

# 空间核动力推进技术研究展望

张 泽, 薛 翔, 王园丁, 王浩明, 杜 磊

(上海空间推进研究所 上海空间发动机工程技术研究中心, 上海 201112)

**摘 要:** 为满足未来太阳系边际探测、深空轨道转移、载人深空探测等大型空间任务对于高可靠、可持续、大功率动力源的需求, 空间核动力推进技术成为全球研究热点。通过追踪世界主要国家现阶段空间核动力发展动态, 对空间核动力领域模块化、通用化、型谱化的发展方向进行了系统性梳理, 对涉及的总体技术、散热技术、制造技术、验证技术等关键技术进行了解析。最终总结我国核心优势和潜在风险, 为未来空间核动力推进的规划论证与技术研究提供参考。

**关键词:** 空间核动力; 空间推进; 核裂变反应堆; 核热推进; 核电推进

**中图分类号:** V439.5    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-9374(2021)05-0001-13

## Prospect of space nuclear power propulsion technology

ZHANG Ze, XUE Xiang, WANG Yuanding, WANG Haoming, DU Lei

(Shanghai Engineering Research Center of Space Engine,

Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China)

**Abstract:** In order to meet the demand of reliable, sustainable and high-power energy sources for large-scale space missions in the future, such as marginal exploration of the solar system, deep-space orbit transfer and manned deep-space exploration, space nuclear power propulsion technology has become a global research hotspot. By reviewing the current development trends of space nuclear power in major countries, this paper systematically sorts out the development direction of space nuclear power including modularization, generalization and spectrum. The key technologies such as integration, heat dissipation, manufacture, verification and others involved in space nuclear power are thoroughly analyzed. Finally, the core advantages and potential risks for China are summarized, which provides a reference for the demonstration and investigation of future space nuclear power propulsion.

**Keywords:** space nuclear power; space propulsion; fission reactor; nuclear thermal propulsion; nuclear electric propulsion

## 0 引言

随着人类的探测活动向深远空间不断拓展,

对于可靠性高、能量密度大、使用寿命长、不受环境因素影响的动力源的需求日益突出, 而传统化学推进系统因推进剂携带量的限制已经难以满足

收稿日期: 2020-12-16; 修回日期: 2021-04-06

基金项目: 上海市青年科技英才扬帆计划(21YF1430200)

作者简介: 张泽(1993—), 男, 博士, 研究领域为先进空间推进技术。

要求。目前最常用的深空探测器能源供给方式为太阳能电池阵列发电,然而随着功率需求的提高和对日距离的增长,太阳能发电的效能显著降低,对于 100 kW 以上的大功率任务已经不再适用。目前看来,核能是未来空间能源的必然发展方向<sup>[1-2]</sup>,各国也对空间核动力进行了长期和深入的探索。

根据现阶段技术发展,在空间推进领域利用核能的主要途径有两种:一是通过核反应堆释放的能量将推进剂直接加热到 2 500 K 以上,随后喷管内将热能转化成定向喷射动能,即核热推进;二是利用核能进行热电转换,然后驱动大功率电推力器工作,即核电推进<sup>[3-4]</sup>。核热推进的能量利用过程与传统的化学火箭发动机相似,从而达到与之相当的吨级推力,有效避免了多次能量转换过程中的能量损失和散热问题,因此效率更高,能够获得的推重比也较高,但热力学原理限制了核热推进的加速效率,对于比冲的提高相当有限,只能达到 800 ~ 1 000 s,同时还存在核燃料高温腐蚀、核裂变产物释放造成的放射性污染等问题;核电推进由于是通过电磁场对带电粒子进行加速,因而可以获得更高的加速效率,比冲达到 3 000 ~ 10 000 s,不过由反应堆热能到电能再到定向喷射动能的能量转换过程限制了推进系统能量利用效率的提高,并且相应地需要更多的部件质量,推重比相对较低,推力在牛到百牛量级,还存在系统复杂、热电转换效率不高等技术难点<sup>[5]</sup>。在此基础上,还衍生出核热推进兼顾发电或核电推进的双模式以及多模式空间核动力推进方式。

核能的能量密度与常规化学能相比高出几个量级(见图 1)<sup>[6]</sup>,其优异的性能吸引了科研人员的广泛关注,目前已经在包括民用大规模发电、船用及潜艇用动力、航天探测器电源等领域得到了成功应用<sup>[7]</sup>。自 1965 年美国发射全球首个空间核反应堆电源开始,据公开资料报道,世界各国已发射 73 颗以核能作为能源的空间飞行装置,其中美国发射了 32 颗,苏联发射了 40 颗,中国发射了 1 颗,包括 38 颗放射性同位素航天器以及 35 颗核反应堆(核裂变)航天器<sup>[8-9]</sup>。由于放射性同位素主要应用于小功率热源或电源,并不适用于未来空间飞行器

的大功率推进任务,因而本文主要针对基于核裂变反应堆的空间核动力推进系统展开论述。

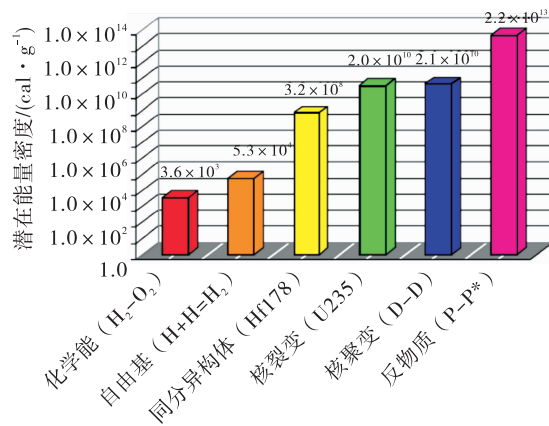


图1 各类物质能量密度

Fig. 1 Potential specific energy density of various substances

现有文献主要根据具体的研发计划与产品特性对世界各主要国家在空间核动力推进领域的成果进行总结,尚缺乏从技术发展的脉络对未来研究方向的分析。本文在梳理国内外最新政策导向的基础上,研判未来技术发展方向,识别空间核动力推进领域的关键技术,进而剖析我国的核心优势和潜在风险,对未来研究发展趋势进行展望。

## 1 主要国家在空间核动力推进领域的最新政策及技术进展

美国和俄罗斯历来视空间核动力推进为国家战略核心技术,在数十年的时间里支持和开展了一系列研发计划,取得了举世瞩目的成就。作为核动力技术的一个分支,始于冷战时期的空间核动力推进技术首先在相关军事用途的强力驱动下获得迅速发展。21 世纪以来,因化学能和太阳能等常规能源不能有效满足载人火星探测、星表科研站建设等未来空间探测任务需要,美、俄、欧在空间核动力推进领域的研发再次进入高潮,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工作。空间核动力推进技术的研发与应用将对国防军事、科学探索和拓展人类生存空间、开发宇宙资源、推动社会进步等产生重大影响。

