空间核反应堆电源研究

吴伟仁¹, 刘继忠¹, 赵小津², 代守仑³, 于国斌¹, 万钢⁴, 刘仓理⁵, 罗琦⁶, 庞涪川^{1*},
朱安文², 唐生勇³, 柳卫平⁴, 张传飞⁵, 曾未⁶

1. 国家航天局探月与航天工程中心, 北京 100190;
2. 中国空间技术研究院, 北京 100094;
3. 中国航天科技集团有限公司第八研究院, 上海 201108;
4. 中国原子能科学研究院, 北京 102413;
5. 中国工程物理研究院, 绵阳 621900;
6. 中国核动力研究设计院, 成都 610213

* E-mail: pangfc@163.com

收稿日期: 2018-11-09; 接受日期: 2019-01-02; 网络版发表日期: 2019-01-11

中国工程院咨询研究项目(编号: 2018-XY-64)资助

摘要 空间核反应堆电源是自持的核裂变能在空间的应用, 能从根本上解决未来航天器大功率需求的瓶颈问题, 是大规模开发和利用空间资源的前提. 本文在综述国外新型空间核裂变反应堆电源的技术方案、发展规划的基础上, 结合未来发展趋势、任务需求和主要技术路线, 提出了空间核反应堆电源按照10, 100, 1000 kWe级不同功率等级分阶段滚动发展的设想, 以及需重点突破的关键技术、涉核安全性应重点关注的内容, 可为未来空间核反应堆电源的研制提供参考.

关键词 空间核反应堆电源, 任务需求, 关键技术, 安全性, 总体方案

1 引言

核动力航天器主要包括同位素衰变能源航天器、核裂变反应堆能源航天器等, 基于经济性、比功率等方面考量, 空间核反应堆(以下简称空间堆)能源是当前大功率空间飞行器应用研究的重点. 空间堆电源是指通过持续的链式裂变反应产生热量, 由冷却剂将热量载出至热电转换系统发电, 为探测器或飞船提供电能的能源装置.

空间堆电源(图1)具有不依赖太阳、能量自主产

生、能量密度高等优点, 可有效突破传统太阳能电池阵功率上限50 kWe的瓶颈, 大幅提高空间可用电功率水平和推进系统可使用时间, 特别适用于难以获取太阳能或具有瞬时大功率能量需求特点的空间任务.

空间堆电源是牵动航天产业发展和空间技术进步的重大空间能力设施, 是我国进入空间、利用空间等能力大幅跃升的基础支撑. 在深空探索、空间科学等方面, 是不可或缺的技术支持条件; 在地球高轨高分辨率勘查、空间综合服务等领域(图2), 是大幅提升工作效能的技术手段, 具有重要的经济效益和社会效益.

引用格式: 吴伟仁, 刘继忠, 赵小津, 等. 空间核反应堆电源研究. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 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 (in Chinese). Sci Sin Tech, 2019, 49: 1–12, doi: 10.1360/N092018-00374

图1 空间堆电源应用示意图

图2 基于空间堆的星球表面科研站示意图

2 国际空间堆电源发展情况

美国和俄罗斯(苏联)历来都把空间核动力视为国家战略核心技术^[1], 围绕切实增强应用空间、控制空间的战略目标, 在空间堆保持了持续的资金投入和技术研发, 并取得了重要突破。

2.1 历史情况

自20世纪50年代以来, 围绕空间堆电源开展了全面而深入的研究设计、地面试验与在轨应用^[2]。

从1965年到1988年, 全世界入轨的空间堆电源共计36个, 主要用于海洋监视卫星。美国仅于1965年发射了人类首颗SNAP-10A型空间堆电源航天器, 采用液态金属冷却快中子堆+温差发电的路线, 输出电功率565 We, 热电转换效率1.6%。苏联于1970~1988年, 成功发射了33颗BUK型空间堆电源, 采用液态金属冷却快中子堆+温差发电的路线, 电源系统总重1250 kg, 设计输出电功率3 kWe, 最长在轨运行时间135 d。1987年发射了2颗TOPAZ-I型空间堆电源卫星, 采用液态金属冷却快中子堆和热离子发电方式, 电源系统重1200 kg, 设计输出电功率6 kWe, 最长在轨运行时间342 d。该时期, 美苏发射入轨的空间堆电源均为低功率(最大5 kWe)和短寿命(最长不到1年)电源^[3], 而实际

使用寿命一直未达到设计要求。

1988年以后, 因太阳能电池技术水平发展迅速, 替代效应明显, 空间堆不再发射入轨。但美俄仍有计划地持续攻关, 促进了反应堆工程、热电转换、传散热等关键技术发展, 反应堆传热技术路线从单一的液态金属冷却扩展为液态金属冷却、热管冷却、气体冷却堆等, 热电转换方式从温差/热离子等低效率发电方式向斯特林、布雷顿、磁流体等高效发电方式拓展, 高效率废热排散等技术也得到了发展^[4~15]。

21世纪以来, 因传统太阳能不能有效满足星球表面科研站等深空探索需要^[16], 以及未来空间活动对100 kWe级以上功率的潜在需求^[17], 美俄空间堆的研发再次进入高潮, 分别提出了电功率达到百千瓦级至兆瓦级、寿命不小于10年的发展计划^[17,18], 以切实提高能量利用效率为主线, 保持资金投入持续推进相关研究工作^[19~23]。

