

## 空间核电源热电转换技术研究综述

陈金利<sup>1,2</sup>, 薛翔<sup>1,2</sup>, 王园丁<sup>1,2</sup>, 王浩明<sup>1,2</sup>, 杜磊<sup>1,2</sup>, 林庆国<sup>1,2</sup>

(1. 上海空间推进研究所, 上海 201112; 2. 上海空间发动机工程技术研究中心, 上海 201112)

**摘要:** 空间热电转换技术是空间核电源的关键技术之一, 发电功率覆盖瓦级至兆瓦级, 可满足各类航天任务对空间电源的需求, 因此发展空间热电转换技术至关重要。从基本原理、国内外应用情况等方面梳理包括热电偶转换、热离子转换、碱金属转换、磁流体转换、热光伏转换、朗肯循环、斯特林循环和布雷顿循环在内的各种空间核电源热电转换技术研究进展, 总结各种热电转换技术空间应用的技术难点, 分析热电转换技术实现长寿命、免维护基本要求的研发方向, 针对不同空间核电源的功率需求, 提出热电转换技术主导方案。当空间核电源功率需求小于100 kWe时, 建议采用热电偶转换或热离子转换等静态热电转换技术; 当功率需求超过100 kWe时, 应采用布雷顿循环等动态热电转换技术。

**关键词:** 空间核电源; 热电转换; 静态转换; 动态转换; 性能提升

中图分类号: V439.5

文献标志码: A

文章编号: 1672-9374(2024)04-0042-13

## Review on thermoelectric conversion technology for space nuclear power

CHEN Jinli<sup>1,2</sup>, XUE Xiang<sup>1,2</sup>, WANG Yuanding<sup>1,2</sup>, WANG Haoming<sup>1,2</sup>, DU Lei<sup>1,2</sup>, LIN Qingguo<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Engineering Research Center of Space Engine, Shanghai 201112, China;

2. Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China)

**Abstract:** Space thermoelectric conversion technology is one of the key technologies of space nuclear power. The conversion system covers watt level to megawatt level, which can meet the requirements of space power supply for various space missions. Therefore, it is crucial to develop the space thermoelectric conversion technology. The basic principles and domestic and overseas research progress of the thermoelectric conversion technology for space nuclear power were presented, including thermocouple, thermionics, alkali metal thermal to electric converter (AMTEC), magnetohydrodynamic, thermophotovoltaic, Rankine cycle, Stirling cycle and Brayton cycle. The technical difficulties in space application of various thermoelectric conversion technologies were summarized. Meanwhile, the development direction of thermoelectric conversion technology to realize the basic requirements of long-life and maintenance-free was proposed. Finally, according to the power requirements of different space nuclear power, a leading scheme of thermoelectric conversion technology was put forward. When the

收稿日期: 2023-02-01 修回日期: 2023-03-05

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划(19DZ1206502)

作者简介: 陈金利(1993—), 博士, 工程师, 研究领域为空间高效热电转换技术。

引用格式: 陈金利, 薛翔, 王园丁, 等. 空间核电源热电转换技术研究综述[J]. 火箭推进, 2024, 50(4): 42-54.

CHEN J L, XUE X, WANG Y D, et al. Review on thermoelectric conversion technology for space nuclear power[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2024, 50(4): 42-54.

power requirement of space nuclear power is less than 100 kWe, it is recommended to use static thermoelectric conversion technologies such as thermocouple conversion and thermionic conversion. When the power requirement exceeds 100 kWe, dynamic thermoelectric conversion technologies such as the Brayton cycle should be used.

**Keywords:** space nuclear power; thermoelectric conversion; static conversion; dynamic conversion; performance improvement

0 引言

随着人类航天活动范围不断拓展,日益丰富的航天任务对空间电源提出了更高要求<sup>[1]</sup>。常用的空间电源有 3 类<sup>[2]</sup>:①化学电源,例如锂电池、锌银蓄电池和氢氧燃料电池等;②太阳能光伏-蓄电池联合电源;③核电源,例如放射性同位素电源(radioisotope thermoelectric generator, RTG)、采用热电转换技术的空间反应堆电源等。在这 3 类空间电源中,核电源的输出功率覆盖瓦级到兆瓦级范围,不受环境影响,可在恶劣环境中服役,能够满足绝大部分航天任务需求,是深空探测用航天器的唯一电源,具有广阔的发展和应用前景。

空间热电转换单元作为核电源的核心部件,需要具备长寿命、高可靠、高转换效率等技术特点<sup>[3]</sup>。与地面应用的热电转换单元不同,空间热电转换单元还需要适应微重力、散热条件差等环境,因此研

制难度更大。

空间热电转换按转换形式可分为静态转换和动态转换两类。静态转换直接利用热电装置产生电能,系统内无旋转部件,包括热电偶转换、热离子转换、碱金属转换、磁流体转换和热光伏转换等。动态转换包括朗肯循环、斯特林循环和布雷顿循环等<sup>[4]</sup>。动态转换具有效率高、发电功率大等优势,但由于存在运动部件、气体密封难及振动较高等原因,研制难度较大。

20 世纪 50 年代开始,世界上主要航天强国都竞相开展了核电源的研制工作,各种空间核电源热电转换技术对比如表 1 所示<sup>[5-7]</sup>。其中,热电偶转换技术成熟度最高,被广泛应用于放射性同位素电源和空间核反应堆电源中<sup>[8]</sup>。但其功率和比功率较小、转换效率低,无法胜任更高功率需求的航天任务。其余热电转换技术功率、比功率和转换效率高,但技术成熟度不够,相关关键技术有待突破,还需进一步投入研发。

表 1 各种空间热电转换技术对比

Tab. 1 Comparison of various space thermoelectric conversion technologies

参数及型号	热电偶转换	热离子转换	碱金属转换	磁流体转换	热光伏转换	朗肯循环	斯特林循环	布雷顿循环
功率范围/ kWe	0.001 ~ 5	5 ~ 1 000	0.01 ~ 100	> 1 000	0.01 ~ 1.0	10 ~ 1 000	1 ~ 100	5 ~ 1 000
热电转换 效率/%	< 7	< 21	20 ~ 40	40 ~ 65	15 ~ 40	20 ~ 30	15 ~ 40	20 ~ 36
比功率/ (W · kg <sup>-1</sup> )	< 5	5 ~ 30	30 ~ 40	100 ~ 500	5 ~ 20	1 ~ 200	3 ~ 50	30 ~ 100
循环热端 温度/K	600 ~ 1 300	1 100 ~ 2 000	900 ~ 1 300	> 1 800	1 200 ~ 2 000	900 ~ 1 500	900 ~ 1 123	1 000 ~ 1 500
代表性 型号/项目	MHW-RTG MMRTG BUK	TOPAZ- I TOPAZ- II SPACE-R	PX SAIRS	-	-	SNAP-50 MPRE	SP-100 SRG110	BRU TEM
技术成熟度/ 最初研制时间	9 级/1956 年	9 级/1965 年	6 级/1993 年	4 级/1970 年	4 级/1993 年	5 级/1965 年	7 级/1984 年	6 级/1968 年

