

空间核反应堆电源研究进展

何宇豪,孟涛,卢瑞博,赵富龙,谭思超

(哈尔滨工程大学核安全与仿真技术国防重点学科实验室,黑龙江哈尔滨 150001)

摘要:随着航空航天领域对能源需求的不断扩大,核能的空间应用迎来了新的发展高潮。本文针对空间核反应堆技术的发展现状进行综述,重点关注了空间核反应堆与静态能量转换、动态能量转换技术结合供电的研究进展,总结分析了空间核反应堆电源技术的发展特点,并指出未来发展中需要重点关注的内容,为未来空间核反应堆电源的发展提供指导。

关键词:空间核反应堆;静态能量转换;动态能量转换;电推进

中图分类号: TL 99 **文献标志码:** A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2019.06.018

Advances in Space Nuclear Reactor Power Source Research

HE Yuhao, MENG Tao, LU Ruibo, ZHAO Fulong, TAN Sichao

(Fundamental Science on Nuclear Safety and Simulation Technology Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China)

Abstract: With the increasing demand of energy in aerospace field, the space application of nuclear energy has come into a new development climax. In this paper, the development status of space nuclear reactor technology is reviewed, especially for the research on the power supply of space nuclear reactor combined with static or dynamic energy conversion technology. The development characteristics of space nuclear reactor power supply technology are summarized, and the contents what we need to be focus on in the future development are pointed out. The results can provide guidance for the design and development of space nuclear reactor power source.

Key words: space nuclear reactor; static energy conversion; dynamic energy conversion; electric propulsion

0 引言

随着航空航天事业的不断发展,大功率空间作业与轨道快速转移等多种空间任务对能源的需求提出了更高的要求。在空间电源方面,目前主要有化学电池、太阳能电池阵-蓄电池组联合电源和核电源 3 种。其中,化学电池具有结构简单、性能可靠的优点,但工作寿命短,低温性能差,且功率较小。太阳能电池阵-蓄电池组联合电源的技术成熟、性能可靠,同时兼具寿命长、供电能力强的特点,但太过依赖太阳光照,必须对日定向,因此,对发射窗口、轨道参数、飞行姿态等有严格的限制。同时太阳能电池阵的面积很大,对机动飞行和低轨道飞行带来较大

阻力,需要携带大量燃料用于轨道维持,结构复杂,容易遭受空间碎片、陨石和来自外部的打击,导致系统性能下降或失效。核能具有不依靠氧气环境、不依赖太阳光照、能量密度高、可实现高温和超高温、使用寿命长等优点,这些优势使得核能在空间探测领域、空间运载领域都有很好的应用前景。在空间应用上,核电源无论是放射性同位素电源、空间核反应堆电源,还是星表反应堆电站,都具有各自的优势,在大功率、长续航需求的空间任务中,核能凭借特有的优势能够替代传统的化学能和太阳能。

空间核电源的研究自 20 世纪 50 年代开始一直发展到今天,期间产生的研究成果包括大量的实验

收稿日期:2019-10-09;修回日期:2019-10-17

基金项目:国家重点研发资助项目(2017YFE0106200);黑龙江省自然科学基金资助项目(JQ2019A001)

作者简介:何宇豪(1994—),男,博士研究生,主要研究方向为反应堆热工水力。

通信作者:谭思超(1979—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为反应堆热工水力。

结果和数十个已经用于空间探测的成熟核能系统,其中,有的核动力探测器已经连续工作超过30 a,为核动力在空间的广泛应用打下了基础。众多研究结果证明了核能在空间领域的可行性和优越性,但是要让核能更好地应用于航空领域,目前仍存在一些亟待解决的问题,主要有研制周期长、经费投入多以及来自辐射防护等方面的问题^[1]。空间核反应堆电源是利用热电转换系统将核反应堆产生的裂变能转换为电能的装置,根据热电转换的方式分为静态热电转换和动态热电转换。下面针对静态能量转换、动态能量转换及核电推进等不同型式的空间核反应堆电源分别进行论述。

1 静态能量转换

静态能量转换系统运动部件较少,可靠性较高^[2]。核能静态能量转换技术经过长时间的研发和应用,已经较为成熟。美国和俄罗斯均有发射成功且至今仍在轨运行的、使用核动力静态能量转换系统供能的卫星。

