

基于AMTEC的空间核反应堆电源热力学性能分析

张怡晨, 胡宇鹏, 王 泽, 朱长春, 胡绍全, 李思忠

(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 绵阳 621999)

摘 要: 随着深空探测任务不断推进, 空间探测器对于动力的需求也在不断提升, 基于碱金属热电转换器(Alkali Metal Thermal to Electric Converter, AMTEC)的空间核反应堆电源系统由于其自身优良的特性被广泛关注。基于热力学第一和第二定律, 结合空间核反应堆电源系统内部热力过程能量传递特性, 建立了电源系统整体热力学分析模型和针对内部反应堆、蒸发器、BASE、冷凝器等6个控制单元的能量传递及焓分析数学模型, 讨论了反应堆堆芯温度和输出电流密度对整个电源系统和内部各控制单元性能的影响规律。仿真研究结果表明: 堆芯温度增加, 空间核反应堆电源系统输出电功率和焓效率增加; 随着输出电流密度的增大, 输出电功率和焓效率先增大后降低, 出现最大值; 不同的堆芯温度对应了使系统性能最优的输出电流密度; 经过对比分析各控制单元焓损失的影响规律, 发现焓损失较大的部件为冷凝器和蒸发器。可为空间核反应堆电源系统设计和优化提供前期理论支撑。

关键词: 空间核电源; 碱金属热电转换器; 热力学分析; 焓损失

中图分类号: V439+5

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2021)02-0205-08

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2020.20200045

引用格式: 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(中英文), 2021, 8(2): 205-212.

Reference format: 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.

引 言

随着人类对太空认识的深入, 深空探测任务对大功率(数十千瓦至数兆瓦)空间电源的需求也越来越迫切。而传统太阳能电池阵的功率上限为50 kW, 并且难以提供连续稳定的电功率。近年来, 空间核反应堆电源由于具有不依赖太阳、全天候连续工作、能量密度高、环境适应性好等优点成为大功率空间电源研究的重点^[1]。空间核反应堆电源主要由反应堆、热电转换器和散热器等分系统组成, 如图1所示, 其通过持续的链式裂变反应, 产生连续、高能量密度的热量, 热量在热电转换器中转换为电功率, 剩余热量由散热器排除以保证电源稳定工作^[2]。

热电转换器作为空间核反应堆电源中的核心部件, 工作方式的设计至关重要, 主要包括以下两种方式: 动态转换和静态转换。对于动态转换方式, 核裂变所产生的热能先被转换成机械能, 然后通过交流发电机将机械能转换为电能, 目前研究主要集中在朗肯循环、布雷顿循环和斯特林循环^[3-5]。这类转换方式的

转换效率可达20%以上, 但运动部件引起的可靠性问题是制约其在空间大规模应用的主要原因^[6-7]。静态转换方式不需要机械部件即可直接将热能转换为电能。由于不存在运动部件, 其可靠性较高, 并且比体积和比体重小^[8]。可用于空间的常见静态转换主要有温差发电器、热离子热电转换器和碱金属热电转换器。前两类已经成功应用于空间电源(SNAP-10A、BUK、Topaz等核反应堆电源), 但转换效率低(温差发电效率为4%~6.8%, 热离子发电效率为5.5%~10%), 若将其用于大功率能量系统, 质量和体积配额较大, 不具备大功率的拓展能力^[9]。碱金属热电转换器(Alkali Metal Thermal to Electric Converter, AMTEC)的热电转换效率可达18%~30%, 是一种兼具静态和高热电转换效率的发电机, 并且AMTEC热端工作温度范围一般在900~1300 K, 与核反应堆热源匹配度较高。基于AMTEC的空间核反应堆电源系统(以下简称空间堆电源系统)在深空探测中有着巨大的应用潜力, 受到广泛的关注^[10-11]。

收稿日期: 2020-07-11 修回日期: 2020-08-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51706213); 民用航天技术预先研究资助项目(D020216)

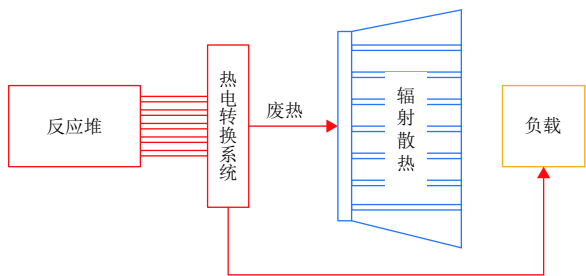


图1 空间核反应堆电源系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of space nuclear power system

