

空间热管反应堆电源研究进展及展望

刘 逍, 王 宁, 张开远, 齐 敏, 李仲春, 张卓华, 谢细明, 柴晓明
(中国核动力研究设计院 核反应堆技术全国重点实验室, 四川 成都 610200)

摘 要: 深空探测技术的发展对动力系统提出了更高的要求。传统的太阳能电源与化学电源的适用范围较小, 环境适应能力不强, 而微型核反应堆电源能量密度高, 不依赖太阳光照, 可应用于轨道运输、高轨探测多场景任务。在微型核反应堆电源技术路线中, 热管冷却核反应堆电源因其系统设备极大简化、模块化设计, 高可靠的全固态堆芯、非能动传热及瞬态响应迅速等特性, 成为空间核反应堆电源最具可行性的路线之一。通过文献调研总结目前空间热管堆发展现状, 从发展历史出发, 梳理热管冷却核反应堆电源设计和理论研究, 总结热管冷却核反应堆电源发展方向和关键技术。

关键词: 空间动力; 核电源; 热管反应堆; 高温热管

中图分类号: TL99

文献标志码: A

文章编号: 1672-9374(2024)04-0066-10

Research progress and prospect of space heat pipe cooled reactor power

LIU Xiao, WANG Ning, ZHANG Kaiyuan, QI Min, LI Zhongchun,
ZHANG Zhuohua, XIE Ximing, CHAI Xiaoming
(National Key Laboratory of Nuclear Reactor Technology,
Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610200, China)

Abstract: The development of deep space exploration technology has been restricted by reliable engine power. The traditional solar power source and chemical power source have a small scope of application, and the environmental adaptability is not strong, while the micro nuclear reactor power source has high energy density. It does not depend on sunlight and has strong survivability, which can be applied to multi-scene tasks. In the design scheme of the power supply of the miniature nuclear reactor, the heat pipe reactor has become one of the most promising options for the power supply of space nuclear reactors due to its modular design idea, simplified reactor structure, good inherent safety characteristics and transient response characteristics. This paper summarizes the current development status of space heat pipe reactors through literature research. Starting from the development history, it sorts out the design and theoretical research of heat pipe reactors, summarizes the development directions and key technologies of heat pipe reactors.

收稿日期: 2024-03-31 修回日期: 2024-07-26

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC2802600); 四川省自然科学基金项目(2023NSFSC1328)

作者简介: 刘 逍(1994—), 男, 博士, 工程师, 研究领域为反应堆热工水力。

通信作者: 齐 敏(1990—), 男, 硕士, 工程师, 研究领域为核动力工程。

引用格式: 刘逍, 王宁, 张开远, 等. 空间热管反应堆电源研究进展及展望[J]. 火箭推进, 2024, 50(4): 66-75.

LIU X, WANG N, ZHANG K Y, et al. Research progress and prospect of space heat pipe cooled reactor power[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2024, 50(4): 66-75.

Keywords: space power; nuclear power; heat pipe cooled reactor; high-temperature heat pipe

0 引言

目前在航天设备中采用的主流电源系统主要有 3 类。第一类为使用广泛的化学能电池,如氢氧燃料电池,具有结构简单、技术成熟、电力输出平稳等优点,缺点是均为千瓦以内的低功率电源,并且在低温情况下性能下降,自持时间较短。第二类为太阳能电池,是目前在轨航天器中被广泛使用的电源。该技术成熟,工作可靠,电力供给时间长,功率可拓展性强。但是其缺点也是致命的,由于其极度依赖光照条件,对轨道及飞行姿态等均有严格限制,同时在阴影、深空和外太阳系等环境下不能工作。第三类为核电源,包括同位素电源与核反应堆电源。核能是自主能源,不受太阳光照和其他环境因素的影响。空间反应堆电源因能量密度高,在大功率情况下相比其他电池具有较高的功率质量比,可满足航天器在质量方面的严格要求;功率调节范围大、质量轻、体积小、比面积小;可在低光照或无光照条件下稳定工作,值得一提的是其低温工作性能优异,更适用于太空和深空环境。从 20 世纪 60 年代开始,各国纷纷对空间核动力进行探索,并对各种路线进行尝试。热管冷却反应堆因其模块化、长寿命周期等优点符合航行器的发展趋势,因此成

为发展热点。本文通过梳理空间热管堆发展历史及国内外研究前沿工作,总结空间用热管反应堆电源的发展趋势及关键技术路径。

1 热管反应堆简介

根据应用场景分类可以分为深空使用的空间核反应堆电源、陆地使用的可移动式微型核反应堆电源和应用于深海的无人航潜器核反应堆电源。图 1 结合传统空间推进动力发展情况^[1-2],给出了目前空间核动力系统核反应堆电源的分类,根据对核能具体应用形式的不同,可将空间核动力分为同位素电源、核反应堆电源^[3-5]及核热推进^[6-8]。从 20 世纪 60 年代起,人们就在航天活动中使用了空间核动力技术^[9]。1961 年 6 月,美国国防部在子午仪导航通信卫星上装备了²³⁸Pu 放射性同位素电源 SNAP-3B7;1965 年 SNAP-10A^[10]成功发射并在运行轨道正常运行,标志着反应堆电源正式进入空间应用;紧随美国的研制进展,苏联 5 年后发射了装备 BUK 型空间核反应堆电源卫星^[9];1987 年 2 月 1 日和 7 月 10 日,先后成功发射装备了 TOPAZ-I 型热离子空间堆电源的两艘飞行器^[11]。上述核反应堆电源由于研制流程长、配套系统复杂、运载质量大、设备寿命短等原因逐渐被以太阳能为主的卫星所代替。

