



# 兆瓦级锂冷空间核反应堆电源方案设计与研发进展

吴宜灿<sup>1,5\*</sup>, 刘超<sup>2,4</sup>, 金鸣<sup>2,4</sup>, 陈建伟<sup>2</sup>, 张勇<sup>1</sup>, 吴庆生<sup>1</sup>, 洒荣园<sup>2,4</sup>, 柏云清<sup>1</sup>, 李春京<sup>1</sup>, 蒋洁琼<sup>5,16</sup>, 宋勇<sup>1,5</sup>, 胡丽琴<sup>3</sup>, 王芳<sup>1</sup>, 谈鹏<sup>6</sup>, 翁娜<sup>7</sup>, 江新标<sup>8</sup>, 高扬<sup>9</sup>, 周新贵<sup>10</sup>, 郑友琦<sup>11</sup>, 鹿鹏<sup>12</sup>, 张智刚<sup>13</sup>, 郝祖龙<sup>14</sup>, 殷园<sup>15</sup>

1. 中子科学国际研究院, 青岛 266199;
2. 中子科学(重庆)研究院有限公司, 重庆 401331;
3. 中子科学研究院(合肥)有限公司, 合肥 230001;
4. 安徽中科超核科技有限公司, 合肥 230001;
5. 中国科学院合肥物质科学研究院, 合肥 230001;
6. 中国科学技术大学, 合肥 230026;
7. 上海核工程研究设计院有限公司, 上海 200233;
8. 西北核技术研究院, 西安 710024;
9. 中国科学院空间应用工程与技术中心, 北京 100094;
10. 国防科技大学新型陶瓷纤维及其复合材料重点实验室, 长沙 410073;
11. 西安交通大学核科学与技术学院, 西安 710049;
12. 南京航空航天大学能源与动力学院, 南京 210016;
13. 哈尔滨工程大学核安全与仿真技术国防重点学科实验室, 哈尔滨 150001;
14. 华北电力大学核科学与工程学院, 北京 102206;
15. 深圳大学物理与光电工程学院, 深圳 518060;
16. 山东大学核科学技术研究院, 济南 250012

\* E-mail: [yican.wu@fds.org.cn](mailto:yican.wu@fds.org.cn)

收稿日期: 2023-06-19; 接受日期: 2023-12-05; 网络版发表日期: 2024-02-23

国家重点研发计划项目(编号: 2018YFB1900600)资助

**摘要** 空间核反应堆电源因具有能量密度大、输出功率高、持续时间长、环境适应性强等优势, 是未来大功率长寿命航天任务及深空探测任务能源供应的优选路线. 本文在分析兆瓦级空间堆电源研发需求与选型特点的基础上, 提出并设计了一套兆瓦级小型锂冷空间堆电源技术方案, 该方案采用锂冷反应堆与布雷顿发电系统耦合, 具有轻量化、长寿命等特点. 本文针对该方案梳理了所涉及的关键技术, 介绍了在技术分析论证、相关验证样机和实验平台研制的进展情况, 并在此基础上提出我国未来发展大功率空间堆电源的建议.

**关键词** 空间核反应堆, 锂冷反应堆, 布雷顿发电

引用格式: 吴宜灿, 刘超, 金鸣, 等. 兆瓦级锂冷空间核反应堆电源方案设计与研发进展. 中国科学: 技术科学, 2024, 54: 365–376  
Wu Y C, Liu C, Jin M, et al. Design and R&D of megawatt lithium-cooled space nuclear reactor (in Chinese). Sci Sin Tech, 2024, 54: 365–376, doi: 10.1360/SST-2023-0202

## 1 引言

深空探测对于开发太空资源、研究星系形成与演变、推动空间科学领域的发展以及提高我国的综合国力具有重大意义。近年来我国航天事业快速发展,神舟、嫦娥、天宫等系列航天器取得了举世瞩目的成就<sup>[1]</sup>。随着空间争夺的形势日趋严峻,航天器和航天装备功能和性能要求逐步提升<sup>[2,3]</sup>,对大功率、可靠的能源供给需求也逐步增加。目前,航天器的能源供给主要依靠太阳能、化学能及核能,其中空间核反应堆电源(简称空间堆电源)通过持续的链式裂变反应产生热能,通过耦合热电转换系统,实现电能的供给,具有能量密度高、输出功率大、工作寿命长、有较高自主调节能力、环境适应性强等优势,是未来大功率长寿命航天任务及深空探测任务的优选路线<sup>[4]</sup>。

自20世纪50年代起,美国、苏联等主要核大国开展了大量关于空间核电源的科学研究,在千瓦级空间核电源的研发方面取得重大进展<sup>[5-7]</sup>,并实现了空间应用。

随着深空探索任务的不断深入,对电源的功率需求也相应增加<sup>[8,9]</sup>,进入21世纪,美国实施了电功率200 kW<sub>e</sub>的“普罗米修斯”计划<sup>[10]</sup>;俄罗斯重启了空间核动力发展计划,2009年批准实施兆瓦级空间核动力飞船项目<sup>[11]</sup>;欧盟围绕兆瓦级空间推进飞船支持了MEGAHIT, DiPoP, DEMOCRITOS等3个项目的发展<sup>[12,13]</sup>。

兆瓦级空间反应堆的应用目标是提供地月、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<sup>[14,15]</sup>。本文针对空间任务需求,给出了兆瓦级锂冷空间堆设计方案,对设计思路和理念进行了重点阐述,给出了部分关键部件设计方案,介绍了验证样件和样机的研制和试验测试进展情况,同时,针对本文设计方案所涉及的技术选型与参数要求,结合国内外相关技术的发展现状,分析了关键技术的研发需求和重点方向,最后给出了未来发展思路与建议。

## 2 设计思路与选型

空间堆主要由反应堆、屏蔽系统、发电系统和散热系统构成。其中,反应堆及发电系统存在显著的选型

关联性,是设计选型的关注重点。

反应堆部分主要采用的冷却方式选项有液态金属回路冷却(液态钠、钠钾合金或锂为工质)、惰性气体冷却(氦气或氦-氘混合气体为工质)和热管冷却(液态钠、钠钾合金或锂为工质)。其中,液态金属回路冷却方式的发展时间最长、型号最多,已公开报道的19个开展过工程研制或空间应用的空间堆电源方案中有12个采用液态金属回路冷却方式<sup>[16]</sup>,其具备优良的冷却性能,且一般由电磁泵驱动,运行压力低,系统有足够高的可靠性。惰性气体冷却最大的优势是可以结合二回路发电,整体系统构造简单,但相比液态金属,其冷却能力较弱,运行压力大,堆芯体积较大,屏蔽也相应较重,例如欧洲MEGAHIT项目<sup>[12]</sup>同时设计对比过上述两种堆型,锂冷方案和气冷方案在反应堆部分的质量分别为1.1和4.0 t,液态金属回路冷却方式的堆系统在重量上有显著优势。对于热管冷却堆来说,热管可靠性高,特别是可以对抗单一故障,是20世纪以来关注的热点<sup>[17]</sup>,但传热能力有限,对于百千瓦以上的大功率空间堆来说重量劣势较大。

