

空间核电源朗肯循环系统的研究进展

王洁伟 刘凯旋 杨夷 吕征

(中国原子能科学研究院反应堆工程技术研究所 北京 102413)

摘要 空间核电源朗肯循环具有热电转换效率高、废热辐射面积小、功率变化灵活等特点,是空间核反应堆电源领域的研究热点。以空间核能朗肯循环的发展与研究现状为基础,对空间核能朗肯循环的工质及选择标准和原则进行分析。对不同功率等级的空间核能朗肯循环系统设计方案进行对比,分析各个系统方案的反应堆设计、各回路工质选择、朗肯循环功率设计、关键部件设计等,提出空间核电源朗肯循环的主要研究方向,包括工质特性、朗肯循环关键部件、反应堆芯设计等,而新型金属材料、高性能关键设备设计和地面集成方案等将是有待继续深入研究的关键技术问题。分析结果可对中国未来空间核能朗肯循环的设计提供一定参考。

关键词 空间核能, 朗肯循环, 液态金属, 方案设计, 循环优化

中图分类号 TL411

Research Progress of Rankine Cycle System for Space Nuclear Power System

WANG Jiewei LIU Kaixuan YANG Yi LÜ Zheng

(Reactor Engineering Technology Research Institute, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Abstract The space nuclear power Rankine cycle is a research hotspot in the field of space nuclear reactor power supply because of its high thermoelectric conversion efficiency, small waste heat radiation area and flexible power change. In this paper, based on the in-depth analysis of the development history of space nuclear power Rankine cycle at home and abroad and the research progress at home and abroad, the research progress of the workmass of space nuclear power Rankine cycle is sorted out, and the selection criteria and principles of workmass are summarized. In this paper, a detailed review of the design schemes of space nuclear energy Rankine cycle systems of different power levels is carried out, summarizing the reactor design, the selection of industrial materials for each circuit, the design of Rankine cycle power, the design of key components and other aspects of each system scheme, and it is found that the main research directions include the research on the characteristics of the industrial materials, the research on the key components of the Rankine cycle, the design of the reactor core, etc. The key technical issues to be further studied include research on new metal materials, high-performance key equipment design and ground integration program. The results of the analyses are intended to provide a certain reference for the design and research of the Rankine cycle for space nuclear energy in China in the future.

2023-12-01 收到原稿, 2024-03-19 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Key words Space nuclear power, Rankine cycle, Liquid metal, Schematic design, Loop optimisation

0 引言

随着深空探测技术的不断发展, 对于电源的需求也在不断提高, 传统的太阳能电源、化学电源等由于其使用寿命短、能量密度低等缺点, 不能完全满足深空探测的需求. 空间核动力电源由于其具有工作寿命长、能量密度大、极端环境适应性好等优点, 是进行深空探测所需电能供给的较优方案之一.

自 20 世纪 50 年代起, 美、俄等国家相继开展了对空间核电源技术的研究^[1]. 例如俄罗斯提出了 ROMANSKA^[2], BUK^[3], TOPAZ-I 和 TOPAZ-II^[4] 等空间核电源计划, 美国提出了辅助核电源 (Systems for Nuclear Auxiliary Power, SNAP) 计划^[5]、MPRE (中等功率反应堆试验) 计划^[6]、SP-100 计划^[7] 以及普罗米修斯计划^[8] 等空间核电源计划. 较大功率的空间堆的热电转换方式一般采用动态循环, 如布雷顿循环、斯特林循环和朗肯循环. 其中, 朗肯循环由于其高转换效率、低废热辐射面积、多能级等特点, 成为了当前空间核反应堆电源领域的热点课题之一^[9,10]. 中国对空间核电源液态金属朗肯循环系统的研究和开发还处于起步阶段, 包括理论知识储备及实验数据在内的相关资料库都不完备^[9], 本文在充分调研国外空间核能朗肯循环基础上, 分析几种典型的不同能级的空间核能朗肯循环系统的设计方案, 以期为中国空间核能朗肯循环研究提供一定参考.

1 核能朗肯循环工质研究

空间核能朗肯循环工质的选取一般有如下要求: 合适的沸点, 以保证获得相对小的辐射器面积; 较小

的密度, 以降低工质的总体质量; 较高的热导率以及较低的成本等. 根据以上要求, 空间核能朗肯循环工质一般选择液态金属, 包括锂、钠、钾、铷、铯和汞等^[10]. 早期的空间核能朗肯循环一般选择液态金属汞作为循环工质, 例如 1955 年美国原子能委员会 (AEC) 负责的 SNAP-2 反应堆电源^[11] 及之后的 SNAP-8 反应堆电源. 后由于汞蒸气的化学毒性以及汞蒸气容易与大多数金属结构材料产生汞蒸气而改用碱金属材料, 例如 1959 年到 1966 年间美国橡树岭国家实验室 (ORNL) 的 MPRE(中等功率反应堆试验) 计划使用钾作为循环工质^[6], 以及美国用于火星探测的空间堆采用钠作为工质^[12]. 表 1 是四种液态金属的热物性参数.

1968 年美国橡树岭国家实验室研究了钾和铯的性能对朗肯循环的影响^[13], 为验证工质钾和铯的性能, ORNL 研制出了输出电功率为 330 kW 的朗肯循环系统^[14], 并在该系统上进行了超过 5000 h 的测试, 实验结果表明^[15], 钾工质作为朗肯循环工质相比于铯, 系统质量比功率更小, 更能满足空间系统低质量的需求.