现有文献主要针对一种特定的热电转换技术进行研究现状的总结,尚缺乏对多种热电转换技术的全面总结与技术分析比较。本文重点围绕空间核电源热电转换技术,概述了 8 种热电转换技术的研究进展和发展趋势,针对当前热电转换技术空间应用的技术难点,总结了热电转换技术实现长寿命和免维护基本要求的研发方向。在此基础上,根据不同功率的空间核电源任务需求,提出了热电转换技术优先发展类型,为后续空间核电源的研发提供参考。

## 1 静态转换

由于系统内部没有运动部件,静态热电转换具有运行可靠、使用寿命长等优点,是最早实现空间应用的热电转换类型,更大的发电功率和更高的发电效率是静态热电转换的发展方向。

### 1.1 热电偶转换

热电偶转换(thermoelectrics)利用半导体温差电材料的赛贝克效应(Seebeck effect),将热源的热能直接转换为电能,热电转换效率可达 7%。在空间热电偶转换技术领域,美、俄两国一直处于国际领先,发展水平相当,但技术路线不同,美国几乎全部使用 $^{238}\text{Pu}$ 作为热源(放射性同位素热源),而俄罗斯(苏联)的空间热电偶转换技术应用大多采用核反应堆作为热源<sup>[9]</sup>。

美国已经发射 40 余个带同位素电源(RTG)的航天器<sup>[10]</sup>。其中,百瓦级的 RTG(MHW-RTG)热电转换材料选用 SiGe 高温材料,电功率达到 170 We,热端温度超过 1 000 ℃,成功应用在“旅行者 1 号”航天器上,寿命超过 43 a<sup>[9]</sup>。电池结构可靠性提升的 MMRTG,环境适应性更强,已成功应用于“好奇号”“毅力号”等火星车,如图 1 所示<sup>[10-11]</sup>。MMRTG 项目采用 PbTe/(TAGS 85, PbSnTe)中温热电转换材料,热端温度为 525 ℃,电池效率为 6%,电功率约为 120 We,设计寿命超过 17 a<sup>[12-13]</sup>。

苏联于 1970—1988 年间发射了 33 颗 BUK 型轨道核电源,采用液态金属冷却快堆与热电偶转换相结合的路线,设计输出功率为 5 kWe,系统质量为 1 250 kg,发电效率约为 5%<sup>[5]</sup>。我国于 1971 年研制成功第一个同位素电源,热源燃料为 $^{210}\text{Po}$ ,输出功率为 1.4 We,转换效率为 4.2%,同时开展了地面试

验<sup>[14]</sup>。我国第一个 $^{238}\text{Pu}$ 同位素电源于 2006 年研制成功,电源功率为 0.37 We,转换效率为 3.3%,热端温度为 153.8 ℃。2018 年,我国自主研制的 $^{238}\text{Pu}$ 同位素电源成功应用于“嫦娥 4 号”月球巡视器,该电源的输出功率约为 3.5 We<sup>[15]</sup>。

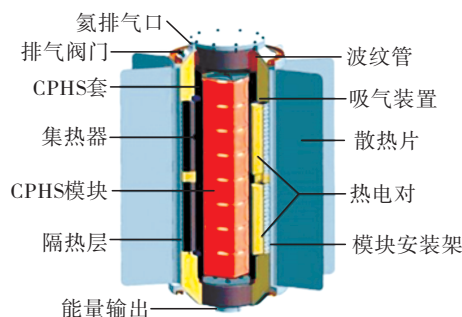


图 1 “好奇号”火星车同位素电源

Fig. 1 Isotope power supply of “Curiosity”

热电材料的性能(由热电优值 ZT 表示)及工作温差决定了热电偶转换的最大理论效率,对于空间应用的热电转换系统,由于空间散热条件限制,空间热电偶转换需要采用工作温区在 300 ~ 1 000 ℃的中高温热电材料,研发高性能的中高温热电材料是当前研究重点。目前,美国开发的高温热电材料 n 型 $\text{La}_3\text{Te}_4$ 、p 型 $\text{Yb}_{14}\text{MnSb}_{11}$ 及中温热电材料 $\text{CoSb}_3$ 基填充方钴矿,其最大 ZT 值均要比传统材料提升 50% 以上<sup>[9]</sup>。为提升空间热电偶转换性能,还需开展以下几方面研究<sup>[16-18]</sup>。

1) 通过开发热电材料制备新技术(如熔融旋甩、感应熔炼、多原子填充、原位复合等),制备 ZT 值更大、高温稳定性更好的热电材料。

2) 完善设计方案,采用基于有限元的三维计算方法,实现器件热流、电流等全参数三维仿真模拟,获得最优结构设计集成方案。

3) 提高热电材料的力学性能和抗辐照损失性能,实现更好的热电偶转换性能稳定性。

为满足后续航天任务需求,热电偶转换技术还应重点关注如何提高系统发电功率。

### 1.2 热离子转换

热离子转换(thermionics)的原理图如图 2 所示<sup>[19]</sup>。工作时,发射极被核反应堆加热至高温从而发射电子,自由电子克服电极表面功函数的能量,飞跃电极间隙达到接收极,发射极与接收极形成回

路,成为电源的两极。发射极与接收极之间的间隙小于 1 mm,且充满铯蒸气,能够消除电子运输的势垒、减少发射极材料蒸发损耗,提高输出功率。当发射极温度为 2 000 K 时,热离子转换的理论效率可达 21%。

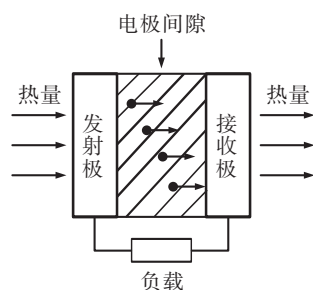


图 2 热离子转换原理图

Fig. 2 Schematic diagram of thermionics

苏联于 1987 年发射了 TOPAZ- I 轨道核反应堆电源,如图 3 所示<sup>[19]</sup>。该核反应堆电源采用热离子转换方式,输出功率为 5 kWe,热功率为 150 kWt,系统质量为 1 200 kg,热端温度为 1 800 K,冷端温度为 880 K,在轨运行了 6 m<sup>[20]</sup>。在 TOPAZ- I 的基础上,苏联开发了 TOPAZ- II 空间核反应堆电源。与 TOPAZ- I 相比,TOPAZ- II 采用单节热离子原件,能够在发射前进行电加热试验。TOPAZ- II 的最大电功率为 5.5 kWe,热功率约为 125 kWt,系统质量为 1 061 kg。热离子核反应堆是目前俄罗斯的主要研究方向,包括目前仍在研制的大功率热离子空间核反应堆 Gerkules 空间核动力拖船<sup>[21]</sup>。

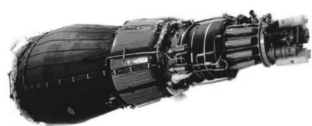


图 3 TOPAZ 系列轨道反应堆电源

Fig. 3 TOPAZ orbital reactor power supply

美国于 1992 年引进了俄罗斯的 TOPAZ- II 核反应堆电源,在此基础上设计出了 SPACE-R,其设计功率为 40 kWe<sup>[22]</sup>。德国于 1971 年开始研制采用热离子转换技术的空间核反应堆电源(ITR),设计功率为 20 ~ 200 kWe,发射极温度为 1 800 K,接收极温度约为 950 K,效率为 9%<sup>[23]</sup>。20 世纪 70 年代开始,我国原子能科学院对热离子热电转换技术进