空间核电源采用的热电转换方式选项主要有斯特林、布雷顿、温差、热离子等方式<sup>[18,19]</sup>。其中,属于静态热电转化的温差和热离子效率过低,就目前技术,系统的热电转化效率一般不超过10%,如应用于大功率型号,则必须设计更大的堆芯热功率,将直接导致堆芯体积、屏蔽质量、辐射散热器质量的大幅上升,虽然减少了动部件,但却带来整个系统总质量的极大上升,一般不予考虑。自由活塞斯特林的单机功率则相对较低,质量比功率也不随着功率增加而显著提升,更适合于百千瓦级空间堆。布雷顿的热电转换效率高且热端温度适中,现有材质即能满足热端能够达到高效率的高温要求,满足大功率需求,此外,当与气冷反应堆耦合时,可将一二回路合二为一,简化整体系统。此外,碱金属热电(AMETC)、磁流体虽具备较高的理论效率,但技术成熟度低<sup>[14]</sup>。目前来看,布雷顿发电方式是兆瓦级空间核电源热电转换需求的最佳选择,是国际上各项目的最主要选项<sup>[10-12]</sup>。

此外,空间堆屏蔽体普遍采用影子屏蔽形式,通过中子慢化与吸收材料(如LiH或B<sub>4</sub>C等)及 $\gamma$ 屏蔽材料(如钨或贫铀)组合实现。散热系统选型较为统一,除俄罗斯提出的液滴式之外,几乎均为热管-翅片的辐射散热系统。

经过上述分析, 适用于兆瓦级大功率空间堆候选类型主要为两个方向: 一个是液态金属冷却耦合二回路布雷顿发电; 另一种则是气体冷却堆直接布雷顿发电. 由于两者发电方式一致, 因此发电效率、可靠性水平差别很小(系统失效主要由发电和辐射散热系统故障导致). 主要差别则在于前者相比后者, 具有更小的堆芯和屏蔽质量, 但是会额外增加主换热器、电磁泵等设备.

针对前一技术路线中的液态金属堆“额外增加”的设备, 本文提出了屏蔽换热一体化的总体布置思路(见图1), 通过设计钨合金的板式换热器, 充分利用换热器自身材料的屏蔽效果, 通过适形设计置于反应堆后端的影子屏蔽中, 既满足回路换热, 又兼具 $\gamma$ 屏蔽功能, 实现了不提升重量前提下将紧凑液态金属锂冷堆芯一回路与高温气体二回路耦合, 使系统同时具有液态金属堆芯紧凑轻量化和布雷顿循环高效的特点.

对于液态金属冷却剂的选择, 常用的有锂、钠、钠钾等. 为了实现更高的性能指标, 设计方案选择锂为反应堆冷却剂. 其具备较强的传热能力, 比热容是钠钾等其他候选液态金属的3~5倍, 在同样的温差下能够携带更多的热量, 使堆芯更加紧凑, 且其沸点高(物性对比详见表1), 可单相运行在1600 K以上, 具备实现更高发电效率的潜力.

基于上述分析, 本文选择液态金属锂冷堆耦合布雷顿发电技术路线.

### 3 方案设计与验证

#### 3.1 总体设计方案

空间堆电源主体为锥形结构, 从前到后分别布置液态金属锂冷反应堆、影子屏蔽系统、布雷顿循环发电系统、配套系统、辐射散热系统, 主体结构设计如图2所示.

反应堆为液态金属锂冷堆, 采用高富集度UN燃料, 设计了反应性调节和补偿系统, 堆芯进出口温度分别为1400和1550 K. 热电转换系统采用氦-氙布雷顿循环发电机组, 发电功率为1.55 MW, 电源净电功率为1.5 MW, 系统运行设计寿命 $\geq 10$ 年.

影子屏蔽系统由 $B_4C$ 、W-Re换热器及LiH交替布置而成, 采用扇形阴影屏蔽, 整体置于反应堆堆芯之后.

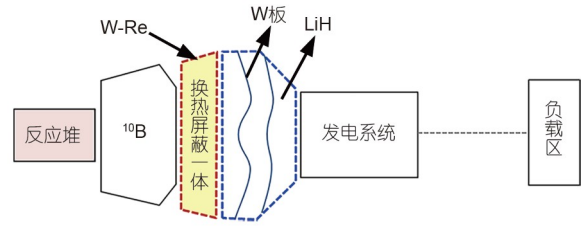


图1 (网络版彩图) 换热屏蔽一体化原理图

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of integration of heat exchange and shielding.

表1 锂和钠钾物理性质对比

Table 1 Comparison of physical properties between lithium and sodium-potassium

物理性质	锂	钠钾
密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	491	754
比热容 ( $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$ )	4170	873
热导率 ( $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ )	54.1	26
熔点 (K)	453	260
沸点 (K)	1615	1058

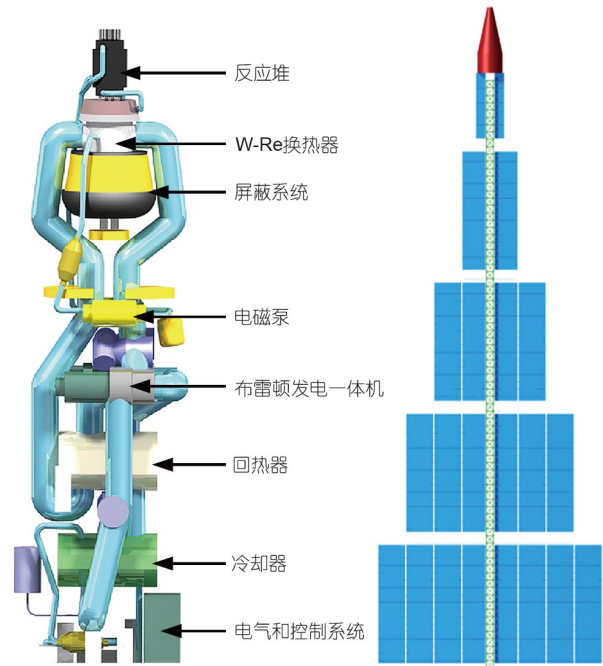


图2 (网络版彩图) 锂冷却反应堆系统结构图

Figure 2 (Color online) Structure of the lithium-cooled nuclear reactor.