2.2 21世纪以来俄罗斯发展情况

俄罗斯TEM新型空间堆电源(图3)重点聚焦超高温气冷快堆+布雷顿发电+热管/液滴辐射散热技术方案, 由4个布雷顿系统共同产生900 kWe的电功率, 预期最高转换效率34%, 飞行轨道高度为1200 km, 于2012年完成初步设计, 预计2025年实施在轨飞行^[24,25]。

2.3 21世纪以来美国发展情况

美国NASA基于钚-238库存及年产能力, 结合经费需求情况, 同位素电源适宜的热功率上限1000 W^[26~28], 为满足未来空间任务的需求, 加快实施了空间堆电源的研发工作。得益于持续多年的研发, 以及20世纪90年代苏联解体后美国引进了当时最先进的6套TOPAZ-II型空间堆电源^[26], 美国新型空间堆电源研制进展

图3 俄罗斯TEM新型空间堆航天器

迅速。

2015年,美国NASA发布了空间核动力技术路线图,按功率等级对空间堆技术途径进行了分析:1~4 kWe建议采用铀钼(UMo)合金燃料、液态金属热管冷却、温差发电;1~10 kWe采用铀钼合金燃料、液态金属热管冷却、斯特林发电;10~100 kWe采用氧化铀(UO_2)陶瓷燃料、斯特林发电,或采用氧化铀陶瓷燃料、静态发电(主要指高效率温差发电);1~10 MWe采用金属基高温陶瓷燃料(钨基氧化铀、钼基氮化铀)、高温高效率热电转换技术;10 MWe以上采用金属基高温陶瓷燃料(钨基氧化铀)、高温高效率热电转换技术。此外,技术路线图还提到,开发满足近期应用需求的较低功率(10 kWe级及以下)的空间核反应堆电源所涉及的材料、燃料、能量转换、排热等技术已突破,面临的系统集成与验证等主要挑战解决后,可形成安全、可靠、经济性强的空间堆电源。而较大功率(100 kWe级以上)空间堆电源的主要挑战是高温反应堆燃料与材料、高温高效率能量转换技术、轻型高温热辐射器^[17]。

2017年11月至2018年3月,美国NASA与国家能源局共同完成了可用于星际探索和火星探测任务的Kilopower空间堆电源(图4)系统带核样机地面测试工作^[23,24]。

1 kWe电功率的Kilopower空间堆电源采用高富集度块状铀钼合金作为活性区燃料,堆芯产生的热量(4.3 kWt)由布置在燃料外围的8根非能动Na热管载出,采用8个125 We的自由活塞斯特林发电机产生1 kWe电能(图5)。系统总质量406 kg,热电转换效率为24%,满功率工作寿命不低于15年^[29~32]。若采用较高热电转

图4 美国Kilopower空间堆装置

图5 Kilopower反应堆结构示意图

换效率的斯特林发电技术,在不改变燃料类型和控制方式的前提下,系统发电功率可扩展至10 kWe^[33]。

2.4 发展趋势分析

基于对国际空间堆电源发展历程和未来发展规划的调研分析,可以看出空间堆电源的任务需求明确且迫切,总的发展趋势是:切实提升能源利用效率是目标,重点技术路线+多路线并行研究是策略,10 kWe级空间堆电源是突破口,设计寿命、热电转换效率、比功率等关键指标由低到高、循序突破是途径,最终实现系列化空间堆电源产品并通过模块化组合满足在轨应用。

在反应堆方面,美俄以提高反应堆出口温度为目

材料的选型与工艺制备技术研究与攻关; 在发电技术方面, 先期以技术较为成熟的斯特林发电(适用功率小)为突破口并开展飞行应用, 同步开展布雷顿和磁流体(适用功率大)等技术路线的研发工作, 不断提升热电转换效率和比功率。

从Kilopower空间堆电源的发展情况来看, 10 kWe级小功率核动力装置因体积和质量小, 为整个系统的安全性和可靠性的大冗余设计提供了必要条件, 是空间堆电源研发的突破口。研制10, 100, 1000 kWe级不同功率的标准模块, 通过多模块组合满足任务实际功率需求, 可有效降低研制成本和任务成本。

3 空间堆需求分析

空间堆电源的应用方向主要体现在: 解决传统太阳能电池阵能力上限约50 kWe的瓶颈问题; 解决因距离太阳太远或星表昼夜交替导致太阳能无法利用的问题; 解决化学推进比冲低的难题; 解决大功率遥感卫星对指向精度和姿态稳定度要求高的难题; 解决在轨制造、维护等任务对大功率能源的需求难题等。

3.1 深空探测领域

(1) 太阳系边际探测任务

受限于太阳光照强度, 木星以远的10 kWe级以上深空探测任务, 空间堆是唯一选择。可提供持久的推进动力并极大提升载荷能力、数传能力, 实现太阳系内全域到达, 有效开展太阳系内行星及其卫星的探测, 以及太阳系边缘柯伊伯带甚至恒星际空间探测。