行了相关研究,开展了热离子转换器反应堆堆内和堆外试验,试验运行时间超过 270 h。试验结果表明:堆内试验中,热离子转换器的最大功率密度为 5.6 We/cm<sup>2</sup>,电极效率为 8%,发射极温度为 1 540 ℃;堆外试验中,最大功率密度为 7.8 We/cm<sup>2</sup>,电极效率为 12.7%,发射极温度为 1 600 ℃<sup>[24]</sup>。当前的研究重点为如何提高热离子转换器的使用寿命。

热离子发电元器件是热离子转换的关键器件,高效率、长寿命和高可靠性是空间热离子反应堆电源的发展方向。提升热离子发电元器件性能,还需开展以下研究<sup>[25-26]</sup>。

1)增强发射极热电子发射特性。通过采用在发射极材料上沉积低功函数材料(如铯、钡)、电极表面的微/纳结构化、在发射极上引入量子阱效应等一系列方法,降低发射极电子发射势垒。

2)降低空间电荷效应。通过在极间引入铯离子、采用负电子亲和势阴极和三极管结构以及引入分子辅助电荷运输等方法,降低空间电荷效应,提高热离子转换效率。

3)优化接收极特性。采用低功函数接收极材料,同时增加接收极表面积和极间等离子体密度,提高热电转换效率。

4)提高发电组件使用寿命。采用纳米材料代替传统金属材料,例如石墨烯、掺氮金刚石等,提高发电组件在高温环境下的使用寿命。

### 1.3 碱金属转换

碱金属转换(alkali metal thermal to electric convertor, AMTEC)是一种以碱金属为循环工质、以  $\beta''$ 氧化铝固体电解质为离子选择性渗透膜的热电转换方式,如图 4 所示。液态金属钠在蒸发器中被加热成过热钠蒸气,在 BASE/阳极发生电离产生  $\text{Na}^+$  和  $\text{e}^-$ ;由于 BASE 的选择渗透性, $\text{Na}^+$  通过 BASE 直接从阳极达到阴极,电子则从外电路通过,产生电能; $\text{Na}^+$  和  $\text{e}^-$  则在 BASE 阴极重新结合成钠原子,通过冷凝器冷凝成低温低压的液态金属钠(20 ~ 60 Pa);液态金属钠在电磁泵或吸液芯的作用下形成高压液态金属钠(40 ~ 80 kPa),进入蒸发器,开始下一个循环<sup>[27]</sup>。循环热端温度为 900 ~ 1 300 K,冷端温度为 400 ~ 800 K,热电转换效率为 20% ~ 40%<sup>[28]</sup>。

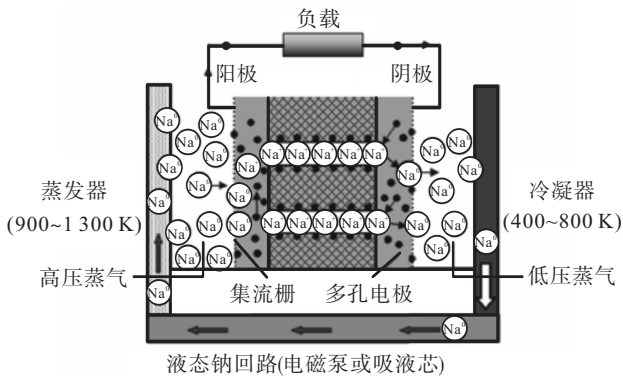


图 4 AMTEC 工作原理图(工质-金属钠)

Fig. 4 Working principle diagram of AMTEC  
(working medium-metallic sodium)

1993 年起,美国研发了面向空间应用的单管碱金属热电转换元器件(pluto express),采用放射性同位素热源,发电功率为 10 We ~ 1 kWe,效率为 14% ~ 25%<sup>[29]</sup>。1994 年,中科院电工所与硅盐所合作,开展了单管钠工质碱金属热电转换器件试验,累计运行了 17 h,发电 5.7 h,峰值功率达 8.85 We,功率密度为 0.7 We/cm<sup>2</sup><sup>[30]</sup>。1996 年,俄罗斯分别提出了基于 Li 工质的 AMTEC 概念和基于可变导热管的 AMTEC 概念<sup>[31-32]</sup>。2004 年,美国开发了空间碱金属反应堆系统(SAIRS),采用液态金属钠冷堆,设计功率为 111 kWe,转换效率为 22.7% ~ 27.3%<sup>[6, 33]</sup>,系统比功率为 29.7 ~ 34.8 We/kg。近几年,哈尔滨工程大学、华北电力大学、重庆大学和西北核技术研究所等研究机构开展了一系列碱金属热电转换技术研究,以系统设计和原理验证试验为主。

虽然 AMTEC 具有热端温度低、转换效率高等优点,但热电转换元器件的性能衰减问题仍没有解决。比如 PX-3A 器件在运行 18 000 h 后,最大功率约减少 50%<sup>[34]</sup>,这使得碱金属热电转换技术难以满足空间电源长期免维护的要求。为了提高碱金属热电转换的运行稳定性,还需开展以下研究<sup>[28, 35-36]</sup>。

