地面试验分别进行介绍。

2.1 SNAP 空间核反应堆地面试验

1959年3月，美国的 SNAP-10A 项目启动并决定用于一颗侦察卫星，功率需求为 500 W。SNAP-10A 项目建造了 8 个结构模型及其鉴定系统，其中 3 个用于结构试验，3 个用于热真空试验，2 个用于系统鉴定。2 个鉴定系统包含 1 个核系统和 1 个非核系统(用

电加热器来模拟反应堆堆芯)，这 2 个系统的其他硬件均与正样状态一致。SNAP-10A 燃料为 U235-ZrH，热电转换方式为温差，冷却剂采用 NaK，其系统外形和结构如图 7 所示，堆芯结构如图 8 所示。

2.1.1 环境适应性和可靠性试验

为节省费用和减少“建造-测试-维修”循环次数，美国 SNAP-10A 项目计划从组件研制和鉴定开始，最后集成为完整系统^[34]。SNAP-10A 项目很多组件的研制都考虑了 SNAP 反应堆家族其他型号 (SNAP-2、SNAP-8) 的兼容性。各种组件针对每个型号进行的

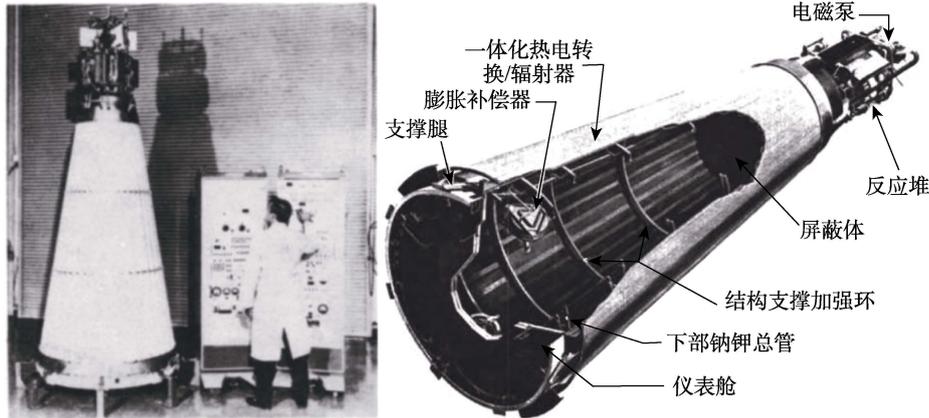


图 7 SNAP-10A 系统^[33]
Fig.7 SNAP-10A system^[33]

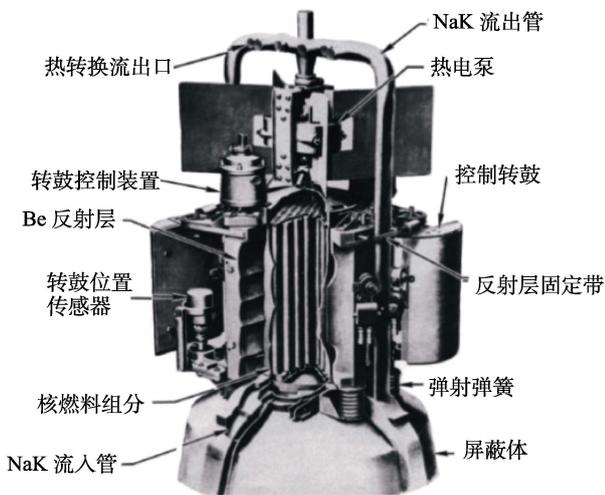


图 8 SNAP-10A 堆芯结构^[33]
Fig.8 Structure of SNAP-10A reactor core^[33]

适应性改动设计, 都必须进行环境适应性(真空、动力学、热测试等)考核, 例如控制系统的制动器、轴承、齿轮、润滑油等^[35]。燃料的研制和试验分别在 SNAP-2 试验堆 (SER 或 S2ER)、SNAP-2 研制堆 (S2DR)、SNAP-8 试验堆 (S8ER) 和 SNAP-10A 的 FS-3 反应堆中进行, 测试了不同的运行功率、温度对燃料和包层的影响。

为验证电力转换系统的飞行试验, SNAP-10A 项目也进行了相应的地面试验项目。先对 1 300 个模块进行模块化验收、开发、鉴定试验, 包括冲击、振动、静载、热循环, 证实转换系统的可靠度超过 0.996^[36]。类似的开发经验均用在了 SNAP-10A 的主要部件上,

热电泵、NaK 管路分别进行了 14 000 h 的寿命试验和 500 h 的膨胀补偿试验, 所有的电路仪表至少进行 90 d 的性能试验。项目早期主要进行组件试验, 后期则侧重于子系统和系统级试验, 主要针对 2 个方面: 一者是 SNAP-10A 系统与 Agena 航天器的联合运行, 另一者为完整 SNAP-10A 系统的性能试验。

SNAP-10A 系统的性能通过 3 个完整系统样机的序贯试验来获取, 模拟了“工厂-转运-飞行”的全过程。其中 2 个样机系统采用电加热以简化试验设施, 且在试验后能直接获取数据, 不必考虑放射性材料复杂的后处理。第 1 个系统于 1963 年 5 月开始试验, 完成了 90 d 模拟空间耐久性试验; 第 2 个系统使用了最终飞行硬件, 在试验中确认了第一个系统获得的结果, 并通过改进组件开发状态, 实现了系统性能的提升; 第 3 个系统是核地面试验系统, 使用了完整的反应堆作为热源。代号 FS-3 的核地面试验系统于 1964 年 8 月投入试验, 其流程如图 9 所示。在模拟空间环境中开展地面试验, 依次通过了全部环境循环测试, 包括冲击和振动、堆自动启动、在真空容器中的长时耐久性等, 经历的序贯试验包括了从装配完成到入轨过程各环节的重要环境。该系统通过了 10 005 h 不间断全功率运行试验, 并按计划于 1966 年 3 月 15 日关闭。

FS-3 核地面试验系统在冲击振动实验室进行振动试验与性能试验时的照片如图 10 所示。冲击振动试验包括 3 个正交轴方向上频率范围 5~2 000 Hz 的正弦输入, 临界结构频率为侧向 16 Hz、纵向 40~225 Hz, 试验中仅出现小托架扭曲、连接件松动等

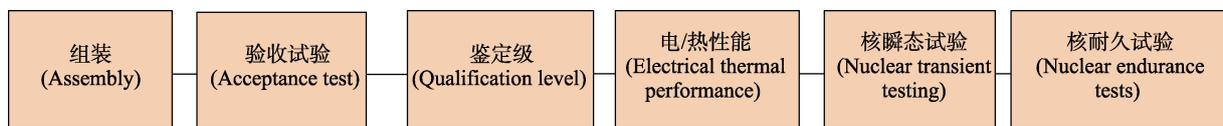


图 9 美国 SNAP-10A 项目核地面试验流程^[36]
Fig.9 Ground nuclear test procedure in SNAP-10A project^[36]

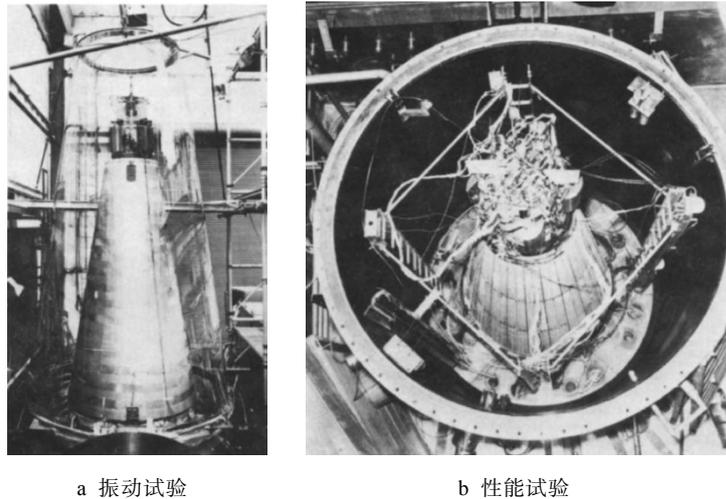


图 10 SNAP-10A 核地面试验系统的振动试验和性能试验^[36]

Fig.10 Vibration test and performance test in ground nuclear test system of SNAP-10A^[36]: a) vibration test; b) performance test

情况,未发生其他技术问题^[36]。冲击振动试验后,将该系统安装到地下屏蔽室内的真空容器中进行环境性能试验,真空试验条件确保所有的热耦合通过辐射实现而非通过对流,但未精确模拟外太空环境,试验真空度保持在 0.133~0.013 3 Pa,热沉温度为日常城市冷却水温(约 26.7℃)。