(2) 星表基地建设与行星资源开发任务

在星体表面上建设基地可更直接、更深入地进行科学探测。受天体自转、星表沙尘暴等影响, 太阳能的应用受到了限制。空间堆电源功率范围大、寿命长、生存能力强、不依赖阳光、可全天候工作, 是星球表面基地建设和星球发电能和热能供给的理想方案, 能大幅提升星表科研站有效工作时间和效率。

(3) 深空轨道转移运输任务

对火星、木星等天体的采样返回或未来的载人星际航行, 探测器的重量、功耗大幅提升。基于空间堆可实现更加高效、快速的火星及以远的行星际轨道转移。以载人火星探测为例, 相同的任务时间和等效速度增量情况下, 采用化学推进的航天器系统LEO运载能

力(货运飞船)要求为千吨量级, 且80%是推进剂, 而采用核电/核热推进的航天器LEO运载能力要求为百吨量级, 具有更优的整体任务效能。

3.2 地球高轨领域

(1) 空间综合服务

基于100 kWe级以上核动力高轨综合服务站, 每年可服务约15~20个GEO目标, 具有切实的经济效益和战略价值。此外, 空间堆还可在天基数据处理、信息传输、通信广播等领域发挥积极作用。

(2) 高分辨率对地观测领域

未来36000 km轨道高分辨率微波遥感卫星(GEO-SAR)功率需求为100 kWe级, 1100~1300 km轨道高分辨率SAR卫星的功耗将达到40~60 kWe左右, 空间堆具有良好经济竞争力。较大功率柔性太阳翼因帆板面积大、翼展长, 姿态调整引起平台颤振而严重影响卫星成像质量, 空间堆装置无此类问题。

4 空间堆电源主要技术路线

空间堆电源装置由核反应堆(含堆芯冷却及传热)、屏蔽体、能量转换单元、散热单元、电源管理共5部分, 不同路线的差异主要体现在采用了何种反应堆(含堆芯冷却及传热)和热电转换单元。不同反应堆类型, 其重量、工作温度和压力等各不相同, 与之对应了几种适宜的热电转换方式。目前暂不存在某一方案在不同功率需求下, 均能表现出较好的性能。

确定技术路线的主要原则: 一是满足应用需求的总体要求, 包括经济性、安全性、使用寿命等; 二是电源方案具有较高的性能指标, 尤其是具有较高的功率质量比; 三是具有较好的技术基础, 研发难度小、可实现性好; 四是不同方案间的继承性和借鉴性好。

从系统复杂度、重量等方面考量, 空间用反应堆主要以快中子能谱堆(简称快堆)为主, 可省掉中子慢化系统以减少重量和复杂度, 代价是铀235的燃烧率低。从技术成熟度、与发电方式匹配程度等方面考虑, 反应堆主要采用的冷却方式有热管冷却(液态钠或锂为工质)、液态金属冷却(液态钠钾合金或锂为工质)、惰性气体冷却。反应堆主要技术路线如表1。

热电转换分为动态发电和静态发电两种。动态发

电是指将反应堆导出的热能转换为机械能,再由发电机转换为电能的发电方式,对应了斯特林、布雷顿等发电方式.静态发电是指将热能直接转换为电能,没有机械运动部件和噪声的发电方式,对应了温差、热离子、碱金属、磁流体等发电方式.空间堆电源发电主要技术路线如表2所示.

热管冷却快中子堆电源具有系统结构简单、防单点失效、非能动、不需专门解冻等优点.采用的热电转换方式主要为温差发电和斯特林(美国Kilopower为此方式)发电.技术较成熟,适用于10~100 kWe级低功

率需求.

碱金属回路冷却快中子堆电源,导热能力最强,须考虑空间极端环境冷却系统解冻问题.采用的热电转换方式主要有温差发电、斯特林发电、热离子发电、碱金属等.技术较成熟,功率扩展性优于热管冷却快中子堆电源.

气体回路冷却堆,热电转换方式采用闭式布雷顿循环(俄罗斯TEM为此方式)和磁流体发电.由于工作温度高,对材料提出了很高的要求(使用耐高温合金),在100 kWe级以上具有明显优势.

表 1 空间堆主要类型及特点

类型	特点
热管冷却快中子堆	通过内部工质液气相变和毛细力回流来实现高效传热传质,热端受热液体工质受热蒸发汽化,蒸汽在微小的压差下流向冷端放出热量,凝结成液体,液体依靠多孔材料毛细力的作用流回蒸发段. 优点:系统结构简单,每根热管自成一独立的热传导回路,有效避免单点失效;利用毛细力驱动传热,无运动部件,有助于停堆后的余热排出;内压小,对材料蠕变强度要求低;无需专门解冻、能自启. 缺点:传热效率受限,适用于中低功率堆型
液态金属冷却快中子堆	通过电磁泵,驱动密封回路内的液态碱金属,将堆芯热量带出. 优点:传热效率高,接口较简单;内压小,对材料蠕变强度要求低. 缺点:回路易冻结,且冻结后解冻重启困难;回路存在泄漏风险;需要高温电磁泵驱动,技术难度大;若存在裂变气体,弱重力下气液分离困难
气体冷却快中子堆	通过密封回路内的高压气体将堆芯热量带出. 优点:可允许很高的堆芯温度,不需专门解冻;惰性气体无腐蚀;易于与布雷顿、磁流体发电匹配,适用于MW级大功率发电. 缺点:高气压(0.3~3 MPa)对结构材料高温蠕变强度的要求最高;气体泄漏风险较大;需要压缩机驱动,存在运动部件