1) 选择性能更稳定的结构材料,例如采用铌、钼、钽等难熔金属,提高元器件的使用寿命。

2) 提高 BASE 材料的性能稳定性,选择离子电导率适中的 BASE 材料,并添加稳定剂。

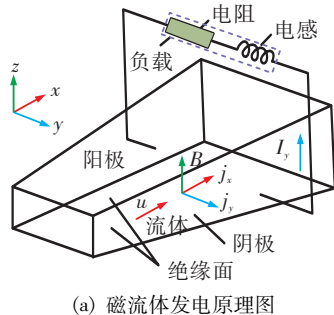
3) 提高电极材料性能稳定性,比如选用晶粒增长缓慢的难熔合金。

4) 适当降低运行最高温度,提高 BASE 和电极的使用寿命。

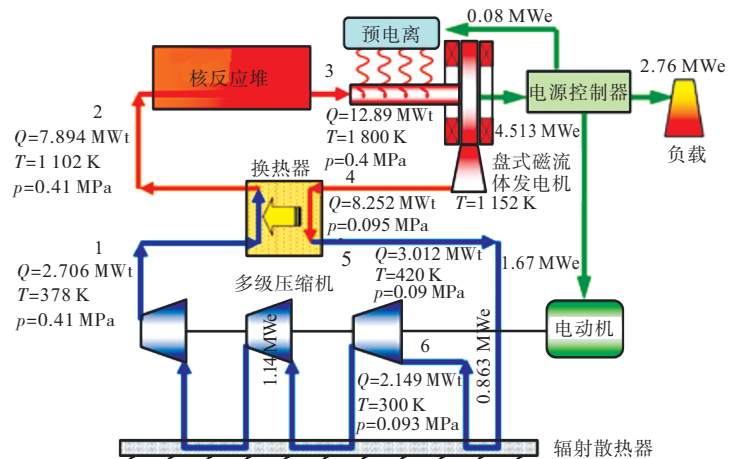
5) 开发基于液态电极的新型 AMTEC 元器件,从根本上解决电极衰退问题。

#### 1.4 磁流体转换

磁流体转换(magnetohydrodynamic, MHD)的原理比较简单,如图 5(a)所示。当等离子体穿过磁场时,会在磁场的正交方向上产生电场,将流体的动能转换成外接负载电能<sup>[37]</sup>。整个磁流体热电转换系统包括预电离装置、热交换器、压缩机以及核反应堆,如图 5(b)所示<sup>[38]</sup>。一般地,工质只有在被加热到 1 800 K 以上时,才会发生电离。磁流体转换通常采用氦气作为循环工质,在电离区会加入少量氙气以提高工质电离能力并增强电导率<sup>[39]</sup>。当热端温度为 2 500 K 时,磁流体转换的理论效率可达 65%。



(a) 磁流体发电原理图



(b) 磁流体发电系统性能参数图(热源功率 5 MWe)

图 5 磁流体热电转换系统原理图

Fig. 5 Schematic diagram of MHD thermoelectric conversion system



根据发电通道几何形状,磁流体发电机可分为直线型和盘式两类。盘式磁流体发电机结构紧凑、效率高,更适用于大型航天器(电功率  $> 1 \text{ MWe}$ )<sup>[40]</sup>。1970 年,美国西屋公司提出了一种基于火箭飞行器用核引擎(nuclear engine for rocket vehicle application, NERVA)反应堆的磁流体发电系统,循环工质为 He/Xe 混合气体。当热端温度为 2 500 K,发电功率为 5 MWe 时,系统的发电效率为 65%、比功率为  $200 \text{ We/kg}$ <sup>[41]</sup>。NASA 在此基础上论证了当加热功率达到 100 MW、热端温度为 2 500 K、冷端温度为 500 K 时,系统发电效率为 40%、比功率为  $909 \text{ We/kg}$ <sup>[42]</sup>。日本相关研究机构针对 5 MWt 热功率的核热源,开展了空间闭式磁流体发电系统循环分析。当热端温度为 1 800 K 时,系统循环效率可达 55.2%。当系统输出功率大于 3 MWe 时,系统比功率可大于  $500 \text{ We/kg}$ <sup>[7]</sup>。国内的研究大多聚焦于磁流体热电转换系统性能分析与优化。2022 年,清华大学研究人员开展了热功率 1 MWt 的空间核能磁流体发电系统性能分析,实现了系统循环效率 46.15% 和比功率  $105 \text{ We/kg}$ <sup>[39]</sup>。

目前空间磁流体热电转换技术还处于理论研究与方案论证阶段,为加快磁流体热电转换技术的空间应用,还需开展以下研究<sup>[37, 40, 43]</sup>:

1) MHD 通道内部机理探究,采用理论分析、数值模拟及试验相结合的手段对磁流发电涉及的电磁场、流场和温度场三者耦合的多物理场进行仿真;

2) 系统的高温运行稳定性提升,研发性能优越的高温材料,突破高温高效换热器技术;

3) 充分开展试验研究,突破空间磁流体发电关键技术,包括等离子体稳定性技术、等离子体物理参数测量技术、精确构型发电通道加工技术等,解决工程化问题。

### 1.5 热光伏转换

热光伏转换(thermophotovoltaic, TPV)是通过光伏电池将热辐射部分能量转换为电能的一种热电转换方式,其结构示意图如图 6 所示<sup>[44]</sup>。热光伏器件由热发射器和光伏电池组成,发射器从外部接收热流并转换成辐射能流传递给光伏电池表面。对于光伏电池,当入射能量高于禁带宽度时,电子空穴会被激发到高能态,产生电能。一般地,改变发射器的辐射特性和真空间隙尺寸,能够改变热光伏

器件的输出特性<sup>[45]</sup>。当热端温度为 2 000 K 时,热光伏转换的效率可达 40%。

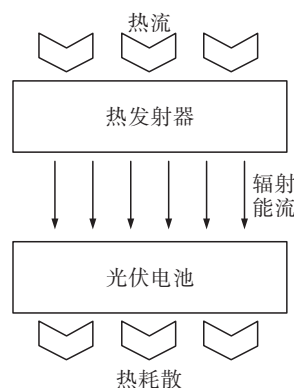


图 6 热光伏器件结构

Fig. 6 Thermal photovoltaic device structure

20 世纪 90 年代,美国提出了基于放射性同位素热源的热光伏发电系统,实现了系统比功率大于  $15 \text{ We/kg}$ <sup>[46]</sup>。2003 年,NASA 开发了一个  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$  的热光伏发电模块,模块由 25 个串联的 InGaAs 子电池组成,热源温度为 1 350 K,输出电功率为 50 We,发电效率为 18% ~ 20%,最大比功率约为  $17 \text{ We/kg}$ <sup>[47]</sup>。限制热光伏转换系统比功率进一步提升的瓶颈在于散热器质量,光伏电池需要采用大面积散热器来维持电池元件在较低温度环境工作<sup>[48]</sup>。

热光伏电池在核反应堆中子辐射下的性能衰减是一直以来的研究热点。美国海军研究实验室(NRL)对热光伏电池进行了中子辐射试验,在连续运行 14 年后,热光伏电池性能只退化了 20%<sup>[48]</sup>。2015 年,在国防先进研究计划局(DARPA)的资助下,研究人员使用  $^{238}\text{Pu}$  和  $^{244}\text{Cm}$  两种放射性同位素源对 0.6 eV InGaAs 电池进行衰减试验测试,每年电池性能衰退不到 1%<sup>[49]</sup>。

下一代用于空间的放射性同位素热光伏电源旨在提高系统的比功率,为了实现更高比功率,还需开展以下研究<sup>[5, 44, 50]</sup>:

1) 辐射器和光伏组件的性能提升,开展辐射器与光伏组件之间的光谱匹配研究,辐射器可采用稀土化合物、光子晶体等材料,也可设计滤光片和反射器的方案;

2) 新型热光伏转换器开发,包括近场热光伏转

换器和热光子转换器、光管热光伏转换器、热离子-光伏耦合转换器等;

3) 热光伏系统整体优化设计, 以比功率和转换效率为目标, 优化热光伏热电转换系统整体结构和尺寸。

## 2 动态转换

动态热电转换具有发电功率大、热电转换效率高等优势, 广泛应用于地面发电系统。而长寿命、免维护运行是动态热电转换实现空间应用的基础, 也是今后动态热电转换的研制方向。

### 2.1 朗肯循环

朗肯循环(Rankine cycle)用于空间热电转换系统时, 一般使用液态碱金属为循环工质(如钠、钾), 循环包括等压加热(工质从热源吸热)、等熵膨胀(工质膨胀做功)、等压冷凝(工质冷却)和等熵压缩(工质被加压)等过程, 如图7所示<sup>[51]</sup>。当热源温度为900~1500 K时, 朗肯循环具有较好的循环特性和经济性, 系统理论效率为20%~30%。

