

空间堆氦氙布雷顿循环研究进展

陈伟雄¹, 梁铁波², 姜超², 廖先伟², 钱奕然¹, 唐鑫¹, 严俊杰¹

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 610213, 成都)

摘要: 氦氙混合物为工质的布雷顿循环具有循环效率高、系统结构紧凑、化学稳定性好等优势, 适合作为空间核反应堆的能量转换系统。在深入调研空间堆氦氙布雷顿循环发展历史和国内外研究进展的基础上, 对其关键技术问题和重点研究方向的相关研究进展进行了综述, 发现主要研究方向包括氦氙混合物工质特性、氦氙布雷顿循环关键部件、循环性能提升、循环动态特性及控制策略等方面; 而有待继续深入的关键技术问题包括不同比例氦氙工质的高精度物性及流动传热模型、高性能叶轮及高效紧凑式换热器设计及试验、不同功率等级下系统全工况优化、耦合反应堆的系统全局动态特性及控制策略等。分析结果可为推动空间堆氦氙布雷顿循环技术发展提供参考。

关键词: 空间堆; 氦氙布雷顿循环; 性能优化; 动态特性

中图分类号: TL353 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtubxb202311005 **文章编号:** 0253-987X(2023)11-0046-12

Advances in the Study of He-Xe Brayton Cycle in Space Reactors

CHEN Weixiong¹, LIANG Tiebo², JIANG Chao², LIAO Xianwei², QIAN Yiran¹,

TANG Xin¹, YAN Junjie¹

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China,

Chengdu 610213, China)

Abstract: The Brayton cycle with He-Xe mixture as the working medium has many advantages, including high cycle efficiency, compact system structure, and good chemical stability, making it suitable for energy conversion systems in space nuclear reactors. This paper reviews the development history and research progress of the He-Xe Brayton cycle in space reactors and summarizes the research progress of key technical problems and key research directions. The current research mainly focuses on the characteristics of He-Xe mixture working medium, the key components of the He-Xe Brayton cycle, the performance improvement of the cycle, and the dynamic characteristics and control strategy of the cycle. The key technical issues to be further investigated include high precision physical properties and flow heat transfer modeling of helium-xenon working medium with different helium-xenon ratios, the design and testing of high-performance impellers and high-efficiency compact heat exchangers, optimization of the whole working condition of the system under different power levels, and the global dynamic characteristics and control strategy of the coupled reactor system. The analysis results provide a reference for advancing the develop-

ment of the He-Xe Brayton cycle in space reactors.

Keywords: space nuclear reactor; He-Xe Brayton cycle; performance optimization; dynamic characteristics

在空间动力技术领域,稳定、高能量密度、长寿命的空间动力系统是太空开发的研究重点。空间核反应堆利用核裂变能量加热推进工质或通过热电转换系统发电,是未来应用于太空核动力以及星球表面核电源的重要能源系统。空间核反应堆匹配的能量转换系统必须同时保证较高的能量转换效率以及较小的质量和体积,此外还必须满足可靠性、灵活性、长寿命等要求。目前,大功率空间核反应堆一般采用动态能量转换系统,如布雷顿循环和斯特林循环系统,其中布雷顿循环具有效率高、循环结构简单、单位体积发电量高等特点,是满足兆瓦级核电系统的理想热电转换技术^[1]。

布雷顿循环的主要工质有超临界二氧化碳(SCO₂)、氦气、空气等。SCO₂布雷顿循环相较其他工质循环更为高效,在中温热源(400~800℃)区间,其热效率明显高于其他工质循环。空气作为工质的布雷顿循环,其循环效率方面没有明显优势,但空气工质容易获取和补充,因此在可移动微小型核电源领域有较好的应用前景。国内外研究表明,氦气布雷顿循环在高温气冷堆领域有很好的应用前景,使用氦气等惰性气体作为工质具有很好的热力学性能和化学稳定性,并可以最大限度地减少腐蚀问题,适应较高的入口温度,其效率更高。但由于氦气摩尔质量小且难以压缩,需要多级数、大尺寸的叶轮设备以及换热设备,因此,在空间布雷顿循环中,通常将循环工质由纯氦气改为氦氙混合气体。研究发现,当使用特定比例的氦氙混合物作为工质时,其换热性能比氦气高或者与氦气相当,且氦氙混合气体压缩性能好,能减少叶轮级数与换热器数量,对减