美国对核电源的研究可追溯到20世纪50年代,1958年美国空军提出需要一款输出电功率为数百瓦,可将热量直接从外表面排出而不需要循环流体的核电源。针对上述需求,美在1960年确认开发使用强制对流冷却、温差发电直接转换的空间核电源“SNAP-10”,并于1965年发射升空,运行12 h后达到满功率0.5 kWe,效率为1.6%。运行43 d后由于运载火箭故障而被永久关停^[1]，“SNAP-10A”反应堆堆芯的结构如图1所示。

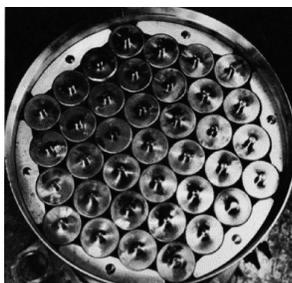


图1 SNAP-10A反应堆堆芯结构图^[3]

Fig.1 Structure of SNAP-A space reactor core^[3]

在SNAP-10研发的同一时期,为填补数千瓦到数兆瓦之间的功率空挡^[4],美国开始开展堆内热离子反应堆的研究工作,电功率范围覆盖5~120 kW^[5]。1986年,美国启动热离子燃料元件研究工

作,旨在研发功率为0.5~1.0 kWe、寿命为7~10 a的热离子燃料元件^[1],主要针对燃料、包壳肿胀、长时间辐照下绝缘体完整性、多节热离子燃料元件(TFE),以及其部件的性能与寿命问题进行了研究。

1979年,为了研究空基防御系统未来的能源供应设备,美国又开展了先进空间反应堆项目(SPAR/SP-100)^[6]。该项目一直持续到20世纪90年代,设计了100 kWe功率的通用电源,以热管式固态堆芯反应堆几何温差转换为研究方案,设计寿命为7~10 a。后来由于项目变动,该项目转向NASA的任务需求,功率调整为20 kWe量级,其设计采用了反应堆外部热电转换布置,可以灵活使用如斯特林、热离子等不同的热电转换系统,最终实现功率可变范围从几十千瓦到几百千瓦。该反应堆设计堆芯热量可自主导出,无需机械部件,无单点失效风险。

苏联/俄罗斯自20世纪60年代起开展了很多空间核动力方面的研究工作。1961年,苏联政府决定开展ROMASHKA温差直接转换空间反应堆的研究,并于1964年完成设计,进行地面功率实验,最终完成了约15 000 h地面实验,该设计的基本参数得到了验证^[1]。

1966年,苏联物理与动力研究院(IPPE)等机构联合开展了BUK空间核反应堆的研发工作^[1]。该反应堆采用将外侧反射层通过钢带连接的设计,当反应堆重返大气层时,外侧钢带会因气动加热而熔断,反射层与反应堆因此而分离,进而使反应堆无法达到临界状态,提高了反应堆系统的安全性。截至1988年,苏联时期的BUK反应堆共完成了33次航天发射,成为历史上发射次数最多的空间核反应堆。

热离子技术一直是苏联研究的重点,1972年,苏联在已有的热离子技术的研究基础上,开始研制热离子空间反应堆,并命名为TOPAZ-I^[1]。1987年,该反应堆完成了首次发射,且成功以自动模式在轨运行6个月。同年7月,苏联发射了第二代TOPAZ反应堆,成功运行约1 a。

20世纪末苏联解体后,其空间反应堆方面的研究规模逐渐减小,期间苏联着手研制TOPAZ-II空间反应堆,但因技术及资金原因,第二代TOPAZ热离子核反应堆电源系统并未发射升空,仅开展了地面试验研究,地面单机实验成功运行超过14 000 h。最终该技术出售给美国等其他国家。苏联时期共完成了4个型号的空间反应堆研制工作,其主要参

数汇总见表 1。

冷战结束后,美国也开展了 TOPAZ 国际计划,对购自俄罗斯的 TOPAZ-II 反应堆进行测试,并以此为基础开展新一代热离子反应堆的研发工作。最终美国于 1992 年成功研发出功率为 40 kW、寿命为 10 a 的 SPACE-R 热离子空间反应堆。

联邦德国在 20 世纪也开展了空间反应堆研究计划(ITR),该反应堆方案采用钠金属冷却,堆芯采用热离子燃料元件,设计输出电功率为 20~200 kW。

除了热离子与温差能量转换技术,碱金属能量转换技术与磁流体发电技术也属于静态能量转换。碱金属热电转换相对于热离子与温差技术有较高的转换效率,目前已通过实验实现的最高转换效率高到 19%^[6]。21 世纪初,美国墨西哥大学以美国太空探索计划为背景设计了一款碱金属热电转换的空间反应堆电源系统(SAIRS)^[7],该系统使用 UN 作为燃料,钠热管导热,设计电功率为 111 kW。