表 2 空间堆电源发电技术分类及特点

发电技术	技术特点
温差	(1) 技术成熟,可靠性高,长寿命 (2) 效率4%~6.8%,系统功率5 We~40 kWe (3) 效率低,不具有大功率的拓展能力
热离子	(1) 结构紧凑,布局简单,可靠性高,技术成熟度高,寿命约3~5年 (2) 效率5.5%~10%,系统功率5~40 kWe (3) 效率低,需解决材料蠕变肿胀导致寿命偏低的问题
碱金属	(1) 结构简单、理论转换效率高 (2) 效率20%~30%,系统功率5~100 MWe (3) 基体合多孔薄膜电极易被堵塞导致转换器寿命低,技术不成熟
磁流体	(1) 能量密度高,理论效率高;技术成熟度低,高电导率解决难 (2) 效率22%~55.2%,系统功率40 kWe~100 MWe (3) 反应堆出口温度高(1500 K以上),材料和工艺要求高,发电通道腐蚀防护难等
布雷顿	(1) 内燃机原理,地面技术成熟 (2) 效率14%~25%,单机35~350 kWe,系统35 kWe~1.4 MWe (3) 耐高温、高转速、长寿命、小尺寸的涡轮机研制难度大
斯特林	(1) 最接近理想卡诺循环 (2) 效率22%~28%,单模块电功率10 We~10 kWe,系统400 We~200 kWe (3) 单机功率低,长寿命难度大

5 空间堆电源发展设想

5.1 划分为10, 100, 1000 kWe级3个功率级别的主要考量

受运载火箭发射能力和整流罩包络的约束, 应尽可能提高反应堆出口温度并采取高效率热电转换技术, 切实提升比功率, 避免系统的体积与重量因功率提升呈线性增加。

划分为3个功率级别的主要原因: 一是不同功率等级有着与之对应的任务需求; 二是功率越大技术难度也大幅增加。故基于综合技术成熟度、技术递进关系、研发周期等因素, 按照由易到难、不断突破、滚动发展的研制思路, 有效突破难熔金属选型及加工工艺、材料长期辐照肿胀预防及应对、高效废热排散技术等关键技术, 不断提升指标与性能, 有序开展10, 100, 1000 kWe级空间堆电源的研制。

选择10 kWe级为空间堆电源突破口的主要考量: 一是设计裕度相对宽松, 由于系统功率小, 结构质量小、辐射剂量小、体积小, 可以采取较大的设计裕度和冗余设计, 提升系统的可靠性、安全性; 二是技术指标要求不高, 热电转换效率和反应堆出口温度相对较低, 故最核心的技术难题——元件材料与反应堆结构材料要求也低, 与现有工程体系基本相当, 工程应用和安全设计基础好。可在较短的研制周期内, 根据空间任务的需求, 以较少的经费开展10 kWe级空间堆装置的研制与飞行应用, 是经费省、风险小的现实途径。

5.2 10 kWe级空间堆电源基础航天器

10 kWe级是空间堆电源航天器的基础型, 适用功率范围为1~100 kWe, 主要应用目标是难以使用太阳能的空间探索任务, 如太阳系边际探测、星球表面科研站等。重点突破空间堆电源总装集成、非核与涉核试验、数字仿真与验证等关键技术, 实现空间堆动力装置的首次在轨飞行与应用。

总的研制思路是研制功率范围为1~10 kWe的单个空间堆电源, 根据任务需求通过模块化组装的方式, 实现1~100 kWe的电功率输出能力。当前主要有热管冷却快中子堆+温差/斯特林和液态金属冷却热中子堆+热离子热电转换等技术路线。10 kWe级核动力航天器具备10~25年寿命空间运行能力, 可为长周期空间

任务提供充足电力供给。10 kWe级核动力航天器展开状态构型示意见图6。

5.3 100 kWe级空间堆电源实用航天器

利用10 kWe级空间堆电源航天器研制及在轨应用数据, 开展100 kWe级空间堆电源航天器的研制。主要应用目标是深空轨道转移、高分辨率对地观测、空间综合服务。

研制功率范围为100~250 kWe的单个空间堆电源, 根据任务需求通过模块化的方式, 实现100~900 kWe的功率输出能力。当前有锂热管冷却快中子堆+斯特林发电、液态锂冷却快中子堆+斯特林发电、热管冷却快中子堆+热声电发电(图7)、液态锂冷却快中子堆+布雷顿循环发电和气冷快中子堆+磁流体发电等技术路线; 此外, 若碱金属发电技术获得突破, 将十分具有竞争力。

5.4 1000 kWe级空间堆电源应用航天器

基于前期核动力航天器研制和应用经验, 开展1000 kWe级空间堆电源航天器(图8)的研制。应用目标是地月、地火转移轨道大质量往返运输能力, 支撑各类空间站等大型空间基础设施建设, 载人火星探测货运舱飞行等深空任务。

