

深空轻质长寿热管堆电源方案研究

安伟健, 胡古, 郭键, 葛攀和, 刘金宏, 葛思淼

(中国原子能科学研究院核工程设计研究所, 北京 102413)

摘要: 针对中国深空探测任务对电源的长寿命要求, 选择非能动、高可靠的热管堆作为电源技术路线; 为满足电源的轻质要求, 选择高铀密度且具备足够高温力学性能及辐照稳定性的铀钼合金作为反应堆燃料; 热传输选择海恩斯合金包壳的钠热管, 热管布置于燃料内部, 两者之间可采用钎焊或液体界面扩散的集成方式; 热电转换选择长寿命且具备丰富成功经验的静态温差转换, 转换材料选择温度适宜且高效率的半赫斯勒; 为实现超长寿命的反应堆控制, 提出了可燃毒物控制和多种提升堆芯负温度系数的创新型、非能动控制方案。最终电源方案预计可满足中国深空探测任务需求。

关键词: 深空探测; 热管堆; 铀钼合金; 静态温差转换; 非能动控制

中图分类号: TL371

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2024)05-0453-09

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230127

引用格式: 安伟健, 胡古, 郭键, 等. 深空轻质长寿热管堆电源方案研究[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(5): 453-461.

Reference format: AN W J, HU G, GUO J, et al. Study of a deep-space light-mass long-life heatpipe reactor power scheme[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(5): 453-461.

引言

深空探测是中国未来空间重要的发展领域。开展深空探测, 可推动中国空间技术、空间应用、空间科学全面发展, 提高人类认识宇宙、进入宇宙和开发利用宇宙的能力, 服务于人类文明的可持续发展^[1]。

能源系统是深空探测的核心关键技术之一。目前, 中国月球和火星探测主要采用太阳能电池, 但木星以远的深空探测任务因太阳光能量密度过低而无法采用太阳能电池。针对星际空间严峻的环境条件及其对电源稳定性和持久性的要求, 核电源是最佳的能源选择^[1-2]。

空间核电源主要包括放射性同位素电池(Radioisotope Thermoelectric Generator, RTG)和核反应堆电源。RTG技术相对成熟, 可长寿命稳定运行, 是深空探测的优选方案。但是RTG燃料²³⁸Pu在国内尚不具备量产条件, 须依赖国外进口, 在²³⁸Pu获取困难的情况下, 空间核反应堆电源是中国深空探测任务的现实选择^[1]。

深空探测对电源的核心指标要求在于轻质和长寿命。寿命方面, 深空探测电源须具备超过10 a的连续运行寿命。以太阳系边际探测任务为例, 其对电源的寿命要求甚至超过20 a^[2], 而目前国际上实现飞行应用的回路式空间堆电源寿命最长仅约1 a^[3], 造成其寿命较短的原因部分在于回路式系统结构复杂、可靠性低,

相比之下, 热管式反应堆具备系统简单、非能动、可靠性高的优势, 美国空间热管堆Kilopower的设计寿命长达15 a。质量方面, 热管堆因其系统结构简单同样具备优势, Kilopower为减小质量, 采用高铀密度铀钼合金燃料, 电源全系统重量仅约400 kg^[4]。因此, 针对轻质和长寿命需求, 本文参考Kilopower选择“铀钼合金燃料+热管堆”的技术路线。考虑到限制Kilopower寿命的主要因素在于动态转换的斯特林发电机, 因此本文选择静态温差转换以进一步提升电源寿命。此外, 考虑到主动控制技术难以实现无人状态下的长寿命, 本文提出了数种创新型的非能动被动控制策略。预计最终电源方案可以满足中国深空探测的需求。

1 热管堆简介

热管堆采用热管作为传热方式, 相比传统回路堆, 具有非能动、防单点失效、结构简单可靠等优势。美国从20世纪90年代开始陆续开展了多型热管堆研究, 如HPS^[5]、HOMER^[6]、SAFE^[7]、HP-STMCs^[8]等。

2010年, 针对气态巨行星探测任务需求, 美国提出了电功率1 kWe的空间热管堆电源Kilopower^[4,9,10], 如图1所示。Kilopower采用块状UMo燃料、Na热管传热, 热电转换采用自由活塞式斯特林发电机, 堆芯热功率约4 kW, 系统质量约406 kg, 设计寿命达15 a。

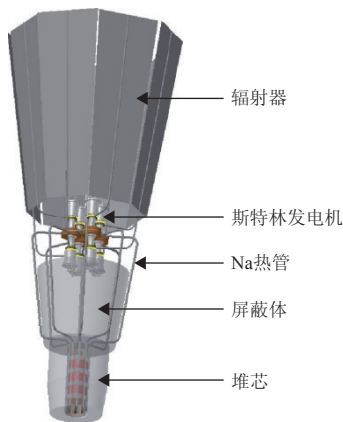


图1 采用斯特林发电的Kilopower方案
Fig. 1 Kilopower using Stirling conversion

2014年,美国启动了Kilopower项目,陆续完成了电加热不锈钢模拟堆芯试验、电加热贫铀模拟堆芯试验等非核试验工作,确定了燃料、热管以及斯特林发电机之间的集成方式,并于2017年建成了高浓铀堆芯试验装置KRUSTY,见图2。2018年5月,美国宣布KRUSTY试验取得成功^[11],试验结果与采用理论模拟工具预测的结果高度吻合。KRUSTY的成功使热管堆成为空间堆领域的研究热点。