系统启动试验是为了尽可能模拟在轨启动,试验人员仅需发送启动命令给系统,SNAP-10A 的内部系统自动控制燃料插入,运行所有预设程序,并使系统稳定在满功率条件下。FS-3 系统的核地面试验获得了多个具有重要意义的发现:1)单独部件在系统试验中的表现近似等同于其在单独组件试验中的表现;2)温度、真空和辐射的联合效应在经历不同辐照损伤的组件试验中得到了充分模拟,至少超过了 SNAP-10A 的总累积通量;3)组件的退化在预料之中,未发生灾难性的耐久性环境问题或环境导致的失效;4)系统的运行非常稳定。

2.1.2 安全性鉴定试验

美国 SNAP-10A 空间核反应堆安全试验认证中的力学和热化学试验分为材料冲击试验、部组件冲击试验和整体级试验等。材料冲击试验包括 316 不锈钢、LiH 合金、钨、TaW 合金、ZrH 燃料材料、铬镍铁合金、圆柱壳体材料、复合结构材料等 8 项冲击试验。部组件冲击试验主要为圆柱形堆芯解体试验,解体设计可防止异常事故时的辐射增殖。该试验需要从 30.5m 高度(空间核反应堆在运载工具上的安装高度)跌落至混凝土靶面,同时考虑发射场事故环境,空间核反应堆需暴露在推进剂火烧环境中,或者空间核反应堆经历撞击后,其 NaK 管发生破坏,并与推进剂和水发生相互作用。整体级冲击试验主要包括:LOX 喷射、LOX-NaK 相互作用喷射、H₂O-NaK 相互作用、

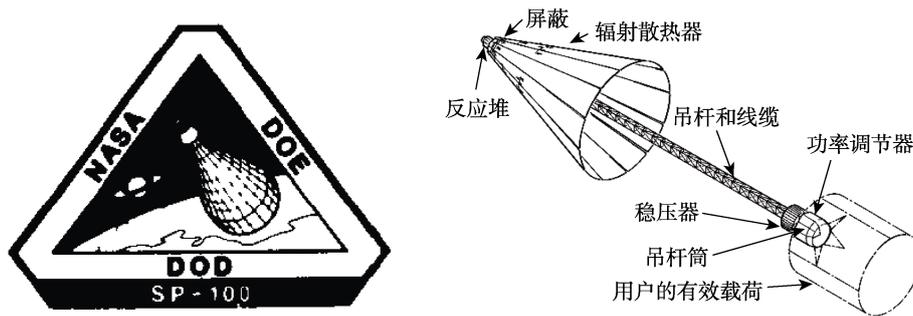
火烧、爆炸、转鼓锁定爆炸螺栓火烧、小端正跌、大端正跌、侧面跌落、高速撞击(171 m/s)、高速入水(130~182 m/s,侧碰、头碰、尾碰)等 15 项试验。

2.1.3 核安全性评估试验

SNAP-10A 到达轨道后才启动运行,其轨道时限为 3 700 a,远超反应堆在 1 a 寿命期内产生的放射性核素约 300 a 的衰变期,因此地面上的制造、运输、集成及最终状态都不会受到其放射性的威胁。经过了一系列全面测试、冲撞-挤压试验,以及火灾和水浸试验,结果充分证明,除非到达预定轨道后发生程序控制指令错误,否则反应堆不会投入运行或达到临界状态。SNAP-10A 的设计中包含了 2 个大型发射安全反射层元件和 2 个大型反应性控制元件,在地面遥控信号控制下,或反应堆出现冷却剂丧失、冷却剂泵掉电、超功率等事故时,或者再入加热时,这些由 Be 材料制成的反射体会弹出并致使反应堆停堆,以确保安全。

2.2 SP-100 空间核反应堆地面试验

1980 年,为应对苏联洲际弹道导弹的威胁,美国国防部(DOD)战略防御倡议办公室(SDIO)启动了 SP-100 空间核反应堆电源计划,为天基防御系统提供 100 kW 以上的电源支持。SP-100 设计为 10~1 000 kW 电功率、10 a 寿命、可进行比例调整的电源系统。该项目使用了一种分阶段计划方法进行设计,进而增大了系统功率和任务寿命,并降低了系统比质量(kg/kWe)^[33],相应多功率水平使其具有普遍适应性。项目前期,DOD 和 NASA 提供基于 SP-100 的航天任务,NASA 负责管理功率转换,DOE 负责管理计划的核技术部分,项目标记和结构设计如图 11 所示。

图 11 SP-100 项目标记及结构设计^[35]Fig.11 Logo of SP-100 project and corresponding structure design^[35]

SP-100 项目原计划分为 3 个阶段: 第 1 阶段是技术评估和改进; 第 2 阶段是地面试验, 建立样机并进行地面验证; 第 3 阶段是飞行鉴定^[37]。在计划前期, 主要集中开展系统权衡研究和关键技术可行性研究, 最终选择了一个氮化铀(Uranium Nitride, UN)燃料、锂冷堆与温差转换相结合的方案, 热管辐射板用来排散废热^[38]。此后转而以 NASA 任务为中心, 降低了难度和技术要求(减寿增质量), 演化为 20~40 kW 的系统。为了满足比例调节的要求, SP-100 采取了模块化设计, 其热电转换系统位于反应堆外部, 因而可方便地变换使用不同的热电转换系统(温差、布雷顿、朗肯、斯特林、热光伏、碱金属、堆外热离子等)。因此, SP-100 反应堆、屏蔽和热排散分系统可以直接与备选的动态转换设备耦合。从 1985 年到 20 世纪 90 年代初, SP-100 经历了从概念设计发展到飞行系统设计以及特定部件设计、开发和测试等多个阶段。1994 年项目终止时, 除电磁泵和热电转换装置仍需在液态锂回路中进行部件耦合试验外, SP-100 正准备进入详细设计、制造和鉴定(认证)状态。该项目虽然最终没有实现在轨应用, 却将美国的空间核反应堆电源技术带入了百千瓦时代, 为美国后续的大功率核电源技术研发(如 JIMO 项目等)奠定了良好基础。

2.2.1 材料、组件和子系统试验

SP-100 的材料研制涉及燃料和结构构件的组装和试验。UN 燃料及其 Nb-Zr 包层在反应堆中进行了辐照试验, PWC-1 包层的辐照试验由于项目取消而未完成。项目进行了堆芯装配并开展了临界装配试验, 以验证临界计算方法的技术成熟度。DOE 下属的爱达荷国家工程实验室(Idaho National Engineering Laboratory, INEL)成功开展了一系列的反应堆临界试验, 试验结果显示, 安全性临界可以满足发射、运行、非正常和再入条件, 在淹没和掩埋时堆芯仍不会达到临界状态, 确认了预计保证达到临界所需的燃料加载量的准确性、控制元件的参数、空间功率分布, 以及假定事故的影响等方面。

2.2.2 系统级地面试验

DOE 负责核子系统及其地面试验的硬件研发, 包括通用飞行系统(Generic Flight System, GFS)设计、地面工程系统(Ground Engineering System, GES)设计、工程开发和地面试验以验证飞行系统技术成熟度等。1986 年, 西屋汉福德公司进行了场地初步设计^[39], DOE 选定通用电气公司作为反应堆系统(通用飞行系统 GFS 和地面工程系统 GES 中的反应堆)的主承包商。1988 年, 西屋汉福德公司针对通用飞行系统 GFS 反应堆提出了地面试验场地详细设计^[40]。地面工程系统(GES)的试验目标是验证全尺寸样机反应堆系统(包括反应堆、控制系统、飞行屏蔽等)在空间环境中的性能, 为 SP-100 空间核反应堆电源系统的设计和应用建立信心, 解决飞行任务设计发展所面临的技术问题。

SP-100 的 GES 项目装配级核试验是核装配体试验(Nuclear Assembly Test, NAT), NAT 项目计划在模拟空间条件的真空容器保护壳体中进行长达 2 a 的反应堆运行, 用于验证核装配体的性能。试验对象包括 SP-100 反应堆、测量仪器、控制系统、一回路传热系统和辐射屏蔽子系统等飞行系统设计所需要的技术样机, 样机将经历大量的试验, 用以证明设计中所使用的分析方法和数据足够预测性能, 并适合表征相应的试验对象。

GES 项目将按照以下顺序进行试验: 1) 零功率试验, 包括干反应堆临界、热功能性试验和充锂反应堆临界试验, 用以鉴定所选定设备的运行, 确定反射器控制单元临界位置, 鉴定堆芯中子设计等; 2) 模拟空间启动, 包括初始反应堆解冻、低流动反应堆控制稳定性试验等; 3) 试验装配体全功率和全温度范围运转试验, 以期尽可能完全地表征试验装配体; 4) 核子系统性能试验, 试验中需测量具体的关键反应堆、控制、屏蔽特征, 以提供方法确认和数据用于预测集成核子系统性能; 5) 模拟 RFS 功率试验, 包括飞行系统启动和关闭、飞行系统机动功率、飞行系统紧急停堆和重启和长期保持全功率运行的耐久性等方面; 6) RFS 异常条件试验, 在非正常条件下运行,