小系统尺寸有重要意义,因此氦氙混合物适合作为空间核反应堆的循环工质^[2]。

氦氙布雷顿循环由于其在空间堆的应用前景较广而引起了广泛关注。从 20 世纪 70 年代开始,国外研究者就进行了相关设计和试验工作。小功率空间氦氙布雷顿循环项目主要包括美国 BRU 计划^[3]、BIPS 计划^[4]、NASA 的 JIMO 计划^[5]等,输出功率都是千瓦级,发电效率接近 30%。而较为成熟的大功率空间反应堆方案包括 2009 年俄罗斯提出的兆瓦级核动力飞船项目^[6]和美国 2003 年开展的“普罗米修斯”计划^[7],堆芯都采用了气冷堆,而能量转化系统为氦氙闭式布雷顿循环,冷却回路采用钠钾合金作为冷却剂,输出功率分别为 1 MW 和 200 kW。在试验研究方面,美国开展了 10 kW 布雷顿涡轮机旋转单元的研究,并建立了 2 kW 的微型布雷顿涡轮机旋转单元样机,进行了布雷顿循环系统可行性和性能方面的验证。第一套闭式布雷顿循环(CBC)空间功率转换系统 BRU 于 1968—1976 年在里维斯研究中心研制成功,包括相应回热器和热交换器单元,证实了闭式布雷顿循环系统的转换功率在 25%以上^[8]。表 1 总结了国外典型空间堆布雷顿循环系统参数。

国内外围绕空间堆氦氙布雷顿循环,主要的研究方向包括氦氙混合工质的物性及流动传热特性、透平与压缩机以及换热器设计、循环的参数分析和优化、循环的动态特性和控制策略等方面。调研发现,目前对于空间堆氦氙布雷顿循环研究进展总结较少,因此,本文对空间堆氦氙布雷顿循环重点研究方向的相关进展进行综述。

表 1 空间堆布雷顿循环系统参数
Table 1 Parameters of Brayton cycle system for space reactor

参数	BRU 系统 ^[9]	SR-100G 系统 ^[10]	NASA-GRC 系统 ^[11]	S ⁴ 系统 ^[12]
最高温度,最低温度/K	1 144,294	1 400,514	1 150,400	1 149,400
净功率/kW	6	100	50,2 台	43.6,3 台
工质	氦氙	氦氙	氦氙	氦氙
压比	1.90	1.92	2.00	1.50
转速/(r·min ⁻¹)	36 000	45 000	45 000	
流量/(kg·s ⁻¹)	0.361	1.30	1.85	1.834
压缩机直径,透平直径/cm	10,8,12,6	15,6,17,1		
热效率/%	39.40	24.57	28.06	28.50

1 氦氙布雷顿循环工质特性研究

考虑到氦氙混合工质的特殊性,氦氙布雷顿循环研究需要深入结合工质特性。氦氙混合比例和状态将对工质物性产生影响,主要包括密度、动力黏度、定压比热容以及导热系数等,进而影响氦氙工质的流动

换热特性和气动特性,最终影响循环效率。表 2 给出了氦、氙及氦氙混合物物性参数表。可以看出,氦气的定压比热容和热导率都远大于其他气体工质;纯氙气的分子量很大,但是定压比热容和热导率较小,这使其容易压缩,但其换热性能相较其他工质较差;特定比例的氦氙混合物成为综合性能较好的合理选择。

表 2 氦、氙及氦氙混合物物性
Table 2 Properties of helium and xenon binary mixture gas

参数	空气	氦气	氙气	氦氙混合物
平均分子量/($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)	28.96	4	131.29	40
定压比热容/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	1 006.6	5 193.2	160.1	519.8
比热比	1.401 8	1.666 5	1.677 3	1.668 0
动力黏度/($\mu\text{Pa} \cdot \text{s}$)	18.490	19.846	22.985	24.960
热导率/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	0.025 9	0.155 3	0.005 5	0.027 9
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.184	0.164	5.395	1.636
声速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	346.3	1 016.4	177.0	321.4