### 1.1 美国

早在 1955 年,美国原子能委员会就启动了空间核辅助电源计划(space nuclear auxiliary power, SNAP)<sup>[10]</sup>,并于 1965 年 4 月成功发射了 SNAP-10A,成为人类历史上第一个在轨运行的空间核反应堆电源,采用温差热电偶发电的方式为航天器提供 500 W 的电功率,在运行 43 d 后被永久关闭。此后,美国在太空任务发展规划的优先级上不断进行调整,空间核动力领域的有关研究虽继续取得了重要进展,如 SP-100 计划<sup>[11]</sup>、应用于运载火箭的核发动机计划(nuclear engine for rocket vehicle application, NERVA)<sup>[12]</sup>和普罗米修斯计划(Prometheus)<sup>[13]</sup>等,但再也没有进行实际飞行试验和在轨应用。

2015 年 7 月,美国国家航空航天局(NASA)发布了详细的《NASA 技术路线图》,面向未来 20 年空间探索的任务需求列出了优先发展方向和预期研究水平<sup>[14]</sup>。其中在核热推进技术方面给出了具体的工作参数:推力 111 kN、比冲 900 s、最长单次工作时间 46 min、累计工作时间 85 ~ 102 min 等,针对载人火星探测任务的预期技术成熟度达到 8 级;在核电推进技术方面将空间核反应堆电源划分为 3 个功率等级:1 ~ 10 kW 应用场景为科学任务总线电源与载人探测星表能源,10 ~ 100 kW 应用场景为载人小行星探测等灵活路径任务,1 ~ 5 MW 应用场景为具有低质量密度要求(小于 5 kg/kW)的载人火星探测任务。NASA 在 2020 年发布的《NASA 技术分类》中,分别在推进系统(TX01)及空间电源与能源储存(TX03)分类下对空间核动力推进及空间核反应堆电源进行了强调<sup>[15]</sup>。

美国在空间中应用的涉核技术主要为放射性同位素电源,如在 2020 年 7 月 30 日发射的“毅力号”(Perseverance)火星车的动力即由多任务放射性同位素热电发生器(MMRTG)供应。目前美国最新的空间核动力计划为千瓦级电源计划(Kilopower),发电功率 1 ~ 10 kW,2018 年 3 月“采用斯特林技术的千瓦级反应堆”项目(kilopower reactor using stirling technology, KRUST)的 1 kW 演示机(见图 2)获得成功,成为 40 年来首个进行完全测试的空间核裂变反应器<sup>[16]</sup>。

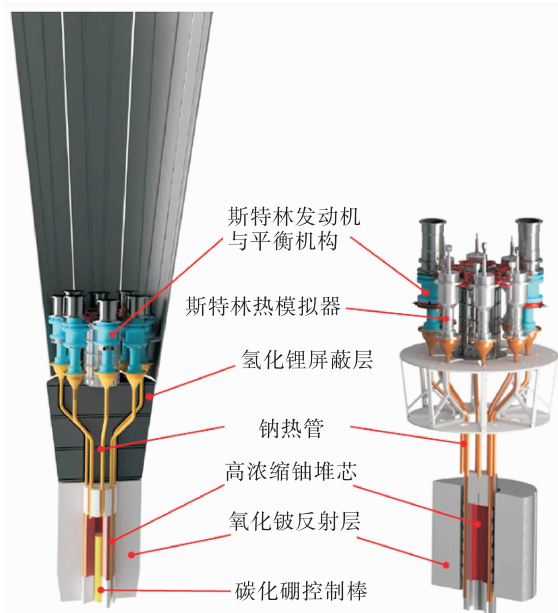


图 2 “采用斯特林技术的千瓦级反应堆”演示论证项目

Fig. 2 “Kilopower Reactor Using Stirling Technology (KRUST)” demonstration project

经过政策上的反复,2019 年 8 月 20 日,美国总统特朗普签署《关于发射含有空间核动力系统航天器的总统备忘录》<sup>[17]</sup>,对于发展空间核动力系统进行了最新的政策说明,表明了美国重新建立空间核动力推进能力技术优势的决心。备忘录指出,安全且可持续地使用空间核动力系统的能力对于保持和提升美国在太空的优势和战略领导力至关重要。备忘录特别强调了空间核动力系统的安全性评估政策,以可能发生爆炸的危害等级分为三级,其中包括高浓度铀核裂变反应堆在内的第三等级发射任务均需要经过总统的直接批准。同时,要求在备忘录生效的 180 d 内组建机构间核安全审查委员会,由国务院、国防部、能源部、交通部、环保局、NASA 及核管理委员会选出的代表组成,以便对于未来的核动力发射任务进行审查。

### 1.2 俄罗斯

自上世纪 50 年代开始,苏联同期对空间核动力开展了广泛且深入的研究,以 BUK 型温差热电转换的空间核电源为代表的动力装置在“宇宙”系列侦察卫星中先后完成了数十次成功在轨应用<sup>[18]</sup>。在此基础上还成功发射 TOPAZ- I 型热离子转换核电

源实现在轨应用,并完成了 TOPAZ- II 型核电源的全尺寸样机研制及地面测试,为空间核动力的技术发展积累了大量经验数据。随着苏联解体,相关研究也由于经费不足而步入低潮。

进入 21 世纪以来,着力发展深空探测的国家战略让俄罗斯重拾空间核动力研究。2008 年 4 月 24 日俄罗斯政府批准了《2020 年前及以后俄罗斯联邦在空间活动领域政策的原则》,表明俄罗斯政府对于全面开展空间研究、探索和利用的重要需求,时任总统梅德韦杰夫批准了总值 170 亿卢布的航天核动力系统计划。俄罗斯有关方面经过技术论证,认为核热推进研发成本过高且应用场景有限,而俄罗斯近年来在电推进方面取得的技术进步,提升了核电推进方案的技术可行性,因而决定集中力量对大功率热电转换技术进行攻关<sup>[19]</sup>,并与欧盟国家开展了广泛的国际合作。

2009 年 12 月俄罗斯航天局宣布,将开发用于行星间载人或无人任务的兆瓦级空间核动力飞行器——运输动力模块(TEM),由 Keldysh 研究中心和 Energiya 航天公司联合设计,力图突破空间核动力关键技术<sup>[20]</sup>。该兆瓦级空间核动力飞船由空间核电源系统进行供电,支持电推进系统实现深空探测任务,采用超高温气冷快堆+闭式布雷顿循环发电+热管/液滴辐射散热的技术方案。其中 4 个布雷顿循环发电核心机两两对置布置,核反应堆热功率为 3.5 MW,系统输出电功率为 1 MW,热电转换效率 28.6%,堆芯出口温度 1 520 K,飞行轨道高度达到 1 200 km,累计运行  $5 \times 10^4$  h 以上,单次连续运行  $1 \times 10^4$  h 以上,目标在轨服务周期 12 a。