模拟飞行系统在组件失效时的响应。

2.2.3 飞行安全性试验^[41]

SP-100 电源系统鉴定(PSQ)安全性项目包含 3 类试验:承受发射火灾和爆炸;再入完整性;落地碰撞时保持临界。安全性项目针对的是 SP-100 通用飞行系统(Generic Flight System, GFS)和相应的 GFS 任务,该任务需将反应堆运行在高(1 000 km 量级)地球轨道,确保到轨之前的所有阶段不临界。任务时间为 10 a,其中有 7.3 a 为全功率运行。当任务结束时,反应堆将关闭,并可能转移到永久的报废位置,同时要求具有再入完整性和在碰撞时不发生临界的能力。在 PSQ 项目中,验证试验聚焦于技术成熟度,目标是建立数值模拟分析方法,以保证飞行承诺。

空间核反应堆电力系统(SRPS)设计和 GFS 任务二者结合,要包络多种任务特定需求。为了 GFS 飞行任务和 SRPS 设计,安全性验证要求通过数值模拟分析覆盖大量的假定事故条件,所涉及 4 个方面的模拟分析如下。

1) 临界分析。在假定事故条件下,预测核临界的主要分析工具是三维蒙特卡罗分析,使用 MCNP 软件。临界试验是在零功率物理反应堆进行,验证 SP-100 燃料材料在模拟正常和事故环境条件下的表现。分析结果显示,试验和数值模拟结果的一致性超过 99%。

2) 安全棒保持试验。其分为 4 个部分,分别为材料性能试验、敏感度分析和详细试验计划、分析验证试验、完整的高速碰撞试验。材料性能试验确定 SP-100 结构材料(主要是 PWC-11)力学行为的应变率效应。敏感度分析采用 DYNA3D 和 DYNA2D 软件,制定第 3 和第 4 部分的详细试验计划。其中,在第 3 部分,对比几何体高应变率试验的测量结果与 DYNA 软件预测结果,第 1 个试验物体是简单棒和圆柱体,然后试验扩展到更复杂的试验物体,包括由单个 SP-100 燃料与相应蜂窝支撑结构部分组装而成的实尺度模型(mock-up)的压缩压溃试验。最后,使用火箭橇设施进行反应堆的缩放模型高速碰撞混凝土试验。

3) 发射场火灾试验。该试验也包括 4 个部分,分别为固体推进剂火灾表征、敏感度分析和详细试验计划、分析验证试验、完整火灾试验。第 1 部分的目标是定义火灾环境,并发展支撑该主张所需要的数据库,该部分以分析已有数据为主,必要时开展额外的推进剂燃烧试验,然后进行对 Agena 航天器火灾分析模型的敏感度分析与火灾表征任务,以指导任务方向和计划后 2 部分。接着使用辐射热灯模拟火灾环境,用简单几何体(比如同轴圆柱体)分析验证试验,将分析预测与 Agena 航天器模型关联起来。最后将小尺寸缩比模型暴露于燃烧的推进剂,测量试验对象,与

仿真结果对比,进而校准三维模拟模型。

4) 再入试验。再入圆锥体的材料辐照用以确认初始预期判断,也即暴露于 SP-100 全部任务时间的辐照,并不会在尺寸、传热性能或结构性能方面产生能够削弱结构再入性能的改变。由于这些材料所处的辐照和热环境,与辐射屏蔽表面具有可比性,因此其辐照试验有可能与辐射屏蔽材料的辐照试验一起进行。

2.3 TOPAZ-II 空间核反应堆地面试验

TOPAZ-II 空间核反应堆由苏联研制,原名叶尼塞(Yenisey)空间核反应堆,由于其热功率为 135 kW,最大电功率为 5.5 kW,质量、尺寸与 TOPAZ-I 类似,西方称之为 TOPAZ-II。从 1969 到 1989 年,开展了多项地面试验,测得多种工况下的临界状态参数,包括系统运行、核特性、启动特性、静载作用下单位强度、发射环境下温度分布/剖面等。相关试验证明, TOPAZ-II 系统可满足能量和生命周期需求,地面试验项目分为 4 类。

1) 热物理试验。该试验也是系统鉴定试验的一部分,采用电加热方式,主要内容是在堆系统中注入热工质以及工作气体,验证反应堆在无核状态下的运行能力。项目共进行了 12 次试验,每次一般持续 1 000 h。

2) 力学试验。共包括 3 类,即静力试验、振动试验和撞击/冲击试验,目的是评估 TOPAZ-II 系统在发射和分离过程中的强度和可操作性。静力试验是验证主要承载结构在施加集中载荷作用下的结构完整性;振动试验用来模拟运输和发射过程中的振动环境;撞击/冲击试验是为了模拟航天器与运载器在发射分离状态下的冲击响应。该项目共进行了 4 次静力试验、2 次振动试验和 2 次撞击/冲击试验。

3) 核地面试验。目的是验证反应堆的核性能和控制参数,同时验证系统在辐射环境下的长时运行能力。苏联共进行过 6 次试验,单次试验时间最长达 1.25×10^4 h (1.4 a)。在试验中发现燃料棒会发生退化及内部短路、辐射器管道泄漏、真空室蒸馏水泄漏等现象,其中影响空间核反应堆运行持续时间的最主要因素为管路密封性保持能力。

4) 低温试验,目的是保证反应堆子系统在发射时的热保持能力。由于 TOPAZ-II 采用 NaK 工质,其凝固点在 $-5 \sim -11$ °C,而俄罗斯的发射场常年处于低温环境下,所以开展低温试验以验证 NaK 工质从预发射、发射和上升段是否处于流动状态。

苏联/俄罗斯发现引发停堆事故的最主要原因是 NaK 工质在长时运行之后容易发生泄漏。美国于 1992 年从俄罗斯进口了 2 台 TOPAZ-II 原型机及相关技术资料,也开展了相关的试验研究,同时依据美军标 MIL-STD-1540E、DOD-HDBK-343 和 QA 项目指南、

DOE 5700.6C 等文件开展了多项测试。然后对 TOPAZ-II 系统的自动控制系统、反临界装置、反应堆燃料、热防护系统以及散热器及承载框架进行了改进。在安全性试验方面, 美国增加了噪声试验, 并增加一些试验的载荷幅值量级, 改进了低温试验的发射加热需求。之后, 美国重新制定了各项试验的顺序为: 俄罗斯验收级试验→反应堆高功率水平测试→美国热性能和验收级试验→反应堆系统泄漏试验→无隔热罩的热试验→冲击和振动试验→热试验→快速启动试验→2 次快速启动试验→长时衰变试验→第 3 次快速启动试验, 总共的试验时间长达 7 724 h (约 11 个月)。

2.4 JIMO 空间核反应堆电源地面试验

美国为进一步加强核推进和空间核电源的开发, NASA 于 2002 年宣布开启美国太空核能新计划, 2003 年该计划更名为普罗米修斯 (Prometheus), 其首要任务是发射木星冰卫星轨道器 (Jupiter Icy Moons Orbiter, JIMO), 要求反应堆具有 200 kW 的电功率以及 15~20 a 的寿命。普罗米修斯计划依赖于一些未开发的技术, 致使项目风险增大, 该反应堆首要承包商团队认为计划期限内的 2 个主要挑战分别为核结构材料的研制、现有临界试验设施缺乏。

2.4.1 材料认证试验

普罗米修斯反应堆使用了快中子谱, 相比典型的陆地反应堆具有更高的运行温度和铀装料。高温环境中, 紧密快堆中很小的几何改变也会造成显著的中子改变, 并带来燃料肿胀、蠕变和热膨胀等, 将造成不确定性。为了认证核材料长时性能, 计划对候选材料进行 2 个辐照试验 (每个试验 2~3 a)。根据试验结果可以更好地理解在期望的运行温度和快中子谱中的材料行为, 从而帮助设计。当时美国没有快中子反应堆, 计划使用日本的 JOYO 设施进行燃料和核结构试验。一些热中子辐照试验也在爱达荷国家工程实验室 (INEL) 的先进试验堆 (Advanced Test Reactor, ATR, 见图 12) 和橡树岭国家实验室 (Oak Ridge National Laboratory, ORNL) 的高通量同位素堆 (High Flux Isotope Reactor, HFIR) 进行表征。