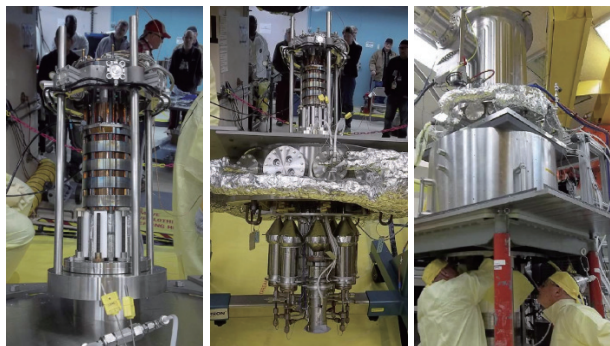


图2 KRUSTY装置建造
Fig. 2 KRUSTY under construction

2 深空探测热管堆技术路线

针对中国深空探测任务对电源的长寿命要求,热管堆因其非能动、结构简单可靠等优势成为了优选技术路线。Kilopower可以为中国热管堆研究提供借鉴,但因需求不同,且考虑到Kilopower技术尚未成熟,中国热管堆方案并不照搬Kilopower,而是综合考虑任务需求、各项技术的研发现状及预期可实现性,以确定适合中国实际情况的技术路线。

2.1 燃料

2.1.1 燃料需求

“纵深防御”原则,燃料必须由高强度包壳封装,以避免放射性物质外泄。深空探测热管堆在进入空间

后才启动运行,不会对公众构成放射性威胁,因此无需满足“纵深防御”要求,燃料形式可以更加灵活^[12]。

深空探测对电源的核心指标要求在于轻质和长寿命。轻质方面,需要在反应堆设计过程中把减小堆芯尺寸和重量作为重点,要求燃料具有尽可能高的铀密度;长寿命方面,要求燃料的几何结构以及与热管之间的传热性能在长寿命运行过程中不会发生过大的变化,燃料应具备足够的高温力学性能和辐照稳定性。

2.1.2 燃料选择

空间堆较为常用的 UO_2 、UN、UC等陶瓷型燃料,由于O、N、C等核素挤占了U的空间,使其铀密度较低,难以满足电源质量要求。金属型燃料的铀密度可远高于陶瓷型燃料,其缺点是高温力学性能和辐照稳定性相对较差。

纯金属铀具有最高的铀密度,可使堆芯达到最小的尺寸和重量,但其高温力学性能和辐照稳定性较差。一方面,金属铀在大于 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 时将变得较软,无法维持几何结构稳定;另一方面,金属铀在辐照下会发生两种效应:一是辐照生长,金属铀在 $668\text{ }^\circ\text{C}$ 以下为 α 相,属于各向异性的斜方晶格结构,在辐照下会发生各向异性生长,晶格的[010]轴生长、[100]轴缩短、[001]轴基本不变,其宏观尺寸将因此发生显著变化,导致燃料严重变形、表面起皱、强度降低以致破坏;二是辐照肿胀,裂变气体Kr和Xe在晶格中形成气泡,造成肿胀,金属铀在高温下的材料强度弱,较低燃料即可引起较大幅度的肿胀^[13]。

在金属铀中掺入一些元素或形成合金可显著提升其高温力学性能和辐照稳定性,备选方案有:铀掺杂Fe或Si、UZr、UV、UNb、UMo,以及金属铀外加封装容器等。其中,铀掺Fe或Si相比于纯金属铀具有更好的屈服强度和极限强度,但其蠕变强度仍与金属铀相当;UZr、UV、UNb、UMo等可使铀在较大温度范围内维持各向同性的 γ 相。 γ 相铀不会发生各向异性辐照生长,因而具有更好的辐照稳定性。其中,UZr的铀密度较低,因为要使UZr维持稳定的 γ 相,需要Zr的含量达80%以上;V的中子学性能不如Mo,且UV的研究不如UMo充分;UNb在铀密度和 γ 相稳定性的综合性能不如UMo,见图3^[14];UMo可以同时满足较高的铀密度、足够的高温力学性能以及辐照稳定性等要求;对于金属铀外加封装容器的方案,由于容器对中子的吸收作用,使得其堆芯尺寸和重量要大于UMo堆芯^[12]。因此,选择UMo作为深空探测热管堆的燃料。图4为中核北方核燃料元件有限公司研制的UMo合金燃料样件。

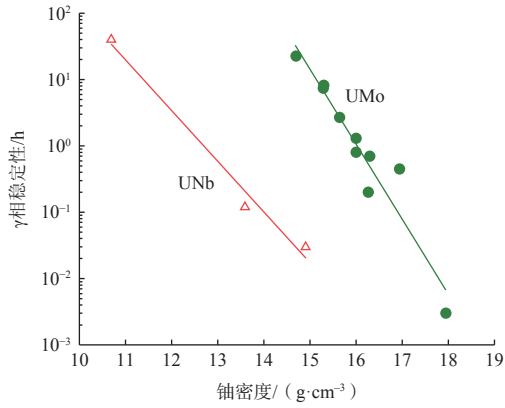


图 3 UNb、UMo的 γ 相稳定性与U密度的关系
Fig. 3 Relationship between γ phase stability and uranium density for UNb and UMo