该空间核动力飞船最早于 2012 年完成系统初步设计<sup>[21]</sup>,迄今为止,又经历了多次方案变化,如图 3 所示,对承重桁架设计、散热系统配置、空间结构布局等方面进行了调整完善。2018 年 10 月,对核动力发动机装置的冷却系统进行了地面测试;同年 12 月,Keldysh 研究中心宣布了在露天场所进行测试的准备工作。2019 年,俄罗斯国家航天集团公司称其已经开发了设计文档并测试了 TEM 模型的组件,Keldysh 研究中心还因为该项目进度延误被罚

款 1.5 亿卢布。2020 年 9 月,俄罗斯军火库设计局(KB Arsenal)开始着手组装核动力飞船,计划在 2030 年前将第一艘核动力太空拖船送入轨道并开展飞行试验。根据飞行计划,第一阶段,拖船将与有效载荷模块停靠在太空中并到达月球,对其进行探测并将一颗研究卫星留在其轨道上;第二阶段,将继续飞往金星并在途中进行补加氙气燃料的测试,在金星上一颗研究卫星也将从有效载荷模块中分离出来;而拖船本身与其余的科学设备将进行引力机动,进入第三阶段到达木星卫星的飞行任务,最终对其进行研究。



图 3 俄罗斯兆瓦级核动力飞行器结构方案演变

Fig. 3 Evolution of Russian MW-class nuclear power spacecraft structure scheme

### 1.3 欧盟

欧盟在空间核动力领域的最新政策主要围绕面向 2030—2040 年的兆瓦级国际空间核电推进(international nuclear power and propulsion system, INPPS)飞船进行开展,现阶段主要支持了 DiPoP、MEGAHIT、DEMOCRITOS 这 3 个项目的发展,在项

目中充分开展以俄罗斯为代表的国际合作。最新的 DEMOCRITOS 即“电推进系统转换器、反应堆、辐射器、推进器演示验证”项目(见图4)<sup>[22]</sup>,由英国 NNL(Nuclear National Laboratory)、德国 DLR(German Aerospace Center)、俄罗斯 Keldysh 研究中心、意大利 TAS(Thales Alenia Space Italia)、法国 ASL(Airbus-Safran Launchers)、ESF(European Science Foundation)、CNES(Centre National d'Etudes Spa-

tiales)等核领域和航天领域的专业研究机构合作开展,巴西 IEA(Instituto de Estudos Avancados)作为观察员。技术路线为建立 200 kW 的闭式布雷顿循环(见图5)<sup>[23]</sup>,将热管辐射反应堆的热量转换成电推力器所需的电能。目前正在进行单机设计以及地面演示验证装置基准测试初步设计,计划在 2023 年进行全系统试验。

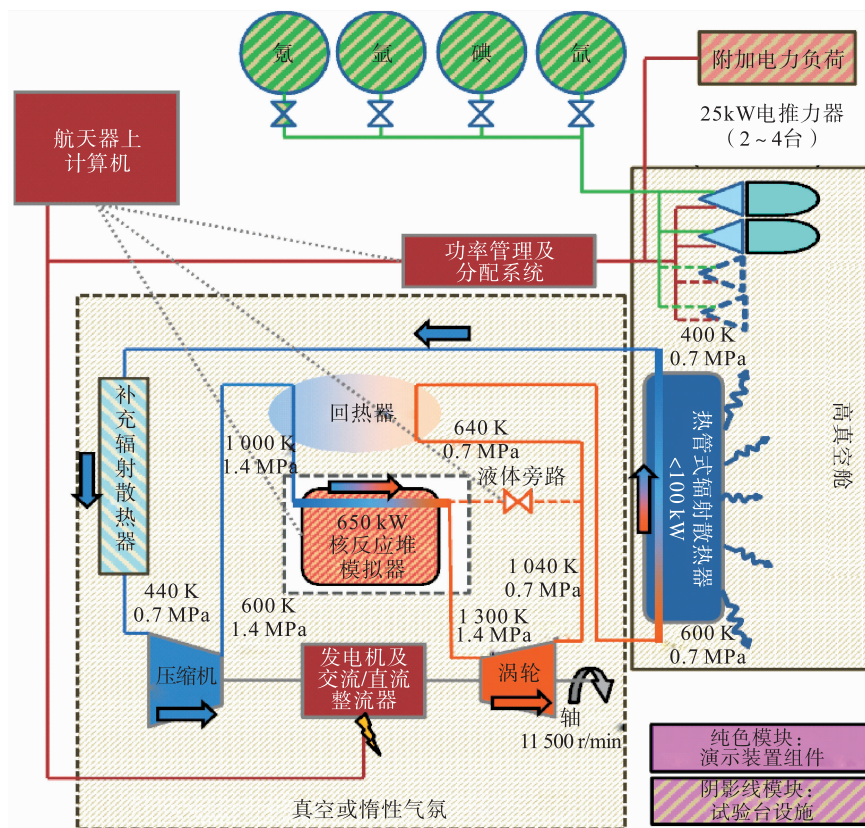


图4 DEMOCRITOS 试验系统及参数

Fig. 4 DEMOCRITOS experimental system and its parameters

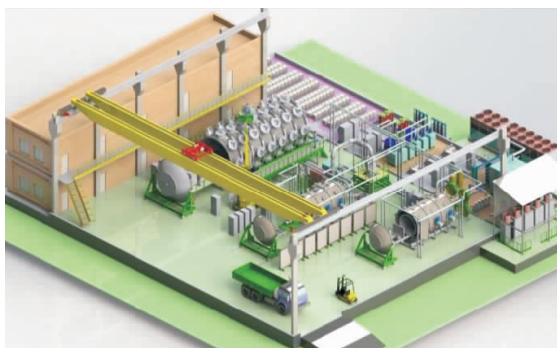
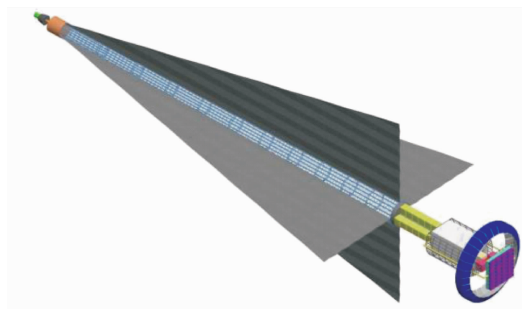