2 几种空间核能朗肯循环系统设计方案

2.1 30 kW 级设计方案

1959 年美国国家航天局 (NASA) 和 AEC 共同研制了 30 kW 的 SNAP-8 空间核反应堆电源^[16], 用于电推进和行星际通信. 最初的 SNAP-8 设计方案是基于 SNAP-2 的技术, 其主要特点是采用两个回路和直接冷凝散热器, 经过 NASA 的全面评估, 散热方式及发电功率不满足应用要求, 后进行重新设计, 系统

表 1 四种液态金属热物性参数
Table 1 Thermophysical parameters of four liquid metals

元素	熔点/K	沸点/K	液体密度/(g·cm ⁻³)	液体热容/(J·g ⁻¹ ·K ⁻¹)	液体汽化热/(kJ·g ⁻¹)	液体热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
锂Li	453.5	1620	0.512	4.07	22.08	71.1
钠Na	371.0	1156	0.929	1.38	4.20	93.0
钾K	336.5	1033	0.850	0.84	2.55	102.4
汞Hg	234.0	630	13.590	0.14	0.29	8.3

流程如图 1 所示. 相较于性能和重量, 新方案更强调可靠性, 因此汽轮机的转速降低一半, 导致系统效率下降.

新方案包括四个主回路. 一回路使用 NaK 合金作为冷却剂将反应堆的热量传递到蒸汽发生器; 二回路使用汞作为朗肯循环的工质, 发生器出口温度 950 K, 冷凝器出口温度 645 K; 三回路使用 NaK 合金将冷凝器中的废热通过辐射散热器排出; 四回路采用有机流体, 用于润滑朗肯循环系统中的旋转部件, 同时为发电机部分提供冷却剂. 方案同时还设计了一条辅助回路, 在汞朗肯循环回路还未启动前为两条 NaK 回路提供热负载.

在研究过程中, 发现汞工质会与蒸汽发生器使用的钴基结构材料发生反应, 造成工质污染, 从而降低了蒸汽发生器二次侧的传热效率, 钴基材料也会出现脆化和腐蚀现象, 为此需要重新选择蒸汽发生器的材料. 路易斯研究中心的一项研究^[17]验证了 9 Cr-1 Mo 合金和钽金属作为蒸汽发生器材料时的材料性能, 9 Cr-1 Mo 合金表现出了较高的腐蚀率, 而钽则表现出较低的腐蚀率, 耐腐蚀性能更好, 故选择钽金属作为蒸汽发生器原材料. 在汽轮机的选材方面, 选择延展性较好的 S-816 金属.

为验证 SNAP-8 方案的可行性, NASA 研制了两套汞朗肯循环系统^[18]并进行地面试验, 分别是 SNAP-8 试验堆 (S8 ER) 以及 SNAP-8 工程堆 (S8 DR), 其中 S8 DR 持续运行了 7500 h, 而 S8 ER 的设计与最终设计差距较大, 不作展开. S8 DR 反应堆为热中子堆, 采用 UZr 合金作为核燃料, ^{235}U 富集度 93.15%, 燃料预先进行氢化处理, 燃料包壳材料使用镍基合金. 反应堆设计热功率 600 kW, 冷却剂出口温度 975 K, 冷却剂使用 NaK-78 合金. SNAP-8 输出功率设计可调, 变化范围为额定功率的 10%~100%, 可通过调整控制鼓的位置来设置合适的出口温度. 当反应堆出口温度为 875 K 时, 输出电功率可达 50 kW, 循环效率为 8.3%, 系统总重 4536 kg, 辐射器面积 167 m², 质量比功率 136 kg·kW⁻¹.

虽然 S8 DR 工程试验堆只运行了 7500 h, 未能达到预期的 10000 h 寿期, 但是本次试验证明了 SNAP-8 系统设计方案要实现 10000 h 寿期的设计目的已经不存在根本性问题.

2.2 100 kW 级设计方案

2002 年美国 NASA 提出普罗米修斯计划, 以促进核推进和空间核电源的开发, 其中包含一项钾朗肯循环的空间核反应堆电源计划^[19].