图 4 UMo样品
Fig. 4 UMo sample

2.1.3 UMo特性

力学性能方面, 在所有试验温度下 (700 °C 除外, 此时铀为 β 相), Mo含量2%~10%的UMo的极限强度和屈服强度都高于铀约1~4倍, 并且, UMo具有很高的蠕变阻力, 这有利于其抗气体肿胀性能。

辐照稳定性方面, 图5为UMo合金相图, 一定Mo含量的UMo在高于约580 °C时可维持稳定的 γ 相。此外, UMo具有几个不同的亚稳相, 这取决于Mo含量和在高温下的UMo固溶体退火冷却速率。在Mo含量高于7at%时, UMo可以被骤冷至室温而得到亚稳态 γ 相。不过该亚稳相并不是热力学稳定的。在低于300 °C下, 亚稳态 γ 相可长期保持, 而在约300~580 °C范围内, 亚稳态 γ 相将开始分解, 该分解速度随Mo含量的升高而变慢, 如图6所示^[14]。为提升UMo的 γ 相稳定性, 一种方法是提高Mo含量, 该方法的效果较有限, 且会降低燃料的铀密度; 另一种方法是添加第三种元素形成三元合金, 少量添加Pt、Ru、Os或Pd等元素可以在不影响铀密度的情况下有效提升UMo的 γ 相稳定性。

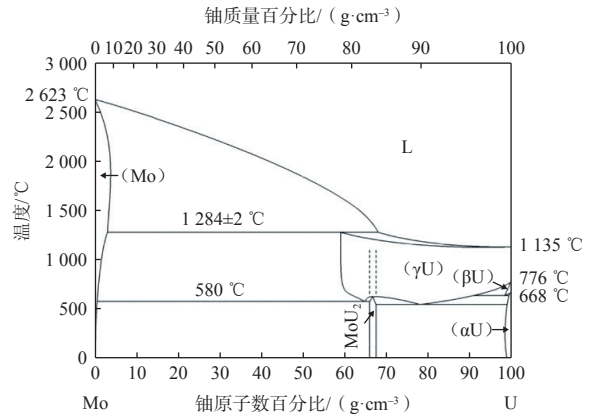


图 5 UMo相图
Fig. 5 UMo phase diagram

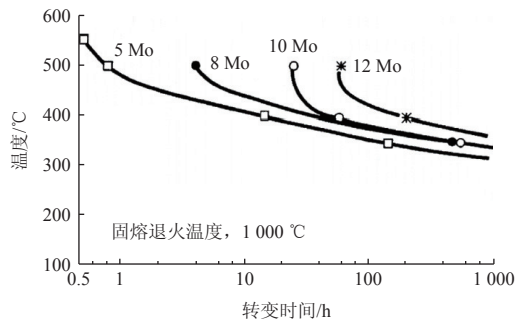


图 6 Mo含量对UMo γ 亚稳相起始分解时间的影响
Fig. 6 Starting time of decomposition of γ phase UMo under different Mo contents

需要说明的是, 虽然 γ 相UMo不会发生各向异性辐照生长, 但在高温辐照环境下, 仍会发生因裂变气体累积而导致的辐照肿胀。对于Kilopower, 因其燃耗很浅, 辐照肿胀的幅度 (体积肿胀约0.13%) 仅约燃料热膨胀的1/10。对于深空探测1 kW热管堆, 若采用转换效率较低的静态温差发电, 其堆芯热功率约18 kW, 按运行时间25 a, 则辐照肿胀幅度约0.8%, 并不会对堆芯带来问题; 对于10 kW热管堆, 则燃料辐照肿胀问题可能无法忽视。针对该问题, 一种解决方案是适当增加燃料质量以减小燃耗深度, 另一种解决方案是向燃料引入一定的孔隙度, 使其内部均匀分布有微小的孔隙, 这些处于低压环境中的孔隙有可能使晶粒内部的高压裂变气体泡向此处迁移, 合并入孔隙中, 使得这些孔隙成为裂变气体的容纳场所, 从而消除大部分晶粒内部的裂变气体泡, 缓解由此带来的体积肿胀^[13]。

2.2 热管

2.2.1 热管选择

空间堆常用的高温热管工质主要有K、Na和Li。在长寿期运行要求下, Li不太适用于堆芯热管, 原因在于Li的两种同位素⁶Li和⁷Li均会吸收中子并产生H、D、T、He等气体, 可造成热管干道的堵塞。在UMo适

宜运行温度(约800 °C)下, Na热管的传热性能优于K热管。因此, 选择Na作为热管工质。管壳材料则参考Kilopower选择海恩斯230合金(Haynes230)。图7为中国原子能科学研究院研制的弯曲型Na热管。



图7 弯曲型Na热管
Fig. 7 Bended Na heatpipe

2.2.2 热管集成

热管在堆芯的布置位置有3种备选方案: ①径向反射层中, ②燃料径向外边缘, ③燃料内部。其中, 将热管布置于径向反射层中可简化活性区结构, 并减小堆芯尺寸和重量, 其问题在于热管距离燃料中心太远, 导致燃料温度过高; Kilopower将热管布置于燃料径向外边缘, 由于热功率小, 使得燃料温度不会过高, 同时该方案使得热管和燃料之间可以采用简单的“机械夹紧”方式实现传热; 深空探测热管堆的热功率数倍于Kilopower, 若将热管布置于燃料径向外边缘, 则燃料最高运行温度将超出限值。因此, 热管应布置于燃料内部。