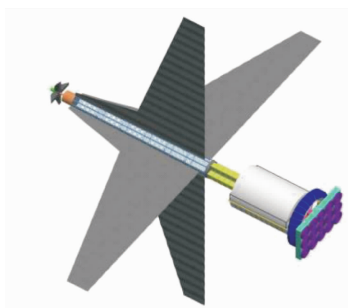
图5 俄罗斯 Keldysh 研究中心的 INPPS 地面演示试验装置

Fig. 5 INPPS ground demonstration testing unit in Russia Keldysh Research Center

DEMOCRITOS 项目目前已经完成了 1 MW 量级核电推进太空飞船初步设计,并针对木卫二和火星探测任务给出了两套整体方案,根据任务进行的空间环境与系统要求的不同,分别采用了不同的反应堆防护层和散热器结构(见图 6)<sup>[24]</sup>,最终目标达到向木卫二运送 12 t 货物以及向火星运送 18 t 货物的能力。



(a) 面向火星的窄翼(散热器)设计



(b) 面向木卫二的宽翼(散热器)设计

图 6 INPPS 飞船总体系统设计

Fig. 6 Integrated system design of INPPS spacecraft

在法国的推动下,2019 年欧空局(ESA)发布了最新的《空间核电源使用安全政策》<sup>[25]</sup>,“针对上世纪八九十年代欧空局与 NASA 的联合核动力任务以来,有关核活动的安全标准、最佳实践、公众认知、透明度和审查要求等所取得的重大进展”,建立了适应最新发展要求的空间核动力领域的安全准则框架,为未来的基础研究和工程应用奠定了政策基础。

#### 1.4 中国

我国早在 1949 年就率先由钱学森提出了发展核火箭的构想,并于 1958 年在原北京航空学院设立了核火箭发动机系<sup>[26]</sup>。其后,受国际应用趋势和国

内发展方向影响,有关研究一度陷入停滞。进入 21 世纪后,空间核动力推进逐渐被重新提上日程。

在空间核反应堆方面,中国原子能科学研究院以载人火星探测任务为应用背景,开展了针对核热推进的工作原理和总体结构论证,完成了多个空间核反应堆的方案设计<sup>[27]</sup>;清华大学则在国内第一座高温气冷堆(HTR-10 堆)的基础上,继续探索了球床堆等堆形结构在核电推进系统中的适应性<sup>[28]</sup>。

在火箭发动机方面,航天科技集团六院 11 所(京)瞄准载人登火、深空探测以及行星资源开发等任务背景,以核热发动机地面原理样机为出发点,提出了合理可行的空间核热推进发动机总体及主要组件技术方案,进而开展了优化设计和非核模拟原理试验研究<sup>[29-30]</sup>,同时也开展了基于斯特林循环的空间核电推进系统关键技术研究;航天科技集团五院 502 所联合中国原子能科学研究院和北京航空航天大学成立了空间核推进技术联合实验室,开展了空间核动力航天器方案论证并梳理出了系统级及子系统级别的关键技术,目前正在开展系统级的初步设计和优化工作,还对兼顾布雷顿回热循环发电的双模式空间核热推进系统进行了探索<sup>[31]</sup>;航天科技集团六院 11 所在载人航天领域支持下联合中国核动力研究设计院、中国工程物理研究院,开展了基于百吨级推力核热火箭发动机的应用方案论证,包括重型火箭上面级、轨道转移运载器、载人登火、深空探测等,论证了 10 t/100 t 推力核热火箭发动机系统论证和组件参数<sup>[32]</sup>,进行了反应堆燃料对比分析<sup>[33]</sup>,并完成了燃料包壳材料 2 500 K 耐高温试验和结构材料辐照试验;航天科技集团六院 801 所联合国内多家单位开展了百千瓦级空间核电推进系统方案论证,重点开展了闭式布雷顿循环大功率热电转换与大推力磁等离子体发动机和霍尔推力器研究<sup>[34]</sup>。

## 2 未来技术发展方向

为满足未来太阳系边际探测、深空轨道转移、载人深空探测、星表能源站、大型空间运输、大功率雷达、空间定向能攻防武器等空间任务对于高可靠可持续动力的需求,建立具有自主知识产权的空间核动力推进能力是我国建设航天强国的必经之路。

针对空间核动力领域技术发展的短板及瓶颈,结合国际发展经验,明确我国技术创新发展主要从以下几个方向展开。

## 2.1 推进系统设计模块化

从研发周期、技术成熟度、产品型号递进关系等角度出发,应该突破热力循环设计、高效废热排散、材料长期辐照耐受性、高温金属选型加工等关键技术,首先完成小功率、小推力空间核动力推进系统的设计和研制,再通过“捆绑”组合小型推进模块的方式将推进系统进行放大。

模块化设计的优势主要在于:一是设计裕度宽松,由于系统的辐射剂量和结构质量较低,能够采取较大的冗余设计,保证系统的安全性;二是系统可靠性高,多台小型推进模块组合实现的大推力结构对于模块失效的容忍度更高;三是材料耐温要求更低,由于反应堆出口温度相对较低,对于反应堆结构材料与元件材料的要求与现有工程体系相当,具备较好的安全设计基础;四是研究周期短、试验成本低,只需对模块进行完整的研究和试验,即可保证组合后的系统性能。

## 2.2 空间核反应堆设计通用化

对于空间核反应堆的堆芯方案以及燃料元件应采取通用化的组合设计,强化反应堆对于不同能量转换方式以及不同推力规模的系统适配性,一方面使之能够同时适配核热推进系统或核电推进系统,具有通用的换热结构、接口和设计约束条件,避免重复研发降低成本;另一方面在具体参数不明确的情况下,能够通过直接增减标准燃料元件的数量,构建不同尺寸以及热功率水平的反应堆,进一步实现发动机推力水平的缩放。在地面试车和飞行试验中,只对低功率空间核反应堆进行验证,再在实际的飞行任务中根据不同的推力和比冲需求进行组合设计。

## 2.3 空间核动力推进能力谱系化

根据美国、俄罗斯、欧盟的发展方案,对于不同输出功率的空间核反应堆的研究均已进行规划布局,其中电源功率涵盖千瓦级到兆瓦级,以满足太阳系边际探测、深空轨道转移、地月及地火往返等不同空间任务对于推进系统的需求<sup>[35]</sup>。我国也应对空间核动力推进系统进行整体布局,通过系列

化、谱系化的研发工作,带动耐高温抗辐射材料、超高效率热排散、系统总装集成等关键技术的阶梯式发展。

## 2.4 提升研发经济性与实效性

随着时代的发展,对于此类大体量涉核研究的经济性与实效性都提出了更高的要求,世界各国在充分利用现有陆地核反应堆技术的基础上,普遍采取国际合作和民间融资的方式,均摊研发风险,提高研发效率。以美国 Kilopower 项目为例,NASA 在分系统中广泛采用包括斯特林发电机在内的成熟商业组件,有效提高了总体方案的可靠性<sup>[36]</sup>。近年来国际政治局势和经济形势发生重大变化,我国更应积极推动空间核动力发展,在缺乏国际合作的情况下充分利用民间资本与技术,特别是对于非核动力组件适当放开,利用我国优势商业制造能力促进总体研发能力的提升。