空间堆电源系统在结构组成、能量传递及转化都较为复杂,为保证能量的有效传递与高效转化,需要对其进行系统的热力学分析。能量在传递和转换过程中兼具“量的守恒”和“质的差异”这两个重要特性,热力系统能量分析方法主要包括能量守恒分析和焓分析方法^[13]。前者普遍应用于分析、评价各类热电转换系统,以系统热电转换效率和输出电功率为基本准则,重点讨论的是热量在系统传递和转换过程中“量”的变化。Wu等^[12]基于能量守恒定律建立空间核反应堆电源系统能量守恒方程,通过联立方程求解得到温度分布,进而计算出系统热电转换效率,并得到热电转换效率最大时的系统参数设置。Tanaka等^[13]讨论了空间核反应堆电源系统最大输出功率模式和最大热电转换效率模式下的性能差异。针对美国太空探测计划,El-Genk等^[14]提出SAIRS (Scalable AMTEC Integrated Reactor Space) 空间堆电源系统,对系统性能的分析止步于“量”的研究,而未讨论能量在传递和转换过程中“质”的差异,使得对导致系统性能变化的内在原因挖掘不够,这对全面认识和优化复杂能量转化系统是不利的。

焓分析方法兼顾能量“量”“质”两个特性,对系统内部能量传递与转换的不可逆性有效评估,可准确理解系统内部固有结构和转换的不可逆性之间相互作用的关系^[15-17]。焓分析方法已被广泛用于诊断火电厂热力系统中的能量利用效率较低的环节,为提升火电机组性能方面提供了强有力的理论和技术支撑^[18-19]。同样,作为一个能量传递和转换的复杂热力系统,空间堆电源系统运行过程中内部各环节都会伴随着能量的消耗,需要予以准确辨识,挖掘提升能量利用及转化效率的关键优化点,但相关研究目前未见报道。

本文采用焓分析方法,对基于AMTEC的空间堆电源系统进行系统热力学分析研究,通过建立系统整体的焓分析模型,研究不同反应堆堆芯温度和输出电流密度下,系统输出电功率和焓效率的变化规律。为深度剖析系统内部能量利用情况,根据空间堆电源系统热力过程的特点,将其划分为6个控制单元,通过建立

每个控制单元的焓平衡方程,研究各部分焓损情况,并计算出各控制单元焓损失占比,找到焓损失最大的部件,进一步讨论减少焓损失的方法,从而为空间堆电源系统的优化设计提供参考。

1 物理数学模型

1.1 物理模型

空间堆电源系统结构示意图如图2所示。核反应堆产生的高温的热量,在热管的传递下用于驱动AMTEC工作产生电能,未被利用的热量通过散热器被排放到环境中。关键部件AMTEC主要由蒸发器、冷凝器、BASE (β "- Al_2O_3 固体电解质)和毛细吸液芯组成,BASE将整个AMTEC分隔成压力不同的两个部分:高温、高压和低温、低压区,其内部热力过程如图3所示。采用碱金属钠作为循环工质,假设从冷凝器出来的工质处于饱和状态。低温低压的饱和液态钠在毛细力的作用下从冷凝器到蒸发器的过程中温度和压力增加变成过冷状态 ($f \rightarrow g$); 过冷液态钠在蒸发器表面吸热变成饱和液态 ($g \rightarrow a$); 反应堆的不断供热使得饱和液态钠吸热发生等温相变,成为饱和蒸汽状态 ($a \rightarrow b$); 饱和蒸汽钠在到达BASE之前在高温高压区域持续被加热,在到达BASE/阳极时变成过热状态 ($b \rightarrow c$); 过热钠蒸汽在BASE/阳极处发生电离产生 Na^+ 和 e^- ; 由于BASE的选择透过性(只允许离子通过而不允许电子通过), Na^+ 通过BASE直接从阳极侧到达阴极侧 ($c \rightarrow d$), 而电子则从外电路通过,这一过程中产生电能; Na^+ 和 e^- 在BASE/阴极处重新结合成钠原子; 重新结合的钠原子在离开BASE/阴极前往冷凝器的过程中温度压力减小熵增加,变成低温饱和蒸汽 ($d \rightarrow e$); 在冷凝器中冷凝 ($e \rightarrow f$), 下一个循环开始。碱金属钠工质在内部不断循环,反应堆中产生的热能被源源不断的转换成电能^[12]。

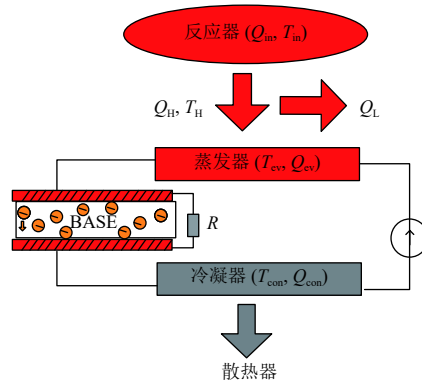


图2 空间堆电源系统结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the space nuclear power system