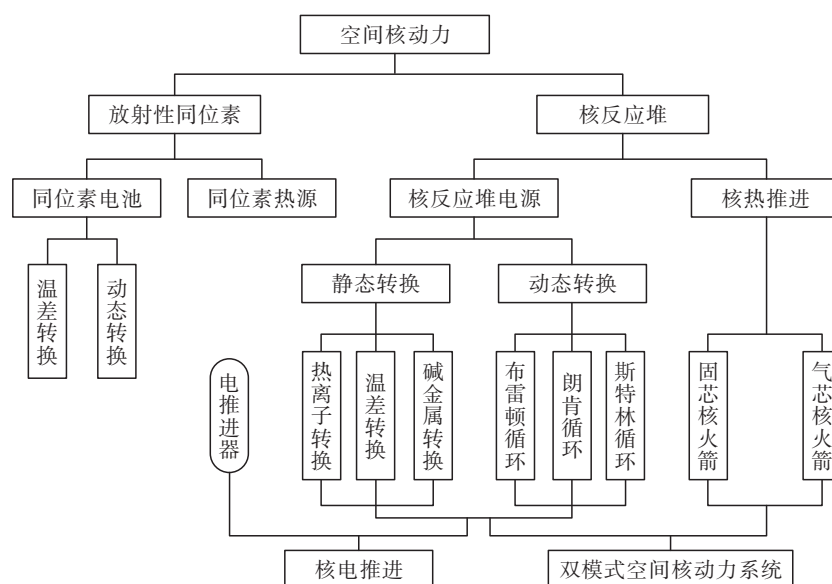


图 1 空间核动力系统分类

Fig.1 Classification of space nuclear power systems

依据目前空间反应堆电源的设计方案可以总结出主要的系统构成及运行原理,堆芯产生的热能通过冷却剂带给热电转换系统进行发电。其主要系统由反应堆系统、热电转换系统、热排放系统、辐射屏蔽系统、控制系统及其辅助设备等组成^[12],系统能量流动原理见图 2。核裂变在核反应堆堆芯内进行,产生的热能在热电转换系统内部分转变成电能(由热能转换为机械能再转换为电能),废热通过余热排出装置(辐射散热器)进入热阱(太空环境)。为减轻系统质量,对仪控及电气部件采用局部屏蔽方式,目前传统的方法是做影子屏蔽。控制系统负责对微型核反应堆电源的运行和供电状态进行监测、诊断、控制和调节。核反应堆电源根据能量转换方式划分为静态转换与动态转换两种方式。静态转换主要包括热离子转换、温差热电转换^[13-14]、碱金属转换^[15-16]等。正在研究的能用于空间核电源的动态转换包括布雷顿循环^[17-18]、斯特林循环^[19-20]及朗肯循环^[21-24]。

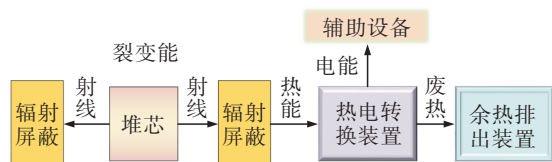


图 2 微型核反应堆电源系统原理

Fig. 2 Schematic diagram of the power supply system of the micro nuclear reactor

空间核反应堆电源根据冷却工质不同,主要分为液态金属(钠、钠钾、锂)冷却反应堆、气体冷却(氦氘、氦气)反应堆与热管冷却反应堆。液态金属冷却反应堆最具代表性的是俄罗斯 TOPAZ 等采用的 NaK 冷却剂,目前技术已非常成熟。美国的 SP-100 与 SCoRe 等则采用液态金属锂和钠。气体冷却空间堆多采用氦氘混合气体作为堆芯的冷却剂和动态热电转换的循环工质,通常结合布雷顿循环,如普罗米修斯计划、俄罗斯的空间核动力飞船等。热管冷却空间堆的方案较多,大多采用高温碱金属热管冷却(锂热管、钠热管及钾热管)。

目前,最具发展潜力、研究最为广泛的一类空间核反应堆电源是采用热管作为热量传递装置的热管冷却反应堆电源(以下简称“热管堆”)。与传统反应

堆相比,热管堆主要具有以下特点和优势:具有固态属性,通过非能动方式与固体导热形成导出堆芯热量,传热链路可靠;无泵阀类辅助部件,运行静默性强,系统配置简单;采用模块化设计,易于安装,扩展性强;结构紧凑,可以灵活应用于不同需求场景。

图 3 为典型的热管冷却反应堆堆芯示意图。其主要结构为一个燃料棒和热管交叉排布的堆芯,热管和燃料棒均位于导热基体中,堆芯外围布置有反射层与屏蔽层,一般采用控制转鼓控制堆芯反应性。根据功率需求的不同,可采用静态热电转换原件、斯特林或布雷顿循环完成能量转换。