2.4.2 组件和系统认证试验

普罗米修斯反应堆系统的气体反应堆采用布雷顿循环设计, 具有显著的不确定性, 在项目早期导致系统效率存在高达 50% 的不确定性。后续项目认识到需要进行系统试验, 以识别控制挑战、最小化损失和解决潜在的材料不相容性等。系统试验从小尺寸组件开始, 然后是初始组件集成试验, 其他组件将被添加到集成系统, 用于验证系统性能或设计特征。电加热反应堆样机用于热试验模块的早期热试验、工程模型的早期样机试验和认证模型的全尺寸样机试验。



图 12 美国爱达荷国家工程实验室 (INEL) 的先进试验堆 (ATR) [40]

Fig.12 Advanced Test Reactor (ATR) at Idaho National Engineering Laboratory (INEL) in USA [40]

2.4.3 涉核系统认证试验

普罗米修斯项目将临界核试验划分为 3 阶段: 临界装配体基准试验, 用以提供初始信息和横截面测量; 模型试验, 用以认证设计方法和反应堆的核设计; 地面试验反应堆试验, 用以表征低功率、瞬态、高功率试验, 获得数据用于改进计算模型和运行程序。项目运行期间, 美国缺乏设施用于模型和临界试验, 计划使用日本的 JOYO 反应堆进行材料试验和快临界装配, 曾考虑使用俄罗斯的 BOR-60 反应堆和法国的 PHENIX 反应堆。同时, 考虑到国际关系的不确定性, 也准备使用样机地面试验反应堆设施, 并要求能够在非核试验中进行高效试验。

3 国外空间核反应堆地面试验设施

3.1 概述

国外空间核反应堆地面试验的设施按是否涉核可分为非核试验设施和涉核试验设施。对于空间环境试验, 其非核试验设施的主要设备是大型真空容器。大型真空容器可谓航天领域的国之重器, 全世界共有 20 多台 [42-46], 其中美国拥有直径超过 6 m 的大型空间环境试验设备十几台, 分布在美国航空航天局附属飞行中心及有关科研单位和私营公司, 用于不同的空间环境试验。俄罗斯、欧洲空间局、日本和印度也拥有不同规模和用途的大型和特大型真空容器, 以满足各自大型航天设备对空间环境试验的需要。其他的地面试验非核试验设施还包括离心机、振动台、跌落塔等。涉核试验设施一般由反应堆样机、核装配试验体、设施场地等组成。反应堆样机按照飞行试验的要求设计。核装配试验体一般由反应堆、屏蔽、控制和测量仪表等组成, 并且需要在大型真空容器中进行以年为单位的长时运行试验。设施场地包括用于安装核装配试验体及其大型真空容器的反应堆保护壳建筑, 以及相关的热系统、真空系统、装置保护系统、电力和通风系统、安保系统等。

3.2 SNAP 空间核反应堆地面试验设施

3.2.1 SNAP 反应堆设施

北美航空公司下属的国际原子公司 (Atom International, AI) 是核辅助电源系统 (Secondary Nuclear

Auxiliary Power, SNAP) 的主承包商, 负责反应堆电源的研制, 开发了 SNAP-2、SNAP-8、SNAP-10A 等反应堆。SNAP 计划下的反应堆设施的临界时间和相关运行情况见表 3, 其反应堆电源的主要参数见表 4^[42-46]。

表 3 SNAP 系列的核反应堆^[42-46]
Tab.3 Nuclear reactors in SNAP series^[42-46]

反应堆	代号	临界时间	关闭时间	热功率/kW	电功率/W	运行时间
SNAP-2 试验堆	S2ER	1959.9	1960.12	50	—	1 800 h(648 °C), 3 500 h(482 °C)
SNAP-2 研制堆	S2DR	1961.4	1962.12	65	—	2 800 h(648 °C), 7 700 h(>482 °C)
SNAP-8 试验堆	S8ER	1963.5	1965.4	600	—	12 080 h
飞行系统	FS-1	1963.5	1964.1	—	—	>2 160 h
飞行系统	FS-2(FSM-4)	1964.6	—	—	—	—
飞行系统	FS-3	1965.1	1966.3	38	402	10 005 h (417 d)
飞行系统	FS-4	1965.4	1965.5	43	560	43 d
SNAP-8 研制堆	S8DR	1968.6	1969.12	600/1 000	—	7 500 h

表 4 SNAP 系列核反应堆电源主要参数^[42-46]
Tab.4 Main power supply parameters of nuclear reactors in SNAP series^[42-46]

反应堆电源	电功率/ kW	热功率/ kW	效率/ %	堆出口 温度/°C	堆型	冷却剂	能量 转换	开发机构	反应堆承包商	系统承包商
SNAP-10A	0.5	30	1.6	538	U-Zr-H 热堆	NaK-78	Si-Ge 温差	AEC、空军	国际原子公司 (AI)	国际原子公司 (AI)
SNAP-2	5	55	9	650	U-Zr-H 热堆	NaK-78	Hg 朗肯	AEC	国际原子公司 (AI)	国际原子公司 (AI)
SNAP-8	35~50	600	8	704	U-Zr-H 热堆	NaK-78	Hg 朗肯	AEC、 NASA	国际原子公司 (AI)	空气喷射通用
SNAP-50	350	2500	14	1093	UC 快堆	Li	K 朗肯	AEC、空军	Pratt&Whitney	Pratt&Whitney

3.2.2 SNAP-10A 样机系统

SNAP-10A 项目和飞行试验项目建立了 11 个系统。

1) PSM-1、PSM-2、PSM-3 共 3 个系统: 用于样机系统试验, 提供早期系统设计信息反过来成为系统设计的一部分。

2) FSM-1、FSM-2、FSM-3 共 3 个系统: 用于电加热认证试验, 考虑了发射前运行的实施, 并证明了部组件协作性、与上一阶段的电兼容性等方面。

3) FS-1 系统: 用于核认证试验。从 1963 年 5 月至 1964 年 1 月完成了 90 d 模拟空间耐久性试验。

4) FS-2 系统: 使用飞行组件, 用于非核认证试验。在 1964 年中开始试验, 确认了 FS-1 获得的结果, 后来变成 FSM-4, 通过改进组件开发状态, 实现了各种各样的系统性能提升。

5) FS-3、FS-4、FS-5 共 3 个系统: 为飞行系统。代号 FS-3 的核地面试验系统于 1964 年 7 月建成并于 8 月投入试验, 通过了 10 005 h 不间断全功率运行试验, 于 1966 年 3 月 15 日关闭。

3.2.3 地面试验场所和设施

SNAP 的能源技术和工程中心位于加州洛杉矶北部, 其中许多设施用于部组件和系统试验^[47], 这些试

验同时考虑了系统研制和工程应用的需要。地面设施具体作用为: 硬件校准和远程操作工具演示, 液态金属部组件的研制、耐久性试验、认证和验收试验以及部组件认证试验和系统校准; 屏蔽组装和试验, 硬件装备和地面支持设备的研制和演示; 热电组件寿命试验、认证试验和热真空室 (箱) 试验; 控制和仪表部组件寿命试验、认证试验和验收试验。

在爱达荷国家工程实验室 (INEL) 和橡树岭国家实验室 (ORNL) 的设施中开展了进一步的涉核试验, 进行了 SNAP-10A 系统的再入加热和刹车试验。结果显示, 由于反应堆容器的融化, 堆芯材料会释放, 保证了再入安全性。SNAP 反应堆的许多部组件和系统试验在同一地点进行, 用于研制和校准的涉核试验设施建筑包括: 临界低功率水平试验、堆芯和反应堆零功率水平试验、飞行单元验收试验 (带有地下热真空室)、空间环境室内的涉核试验、ZrH 燃料研制的临界试验等。

3.3 SP-100 地面试验设施

3.3.1 材料、组件和子系统试验地面设施

SP-100 的材料研制涉及燃料和结构构件的组装

和试验, 以满足 7 a 满功率寿命要求。使用 Nb-1Zr 包层的 UN 燃料的辐照试验设施, 包括快中子通量试验设施和实验增殖反应堆 2 号。临界装配试验方面进行了堆芯装配以验证临界计算方法, 洛斯阿拉莫斯国家实验室 (LANL) 临界试验设施 (TA-18) 可用于核横截面基准测试, EBR-II 和 FFTF 反应堆可以支持材料的快中子谱试验。在爱达荷国家工程实验室 (INEL) 也开展了一系列的反应堆临界试验。

3.3.2 地面工程系统 GES

根据 SP-100 计划工作组备忘录, 确定了反应堆地面试验的 8 个主要试验选项。美国能源部 (DOE) 的爱达荷国家工程实验室 (INEL)^[40]、圣地亚国家实验室 (SNL)^[48] 以及汉福德工程开发实验室 (HEDL) 等均提出利用其已有核设施的提议。HEDL 位于华盛顿 Richland 地区附近, 场地是在已有反应堆壳体建筑基础上进行改建的, 即退役的钚回收试验堆所在的 309 建筑^[47], 其主体结构是反应堆保护壳, 保护壳内部分为上、中、下 3 层, 中层是