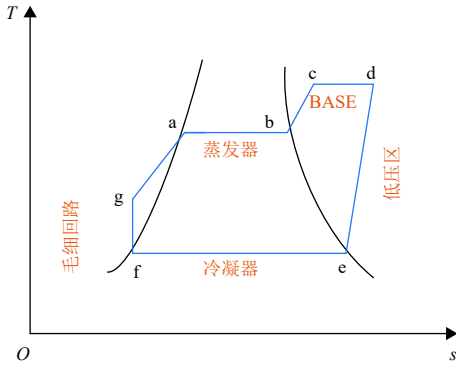


图3 AMTEC内部热力过程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the thermal process in AMTEC

1.2 数学模型

焓表征的是在给定的环境状态下，任何品质的能量被有效利用的最大份额。任何热力过程都具有方向性和不可逆性，在不可逆过程中，不可避免地有一部分焓减少而变成焓损失。焓分析方法采用焓平衡方程对热力系统中焓量进出情况进行衡量。在空间堆电源系统中，进入系统的焓应该等于离开系统的各种焓与系统焓损失之和，即

$$E_{in} = E_{out} + \Sigma E_{xi} + P \quad (1)$$

其中： E_{in} 表示进入系统的焓； E_{out} 表示离开系统的无效焓； ΣE_{xi} 表示系统由于发生不可逆过程产生的焓损失； P 表示系统产生的电能，属于离开系统的有效焓，即

$$P = JV \quad (2)$$

其中： J 和 V 分别为电源的输出电流密度和输出电压。

焓是一个状态参数，当环境状态给定之后，其大小就只与状态有关。忽略宏观动能和位能时，稳定流动的工质从任意状态 (p, T) 可逆变化到给定的不完全平衡环境状态 (p_0, T_0) 时所能做出的最大有用功称为稳定流动工质的物理焓 E_w ，可表示为

$$E_w = (H - H_0) + T_0(S - S_0) \quad (3)$$

其中： H 和 H_0 分别为工质和环境的焓； S 和 S_0 分别为工质和环境的熵。

除了物理焓，空间堆电源系统中还包括热量焓。当温度高于环境温度 T_0 的系统在给定环境条件下发生可逆变化时，传递的温度为 T 、热量为 Q 的工质所能做出的最大有用功称为热量焓 E_Q ，可表示为

$$E_Q = Q \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad (4)$$

通过建立焓平衡方式可以推导出焓损失的大小，

但焓损失是一个绝对量，要评价热力过程中焓的利用程度要采用焓效率。焓效率定义为系统对外输出的有效焓与获得的有效焓之比^[20]，空间堆电源系统的有效焓为产生的电能 P ，获得的焓量表示为空间核反应堆内发生核裂变释放出的热能焓，当输入能量已经确定时，焓效率是输出电功率和反应堆输出焓的比值，即

$$\eta_x = \frac{P}{E_{in}} = \frac{JV}{Q_{in} \left(1 - \frac{T_0}{T_{in}}\right)} \quad (5)$$

空间堆电源系统热电转换效率是电功率与反应堆输出热量的比值。可见，常规能量转换效率只反映了能量传递过程中的数量关系，而焓效率进一步体现了能量传递过程中质量变化。

为揭示系统焓损失的内在原因，对空间堆电源系统内部各环节进行焓分析，采用焓分析单元法，按照热力系统的运行过程，将系统划分为几个控制单元。首先，将反应堆与热管看作一个控制单元；其次，进入AMTEC的热量一部分提供给蒸发器，一部分用于金属钠离子通过BASE时等温膨胀所需能量，还有一部分变成蒸发器和冷凝器之间的辐射热损失，这个过程可看作3个控制单元：蒸发器、BASE和内部热损失，在BASE/阴极到冷凝器入口这一段，工质状态发生较大变化，将这一部分单独作为一个控制单元进行分析；最后，冷凝器也看作一个控制单元。因此，在空间堆电源系统中，依据内部具体结构和特点，可分为反应堆、蒸发器、BASE、冷凝器入口段、冷凝器和内部热损失等6个控制单元，各控制单元焓分析模型如表1所示。

为了揭示内部各控制单元间焓损失的相对大小，引入焓损失占比这一概念，表征各控制单元间焓损失所占的比例，即

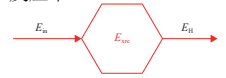

$$I_{xi} = \frac{E_{xi}}{E_{损失}} = \frac{E_{xi}}{\Sigma E_{xi}} \quad (6)$$

2 数值计算与结果分析

基于碱金属热电转换器的空间核反应堆电源系统的工作原理、结构特征和传换热方式建立的整个系统及反应堆、蒸发器、冷凝器等6个控制单元的热力学分析模型，综合整个空间核反应堆电源系统能量传递路径、能量转换模式、能量耗散情况等工作特性，通过编程进行联立数值求解，以能量守恒原则为判据，最终确定各控制单元进出口温度，进一步结合各节点处温度分布情况最终确定系统焓效率和各控制单元焓损