此外,应该对动力系统和空间堆系统并行开展试验验证。在动力系统试验中广泛采用非核试验,降低试验难度和维护成本,以电加热模拟核反应堆在没有辐射安全风险的前提下对动力组件的热可靠性充分论证。在空间堆系统试验中对辐照特性进行测试,建立完善的核辐照仿真方法,尽可能在涉核试验前提高技术成熟度,将失败甚至泄漏风险降至最低。

## 2.5 技术路线全面论证、集中突破

在对某一推力范围的空间核动力推进系统进行研发时,应该首先进行技术路线论证,根据本国技术基础、目标性能参数、功率适用范围、研发成本周期等因素进行综合考量,在此基础上还要对堆芯、辐射屏蔽、热力循环、散热器等分系统可能的技术路线进行更加详细的论证。在对比技术路线时,无法完全追求技术指标最高,而应整体权衡技术的成熟度、先进性和经济性,在技术的发展和继承上达到有机统一。确定技术路线后还应注意辨别各项关键技术,最终做到有的放矢、突出重点、集中突破。

## 2.6 完善空间核安全评估体系

自核工业建立以来,偶有发生的大规模地面核事故一直使其发展备受争议。空间核动力源的试验与应用,因维修困难、响应时间长、影响范围不可控等特性,更加引起舆论的警惕。因此,在着

力发展空间核动力技术的同时,一定要随着探索的深入构建相匹配的空间核安全评估体系<sup>[37]</sup>,对于技术路线、试验方法开展全面可量化的风险评估,并推动国内国际立法建立相应的涉核飞行信息披露制度,从而消除民众顾虑,降低使用风险。

### 2.7 提高推进系统多模式、变工况适应性

虽然核反应堆作为动力源保证了长时间可持续的能源供应,但是热力学原理限制了核热推进系统的比冲以及核电推进系统的热电转化效率的进一步增长,为满足深空探测在复杂空间环境中对于大推力、高比冲的需求,应着力发展具有多种推进模式的空间核动力推进系统,如核热-核电双模式共推进,可根据不同空间任务的动力需求切换工作模式,非常适合深远空或双程模式航行。

在此基础上,空间核电源产生的一部分电力可以供给航天器用于数据传输、生命保障以及液氢工质的主动低温贮存等;核热推进系统还可以在喷管扩张段引入氧气,进行混合比可调的增强燃烧来提高推力(见图7)<sup>[38]</sup>;对核反应堆燃料元件进行合理设计实现单位质量核能释放率的调节。通过上述手段能够达到调节比冲、推重比的目的,在系统质量增长可控的前提下,在不同的物理化学机制驱动作用下实现高比冲/小推力工况到低比冲/大推力工况间的大范围分档过渡甚至连续过渡,从而提高推进系统在深空环境中的适应性。

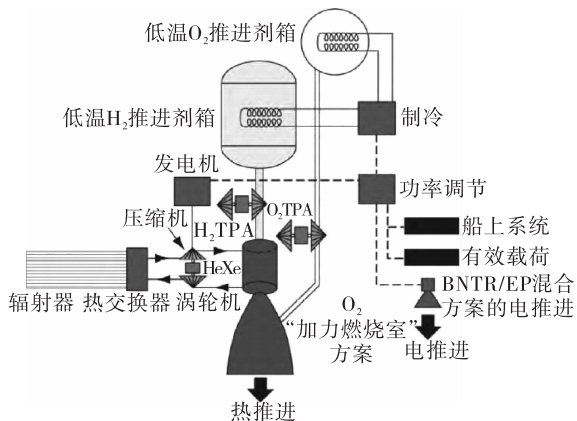


图7 多种模式核热推进示意图

Fig. 7 Diagram of multi-mode nuclear thermal propulsion

## 3 未来空间核动力推进领域关键技术

作为将核工业与航天工业深度融合的大型复杂航天器系统,空间核动力推进涉及不同的学科专业,各分系统之间互相制约又紧密耦合,因而对于总体设计、系统集成、仿真试验均提出了极高的要求。在全面考量分系统技术成熟度、接口关系、约束条件的前提下,需对以下关键技术进行深入研究,最终根据任务场景和具体需求得到最优解决方案,真正在空间核动力推进领域做到型谱化发展。

### 3.1 空间核反应堆总体设计技术

无论是核电推进技术还是核热推进技术,空间核反应堆作为能量来源,一般通过热中子轰击燃料的原子核引发核裂变链式反应释放能量,与中子的时间、能量及空间分布密切相关,反过来又对推进系统的整体性能产生直接影响。空间核反应堆与地面核反应堆具有明显差异,要求质量更轻且结构紧凑,在出现一切事故的情况下反应堆都不能临界。反应堆与高温换热、废热排放等分系统之间还具有强烈的耦合相关关系,瓶颈在于耐高温材料及其加工工艺。空间核反应堆需要将工质在头部极短的流程内瞬时加热到工作温度,对燃料芯体的功率密度以及燃料元件与工质之间的换热能力提出了更高的要求,使得反应堆具有轴向流动温度梯度大、燃料元件结构承受工质热物性复杂等特点,给设计带来了很大的难度。

应基于目前已有的数据与模型,利用高性能计算仿真技术,综合考量功率、质量、工质温度、体积、寿命、反应性控制、临界安全等各参数之间的匹配和制约关系,合理选择燃料元件的布置与结构、工质流道设置、反射层结构、反应性控制方式等,进行反应堆方案论证和设计,筛选确定转化效率高、技术成熟度高、可行性强的系统方案。

### 3.2 高效热电转换技术

热电转换作为核电推进的核心系统,将核反应堆的热能转换为能够被直接利用的电能(见图8)<sup>[39]</sup>。针对未来空间核动力航天器对于大功率电源的需求,为提高能量利用效率,保障深空探测任务的实施,必须发展高效、高可靠、功率密度大、与核反应

堆灵活适配的热电转换系统。对于动态发电技术而言,虽然其能够达到更高的输出功率,但是因为包含机械旋转部件且具有极高的循环温度和运转速度,对空间环境适应性、长寿命性能、高温性能提出了严苛要求。因而在高效紧凑型涡轮压气发电机组系统技术、高速大功率启发一体电机技术、涡轮压气机匹配设计技术、高速转子动力学及振动抑制技术、空间微重力环境高阻尼悬浮轴承及冷却技术等方面均存在技术攻关的必要。