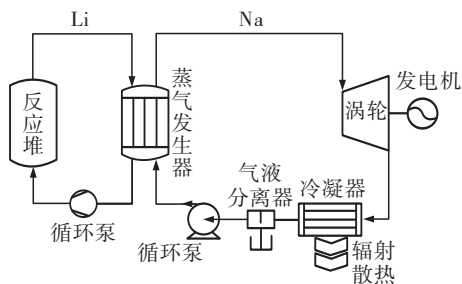


图7 液态金属朗肯循环

Fig. 7 Liquid metal Rankine cycle

20世纪60年代, 美国橡树岭实验室(ORNL)开始研究空间应用的液态金属朗肯循环, 其中项目 SNAP-1 (发电功率500 We)、SNAP-2 (发电功率3 kWe)、SNAP-8 (发电功率30~60 kWe) 是以汞作为工作介质<sup>[52]</sup>。SNAP-50/SPUR项目使用液态金属钾作为二回路循环做功工质, 一回路冷却工质为金属锂, 系统发电功率为300~1200 kWe, 循环最高温度为1365 K, 最大压力为1.05 MPa<sup>[53]</sup>。ORNL还进行了中等功率反应堆试验(MPRE)计划, 采用钾冷却技术, 系统曾2次成功运行超5000 h, 最大功率为150 kWe<sup>[54]</sup>。2002年, 美国相关研究人员论证了一个15 MWe的液态金属朗肯循环系统(工质为金属钾), 系统设计的发电效率为

25.4%, 比功率约为155.5 We/kg<sup>[55]</sup>。20世纪90年代开始, 我国多个高校和研究所开始了空间朗肯循环的研究, 包括工质传热特性研究、关键部件设计和系统优化仿真等<sup>[56-57]</sup>。

由于朗肯循环中两相流传热效果好, 需要散热器的面积较小, 宜作为空间高功率电源的热电转换方式(千瓦级和兆瓦级空间电源)。为加快朗肯循环热电转换技术的空间应用, 还需开展以下研究<sup>[5, 51, 58]</sup>:

1) 空间应用环境中液态金属传热特性研究, 特别是微重力环境下工质的相变传热特性理论与试验验证, 突破液态金属高效相变传热技术, 完成液态金属空间两相流系统论证;

2) 微重力环境下工质气液分离技术研究以及涡轮叶片对液态金属防侵蚀技术研究, 提高系统运行稳定性;

3) 优化空间用朗肯循环系统方案及各关键部件的结构与尺寸, 提高系统效率和比功率。

由于空间微重力环境增加了相变传热和气液分离的难度, 朗肯循环热电转换系统更适用于地外天体星表基地。系统的功率、质量和尺寸等参数, 则要参考火箭的运载能力和任务需求。

### 2.2 斯特林循环

斯特林循环(Stirling cycle)包括等温膨胀、等容冷却、等温压缩和等容加热4个过程<sup>[59]</sup>。图8为Sunpower公司设计的先进斯特林发动机能量转换原理示意图, 该发动机由一个配气活塞和一个动力活塞组成, 两个活塞反复运行, 将热能转换成电能。过程1→2为工质从外部热源吸热, 进行等温膨胀, 对外做功; 过程2→3为工质等容冷却过程, 将热量通过回热器传递给低温工质; 过程3→4为工质等温压缩过程, 将热量排至外界; 过程4→1为工质等容加热过程, 工质从回热器中吸热热量。当热端温度为1123 K时, 斯特林循环的发电效率可达38%。

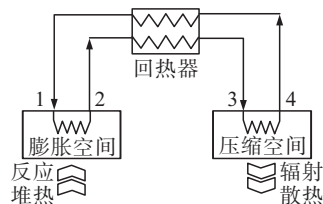


图8 斯特林发动机能量转换示意

Fig. 8 Energy conversion of Stirling engine

1984 年, NASA 提出了首个用于空间电源的斯特林发动机 (SP-100), 受材料限制热源温度为 630 K, 运行平均压力为 15 MPa, 运行超过 400 h, 发电功率为 17 kWe。在此基础上, 将热源温度提升至 1 050 K, 发电效率提高到 22%, 运行时间超过 1 500 h<sup>[60]</sup>。当前技术应用最为成熟的是热管堆与斯特林转换器结合的 Kilopower 核反应堆, 采用 Sunpower 公司生产的 ASE-E2 自由活塞斯特林发电机, 系统质量约为 400 kg, 电功率为 1 ~ 10 kWe, 发电效率为 24%, 期望寿命 15 a, 并于 2015 年进行了更加系统性的试验“KURSTY”<sup>[5]</sup>。

20 世纪 90 年代, NASA 还开发了用于放射性同位素热源的斯特林发动机, 发电功率约为 100 We。例如用于 SRG110 项目的斯特林发动机, 单台输出功率为 55 We, 运行时间超过 26 000 h, 系统比功率为 3.6 We/kg<sup>[61]</sup>; Sunpower 开发的斯特林发动机, 热端运行温度为 1 123 K, 冷端运行温度为 362 K, 发电功率为 160 We, 发电效率为 38%, 比功率大于 8 We/kg<sup>[62]</sup>。1975 年以来, 中船重工 711 所研制了一系列斯特林特种发动机, 应用于舰船发动机系统, 并于 2022 年研制成功 320 kWe 大缸径斯特林发动机, 转换效率为 40%。2010 年至今, 中科院理化所成功研制了 10 kWe、15 kWe 和 60 kWe 级的斯特林发动机, 热电效率超过 35%。

当前空间用斯特林发动机还处在概念设计和样机试验阶段, 斯特林发动机有运动部件、工作压力高, 难以实现长寿命运行, 其振动也会影响航天器工作, 为加快斯特林发电系统的空间应用, 还需开展以下研究<sup>[63-65]</sup>。

1) 提高斯特林发动机性能, 提升热端温度适应能力, 突破长寿命间隙密封技术和悬浮轴承技术, 提高系统稳定性。

2) 研制可靠性和功率水平更高的热管裂变反应堆, 提高系统比功率。

3) 开发新型斯特林发动机, 例如鲁棒斯特林发电机 (SRSC)。

斯特林循环热电转换系统是当前最有可能率先实现空间应用的动态热电转换系统, 关键在于提高系统运行寿命与发电功率。

### 2.3 布雷顿循环

布雷顿循环 (Brayton cycle) 包括绝热压缩、等

容加热、绝热膨胀和等容冷却 4 个过程 (如图 9 所示)<sup>[66]</sup>。用于空间热电转换的是闭式布雷顿循环系统, 常用工质为 He/Xe 混合气体。其中, 空间核反应堆为系统提供热源, 系统散热通常采用辐射散热器。当热端温度为 1 500 K 时, 布雷顿循环的发电效率可达 36%。