1.1 氦氙混合工质物性

不同氦氙混合比例将对工质物性产生较大影响,其比例改变会导致混合物摩尔质量变化。相关研究给出了在特定温度和压力下的氦氙混合气体物性随摩尔质量即混合比例的变化规律。Tournier 等^[13]通过总结相关实验研究结果,采用对应态原理拟合得到了用于计算两种惰性气体混合工质热物性的半经验关联式,该公式可在压力范围 0.1~20 MPa、温度范围 300~1 400 K 时进行较高精度预测。因此得到了广泛应用,后续研究者开发的物性计算程序均是在该半经验公式基础上进行的。杨谢等^[14]探究了摩尔质量、压力和温度等参数变化对氦氙混合物的热物性影响规律,结果表明随着混合物摩尔质量增加,定压比热容与比热比缓慢增大,动力黏度呈先增大后平缓下降的趋势,导热系数则单调下降,普朗特数先减小后增大;混合气体动力黏度、导热系数、普朗特数都不随压力发生明显变化;温度升高会使氦氙混合物导热系数及动力黏度增大,但普朗特数变化很小。

Xu 等^[15]提出并建立了基于维里(Virial)系数的氦氙热物性模型,并与理想气体模型进行比较,阐明氙气体的添加使得氦氙混合工质呈现明显的非理想气体特性;在不同温度和压力条件下,比较了两种模型间氦氙混合工质的物性参数与主要循环参数的偏差,建立了 3.0 MW 锂冷快堆氦氙循环热力学模型,并分析了非理想气体特性对循环效率的影响规律。结果表明,在摩尔质量大于 40 g/mol,或者在较

低的温度(<500 K)或较高的压力(>3.0 MPa)下,氦氙混合工质物性参数与理想气体特性有明显的偏差。而在不同压比下,非理想气体模型系统效率比理想气体模型系统效率约低 1.5%,表明非理想气体模型使系统的模拟精度提高了约 4.91%。

1.2 氦氙混合工质流动及换热特性

现有关于氦氙混合气体流动特性的研究中,主要关注雷诺数、压降和摩擦阻力系数间的变化规律。研究氦氙混合气体的换热性能时,主要关注对流换热系数的变化,该系数由气体的雷诺数和普朗特数共同决定。El-Genk 等^[16]指出,He 和较重的惰性气体,如 Kr 和 Xe,组成二元混合物时,当混合摩尔质量分别小于 22 g/mol 和 40 g/mol 时,它们的换热系数均略高于纯氦气,同时还显著降低了叶轮机机械的尺寸。Taylor 等^[17]通过总结实验数据,给出了计算氦氙混合物对流换热努塞尔数的半经验关联式,该公式适用于低普朗特数条件。杨谢等^[14]利用该经验公式探究了 He-Xe 混合工质热物性变化对换热性能的影响,发现对流换热系数最大值对应的氦氙混合工质摩尔质量约为 15 g/mol,并且证实在该比例下换热能力比纯氦气好。Leontiev 等^[18]针对普朗特数较低的氦氙混合物,研究了气体雷诺数和马赫数对流动、传热、传质的积分和局部特性的影响。

Szalmás 等^[19]基于动力学理论,计算了 He-Xe 和 He-Ar 在圆管中的压力驱动流,并给出了整个系统各节点的流量、压力和摩尔分数的计算结果,以及

压力和摩尔分数沿通道的代表性分布。李杨柳等^[20]等开发了计算反应堆内单个通道采用 He-Xe 混合工质冷却的分析程序,建立了包含环形流道模型和圆管流道模型的反应堆单通道模型,将计算结果与 Fluent 计算结果以及试验数据对比,验证了模型程序的准确性。余霖^[21]采用 STAR-CCM+ 软件,对普罗米修斯计划的气冷堆环形冷却剂通道进行数值建模,研究了单冷却剂通道和 1/6 堆芯冷却剂通道内不同比例的氦氙混合气体的流动换热特性,明确了环形、圆形、棒束等不同堆内通道结构条件下,氦氙混合气体的最佳摩尔质量均在 15 g/mol 附近。