若将100 kWe级空间堆装置简单放大至1000 kWe级, 将导致系统质量、结构尺寸的线性增加, 运载能力难以负荷。应尽可能提升系统热电效率, 须突破耐极高温的核燃料元件及结构材料、高热电转换效率、超高效率的热排散等关键技术, 进一步提升比功率。

研制功率范围为500~2500 kWe的空间堆电源, 通过模块化组合达到实际任务功率要求。目前主要有气体冷却快中子堆+磁流体发电和气体冷却快中子堆+布雷顿发电两种技术方案。由于系统效率的原因, 超大功率的空间堆电源需要发展非常高效率的热电转换技术, 以有效降低系统废热排散功率和辐射屏蔽层质量。

6 空间堆电源关键技术分析

空间堆电源作为深度融合航天工业和核工业的大型、复杂航天器系统, 涉及特种航天器总体、空间堆、热电转换、辐射散热、伸展机构、电源管理等多

图 6 10 kWe级核动力深空探测器飞行示意图

图 7 100 kWe级热管冷却快中子堆+热声电发电技术方案示意图

图 8 1000 kWe级空间核动力航天器示意图

个分系统(如图9所示)与学科专业,各系统紧密耦合且相互制约,对总体设计、集成与试验提出了严酷的要求。总体设计需要从系统工程的角度,综合考虑系统之间接口关系和众多约束条件,开展总体参数优化设计,最终形成满足任务需求的最优解决方案。

6.1 空间堆技术

空间堆电源是核动力航天器能源供给的源头,通

图 9 空间堆系统组成

过中子诱发持续的链式裂变反应释放能量,其行为与系统内中子的空间、能量、时间分布有关(图10)。空间堆与热电转换、辐射散热等分系统之间亦存在着强烈的耦合性,瓶颈是高温难熔材料及其制备工艺技术。应基于已有的数据与模型,利用数字化仿真与验证技术,综合考量质量、寿命、可靠性等各参数之间的匹配和制约关系,开展空间堆方案论证与设计,选择效率高、技术基础好、可实现性较强的系统方案。

核心指标:具备多次启堆/停堆能力;反应堆系统满功率运行寿期 ≥ 10 年;辐射剂量符合约束;事故工况下保证临界安全。

6.2 高效热电转换技术

热电转换系统是将核热能转换为电能的核心系统(图11),不同的热电转换技术须采用与之最匹配的反应堆。重点是提高系统效率、寿命和可靠性,特别是动态发电技术由于包含机械旋转部件且运转速度和循环温度均较高,对高温性能、长寿命性能和空间环境适应性提出了较高要求。

核心技术指标:10 kWe级整个电源系统热电转换效率 $\geq 5\%$,寿命 ≥ 10 年(太阳系边际探测 ≥ 25 年);100 kWe级整个电源系统热电转换效率 $\geq 20\%$,寿命 ≥ 10 年;1000 kWe级整个电源系统热电转换效率 $\geq 40\%$,寿命 ≥ 10 年。

6.3 大功率热排散技术

热排散效率是关系到空间堆体积与重量的关键因素,当前热管式热排散具有较好基础,散热效率更高的液滴式排散技术(图12)是未来攻关重点。由于核动力电源往往是与大功率电推进装置组合使用,且电推进热排散问题也比较突出,由航天器统一考虑热排散有利于系统减重。

图 10 燃料棒式空间堆堆芯示意图

图 11 空间布雷顿发电装置示意图

图 12 液滴式热排散原理示意图

基于空间堆大功率热量排散需求, 进行大功率辐射散热系统总体方案设计及热仿真分析。主要开展泵驱动中高温流体回路技术、热管式及液滴式轻质辐射器技术以及大型辐射器折叠展开技术研究, 重点是降低辐射散热系统的整体质量和尺寸。

核心技术指标包括: 展开式辐射器耐温上限不低于400~600 K; 满足核动力飞行器重量及尺寸包络要求。

6.4 高性能核燃料/结构材料选型与工艺制备

提高反应堆出口温度可有效提升系统热电转换效率, 与堆芯燃料元件材料和结构材料(导热管道、能量转换单元等)的性能密切相关, 应具备在高温、辐照、腐蚀等环境下稳定的工作能力, 材料选型与工艺制备是技术可行性和研发成本的核心因素。

燃料元件材料宜选取密度较大、力学性能和热学性能较好的核燃料。目前主要的核燃料包括陶瓷燃料(UO_2 , UN, UC)、铀合金(Umo, Uzr, UZrH)、金属陶瓷等, 从材料抗辐照性能角度宜采用陶瓷燃料。在陶瓷材料中, UC在高温下蠕变速率最低^[34], 但高温辐照下肿胀最显著, 随着燃耗增加将存在较大的芯块-包壳作用风险; UN在高温辐照下随着燃耗增加会释放氮气和裂变气体, 在包壳内形成高压甚至穿孔; UO_2 存在铀密度低、高温热导率较差的不足, 但由于其辐照肿胀小、裂变气体释放率低、制备技术成熟且经过长期考验, 仍是目前的最佳选择。