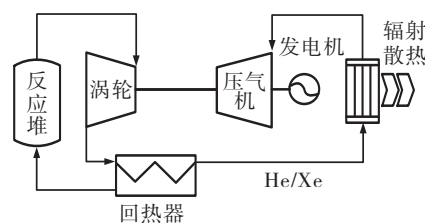


图 9 空间闭式布雷顿循环系统图

Fig. 9 System diagram of space closed Brayton cycle

最早将布雷顿循环用于空间应用的是 NASA 的 BRU 项目, 该项目研制的布雷顿循环核心机的发电功率为 2 ~ 10 kWe, 热端温度为 1 114 K, 冷端温度为 300 K, 发电效率为 32%, 试验运行超过 50 000 h<sup>[67]</sup>。Mini-BRU 项目则研制了发电功率为 0.5 ~ 2 kWe 的布雷顿循环核心机, 发电效率为 30%<sup>[68]</sup>。后来, 这些核心机也成功应用于 SD 项目的地面测试中。2002 年, 美国开启木星冰卫星轨道器 (JIMO) 计划, 任务是开发发电功率为 200 kWe 的空间反应堆电源系统, 热电方式采用闭式布雷顿循环<sup>[69]</sup>。JIMO 计划暂停后, NASA 一致致力于开发月球或火星表面的反应堆电源系统, 系统发电功率约为 12 kWe<sup>[70]</sup>。

俄罗斯于 2009 年提出兆瓦级空间核动力飞船 (TEM), 飞船电源系统采用气冷快堆与布雷顿循环结合的方式, 辐射散热器采用液滴式辐射器的设计方案, 同时采用 4 台布雷顿核心机并联, 转换效率为 34%, 输出功率为 1 MWe<sup>[21]</sup>。近年来, 欧盟支持了多个空间核反应堆项目。其中, DEMOCRITOS 空间堆电源项目已经完成 1 MWe 核电推进太空飞船初步设计<sup>[71]</sup>。近年来, 我国北京动力机械研究所和航天六院 801 所均已开展百千瓦级闭式布雷顿循环原理样机研制与测试<sup>[72-73]</sup>, 目前正在研制 250 kW 闭式布雷顿循环原理样机。

当前空间闭式布雷顿热电转换系统的研制处于地面非核演示阶段, 为尽快实现布雷顿热电转换



系统的空间应用,还需开展以下研究<sup>[63, 74]</sup>。

1) 长寿命、免维护悬浮轴承开发,包括高温气浮轴承和悬浮轴承,轴承还需具备强抗冲击能力。

2) 系统核心设备研制,包括用于高温环境下的高速启发一体电机、高温高效低流阻回热器等。

3) 涡轮高温材料开发,要求开发适用于 1 500 K 的涡轮材料,提高系统转换效率。

4) 耦合反应堆的系统调控策略与控制技术开发,实现系统安全、稳定、高效运行。

同朗肯循环、斯特林循环相比,布雷顿循环兼具了两者优势,即系统发电功率大、发电效率高,是一种极具潜力的空间动态热电转换方式,关键在于提高系统运行寿命与发电效率。

### 3 展望

本文介绍了各种空间核电源热电转换技术的基本原理、国内外研究情况和最新进展,分析了各种热电转换技术空间应用的技术难点,今后的研究与发展方向如下。

1) 多样化的航天任务对空间电源的功率需求将覆盖瓦级到兆瓦级。针对不同的功率需求,应采用不同类型的热电转换技术。当空间核电源的需求功率小于 1 kWe 时,建议发展热电偶转换或热光伏热电转换技术,热光伏转换在热电转换效率和比功率等方面具有较大优势,但热电偶转换的热端温度更低,可靠性更好,也是当前应用最为广泛的空间热电转换技术。

2) 当空间核电源的需求功率为 1 ~ 100 kWe 时,发展热电偶转换、热离子转换、碱金属转换和斯特林循环热电转换技术更加合适,其中斯特林循环的热电转换效率和比功率最高,其次是碱金属转换和热离子转换。斯特林循环的最大比功率接近 50 We/kg,碱金属转换和热离子转换的最大比功率分别为 40 We/kg 和 30 We/kg。但斯特林循环的寿命和振动问题、碱金属转换的元器件性能衰减问题始终都没有解决,因此热离子转换是目前最合适的选择。

3) 当空间核电源的需求功率为 100 ~ 1 000 kWe 时,建议发展热离子转换、朗肯循环和布雷顿循环热电转换技术。热离子转换工作寿命有限,朗肯循环虽然比功率最大,但两相流的空间微重力适用性

差。布雷顿循环的效率最高(超过 35%)、热端温度适中,是最合适的选择。当空间核电源的需求功率大于 1 000 kWe 时,磁流体转换是更为合适的热电转换方式。

更大系统比功率、更长运行寿命、更高转换效率是空间核电源热电转换技术的发展目标。当前,空间核电源的应用需突破许多研究难点和关键技术,应充分联合国内航天、核工业及相关优势单位,开展方案论证、技术攻关、地面试验和飞行验证,逐步提高空间核电源的技术成熟度,为未来航天任务的执行提供有力支撑。