表 1 各控制单元的焓分析方法表

Table 1 Each control volume of energy analysis table

| | |
|---|---|
| <p>反应堆</p>  | <p>反应堆焓平衡方程: $E_{in} = E_H + E_{xre}$</p> <p>反应堆焓损失: $E_{xre} = E_{in} - E_H$</p> <p>反应堆焓损失占比: $I_{xre} = \frac{E_{xre}}{E_{损失}}$</p> <p>其中: E_{in}为裂变反应产生的热量焓; E_H为反应堆中流出的热量焓; E_{xre}、I_{xre}分别为反应堆焓损失和焓损失占比。</p> |
| <p>蒸发器</p>  | <p>蒸发器焓平衡方程: $E_g + E_{ev} = E_{xev} + E_c$</p> <p>蒸发器焓损失: $E_{xev} = E_g + E_{ev} - E_c$</p> <p>蒸发器焓损失占比: $I_{xev} = \frac{E_{xev}}{E_{损失}}$</p> <p>其中: E_g、E_c分别为工质钠在蒸发器进出口的焓; E_{ev}—流入蒸发器的热量焓; E_{xev}、I_{xev}—分别为蒸发器焓损失和焓损失占比。</p> |
| <p>BASE</p>  | <p>BASE焓平衡方程: $E_c + E_B = E_{xB} + E_d + P$</p> <p>BASE焓损失: $E_{xB} = E_c + E_{QB} - E_d - P$</p> <p>BASE焓损失占比: $I_{xB} = \frac{E_{xB}}{E_{损失}}$</p> <p>其中: E_d—工质钠在BASE/阴极处的焓; E_B—流入BASE的热量焓; E_{xB}、I_{xB}—分别为BASE焓损失和焓损失占比。</p> |
| <p>冷凝器入口段</p>  | <p>冷凝器入口段焓平衡方程: $E_d = E_{xde} + E_e$</p> <p>冷凝器入口段焓损失: $E_{xde} = E_d - E_e$</p> <p>冷凝器入口段焓损失占比: $I_{xde} = \frac{E_{xde}}{E_{损失}}$</p> <p>其中: E_e—工质钠在冷凝器入口处的焓; E_{xde}、I_{xde}—分别为冷凝器入口段焓损失和焓损失占比。</p> |
| <p>冷凝器</p>  | <p>冷凝器焓平衡方程: $E_c = E_f + E_{xcon} + E_{con}$</p> <p>冷凝器焓损失: $E_{xcon} = E_c - E_f - E_{con}$</p> <p>冷凝器焓损失占比: $I_{xcon} = \frac{E_{xcon}}{E_{损失}}$</p> <p>其中: E_f—工质钠在冷凝器出口处的焓; E_{xcon}、I_{xcon}—分别为冷凝器焓损失和焓损失占比。</p> |
| <p>内部热损失</p>  | <p>内部热损失焓损: E_{xloss}</p> <p>内部热损失焓损占比: $I_{xloss} = \frac{E_{xloss}}{E_{损失}}$</p> |

失及焓损失占比情况。计算过程中,主要参数设置如下:反应堆热功率为500 kW,环境温度为4 K,热管换热系数为5 000 W/m²,表面发射率为0.4,有效换热面积为1.1 m²。碱金属热电转换器:BAES表面发射率为0.9,无量纲压力损失系数为22,交换电流系数为120 AK^{1/2}/(Pa·m²),其他一些基本参数的设置参考文献[12]。

2.1 堆芯温度与电流密度对电源输出电功率的影响

针对深空探测所需的大功率需求,提出用于深空4 K环境下的空间核反应堆电源系统,设计反应堆热功率 Q_{in} 为500 kW,热源的另一个关键参数是堆芯温度 T_{in} 。堆芯温度的大小一方面决定了驱动做功的热能的品位;另一方面也影响着AMTEC的输出电功率,是电源设计必须要提前考虑的问题。图4讨论了堆芯温度1 100~1 300 K范围内变化时,空间堆电源系统输出电功率的变化:反应堆堆芯温度越高,输出电功率越

大,即空间核反应堆电源系统对外做功能力越强。输出电流密度为6 000 A/m²不变时,当堆芯温度从1 100 K提升到1 300 K,输出电功率从57.8 kW增加到111.7 kW,提高了近1倍。