热管与燃料之间的连接方式主要有钎焊、热等静压扩散焊(HIP)、机械夹紧、液态金属连接等。其中, 在热管与燃料之间充装液态金属可以实现较好的传热性能, 但需要引入密封容器以避免液态金属泄漏, 这增加了堆芯复杂性并降低了可靠性; Kilopower所采用的机械夹紧方式无法适用于热管布置于燃料内部的方案; 对于HIP, 为避免热管在高压下损坏, 需要先将所有热管管壳与燃料通过HIP实现连接, 之后再充装热管工质, 这样很难保证每根热管都具有预定的传热性能^[15]; 钎焊是目前重点关注的连接方式。在焊料选择方面, U与多种金属元素(如Haynes230所含有的Fe、Ni、Si、Mn、Cr、Co等)会形成低熔点共熔合金, 因此焊料应当具备阻止UMo与Haynes230之间核素扩散的作用。Kilopower的燃料与热管之间设置有3层金属箔Cu-Mo-Cu作为核素扩散屏障^[16]。图8为中国原子能科学研究院牵头试制的热管/燃料钎焊模拟样件。

此外, NASA联合Peregrine Falcon公司开发了一种热管与UMo的连接方式——液体界面扩散(Liquid Interface Diffusion, LID), 用于10 kWe Kilopower, 其堆芯结构和深空探测热管堆类似, 热管布置于燃料

内部孔道。该方法的基本原理: 燃料与热管之间布置中间材料(Cu-Mo-Cu), 并加热到一定温度, 燃料与Cu之间, 以及热管与Cu之间由于核素扩散而形成液态的低熔点共熔合金, 该液态合金可以消除各材料之间的空隙, 然后在一定温度下保持一定时间, 使材料之间继续扩散并形成预定的固体合金。该方法可以在燃料和热管之间实现良好的传热和机械连接^[15], 如图9所示。



图8 热管/燃料钎焊样件
Fig. 8 Braze welding sample of heatpipe and fuel

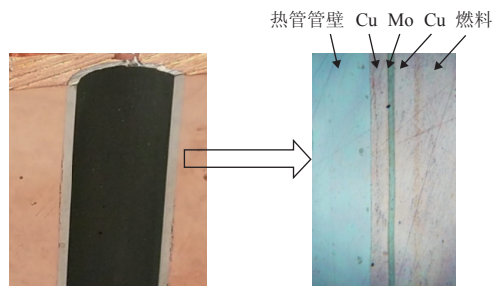


图9 热管与燃料LID前(左)后(右)
Fig. 9 Before(left) and after(right) LID of heatpipe and fuel

2.3 热电转换

空间核反应堆电源的转换方式主要有静态温差转换、热离子转换、斯特林转换和布雷顿转换等。其中, 热离子转换的高温端温度约1 800 °C, 远超金属型燃料的熔点, 且其寿命难以超过10 a; 布雷顿转换的技术成熟度相对较低, 距离空间应用较为遥远; 自由活塞式斯特林转换和静态温差转换是深空探测热管堆的备选转换方式, 前者兼具高效率 and 长寿命, 后者已成功应用于诸多深空探测RTG及空间堆。

2.3.1 斯特林转换

自由活塞式斯特林发电机的优势有: ①转换效率数倍于静态温差转换, 可减小堆芯热功率和重量, 这也是Kilopower由最初的静态温差转换更改为斯特林转换的原因; ②理论上的长寿命, Kilopower的设计寿命

达到15 a, 斯特林转换同位素电池ASRG的设计寿命则达到17 a。

然而, 斯特林转换技术的发展不如预期顺利。为解决RTG燃料 ^{238}Pu 短缺问题, 美国曾大力研发ASRG, 采用斯特林转换取代静态温差发电, 可将 ^{238}Pu 用量节省约3/4。美国在2014年开展了ASRG电加热工程样机试验, 试验仅持续约200 h后, 两台发电机均出现了功率波动, 且波动的频率和幅度随着时间不断变大, 试验因此被迫终止。之后, 来自美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)格伦研究中心(Glenn Research Center)、Sunpower公司以及洛克希德马丁公司(Lockheed Martin Space Systems Company)约40位专家组成研究团队, 对两台发电机进行解体研究, 发现发电机内部多处发生了摩擦和碰撞并产生了碎片, 但最终没能确定导致该现象的根本原因^[17]。

目前中国用于空间任务的自由活塞式斯特林发电机的技术成熟度偏低, 距离工程应用还有一定距离。此外, 考虑到有些深空探测任务对电源的寿命要求甚至超过了斯特林发电机的理论设计寿命, 如太阳系边缘探测的任务周期超过20 a。因此, 现阶段暂不选择斯特林转换作为深空探测热管堆的转换方式。

2.3.2 静态温差转换

静态温差转换的效率仅约为斯特林转换的1/4, 其优势在于纯静态无振动、高可靠性以及充分验证的长寿期稳定运行性能。美国已成功发射近50个RTG, 均采用静态温差发电, 有些已连续运行超过50 a^[3]。采用RTG的“旅行者1号”(Voyager 1)已通过太阳风层顶, 正在持续刷新人类探测的最远距离记录, “先驱者10号”(Pioneer 10)、“先驱者11号”(Pioneer 11)、“旅行者2号”(Voyager 2)以及“新视野号”(New Horizons)等均已超过太阳系逃逸速度, 正飞往星际空间。此外, 目前已实现飞行应用的绝大多数空间堆均采用静态温差转换, 包括美国的SNAP-10A, 以及前苏联的33座BUK空间堆。因此, 虽然转换效率较低, 但考虑到较小的功率需求、超长的运行寿期需求以及较好的技术成熟度, 静态温差转换是深空探测热管堆电源较优的转换方式。