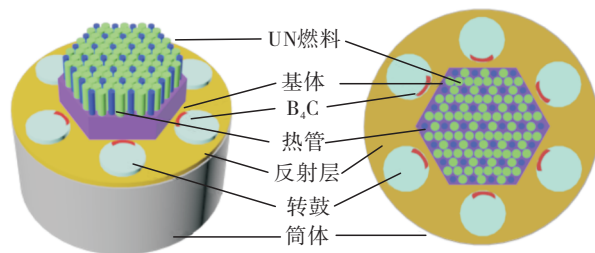


图 3 典型热管冷却反应堆堆芯示意图

Fig. 3 Schematic diagram of a typical heat pipe cooled reactor core

2 热管反应堆发展历程

20 世纪 60 年代,为适应航天飞行器质量极轻、系统极简和固有安全性极高的要求,洛斯阿拉莫斯国家实验室(LANL)以液态金属冷却堆为基础进行简化设计,并基于液态金属工质的热管设备,提出了一种全新的空间核反应堆设计方案,即热管冷却反应堆^[25]。液态金属热管最早应用于空间热离子反应堆电源的热排放系统设计(即辐射散热器)中,以提高换热效率和降低质量。LANL 进一步将热管与堆芯导热和热电转换技术结合,基于堆芯物理设计和热工设计最终形成燃料棒-热管间隔排布的热管堆设计理念^[26-27]。

目前,世界各国对空间热管堆方案与关键技术研究^[28-29]已经进入工程试制阶段,且不断扩展热管堆在不同领域的应用,如深海、陆地可移动等场景。热管堆逐渐发展成为新型核动力技术的主流选择。目前全球提出的用于空间探索及星表供电的热管堆设计方案列于表 1。

表 1 热管堆的技术方案
Tab.1 Technical scheme of heat pipe cooled reactor

型号	热电转换方式	年代	电功率/kW	效率/%	工质
HOMER(热管火星堆)-15 ^[30]	斯特林循环	2000	3	20.0	钠
HOMER-25 ^[30]	斯特林循环	2000	25	26.5	钾
RAPID(一体化换料设计反应堆) ^[31]	温差发电	2000	200	3.0	锂
MSR(火星表面反应堆) ^[32]	热离子转换	2004	125	—	锂
HP-STMCs ^[33]	温差发电	2004	110	—	锂
SAFE(安全经济裂变引擎)-400 ^[34]	布雷顿循环	2007	100	25.0	钨
LEGO-LRCS ^[35-36]	斯特林循环	2008	—	25.0	钠
Kilopower-10 kW ^[37]	斯特林循环	2012	10	35.0	钠
HPCMR ^[38]	斯特林循环	2015	40	—	—
NUSTER-20/50/100 ^[39]	温差发电	2017	20/50	8.0	钾
Megapower ^[40]	空气布雷顿循环	2018	22	20.0	钠
Aucura Oklo ^[41]	—	2020	100	—	钠
eVinci ^[42]	—	2021	—	—	钠

热管冷却反应堆因其模块化的设计思想、极简的系统设计与高可靠的反应堆结构设计等特点,成为业内学者关注的热点。围绕该设计的技术研发,国际上已经开展了耐高温燃料及材料、碱金属高温热管、热电转换技术等研究,并已获得大量技术突破和研究成果。由于当时设计方案功率密度比低、核安全研究内容不充分,且热电转换装置可靠性低,系统寿命较短,逐渐被太阳能所代替。

在 21 世纪初,随着美国重启空间探索计划,高效小型热电转换技术得到突破,热管冷却反应堆重新受到关注。2002 年,LANL 提出了热管与燃料元件呈六边形排布的“HOMER”设计方案。还提出创新型的热管分布在堆芯外围的设计形式,采用弥散燃料,热管分布于燃料基体周围。根据不同功率等级需求,各国研究机构基于其运行原理,在不同应用场景下方案进行设计优化提出了 HP-STMCs、LEGO、MSR^[43]等热管冷却反应堆设计方案。2020 年以来针对热管堆模块化的特性,美国国防部又支持了奥克洛公司和西屋公司以 Aucura 和 eVinci 两种堆型进行可移动核电源方案设计和申请建造许可。

自 2010 年开始国内也陆续关注热管堆在空间方面的应用,其中中国原子能科学研究院提出了多种热管堆设计方案,如行星供电平台 HPCMR 等^[44],西安交通大学针对热管堆深海应用提出了 NUSTER 系列热管堆方案。国内学者进一步将热管堆的应用向深海、陆基移动电源等领域进行拓展^[45]。

3 热管反应堆理论及实验研究

3.1 热管堆理论研究

国际上对热管这一非能动传热方式的稳态运行特性、瞬态响应特性及安全特性开展了大量工作,如系统启动策略、系统安全分析(控制鼓意外动作、热管损坏、热电装换装置失效)等。Gaeta 等^[46]对热管堆各个系统进行了建模,对系统开展了稳态和事故条件下瞬态研究。NASA 与 LANL 基于试验数据与仿真分析,在系统分析程序中研究了热管堆的瞬态响应特性^[47-48]。Kapernick 等^[49]利用 Fluent 对交错排布热管堆形式进行了分析计算,得到了堆芯三维温度分布,分析了堆芯稳态传热特性。