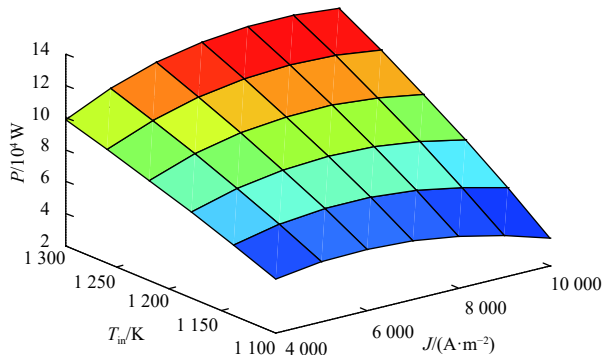


图 4 堆芯温度和输出电流密度对输出电功率的影响
Fig. 4 Variations of output power with core temperature and electrode current density

在恒定堆芯温度下，空间核反应堆电源系统的输出电流密度 J 是一个与面积和工质钠循环质量流量有关的参数，从本质上来讲也是一个变量，图4同时也讨论了不同热源参数设置下系统输出电功率与电流密度 $4\,000\sim 10\,000\text{ A/m}^2$ 之间的关系：随电流密度的增加，输出电功率出现先增加后降低的趋势。当堆芯温度为 $1\,300\text{ K}$ 时，空间堆电源系统的输出功率达到最大值约 129.4 kW ，此时电流密度的取值为 $9\,000\text{ A/m}^2$ 。值得注意的是，不同堆芯温度下取得最大值时的输出电流密度值不同，堆芯温度越大，最大功率时的电流密度越大。 $T_{\text{in}} = 1\,100\text{ K}$ 时，输出功率在 $6\,000\text{ A/m}^2$ 处取得最大值约为 57.8 kW ；当 $T_{\text{in}} = 1\,200\text{ K}$ 时，输出功率在 $7\,000\text{ A/m}^2$ 处取得最大值约 95.0 kW 。这说明从输出电功率角度考虑，空间堆电源系统中堆芯温度越高功率越大，不同堆芯温度下分别对应了一个使功率最大的电流密度。因此，电源系统在设计时，可配合考虑堆芯温度和输出电流密度这两个参数取值，以便获得最大的输出功率。

2.2 堆芯温度与电流密度对电源焓效率的影响

为了更深入地了解空间堆电源系统的性能，还应从焓分析的角度进行分析。不同堆芯温度下，空间堆电源系统焓效率变化如图5所示。同一条件下，堆芯温度越高，系统焓效率越高。 $J = 6\,000\text{ A/m}^2$ 时，堆芯温度从 $1\,100\text{ K}$ 提升到 $1\,300\text{ K}$ ，做功能力显著提升，焓效率从 12.9% 增加到约 26.2% 。由式(4)可知，热源做功能力与其温度和环境温度之间的温差有关，温差越大，做功能力越强，即能量品味越高。例如，海洋中蕴藏着数量巨大的热能，但是很难找到比其温度更低的环境，因此这部分热能几乎不能被转换成机械功加以利用。同样，空间核反应堆电源系统中热源温度

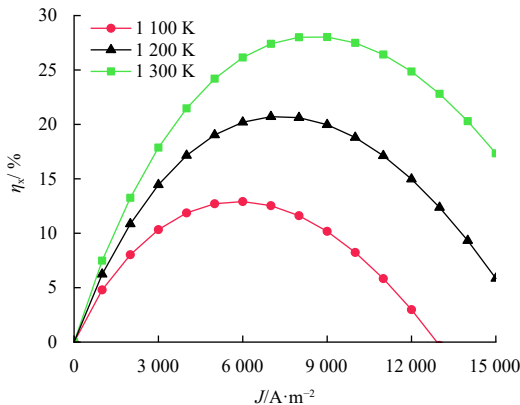


图5 堆芯温度和输出电流密度对空间核反应堆电源系统焓效率的影响
Fig. 5 Variations of exergy efficiency with core temperature and electrode current density

越高，与深空环境之间的温差就越大，做功能力就越强。因此，对反应堆热源的设计来说，应尽量提高堆芯温度，以便提高整个空间核反应堆电源系统的焓效率，但高堆芯温度对堆芯选材也提出了更高的要求。而且随着热源温度的增加，BASE的强度降低，考虑BASE的可靠性，热源温度也不宜过大。