黄笛等^[22]通过数值模拟研究氦氙混合比例对堆内通道流动换热特性影响,分析了 He-Xe 混合工质的混合比例变化对燃料棒间流动的换热性能影响规

律,发现当混合工质的摩尔质量在 15~20 g/mol 范围时,燃料棒间流动的换热效果最好,而当流通面积一定时,通过减小冷却剂流道的直径能提高换热性能。周彪等^[23]开发了适用于氦气冷空间堆的热工系统分析程序用于计算混合物的热物性及换热性能,并通过与实验值的对比,证明了该程序模拟的准确度较高。此外,一些研究关注于不同结构流动通道对氦氙换热的影响。Huang 等^[24]的研究结果表明,窄矩形通道的传热性能与圆形通道相差不大,而圆形通道传热性能小于环形通道,并且通道类型的等效直径越小,通道内氦氙混合气体的对流换热系数越大。

通过调研总结国内外学者对氦氙混合工质流动及换热特性研究,得到如表 3 所示的氦氙混合工质流动换热关联式,并给出了经验关联式的适用范围。

表 3 氦氙混合工质流动换热关联式
Table 3 Helium-xenon fluid heat transfer correlation

编号	文献来源	换热关联式	适用范围
1	Dittus 等 ^[25]	$Nu=0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}$	$0.7\leq Pr\leq 120$ $10^4\leq Re\leq 1.2\times 10^5$
2	Colburn ^[26]	$Nu=0.023Re^{0.8}Pr^{1/3}$	$0.5\leq Pr\leq 100$
3	Taylor 等 ^[17]	$Nu_b=0.023Re_b^{0.8}Pr^{0.65}(T_w/T_b)^{-n}$ $n=(0.57-1.59/(x/D))$	$1.8\times 10^4\leq Re\leq 6\times 10^4$ $T_w/T_b<2$
4	Notter 等 ^[27]	$Nu_b=5+0.012Re_b^{0.83}(Pr+0.29)(T_w/T_b)^n$ $n=-\lg(T_w/T_b)^{0.25}+0.3$	$10^4\leq Re\leq 5\times 10^6$ $1<T_w/T_b<5$
5	Churchill ^[28]	$Nu=6.3+\frac{0.079Re\sqrt{f}Pr}{(1+Pr^{0.8})^{5/6}}$ $1/\sqrt{f}=2.21\ln(Re/7)$	$0.001\leq Pr\leq 200$
6	Chen 等 ^[29]	$Nu=3.6+0.025(PrRe)^{0.8}$	$Pr<0.1$
7	Lyon ^[30]	$Nu=7.0+0.025(PrRe/2)^{0.8}$	$Pr<0.1$

注: T_w 表示壁面温度; T_b 表示流体温度; x 为轴向距离; D 为直径; f 为阻力系数。

2 氦氙布雷顿循环关键部件研究

相比于陆基能量转换系统,空间能量转换系统不仅需要考虑转换效率,而且需要考虑系统质量及尺寸等影响设计方案可行性和发射运载成本的重要因素。因此,高效紧凑的叶轮机械以及换热设备是空间堆氦氙布雷顿循环需要关注的重点。

2.1 氦氙叶轮部件研究

氦气的定压比热容和热导率都远大于其他氙气、空气等气体工质,因此在氦气循环中换热器的体积较小。但由于其大比热故难以压缩,需要更大尺寸及更多级数的压气机才能达到与空气相同的压

比。氙气的分子量很大,但其定压比热容和热导率较小,这使其容易压缩,换热性能较差且定压比热容较小,因此其所需换热器体积较大。研究表明,特定混合比例的氦氙混合物能较好地兼顾换热性能和可压缩性,从而使压缩机和换热器的尺寸都较小,其中 40 g/mol 的氦氙混合物研究较多,其对流换热系数与氦气相当,还能够将叶片的气动负荷降低到纯氦气的 10% 左右,还可以使叶轮机械级数降低从而使动力系统的尺寸、质量相对减小^[31];对于空间堆小功率的闭式布雷顿循环系统来说,径流式压气机以及涡轮无疑更具有尺寸和质量优势,而小功率径流式叶轮则需要高转速。