PRTR 反应堆和 B 房间, 保护壳旁边是附属的控制室、办公区域和维修车间。保护壳为直径 24.4 m, 高 36.9 m 的全钢圆柱形容器, 地面以上高 22.9 m, 按美国机械工程学会 ASME 锅炉和压力容器标准制造。容器底部低于地面 14 m, 下面由钢筋混凝土垫支撑。容器的内部设计压力为 103 kPa, 设计最大外部压力为 3.4 kPa。

309 建筑经过改造, 变成 SP-100 的地面工程系统 (GES) 试验场地, 为 SP-100 液态金属冷却快堆在真空容器 (模拟太空运行时的真空和温度条件) 中安全和可靠运行提供支持。改造后的外观和结构如图 13 所示^[49]。该设施提供反应堆保护壳、相关的传热系统、真空系统、装置保护系统、电力和通风系统、安保系统等支持 SP-100 GES 的核装配体试验项目必须的条件。除了反应堆运行, 试验场地责任还包括设施增加设计的准备工作、真空室的建立及反应堆的安装、二回路传热系统 (用于清除反应堆热)、设施控制系统、辐照后的检测等。

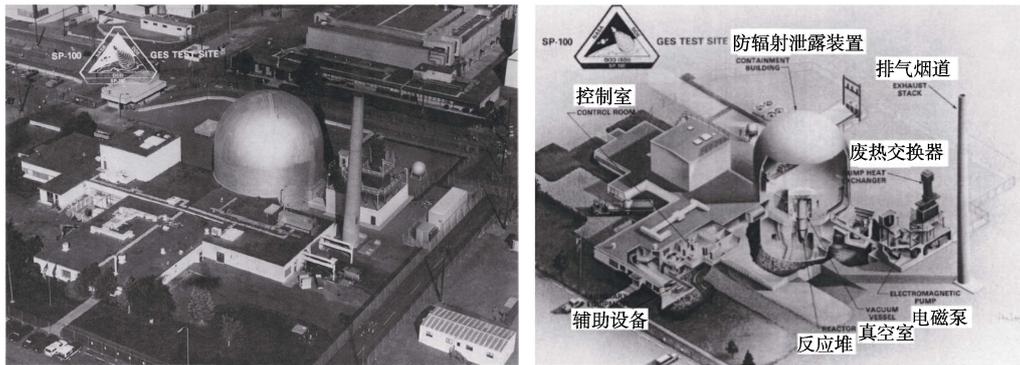


图 13 SP-100 地面工程系统 (GES) 试验场地^[49]
Fig.13 Test site of ground engineering system (GES) of SP-100^[49]

地面工程系统 (以下简称 GES) 设施的核心是核装配体试验设施 (以下简称 NAT)。NAT 是锂冷反应堆、飞行屏蔽、反应堆控制和测量仪表等通用飞行系统 (GFS) 所需要的关键技术的样机。NAT 设施为核装配体试验提供了模拟飞行试验所需要的真空低温环境。NAT 设施如图 14 所示^[49], 其中真空容器直径为 3.1 m, 高为 7.7 m, 材质为不锈钢。反应堆的热功率为 2.4 MW, 要求热排散系统具有相应的排热能力。反应堆入口温度和出口温度分别为 1 285、1 345 K。中间热交换器 (Intermediate Heat Exchanger, IHX) 的前端和后端温度分别为 900、790 K。反应堆及真空容器等主要结构位于保护壳 (309 建筑) 内。

核装配体试验固定于不锈钢真空容器中, 如图 15 所示^[49]。其中, 反应堆在底部, 热交换器在顶部, 以保证万一泵送动力丧失时可以通过自然循环冷却。真空容器会被抽真空到 1.33×10^{-6} Pa 的高真空条件, 以模拟空间环境。真空容器具有温度控制系统, 为试

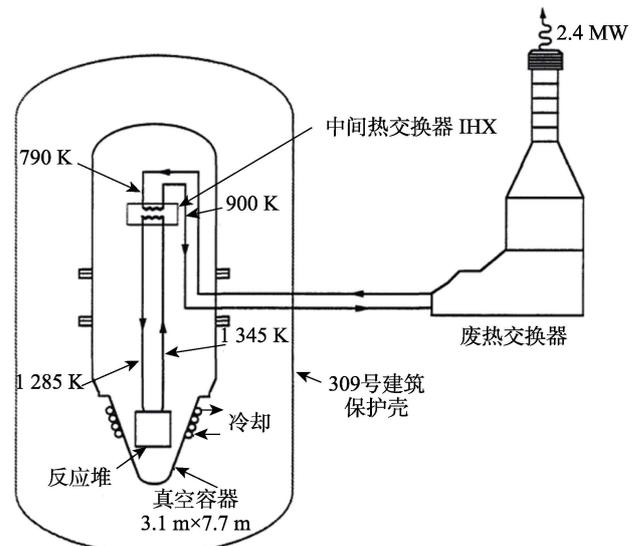


图 14 SP-100 GES 的核装配体试验 (NAT) 支持系统^[49]
Fig.14 Support system of nuclear assembly test (NAT) in SP-100 GES^[49]

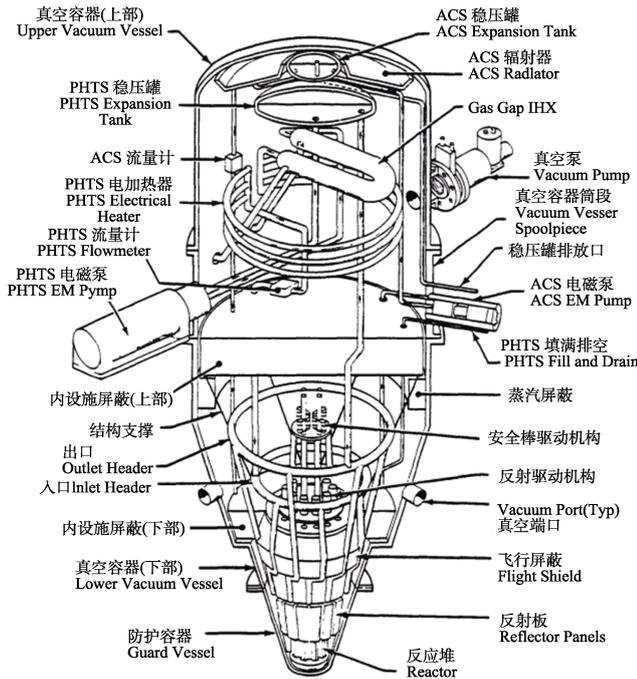


图 15 真空容器中的 SP-100 GES 的核装配体试验 (NAT) [49]

Fig.15 Nuclear assembly test (NAT) of SP-100 GES within vacuum vessel [49]

验对象生成的辐射热提供热沉并模拟热量在空间的丧失。反应堆容器和一回路传热系统由钽合金构成,以容纳空间电源系统高效热电转换所需要的 1 375 K 高温锂冷却剂。钽会与氧气及其他气体在高温下反

应,因此只能隔绝到超高真空环境中使用。GES 的屏蔽按照飞行系统样机化进行设计,以确认设计方法和屏蔽效力,证实与反应堆的界面相容性[49-56]。氢化锂和铍用于中子屏蔽,钨用于伽马屏蔽。作为控制系统的 3 个安全棒和 12 个可调整反射器及其驱动机构也是按飞行样机设计和装配的,用于反应堆的关闭和控制。反应堆的控制和保护系统位于真空容器外面,包括中子监测系统、反应堆保护系统、NAT 专用的反应堆和设施控制、功能性的飞行样机反应堆控制。

SP-100 地面工程系统 (GES) 的核装配体试验 (NAT) 的一回路传热系统 (Primary Heat Transport System, PHTS) 如图 16 所示[51]。PHTS 将反应堆产生的热能传送到二回路传热系统,由锂回路组成。PHTS 的主要部件包括一回路冷却剂电加热器、中间热交换器 (IHX)、一回路电磁泵和一回路锂膨胀稳压罐 (以适应锂的体积增长) 等。液态锂的流动,从反应堆出发,通过一回路传热管道,到集流管、膨胀罐和电磁泵,通过 IHX 的管道一侧,到达电加热器,最终回到反应堆入口。PHTS 包含电加热器,可为在不含反应堆加热情况下进行高达 1 375 K 的热功能性试验和等温物理试验提供热输入。西屋高级能量系统部 (Westinghouse Advanced Energy Systems Department, WAESD) 负责设计和制造 PHTS 的主要部件,PHTS 管路完全位于真空容器内部,而电磁泵的压气机在真空容器外,电磁泵的管道置于真空容器扩展出来的一个套管内。