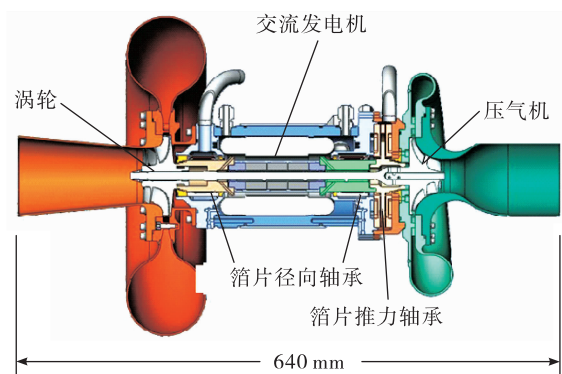


图8 空间布雷顿发电装置示意图

Fig. 8 Diagram of space Brayton cycle power conversion system

### 3.3 大功率空间辐射散热技术

在空间环境中,系统废热只能通过热辐射的方式进行排散,因而必须通过提高辐射散热器性能来减小整个推进系统的质量和尺寸。尤其对于大功率空间核动力推进系统,辐射散热器占据了系统绝大部分的空间结构。因此,散热效率和散热器的质量、面积是影响核电源性能的主要约束条件。当前热管式和泵驱动中高温流体回路式散热系统具有较好基础<sup>[40]</sup>,但存在系统质量大且只能通过增大散热面积扩大散热量等缺点。而液滴辐射散热器(见图9)<sup>[41]</sup>具有更高的散热效率,其中作为热载体的工作液体通过液滴发生器的喷口,直接进入空间飞行一段距离,通过辐射放出热量,然后被液滴收集器回收,将是未来技术研究的重点。当空间核电源与大功率电推力器组合使用时,电推进系统同样面临散热问题,应统一考虑整个航天器的辐射散热设计,有利于系统整体质量和尺寸的降低。

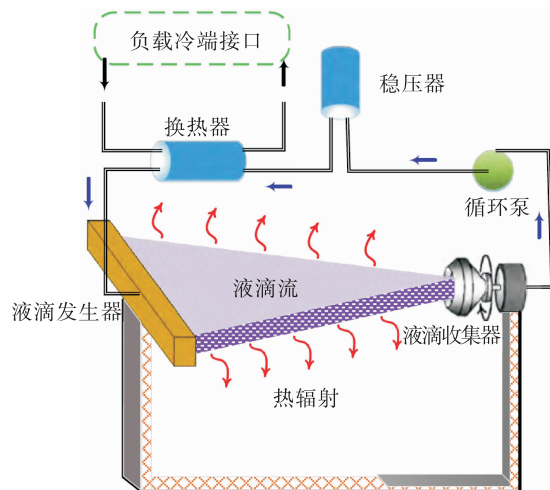


图9 液滴辐射散热器原理示意图

Fig. 9 Diagram of droplet heat radiator

### 3.4 空间核反应堆芯体材料选型与制造工艺

虽然与常规推进剂相比,核燃料能量密度极高,不存在牺牲载荷的问题,但是空间中需要对反应堆的能量释放速率进行安全、精确、可靠地控制,因而对芯体材料的选择与构型提出了极高的要求,应能够在高温、腐蚀、辐照的环境下稳定工作。一方面反应堆燃料工作温度与能量转换效率密切相关,燃料元件需要在尽可能高的温度下保持优良的力学性能和热学性能;另一方面有效传递到能量转换机构的热量决定了空间核动力装置的功率,用于强化工质换热的结构元件需要保持长时间的耐辐照可靠性以及与高温工质的相容性。在材料选型的基础上,还需进一步对燃料芯体的成分配比与粉末制备工艺、结构元件的密封焊接工艺等进行深入研究<sup>[42-43]</sup>,最终掌握空间核反应堆芯体制造工艺。

### 3.5 轻质高效核辐射屏蔽技术

在空间核反应堆的利用过程中,需要对堆芯进行有效的辐射屏蔽,由于不同的材料能够屏蔽不同种类的射线,一般通过多种材料复合的方式获得轻质高效的核辐射屏蔽层(见图10)<sup>[44]</sup>。例如, $\gamma$ 射线能够在具有高原子序数的贫化铀或钨材料中迅速衰减;而热中子则能够被碳化硼或氢化锂等含有轻元素的材料慢化和吸收。不同材料之间具有不同的耐温性能以及辐照肿胀特性,需要在综合考虑轻质化要求的基础上,对于复合层进行合理设计,

避免层面脱落破坏屏蔽。

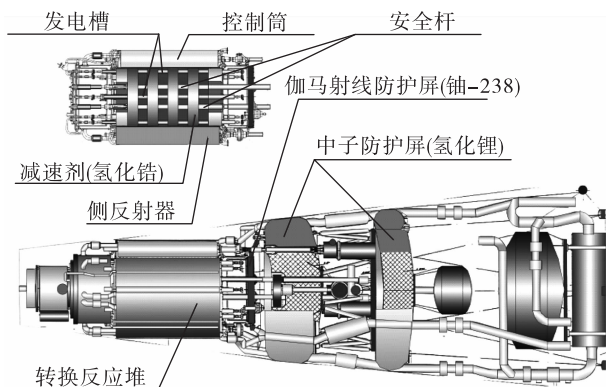


图10 空间核反应堆辐射屏蔽复合层

Fig. 10 Radiation shielding composite layer for space nuclear reactor

### 3.6 发动机快速启动技术

对于传统火箭发动机来说,其启动响应时间一般在毫秒级,而地面核反应堆至少需要几个小时才能完成从零功率到满功率的启动。因此,开展针对空间核反应堆的快速启动技术的研究是十分必要的。当空间核反应堆启动时,应当综合考虑不同反应性效应的大小,确定合理的引入速率,在实现快速启动的前提下避免瞬发临界的发生;同时应当考虑芯体材料的温度变化梯度,防止温度快速变化导致热应力过大;此外,还应根据反应堆启动时的功率变化实现对换热工质流量的大范围精确调节,既要维持工质出口温度稳定保证推进系统比冲,又要避免反应堆过热造成芯体烧毁。

### 3.7 系统仿真及试验验证技术

为提升系统设计研发的效率和经济性,应深入研究空间核反应堆的热力学动力学机理及辐照特性,突破微重力强辐照条件下的空间核反应堆高精度高性能仿真技术,引入机器学习手段对于结构设计进行高通量筛选,形成完善的数字化样机研制体系。在此基础上,厘清核反应堆在空间环境中的边界条件和约束特性,进行不同堆型和功率量级的地面试验,对仿真模型及设计方案进行校核验证。在动力系统试验中广泛采用非核试验,以电加热充分模拟核反应堆运行及故障特性,在没有辐射安全风险的前提下对动力组件的热可靠性论证,降低试验难度和维护成本。此外,在对空间核动力航天器进

行试验验证时,主要针对与常规动力航天器不同的结构及辐射特性,针对具有轻型高刚度伸展机构的大挠性航天器姿态控制、基于热回路和散热技术的中高温热综合管理、空间辐射模拟及防护等方面开展试验。