2008 年, Gallo 等^[32] 针对空间堆闭式氦氙布雷顿循环系统, 对 BRU 项目中的涡轮与压缩机进行缩放, 设计并研究了用于 40 g/mol 氦氙混合工质的 38 kW 涡轮机组单元。研究考虑了叶轮机械的各种能量损失和氦氙工质物性变化, 发现压缩机压比和多变效率分别为 1.6 和 83.1%, 透平压比和多变效率分别为 1.51 和 88.3%。之后, Gallo 等^[3] 又用同样方法对 15 g/mol 氦氙混合工质的涡轮机组单元进行研究, 结果表明在相同发电功率下, 采用 15 g/mol 混合工质可获得较 40 g/mol 氦氙混合工质更低的流量和更高的循环压力。2009 年, El-Genk 等^[33] 针对间接闭式布雷顿循环高温堆, 研究了以氦气、氦氙混合气体和氦氮混合气体为工质时, 透平入口温度、转速对叶轮设备尺寸、级数的影响规律。结果表明, 两种混合物的压缩机和叶轮尺寸明显低于纯氦工质; 当转速从 3 000 r/min 提高至 5 400 r/min 时, 3 种工质的压缩机级数减少了 40% 以上; 15 g/mol 摩尔质量的氦氮混合工质的叶轮级数高于氦氙混合工质。

国内, 刘学峰^[34] 设计了一种可用于氦氙混合工质的离心式压缩机, 并获得了氦氙离心式压气机设计参数选取规律。田志涛等^[35] 采用一维方法设计了一种适用于摩尔质量为 40 g/mol 混合氦氙工质的离心式压气机, 如图 1 所示, 该压气机单级总压比为 2.3, 等熵效率为 88.7%, 流量为 1.6 kg/s, 喘振裕度为 20.4%, 并通过数值模拟对压气机内部流场进行分析, 得到氦氙离心式压缩机的特性曲线。

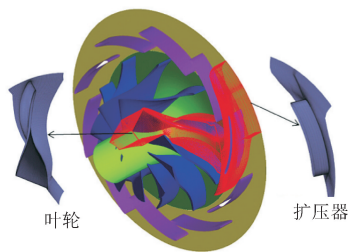


图 1 He-Xe 离心式压气机结构示意图^[35]

Fig. 1 Schematic diagram of He-Xe centrifugal compressor^[35]

徐森鎔等^[36] 针对空间核电源系统设计了一种可用于 He-Xe 混合物的径流式向心透平, 并采用数值模拟研究了透平内部情况。结果表明, 所设计的向心透平效率为 84.4%, 功率为 618.3 kW, 具有较好的气动性能, 并给出了叶顶间隙损失、二次流损失和内部端壁损失的分布结果。后续研究表明, 增大出口背压、增大叶顶间隙以及减少叶片数目均会造成透平效率下降^[37]。Yuan 等^[38] 采用 Chapman-Ebskog

动力学理论和相应态理论方法, 计算了 15.9 g/mol 和 40 g/mol 的氦氙混合工质的输运特性; 根据流动相似条件开发了计算相似涡轮边界的程序, 使得径向涡轮通道内的流动相似; 分析了氦氙混合气体、氦气和空气作为工质的径向涡轮, 发现其效率特性曲线相似度较高, 而在偏离设计工况点后, 氦气和其他流体之间的效率误差则会增加。

Malik 等^[39-42] 以 15 g/mol 氦氙混合气体作为工质, 为 300 MW 高温气冷堆电站设计了一种两级高负荷轴流式压缩机, 压缩机级数仅为纯氦气压缩机的 20%, 大大缩小了设备尺寸。在后续研究中, 利用相似原理对不同分子量的氦氙混合气体的离心式压缩机进行性能分析, 结果认为使用 40 g/mol 的氦氙混合工质是空间堆循环的最佳选择, 而 15 g/mol 的氦氙混合工质更适用于陆地闭式布雷顿循环电厂。

2.2 氦氙换热设备研究

由于太空环境的特殊性, 循环废热只能以辐射散热的方式向外排放。因此, 冷却器、冷却介质回路和辐射散热器设计也成为了氦氙布雷顿循环的重要研究方向之一。El-Genk 等^[43] 针对高温气冷堆耦合 3 个氦氙布雷顿循环空间动力系统提出了一种高温水管辐射散热器设计方案, 该设计可以防止冷却系统单点失效。气体冷却器采用 NaK-78 作为冷却回路介质, 另一端连接两个水热管散热器面板。设计的水热管辐射式散热器总散热量为 324 kW, 总质量约 994 kg。Qin 等^[44] 对空间气冷堆氦氙布雷顿循环分别耦合热管散热器和液滴散热器(图 2)的循环性能进行对比研究, 发现在相同输出功率和进口温度下, 液滴辐射散热器的质量仅为热管换热器质量的 10% 左右, 在空间堆动力系统质量方面更具优势。采用液滴辐射散热器, 当氦氙循环压缩机压比为 2.17 时, 循环效率可达到 36%。