结构材料应有良好的抗辐照性能(如辐照硬化和脆化、肿胀、相变、蠕变等)和高温力学性能(高强度、抗热蠕变、抗老化等), 此外还需拥有良好的加工焊接性能和与碱金属的相容性。奥氏体不锈钢和镍基合金技术最为成熟, 基本满足10 kWe级空间堆研制需要。对于工作温度设计值为1500 K左右中等100 kWe级空间堆, 仅钼合金、钽合金和钨合金满足设计温度要求。钼合金相对于钨合金具有密度和韧脆转变温度(DBTT)更低的优势, 相对钽合金具有更好的抗氧脆性能(ppm量级的氧杂质变会导致拉伸性能严重恶化)和较低的密度, 因而成为热管结构材料的首选。对于工作温度达约2000 K或更高的1000 kWe级空间堆, 只能采用钨合金作为结构材料。涉及的主要基础问题是要设计出耐高温、抗辐照、耐腐蚀(碱金属)的钨合金(或钼合金)结构材料体系, 掌握所需结构件的制备加工、密封焊接等技术。

6.5 轻质高效辐射屏蔽技术

对于超大功率的空间堆电源, 利用不同材料对不同射线的屏蔽作用, 研制出轻质高效复合辐射屏蔽层。采用高原子序数元素的材料(如钨、贫化铀等)屏蔽 γ 射线, 钨是质量最轻的 γ 射线衰减材料^[35]; 采用含有轻元素和有较大热中子吸收截面元素的材料来慢化和吸

收中子(如氢化锂和碳化硼). 氢化锂是优异的中子屏蔽材料^[35], 氢具有最佳快中子慢化性能, 锂-6具有优良的中子吸收性能, 可大大降低屏蔽体质量, 但氢化锂使用条件苛刻, 辐照条件下高温易分解、低温易肿胀, 在高温端需采用辐照肿胀低且使用温度范围宽的碳化硼材料, 并需要对屏蔽体进行温控. 高效轻质反应堆复合辐射屏蔽层结构基本构成如图13所示.

6.6 试验验证技术

在反应堆试验验证方面, 结合反应堆在空间环境约束下的特殊性开展不同功率量级和堆型地面试验, 验证设计方案的合理可行性, 以及反应堆的安全可靠性. 主要涉及反应堆结构材料试验、高温燃料元件试验、中子物理试验、热工水力循环试验、辐射屏蔽试验、临界安全试验等, 需重点建立结构材料与核燃料高温辐照性能考核试验、中子物理设计验证和热工设计验证三类试验平台^[36-40], 并发展数字仿真验证技术.

在核动力电源航天器试验方面, 需在大挠性航天器姿态控制、大功率热管理、发电和电源管理等方面开展试验, 验证设计方案的安全性和可靠性. 主要涉及轻型高刚度伸展机构地面模拟试验; 基于热管、热回路和新型散热技术的中高温热综合管理和验证试验; 动静态空间热电转换模拟试验; 超大功率电源传输模拟试验; 核辐射、空间辐射模拟及防护试验等.

针对空间堆电源发射与在轨应用环境的特殊性, 在地面上需开展空间堆电源各类力、热、电磁等试验, 模拟空间环境完成整体的鉴定级和验收级试验, 主要包括模态试验、振动试验、噪声试验、冲击试验、热平衡试验、热真空试验、磁测试、检漏、电磁兼容试验、老练试验等, 以及各类可靠性试验. 为此, 需加强地面试验能力建设并提高保障条件, 一方面充分利用已有的实验装置、台架和设备, 并补充完善试验条件, 包括必要的辐射安全保障场所等; 另一方面需系统规划并新建满足10, 100, 1000 kWe不同功率等级的核电源系统验证和考核试验条件.

7 涉核安全性问题

核安全是空间核能应用的核心和基础, 也是公众能否接受的重要因素. 与地面核设施相比, 由于空间堆电源装置的运行环境和任务剖面不同, 特别是体积

图 13 高效轻质反应堆复合辐射屏蔽层示意图

质量的强约束和系统的不可维护维修性, 在设计时无法做到与地面核设施同等的冗余性和多样性. 同时, 空间堆电源装置整个寿命周期会经历地面、发射、在轨运行等多个阶段, 一旦发生事故可能影响的范围和空间也更大. 因此, 空间核安全问题十分重要和特殊.

7.1 历史上空间核安全问题

截至目前, 美国共开展了36次载有核动力装置的太空任务, 其中有3次发射或部署失败, 但均未造成有害的放射性影响. 苏联及俄罗斯在其42次空间载核任务中报告过6次失败的任务, 最为严重的是1978年苏联载有反应堆的COSMOS 954卫星再入大气层并解体, 带有放射性的碎片散落在加拿大北部无人区, 事后通过处理和回收, 并未造成明显的环境影响, 但往后的空间核电源便更加注重安全设计与应用规范.

基于以往经验的分析表明, 在应用放射性同位素源的空间任务中, 一旦发生发射失败或意外再入, 保持放射性同位素源的完整性比在高空烧毁对生物圈的影响更小, 是更为安全的策略. 对于空间堆, 裂变反应前将其完全烧毁并完全扩散是减轻放射性危害的较优策略; 发射至800 km以上高度再启动裂变反应, 发生意外事故不会对地面产生危害.