热传输系统如图3所示, 堆芯出口温度为1550 K, 一回路布置压力控制装置和气液分离器, 采用两台串

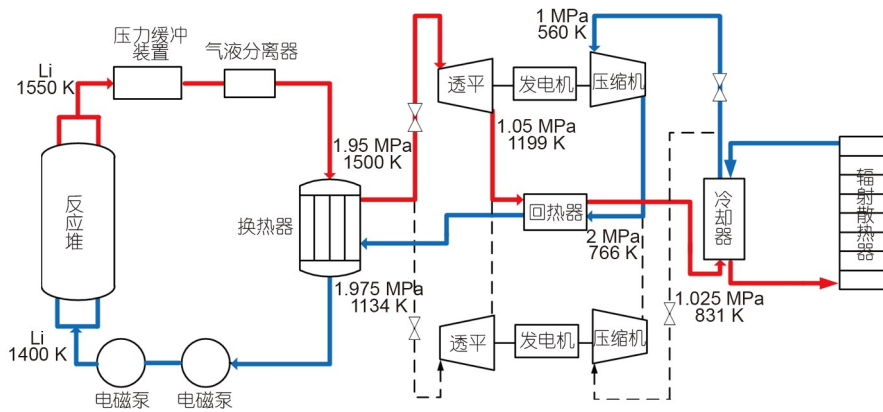


图3 (网络版彩图)空间堆热力循环图  
Figure 3 (Color online) Thermodynamic cycle of the space reactor.

联的电磁泵静态驱动, 通过W-Re板式换热器将热量传递给二回路, 其中电磁泵置于屏蔽系统之后。

发电系统采用氦氙布雷顿闭式循环, 透平进口温度为1500 K, 考虑总体可靠性要求, 采用两台发电机组一用一备的方式运行。气体进入透平膨胀做功, 之后通过回热器进行回热, 再通过三回路将热量传递至辐射散热系统, 最终通过压缩机进行循环驱动, 经过压缩后的气体在回热器处进行加热后回到透平。为了降低系统总重, 考虑到辐射散热温度与绝对温度的4次方成正比, 因此适当提升了辐射散热温度, 即可大幅降低辐射散热系统重量, 但这也带来了一定发电效率的损失。在综合优化后, 设计了压缩机进口温度为560 K, 压比为2.0, 发电系统循环效率为25.79%。主要设备按照布雷顿发电一体机、回热器、冷却器的顺序沿轴线向后排开。

辐射散热系统采用双面的汞+钾热管-翅片辐射散热结构, 通过三回路循环将二回路发电废热传递至热管。主体结构采取可折叠式的结构, 沿支撑轴方向分五级折叠, 每一级本身散热片也能折叠(见图4), 折叠后的系统发射长度为12 m、直径为4.4 m, 易于火箭装载发射。

空间堆电源系统总体参数与主要部件和系统的总体设计选项、核心参数如表2所示。

方案中为了实现轻量化, 针对部分关键部件, 提出了多项轻量化思路, 设计了一体化堆芯、预储能反应性补偿、金属内衬SiC<sub>f</sub>/SiC复合管道等部件(具体将在下一节介绍), 实现了兆瓦级锂冷空间堆系统总体减

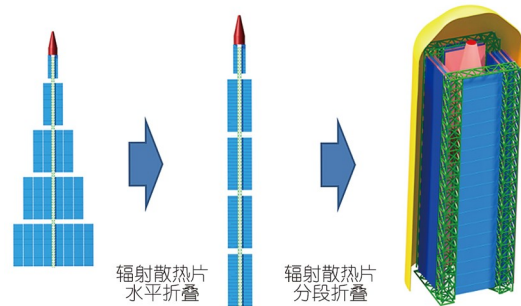


图4 (网络版彩图)运行和发射时的总体布局  
Figure 4 (Color online) Overall layout during operation and launch.

表2 设计选项及总体参数  
Table 2 Design options and overall parameters

系统	设计选项	选型
反应堆	堆型	快堆
	燃料类型	UN
	热功率	6 MW <sub>t</sub>
	冷却剂类型	液态金属锂
	进出口温度	1400 K/1550 K
屏蔽	屏蔽形式	影子屏蔽 换热屏蔽一体化
	发电方式	He-Xe布雷顿循环
发电系统	热电效率	25.8%
	净输出功率	1.5 MW <sub>e</sub>
	透平入口温度	1500 K
	散热系统	散热形式 热管
运行寿命	-	10年

重, 总重量约7866 kg, 具体分布见表3.

### 3.2 关键部件设计与验证

锂冷反应堆堆芯设计中为增加燃料份额, 减少堆芯尺寸和体积, 采用了一体化燃料元件和内冷却流道设计. 堆芯活性区由蜂窝状UN燃料基体和锂冷却剂流道、反应性控制系统(预储能补偿结构、调节棒)等组成. 锂冷却剂流道管在UN基体中呈三角形排布, 采用单相液态锂在管内流动进行热传输. 流道管直径沿堆芯径向从内到外逐渐减小, 以降低径向功率峰因子, 此外, 不同孔径流道还可以实现流量分配, 最大限度降低流道管的峰值温度, 如图5所示. 通过开展ZrN模拟氮化物燃料加工工艺与性能研究, 制备了具备多个不同直径内孔的ZrN芯块(见图6), 开展了芯块轴向抗压强度测试, 平均轴向抗压强度为760.5 MPa. 该样件研制与测试结果初步证明了多孔氮化铈芯块工艺的可行性.

堆内布置有两根控制棒实现反应性调节功能, 并针对长周期运行的反应性补偿设计了堆内预储能反应性补偿机构. 该方案充分考虑空间堆运行特性—即反应性补偿机构全寿期内无复原需求, 通过在堆内布置“一次性”的反应性引入机构, 避免了传统转鼓机构实现大反应性补偿需要增厚反射层的弊端, 实现堆芯尺寸的大幅减小. 预储能反应性补偿机构的执行元件由下方的弹簧和活塞组成, 通过电加热熔化出口密封材料, 利用弹簧将内部填充的碳化硼吸收体顺利推出通道, 实现反应性补偿. 针对性研制了预储能反应性补偿机构原理验证样件, 通过开启功能的电流熔断, 试验实现了吸收体元件弹出功能, 初步验证了机构的原理可行(如图7和8所示).

基于上述理念和技术设计的反应堆主要参数如表4所示.