### 3.8 空间核反应堆安全防护技术

核安全在空间核动力能否投入实际应用上具有一票否决权。与常规地面核设施相比,空间核动力飞行器需要通过运载火箭运送入轨后再启动,随后在宇宙空间中持续运行。因此,空间核反应堆一方面依赖于运载火箭的可靠性,另一方面在工作过程中一直处于运动状态,且空间环境中存在宇宙射线、高能粒子等复杂条件。针对空间核动力应用过程中面临的安全问题,应当通过空间核反应堆安全防护技术,识别并归纳从发射、入轨到工作、返回各个阶段可能发生的安全事故,建立故障概率评估模型,确定相应的安全要求与安全准则。针对影响重大的严重安全事故,如在轨失冷、发射掉落等,充分进行理论论证,制订应急安全措施预案,并反馈到空间核动力系统总体设计中,确保空间核动力的安全在可控范围之内<sup>[45]</sup>。

## 4 我国研究展望

空间核动力推进具有研发周期长、学科跨度大、技术难度高的特点,美国和俄罗斯在长期研究的基础上与实际应用尚有一定距离。我国在有关研究上起步晚、底子薄,存在不少技术空白,因此为支撑我国未来高性能远距离空间推进的技术发展,有必要识别核心优势和潜在风险,尽快梳理明确技术路线,并持续给予人力物力支持。

分析我国在空间核动力领域的发展现状,核心竞争优势主要有以下几点:

1)工业链条完整。空间核动力推进系统在研发过程中需要涉及复杂的工业制造技术,我国现有的工业体系已经能够独立完成核工业和航天工业相关的制造任务,足以支撑相关特殊零部件的生产加工,为后续型号化发展奠定基础。

2)地面核反应堆核心技术成熟。我国在几十年来已经建立了多座不同技术方案的地面核电站,并在技术引进的基础上进行了自主研发,在此

期间积累了大量核反应堆运行数据,可以为空间核反应堆设计提供参考。相应的核燃料元件及控制元件设计方法也能够改进后应用于空间堆制造。

3) 航天器总体设计经验丰富。我国在航天领域拥有完整的核心技术和制造能力,对于使用传统化学推进及电推进的空间航天器具有丰富的总体设计经验。在此基础上充分考虑空间核反应堆的控制及防护部分,能够为空间核动力航天器的总体设计提供重要保障。

然而,在空间核动力的研发过程中也存在以下潜在风险:

1) 材料制造能力难以满足需求。空间核反应堆由于集约化总体设计及热效率提升需要,对材料的耐高温和辐射屏蔽性能提出了很高的要求,我国在先进材料制造领域的基础薄弱,短期内还难以达到相应水平,存在反应堆热功率无法有效提高的风险。

2) 工艺水平有待进一步提高。在进行技术研究和总体设计的基础上,空间核动力航天器的工程实现和产业化应用还有赖于制造工艺水平。而目前我国对于高匹配精度、高结构强度的新型航天器尚缺乏加工装配经验,存在工艺水平无法满足设计要求的风险。

3) 安全评估体系尚不健全。核安全问题一直是世界各国的关注焦点,但是不同于美俄已经具有空间核动力飞行器的在轨应用经验,我国在该领域的实际应用尚处空白,亟需建立适合我国技术水平的安全评估与安全管理体系,提高研发过程安全性与透明度,降低民众担忧。

4) 国际规则制定参与度。关于核动力航天器的国际规则主要是1993年的《关于在外层空间使用核动力源的原则》<sup>[46]</sup>和2009年的《外层空间核动力源应用安全框架》<sup>[47]</sup>,相关的国际规则谈判正在开展。我国在发展空间核动力推进技术的过程中,也应当合理预判空间核动力规则国际谈判形势,在战略层面上对自身角色进行合理定位,确保中国空间核动力航天器应用发展的政策空间,积极参与、引导甚至主导国际规则的制定<sup>[48-50]</sup>。

综合各主要国家的技术发展路径和最新研究成果来看,由于极高的能量密度和运行稳定性,发展空

间核动力飞行器是未来深空探测的必由之路。各个国家也根据自身技术条件确定了适合自己的发展路线,污染更小、比冲更高的核电推进(如美国的千瓦级 Kilopower、俄罗斯与欧盟合作的兆瓦级国际空间核电推进 INPPS 飞船)成为近年来的主流选择。

然而,我国在空间核动力推进领域目前尚未有国家层面的发展规划出台,技术储备仍然比较薄弱,相关的科研力量也较为分散,虽然在各子系统的重点技术方面进行了一定的理论可行性研究与性能提升工作,但是仍缺乏系统级的统筹协调,难以形成研究合力。因此,现阶段我国亟需在充分论证的基础上建立中长期发展规划,识别关键技术及发展方向,同时提升高端工业制造能力以促进空间核动力未来的产业化发展。总体来说,国内已经认识到未来空间核动力的重大意义,对于各子系统零部件也具备了一定的技术基础,还需要抓住机遇迎头赶上。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张梦龙,张悦,王宝和. 空间核推进系统综述与展望[J]. 兵器装备工程学报,2018,39(9):96-100.
- [3] 刘佳,康小录,张岩,等. 基于核电的大功率霍尔电推进系统设计及分析[J]. 原子能科学技术,2019,53(1):9-15.
- [4] 廖宏图. 空间核动力技术概览与发展脉络初探[J]. 火箭推进,2016,42(5):58-65.  
LIAO H T. Survey and venation analysis on space nuclear power[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2016, 42(5): 58-65.
- [5] 李永,周成,吕征,等. 大功率空间核电推进技术研究进展[J]. 推进技术,2020,41(1):12-27.
- [6] TOMBOULIAN B N. Lightweight, high-temperature radiator for in-space nuclear-electric power and propulsion[D]. Massachusetts: University of Massachusetts Amherst, 2014.
- [7] 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.
- [8] 马世俊,杜辉,周继时,等. 核动力航天器发展历程(上)[J]. 中国航天,2014(4):31-35.
- [9] 马世俊,杜辉,周继时,等. 核动力航天器发展历程(下)[J].