二回路传热系统 (Secondary Heat Transfer System,

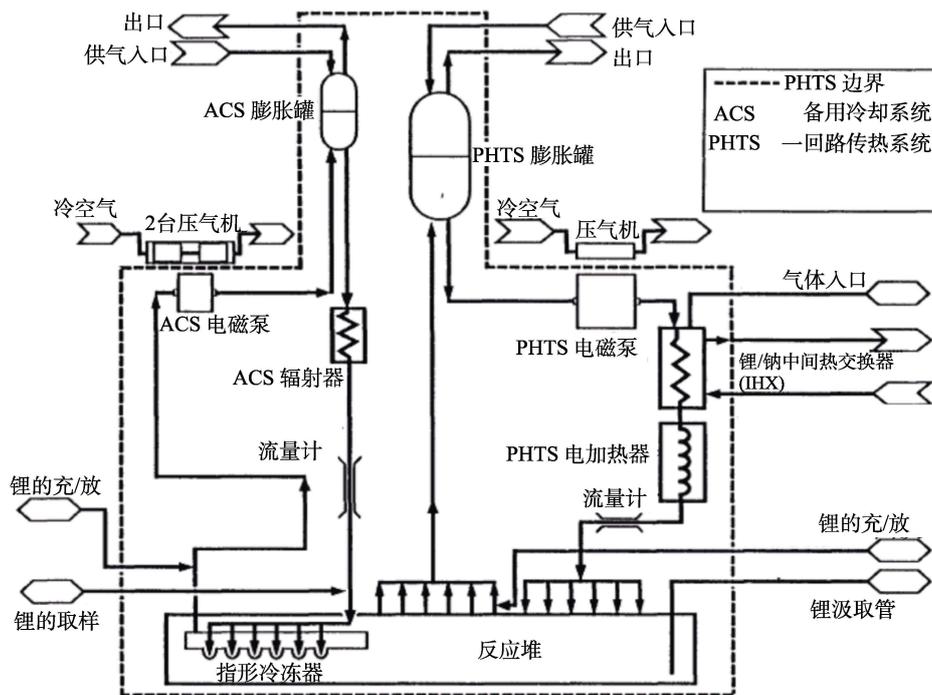


图 16 SP-100 GES 一回路传热系统 (PHTS) [51]

Fig.16 Primary heat transfer system(PHTS) in SP-100 GES [51]

SHTS) 是场地设施之一, 如图 17 所示^[53]。其作用是利用钠冷却剂将反应堆的热量从 PHTS 耗散到大气中。SHTS 的许多部件是从试验场所现有设备中获取的。真空容器内部的中间热交换器 IHX 将热量从锂冷一回路传热系统 PHTS 传递到钠冷二回路传热系统 SHTS, 钠在废热交换器 (Dump Heat Exchanger, DHX) 中被强风循环冷却。真空容器外面的 SHTS 全部用 316 不锈钢制造。

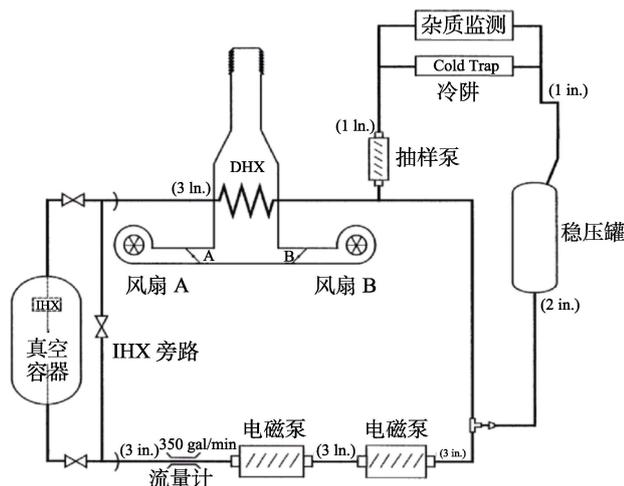


图 17 SP-100 GES 的二回路传热系统 (SHTS)^[53]
Fig.17 Secondary heat transfer system(SHTS)
in SP-100 GES^[53]

屏蔽设施包括样机化飞行屏蔽、扩展飞行屏蔽 (低设备屏蔽) 以及反应控制系统上的设备屏蔽。这些屏蔽设计为试验装配体提供样机空间环境, 并提供试验装配体的访问, 以及减弱到达二回路钠的中子流。真空容器外部制造了 2 个屏蔽房间, 上层房间容纳 PHTS, 用 1.219 2 m 厚的高密度混凝土屏蔽包围, 使其用作辐照反应堆的维护间。下层房间位于操作地板之下, 容纳反应堆、样机飞行屏蔽和反应控制系统, 使用等效 2.74 m 普通结构混凝土包围, 允许反应堆房间外面的全职工作人员进入。

反应堆和一回路传热系统的界面在真空容器中截面的中心筒段, 外直径为 3.048 m, 壁厚为 0.609 6 m。该筒段将容纳所有的管道和电气穿透装配体。PHTS 和试验场所系统的主要物理界面由这些穿透装配体提供。位于真空容器内部的反应堆控制, PHTS、屏蔽和中间热交换器等由 GE 提供。

3.4 TOPAZ-II 地面试验设施

1969—1989 年, 苏联总共制造了 26 台 TOPAZ-II。在研发热离子空间核反应堆电源过程中用到许多试验设施, 最具代表性的有 3 个: “里克 (Rig)” 台架、“第一核电站” 堆内回路试验装置和 “贝加尔 (Baikal)” 电加热综合试验台架, 各设施的结构特点和性能特征具体如下。

1) “里克 (Rig)” 台架。该台架由真空室、工作段、真空系统、真空-铯系统、负载系统、气体供应系统、加热器供电系统、数据自动化采集系统和供水系统等 9 部分组成, 是单节全长热离子燃料元件 (TFE) 的考验台架, 还可用于验收检验、性能试验和寿命考验。装置占地面积约 30 m², 从地面到吊车挂钩高度约 6 m, 吊车载质量为 5t。真空室直径为 0.6 m, 高度为 1.2 m, 真空度为 1×10⁻³ Pa, 采用铯真空系统。冷却水流量为 1 m³/h。动力电要求为 380 V、50 Hz、50 kW。液氮流量为 40 L/d。

2) “第一核电站” 堆内回路试验装置。装置位于俄罗斯物理与动力工程院, 用于各种燃料元件的堆内回路试验, 包括热离子型空间核反应堆燃料元件在内。由辐照罐、真空及测量系统、热工水力及参数测量系统、裂变气体排放系统、铯蒸气供应与调节系统、电能供给与输出线路系统、热离子燃料元件的伏安特性测量系统、元件与试验回路的工作参数测量记录系统和诊断调节系统、辐射和事故工况下的安全保障与监测系统等多个分系统组成。该装置可进行单根/2 根/4 根热离子元件试验, 以便同时模拟不同工况下进行热离子元件寿命试验的比较研究, 进行不同结构或燃料装载方案的热离子燃料元件设计对比试验, 甚至进行加速试验。寿命考验时间可长达 3 a。

3) “贝加尔 (Baikal)” 电加热综合试验台架。该台架由供电系统、真空系统、真空机组/仪表/铯机组、浇灌系统、气体供应系统、中央电磁泵控制系统、燃料热模拟器电源系统、工作负载系统、辐射冷却器电加热控制系统、数据自动采集系统等 10 个系统组成。台架占地面积 150 m², 从地面到吊车吊钩的高度约 12 m, 吊车载质量为 5 t。真空室内直径为 2.5 m, 内高为 5.4 m, 质量为 16 t。冷却水流量为 7m³/h。动力电要求为 380 V、50 Hz、250 kW。台架建在圣彼得堡机器制造中心设计局 (Center of Design Bureau of Machine Building, CDBMB), 专门用于 TOPAZ-II 空间核反应堆电源的电加热综合试验, 其用途包括对 TOPAZ-II 装置除气, 向 TOPAZ-II 装置浇灌冷却剂 (NaK) 和混合气体, 利用专用的电加热器代替核燃料加热发射极, 并检查反应堆的电输出特性。从放射性安全角度看, 在贝加尔台架上试验是绝对 “干净” 的。能在贝加尔综合试验台架上进行整机的电输出特性试验, 是 TOPAZ-II 空间核反应堆电源的一大优势, 贝加尔综合台架试验通过之后, TOPAZ-II 空间核反应堆电源的核加热试验就比较简单了。