### 参考文献

- [1] 刘世超, 李阳, 吴春瑜, 等. 空间核动力平台电力管理系统的设计[J]. 上海航天, 2019, 36(6): 134-140.  
LIU S C, LI Y, WU C Y, et al. Design of power management system at space nuclear power platform [J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2019, 36(6): 134-140.
- [2] 李国欣. 航天器电源系统技术概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2008.
- [3] 杨继材. 空间核电源中的热电转换[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2017.
- [4] 苏光辉, 章静, 王成龙. 核能在未来载人航天中的应用[J]. 载人航天, 2020, 26(1): 1-13.  
SU G H, ZHANG J, WANG C L. Application of nuclear energy in future manned space flight [J]. Manned Spaceflight, 2020, 26(1): 1-13.
- [5] DATAS A, MART A. Thermophotovoltaic energy in space applications: review and future potential [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2017, 161: 285-296.
- [6] EL-GENK M S. Space nuclear reactor power system concepts with static and dynamic energy conversion [J]. Energy Conversion and Management, 2007, 49(3): 402-411.
- [7] HARADA N, KIEN L C, HISHIKAWA M. Basic studies on closed cycle MHD power generation system for space application [C]//35th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference. Reston, Virginia: AIAA, 2004.
- [8] 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.
- [9] 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, 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.
- [10] 马世俊. 空间核动力的进展[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2019.
- [11] 吴伟仁, 王倩, 任保国, 等. 放射性同位素热源/电源在航天任务中的应用[J]. 航天器工程, 2013, 22(2): 1-6.
- WU W R, WANG Q, REN B G, et al. Application of RHU/RTG in space missions [J]. Spacecraft Engineering, 2013, 22(2): 1-6.
- [12] EL-GENK M S, SABER H H. Radioisotope power systems with skutterudite-based thermoelectric converters [J]. Space Technology and Applications International Forum-Staif, 2005, 746(1): 485-494.
- [13] HOLGATE T C, BENNETT R, HAMMEL T, et al. Increasing the efficiency of the multi-mission radioisotope thermoelectric generator [J]. Journal of Electronic Materials, 2015, 44(6): 1814-1821.
- [14] 蔡善钰, 何舜尧. 空间放射性同位素电池发展回顾和新世纪应用前景[J]. 核科学与工程, 2004, 24(2): 97-104.
- CAI S Y, HE S Y. Retrospection of development for radioisotope power systems in space and its prospect of application in new century [J]. Nuclear Science and Engineering, 2004, 24(2): 97-104.
- [15] 宋馨, 陈向东, 雷英俊, 等. 嫦娥四号着陆器月夜热电联供系统设计与验证[J]. 航天器工程, 2019, 28(4): 65-69.
- SONG X, CHEN X D, LEI Y J, et al. Design and verification of heat and electricity cogeneration system in moon night of Chang'e-4 lander [J]. Spacecraft Engineering, 2019, 28(4): 65-69.
- [16] XING Y F, LIU R H, SUN Y Y, et al. Self-propagation high-temperature synthesis of half-Heusler thermoelectric materials: reaction mechanism and applicability [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2018, 6(40): 19470-19478.
- [17] ROGL G, GRYTSIV A, ROGL P, et al. Multifilled nanocrystalline p-type didymium-skutterudites with  $ZT > 1.2$  [J]. Intermetallics, 2010, 18(12): 2435-2444.
- [18] LIU W, BAI S. Thermoelectric interface materials: a perspective to the challenge of thermoelectric power generation module [J]. Journal of Materiomics, 2019(3): 321-336.
- [19] 尹德状. MW 级热离子转换空间核能系统性能分析与优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- YIN D Z. Performance analysis and optimization of MW thermal ion conversion space nuclear power system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [20] 凯贝舍夫. 空间核动力装置中的热离子发射[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2016.
- [21] KOROTEEV A S, OSHEV Y A, POPOV S A, et al. Nuclear power propulsion system for spacecraft [J]. Thermal Engineering, 2015, 62(13): 971-980.
- [22] OFFICE S F F. SPACE-R thermionic space nuclear power system: design and technology demonstration [R]. DOE/SF/19441-T4.
- [23] PRUSCHEK R, GROSS F, STEHLE H, et al. Incore-thermionic-reactor ITR [R]. AED-CONF-71-100-17.
- [24] 曹绳全, 杨继材. 反应堆热离子转换器[J]. 核科学与工程, 1984, 4(3): 227-232.
- CAO S Q, YANG J C. Thermionic converter for space reactor [J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 1984, 4(3): 227-232.
- [25] 钟武辉, 赵守智, 郑剑平, 等. 空间热离子能量转换技术发展综述[J]. 深空探测学报, 2020, 7(1): 47-60.
- ZHONG W Y, ZHAO S Z, ZHENG J P, et al. A review of technology development of thermionic energy conversion for space application [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(1): 47-60.
- [26] 郑光华. 太阳能热电子发电的实验与理论基础研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- ZHENG G H. Experimental and theoretical research on solar thermal electron power generation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [27] 张怡晨, 胡宇鹏, 王泽, 等. 基于 AMTEC 的空间核反应堆电源热力学性能分析[J]. 深空探测学报, 2021, 8(2): 205-212.
- ZHANG Y C, HU Y P, WANG Z, et al. Thermodynamic analysis of space nuclear power system based on AMTEC [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8(2): 205-212.
- [28] 马明阳, 谢奇林, 梁文峰, 等. 用于空间堆的碱金属热电转换技术研究[J]. 航天器工程, 2018, 27(6): 102-111.

- MA M Y, XIE Q L, LIANG W F, et al. Technical research of alkali metal thermo-to-electric conversion for space reactors [J]. *Spacecraft Engineering*, 2018, 27(6): 102-111.
- [29] SIEVERS R, PANTOLIN J, HUANG C D. Advanced AMTEC radioisotope power systems for deep space applications [C]//35th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 2000.
- [30] 张来福. 钠钾工质碱金属热电转换器的基础研究[D]. 北京: 中国科学院电工研究所, 2002.
- ZHANG L F. Basic research on alkali metal thermoelectric converter with sodium and potassium working medium[D]. Beijing: Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, 2002.
- [31] KALANDARISHVILI A G. Working medium circuit for alkali metal thermal-to-electric converters (AMTEC) [C]//Energy Conversion Engineering Conference. New York: [s. n.], 1996.
- [32] LYSENKO G P. Lithium AMTEC with gas-diffusion cathode [C]//Energy Conversion Engineering Conference. New York: [s. n.], 1996.
- [33] EL-GENK M S, TOURNIER J M P. "SAIRS": scalable amtec integrated reactor space power system [J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2004, 45(1): 25-69.
- [34] MERRILL J M, SCHULLER M, HUANG L M. Vacuum testing of high efficiency multi-base tube AMTEC cells [C]//AIP Conference. Albuquerque, New Mexico: AIP, 1998.
- [35] WU S Y, XIAO L, CAO Y D. A review on advances in alkali metal thermal to electric converters (AMTECs) [J]. *International Journal of Energy Research*, 2009, 33(10): 868-892.
- [36] LU X C, LI G S, KIM J Y, et al. Liquid-metal electrode to enable ultra-low temperature sodium-beta alumina batteries for renewable energy storage [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 4578.
- [37] 唐路, 夏琦, 刘保林, 等. 脉冲磁流体发电技术研究进展[J]. *推进技术*, 2022, 43(8): 26-44.
- TANG L, XIA Q, LIU B L, et al. Research progress of pulsed MHD power generation technology [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(8): 26-44.
- [38] LITCHFORD R J, HARADA N. Multi-MW closed cycle MHD nuclear space power via nonequilibrium He/Xe working plasma [C]//Nuclear and Emerging Technologies for Space 2011. Albuquerque, NM: [s. n.], 2011.
- [39] 王志鹏, 吉宇, 石磊. 空间核能磁流体发电系统性能分析及参数优化 [J]. *原子能科学技术*, 2023, 57(2): 284-293.
- WANG Z P, JI Y, SHI L. Performance analysis and parametric optimization of space nuclear power system combined with MHD power generation [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2023, 57(2): 284-293.
- [40] 刘飞标, 朱安文, 唐玉华. 磁流体发电系统在空间电源中的应用研究 [J]. *航天器工程*, 2015, 24(1): 111-119.
- LIU F B, ZHU A W, TANG Y H. Research on MHD power generation system in space electrical power application [J]. *Spacecraft Engineering*, 2015, 24(1): 111-119.
- [41] HOLMAN R, WAY S. Exploring a closed Brayton cycle MHD power system applying NERVA reactor technology [C]//7th Annual Meeting and Technical Display. Reston, Virginia: AIAA, 1970.
- [42] LITCHFORD R, BITTEKER L, JONES J. Prospects for nuclear electric propulsion using closed cycle magnetohydrodynamic energy conversion [C]//39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 2001.
- [43] 周倩倩. 磁流体发电技术浅析 [J]. *可持续发展*, 2018, 293: 25-27.
- ZHOU Q Q. Analysis of magnetic fluid power generation technology [J]. *Sustainable Development*, 2018, 293: 25-27.
- [44] 苏山河, 付彤, 王远, 等. 新型能量转换微器件的热力学特性及研究进展 [J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2021, 60(3): 509-519.
- SU S H, FU T, WANG Y, et al. Thermodynamic properties and research progress of novel energy conversion micro-devices [J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2021, 60(3): 509-519.
- [45] SCHWEDE J W, BARGATIN I, RILEY D C, et al. Photon-enhanced thermionic emission for solar concentrator systems [J]. *Nature Materials*, 2010, 9(9): 762-767.
- [46] SCHOCK A, OR C T, KUMAR V. Modified design of radioisotope thermophotovoltaic generator to mitigate adverse effect of measured cell voltage [C]//31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. Washington, D C: [s. n.], 1996.