- 中国航天,2014(5):32-35.
- [10] VOSS S S. SNAP reactor overview[R]. AFWL-TN-84-14.
- [11] PLUTA P R, SMITH M A, MATTEO D N. SP-100, a flexible technology for space power from 10 s to 100 s of kWe [C]//Proceedings of the 24th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. Washington DC, USA: IEEE,1989.
- [12] BENNETT G L. Nuclear thermal propulsion program overview[R]. NASA-19920001871.
- [13] ASHCROFT J, ESHELMAN C. Summary of NR program prometheus efforts [J]. AIP Conference Proceedings, 2007,880(1):497-521.
- [14] NASA. 2015 NASA technology roadmaps[R/OL]. [2021-3-13] <https://nasa.gov/offices/oct/home/roadmaps/index.html>.
- [15] NASA. 2020 NASA technology taxonomy [R]. HQ-E-DAA-TN73838.
- [16] CHAIKEN M. The kilowatt space nuclear fission power reactor[R]. GRC-E-DAA-TN68456.
- [17] TRUMP D J. Presidential memorandum on launch of spacecraft containing space nuclear systems [EB/OL]. [2019-8-20]. <https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/presidential-memorandum-launch-spacecraft-containing-space-nuclear-systems/>.
- [18] International Atomic Energy Agency. The role of nuclear power and nuclear propulsion in the peaceful exploration of space[M]. Vienna: International Atomic Energy Agency,2005.
- [19] ZAKIROV V, PAVSHOOK V. Feasibility of the recent Russian nuclear electric propulsion concept:2010[J]. Nuclear Engineering and Design,2011,241(5):1529-1537.
- [20] 周成,张笃周,李永,等. 空间核电推进技术发展研究[J]. 空间控制技术与应用,2013,39(5):1-6.
- [21] 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[J]. 深空探测学报,2017,4(5):397-404.
- [22] ORIOL S, MASSON F, TINSLEY T, et al. DEMOCRITOS: Development logic for a demonstrator preparing nuclear-electric spacecraft [C]// 2016 Nuclear and Emerging Technologies for Space. Huntsville:[s. n.],2016.
- [23] KOROTEEV A S, KAREVSKIY A V, LOVTSOV A S, et al. Study of operation of power and propulsion system based on closed brayton cycle power conversion unit and electric propulsion[C]// 36th International Electric Propulsion Conference. Vienna:IEPC,2019.
- [24] JANSEN F, GRUNDMANN J T, MAIWALD V, et al. High power electric propulsion: MARS plus EUROPA-already beyond 2025[C]// 36th International Electric Propulsion Conference. Vienna:IEPC,2019.
- [25] European Space Agency (ESA). Implementation of the guidelines provided for in the international safety framework for nuclear power source applications in outer space for ESA space missions-the ESA safety policy on the use of nuclear power sources[EB/OL]. [2019-2-8]. A/AC.105/C.1/2019/CRP.10.
- [26] 何伟锋,向红军,蔡国飙. 核火箭原理、发展及应用[J]. 火箭推进,2005,31(2):37-43.
- HE W F, XIANG H J, CAI G B. The fundamentals, developments and applications of nuclear rocket propulsion[J]. Journal of Rocket Propulsion,2005,31(2):37-43.
- [27] 霍红磊,安伟健,解家春,等. CERMET-SNRE 堆芯物理计算分析[J]. 原子能科学技术,2016,50(12):2150-2156.
- [28] 游尔胜,石磊,郑艳华,等. 球床堆在空间核动力系统中的应用[J]. 原子能科学技术,2015,49(S1):75-80.
- YOU E S, SHI L, ZHENG Y H, et al. Application of pellet bed reactor in space nuclear power system[J]. Atomic Energy Science and Technology,2015,49(S1):75-80.
- [29] 刘忠恕. 核热火箭发动机系统方案研究[D]. 北京:中国航天科技集团公司第一研究院,2017.
- [30] 王浩泽,李子亮,吴宏雨,等. 基于金属陶瓷堆芯 1 000 kW 核热火箭发动机系统及组件参数研究[J]. 载人航天,2018,24(5):637-642.
- [31] 李强,李家文,王戈,等. 新型空间双模式核热推进系统热力学性能研究[J]. 火箭推进,2018,44(6):21-28.
- LI Q, LI J W, WANG G, et al. Research on thermodynamic performance of a new aerospace nuclear thermal propulsion system[J]. Journal of Rocket Propulsion,2018,44(6):21-28.
- [32] 朱岩,马元,南向谊,等. 大推力核热火箭运载器及动力特性分析[J]. 载人航天,2018,24(3):388-393.
- [33] 王三丙,马元,郭斯茂,等. 核热火箭反应堆燃料对比分析[J]. 载人航天,2018,24(6):784-795.
- WANG S B, MA Y, GUO S M, et al. Comparison and analysis of nuclear thermal propulsion reactor fuel[J]. Manned Spaceflight,2018,24(6):784-795.
- [34] 廖宏图. 核推进的空间应用浅析[J]. 火箭推进,2016,42(3):6-14.

- LIAO H T. Preliminary application analysis of nuclear propulsion in space[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2016, 42(3):6-14.
- [35] 陈杰,高劭伦,夏陈超,等. 空间堆核动力技术选择研究[J]. 上海航天, 2019, 36(6):1-10.
- [36] GIBSON M, SCHMITZ P. Higherpower design concepts for NASA's kilowatt reactor [C]//2020 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA:IEEE, 2020.
- [37] 周继时,朱安文,耿言. 空间核能源应用的安全性设计、分析和评价[J]. 深空探测学报, 2015, 2(4):302-312.
- [38] 解家春,霍红磊,苏著亭,等. 核热推进技术发展综述[J]. 深空探测学报, 2017, 4(5):417-429.
- [39] FULLER R L. Closed Brayton cycle power conversion unit for fission surface power phase I final report[R]. NASA/CR-2010-215673.
- [40] 张秀,张昊春,刘秀婷,等. 空间核电源热管式辐射散热器热分析与参数优化[J]. 宇航学报, 2019, 40(4):452-458.
- ZHANG X, ZHANG H C, LIU X T, et al. Thermal analysis and parameter optimization of a heat-pipe radiator for space nuclear power[J]. *Journal of Astronautics*, 2019, 40(4):452-458.
- [41] 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.
- [42] 姜夺玉,江新标,王立鹏. 空间核热推进粒子球床堆慢化剂温度效应分析[J]. 核动力工程, 2016, 37(1):4-7.
- JIANG D Y, JIANG X B, WANG L P. Analysis of moderator temperature effect for PBR of SNTP[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2016, 37(1):4-7.
- [43] 黄洪涛,王卫军,钟武烨,等. 钼铯合金在空间核电源中的应用性能研究进展[J]. 原子能科学技术, 2020, 54(3):505-511.
- [44] 俄罗斯联邦提效工作文件. 外星空间应用核动力源的独特设计考虑[C]//第43届和平利用外层空间委员会会议. 维也纳:和平利用外层空间委员会, 2006.
- [45] 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.
- [46] 联合国大会第47/68号决议. 关于在外层空间使用核动力源的原则[Z]. 1993.
- [47] United Nations Committee on the Peaceful Uses of Outer Space Scientific and Technical Subcommittee, International Atomic Energy Agency. Safety framework for nuclear power source applications in outer space[M]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2009.
- [48] 龙杰,唐玉华. 国外空间核动力源安全管理机制探析及其启示:基于国外政府层面的相关经验[J]. 国际太空, 2020(5):21-26.
- [49] 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.
- [50] 王国语,吕端. 空间核动力源应用国际规则现状与发展分析[J]. 中国航天, 2016(9):40-44.