7.2 国际公约情况

空间核应用需遵守相关的国际规则^[36], 目前直接规范空间核动力源的国际文件有1992年通过的《关于在外层空间使用核动力源的原则》, 以及2009年制定的《外层空间核动力源应用安全框架》. 这两个文件为空间核动力装置的应用提供了需遵循的一般原则和

技术性规范;关于安全问题也提出了相应标准,要求空间核动力自身的辐射与毒性,以及事故条件下的危害,应低于国际辐射防护委员会、国际辐射防护有关准则等的要求,以确保空间核动力源达到放射性防护和核安全目标。

7.3 不同阶段的核安全考虑

空间核电源从地面发射至轨道上应用可分为多个活动阶段,各个阶段均需进行专门的安全性考虑。例如,在地面阶段,需考虑运输、装料、装配和测试等情况下的安全问题;在发射准备阶段,需考虑起火、爆炸、撞击等情况下的安全问题;在发射部署阶段,需考虑发射失败、轨道偏离等情况下的安全问题;在运行阶段,需配置可靠的启停控制手段和相关辅助安全应急系统;在废弃处置阶段,需确保核动力装置处于足够高的规定高度上,避免使其再入。

7.4 涉核安全的主要研究内容

空间涉核安全的关键内容是极端意外情况下核动力装置安全指标的确定及其试验验证方法,为此需构建空间核动力安全认证体系,主要包括涉核试验、核

动力航天器应用全流程的安全指标及试验方法,包括故障模式和极端意外情形下进行安全认证的能力^[41]。尽管很多为地面核设备开发的安全措施可以直接应用到空间堆系统,但由于结构、运行要求和环境等存在很大不同,产生了很多独特的安全问题,应充分考虑核反应堆空间应用的特殊性,借鉴国外前期探索的经验教训,开展系统全面的故障模式分析、极端环境条件研究、安全指标及试验方法研究等,制定合理的安全原则和策略,加强安全与可靠性设计,建立覆盖全面、指标合理的空间核动力安全认证体系。

8 结束语

航天发展动力先行,针对未来航天器大功率能源与动力供应的卡脖子问题,我国有关部门应积极统筹航天与核领域的优势力量,建立抓重大、抓尖端、抓基本的有利局面,竞争择优,在先期多条路线并行探索的基础上,迭代形成重点技术路线进行集中攻关,分阶段滚动开展10, 100, 1000 kWe级核动力航天器的研制与飞行试验,实现我国空间飞行器能力跨越式发展。

参考文献

- 1 苏著亭,杨继材,柯国土. 空间核动力. 上海:上海交通大学出版社, 2016. 122-123
- 2 Bennett G L. CRC Handbook of Thermoelectrics. Boca Raton: CRC Press, 1995. 515
- 3 El-Genk M S. Deployment history and design considerations for space reactor power systems. *Acta Astronaut*, 2009, 64: 833-849
- 4 Slaby J G. Overview of free-piston stirling SP-100 activities at the NASA Lewis Research Center. In: Third International Stirling Engine Conference. Rome, 1986. CONF-860676-2
- 5 Anderson R V, Atkins D F, Bost D S, et al. Power plant system assessment-final report. Technical Report. SP-100 Program. NASA, 1983
- 6 Demuth S F. SP100 space reactor design. *Prog Nucl Energy*, 2003, 42: 323-359
- 7 Slaby J G, Alger D L. Overview of free-piston stirling technology for space power application. In: 22nd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. Philadelphia, 1987
- 8 Van Dyke M K, Martin J J, Houts M G. Overview of nonnuclear testing of the Safe, Affordable 30-kW Fission Engine including end-to-end demonstrator testing. NASA Technical Report, 2003, NASA/TM-2003-212930
- 9 Hrbud I, Van Dyke M, Houts M, et al. End-to-end demonstrator of the Safe Affordable Fission Engine (SAFE) 30: Power conversion and ion engine operation. NASA Technical Report, 2001, NASA-9-99055-40
- 10 Steeve B E. Safe affordable fission engine 100 a heat exchanger thermal and structural analysis. NASA Technical Report, 2005, NASA/TM-2005-213609
- 11 Houts M G, Poston D I. Heatpipe Power System Development. Technical Report, 1999, LA-UR-98-3276
- 12 JIMO Team. Jupiter Icy Moons Orbiter (JIMO)—An element of the Prometheus Program. Annual Report, 2004, JPL 04-01610-04
- 13 Houts M G, Poston D I, Ranken W A. Heatpipe space power and propulsion systems. In: STAIF-96 Meeting. Albuquerque, NM, 1996
- 14 Poston D I. The Heatpipe-Operated Mars Exploration Reactor (HOMER). Technical Report, 2000, LA-UR-00-5209