采用自主研发的TopMC (原大型核设计与安全评价软件系统SuperMC的升级拓展版本)<sup>[20]</sup>进行了反应堆堆芯物理和辐射屏蔽三维计算与分析. 堆芯初始 $k_{\text{eff}}$ 为1.12, 10年反应性燃耗损失~9800 pcm, 寿期初轴向功率峰因子为1.205, 径向功率峰因子为1.198, 燃料包壳最高温度不超过1650 K, 燃料芯块最高温度不超过1840 K. 满功率运行10年之后, 载荷处的中子总注量达到 $5.11 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2$ , 光子总剂量为 $2.85 \times 10^4 \text{ Rad}$ , 低于限值要求.

表3 空间堆系统总重量评估

Table 3 Total weight evaluation of the space reactor system

系统名称	重量 (kg)
堆芯及一回路	656
屏蔽体	1267
发电系统	2660
辐射散热系统	2759
其他	524
总重	7866

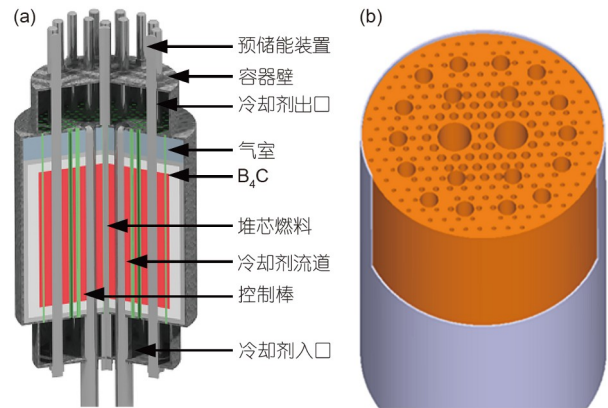


图5 (网络版彩图)反应堆堆芯结构图. (a) 堆本体结构; (b) 一体化燃料

Figure 5 (Color online) Reactor core structure. (a) Reactor body structure; (b) integrated fuel.

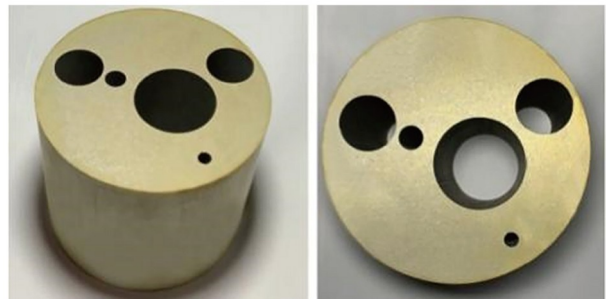


图6 (网络版彩图) ZrN芯块样件

Figure 6 (Color online) ZrN pellet sample.

二回路的发电效率与管道中的流阻相关性很大, 为了降低流阻则必须增加管径, 而这将直接导致管道厚度、弯曲布置难度和总质量的大幅上升. 因此, 管道采用了轻量化的 $\text{SiC}_f/\text{SiC}$ 复合材料包覆镍合金管道, 既保持管道在高温高压环境下的结构强度, 又通过低

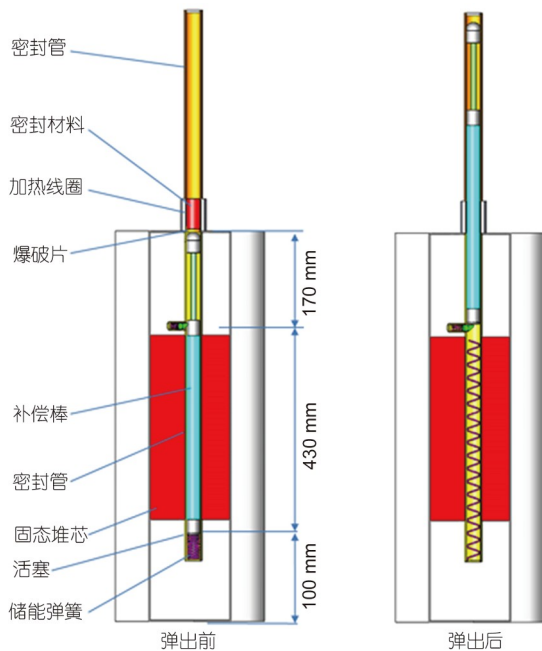


图 7 (网络版彩图)预储能反应性补偿机构原理图  
Figure 7 (Color online) Schematic of pre-energy-stored reactivity compensation mechanism.

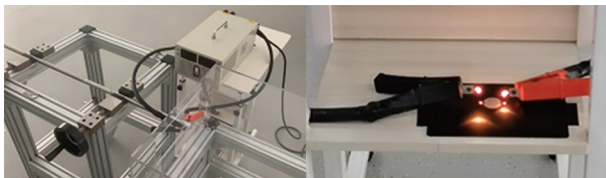


图 8 (网络版彩图)预储能反应性补偿机构样机  
Figure 8 (Color online) Prototype of pre-energy-stored reactivity compensation mechanism.

表 4 堆芯主要设计参数

Table 4 Main design parameters of the reactor core

类型	设计值
功率 (MW <sub>t</sub> )	6
堆芯进出口温度 (K)	1400/1550
燃料类型	93% UN
装料量 (kg)	215
初始 $k_{eff}$	1.12
最大/最小流道直径 (mm)	11/8
流道数	221
反应堆高度/直径 (mm)	530/490

密度SiC<sub>f</sub>/SiC复合材料实现系统减重的设计目标. 为验证该设计, 制备出长度大于1 m的金属铌内衬的

SiC<sub>f</sub>/SiC复合材料管件(见图9), 测试表明管件平均拉伸强度达到150.7 MPa<sup>[21]</sup>, 探索并初步验证了具备减重作用的双层复合管的加工工艺及其可行性.

辐射散热器由三回路以及汞热管、钾热管组成的可折叠式伞状结构辐射散热板. 图10为辐射散热器的回路示意图, 主回路沿中间支撑柱方向布置, 在电磁泵的驱动下回路介质在传输回路内循环. 分支回路介质将热量传给热管蒸发段, 然后由热管冷凝段将热量传递给外部的翅片, 高温翅片通过辐射散热把热量辐射排出.

### 3.3 集成原理样机验证

针对锂冷空间堆系统的关键设备、锂冷主回路与布雷顿发电耦合运行验证以及高温材料耐腐蚀性能试验等实验需求, 研制了锂冷空间堆系统集成原理实验样机(见图11).