4 地面试验能力建设工作展望

4.1 非核试验部分

未来, 对正常环境下的非核试验将主要围绕振动、冲击和离心等全寿命周期环境试验, 以及高真空、

低温等空间环境试验开展。异常环境下的非核试验则主要针对跌落和冲击、火箭爆炸火烧、火箭爆炸冲击、入水冲击等环境进行试验。

4.2 涉核地面综合试验部分

涉核地面试验首先是电加热与涉核综合试验相结合,建议分别建设非核的电加热综合试验设施和涉核的综合试验设施,以节省研发时间与成本。电加热系统试验有助于演示验证,获取运行参数,积累运行经验,认证组件和系统寿命,评估非正常运行模式。空间核反应堆系统先在电加热系统(无燃料、零功率、无辐照)平台上完成验收级试验,然后在涉核地面试验设施中进行鉴定级试验,认证最终系统构型。

对于涉核地面试验设施,试验场地除了负责反应堆运行,还包括对试验设施的屏蔽进行设计和建设,为反应堆建立真空室并安装,建设二回路传热系统和控制系统,以及放射性监测等。试验项目完结时,核废物处理、设施退役、环境和安全性评估报告也要同步完成。

涉核综合地面试验内容建议按照以下实验顺序依次开展:零功率试验,包括干反应堆临界、热功能性试验和充锂反应堆临界试验,研究温度和流动对反应活性的效应,获取反应堆零功率频率响应,校准反应堆安全棒和控制单元;模拟空间启动,包括初始反应堆解冻和低流动反应堆控制稳定性试验;全功率和温度范围运行试验;核子系统性能试验,以测量反应堆、控制、屏蔽特征等相关性能数据;模拟飞行样机功率试验,包括模拟飞行系统的启动和关闭、机动功率运行、紧急停堆和重启、保持全功率运行的持久性等方面;飞行样机异常试验,模拟飞行系统在组件失效时的响应。

5 结语

本文针对国外(主要包括美国和苏联/俄罗斯)空间核反应堆发展历程、空间核反应堆的地面试验、空间核反应堆地面试验设施等3个方面进行了调研,重点关注 SNAP-10A、SP-100、TOPAZ-II 和 JIMO 等主要空间核反应堆,对地面试验的内容、顺序和设施进行了详细调研,总结了国外空间核反应堆的地面试验能力。

SNAP 空间核反应堆采用组件认证方法,从组件研制和鉴定试验开始,最终集成为完整系统的地面试验。SP-100 采用系统级方法、分阶段计划和模块化设计,其地面试验分为材料/组件/子系统试验、系统级地面试验和在地面开展的飞行安全性试验3个阶段。其中,系统级地面试验建立了地面工程系统(GES),验证了全尺寸样机反应堆系统(包括反应堆、控制系统、飞行屏蔽等)在空间环境中的性能;

TOPAZ-II 在苏联开展的地面试验项目分为热物理试验、力学试验、核地面试验和低温试验等4类,美国引进后依据美国标准开展了测试和改进;JIMO 反应堆的研制试验采用了计算与基本试验相结合的方法,其短板在于缺乏临界设施,因而要求反应堆能够在非核试验设施中进行高效试验。

空间核反应堆地面试验的非核试验设施包括真空室、离心机、振动台、跌落塔等。涉核试验设施包括反应堆样机、核装配试验体、设施场地等,其中核装配试验体由反应堆、屏蔽、控制和测量仪表等组成,且需要在大型真空容器中进行以年为单位的长时运行试验。

对于空间核反应堆涉核地面试验设施,场地责任包括安装核装配试验体,提供大型真空容器并将反应堆安装到真空室,提供反应堆保护壳建筑,以及相关的传热系统、真空系统、装置保护系统、电力和通风系统、安保系统等,还要负责辐照后环境和安全性评估、检测、核废物处理、设施退役等。

系统级验收试验地面设施分为非核的电加热综合(带真空室)试验设施和涉核综合(带真空室)试验设施。使用电加热系统和核地面试验共同认证反应堆,成本高但节省研制时间。

电加热系统试验有助于演示验证,获取运行参数,积累运行经验,认证组件和系统寿命,评估拉偏-正常运行模式。

核地面试验能够进一步发展形成最终的系统构型,为发射的反应堆系统提供一个“地面孪生”。对于发生在飞行单元上的任务偏离正常条件导致的问题,地面试验也能够加速排除故障,然而目前公开文献仍鲜见报道通过地面试验进行寿命外推的具体方法和技术。

上述总结和展望可为国内相关能力建设方案的编制提供参考。

参考文献:

- [1] 胡古,赵守智.空间核反应堆电源技术概览[J].深空探测学报,2017,4(5):430-443.
HU G, ZHAO S Z. Overview of Space Nuclear Reactor Power Technology[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(5): 430-443.
- [2] 苏著亭,杨继材,柯国土.空间核动力[M].上海:上海交通大学出版社,2016.
SU Z T, YANG J C, KE G T. Space Nuclear Power[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2016.
- [3] 马世俊,唐玉华,朱安文,等.空间核动力的进展[M].北京:中国宇航出版社,2019.
MA S J, TANG Y H, ZHU A W, et al. Progress of Nuclear Power in Space[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2019.
- [4] 周继时,朱安文,耿言.空间核能源应用的安全性

- 计、分析和评价[J]. 深空探测学报, 2015, 2(4): 302-312.
ZHOU J S, ZHU A W, GENG Y. Safety Design, Analysis and Estimation for the Use of Nuclear Power Source in Outer Space[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2015, 2(4): 302-312.
- [5] 周继时, 李莎, 刘磊, 等. 核动力航天器总体设计研究[J]. 深空探测学报, 2017, 4(5): 444-452.
ZHOU J S, LI S, LIU L, et al. Study on Overall Design of Nuclear Powered Spacecraft[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(5): 444-452.
- [6] 胡文军, 陈红永, 陈军红, 等. 空间核动力源的安全性研究进展[J]. 深空探测学报, 2017, 4(5): 453-465.
HU W J, CHEN H Y, CHEN J H, et al. Advances of Safety Research on Nuclear Space Power Sources[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(5): 453-465.
- [7] 胡文军, 刘继忠, 唐玉华, 等. 空间同位素热/电源安全性技术指标体系框架研究[J]. 深空探测学报, 2020, 7(1): 73-80.
HU W J, LIU J Z, TANG Y H, et al. Study on Technical Index System and Framework of Safety Standards for RHU and RTG[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(1): 73-80.
- [8] 刘继忠, 唐玉华, 龙杰, 等. 关于建立我国空间核动力源应用安全机制的建议[J]. 科学通报, 2020, 65(10): 875-881.
LIU J Z, TANG Y H, LONG J, et al. Suggestions for China on Establishing Safety Mechanisms for Space Nuclear Power Source Applications[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(10): 875-881.
- [9] 郭筱曦, 田岱, 朱安文, 等. 国外空间核动力装置应用安全机制分析及启示[J]. 核科学与工程, 2022, 42(5): 1212-1221.
GUO X X, TIAN D, ZHU A W, et al. Analysis on Safety Mechanisms for Using Nuclear Power Units in Space and Its Inspiration[J]. Nuclear Science and Engineering, 2022, 42(5): 1212-1221.
- [10] 贺芳, 丁宏春, 刘明皓. 空间核动力源概率安全分析技术初步研究[J]. 核动力工程, 2023, 44(S2): 207-210.
HE F, DING H C, LIU M H. Preliminary Research on Probabilistic Safety Analysis Technology of Space Nuclear Power Source[J]. Nuclear Power Engineering, 2023, 44(S2): 207-210.
- [11] 闫锋哲, 陈章隆. 空间核反应堆电源发展及应用[J]. 科技创新导报, 2019, 16(12): 21-22.
YAN F Z, CHEN Z L. Science and Technology Innovation Herald, 2019, 16(12): 21-22.
- [12] 赵振华, 张佳琦, 王路瑶. 空间核反应堆电源应用前景概述[J]. 中国水运(下半月), 2022(9): 82-83.
ZHAO Z H, ZHANG J Q, WANG L Y. Overview of Application Prospect of Space Nuclear Reactor Power Supply[J]. China Water Transport, 2022(9): 82-83.
- [13] 张怡晨, 胡宇鹏, 王泽, 等. 基于 AMTEC 的空间核反应堆电源热力学性能分析[J]. 深空探测学报(中英文), 2021, 8(2): 205-212.
ZHANG Y C, HU Y P, WANG Z, et al. Thermodynamic Analysis of Space Nuclear Power System Based on AMTEC[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8(2): 205-212.
- [14] 于国斌, 汪鹏飞, 朱安文, 等. 基于 10 kWe 核反应堆电源的海王星探测任务研究[J]. 中国科学(技术科学), 2021, 51(6): 711-721.
YU G B, WANG P F, ZHU A W, et al. Mission Analysis of a Neptune Detector with a 10 kWe Nuclear Reactor Power Generator[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2021, 51(6): 711-721.
- [15] 刘奕宏, 张明, 杨祎, 等. 月球科研站分布式能源系统方案设计[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(6): 579-588.
LIU Y H, ZHANG M, YANG Y, et al. Scheme Design and Key Technology Research of Distributed Energy System for Lunar Scientific Research Station[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(6): 579-588.
- [16] 裴照宇, 彭兢, 张明, 等. 月球科研站能源系统关键技术及发展趋势[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(22): 8689-8700.
PEI Z Y, PENG J, ZHANG M, et al. Key Technologies and Development Trend of Power System for International Lunar Research Station[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(22): 8689-8700.
- [17] 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.
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.
- [18] IAEA. The Role of Nuclear Power and Nuclear Propulsion in the Peaceful Exploration of Space[R]. Vienna: IAEA, 2005.
- [19] 吴伟仁, 刘继忠, 赵小津, 等. 空间核反应堆电源研究[J]. 中国科学(技术科学), 2019, 49(1): 1-12.
WU W R, LIU J Z, ZHAO X J, et al. System Engineering Research and Application Foreground of Space Nuclear Reactor Power Generators[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2019, 49(1): 1-12.
- [20] EL-GENK M S. Deployment History and Design Considerations for Space Reactor Power Systems[J]. Acta Astronautica, 2009, 64(9): 833-849.
- [21] VOSS S S. SNAP Reactor Overview[R]. USA: Air Force Weapons Laboratory, 1984.
- [22] GODFROY T, MCCLURE P R, SANCHEZ R G. Kilo Power Project-KRUSTY Experiment Nuclear Design[M]. USA: Los Alamos National Laboratory, 2015.
- [23] SOVIE R J. SP-100 Advanced Technology Program[C]// Proceedings of 22nd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. Philadelphia, Pennsylvania: AIAA, 1987.
- [24] BURDGE W, LEVINE B, BREWER G, et al. Space Nuclear Power Plant Reconceptual Design Report, for In-