磁流体发电技术具有大的功率密度,且启动快、废热温度高,目前与地面蒸汽发电配合能在很大程度上提高转换效率。磁流体发电与空间核反应堆结合的研究较少,且磁流体发电机由于使用了高温高速的含铯蒸汽,导致管道、燃料元件的寿命大大降低^[8],适合用于短时大功率供电或者脉冲式电推进使用。

2 动态能量转换

空间核反应堆电源中目前主要采用的动态能量转换方式,包括斯特林循环和布雷顿循环。SP-100 反应堆的设计使得它能与不同的能量转换系统结合,于是在 SP-100 计划同时期进行斯特林发动机的研发工作,希望将其与 SP-100 结合达到较低的质量功率比,理论上当发动机运行温度为 1 050 K 时,600 kWe 电源的质量功率比可低于 23 kg/kW。该计划于 1985 年开始,最终研发了 SPDE 和 EM-2 两款发动机,功率分别为 25 kWe 和 2 kWe,其中 EM-2 的寿期持久测试超过 5 385 h。

在 SNAP 计划初期,美国空军认为未来任务对电源功率需求会更大,于是着手启动更大功率系统的开发。北美航空公司下属的国际原子公司(AI)成功研发出陶瓷包壳,在此基础上很快设计并建造出了第一个空间反应堆 SNAP-2^[5]。该反应堆以 NaK 作为冷却剂,U-ZrH 为核燃料,采用水银朗肯循环方式,电功率为 3 kWe。SNAP-2 空间反应堆的研究解决了 U-ZrH 反应堆临界和 U-ZrH 富集燃料制造等一系列技术问题。在此基础上,美国很快开展了 SNAP-8^[9]反应堆研究计划,SNAP-8 反应堆立足于满足更大功率的空间能源需求,其设计功率为 35 kWe,且能扩大到 60 kWe,设计寿命超过 10 000 h。该项目建造了 S8ER 和 S8DR 两个地面

表 1 苏联时期空间反应堆主要参数汇总^[1]

Tab.1 Summary of parameters for former Soviet Union space reactor designs^[1]

名称	ROMASHKA	BUK	TOPAZ-I	TOPAZ-II
项目时间	1964—1966	1966—1988	1970—1988	1975—1988
中子谱	快中子	快中子	热中子	热/超热中子
U ²³⁵ 装载量/kg	49	25~30	11.5	27
核燃料	UO ₂	U-Mo	UO ₂	UO ₂
冷却剂	无	NaK	NaK	NaK
热电转换方式	温差	温差	热离子	热离子
热功率/kW	28.2	100	120	135
电功率/kW	0.45	3	7	4.5~5.5
寿期/月	24	3~6	4~12	18
堆芯温度/℃	1 900	800	1 600	1 500~1 650
系统质量/kg	508	930	994	1 061
轨道实验次数	0	33	2	0
辐射器面积/m ²	—	—	7	7.2

实验堆,并于1963—1969年期间进行了多项地面实验^[9],实验证明反应堆及能量转换设备均能达到设计寿命要求, SER的堆芯组装图如图2所示。SNAP项目最终证实了空间核反应堆电源的可行性,并解决了诸多技术难题,为空间核反应堆技术的后续发展打下了坚实的基础。

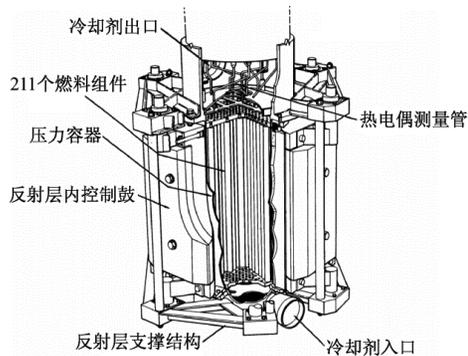


图2 SER反应堆组装视图

Fig.2 SER reactor assembly view

除此之外,美国也一直致力于钾金属朗肯循环反应堆技术的研究,SNAP-50/SPUR项目及其后续的先进液态金属冷却反应堆项目、中等功率反应堆试验计划(MPRE)等都涉及相关研究^[5]。SNAP-50/SPUR项目旨在开发300~1 200 kWe的大功率空间反应堆电源^[10],该反应堆堆芯使用锂金属冷却,钾金属朗肯循环作能量转换系统发电,设计寿命超过10 000 h,该项目验证了高温朗肯循环技术的可行性。中等功率反应堆试验计划(MPRE)由美国橡树岭国家实验室负责研究,设计为使用单回路钾金属朗肯循环。该项目早期遇到钾金属沸腾传热及材料相容性等问题,相关问题在1964年都得到了较好的解决,并计划开展地面试验,该项目后因资金原因于1966年终止^[1]。