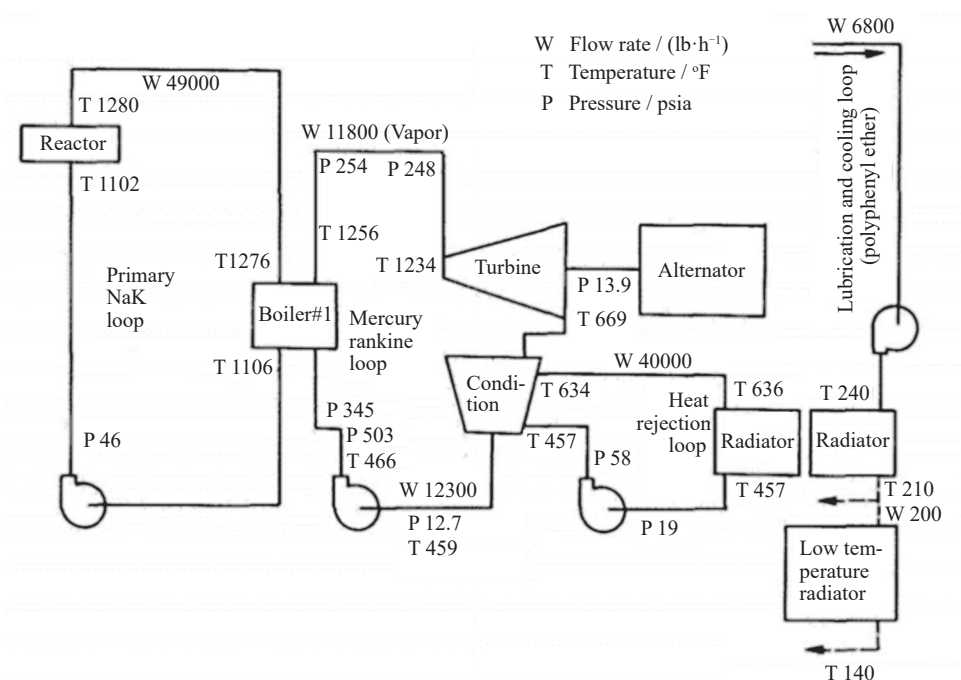


图 1 SNAP-8 系统

Fig. 1 System of SNAP-8

最初的设计方案使用快中子堆, 反应堆热功率 2.4 MW, 反应堆包括 703 根 UN 燃料棒, 单根燃料棒直径 0.635 cm, 长 30.22 cm. 该方案主要特点是一、二回路均配备两套独立回路, 互为冗余. 一回路为锂冷却回路, 二回路为钾朗肯循环回路, 输出电功率 100 kW, 图 2^[19] 给出了双回路朗肯循环基本设计系统.

方案使用 ALKASYS-SRPS 程序进行评估验证, 评估发现其质量比功率较低, 能量转换效率较低. 故对该方案进行优化, 在最初方案的二回路中添加再热器和回热器, 设置反应堆出口温度为 1350 K, 再热器的质量设定为蒸汽发生器质量的 50%, 图 3^[19] 为优化后的设计方案. 从图可知, 钾工质经高压汽轮机膨胀

做功之后在再热器中被重新加热到接近锅炉出口温度后进入低压汽轮机再进行膨胀做功, 以此提高循环效率. 回热器位于蒸汽发生器入口处, 其高温侧工质来自于汽轮机抽气.

ALKASYS-SRPS 程序分析了三个回热器和一个再热器对循环的影响, 分析结果列于表 2. 在不进行回热和再热时, 系统循环效率为 23.6%, 系统质量为 3071 kg. 对于使用三个回热器和无再热的情况, 效率提高到 24.8%, 系统质量减少了约 88 kg. 在有再热的情况下, 假定涡轮机的质量比没有再热的涡轮机增加 80%. 这一增加是由于从高压涡轮机中提取抽汽, 然后将其重新引入低压涡轮机所需的额外复杂性所致. 使用再热器相比于使用回热器系统质量减少更多. 在

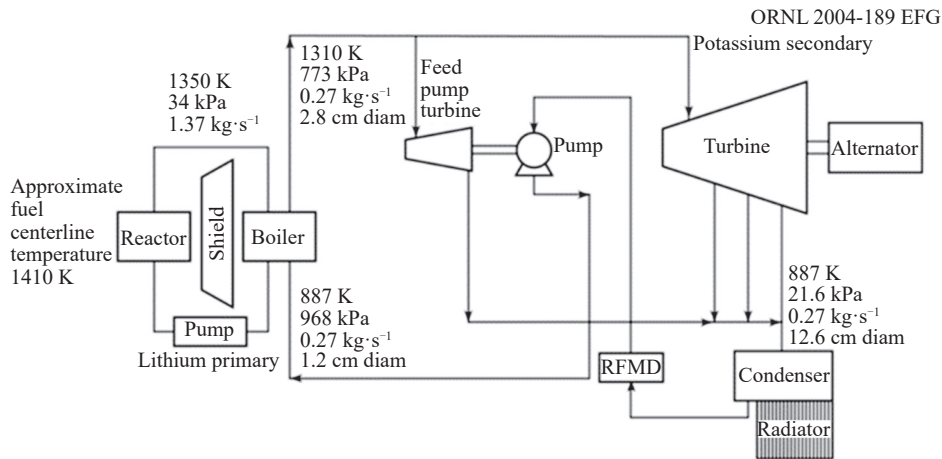


图 2 100 kW 双回路朗肯循环系统

Fig. 2 100 kW dual circuit Rankine cycle system

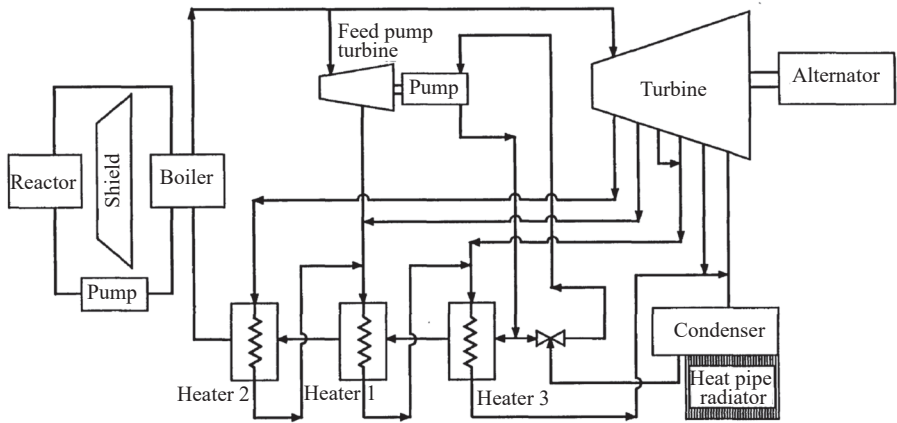


图 3 带回热和再热的 100 kW 朗肯循环系统

Fig. 3 100 kW Rankine cycle schematic with feed heat and reheat

使用全部三个回热器和再热的情况下, 系统总质量减少了 436 kg. 优化后的 100 kW 系统 (包括两套冗余 PCS 回路) 的整体系统质量为 2635 kg, 质量比功率 $20.4 \text{ kg}\cdot\text{kW}^{-1}$.