集成原理实验样机主要包含锂冷一回路和氦氘布雷顿循环二回路, 一回路采用≥100 kW的电加热器模拟堆芯加热, 设计最高温度≥1500 K, 通过电磁泵驱动锂循环, 一二回路间采用板式换热器进行热量交换, 二回路设计氦氘透平进行发电, 最终通过水冷散热器将最终热量排出. 目前已开展系统集成运行试验, 包括一回路锂冷循环、一二回路耦合换热、闭式布雷顿系统发电等测试, 初步实现了锂冷空间堆耦合布雷顿



图 9 (网络版彩图)金属内衬SiC<sub>f</sub>/SiC复合材料薄壁管样件  
Figure 9 (Color online) Metal lined SiC<sub>f</sub>/SiC composite thin-walled pipe sample.

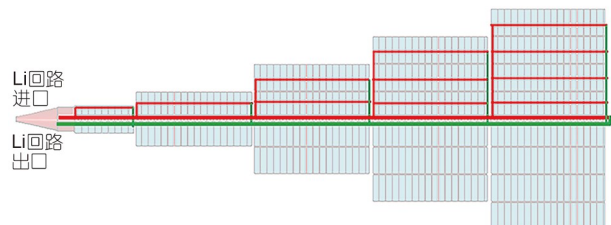


图 10 (网络版彩图)辐射散热系统  
Figure 10 (Color online) Radiator system.



图 11 (网络版彩图) 锂冷空间堆系统集成原理实验样机  
Figure 11 (Color online) Integrated experimental of lithium-cooled space nuclear reactor.

发电的原理性验证。此外, 还开展了铝合金材料在高温锂环境下的腐蚀试验。

## 4 关键技术

针对上述设计方案, 梳理了方案涉及到的燃料、高温材料、反应堆、热电转换等各系统与技术的性能指标要求, 结合对应技术方向国际最新的研发进展情况与国内技术水平, 本节将分析方案关键技术的可行性, 并给出未来我国针对本文提出的兆瓦级锂冷空间堆需开展的关键技术研发方向和研究重点。

### 4.1 锂冷堆堆本体及屏蔽技术

本项目采用的氮化物燃料在物理、传热和力学性能等方面具备一定优势。虽然我国多个单位开展了粉末真空热压烧结等氮化物芯块制备工艺研究<sup>[22]</sup>, 但总体来说还在起步阶段。国际上俄罗斯进展较快, 氮化物芯块已经在BOR-60和BN-600中开展了辐照验证, 最大达到9.0 at%的燃耗和107.6 dpa的辐照剂量<sup>[23]</sup>, 并被国际首个在建的第四代反应堆BREST-OD-300采用<sup>[24]</sup>。本方案采用的氮化物多孔燃料的烧结、加工等制备工艺研发是实现应用的关键, 此外, 燃耗性能、氮气和裂变气体的释放等也是需要开展辐照试验验证的重点。

锂冷反应堆涉及高温, 堆芯结构材料拟选取耐高温难熔金属Mo-Re合金。由于金属Re价格昂贵, 在Mo-Re合金应用领域, 国内外相关的研究相对有限。目前, 已经研究证明粉末冶金法<sup>[25]</sup>具备批量生产Mo-Re合金坯锭的能力, 坯锭经进一步处理可以获得Mo-Re合金

棒材、管材、板材等多种型材, 但需进一步解决合金杂质含量偏高等问题<sup>[26]</sup>, 目前国内已有多家单位试制<sup>[27]</sup>。Mo-Re合金由于具有较高的熔点和韧脆转变温度以及较脆的晶界, 焊接难度大, 前期已有不同焊接工艺的研究<sup>[28]</sup>, 目前真空电子束焊接研究相对较多。未来管材及板材的加工与焊接工艺是需要研发的重点, 高温碱金属环境下的结构材料耐腐蚀、抗辐照等性能需要进一步实验验证。

Mo-Re中的Mo与UN存在高温相容性问题, 可以通过在Mo-Re与燃料间增加金属Re层解决该问题, 例如SP100设计了Re/PWC11双层金属复合结构包壳<sup>[29]</sup>。双层金属复合管制备工艺较多, 如冷成型法、热成型法、离心铸造法、离心铝热剂法、爆炸焊成型法等均已不同领域广泛应用。未来需要针对难熔合金Mo-Re/Re双层管开展制备工艺研发与性能验证测试。

作为空间应用的反应堆, 其在发射过程中存在事故跌落可能, 因此需在各类工况下保证临界安全<sup>[30]</sup>, 特别应避免在跌落水、沙中由于产生较强的慢化效应而导致反应性增加的问题, 其中涉及到计算分析、物理验证、谱移吸收材料等技术。

针对辐射屏蔽的中子慢化和吸收剂选用了LiH。该材料已在实际空间堆上应用<sup>[29]</sup>, 但由于在辐照下易分解、低温易肿胀, 需要结合B<sub>4</sub>C使用, 并进行温控设计。

### 4.2 液态锂回路技术

一回路锂电泵运行在1400 K下, 常规铁芯材料在高温下导磁性迅速下降, 严重影响电磁泵效率, 目前国内研制和应用的电磁泵主要针对相对低温的系统。为解决此问题, 设计了圆柱型感应电磁泵, 通过增加来源于三回路的冷却液冷却电磁线圈和铁芯, 以降低局部温度。该方案首先由NASA针对液态金属朗肯循环的空间堆开发, 可提供1422 K流动的锂的驱动<sup>[31]</sup>, 是目前超高温电磁泵研发的主要方向。

锂流过堆芯时会在中子辐照下产生氦气, 长期堆积会影响换热和流动, 通过利用离心结构气液分离器进行分离<sup>[30]</sup>是一种非能动、高可靠的方式。但是, 国内外对其相关的试验非常有限, 实施的关键在于重力会显著影响其运行特性, 因此, 需要发展通过空间站、坠机条件等无重力环境以及考虑替代介质开展试验验证的技术。

单相锂在一回路内运行必须经过稳压,通过波纹管 and 弹簧结合,可以实现不同温度下锂膨胀体积变化的吸收及压力的非能动控制,其关键在于发展具备高可靠性Mo-Re波纹管 and 耐高温弹簧技术。

### 4.3 高效热电转换技术

布雷顿一体机是热电转化系统的核心部件,在传统领域使用的压缩机和透平重量偏大,布雷顿一体机的轻量化技术是发展重点。目前美国在普罗米修斯计划中,利用前期BRU项目的研究成果设计的200 kW一体机为93 kg<sup>[10]</sup>,在NASA的火星飞船动力中设计的270 kW的一体机为55 kg<sup>[32]</sup>。我国陆上核电站用布雷顿一体机已有较好基础,以HTR-10为背景已经研制成功2.2 MW氦气透平压气机组,HTR-10和HTR-PM的主氦气风机已经在反应堆上运行<sup>[33]</sup>,针对空间应用,航天科技集团六院八〇一所2023年成功实现了基于氦氖布雷顿百千瓦内电功率输出<sup>[34]</sup>。围绕高温运行需求,我国已经研制具有自主知识产权的第三代单晶高温合金<sup>[35]</sup>,结合采用叶片冷却流道、气动轴承等技术可延长使用寿命。对于高速永磁发电机,其在燃气轮机等其他形式的布雷顿循环中已有成熟应用,但由于冷端条件的不同,基于钕钴永磁体的使用温度还有待拓展。总的来说,发展轻量化、耐高温、高可靠的布雷顿发电一体机是大功率空间堆领域的最为关键的技术和难点之一。