- [47] WILT D, WEHRER R, PALMISIANO M, et al. Monolithic interconnected modules (MIMs) for thermophotovoltaic energy conversion [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2003, 18(5): S209-S215.
- [48] WILT D, CHUBB D, WOLFORD D, et al. Thermophotovoltaics for space power applications [C]//AIP Conference. Madrid: AIP, 2007.
- [49] STRAUCH J E, KLEIN A, CHARLES P, et al. General atomics radioisotope fueled thermophotovoltaic power systems for space applications [C]//13th International Energy Conversion Engineering Conference. Reston, Virginia: AIAA, 2015.
- [50] 贺峦轩. 同位素热光伏电池物理设计[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- HE L X. Physical design of isotope thermophotovoltaic cell [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.
- [51] 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.
- ZHANG Z. Simulation analysis and optimization of dynamic thermoelectric conversion system of space nuclear power metal Rankine cycle [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [52] CATALDO R L, BENNETT G L. U. S. space radioisotope power systems and applications: past, present and future [R]. E-18060.
- [53] BEVARD B B. Technology development program for an advanced potassium Rankine power conversion system compatible with several space reactor designs [C]//AIP Conference. Albuquerque, New Mexico: AIP, 2003.
- [54] YODER J, CARBAJO J J, MURPHY R W, et al. Technology development program for an advanced potassium Rankine power conversion system compatible with several space reactor designs [R]. ORNL/TM-2004/214.
- [55] LONGHURST G R, SCHNITZLER B G, PARKS B T. Multi-megawatt power system trade study [C]//Space Technology and Application International Forum: [s. n.], 2002, 608: 1075-1083.
- [56] 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.
- [57] 刘秀婷, 张昊春, 尹德状, 等. 基于液态金属朗肯循环的空间双模式核热推进系统性能分析[J]. *热科学* 与技术, 2020, 19(5): 444-450.
- LIU X T, ZHANG H C, YIN D Z, et al. Performance of space dual-mode nuclear thermal propulsion system based on liquid metal Rankine cycle [J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2020, 19(5): 444-450.
- [58] RICHARD T. LAHEY J, DHIR V. Research in support of the use of Rankine cycle energy conversion systems for space power and propulsion [R]. NASA/CR-2004-213142.
- [59] 张昊春, 冯致远, 蔡书宜, 等. 空间核动力装置斯特林转换系统的热力学性能优化分析[J]. *核动力工程*, 2016, 37(3): 146-151.
- ZHANG H C, FENG Z Y, CAI S Y, et al. Optimizing analysis of thermodynamic performance optimizing analysis of stirling conversion system for space nuclear power installation [J]. *Nuclear Power Engineering*, 2016, 37(3): 146-151.
- [60] BRIGGS M, GIBSON M, GENG S, et al. Development status of the fission power system technology demonstration unit [C]//10th International Energy Conversion Engineering Conference. Reston, Virginia: AIAA, 2012.
- [61] MASON L S, SCHREIBER J G. A historical review of Brayton and Stirling power conversion technologies for space applications [R]. NASA/TM-2007-214976.
- [62] ORITI S M. Advanced Stirling radioisotope generator engineering unit2 (ASRG EU2) final assembly [C]//Nuclear and Emerging Technologies for Space 2015. Albuquerque, NM: [s. n.], 2015.
- [63] 陈杰, 高劭伦, 夏陈超, 等. 空间堆核动力技术选择研究[J]. *上海航天*, 2019, 36(6): 1-10.
- CHEN J, GAO S L, XIA C C, et al. Study on space nuclear power technological option [J]. *Aerospace Shanghai*, 2019, 36(6): 1-10.
- [64] COLLINS J, STANLEY J. Sunpower robust Stirling convertor (SRSC) [C]//Dynamic Power Convertor Technology for Space Power Generation Technical Interchange Meeting. Cleveland: [s. n.], 2018.
- [65] 骆成栋, 罗雨微, 杨伟杰, 等. 美国空间核动力斯特林电源系统技术发展分析[J]. *国际太空*, 2021(6): 44-48.
- LUO C D, LUO Y W, YANG W J, et al. Analysis of technological development of stirling power system for space nuclear power in the United States [J]. *Space International*, 2021(6): 44-48.
- [66] 张秀, 张昊春, 刘秀婷, 等. 回热式闭式空间核能布



- 雷顿循环系统性能分析及优化[J]. 热科学与技术, 2021, 20(1): 79-85.
- ZHANG X, ZHANG H C, LIU X T, et al. Performance analysis and optimization of a closed regenerative Brayton cycle for nuclear space power system [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2021, 20(1): 79-85.
- [67] EVANS R C, KLASSEN H, WINZIG C H, et al. Mechanical performance of a 2 to 10 kilowatt Brayton rotating unit [R]. NASA TM X-2043.
- [68] DOBLER F X. Analysis, design, fabrication and testing of the mini-Brayton rotating unit ( Mini-BRU ) [R]. NASA CR-159441.
- [69] LEE M. A power conversion concept for the Jupiter icy moons orbiter [C]//1st International Energy Conversion Engineering Conference ( IECEC ). Reston, Virginia: AIAA, 2003.
- [70] FULLER R L. Closed Brayton cycle power conversion unit for fission surface power phase I final report [R]. NASA/CR-2010-215673.
- [71] JANSEN B F, BAUER W, MASSON F, et al. DEMOCRITOS demonstrators for realization of nuclear electric propulsion of the European roadmaps MEGAHIT & DiPoP[J]. JSASS Aerospace Tech, 2016, 14 ( 30 ): 225-233.
- [72] 马同玲, 张扬军, 王正, 等. 闭式布雷顿循环发电系统热力过程建模及其参数影响研究[J]. 推进技术, 2022, 43(7): 327-335.
- MA T L, ZHANG Y J, WANG Z, et al. Thermodynamic process modeling and parameter influence of closed brayton cycle power generation system [J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(7): 327-335.
- [73] 薛翔, 杜磊, 王浩明, 等. 闭式布雷顿循环核心机调控过程仿真分析[J]. 火箭推进, 2021, 47(5): 49-55.
- XUE X, DU L, WANG H M, et al. Simulation analysis of adjustment and control process for core machine in closed Brayton cycle [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2021, 47(5): 49-55.
- [74] 张泽, 薛翔, 王园丁, 等. 空间核动力推进技术研究展望[J]. 火箭推进, 2021, 47(5): 1-13.
- ZHANG Z, XUE X, WANG Y D, et al. Prospect of space nuclear power propulsion technology [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2021, 47(5): 1-13.