国内对于热管堆的理论研究主要以系统的安全分析为主,涉及全堆芯核热力耦合方法研究和系统热工安全分析。刘松涛等^[50]基于 SAIRS 设计方案进行建模,分析研究了控制装置误动作的反应性引入事故、热电转化装置失效事故和辐射器部分损坏(即失热阱)事故下系统的安全特性。田晓艳等^[51]研究了热管堆电源系统稳态运行参数,以及系统在推进模式下不同事故(反应性引入及冷却剂丧失)的安全特性。李华琪等^[52]基于自编程建立热管堆堆芯稳态热工模型、反应性反馈模型和功率瞬变模型,对 HP-TMCS 热管堆电源方案进行了瞬态分析计算。Ma 等^[53]通过 RMC-ANASYS 对堆芯精细化建模,实现了热管核热力耦合分析方法研究。张胤等^[54]基于 COMSOL 实现了热管堆堆芯核热力电四场耦合分析工具。葛攀和等^[55]基于 OpenFOAM 开发了适用于温差热电转换型空间热管冷却反应堆的瞬态分析程序,并采用该程序对千瓦级热管冷却反应堆原型(KRUSTY)进行了建模分析,开展了反应性引入、热电转换模块失效、负荷跟踪、主动冷却丧失工况下的瞬态分析,该工具计算结果与试验值符合良好,具备热管堆瞬态分析条件。王立鹏等^[56]基于蒙特卡罗方法(MCNP)的非结构网格功能结合有限元软件 ABAQUS,进行 KRUSTY 的热力耦合计算,研究了 KRUSTY 热变形模拟、膨胀反应性反馈和密度反馈,相较于传统的组合实体(CSG)几何,可以更真实地模拟金属燃料堆的热膨胀效应,为热管堆的热力耦合计算提供方法支撑。钱雅兰等^[57]从法规、标准和概率安全目标等方面结合国内外研究现状,提出了热管堆 PSA 发展的方向,为热管堆的安全评价提供借鉴。

3.2 热管堆实验研究

在试验研究方面,NASA 在 EFF-TF 试验装置上开展了相关试验^[58-59],该试验分为 30 kW 和 100 kW 两个等级^[60-61];30 kW 级试验用于研究高温热管及换热器部件级验证;100 kW 级试验用于评价热工分析程序误差。HPR-1 试验装置如图 4 所示^[62],采用典型的热管与燃料棒布置方式,试验结果基本验证了系统的启停、稳态、功率升降等工况。DUFF 试验装置如图 5 所示^[63-64],该试验台采用了半球型屏蔽层,测试了斯特林与单根热管耦合传热特性,验证设计的原理可行性。

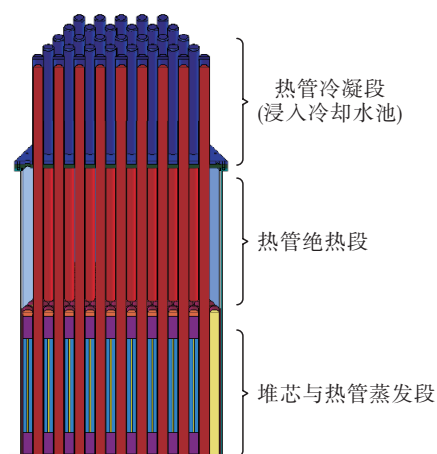


图 4 HPR-1 实验装置^[62]

Fig. 4 HPR-1 experimental device^[62]

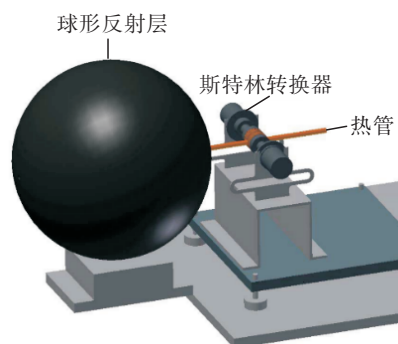


图 5 DUFF 实验装置^[63-64]

Fig. 5 DUFF experimental device^[63-64]

2010 年以来,相关研究者加快了试验论证与演示的步伐,并围绕千瓦级热管堆开展了带核集成演示验证试验研究。2015 年,NASA 开展了 KRUSTY^[65-66]的带核验证(见图 6),论证了模拟软件分析的准确性,该装置为目前唯一的热管堆带核试验装置,标志着热管堆的发展正式步入工程化阶段^[67]。

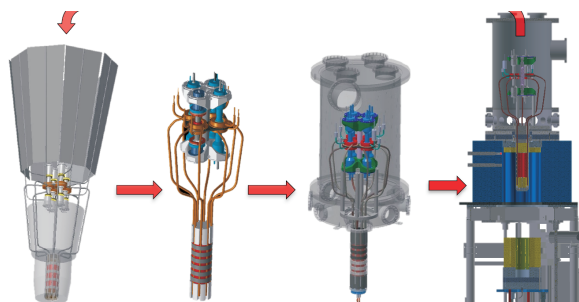


图 6 KRUSTY 实验装置^[65-66]

Fig. 6 KRUSTY experimental device^[65-66]

西安交通大学^[68]在 2018 年完成了基于温差发电装置的热管堆原理样机(见图 7),基于该样机一体化集成装置,开展了智能转鼓自动控制系统性能研究、高温热管能量输运机制研究、系统级大功率静态温差发电特性研究,探究了非核原理样机在单根热管失效、冷却能力丧失、升功率等事故工况下的系统安全特性及智能转鼓自动控制特性。依托原理样机获取了 7.5% 静态热电转换效率和超过 200 W 以上的输出功率^[69]。