当反应堆运行在某一恒定温度时，焓效率受电流密度的影响出现先增加后降低的趋势，取得最大值时的电流密度与输出电功率最大时的电流密度相同。当堆芯温度为 $1\,300\text{ K}$ 时，空间堆电源系统的焓效率在 $J = 9\,000\text{ A/m}^2$ 时达到最大值约为 28.0% ；当 $T_{\text{in}} = 1\,200\text{ K}$ 时，在 $J = 7\,000\text{ A/m}^2$ 处焓效率取得最大值约为 20.7% 。 $T_{\text{in}} = 1\,100\text{ K}$ 时，焓效率在 $J = 6\,000\text{ A/m}^2$ 处取得最大值约为 12.9% 。

2.3 电源内部焓损失占比分析

由前面分析可知，当 $J = 9\,000\text{ A/m}^2$ ， $T_{\text{in}} = 1\,300\text{ K}$ 时，空间堆电源系统输出功率和焓效率最大，但是焓效率也仅有 28% ，仍有大量的余热未被利用，这部分余热的温度在 $500\sim 700\text{ K}$ 范围，品味也较高，从“量”和“质”的角度分析系统性能都还有提升空间。为了深入剖析系统能量传递和转换的规律，提高系统做功能力，在该状态下对空间核反应堆电源系统内部6个控制单元的焓损失占比进行分析，结果如图6所示，空间堆电源系统中的焓损失主要发生在冷凝器和蒸发器处。最大焓损失出现在冷凝器处，占整个系统焓损失的 46% 左右，这是因为在冷凝器处排放的余热全部算作焓损失。这部分热量的品味较反应堆的品味有降低但是量大，可以设法再加以利用。提出可采用所能利用的低品位热能，并且与AMTEC同属静态热电转换的温差发电器来回收这部分余热，以减少这部分焓损失。

图6显示蒸发器焓损失占整个空间核反应堆电源系

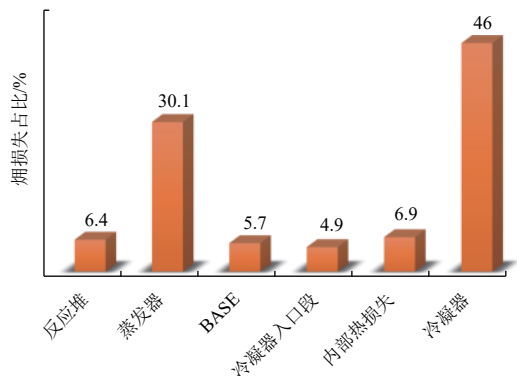


图6 系统各控制单元的焓损失占比

Fig. 6 The ratio of exergy loss to total exergy loss in each control volume

统焓损的30%左右,是除冷凝器外焓损失最大的控制单元。从AMTEC内部热力循环过程可知,蒸发器焓损失主要是因为从冷凝器处出来的低温液态钠工质在蒸发器中吸热发生状态变化的过程中,传热温差造成的不可逆损失,导致焓损失产生。

2.4 堆芯温度对系统内部控制体焓损失的影响

为了认识冷凝器和蒸发器处焓损失变化的规律,图7采用控制变量法讨论了堆芯温度对空间核反应堆电源系统内部6个控制单元焓损失的影响。由图7可知,增加堆芯温度可同时减小蒸发器和冷凝器的焓损失。当堆芯温度从1 100 K增加到1 300 K时,蒸发器焓损失降低了约28%。冷凝器处焓损失在堆芯温度1 100 K时约为193 kW,到堆芯温度1 300 K时降低到152 kW,但依然是整个系统中焓损失占比最大的控制单元。随着堆芯温度的增加,焓损失降低的还有BASE。对BASE来说,焓损失主要来自于:工质钠在BASE中等温膨胀吸热、BASE电阻率、电极化现象产生的焓损。由于BASE是空间堆电源系统中产生电能的关键控制单元,BASE处焓损失的减小也表示BASE的做功能力增强,电源输出电功率增大。

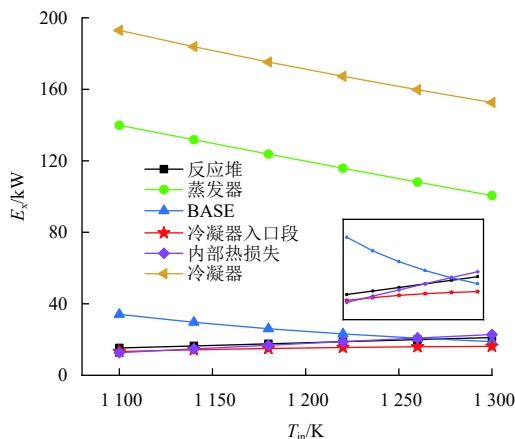


图7 堆芯温度对系统内部控制单元焓损失的影响
Fig. 7 Variations of exergy loss in each control volume with core temperature