此外,为了提高整体系统的热电循环系统的效率,对透平和压缩机的内效率以及管道、阀门和换热器、回热器的流阻也提出了较高要求。

### 4.4 大功率废热排放技术

本方案采用了汞热管和钾热管结合的方式提升辐射散热温度以应对大功率的废热排放。钾热管作为碱金属热管的一种,在国内外均有较多试验经验,汞热管国际上有一些成功案例<sup>[36,37]</sup>,但国内还未见试验报道。发展轻量化、高载热性能的汞热管和钾热管是实现空间堆电源整体减重的重要研发方向。

针对辐射散热片的应用需求,设计了C-C翅片。NASA已研制成功1 mm厚C-C复合材料,并实现与金属热管的集成<sup>[38]</sup>,国内的C-C复合材料已经在喷管喉衬、飞机刹车片等领域应用,但薄膜化工艺的经验非常有限。后续应发展高热导、高强度的C-C薄膜化加

工制备工艺,研发翅片与金属热管的焊接技术。

### 4.5 系统自主运行技术

现有无论是在运核电,还是拟建设的下一代核电均未实现自主控制应用<sup>[39]</sup>,而空间反应堆需具备连续、远程、无人值守运行能力,必须依赖自主控制系统进行运行,因此,需发展自适应控制、智能控制方法技术,建立数字仿真堆,开展仿真系统的自主运行试验。

在单项技术发展的基础上,应建立地面模式堆,通过在地面模式堆上的运行和测试,进一步验证自主控制技术。

### 4.6 空天环境试验验证技术

针对空间堆电源发射和在轨应用环境的特殊性,需开展模拟环境的试验,主要包括真空环境、热环境、发射时加速度和振动环境、电磁环境、等离子体环境、粒子和射线引发的电离辐射环境、微流星及轨道碎片等<sup>[40]</sup>。应充分利用航天体系已有环境试验平台以及“天宫空间站”等太空试验条件,同时,根据型号需要,补充部分实验台架和条件,特别是涉及大尺寸、高温和辐射场等核电源特殊特征的试验环境。

## 5 总结与展望

大功率长周期的航天任务对能源供给提出了新的需求,能量密度高、输出功率大、工作寿命长、自主调节能力强、环境适应性强是空间核反应堆电源的重要优势。相对应地,空间核反应堆电源在设计、建造、运行维护等方面也存在许多新挑战,需要满足其固有安全性、轻量化和长寿期等要求。本文提出了换热屏蔽一体化的总体布局思路,充分利用钨合金的换热器自身材料的屏蔽效果,使系统兼具液态金属堆芯小型轻量化和布雷顿循环高效的特点;通过设计一体化燃料元件和预储能反应性补偿机构实现紧凑的锂冷堆芯,进而带动反应堆及屏蔽的质量减小;利用辐射散射能力与温度四次方成正比的特征,设计高温辐射散射系统,大幅降低辐射散热面积;设计的一回路锂冷系统无持续动部件,二回路的布雷顿发电一体机采用一用一备模式,显著增加系统的可靠性。结合上述设计理念,本文给出了兆瓦级液态锂冷反应堆耦合布雷顿循



环发电系统方案,电功率为1.5 MW,发射重量为7.866 t,设计寿命10年,可满足大功率空间能源供给与推进应用需求.此外,针对关键部件研制了样件开展测试验证,并建成了锂冷空间堆系统集成原理样机,完成了该方案的原理性验证.该实验装置也可为未来其他高温环境锂冷系统的各类试验、测试提供重要平台.

液态金属冷却反应堆性能优、我国的研发经验丰富,本文提出液态金属堆耦合气体布雷顿发电方案,应是我国兆瓦级大功率空间反应堆发展的重要方向.不过,该方案研发是个复杂且长期的过程,相关技术的研究单位众多但发展力量不够聚焦,我国如何奋起直追和实现工程应用是摆在我国空间堆技术研究人员面前的重要课题,对此,我们形成了一些初步思考和建议.

(1) 空间堆各项指标要求严格,应进一步对轻量化、耐高温、高可靠性等开展关键技术方面的研究.梳理了锂冷反应堆、液态锂回路、高效热电转换、大功率废热排放等关键技术,需要在现有技术基础上进一步轻量化.并且,运行温度高,且无法人为维护,对部件的耐高温和高可靠性提出更高要求,这也需要相应的材料、控制等基础研究的支持.此外,空间堆是核能与航天领域的结合,其中一些问题涉及到交叉科学,例如反应堆受到航天环境的影响,航天器受到反应堆带来的辐射问题等,未来应更重视其交叉部分的科学和技术的研究.

(2) 空间堆关键技术覆盖范围广,应在国内进一步扩大空间反应堆研发队伍,建立一个自主创新的空间堆行业体系.大功率空间反应堆由于重量和性能要求高,各领域传统的成熟技术往往无法直接应用,目前,在本研究开展过程中,初步形成了一支涉及十多个单位的锂冷技术、高温材料、轻量化设备、热电转换技

术、智能控制及仿真技术的团队.但是在研究过程中仍然可以感觉到,针对部分关键技术研究布局的细致程度和覆盖面距离工程示范还有一定差距.因此,在现有基础上,应针对方案所需进一步扩大队伍,更广泛地吸纳具有较好专项技术基础的团队,共同建设并完善空间堆研发体系.除研究团队以外,未来空间堆领域应重视上下游供应链工业体系,避免闭门造车,应关注产生的新材料、新技术如何反哺研制单位,形成一个注重创新发展的行业体系.

(3) 争取有利时机,针对深空探测需求,加大国家针对空间反应堆的规划布局和引导.空间反应堆的研发是个复杂且长期的过程,后续的研发耗资大、周期长.考虑到我国兆瓦级空间堆的实际应用需求预期在2035~2050年左右,因此建议国家层面上加大与空间堆耦合的航天任务部署力度,明确空间堆在深空探测战略发展中的地位和作用,一方面做好对行业和技术发展的规划,给予适当引导,建议其纳入国家的中长期规划,另一方面,应针对型号方案的研发进行布局,采取开放竞争与合作模式,例如可以采用“揭榜挂帅”等创新机制方式加强国内优势研发力量的聚焦.