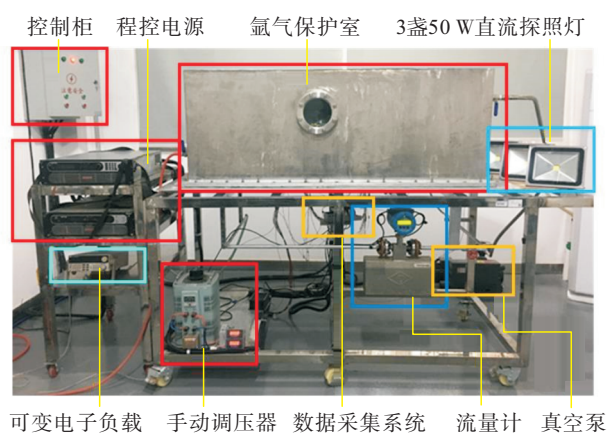


图 7 热管堆原理样机^[68]

Fig. 7 NUSTER device^[68]

3.3 热管堆需要考虑的因素

当前热管堆发展已经步入工程阶段,但在热管堆中长期运行可靠性尚没有参考依据。在热管堆实际运行过程中,需要考虑堆芯辐射和特殊应用场景对热管和热性能、结构强度和反应堆整体运行特性的影响。首先,由于受中子辐照的影响,热管工质会分解产生不凝结气体,而不凝结气体的存在一方面改变了热管工质的工作压力,另一方面也影响了碱金属工质的蒸发与凝结,从而对热管的换热性能产生影响。同时,高温造成的固态堆芯膨胀作用会造成局部温度的升高并产生机械应力,对热管的换热能力和结构强度提出了挑战,也对堆芯物理、热工特性造成显著影响。高温热管在微重力条件下的特殊现象更需进一步探索,尤其是传热极限可能受到多种因素的影响,如工质的物理性质、热管的结构设计及外部环境的热负荷等。微重力条件下热管内部的流动状态可能更加复杂,导致热管在某些条件下出现不稳定现象。因此,需要进一步研究如何优化热管的设计和运行参数,以提高其在微

重力环境中的稳定性。

4 发展趋势及展望

空间核电源的发展阶段主要分为方案设计、原理样机验证、非核原型样机验证、带核地面样机验证、飞行装置验证五大阶段。通过公开发表文献梳理得出,国际热管堆发展已经从带核地面样机验证进入频谱化和高度模块化发展阶段,但在工程实施阶段还有以下关键技术亟待突破。

1) 热管冷却反应堆总体耦合模拟技术。空间热管冷却反应堆电源在全生命流程中,具有全固态堆芯和高温运行特点,系统在运行过程中需经历常温(发射阶段)、低温(进入预定轨道)、高温(在轨)运行等环境,对系统全流程总体设计提出了更高的要求,需结合核安全和航天航空相关力学规范开展设计工作。

2) 微型核动力系统无人智能化控制技术。空间热管反应堆电源作为带核装置,在保证核安全的前提下开展无人智能化控制属于反应堆运行领域的空白区,与传统核电站具有复杂冗余控制及保护系统的运行相比,在极简测量控制系统条件下还需满足核安全相关规范,并对系统故障监测、智能控制和故障处理进行遥控,显得尤为困难,因此需开展反应堆控制系统小型化和智能化研究。

3) 耐高温难熔金属材料研发。作为热管冷却反应堆电源特点的高温运行,对燃料、包壳材料、堆结构材料提出了更高的要求,核电站常用的锆合金材料已经无法满足,目前主流方案均采用高温下力学性能更优的钼合金、钨合金等,需开展辐照后相关性数据测试支撑应用。

4) 核-热-力-电全场耦合分析方法。与传统核电站可近似脱耦分析不同,热管冷却反应堆瞬时响应迅速,系统热惯性小,对于系统负载变化、运行力学载荷变化、热阱环境变化等较为敏感。为保证系统核安全,传统解耦方法过于保守,需采用更为精细的核-热-力-电全场耦合分析方法对反应堆状态进行预测和分析。

总之,尽管相较传统反应堆,固态热管堆堆芯结构较为简单,但其仍具有独特且复杂的运行特性。因此,针对高温热管和固态热管堆堆芯运行过程中的关键现象和机理开展基础理论和实验研究,