2.3 300 kW 级设计方案

1969 年 NASA 路易斯研究中心提出了一项液态金属朗肯循环设计方案^[20]. 该方案使用热功率为 2 MW 的快中子反应堆, 输出电功率可达 300 kW 级, 系统如图 4 所示. 反应堆设计寿命 50000 h, 反应堆使用液态金属锂作为冷却剂, 一回路锂流量为 $8.9 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$, 堆芯出口温度 1480 K.

系统包括三个主要回路: 一回路液态金属锂将反应堆热能传递至蒸汽发生器, 二回路使用液态金属钾作为朗肯循环工质, 三回路 NaK 合金吸收冷凝器废

热后通过散热器向空间散热. 考虑带载人航行, 设计三个辅助回路对系统关键部件冷却: 液态钾对汽轮机两端和发电机分别冷却, 有机流体对系统电子元件冷却. 1970 年之后空间探索 and 开发不再是美国政府的投资重心, 该项目得不到后续经费支持, 因此只进行到系统关键部件设计阶段.

堆芯燃料 UN 先被包裹在钨箔内, 后装入难熔合金 T-111 包壳管密封, 因此必须考虑管壳包层是否能承受堆芯裂变气体所产生的压力. Miller^[21] 对空间核反应堆是否有气体裂变产物进行了深入研究, 研究结果表明 T-111 包壳管足以承受堆芯裂变气体所产生的压力.

系统二回路蒸汽发生器设计图如图 5 所示, 使用 T-111 作为结构材料, 31 根管道由直径为 15.2 cm 的

表 2 回热和再热对 100 kW 系统效率和质量的影响
Table 2 Effect of feed heat and reheat on 100 kW system efficiency and mass

Number of feed heaters	Reheat temperature/K	Cycle efficiency/(%)	Relative mass	$\Delta \text{ mass /kg}$
0	0	23.6	1.00	0
3	0	24.8	0.97	-88
0	160	28.0	0.92	-256
3	160	31.5	0.86	-436

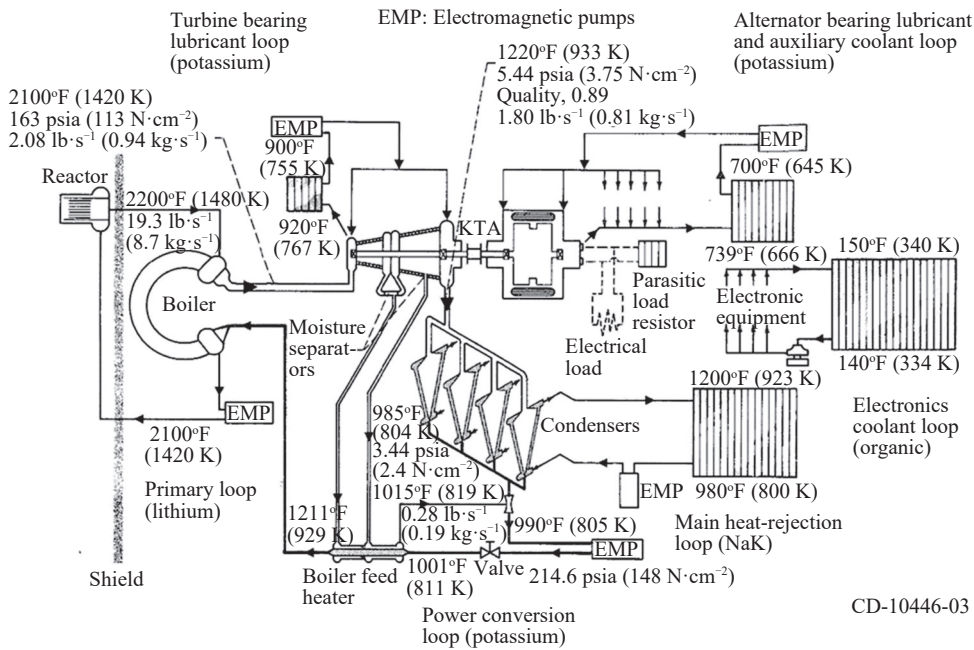


图 4 300 kW 级系统原理
Fig. 4 300 kW level system schematic diagram

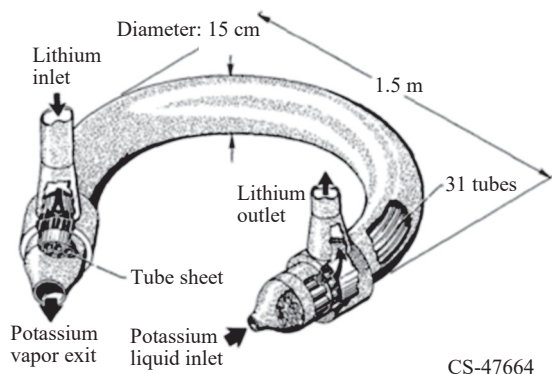


图5 蒸汽发生器

Fig. 5 Steam generator

壳层包覆; 其中单管长 230 cm, 直径 1.27~1.90 cm. 在壳程流动的一次侧高温锂工质向管程逆流的二次侧钾工质传热, 锂工质进口温度 1480 K, 钾工质进口温度 929 K, 两侧工质出口温度均为 1420 K.

NASA 负责系统汽轮机设计^[22,23], 其设计如图 6 所示. 系统采用轴流式汽轮机, 汽轮机静态部件结构材料为 T-111, 动态部件结构材料为 TZM 合金, 设计级数 10 级, 设计转速可达 $19200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 转换效率可达 81.3%, 使用液态金属钾作为汽轮机润滑油和冷却剂. 为避免汽轮机内工质液化影响叶片速度, 在转子之间加装除湿槽. 饱和钾工质在蒸汽发生器吸热气化后进入汽轮机膨胀做功, 汽轮机出口乏汽温度 933 K.