目前用于空间核电源的温差转换材料主要有两种: SiGe型和PbTe型, 两者均在美国大量空间任务中得到成功应用。其中, SiGe适用于高温区, 在MHW-RTG、GPHS-RTG中其热端温度达到约1 000 °C, 冷端温度约300 °C, RTG系统转换效率约6.7%。但SiGe在中温区的转换效率并不理想。美国SNAP-10A空间堆采

用SiGe转换, 热端温度约504 °C, 转换效率仅1.3%。PbTe适用于中温区, 其热端温度一般不超过550 °C, 冷端温度约200 °C, 在SNAP-19、MM-RTG中实现了约6.2%的系统转换效率^[18]。

然而, SiGe和PbTe的适宜运行温度与UMo并不匹配, 根据UMo相图(图5), 要维持 γ 相, 其运行温度应不低于约700 °C, 远高于PbTe的适宜温度; 而要维持足够的高温力学性能, UMo高温运行限值约923 °C^[12], Kilopower中UMo运行温度约800 °C, 在该温度下, SiGe的转换效率将大打折扣。不过, 除这两种材料之外, 目前还有更多的材料选择。表1为中国现有温差器件的主要性能参数^[19]。根据表1, 半赫斯勒(HH: Half-Heusler)的运行温度可以与UMo匹配, 并具有很好的转换效率。中科院上海硅酸盐研究所对于该型温差器件已积累了相当的研究基础, 其HH器件(见图10)的转换效率达到了7.7%, 目前该型转换技术处于向工程化应用转化的阶段。综合考虑运行温度、转换效率及可实现性, 选择HH作为深空探测热管堆电源现阶段的转换方式。

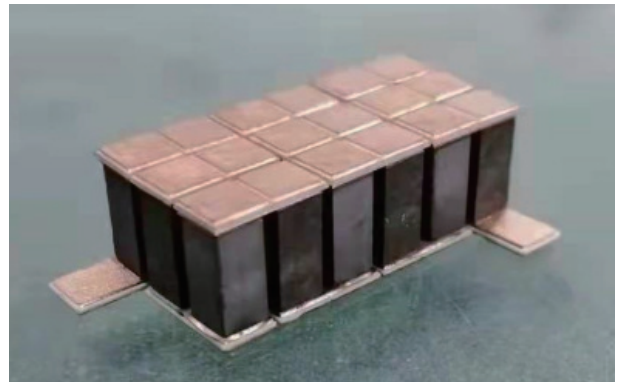


图10 HH温差器件样品

Fig. 10 HH thermoelectric module sample

表1 中国现有温差器件的主要性能参数

Table 1 Performance parameters of typical thermoelectric modules in China

材料体系	Bi_2Te_3	PbTe	SKD	HH	SiGe
热端温度/°C	<300	<550	<600	<850	<1000
最大转换效率/°C	6~7	~7	10.4	10.5	~7
面功率密度/($\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$)	0.5	0.8	1~1.5	2~3.5	0.5~1
功率质量比/($\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$)	~120	150~200	250~300	250~350	300~350
功率体积比/($\text{W}\cdot\text{cm}^{-3}$)	~0.5	0.5	1~2	2~3	0.6~1

2.4 控制方式

简单的控制策略有助于实现电源的长寿命。Kilopower的控制机构仅有一根中心安全棒, 且具备全自主运行的特性。其运行模式为: 发射成功后, 调节中心安全棒使反应堆达到额定运行状态, 之后不再调节棒位,

寿期内的反应性损失由燃料温度的下降来自动补偿,其机理为:随着反应性的下降,堆芯热功率及运行温度也会相应降低,由于堆芯具有较大的负反应性温度系数,较小的温降即可引入足够反应性使堆芯维持临界运行。Kilopower全寿期内的反应性损失为0.0014,燃料温度系数约 $-1.95 \times 10^{-5}/\text{K}$,由此可算得燃料总温降为78 K,平均每年温降仅为4.9 K^[20]。深空探测热管堆采用转换效率较低的静态温差转换,使其堆芯热功率数倍于Kilopower,因此,由于燃料的燃耗和肿胀导致的反应性损失也将远大于Kilopower,仅利用燃料温度下降来自动补偿反应性损失的方式难以满足要求。为此,需引入新的堆芯控制策略。

空间核反应堆电源上的主动控制系统在强辐照环境下的寿命及可靠性是制约其寿命的关键因素,为了实现超长寿命,应尽可能减少控制系统对反应堆的主动干预。因此,由主动控制机构驱动控制棒/鼓的常规控制手段不适宜作为深空探测热管堆长寿期的控制方式。目前主要考虑如下两种非能动自主控制思路:

1) 可燃毒物。可燃毒物可布置于安全棒跟随体、燃料外围或反射层,可燃毒物随着堆芯运行而缓慢消耗,同时引入正反应性补偿燃耗反应性损失。虽然无法做到在全寿期内使可燃毒物消耗速度与燃料燃耗速度完全匹配,但由于可燃毒物的存在,使堆芯需补偿的净反应性损失显著减小,剩余的反应性损失即可由燃料温度的小幅下降来自动补偿。