相反地,空间核反应堆、内部热损失和冷凝器入口段的焓损失随堆芯温度的增加而有不同量的增加,增加幅度分别约为25%、79%和22%。内部热损失产生的焓损对堆芯温度更敏感、幅度最大,这是因为蒸发器温度增加导致BASE表面温度增大,BASE表面向低温、低压区辐射热损失增大,所以这部分焓损失增大。反应堆处焓损失与传热温差有关,堆芯温度增大使得反应堆与AMTEC之间的传热温差增大,不可逆损失增加。冷凝器入口段焓损失主要来自于工质从BASE/

阴极流动到冷凝器入口这一过程中压降的变化,堆芯温度增加导致沿程压降损失增大,焓损失增大。

2.5 电流密度对系统内部控制体焓损失的影响

图8给出了输出电流密度对各控制单元的焓损失的影响。焓损失占比最大的依然是冷凝器和蒸发器,随着电流密度的增加,冷凝器焓损失减小而蒸发器焓损失增加,但是相比于堆芯温度来说,电流密度变化时二者的变化幅度不大,反而是反应堆和内部热损失导致的焓损失有较大幅度的降低,但这种变化是非线性的。降低的幅度随着电流密度的增加是逐渐降低的,当电流密度增加到7 000 A/m²时,继续增大电流密度对降低反应堆和内部热损失产生的焓损失效果不大。因此,在工程设计上,电流密度在不超过7 000 A/m²时,可通过增大电流密度对减小反应堆和内部热损失导致的焓损失带来显著效果。

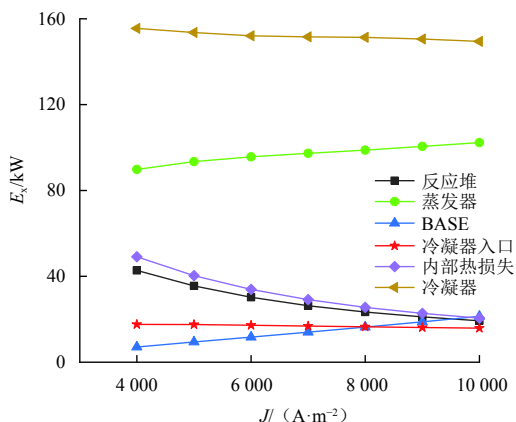


图8 输出电流密度对系统内部各控制单元焓损失的影响
Fig. 8 Variations of exergy loss in each control volume with electrode current density

3 结论

本文建立了热功率为500 kW,用于深空4 K环境的空间堆电源系统的热力学分析模型,重点探讨了堆芯温度和输出电流密度对系统焓效率和输出电功率的影响。通过将空间核反应堆电源系统内部划分为6个控制单元,明确了焓损失最大的部位,并通过改变堆芯温度和输出电流密度获得各控制单元焓损失变化趋势,主要结论如下:

- 1) 反应堆堆芯温度越高,焓效率越大,系统做功能力越强,输出电功率越大;
- 2) 系统焓效率和输出电功率随输出电流密度出现先增加后降低的趋势;
- 3) 堆芯温度增加可有效减小冷凝器、蒸发器和

BASE的焓损失, 电流密度增加不但对降低冷凝器的焓损失有限, 而且还会增大蒸发器和BASE的焓损失, 但是反应堆和内部热损失导致的焓损失有较大幅度的降低, 超过 $7\ 000\ \text{A}/\text{m}^2$ 这种降低效果减弱;