汽轮机出口乏汽在四个并联的管壳式冷凝器中冷凝并达到过冷状态, 乏汽在管程流动, NaK 合金在壳程逆流, 冷凝后液态钾工质经电磁泵加压进入蒸汽发生器, 完成循环. NaK 合金将冷凝器的废热传递到辐射器进行散热.

系统电输出功率 428 kW, 汽轮机和交流发电机的效率分别为 81.3% 和 94.5%. 系统自用电功率约 53 kW, 净输出功率 375 kW, 循环效率为 19%, 总重 10000 kg, 辐射器总面积 325.87 m^2 , 质量比功率 $27 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$.

2.4 10 MW 级设计方案

1962 年, 美国空军联合 AEC、NASA 提出 SNAP-50/SPUR 计划, 1965 年改名为 SPR 计划^[24]. 劳伦斯利弗莫尔国家实验室 (LLNL) 在 1970 年提出 SPR-6 空间堆电源系统设计方案^[25], 使用钾朗肯循环作为热电转换方式.

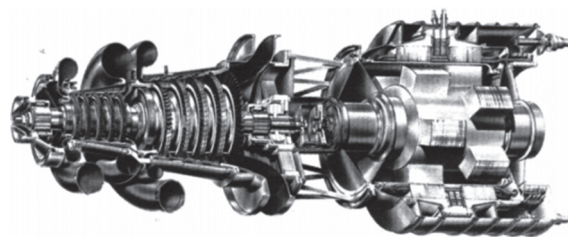


图6 300 kW 级系统汽轮机设计

Fig. 6 Design drawing of 300 kW system steam turbine

SPR-6 系统包括反应堆、辐射屏蔽层、钾朗肯热电转换系统和辐射散热系统四部分. 系统工质流程如图 7 所示. 反应堆燃料为 UN(氮化铀), 包壳采用钨铍合金, 冷却剂为液态金属锂, 堆热功率 57 MW, 设计出口温度 1650 K, 冷却剂流量 $191 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$. 系统设计一个辅助回路用于防止反应堆堆芯容器过热, 使用液态金属锂做冷却剂, 出口温度 1370 K, 流量 $5.3 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$.

反应堆堆芯容器辅助回路的液态锂通过预热器向二回路入口过冷液态钾传热, 预热后液态钾在蒸汽发生器中吸收一回路过冷液态钾热量气化, 气态钾出口温度 1560 K. 蒸汽发生器使用钼金属作为结构材料, 由 2900 根直管组成, 单管长 154 cm, 直径 1 cm.

出于可靠性考虑, 系统使用四台汽轮发电机组并联发电, 单组输出电功率 2.5 MW. 汽轮机为轴流式, 级数 7 级, 效率 78%. 电机效率 90%, 与汽轮机同轴, 转速 $12000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$. 气态钾在汽轮机膨胀做功, 出口乏汽温度 1110 K, 乏汽在冷凝器中冷凝, 冷凝器出口温度 1080 K.

散热器由主、辅两个散热器组成, 均使用热管式散热器^[26]. 主散热器将冷凝器中废热排向空间, 面积 400 m^2 , 质量 13400 kg. 辅助散热器用于冷却发电机, 面积 10 m^2 , 质量 300 kg.

SPR-6 系统设计寿命 10000 h, 总效率 17.5%, 总重 70000 kg, 质量比功率 $7 \text{ kg}\cdot\text{kW}^{-1}$.

2.5 15 MW 级设计方案

1985 年 NASA 和 SDIO (美国战略防御计划局) 开展了多兆瓦计划空间核反应堆计划, 开发适用于深空探测和星表基地的核反应堆电源, 功率水平从几十瓦到数百兆瓦, 其中包括一项液态金属反应堆钾朗肯循环系统的设计方案^[27]. 方案设计目标: 质量比功率 $3\sim5 \text{ kg}\cdot\text{kW}^{-1}$, 寿命 7 年, 输出电功率 15 MW. 图 8^[28] 为该方案热电转换系统基本原理.

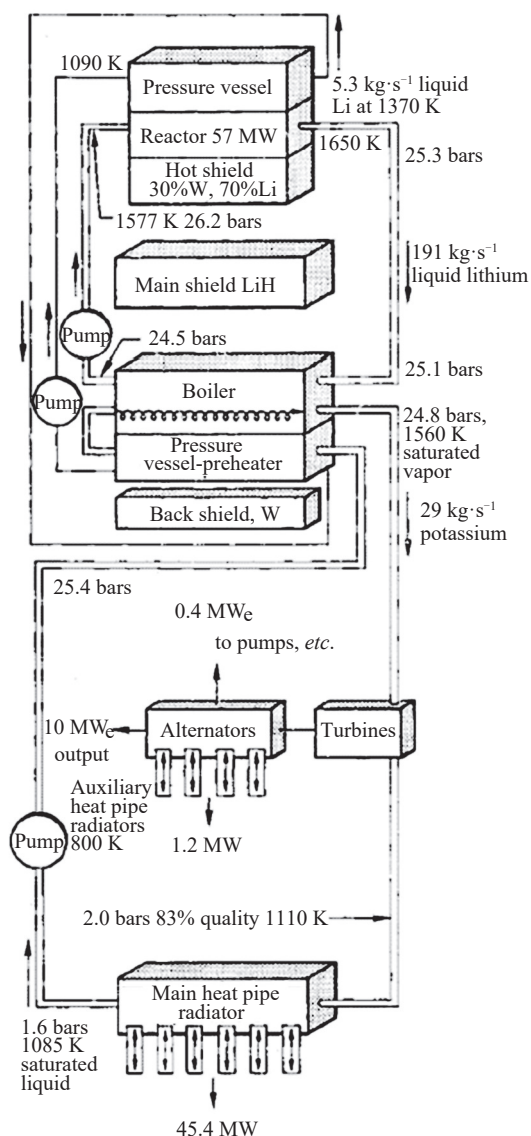


图7 SPR-6系统

Fig. 7 System of SPR-6

方案基于 SP-100 计划进行设计优化. SP-100 计划^[29]中关于朗肯循环的系统设计参数如表 3 所示. 反应堆燃料为 UN, 堆芯最高温度由反应堆包壳材料决定, 包壳材料为 Nb-1 Zr 合金时, 反应堆冷却剂出口温度可达 1350 K; 包壳材料为 ASTAR811 C 时, 反应堆出口温度可提升到 1500 K.