2) 设法大幅提升堆芯的负温度系数,使得较小的燃料温降即可引入较大的正反应性。目前有多种备选实现方法,比如:在堆芯布置一根长热管,该热管延伸至堆外并与滑移式侧反射层相连,在寿期初,侧反射层不完全包覆燃料,随着燃耗的加深,反应性下降导致燃料和长热管的温度随之下降,长热管因热胀冷缩而变短,带动滑移式侧反射层移向能够更多包覆燃

料的位置,从而引入正反应性。或者,在堆外设置一个容器,容器与堆芯热管相接触,内部充装钠钾合金,热管温度下降将引起钠钾合金温度下降和体积收缩,容器设置有弹性波纹管结构,钠钾合金的体积收缩导致波纹管长度缩短,并带动滑移式侧反射层发生位移而引入正反应性。该控制思路属于非能动的被动控制,无需主动控制系统干预。其本质为:利用燃料的温度变化导致堆外部件的热胀冷缩,并通过传动机构将该热胀冷缩转化为控制部件的动作。图11为中国原子能科学研究院开展的两型非能动控制方式的试验图。

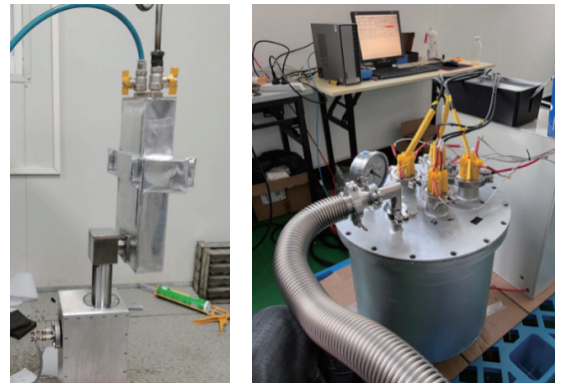


图 11 两种控制方式的试验
Fig. 11 Test of two control schemes

3 深空探测热管堆方案

综上所述,为满足深空探测对电源的轻质要求,选择铀密度高且具备足够高温热力学性能和辐照稳定性的UMo作为堆芯燃料;针对长寿命需求,选择非能动热管堆结合HH纯静态温差转换的技术路线,并采用全自主、非能动控制策略以实现超长寿期的稳定运行。

3.1 深空探测热管堆方案简介

以1 kWe深空探测热管堆为例,系统结构见图12。电源主要分为3个部分:堆芯、屏蔽体、热电一体化辐

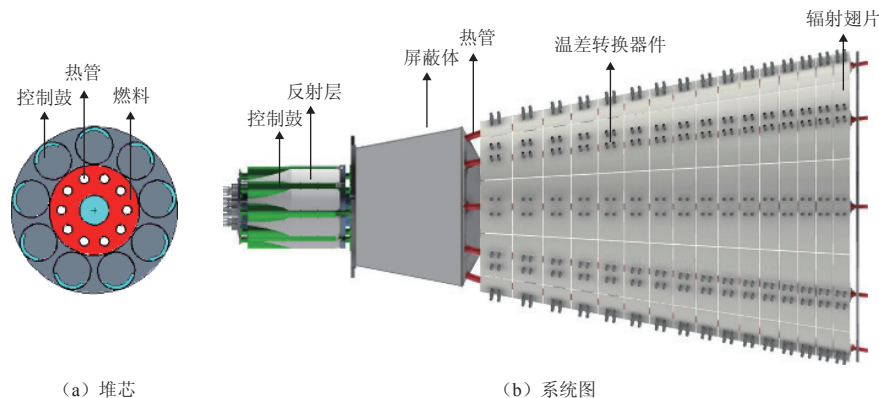


图 12 深空探测热管堆电源堆芯和系统图

Fig. 12 Core and system diagram of deep-space heat pipe reactor

射器。该电源的热功率约18 kW,电功率1 kWe,电源总质量约490 kg。

堆芯燃料采用块状UMo合金,铀质量分数92%,²³⁵U富集度90%。燃料内部布置一圈10根Haynes230包壳的Na热管。燃料中心孔道布置B₄C安全棒。反射层采用BeO,内部设置9个控制鼓。

阴影屏蔽体位于堆芯和热电一体化辐射器之间,屏蔽材料选用W、LiH以及B₄C,采用分层布置结构以优化整体质量。

热管穿过屏蔽体,在屏蔽体内有大幅度弯曲,以避免堆芯射线经热管内腔直接贯穿屏蔽体。HH器件分散布置于热管冷凝段,每个器件冷端连接一个小辐射板,单个器件或单个辐射板损坏时均不会对系统整体造成影响。

3.2 深空探测热管堆安全性

相比于一般空间堆,深空探测热管堆在安全性方面具有如下优势:

1) 固有安全性。一般空间堆采用栅格式排列的燃料棒,燃料温度升高时,燃料只在包壳内膨胀,若栅格尺寸不变,则堆芯活性区整体尺寸基本不变;相比之下,深空探测热管堆活性区为整块式燃料,燃料的膨胀等同于活性区的膨胀,因此在燃料温度升高时,其堆芯活性区的膨胀幅度比一般空间堆更大,对应的,因活性区膨胀导致中子泄漏率的增加也更为显著,因而具有更大的燃料负温度系数,这使得深空探测热管堆在地面试验时具有更好的固有安全性。