2000年,美国洛斯阿拉莫斯实验室(LANL)开展了热管式火星探索反应堆(HOMER)的研究^[11]。该反应堆使用钠热管导出堆芯热量,燃料使用的是技术成熟的二氧化铀,其功率可根据需求在1~250 kWe之间进行调整。在此项目基础上又开展了安全经济的裂变发动机项目(SAFE)^[12]。该项目使用与HOMER反应堆相同的燃料棒-热管比^[1],但将热电转换装置更换为布雷顿循环设备,其功率可在千瓦至数百千瓦之间变化。

2002年,美国又开展了木星冰卫星探测计划

(JIMO),之后该计划更名为“普罗米修斯”^[13-15]。该计划旨在对木星的冰卫星进行科学探测,为此需研发200 kWe功率的空间核动力飞行器,设计寿命需超过10 a。该计划在提出的多个方案中,最终根据循环效率和可扩展性等因素选择了气冷快堆方案^[16],其设计方案如图3所示。该方案冷却剂选定为He-Xe混合气体,堆芯出口温度定为1 150 K,能量转换形式采用布雷顿循环,设计冗余度100%,系统总质量约10 t。该项目初期预算为10 a投入30亿美元,然而却因空间任务优先级的变化仅开展3 a便被终止。该项目留有大量公开文献资料,可为相关研究提供很好的参考。

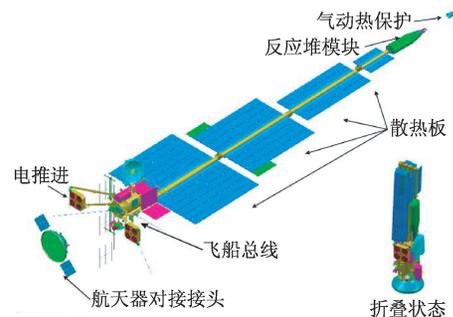


图3 木星冰卫星探测计划(JIMO)设计方案^[14]

Fig.3 Illustration of JIMO project design^[14]

俄罗斯在20世纪90年代以后,着重开展与布雷顿循环动态热电转换的空间反应堆电源设计,该项目历时10 a,设计目标在于同步轨道上供能及火星探索供能,包括核电推进与星表核电站。项目期间提出了超过10种概念设计方案,最高电功率达到了15 000 kW。2009年,俄罗斯着手开展新型兆瓦级空间反应堆计划,该计划将开发用于行星间载人或无人任务的空间核动力飞行器^[1,17],其反应堆结构如图4所示,并计划于2014年开始开展地面实验。该计划成为苏联解体后,俄罗斯投资最大的、项目周期最长的空间反应堆计划,能为俄罗斯培养新一代空间核动力技术专家,对相关技术的传承起到积极的作用。

除了美、俄两国,其他国家也相继展开了空间核电源的研究,法国在1983年发起了空间核动力电源研究计划(ERATO)^[17],该计划主要研究了液态金属冷却快中子堆、高温气冷堆和超高温液态金属冷却堆3种堆型,设计功率均为20~400 kWe^[18],能

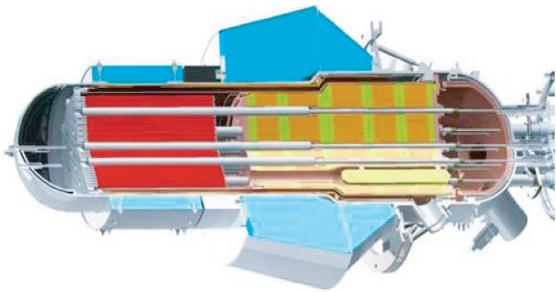
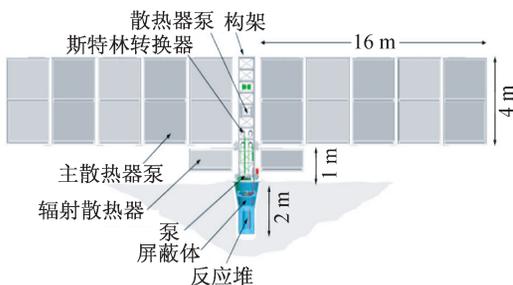