- 15 Van Dyke M, Martin J. Hardware progress made in the Early Flight Fission Test Facilities (EFF-TF) to support near-term space fission systems. NASA Technical Report, 2005, NASA/TM-2004-213447
- 16 Bennett G L. Space nuclear power: A status review. In: 33rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, 1995, AIAA 95-0025
- 17 NASA. NASA Technology Roadmaps—TA3: Space Power and Energy Storage. NASA Technical Report, 2015. 5–7
- 18 Akimov V N, Koroteev A A, Koroteev A S. Space nuclear power systems: Yesterday, today, and tomorrow. *Therm Eng*, 2012, 59: 953–959
- 19 朱安文, 刘磊, 马世俊, 等. 空间核动力在深空探测中的应用及发展综述. *深空探测学报*, 2017, 4: 397–404
- 20 胡古, 赵守智. 空间核反应堆电源技术概览. *深空探测学报*, 2017, 4: 430–443
- 21 Elliott J O, Reh K, MacPherson D. Lunar Fission Surface Power System design and implementation concept. AIP Conf Proc, 2006, 813: 942
- 22 Mason L S. A comparison of fission power system options for Lunar and Mars surface applications. NASA Technical Report, 2006, NASA/TM-2006-214120
- 23 Fission Surface Power Team. Fission Surface Power System initial concept definition. NASA Technical Report, 2010, NASA/TM-2010-216772
- 24 Interview: Academician Anotoly Koroteyev. An Inside Look at Russia's Nuclear Power Propulsion System. 21st Century, Fall/Winter 2012–2013. 57–59
- 25 Submitted by the Russian Federation. Current and Planned Applications, and Challenges. UN COPUOS Scientific and Technical Subcommittee 59th Session, A/AC.105/C.1/2012/CRP.6, Vienna, Feb 2012
- 26 IAEA. The Role of Nuclear Power and Nuclear Propulsion in the Peaceful Exploration of Space. Austria: International Atomic Energy Agency, 2005. 3, 59–60
- 27 Teofilo V L. Space Power Systems for the 21st Century. AIAA 2006-7288
- 28 Cataldo R L, Bennett G L. US Space radioisotope power systems and applications: Past, present and future. NASA 20120000731
- 29 Gibson M A, Oleson S R, Poston D I, et al. NASA's Kilowatt reactor development and the path to higher power missions. NASA Technical Report, NASA/TM-2017-219467, 2016
- 30 Sanchez R G. Kilowatt Reactor Using Stirling TechnologY (KRUSTY) experiment update. Technical Report. 2017
- 31 Palac D, Gibson M, Mason L, et al. Nuclear Systems Kilowatt Overview. Cleveland: NASA Glenn Research Center, 2016
- 32 McClure P, Poston D, Dixon D. Final results of demonstration using flattop fissions (DUFF) experiment. Technical Report. 2012, LA-UR-12-25165
- 33 Gibson M A, Mason L, Bowman C. Development of NASA's small fission power system for science and human exploration. In: 12th International Energy Conversion Engineering Conference. Cleveland, OH, 2014. 7
- 34 Susan S V, Rodriguez E A. Russian TOPAZ II system test program (1970–1989). AIP Conf Proc, 1994, 301: 803
- 35 William J B. Review of previous shield analysis for space reactor. Space Nuclear Power Systems. In: 1984: Orbit Book Company. Malabar, FL, 1985. 329–336
- 36 Poston D. Space nuclear reactor engineering. Technical Report. 2017, LA-UR-17-21903
- 37 Mason L, Casani J. A small fission power system for NASA planetary science missions. Technical Report. NASA/TM-2011-217099, 2011
- 38 Mason L, Bailey S, Bechtel R. Small fission power system feasibility study. Final Report. 2010, NASA/DOE
- 39 Mason L, Palac D, Gibson M. Design and test plans for a non-nuclear fission power system technology demonstration unit. Technical Report. 2011, NASA/TM-2011-217100
- 40 Bragg S, Bess J, Werner J. Reactor testing and qualification: Prioritized high-level criticality testing needs. Technical Report. 2011, INL/EXT-11-22725
- 41 王国语, 吕瑞. 空间核动力源应用国际规则现状与发展分析. *中国航天*, 2016, 9: 40–41

System engineering research and application foreground of space nuclear reactor power generators

WU WeiRen¹, LIU JiZhong¹, ZHAO XiaoJin², DAI ShouLun³, YU GuoBin¹, WAN Gang⁴,
LIU CangLi⁵, LUO Qi⁶, PANG FuChuan¹, ZHU AnWen², TANG ShengYong³, LIU WeiPing⁴,
ZHANG ChuanFei⁵ & ZENG Wei⁶

¹ Lunar Exploration and Space Engineering Center, Beijing 100190, China;

² China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;

³ Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201108, China;

⁴ China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

⁵ China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

⁶ Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China

Space nuclear reactor power is the application of self-sustaining nuclear fission energy in space, which can fundamentally solve the bottleneck problem of high power demand of spacecraft in the future. It is also the premise of large-scale development and utilization of space resource. New technology of nuclear reactor power and its development roadmaps are reviewed in this paper. Based on the future development trend, mission requirement, and main technical route, we suggest that the space nuclear reactor power could be developed in stages according to grades of 10, 100, 1000 kWe. Issues of key technologies and nuclear safety are also analyzed. The content of this work may provide a reference for the future development of space nuclear reactor power.

space nuclear reactor power, mission requirements, key technology, safety, overall program

doi: [10.1360/N092018-00374](https://doi.org/10.1360/N092018-00374)