我国正处于加快建设航天强国的新时期,未来计划开展载人登月、小行星探测、飞越木星、太阳系边际等深空探索任务,空间反应堆都将发挥重要战略作用.目前,我国空间堆研发基础虽然相比美国、俄罗斯等国家还有一定差距,但相信通过协调国内优势资源和技术,可尽早实现空间反应堆的示范应用.本文提出的兆瓦级空间堆方案,可作为我国发展航天计划的一条技术路径.此外,方案中提出的系列创新思路,也希望为其他小型特种核反应堆系统提供一些启发与参考.

**致谢** 感谢凤麟核团队为本工作的顺利开展提供的支持与帮助.

## 参考文献

- 1 Chen X, Zheng Y. China Space Launch statistics and analysis (in Chinese). *Aerospace China*, 2022, 4: 41–47 [陈斌, 郑勇. 中国航天发射任务的统计与分析. *中国航天*, 2022, 4: 41–47]
- 2 Zhou B. Research on space nuclear reactor power demand analysis (in Chinese). *Atomic Energy Sci Technol*, 2020, 54: 1912–1923 [周彪. 空间核反应堆电源需求分析研究. *原子能科学技术*, 2020, 54: 1912–1923]
- 3 He K Y, Chen Z L, Yan F Z. Application and demand of space nuclear reactor (in Chinese). *Chin J Power Sources*, 2020, 44: 142–144 [贺克羽,

- 陈章隆, 闫锋哲. 空间核反应堆电源的应用与需求. *电源技术*, 2020, 44: 142–144]
- 4 Zhu A W, Liu L, Ma S J, et al. An overview of the use and development of nuclear power system in deep space exploration (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2017, 4: 388–404 [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: 388–404]
  - 5 Gibson M, Schmitz P. Higher power design concepts for NASA's Kilopower reactor. In: *Proceedings of the IEEE Aerospace Conference. Big Sky*, 2020
  - 6 NASA. *NASA Technology Roadmaps-TA3: Space Power and Energy Storage*. NASA Technical Report, 2015. 5–7
  - 7 Shu Z T, Yang J C, Ke G T. *Space Nuclear Power* (in Chinese). Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2016 [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]
  - 8 IAEA. *The Role of Nuclear Power and Nuclear Propulsion in the Peaceful Exploration of Space*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2005
  - 9 El-Genk M S. Deployment history and design considerations for space reactor power systems. *Acta Astronaut*, 2009, 64: 833–849
  - 10 Berdge W, Waston A. *Space Nuclear Power Plant Pre-Conceptual Design Report*. USA: Naval Reactors Prime Contractor, 2006
  - 11 Zakirov V, Pavshook V. Feasibility of the recent Russian nuclear electric propulsion concept: 2010. *Nucl Eng Des*, 2011, 241: 1529–1537
  - 12 Jansen F, Bauer W, Masson F, et al. DEMOCRITOS demonstrators for realization of nuclear electric propulsion of the European roadmaps MEGAHIT & DiPoP. In: *Proceedings of the Oint Conference of 30th International Symposium on Space Technology and Science, 34th International Electric Propulsion Conference and 6th Nano-satellite Symposium. Kobe-Hyogo*, 2016
  - 13 Zhang Z, Xue X, Wang Y D, et al. Prospect of space nuclear power propulsion technology (in Chinese). *J Rocket Propuls*, 2021, 47: 1–13 [张泽, 薛翔, 王园丁, 等. 空间核动力推进技术研究展望. *火箭推进*, 2021, 47: 1–13]
  - 14 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 [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]
  - 15 Zhang C, Zhang H. Lunar-gravity-assisted low-energy transfer from Earth into Distant Retrograde Orbit (DRO) (in Chinese). *Chin J Aeronaut*, 2023, 44: 268–279 [张晨, 张皓. 基于月球借力的低能DRO入轨策略. *航空学报*, 2023, 44: 268–279]
  - 16 Song Y. Progress and prospects on lithium cooled space nuclear reactor power (in Chinese). *China Basic Sci*, 2021, 23: 21–27, 50 [宋勇. 锂冷空间核反应堆电源研究现状与展望. *中国基础科学*, 2021, 23: 21–27, 50]
  - 17 Yan B H, Wang C, Li L G. The technology of micro heat pipe cooled reactor: A review. *Ann Nucl Energy*, 2020, 135: 106948
  - 18 Mazzetti A, Gianotti Pret M, Pinarello G, et al. Heat to electricity conversion systems for moon exploration scenarios: A review of space and ground technologies. *Acta Astronaut*, 2019, 156: 162–186
  - 19 Chen J, Gao S L, Xia C C. Study on space nuclear power technological option (in Chinese). *Aerosp Shanghai*, 2019, 36: 1–10 [陈杰, 高劭伦, 夏陈超. 空间堆核动力技术选择研究. *上海航天*, 2019, 36: 1–10]
  - 20 Wu Y. Multifunctional neutronics calculation methodology and program for nuclear design and radiation safety evaluation. *Fusion Sci Tech*, 2018, 74: 321–329
  - 21 Li C L, Wang H L, Yang Y P, et al. Blast and tensile properties of tantalum/niobium lined SiC/SiC composite tubes for nuclear cladding. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2022, 32: 1961–1968
  - 22 Li Z S, Shao Z Y, Liu W T, et al. Preparation technology of uranium nitride fuel powder and pellet (in Chinese). *Atomic Energy Sci Technol*, 1998, 55: 276–281 [李宗书, 邵宗义, 刘文涛, 等. 氮化铀燃料粉末及芯块制备技术研究. *原子能科学技术*, 1998, 55: 276–281]
  - 23 Jansen F, Masson F, Cliquet E, et al. MEGAHIT: Update on the advanced propulsion roadmap for HORIZON2020. In: *Proceedings of the International Space Propulsion Conference*. Conlogne: Association Aeronautique et Astronautique de France, 2014
  - 24 Zabudko L M, Grachev A F, Zherebtsov A A, et al. Status on performance study of mixed nitride fuel pins of BREST reactor type. *Nucl Eng Des*, 2021, 384: 111430
  - 25 Garin J L, Mannheim R L. Manufacturing of Mo-25Re and Mo-50Re alloys by means of powder sintering at medium temperatures. *Mater Manufacturing Processes*, 1998, 13: 731–747
  - 26 Qin H M, Chen X G. Research progress of Mo-Re alloys (in Chinese). *Jiangxi Sci*, 2020, 38: 552–557 [秦寒梅, 陈新贵. Mo-Re合金的研究进展. *江西科学*, 2020, 38: 552–557]
  - 27 Huang H T, Wang W J, Zhong W Y, et al. Research progress on application of Mo-Re alloy in space nuclear power (in Chinese). *Atomic Energy Sci Technol*, 2020, 54: 505–511 [黄洪涛, 王卫军, 钟武焯, 等. 钼铼合金在空间核电源中的应用性能研究进展. *原子能科学技术*, 2020, 54: 505–511]