图 4 空间反应堆 SGFR 全貌

Fig.4 Overall view of the space SGFR

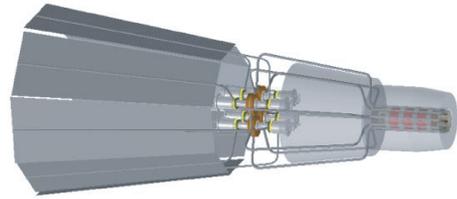
量转换方式均采用布雷顿循环,设计寿命为 7 a。意大利自 1992 年起开始进行先进紧凑空间反应堆 (MAUS) 概念设计,21 世纪初又将其升级为 SPOCK 反应堆,设计功率为 30 kWe,堆芯使用钠金属冷却,设计寿命为 7 a。日本在 20 世纪 90 年代研究了月球表面反应堆电源 (RAPID)^[19],该反应堆为一体化设计,堆芯使用锂金属冷却,包含 2 700 根燃料元件,出口温度达 1 373 K,采用朗肯循环能量转换方式,设计功率为 800 kWe,循环效率可达 16%,换料周期为 10 a。

空间核反应堆电源除了用于航天器,近年随着对月球及火星探索的不断深入^[20-21],在星表核电站方面的研究也越来越多。2006 年,随着普罗米修斯计划的终止,美国航空航天管理局 (NASA) 和能源部 (DOE) 共同发起了星表裂变反应堆电源计划 (FSP)^[22-25],其研究旨在为决策者展示更加可信的成果,从而推动该项目进入飞行实验阶段。该项目重点之一便是降低研发成本,最终该方案选择 NaK 冷却反应堆方案及斯特林循环热电转换方案,系统功率可在 10~100 kWe 之间进行变化,其系统设计方案如图 5 所示。该项目运行期间开展了大量地面非核实验,成功研制了多个关键部件设备。

图 5 星表裂变反应堆电源计划 (FSP) 设计方案^[22]Fig.5 Illustration of FSP project design^[22]

阿拉巴马大学根据火星大气二氧化碳含量丰富的特点,提出了超临界二氧化碳空间堆方案^[12]。该方案使用低富集度陶瓷燃料及布雷顿循环方式,设计功率为 333 kWe,设计寿命为 15 a。该反应堆堆芯采用特殊靶式结构,即燃料与增殖区交替排布。通过布置 3 套该反应堆系统即可达到 1 MWe 功率输出能力,从而满足火星表面基地长期能源供给需求。

近年来,美国为填补放射性同位素电源与星表裂变反应堆电源之间的能源空档,还研发了千瓦级核电源 (Kilopower)^[1,26]。该计划旨在为航天器或星表登陆器提供 1~10 kWe 功率,并计划于 2017 年建立全尺寸的原型地面反应堆样机,其方案设计如图 6 所示。该反应堆使用热管导出堆芯热量,并将热量通过斯特林发动机转换为电能。目前, Kilopower 反应堆已完成地面临界实验,是近半个世纪以来美国在空间裂变反应堆领域中,第二个成熟度最高的设计方案。

图 6 千瓦级核电源 (Kilopower) 设计方案^[26]Fig.6 Illustration of Kilopower design^[26]

美国新墨西哥大学^[27-34]、阿拉巴马大学^[35]等还进行过多个空间反应堆概念设计,包括可扩展碱金属循环一体化反应堆 (Scalable AMTEC Integrated Reactor Space power, SAIRS)、热管分区温差转换模块化反应堆 (Heat Pipe-Segmented Thermoelectric Module Converters space reactor HP-STMCs)、淹没安全反应堆 (Submersion-Subcritical, Safe Space Reactor, S-4) 和钠钾合金冷却分区紧凑反应堆 (NaK-78 cooled Sectored Compact Reactor, ScoRe) 等。

3 核电推进

核电推进是空间核电源与电火箭技术的结合,一般与核反应堆电源匹配的推进系统有静电离子电推进、静电霍尔电推进、电磁类型电推进 3 种类型^[37]。美国的 SNAP-10A 在飞行期间曾为一个小型离子火箭推进器供电,是世界上最早的空间核

电推进试验堆。SP-100 与离子电火箭结合可以提供 2 000 kg 的有效载荷用于火星轨道飞行器及火星卫星、小行星带探索和小行星样品返回。2002 年美国开始“太空核能新计划”,计划包括以发展放射性同位素电源为目标的核电源计划和以裂变反应堆为基础的核电推进计划,核电推进计划之后逐渐发展到“普罗米修斯”计划阶段,“普罗米修斯”巡航阶段使用 8 台 30 kW 的离子电火箭推进器,轨道转移使用 12 台静态等离子体推进器,姿态控制使用 6 台静态等离子体推进器。表 2 为美国大功率电推进器的主要技术参数。