- formation[R]. USA: Knolls Atomic Power Laboratory, 2006.
- [25] ASHCROFT J, ESHELMAN C. Summary of NR Program Prometheus Efforts[R]. Washington: United States Government, 2006.
- [26] PALAC D, MASON L, HOUTS M, et al. Fission Surface Power Technology Development Status[C]// Proceedings of AIAA SPACE 2009 Conference & Exposition. Pasadena: AIAA, 2009.
- [27] LAPOINTE M, OLESON S, PENCIL E, et al. MW-Class Electric Propulsion System Designs for Mars Cargo Transport[C]// Proceedings of AIAA SPACE 2011 Conference & Exposition. Long Beach: AIAA, 2011.
- [28] ZAKIROV V, PAVSHOOK V. Feasibility of the Recent Russian Nuclear Electric Propulsion Concept: 2010[J]. Nuclear Engineering and Design, 2011, 241(5): 1529-1537.
- [29] BOROWSKI S K, MCCURDY D R, PACKARD T W. Nuclear Thermal Propulsion (NTP): A Proven Growth Technology for Human NEO/Mars Exploration Missions[C]// Proceedings of 2012 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2012.
- [30] LITCHFORD R, HARADA N. Multi-MW Closed Cycle MHD Nuclear Space Power *via* Nonequilibrium He/Xe Working Plasma[C]// Proceedings of Nuclear and Emerging Technologies for Space 2011. Albuquerque: American Nuclear Society, 2011.
- [31] NASA. NASA Technology Roadmap 3: Space Power and Energy Storage[M]. USA: NASA, 2015.
- [32] BENNETT G L. Flight Safety Review Process for Space Nuclear Power Sources[C]// Proceedings of 22nd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. Philadelphia, Pennsylvania. Reston: AIAA, 1987.
- [33] KLANN P, MAYO W, WHITMARSH C. Nuclear Design and Experiments for a Space Power Reactor[R]. Boston: NASA, 1982.
- [34] ZILLMER A, RAO D, JOHNSON S. Evolution of Space Reactor Qualification Methods and a Path Forward for New Space Reactors under Consideration[C]// Proceedings of 2020 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2020.
- [35] STEELE O P, KELLOGG L G, DEWART W G. Development of the Control System for SNAP Reactors[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1966, 13(1): 206-223.
- [36] JOHNSON R A, MORGAN W T, ROCKLIN S R. Design, Ground Test and Flight Test of SNAP 10A, First Reactor in Space[J]. Nuclear Engineering and Design, 1967, 5(1): 7-21.
- [37] TRUSCELLO V C. SP-100 Program Overview[C]// Symposium on Refractory Alloy Technology for Space Nuclear Power Applications. Oak Ridge: SP-100 Project Office, 1983.
- [38] RANKENW A, MATTHEWS R B. Fuels for Space Reactors[J]. American Ceramic Society Bulletin, 1983, 62(8): 879.
- [39] COX C M, MILLER W, MAHAFFEY M. Preliminary Site Design for the SP-100 Ground Engineering Test[C]// Proceedings of 21st Intersociety Energy Conversion Engineer Conference. San Diego: ASME, 1986.
- [40] MOTWANI K, FLASTERER G R, UPTON H, et al. Ground Testing of an SP-100 Prototypic Reactor[C]// Proceedings of 23rd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. Colorado: ASME, 1988.
- [41] TEMME M I, BROWN N W, SMITH M A. SP-100 Flight Safety Tests[C]// Proceedings of 10th Symposium on Space Nuclear Power and Propulsion. Albuquerque: AIP, 1993.
- [42] 黄本诚. 空间环境工程学[M]. 北京: 宇航出版社, 1993.
- [43] HUANG B C. Space Environment Engineering[M]. Beijing: China Aerospace Press, 1993.
- [44] 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.
- [45] HUANG B C, MA Y L. Space Environment Test Technology of Spacecraft[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.
- [46] 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.
- [47] HUANG B C, CHEN J M. Space Vacuum Environment and Vacuum Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.
- [48] 彭光东, 齐晓军, 陈丽. KM5A 空间环模试验设备研制[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(4): 485-488.
- [49] PENG G D, QI X J, CHEN L. Development of KM5A Space Environmental Simulation Test Facility[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010, 27(4): 485-488.
- [50] 张世一, 陈丽, 齐晓军, 等. KM5B 空间环境模拟试验设备研制[J]. 航天器环境工程, 2016, 33(4): 434-438.
- [51] ZHANG S Y, CHEN L, QI X J, et al. Development of KM5B Space Environmental Simulation Test Facility[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2016, 33(4): 434-438.
- [52] Energy Technology Engineering Center. Annual Technical Progress Report 1987[R]. California: ETEC, 1987.
- [53] COX C M, MAHAFFEY M M, SMITH G L. SP-100 Design, Safety, and Testing[C]// Proceedings of American Nuclear Society Topical Meeting on the Safety, Status and Future of Non-commercial Reactors and Irradiation Facilities. Boise: American Nuclear Society, 1990.
- [54] QUAPP W J, WATTS K D. Ground Test Facility for Nuclear Testing of Space Reactor Subsystems[C]// Proceedings of 2nd Symposium on Space Nuclear Power Systems, Albuquerque: AIP, 1985.
- [55] PHILBIN J, WEMPLE R. Space Reactor Ground Tests, Assessment of Facility Needs[R]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 1985.
- [56] BORGES E M, FILHO F B, CAMILLO G P, et al. Space Nuclear Reactor sp-100 thermal-Hydraulic Simula-

- tion[C]// Proceedings of 2009 International Nuclear Atlantic Conference. Brazil: Associação Brasileira de Energia Nuclear-Aben, 2009.
- [52] BORGES E M, EDUARDO M, BRAZ F, et al. Primary Loop Simulation of the SP-100 Space Nuclear Reactor[C]// Proceedings of 2011 International Nuclear Atlantic Conference. Brazil: Associação Brasileira de Energia Nuclear-Aben, 2011.
- [53] BORGES E M, FILHO F A B, GUIMARAES L N F. SP-100 Space Nuclear Power Reactor Simulation by the BEMTE-3 Code[J]. Journal of the British Interplanetary Society, 2017, 70(7): 244-249.
- [54] MANVIR F. SP-100 Program Users Handbook Basic Configurational Tradeoffs[R]. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 1986.
- [55] US Department of Energy. Environmental Assessment of SP-100 Ground Engineering System Test Site: Hanford Site, Richland, Washington[R]. Richland: DOE, 2012.
- [56] CARLSON W F, BENNETT K L, DELISLE G V, et al. Status Report of SP-100 Ground Engineering System Test Site Instrumentation, Control, and Plant Protection System Activities[C]// Proceedings of the Eighth Symposium on Space Nuclear Power Systems. Albuquerque:AIP, 1991.