2) 发射再入安全性。UMo的熔点远低于UO₂等陶瓷型燃料,在发生火箭爆炸和再入过程中,UMo容易被气动加热并烧毁,在该情况下,即便安全棒离开堆芯,反应堆也无法达到临界。前苏联的BUK空间堆也采用UMo燃料,其安全系统含有一套堆芯再入弹出系统,一旦反应堆发生意外再入,堆芯在再入时被弹出以保证其完全烧毁至足够小的颗粒。相比之下,UO₂熔点接近3 000 °C,在再入大气层的过程中很难被烧毁。因此,UMo燃料使得深空探测热管堆具有更好的发射再入安全性^[21]。

虽然UMo燃料在发射再入时容易烧毁,但在堆芯设计时仍须考虑燃料完好情况下的安全性。图13给出了深空探测热管堆在各种可能发生的发射再入事故下的临界安全计算结果。这些可能事件,包括:①反应堆被水、湿沙或干沙所包围,②堆内空腔进水与否,③反射层掉落与否。结果表明,热管堆在掉入含水量40%的湿沙中,且堆芯进水、所有反射层均掉落时,其keff达到最大值0.975,满足不超过0.98的限值。

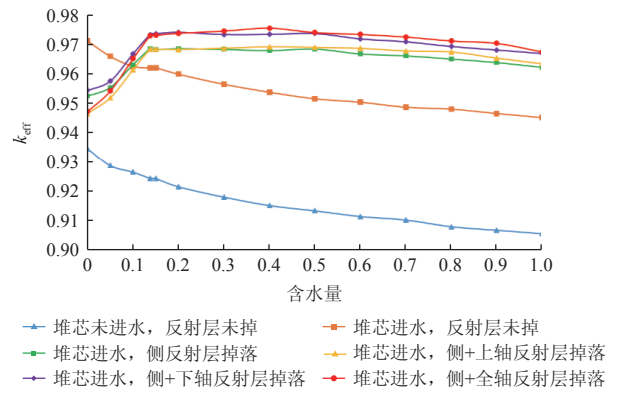


图13 热管堆再入临界安全计算结果

Fig. 13 Reentry criticality calculation results of heatpipe reactor

4 结论

深空探测是中国未来空间任务重要的发展领域,对能源系统提出了轻质、长寿命的要求。热管堆电源是目前最具可实现性的能源方案。对深空探测热管堆进行方案研究,得出如下结论。

1) UMo不仅具有很高的铀密度,还具备足够的高温力学性能和辐照稳定性,用于深空探测热管堆可有效减小系统尺寸和质量。相比于一般空间堆,块状UMo堆芯具有更大的燃料负温度系数和更好的固有安全特性;此外,UMo熔点远低于陶瓷燃料,在发射再入事故时更容易实现烧毁解体,因此具有更好的再入临界安全特性。

2) 在UMo的适宜运行温度下,Na热管具有最好的传热性能,热管布置于燃料内部,与燃料的集成方式可选择钎焊或LID。

3) 由于斯特林转换技术尚未成熟,且其理论设计寿命无法满足如太阳系边际探测等超远深空探测任务需求,目前选择在深空探测领域已具备大量成功经验的静态温差转换作为深空探测热管堆的转换方式。在UMo的适宜运行温度下,HH具备较好的转换效率,且具有很好的研究基础。

4) 简单的控制策略有助于实现电源的长寿命。对于深空探测热管堆,提出了可燃毒物控制和数种创新型提升堆芯负温度系数的控制策略,均属于非能动的被动控制策略,无需主动控制系统干预。

参考文献

- [1] 王颖,朱安文,刘飞标,等.超远深空探测任务的能源动力方案[J].深空探测学报(中英文),2020,7(2):213-220.
WANG Y,ZHU A W,LIU F B,et al.Ultra deep space exploration mission and power project[J].Journal of Deep Space Exploration,2020,7(2):213-220.
- [2] 吴伟仁,于登云,黄江川,等.太阳系边际探测研究[J].中国科学:信