表 2 美国的大功率电推进器的主要技术参数^[1]

Tab.2 Summary of parameters for American high power electric propeller^[1]

名称	功率/ kW	比冲/s	效率/%	推力/ N
离子推进器(HiPEP)	34	9 500	78	0.6
核电氙离子系统(NEXIS)	27	8 700	78	0.5
霍尔推进器(NASA-457)	73.2	2 930	58	2.95
等离子体推进器 (AF-MPDT)	50	6 200	63	5.2
变比冲的磁等离子电推进 (VASIMP)	200	5 500	69	5.8

俄罗斯核电推进技术的开发与应用继承了苏联在空间核反应堆电源上的成果和经验,其核电推进技术处于国际领先水平。苏联首创静态等离子体发动机(霍尔发动机),并取得了很大的成功,近 30 年的在轨飞行试验中,有累计 4 种型号 310 个霍尔推进器被用于近 60 颗卫星上,充分验证了核电推进的可行性。同时为了满足如今对核电推进的任务需求,俄罗斯已经着手研究具有更高比冲和更大推力的电推进器,目前在研的推进器有望达到相同功率下 3~4 倍于霍尔推进器的寿命和更高的比冲、更大的推力。

此外,双模式(电源/推进)空间核动力系统兼具推进与供电两种功能,是两者的高度有机结合。双模式空间核动力系统在将来是主要发展的方向之一,针对双模式空间核反应堆系统已经有不少的概念设计,大致分为以核热推进/电源和核电推进/电源为基础的两类双模式空间核动力系统。空间核反应堆电源与核热推进相结合的设计适用于需

要快速进入轨道飞行尤其是载人的设备。对于无人运载任务,则使用核电推进/电源的双模式空间核动力系统更具优势。

4 结论

从空间核反应堆技术总体上看,美国、俄罗斯始终作为空间核动力技术的研究主力,投入的人力物力巨大,持续时间长,技术水平较为成熟,而其他各国则主要自 20 世纪 80 年代起开始研究空间核动力技术,并且规模较小,多处于概念研究阶段。静态能量转换方面,在空间核动力开始研究的初期,对静态能量转换技术与空间核反应堆结合的研究较多,技术成熟,除了静态能量转换自身的优势外,其能提供的电功率与 20 世纪美、苏的空间任务需求相匹配,重点研发静态能量转换空间核反应堆电源可以在保证可靠性、长寿命的情况下减小质量体积。动态能量转换方面,其具有较高的转换效率,随着无人/载人空间探测领域发展的不断深入,对大功率能源的需求日益迫切,而搭载动态能量转换技术的核反应堆系统可以提供上百千瓦甚至兆瓦级的电功率,能够满足现阶段空间任务的能源需求,美国的“普罗米修斯”就将动态能量转换技术与核电推进系统作为研发重点,俄罗斯也计划研发兆瓦级的载人核动力飞船^[36]。通过对空间核反应堆电源发展现状的分析可以总结出如下结论:

1) 空间反应堆技术的研究整体上呈现出“多功率等级、多技术途径”并存发展的特征,不同的反应堆类型具有不同的适用场景。此外,需求在空间反应堆项目研究中扮演了极其重要的角色,需求不强烈的项目往往很快终止,如美国普罗米修斯计划。对于不同国家,由于国情不同,空间核动力的需求往往也存在差异。现阶段,美国空间核反应堆技术发展更多是从经济角度出发,比如裂变发动机项目(SAFE)使用成熟的二氧化铀燃料技术就是看重其安全性和经济性。俄罗斯的发展则更多从能源需求及人才培养角度出发,研究重点是兆瓦级气冷布雷顿发电反应堆,俄罗斯在 2009 年提出的兆瓦级空间堆计划能够促进相关技术的传承和培养新一代空间核动力技术专家。