并在此基础上建立数学物理模型、开发高温热管传热和热管堆运行特性分析软件平台,对于热管堆的设计研发、安全分析及事故预测都具有重要的科学意义和现实意义。

参考文献

- [1] 杨述明, 谢昌霖, 程玉强, 等. 液体火箭发动机健康监控技术研究进展[J]. 火箭推进, 2024, 50(1): 28-45.
YANG S M, XIE C L, CHENG Y Q, et al. Research progress in health monitoring technology for liquid rocket engines [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2024, 50(1): 28-45.
- [2] 王凯, 王东方, 刘友强, 等. 变形高温合金在液体火箭发动机中的应用进展及展望[J]. 火箭推进, 2024, 50(1): 57-66.
WANG K, WANG D F, LIU Y Q, et al. Application and prospect of wrought superalloy in liquid rocket engine [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2024, 50(1): 57-66.
- [3] SFORZA P M, SHOOMAN M L, PELACCIO D G. A safety and reliability analysis for space nuclear thermal propulsion systems [J]. Acta Astronautica, 1993, 30: 67-83.
- [4] MARSHALL A C, MEHLMAN W F, KOMPANIETZ G, et al. Integrated safety program for the nuclear electric propulsion space test program [C]//AIP Conference. Albuquerque, New Mexico: AIP, 1994.
- [5] CASSADY R J, FRISBEE R H, GILLAND J H, et al. Recent advances in nuclear powered electric propulsion for space exploration [J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(3): 412-435.
- [6] JOYNER C R. A closed Brayton power conversion unit concept for nuclear electric propulsion for deep space missions [C]//AIP Conference. Albuquerque, New Mexico: AIP, 2003.
- [7] CAMPBELL M, KING J D, WISE H M, et al. The role of nuclear power in space exploration and the associated environmental issues: an overview [EB/OL]. <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Role-of-Nuclear-Power-in-Space-Exploration-and-Campbell-King/9b60501f6e9683f3eb30dad5c7da672c89a58518>, 2009.
- [8] AFTERGOOD S, HAFEMEISTER D, PRILUTSKY O, et al. Nuclear power in space [J]. Scientific American, 1991, 264: 42-47.
- [9] BENNETT G L. A look at the Soviet space nuclear power program [C]//24th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. Washington, D C: IEEE, 2002.
- [10] 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(4): 11-20.
YANG Q F, LU H L. Research and application of space nuclear reactor power supply [J]. Spacecraft Engineering, 1995, 4(4): 11-20.
- [11] BENNETT G L, HEMLER R J, SCHOCK A. Space nuclear power-an overview [J]. Journal of Propulsion and Power, 1996, 12(5): 901-910.
- [12] MENG F K, CHEN L G, SUN F R. A numerical model and comparative investigation of a thermoelectric generator with multi-irreversibilities [J]. Energy, 2011, 36(5): 3513-3522.
- [13] WOJTAS N, RÜTHEMANN L, GLATZ W, et al. Optimized thermal coupling of micro thermoelectric generators for improved output performance [J]. Renewable Energy, 2013, 60: 746-753.
- [14] HUNT T K, SIEVERS R K, KUMMER J T, et al. AMTEC/SHE for space nuclear power applications [C]//AIP Conference. Albuquerque, New Mexico: AIP, 1992.
- [15] BANKSTON C, COLE T, KHANNA S, et al. Alkali metal thermoelectric conversion (AMTEC) for space nuclear power systems [EB/OL]. [https://www.semanticscholar.org/paper/Alkali-Metal-Thermoelectric-Conversion-\(AMTEC\)-for-Bankston-Cole/4c16378f1d665da9c3404fa9a56ecc5b3b8ed0f2](https://www.semanticscholar.org/paper/Alkali-Metal-Thermoelectric-Conversion-(AMTEC)-for-Bankston-Cole/4c16378f1d665da9c3404fa9a56ecc5b3b8ed0f2), 1985.
- [16] GALLO B M, EL-GENK M S, TOURNIER J M. Compressor and turbine models of Brayton units for space nuclear power systems [C]//AIP Conference. Albuquerque, New Mexico: AIP, 2007.
- [17] PETERSON P F. Multiple-reheat Brayton cycles for nuclear power conversion with molten coolants [J]. Nuclear Technology, 2003, 144(3): 279-288.
- [18] MASON L S. A comparison of Brayton and Stirling space nuclear power systems for power levels from 1 kilowatt to 10 megawatts [C]//AIP Conference. Albuquerque, New Mexico: AIP, 2001.
- [19] BRANDHORST H W. New 5 kilowatt free-piston stirling space converter developments [C]//AIP Conference. Albuquerque, New Mexico: AIP, 2007.
- [20] YODER G, CARBAJO J, MURPHY R, et al. Potassium Rankine cycle system design study for space nuclear electric propulsion [C]//3rd International Energy Conversion