4) 空间堆电源系统内焓损失主要发生在冷凝器和蒸发器, 因此, 提高系统的性能应该重点提高蒸发器和冷凝器的能量利用率。

参 考 文 献

- [1] 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[J]. 深空探测学报(中英文), 2017, 4(5): 397-404.
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[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(5): 397-404.
- [2] 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 reactor power technology[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(5): 430-443.
- [3] EL-GENK M S, TOURNIER J M P, GALLO B M. Dynamic simulation of a space reactor system with closed Brayton cycle loops[J]. Journal of Propulsion and Power, 2010, 26(3): 394-406.
- [4] CAMPOS M C, VARGAS J V C, ORDONEZ J C. Thermodynamic optimization of a stirling engine[J]. Energy, 2012, 44(1): 902-910.
- [5] ZIPKIN M A. Technology for large Rankine cycle space power systems[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2015, 3(7): 1106-1112.
- [6] AKIMOV V N, KOROTEEV A A, KOROTEEV A S. Space nuclear power systems: yesterday, today, and tomorrow[J]. Thermal Engineering, 2012, 59(13): 953-959.
- [7] BRAGG-SITTON S M, WERNER J E, JOHNSON S G, et al. Ongoing space nuclear systems development in the United States[C]//International Nuclear Atlantic Conference. Vienna: IAEA, 2011.
- [8] EL-GENK M S. Space nuclear reactor power system concepts with static and dynamic energy conversion[J]. Energy Conversion & Management, 2008, 49(3): 402-411.
- [9] 吴伟仁, 刘继忠, 赵小津, 等. 空间核反应堆电源研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(1): 1-12.
WU W R, LIU J Z, ZHAO X J, et al. System engineering research and application foreground of space nuclear reactor power generators[J]. Scientia Sinica Technologica, 2019, 49(1): 1-12.
- [10] SIEVERS R, PANTOLIN J, HUANG C. Advanced AMTEC radioisotope power systems for deep space applications[C]//35th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. Las Vegas, USA: AIAA, 2000.
- [11] BANKSTON C, COLE T, JONES R, et al. The alkali metal thermoelectric converter (AMTEC): a new direct energy conversion technology for aerospace power[C]//3rd Joint Thermophysics, Fluids, Plasma and Heat Transfer Conference. Missouri, USA: AIAA, 1982.
- [12] WU S Y, ZHANG Y C, YANG H, et al. Performance evaluation and parametric analysis of AMTEC/TEG hybrid system[J]. Energy Conversion and Management, 2017(154): 118-126.
- [13] TANAKA K. Concept design of solar thermal receiver using alkali metal thermal to electric converter (AMTEC)[J]. Current Applied Physics, 2010, 10(2): S254-6.
- [14] 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.
- [15] 张超, 刘黎明, 陈胜, 等. 基于热经济学结构理论的热力系统性能评价[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 108-113.
ZHANG C, LIU L M, CHEN S, et al. Performance evaluation of thermal power system based on the structure theory of thermoeconomic[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 108-113.
- [16] DURMAYAZ A, YAVUZ H. Exergy analysis of a pressurized water reactor nuclear-power plant[J]. Applied Energy, 2001, 69(1): 39-57.
- [17] GOMEZ A, AZZARO-PANTEL C, DOMENECH S, et al. Exergy analysis for Generation IV nuclear plant optimization[J]. International Journal of Energy Research, 2010, 34(7): 609-625.
- [18] LIOR N. Thoughts about future power generation systems and the role of exergy analysis in their development[J]. Energy Conversion & Management, 2002, 43(9/12): 1187-1198.
- [19] SAIDUR R, AHAMED J U, MASJUKI H H. Energy, exergy and economic analysis of industrial boilers[J]. Energy Policy, 2010, 38(5): 2188-2197.
- [20] KANOGLU M, DINCER I, ROSEN M A. Understanding energy and exergy efficiencies for improved energy management in power plants[J]. Energy Policy, 2007, 35(7): 3967-3978.

作者简介:

张怡晨(1993-), 女, 工程师, 主要研究方向: 工程热物理、装备环境工程。

通讯地址: 四川省绵阳市919信箱402分箱(621999)

电话: (0816)2494542

E-mail: 471049873@qq.com

胡宇鹏(1987-), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 武器热安全、装备环境工程。**本文通讯作者。**

通讯地址: 四川省绵阳市919信箱402分箱(621999)

电话: (0816)2494542

E-mail: hjhuyp@caep.cn

Thermodynamic Analysis of Space Nuclear Power System Based on AMTEC

ZHANG Yichen, HU Yupeng, WANG Ze, ZHU Changchun, HU Shaoquan, LI Sizhong

(Institute of System Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

Abstract: With the development of exploration in deep space, the power demanding for space probe is also increasing. Space nuclear power system based on AMTEC has been paid widely attention due to its excellent characteristics. The mathematical model for exergy analysis of space nuclear power system is presented based on the first and second law of thermodynamics. Futhuremore, according to the specific characteristics of thermal process in the space nuclear power system, the thermal system was divided into six control volumes. The effects of core temperature and electrode current density on the output power and exergy efficiency of total system and six control volume have been studied. And the results can provided guidance for designing and optimizing system performance. The result shows that the increasing of the core temperature shows a positive impact on the output power and exergy efficiency. With the increasing of electrode current density, the output power and exergy efficiency increases first and then decreases, and each core temperature corresponds to an electrode current density where the output power and exergy efficiency are maximum. The largest part of exergy loss is found to be condenser and evaporator through the comparative analysis.

Keywords: space nuclear power; AMTEC; thermodynamic analysis; exergy loss

Highlights:

- The performance of space nuclear power system has been evaluated with the method of exergy analysis.
- The thermodynamic model of space nuclear power system based on AMTEC has been built.
- The exergy loss in condenser and evaporator are larger than in other control volumes which points the way to optimize the performance of space nuclear power system.
- A higher core temperature can make a positive effect on decreasing the exergy loss of condenser and evaporator.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 朱恬]