2) 不同国家在空间核动力领域的发展路线虽有所不同,但不可否认的是,空间核反应堆技术是

未来的重要发展方向之一。进入 21 世纪以来,火星探测及月球开发等成为各航天大国在航天领域的发展重点,其中涉及的无论是空间载人、载货任务还是星表核电站的建设都离不开大功率的空间核反应堆,美国一直将空间核动力技术看作是能“改变游戏规则”的关键技术,美、俄均开展过规模庞大的大功率空间核动力技术研究,且均在多份报告中对大功率空间核动力的发展需求进行了阐述。除了美、俄两国,欧盟、日本、印度等也相继展开研究,各航天大国都致力于空间核动力尤其是空间核反应堆电源技术的研发,不断的有创新概念被提出。空间核反应堆电源技术对于任何一个航天大国都将是未来发展的重心之一。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 杨启法,卢浩琳.空间核反应堆电源研究和应用[J].航天器工程,1995(4):11-20.
- [3] KRASS A W, GOLUOGLU K L. Experimental criticality benchmarks for SNAP 10A/2 reactor cores [R]. 2005.
- [4] DIX G P, VOSS S S. Pied piper: a gistorical overview of the US space power reactor program [C]// Space Nuclear Power Systems 1984: Proceedings. Malabar, Florida: Orbit Book Company Inc., 1985.
- [5] ANGELO J A. Space nuclear power [M]. Malabar, Florida: Orbit Book Company Inc., 1985.
- [6] DIENST W. Reduction of the mechanical strength of Al_2O_3 , AlN and SiC [J]. J Nucl Mater, 1992, 123 (122):1386-1392.
- [7] KARASEV V S, KOVYRSHIN V G, YAKOVLEV V V. Effect of reactor irradiation on the dissociation pressure of zirconium hydride [J]. Soviet Atomic Energy, 1974, 37(1):745-746.
- [8] 李冠兴,武胜.陶瓷核燃料[M].北京:化学工业出版社,2007.
- [9] Staff. SNAP 8 summary report [R]. Atomic International Division, Canoga Park, California, United States, 1973.
- [10] MENG T, CHENG K, ZENG C, et al. Preliminary control strategies of megawatt-class gas-cooled space nuclear reactor with different control rod configurations [J]. Progress in Nuclear Energy, 2019, 113:135-144.
- [11] DEMUTH S F. SP100 space reactor design [J]. Progress in Nuclear Energy, 2003, 42(3):323-359.
- [12] POSTON D I, KAPERINICK R J, GUFFEE R M. Design and analysis of the SAFE-400 space fission reactor [J]. AIP Conference Proceedings, 2002, 608 (1):578-588.
- [13] ZIKA M W M. Prometheus project reactor module final report, for naval reactors information [R]. Knolls Atomic Power Laboratory (KAPL), Niskayuna, NY; Bettis Atomic Power Laboratory (BAPL), West Mifflin, PA, 2006.
- [14] ASHCROFT J, ESHELMAN C, ASHCROFT J C. Summary of NR program prometheus efforts [R]. 2006.
- [15] TAYLOR R. Prometheus project final report [R]. Pasadena, California, United States: Jet Propulsion Laboratory, NASA, 2005.
- [16] 孟涛,赵富龙,程坤,等.空间气冷反应堆堆芯流动换热数值仿真研究[J].原子能科学技术,2019,53(7):1264-1271.
- [17] DRAGUNOV Y. G. Fast-neutron gas-cooled reactor for the megawatt-class space bimodal nuclear thermal system [J]. Engineering and Automation Problems, 2015(2):117-120.
- [18] EL-GENK M S, CARRE F, TOUNIER J M. A feasibility study of using thermoelectric converters for the LMFBR derivative ERATO-20 kWe space power system [C]// Proceedings of the 24th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. 1989:6-11.
- [19] KAMBE M. RAPID operator-free fast reactor concept without any control rods reactor concept and plant dynamics analyses [J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2005, 42(6):525-536.
- [20] POPA-SIMIL L. Advanced nuclear compact structures for power generation in mars [M]. Berlin: Springer: 2009.
- [21] 朱安文,刘飞标,杜辉,等.核动力深空探测器现状及发展研究[J].深空探测学报,2017,4(5):405-416.
- [22] MASON L S, POSTON D I. A summary of NASA architecture studies utilizing fission surface power technology [R]. Nashville, Tennessee: National Aeronautics and Space Administration, 2010.
- [23] TEAM F S P. Fission surface power system initial concept definition [R]. Cleveland, Ohio: National Aeronautics and Space Administration, 2010.
- [24] MASON L, POSTON D, QUALLS L. System concepts for affordable fission surface power [R]. Albuquerque, New Mexico: National Aeronautics and Space Administration, 2008.
- [25] SHALTENS R K, WONG W A. Advanced stiring technology development at NASA Glenn research center [C]// NASA Science Technology Conference, Maryland. 2007:NASA/TM-2007-214930.
- [26] GIBSON M A, OLESON S R, POSTON D I, et al.