方案使用 AKLASYM 程序进行分析, 假定冷凝器出口温度为 800 K, 对不同堆芯冷却剂、包壳材料、循环工质方案的分析结果如表 4 所示. 在其他条件相同时, 一回路工质为锂时比工质为 Ga 时所需热

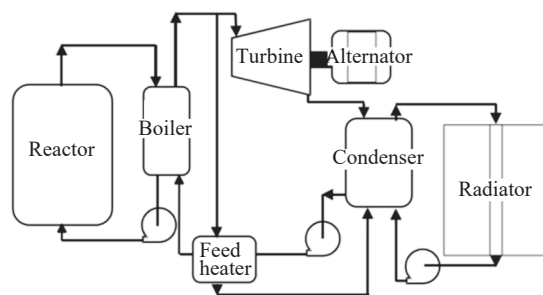


图8 15 MW 级方案朗肯循环系统

Fig. 8 15 MW level scheme Rankine cycle system

交换器质量更小, 二回路工质为钾时比工质为钠时质量比功率更低. 因此, 最终设计方案选用 Nb-1 Zr 合金为燃料包壳, 锂为一回路工质, 钾为二回路工质.

液态钾在蒸汽发生器吸收一次侧高温锂的热量相变为饱和钾蒸汽, 蒸汽发生器二次侧出口温度为 1260 K. 钾蒸汽进入汽轮机将热能转化为机械能, 随后进入冷凝器液化, 冷凝器出口温度 800 K, 循环效率为 27.2%, 系统总重 96376 kg, 质量比功率 6.43 kg·kW⁻¹.

2.6 其他方案与系统特性

20 世纪 90 年代日本提出用于月球表面的 RAPID 反应堆电源^[1], 是以锂为冷却剂的快中子反应堆, 以 UN 为燃料, ²³⁵U 富集度为 97% 和 80% 两种, 燃料包壳材料选用 Mo-Re 合金, 10 年换燃料 1 次, 冷却剂入口温度为 1307 K, 出口温度为 1373 K, 反应堆热功率为 5 MW, 热电转换采用朗肯循环, 输出电功率达 0.8 MW, 系统转换效率达 16%.

美国用于火星探测空间核动力的概念设计中^[30], 以 UN 为燃料, 堆芯燃料分两区, 即 ²³⁵U 富集度为 97% 和 70% 两种. 燃料包壳材料选用 Nb-1 Zr 合金, Na 为冷却剂, BeO 为反射层材料, 堆芯外控制的快中子反应堆, 热电转换采用沸腾钠的朗肯循环. 三个设计方案: 低温 (1300 K), 反应堆的热功率为 10 MW, 输出电功率为 1.0 MW; 高温 (1500 K), 反应堆的热功率为 10 MW 和 27 MW, 相应反应堆输出电功率为 1.2 MW 和 12.6 MW, 设计寿命为满功率 9 个月, 完全满足地球到火星的一次往返.

国内关于空间核能朗肯循环的研究较少, 仅停留在工质特性研究与系统热力学分析阶段. Zhang 等^[31]采用 Simulink 模块化建模方法对空间液态金属朗肯循环模型进行程序化描述. 根据空间朗肯循环各部件的耦合标准, 建立系统部件及总体控制仿真模型, 重

表 3 基于 SP-100 液态金属朗肯循环反应堆系统设计方案
Table 3 Design scheme of liquid metal Rankine cycle reactor system based on SP-100

Concept	Fuel	Clad	Neutron spectrum	Reactor coolant	Coolant outlet temp/K	Power conversion	Technology base
UN/Nb-1 Zr/Li-K	UN	Nb-IZr	Fast	Li	1350	K-Rankine	SP-100
UN/Nb-1 Zr/Ga-K	UN	Nb-IZr	Fast	Ga	1350	K-Rankine	SP-100
UN/Nb-1 Zr/Li-Na	UN	Nb-IZr	Fast	Li	1350	Na-Rankine	SP-100
UN/Nb-1 Zr/Ga-Na	UN	Nb-IZr	Fast	Ga	1350	Na-Rankine	SP-100
UN/ASTAR811 C/Li-K	UN	ASTAR811 C	Fast	Li	1500	K-Rankine	SP-100 ^a
UN/ASTAR811 C/Ga-K	UN	ASTAR811 C	Fast	Ga	1500	K-Rankine	SP-100 ^a
UN/ASTAR811 C/Li-Na	UN	ASTAR811 C	Fast	Li	1500	Na-Rankine	SP-100 ^a

注 上角a表示改进型.