- 息科学, 2019, 49(1): 1-16.
- WU W R, YU D Y, HUANG J C, et al. Exploring the solar system boundary[J]. SCIENTIA SINICA Informationis, 2019, 49(1): 1-16.
- [3] 苏著亭, 杨继材, 柯国土. 空间核动力[M]. 上海: 上海交通出版社, 2016.
- [4] GIBSON M A, MASON L, BOWMAN C, et al. Development of NASA's small fission power system for science and human exploration[C]//Proceedings of 12th International Energy Conversion Engineering Conference. Cleveland, USA: [s. n.], 2014.
- [5] HOUTS M, POSTON D, RANKEN W. Heatpipe space power and bimodal systems[C]//Proceedings of 31st Joint Propulsion Conference and Exhibit. San Diego, USA: [s. n.], 1995.
- [6] POSTON D I. The Heatpipe-Operated Mars Exploration Reactor(HOMER)[C]//Proceedings of Space Technology and Applications International Forum. Albuquerque, USA: [s. n.], 2001.
- [7] POSTON D, KAPERINICK R, GUFFEE R. Design and analysis of the SAFE-400 space fission reactor[C]//Proceedings of Space Technology and Applications International Forum. Albuquerque, NM, USA: [s. n.], 2002.
- [8] EL-GENK M S, TOURNIER J M. Conceptual design of HP-STMCs space power system for 110 kW[C]//Proceedings of Space Technology and Applications International Forum. Albuquerque, USA: [s. n.], 2004.
- [9] MASON L, GIBSON M, POSTON D. Kilowatt-class fission power systems for science and human precursor missions[C]//Proceedings of The Nuclear and Emerging Technologies for Space Conference. Albuquerque, USA: [s. n.], 2013.
- [10] POSTON D I, GODFROY T, MCCLURE P R, et al. KiloPower project—KRUSTY experiment nuclear design: LA-UR-15-25540[R]. Los Alamos, USA: Los Alamos National Laboratory, 2015.
- [11] GIBSON M, POSTON D, MCCLURE P, et al. The Kilopower Reactor Using Stirling Technology (KRUSTY) nuclear ground test results and lessons learned[C]//Proceedings of International Energy Conversion Engineering Conference. Cincinnati, USA: [s. n.], 2018.
- [12] MCCLURE P, POSTON D, GIBSON M, et al. KiloPower space reactor concept – reactor materials study: LA-UR-14-23402[R]. Los Alamos, USA: Los Alamos National Laboratory, 2014.
- [13] 贾建平. 混合堆背景下铀钼合金燃料材料的设计与制备技术研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2013.
- [14] REST J, KIM Y S, HOLMES G L, et al. U-Mo fuels handbook: ANL-09/31[R]. Argonne, USA: Argonne National Laboratory, 2006.
- [15] AMIRI B W, SIMS B T, POSTON D I, et al. A stainless-steel, uranium-dioxide, potassium-heatpipe-cooled surface reactor[C]//Proceedings of Space Technology and Applications International Forum. Albuquerque, USA: [s. n.], 2006.
- [16] CHAIKEN M, GIBSON M, SANZI J. Heat pipe development for space fission demonstration missions[C]//Proceedings of Nuclear and Emerging Technologies for Space. [S. l.]: Oak Ridge National Laboratory, 2021.
- [17] LEWANDOWSKI E J, DOBBS M W, ORITI S M. Advanced stirling radioisotope generator EU2 anomaly investigation[C]//Proceedings of 14th International Energy Conversion Engineering Conference. Salt Lake City, USA: [s. n.], 2016.
- [18] ROWE D M. Thermoelectrics handbook[M]. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2006.
- [19] 柏胜强, 廖锦城, 夏绪贵, 等. 同位素温差电池用高效热电转换材料与器件研究进展[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(6): 525-535.
- BAI S Q, LIAO J C, XIA X G, et al. Research progress of thermoelectric materials and devices for radioisotope thermoelectric generators[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(6): 525-535.
- [20] POSTON D, MCCLURE P, GIBSON M, et al. Thermal power scaling of the kilopower space reactor[C]//Proceedings of the Nuclear and Emerging Technologies for Space Conference. Albuquerque, USA: [s. n.], 2015.
- [21] 胡古, 赵守智. 空间核反应堆电源技术概览[J]. 深空探测学报(中英文), 2017, 4(5): 430-443.
- HU G, ZHAO S Z. Overview of space nuclear power technology[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(5): 430-443.
- 作者简介:
安伟健(1987-), 男, 副研究员, 主要研究方向: 空间核动力。
 通信地址: 北京房山区阜盛西街中核北京科技园综合科研楼(102401)
 电话: (010)69358620
 E-mail: awj1900@163.com
胡古(1978-), 男, 研究员, 主要研究方向: 空间核动力。**本文通信作者**。
 通信地址: 北京房山区阜盛西街中核北京科技园综合科研楼(102401)
 电话: (010)69357485
 E-mail: 13681144067@139.com

Study of a Deep-Space Light-Mass Long-Life Heatpipe Reactor Power Scheme

AN Weijian, HU Gu, GUO Jian, GE Panhe, LIU Jinhong, GE Simiao

(Department of Nuclear Engineering Design, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: To meet the requirement of long-term operation of our country's deep space exploration missions, a passive and highly reliable heat pipe reactor is chosen as the power source. In order to achieve a light mass, UMo with high uranium density, enough high temperature mechanical properties and irradiation stability is selected as the reactor fuel. Na heat pipe with Haynes cladding is chosen for heat transfer. The heat pipes are placed inside the fuel. Brazing or Liquid Interface Diffusion can be used as the integrated method between the heat pipes and the fuel. Static thermoelectric technology, which possesses a long life and rich successful experience, is chosen as the power conversion system. And Half-Heusler with suitable operation temperature and high efficiency is selected as the conversion material. In order to achieve an ultra-long life, a burnable poison control scheme and a variety of creative and passive control schemes to increase the negative temperature coefficient of the core are proposed. The final power scheme is expected to meet the needs of our country's deep space exploration missions.

Keywords: deep space exploration; heat pipe reactor; UMo; static thermoelectric conversion; passive control

Highlights:

- To meet the requirement of long-term operation of our country's deep space exploration missions, a passive and highly reliable heat pipe reactor is chosen as the power source.
- UMo with high uranium density, enough high temperature mechanical properties and irradiation stability is selected as the reactor fuel in order to achieve a light reactor power mass.
- Static thermoelectric technology, which possesses a long life and rich successful experience, is chosen as the power conversion system. And Half-Heusler with suitable operation temperature and high efficiency is selected as the conversion material.
- In order to achieve an ultra-long life, a burnable poison control scheme and a variety of creative and passive control schemes to increase the negative temperature coefficient of the core are proposed.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]