- NASA's kilowatt reactor development and the path to higher power missions [C]// IEEE Aerospace Conference National Aeronautics and Space Administration. 2017:4-11.
- [27] EL-GENK M S, TOURNIER J M. SAIRS: scalable amtec integrated reactor space power system [J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2004, 45(1):25-69.
- [28] EL-GENK M S, TOURNIER J M. Conceptual design of HP-STMCs space reactor power system for 110 kWe [R]. Albuquerque, New Mexico, 2004.
- [29] SCHRIENER T M, EL-GENK M S. Comparative CFD analyses of liquid metal cooled reactor for lunar surface power [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2014, 280:105-121.
- [30] SCHRIENER T M. Multi-physics design and analyses of long life reactors for lunar outposts [R]. Albuquerque, New Mexico: The University of New Mexico, 2015.
- [31] SCHRIENER T M, EL-GENK M S. Neutronics and thermal-hydraulics analysis of a liquid metal fast reactor for expandable lunar surface power [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2012, 41:48-60.
- [32] KING J C, EL-GENK M S. Temperature and burnup reactivities and operational lifetime for the submersion-subcritical, safe space (S4) reactor [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2007, 237:552-564.
- [33] SCHRIENER T M, EL-GENK M S. Thermal-hydraulics and safety analyses of the solid core-sectored compact reactor (SC-SCoRe) and power system [J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2014, 76:216-231.
- [34] SCHRIENER T M, EL-GENK M S. A neutronics analysis of long-life, sectored compact reactor concepts for lunar surface power [J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2011, 53:106-118.
- [35] SCHILLO K J, KUMAR A, HARRIS K E, et al. Neutronics and thermal hydraulics analysis of a low-enriched uranium cermet fuel core for a Mars surface power reactor [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2016, 96:307-312.
- [36] KOROTEEV A S. New stage in the use of atomic energy in space [J]. *Atomic Energy*, 2010, 108(3):170-173.
- [37] 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.

(上接第120页)

- [5] VADIM Z, VLADIMIR P. Russian nuclear rocket engine design for mars exploration [J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2007, 12(3):256-260.
- [6] OLESON S. Electric propulsion for project Prometheus [C]// 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. 2004:5279.
- [7] JERRED N, HOWE T, RAJGURU A, et al. Dual-mode propulsion system enabling cubesat exploration of the solar system. NASA innovative advanced concepts (NIAC) phase I: final report [R]. Idaho National Laboratory (INL), 2014.
- [8] DRAKE B G, HOFFMAN S J, BEATY D W. Human exploration of Mars, design reference architecture 5.0 [C]// 2010 IEEE Aerospace Conference. 2010:1-24.
- [9] BOROWSKI S K, MCCURDY D R, PACKARD T W. Nuclear thermal propulsion (NTP): a proven growth technology for human NEO/Mars exploration missions [C]// 2012 IEEE Aerospace Conference. 2012:1-20.
- [10] 李鹏,孙培杰,包轶颖,等.低温推进剂长期在轨储存技术研究概述[J].*载人航天*,2012,18(1):30-36.
- [11] PLACHTA D, FELLER J, JOHNSON W, et al. Liquid nitrogen zero boiloff testing [R]. NASA/TP-2017-219389, 2017.
- [12] 马通祥,高雷章,胡蒙均,等.固体储氢材料研究进展[J].*功能材料*,2018,49(4):4001-4006.
- [13] 刘永锋,李超,高明霞,等.大容量储氢材料的研究进展[J].*自然杂志*,2011,33(1):19-26.
- [14] KARKAMKAR A, AARDAHL C, AUTREY T. Recent developments on hydrogen release from ammonia borane [J]. *Mater Matters*, 2007(2):6-9.
- [15] SOLOVEICHIK G L. Metal borohydrides as hydrogen storage materials [J]. *Material Matters*, 2007(2):11-15.
- [16] RAMESH R, JAYAKUMAR T, RAJ B. Metal hydrides for hydrogen storage applications [J]. *Metals Materials and Processes*, 1996, 7(4):291-308.
- [17] 申连华,张星,陈艺,等.电推进工质的研究进展及发展趋势[J].*火箭推进*,2017,43(6):7-13.
- [18] SZABO J, ROBIN M, PAINTAL S, et al. High density Hall thruster propellant investigations [C]// 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. 2012:3853.
- [19] 顾清之.镁-氢化镁热化学蓄热系统数值模拟和实验研究[D].上海:上海交通大学,2013.
- [20] HOPKINS M A. Evaluation of magnesium as a Hall thruster propellant [D]. Houghton: Michigan Technological University, 2015.