表 4 各种配置的朗肯循环分析
Table 4 Rankine cycle analysis for various configurations

Parameter	UN/ Nb1 Zr/Li-K	UN/ Nb1 Zr/Ga-K	UN/ Nb1 Zr/Li-Na	UN/ ASTAR811 C/ Li-K	UN/ ASTAR811 C/ Ga-K	UN/ ASTAR811 C/ Li-Na
Turbine inlet temperature/K	1260	1260	1260	1410	1410	1410
Reactor thermal power/kW	59108	59108	62026	49819	49819	49436
Thermal efficiency/(%)	25.4	25.4	24.2	30.1	30.1	30.3
Heat exchanger mass/kg	2254	3296	1205	868	960	493
Power conditioning mass/kg	15106	15106	15106	15106	15106	15106
Radiator mass/kg	14654	42496	15313	11691	35092	11612
Shield mass/kg	9709	5621	9895	8216	3855	8196
Turbine/Generator mass/kg	43614	43614	292801	57820	57820	468938
Main radiator area/m ²	3397	3397	3626	2665	2665	2635
Low-temperature radiator area/m ²	283	283	289	264	264	263
Radiator mass/kg	11039	11039	11746	8789	8789	8696
Total mass/kg	96376	121172	346065	102490	121622	513041
Specific mass/(kg·kW ⁻¹)	6.43	8.08	23.07	6.83	8.11	34.2

点研究变运行条件下循环输出功率的波动. Zhang 等^[32]应用能量分析和焓分析两种热力学方法对输出电功率为 5 MW 的空间核能朗肯循环核动力系统进行了对比分析, 计算出了系统各部件的能量损失和焓损失, 找出了损失最大的部件并分析原因, 最后分析了不同空间环境温度的设定对于系统各部件的焓损失和焓效率的影响.

3 结论

通过对空间核能朗肯循环工质选择及多种不同

功率等级朗肯循环系统的分析, 可以得出如下结论.

对于朗肯循环工质的选择, 液态金属汞热物性表现明显不如碱金属锂、钠、钾, 且汞蒸气易与大多数金属材料产生汞齐. 循环工质选择标准应该着重考虑这几点: 沸点合适, 工质沸点尽可能接近反应堆出口温度; 化学性质稳定, 不易与管壳材料发生反应; 较低的密度和成本等.

在朗肯循环的关键部件研究方面, 汽轮机设计转速均在 20000 r·min⁻¹ 左右, 随着科技进步, 后续研究中可考虑增加汽轮机转速以达到提高效率的目的; 换热器多采用管壳式结构, 通过改变结构材料来提高效

率, 后续研究中可考虑使用不同结构形式的换热器与新型材料相结合的方式来达到提高效率的目的。

在朗肯循环性能提升方面, 目前朗肯循环设计方案多基于传统朗肯循环, 未来的优化方向可考虑耦合多级回热与再热的方式, 还可以开展朗肯循环系统关键部件研究, 实现能量的高效利用。

在朗肯循环的试验验证方面, 除早期的 SNAP-8 方案以外, 其他系统仅停留在方案设计阶段, 或只进行了少量循环部件性能测试, 没有进行系统集成试验, 未来系统研发过程中, 应充分考虑建立地面集成系统进行方案验证。

相较于空间堆布雷顿循环, 有研究很早就针对空间核能朗肯循环开展了地面工程试验。例如美国在 1959 年开始 SNAP-2 开发反应堆 (S2 DR) 的设计与建造, 该反应堆在 1961 年达到临界并且运行到 1962 年底。美国的 SNAP-8 计划对反应堆和热电转换装置都进行了测试, 建造了 S8 ER 和 S8 DR 两座反应堆, 积累了大量的试验数据与工程经验^[18]。NASA 在 20 世纪 70 年代研究的先进电源反应堆 (APR) 系统使用布雷顿热电转换系统, 该系统的材料、屏蔽研究和能量转换都实现了既定目标, 但未展开系统测试^[1]。总体来说, 空间堆朗肯循环在实装与测试方面具有较为明显的优势。

中国目前对空间核能朗肯循环的研究较少, 仅停留在热力学特性研究与系统仿真阶段, 应充分借鉴国外朗肯循环研究的先进经验, 结合中国空间核能应用需求, 尽快开展空间核能朗肯循环研究。

参考文献

- [1] SU Zhuting, YANG Jicai, KE Guotu. Space Nuclear Power[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2016 (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] GUHARKIN H E. Space Nuclear Power Sources “Romanska” and “Yenisei” with Thermoelectric Conversion and Thermionic Conversion[M]. LIU Shu, ZHANG Ling, SONG Chenwei, trans. Beijing: China Atomic Energy Publishing House, 2016: 61-66
- [3] MA Shijun, DU Hui, ZHOU Jishi, *et al.* Development history of nuclear powered spacecraft (part 2)[J]. *Aerospace China*, 2014(5): 32-35 (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)
- [4] WANG C L, LIU T C, TANG S M, *et al.* Thermal-hydraulic analysis of space nuclear reactor TOPAZ-II with modified RELAP5[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2019, **30**(1): 12
- [5] STAUB D W. SNAP Programs: Summary Report[R]. Canoga Park: Atomics International Division, 1973
- [6] PITTS J H, JESTER M H L. Rankine Cycle Systems Studies for Nuclear Space Power[R]. Livermore: Lawrence Radiation Laboratory, 1968
- [7] MASON L S, BLOOMFIELD H S, HAINLEY D C. SP-100 power system conceptual design for lunar base applications[C]//6th Symposium on Space Nuclear Power Systems. Albuquerque: Institute for Space Nuclear Power Studies, 1989
- [8] LAHEY JR R T, DHIR V. Research in Support of the Use of Rankine Cycle Energy Conversion Systems for Space Power and Propulsion[R]. Hanover: NASA Center for Aerospace Information, 2004
- [9] ZHANG Zhen. Simulation Analysis and Optimization of Metal Rankine Cycle Dynamic Thermoelectric Conversion System for Space Nuclear Power[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2021.003978 (张震. 空间核动力金属朗肯循环动态热电转换系统仿真分析及优化 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021. DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2021.003978)
- [10] CHENG Xianwei. Thermodynamic Analysis of Space Nuclear Power System Based on Liquid Metal Rankine Cycle [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017 (程献伟. 空间核能液态金属朗肯循环的热力学性能分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017)
- [11] JARRETT A A. SNAP 2: Summary Report[R]. Canoga Park: Atomics International Division, 1973
- [12] XU Chunyang. Research and Development Progress of Russian Megawatt Space Nuclear Power Plant (Internal Report)[R]. Beijing: China Institute of Nuclear Information & Economics, 2012 (许春阳. 俄罗斯兆瓦级空间核动力装置研发进展 (内部报告)[R]. 北京: 中国核科技信息与经济研究院, 2012)
- [13] YOUNG H C, CLARK D L, GRINDELL A G. Comparison of Boiler Feed Pumps for Cesium and Potassium Rankine Cycle Systems[R]. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 1968
- [14] FRAAS A P, BURTON D W, LAVERNE M E, *et al.* Design Comparison of Cesium and Potassium Vapor Turbine-Generator Units for Space Power Plants[R]. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 1969
- [15] YOUNG H C, GRINDELL A G. Summary of Design and Test Experience with Cesium and Potassium Components and Systems for Space Power Plants[R]. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 1967
- [16] THUR G M. SNAP-8 power conversion system assessment [C]//Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. Boulder: National Aeronautics and Space Administration, 1968
- [17] GERTSMA L G, THOLLOT P A, MEDWID D W. Re-