- Engineering Conference. Reston, Virgina: AIAA, 2005.
- [21] 王浩明, 陈金利, 王园丁, 等. 基于运行状态的氦氙布雷顿循环气体组分分析[J]. 火箭推进, 2023, 49(3): 76-82.
- WANG H M, CHEN J L, WANG Y D, et al. Gas composition analysis of helium-xenon Brayton cycle based on operating status [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2023, 49(3): 76-82.
- [22] NICHOLS J P, HOLCOMB R S, MOYERS J C, et al. Nuclear Rankine/flywheel MMW space power concept [Z]. 1987.
- [23] 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.
- [24] GROVER G M, COTTER T P, ERICKSON G F. Structures of very high thermal conductance [J]. Journal of Applied Physics, 1964, 35(6): 1990-1991.
- [25] RANKEN W A, HOUTS M G. Heat pipe cooled reactors for multi-kilowatt space power supplies [C]// 9th International Heat Pipe Conference. Albuquerque, New Mexico: [s. n.], 1995.
- [26] HOUTS M G, POSTON D I, RANKEN W A. Heatpipe space power and propulsion systems [C]//AIP Conference. Albuquerque, New Mexico: AIP, 1996.
- [27] MCCLURE P R, POSTON D I, DIXON D D, et al. Final results of demonstration using flattop fissions (DUFF) experiment [R]. LA-UR-12-25165, 2012.
- [28] VANDYKE M K, MARTIN J, HOUTS M G. Overview of non-nuclear testing of the safe, affordable 30 kW fission engine, including end-to-end demonstrator testing [R]. Washington, D C: National Aeronautics and Space Administration, 2003.
- [29] VANDYKE M, MARTIN J. Non-nuclear testing of reactor systems in the early flight fission test facilities (EFFTF) [EB/OL]. <https://www.semanticscholar.org/paper/Non-nuclear-Testing-of-Reactor-Systems-in-the-Early-Vandyke-Martin/1fd2df36e2ba7f1a7ce97c78346f0655e0d18b42>, 2004.
- [30] POSTON D I. The heatpipe-operated Mars exploration reactor (HOMER) [C]//AIP Conference. Albuquerque, New Mexico: AIP, 2001.
- [31] KAMBE M, TSUNODA H, MISHIMA K, et al. Rapid-L operator-free fast reactor concept without any control rods[J]. Nuclear Technology, 2003, 143(1): 11-21.
- [32] HARTY R B, MASON L S. 100-kWe lunar/mars surface power utilizing the SP-100 reactor with dynamic conversion [Z]. 2004.
- [33] EL-GENK M S. Conceptual design of HP-STMCs space reactor power system for 110 kWe [C]//AIP Conference. Albuquerque, New Mexico: AIP, 2004.
- [34] POSTON D I, KAPERINICK R J, GUFFEE R M. Design and analysis of the SAFE-400 space fission reactor [C]//AIP Conference. Albuquerque, New Mexico: AIP, 2002.
- [35] BESS J D. Project luna succendo: the lunar evolutionary growth-optimized (LEGO) reactor [Z]. 2008.
- [36] BESS J D. A basic LEGO reactor design for the provision of lunar surface power [R]. [S. l.]: Office of Scientific & Technical Information, 2008.
- [37] GIBSON M A, MASON L S, BOWMAN C, et al. Kilopower, NASA's small fission power system for science and human exploration [C]//12th International Energy Conversion Engineering Conference. Reston, Virginia: AIAA, 2014.
- [38] 姚成志, 胡古, 解家春, 等. 月球表面核反应堆电源方案[J]. 科技导报, 2015, 33(12): 19-23.
- YAO C Z, HU G, XIE J C, et al. A scheme of lunar surface nuclear reactor power [J]. Science & Technology Review, 2015, 33(12): 19-23.
- [39] WANG C L, TANG S M, LIU X, et al. Experimental study on heat pipe thermoelectric generator for industrial high temperature waste heat recovery [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 175: 115299.
- [40] MA Y G, LIU M Y, CHEN E H, et al. Rmc/ansys multi-physics coupling solutions for heat pipe cooled reactors analyses [J]. EPJ Web of Conferences, 2021, 247: 06007.
- [41] Oklo. Technical specifications [EB/OL]. <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/col/aurora-oklo.html>, 2020.
- [42] Westinghouse eVinci™ micro-reactor pre-application [Z]. 2021.
- [43] GENK M S, HOOVER M D. Transactions of the fourth symposium on space nuclear power systems [Z]. 1987.
- [44] TOURNIER J M, EL-GENK M S. A heat pipe transient analysis model [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1994, 37(5): 753-762.
- [45] SCHEIDEGGER A E. The physics of flow through porous media [M]. 3rd ed. Toronto: University of Toronto Press, 1974.
- [46] GAETA M J, BEST F R. Transient thermal analysis of a space reactor power system [J]. Nuclear Technology, 1993, 103(1): 19-33.