- 28 Wu L, Xia C Z, Liu P. Present situation of study on welding of Mo-Re alloys (in Chinese). *Welding J*, 2017, 2: 13–16 [吴磊, 夏春智, 刘鹏. 钼铼合金焊接技术研究现状. *焊接*, 2017, 2: 13–16]
- 29 Demuth S F. SP100 space reactor design. *Prog Nucl Energy*, 2003, 42: 323–359
- 30 Hu G, Zhao S Z. Overview of space nuclear reactor power technology (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2017, 4: 430–443 [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]
- 31 Gaban J W, Pileggi P T, Powell A H. Primary loop electromagnetic pump design. NASA CR-1571. 1970
- 32 Gilland J H, LaPointe M R, Oleson S, et al. MW-Class Electric Propulsion System Designs for Mars Cargo Transport. Long Beach: American Institute of Aeronautics and Astronautics. 2012
- 33 Wang J, Wang H, Zhao G, et al. Helium turbo-compressor and circulator for a high temperature gas-cooled reactor (in Chinese). *J Tsinghua Univ-Sci Technol*, 2021, 61: 350–360 [王捷, 王宏, 赵钢, 等. 高温气冷堆氦气透平压气机和主氦气风机研究进展. *清华大学学报-自然科学版*, 2021, 61: 350–360]
- 34 IThome. Nuclear power propulsion! A major breakthrough in China's space closed Brayton cycle large power conversion system (in Chinese). [2023]. [https://k.sina.com.cn/article\\_1826017320\\_6cd6d028020017rie.html](https://k.sina.com.cn/article_1826017320_6cd6d028020017rie.html) [IT之家. 核电推进! 我国空间闭式布雷顿循环大功率热电转换系统重大突破. [2023]. [https://k.sina.com.cn/article\\_1826017320\\_6cd6d028020017rie.html](https://k.sina.com.cn/article_1826017320_6cd6d028020017rie.html)]
- 35 Wang X G, Li J R, Yu J, et al. Tensile anisotropy of single crystal superalloy DD9 (in Chinese). *Acta Metall Sin*, 2015, 51: 1253–1260 [王效光, 李嘉荣, 喻健, 等. DD9单晶高温合金拉伸性能各向异性. *金属学报*, 2015, 51: 1253–1260]
- 36 Kemme J. Performance investigations of liquid-metal heat pipes for space and terrestrial applications. In: *Proceedings of the 3rd International Heat Pipe Conference*. Palo Alto, 1978
- 37 Yamamoto T, Nagata K, Katsuta M, et al. Experimental study of mercury heat pipe. *Exp Thermal Fluid Sci*, 1994, 9: 39–46
- 38 Juhasz A J. Carbon-carbon heat pipe testing and evaluation. In: *Proceedings of the 29th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*. Monterey, 1994
- 39 Qiu J W, Xu R, Zhao Y T. Autonomous control of small nuclear reactor and its applications for deep space exploration (in Chinese). *Acta Astronaut*, 2019, 40: 1–8 [邱建文, 徐瑞, 赵宇庭. 小型核反应堆自主控制机器深空探测应用设想. *宇航学报*, 2019, 40: 1–8]
- 40 Hu W J, Chen H Y, Chen J H. Advances of safety research on nuclear space power sources (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2017, 4: 453–464 [胡文军, 陈红永, 陈军红. 空间核动力源的安全性研究进展. *深空探测学报*, 2017, 4: 453–464]

## Design and R&D of megawatt lithium-cooled space nuclear reactor

WU YiCan<sup>1,5</sup>, LIU Chao<sup>2,4</sup>, JIN Ming<sup>2,4</sup>, CHEN JianWei<sup>2</sup>, ZHANG Yong<sup>1</sup>, WU QingSheng<sup>1</sup>, SA RongYuan<sup>2,4</sup>, BAI YunQing<sup>1</sup>, LI ChunJing<sup>1</sup>, JIANG JieQiong<sup>5,16</sup>, SONG Yong<sup>1,5</sup>, HU LiQin<sup>3</sup>, WANG Fang<sup>1</sup>, TAN Peng<sup>6</sup>, WENG Na<sup>7</sup>, JIANG XinBiao<sup>8</sup>, GAO Yang<sup>9</sup>, ZHOU XinGui<sup>10</sup>, ZHENG YouQi<sup>11</sup>, LU Peng<sup>12</sup>, ZHANG ZhiGang<sup>13</sup>, HAO ZuLong<sup>14</sup> & YIN Yuan<sup>15</sup>

<sup>1</sup> International Academy of Neutron Science, Qingdao 266199, China;

<sup>2</sup> International Academy of Neutron Science (Chongqing), Chongqing 401331, China;

<sup>3</sup> International Academy of Neutron Science (Hefei), Hefei 230001, China;

<sup>4</sup> China Super Nuclear Technology Co., Ltd., Hefei 230001, China;

<sup>5</sup> Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

<sup>6</sup> University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

<sup>7</sup> Shanghai Nuclear Engineering Research Design Institute, Shanghai 200233, China;

<sup>8</sup> Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

<sup>9</sup> Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

<sup>10</sup> Science and Technology on Advanced Ceramic Fibers and Composites Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

<sup>11</sup> School of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

<sup>12</sup> College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

<sup>13</sup> Fundamental Science on Nuclear Safety and Simulation Technology Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

<sup>14</sup> School of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

<sup>15</sup> School of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

<sup>16</sup> Institute of Nuclear Science and Technology, Shandong University, Jinan 250012, China

Space nuclear reactor power, with the advantages of high energy density, high output power, long duration, and minimal influence from the external environment, is the preferred route for energy supply for future high-power long-life space missions and deep space exploration missions. Based on the developmental requirements and characteristics of different design options for megawatt-class space nuclear reactors, a technical scheme for a megawatt-class small lithium-cooled space reactor is designed. This scheme uses a lithium-cooled reactor coupled with a Brayton power conversion system that is lightweight and durable. The key technologies involved in the design are reviewed. Developmental progress of technical analysis and demonstration, verification prototype systems, and experimental platforms is presented. Suggestions and comments for developing high-power space nuclear power in China in the future are presented.

**space nuclear reactor, lithium-cooled reactor, Brayton power conversion system**

doi: [10.1360/SST-2023-0202](https://doi.org/10.1360/SST-2023-0202)