- view of the double containment Ta/SS SNAP-8 boiler [C]//Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. Boulder: National Aeronautics and Space Administration, 1968
- [18] MA Shijun, TANG Yuhua, ZHU Anwen, *et al.* Progress in Space Nuclear Power[M]. Beijing: China Aerospace Publishing House, 2019 (马世俊, 唐玉华, 朱安文, 等. 空间核动力的进展 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2019)
- [19] YODER G L, CARBAJO J J, MURPHY R W, *et al.* Potassium Rankine cycle system design study for space nuclear electric propulsion[C]//3rd International Energy Conversion Engineering Conference. San Francisco: AIAA, 2005: 5637
- [20] HELLER J A, MOSS T A, BARNA G J. Study of a 300-Kilowatt Rankine-Cycle Advanced Nuclear-Electric Space-Power System[R]. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 1969
- [21] MILLER J V. Characteristics of A Space-Power Nuclear Reactor with Considerations for Venting or Containing Gaseous Fission Products[R]. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 1968
- [22] VARLJEN T C. The Transport of Atomized Drops in Wet Vapor Turbines[R]. Pittsburgh: Westinghouse Astronuclear Laboratory, 1968
- [23] RACKLEY R A. Potassium Turboalternator (KTA) Preliminary Design Study: Volume III-Phase II KTA Final Design[R]. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 1970
- [24] LONGHURST G R, HARVEGO E A, SCHNITZLER B G, *et al.* Multi Megawatt Power System Analysis Report[R]. Idaho Falls: Idaho National Laboratory, 2001
- [25] PITTS J H, WALTER C E. Conceptual design of a 10-MWe nuclear Rankine system for space power[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1970, 7(3): 259-265
- [26] WERNER R W, CARLSON G A. Heat Pipe Radiator for A 50-MWt Space Power Plant[R]. Livermore: Lawrence Radiation Laboratory, 1967
- [27] LONGHURST G R, SCHNITZLER B G, PARKS B T. Multi-Megawatt Power system trade study[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2002, 608(1): 1075-1083
- [28] Morgon R. Comparison of high power nuclear systems for space[C]//Proceedings of the 18th Intersociety Energy Conversion Conference, Orlando, FL, USA. 1983: 21-26
- [29] TRUSCELLO V C, RUTGER L L. The SP-100 power system[J]. *AIP Conference Proceedings*, 1992, 246(1): 1-23
- [30] China Institute of Nuclear Technology Information and Economics. World Reactor Encyclopedia: RAPID Catalogue Reactor Power Supply[M]. Beijing: Atomic Energy Publishing House, 2015: 152 (中国核科技信息与经济研究院. 世界反应堆大全: RAPID 星表反应堆电源 [M]. 北京: 原子能出版社, 2015: 152)
- [31] ZHANG Zhen, ZHANG Haochun, ZHANG Dong, *et al.* Design of alkali metal Rankine cycle thermoelectric conversion system for megawatt space nuclear plant[J]. *Aerospace Shanghai (Chinese & English)*, 2022, 39(2): 76-84 (张震, 张昊春, 张冬, 等. 兆瓦级空间核电源碱金属朗肯循环热电转换系统设计 [J]. *上海航天 (中英文)*, 2022, 39(2): 76-84)
- [32] ZHANG Haochun, CHENG Xianwei, YU Hongxing, *et al.* Thermodynamic analysis of space nuclear power system based on liquid metal Rankine cycle[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2018, 39(2): 242-248 (张昊春, 程献伟, 余红星, 等. 空间核能液态金属朗肯循环的热力学性能分析 [J]. *工程热物理学报*, 2018, 39(2): 242-248)

作者简介



王洁炜 男, 1998年2月出生于浙江省绍兴市, 2021年本科毕业于东南大学, 现为中国原子能科学研究院硕士研究生, 研究领域为特种动力反应堆热工水力研究。

E-mail: wangjw1998@163.com

吕征 (通信作者) 男, 研究员, 博士, 1977年生, 研究领域为反应堆工程研究。E-mail: carrlvzheng@163.com