- [47] KLEIN S K, KIMPLAND R. Dynamic system simulation of the KRUSTY experiment [EB/OL]. <https://www.semanticscholar.org/paper/Dynamic-System-Simulation-of-the-KRUSTY-Experiment-Klein-Kimpland/a22de4a62c47ef00e6bbfd7baed6919fe8dcbc6d>, 2016.
- [48] POSTON D. KRUSTY design and modeling [EB/OL]. <https://www.semanticscholar.org/paper/KRUSTY-Design-and-Modeling-Poston/2411b8bb6d3c904927f2be842b93020d775e642a>, 2016.
- [49] KAPERNICK R J. Thermal stress calculations for heat-pipe-cooled reactor power systems [C]//AIP Conference. Albuquerque, New Mexico: AIP, 2003.
- [50] 刘松涛, 袁园, 魏宗岚, 等. 热管冷却空间反应堆事故特性研究[J]. 核动力工程, 2016, 37(5): 119-124.
LIU S T, YUAN Y, WEI Z L, et al. Accident analysis of heat pipe cooled space reactor system [J]. Nuclear Power Engineering, 2016, 37(5): 119-124.
- [51] 田晓艳, 江新标, 陈立新, 等. 热管冷却双模式空间堆堆芯稳态热工水力分析程序开发[J]. 核动力工程, 2017, 38(5): 34-39.
TIAN X Y, JIANG X B, CHEN L X, et al. Development of code for steady-state thermal-hydraulic analysis in bi-modal space nuclear reactor with heat pipe [J]. Nuclear Power Engineering, 2017, 38(5): 34-39.
- [52] 李华琪, 江新标, 陈立新, 等. 空间堆堆芯热管蒸气流动计算方法研究[J]. 核动力工程, 2014, 35(6): 37-40.
LI H Q, JIANG X B, CHEN L X, et al. Calculation method for vapor flow in space nuclear reactor heat pipe [J]. Nuclear Power Engineering, 2014, 35(6): 37-40.
- [53] MA Y, LIU M, YU H, et al. Neutronic/thermal-mechanical coupling in heat pipe cooled reactor [Z]. 2020.
- [54] 张胤, 王成龙, 唐思邈, 等. 固态热管反应堆模拟装置热工水力特性分析[J]. 原子能科学技术, 2021, 55(6): 984-990.
ZHANG Y, WANG C L, TANG S M, et al. Analysis of thermal-hydraulic characteristic of solid heat pipe reactor simulator device [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2021, 55(6): 984-990.
- [55] 葛攀和, 李敏, 李杨柳, 等. 温差热电转换型空间热管冷却反应堆瞬态分析程序开发及验证[J]. 原子能科学技术, 2024, 58(1): 69-83.
GE P H, LI M, LI Y L, et al. Development and verification of transient analysis program for thermoelectric space heat pipe cooled reactor [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2024, 58(1): 69-83.
- [56] 王立鹏, 曹璐, 陈森, 等. 基于非结构网格 MCNP 的 KRUSTY 热膨胀负反馈计算研究[J]. 核动力工程, 2023, 44(6): 45-53.
WANG L P, CAO L, CHEN S, et al. Study of KRUSTY thermal expansion negative feedback calculation based on unstructured-mesh MCNP [J]. Nuclear Power Engineering, 2023, 44(6): 45-53.
- [57] 钱雅兰, 卓钰铨, 李肇华, 等. 热管冷却反应堆概率安全评价关键问题研究概述[C]//中国核学会. 中国核科学技术进展报告(第八卷)中国核学会 2023 年学术年会论文集. 北京:科学技术文献出版社, 2023.
- [58] MARTIN J, HOUTS M G. Overview of non-nuclear testing of the safe, affordable 30 kW fission engine, including end-to-end demonstrator testing [J]. 2003, 504(1): 128-130.
- [59] STINSON-BAGBY K L. Realistic testing of the safe affordable fission engine (SAFE-100) thermal simulator using fiber Bragg gratings [C]//AIP Conference. Albuquerque, New Mexico: AIP, 2004.
- [60] GODFROY T. Realistic development and testing of fission systems at a non-nuclear testing facility [C]//AIP Conference. Seoul: AIP, 2000.
- [61] DYKE M V, HOUTS M, GODFROY T, et al. Phase I space fission propulsion system testing and development progress [C]//AIP Conference. Albuquerque, New Mexico: AIP, 2002.
- [62] WRIGHT S A. Proposed design and operation of a heat pipe reactor using the Sandia national laboratories annular core test facility and existing UZrH fuel pins [C]//AIP Conference. Albuquerque, New Mexico: AIP, 2005.
- [63] GIBSON M, BRIGGS M, SANZI J, et al. Heat pipe powered stirling conversion for the demonstration using flattop fission (DUFF) test [EB/OL]. <https://www.semanticscholar.org/paper/Heat-Pipe-Powered-Stirling-Conversion-for-the-Using-Gibson-Briggs/16248fcd1b67e8cbddced19ce2e245c67edafd409>, 2013.
- [64] MCCLURE P, POSTON D, DIXON D D. Final results of demonstration using flattop fissions (DUFF) experiment[EB/OL]. [https://www.semanticscholar.org/paper/Final-Results-of-Demonstration-Using-Flat-top-\(DUFF\)-McClure-Poston/418591a222f3e9d113ac30900460b04b8f3a2ba0](https://www.semanticscholar.org/paper/Final-Results-of-Demonstration-Using-Flat-top-(DUFF)-McClure-Poston/418591a222f3e9d113ac30900460b04b8f3a2ba0), 2012.
- [65] KLEIN S K, KIMPLAND R H. Dynamic system simulation of the KRUSTY experiment [R]. Los Alamos;

- LANL, 2016.
- [66] BRIGGS M H, GIBSON M A, SANZI J. Electrically heated testing of the kilowatt reactor using stirling technology (KRUSTY) experiment using a depleted uranium core [R]. Los Alamos: LANL, 2017.
- [67] 余红星, 马誉高, 张卓华, 等. 热管冷却反应堆的兴起和发展[J]. 核动力工程, 2019, 40(4): 1-8.
- YU H X, MA Y G, ZHANG Z H, et al. Initiation and development of heat pipe cooled reactor [J]. Nuclear Power Engineering, 2019, 40(4): 1-8.
- [68] 唐思邈, 王成龙, 苏光辉, 等. 小型核电源传热及热电特性实验研究[J]. 核动力工程, 2019, 40(4): 200-202.
- TANG S M, WANG C L, SU G H, et al. Experimental research on heat transfer and thermoelectric characteristics of small nuclear power supply facilities [J]. Nuclear Power Engineering, 2019, 40(4): 200-202.
- [69] 代智文, 刘天才, 王成龙, 等. 空间核反应堆电源热工水力特性研究综述[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(7): 1296-1309.
- DAI Z W, LIU T C, WANG C L, et al. Research review on thermal-hydraulic performance of space nuclear reactor power [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, 53(7): 1296-1309.