针对高温氦氙回热器的研究中, De Araújo 等^[45] 对小型堆闭式氦氙布雷顿循环的叉流管壳式回热器进行了优化, 研究采用 CFD 方法模拟回热器内部流场, 以最小熵产和回热度之间的比值作为性能评价指标, 评估了该参数与回热器质量之间的相关性, 以确定最优结构。杨夷等^[46] 研究了温度、回热度以及制造工艺等因素对 He-Xe 换热器的性能影响规律, 发现采用精雕工艺能有效减少换热器质量约 17%, 并可降低通道压降约 30%, 且回热器换热性能不会出现明显下降, 并提出采用面积比功率因子作为回热器结构及性能的评价指标。马文魁等^[47] 搭建了空间 He-Xe 布雷顿循环热力学模型, 考

虑了回热器换热系数和压力损失的耦合,并研究了循环压比、He-Xe 工质混合比例以及温比等关键参数对系统性能及回热度最佳值的影响规律。结果表明,随着循环压比增加,回热度的最佳值呈现先增加后减小的趋势;当 He-Xe 工质中 Xe 比例增加时,混合工质的压力损失会快速增大,从而使得回热度最佳值明显减小;而当系统温比增加时,通过减小回热器压力损失会使得回热度最佳值增大。

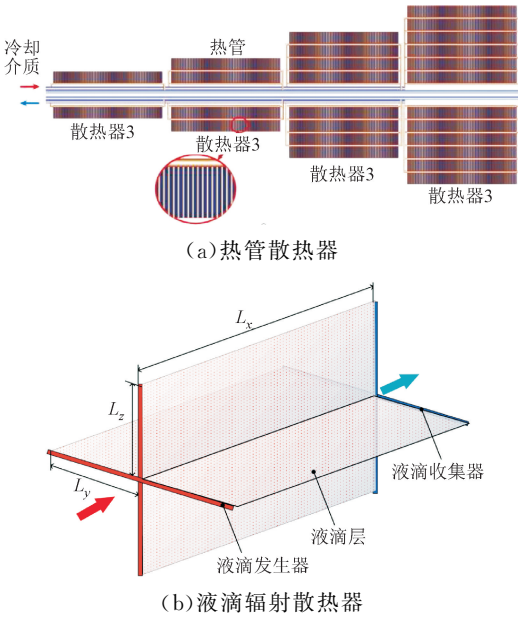


图 2 空间堆氦氙布雷顿循环散热器^[44]
Fig. 2 Space reactor He-Xe Brayton cycle radiator^[44]

3 氦氙布雷顿循环性能优化研究

目前,大多数氦氙布雷顿循环都是基于空间堆动力系统应用而开发的,陆基布雷顿循环系统为提高循环效率而采用的增加换热面积,以及采用更复杂的循环构型、耦合底循环系统等方法,在空间氦氙循环中并不适用。现有的氦氙布雷顿循环大多采用简单回热循环构型,追求更加高效紧凑的设备和整体布置,其系统示意图如图 3 所示。

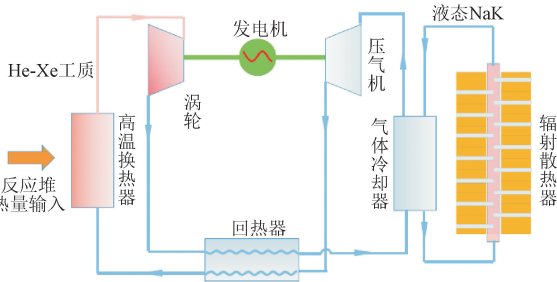


图 3 空间堆氦氙简单回热循环系统示意图
Fig. 3 Schematic diagram of a space reactor He-Xe simple regenerative cycle system

El-Genk 等^[48]研究发现,摩尔质量为 15 g/mol 的氦氙混合气体的传热系数比纯氦气高 7%,且叶轮设备级数仅为纯氦气的 24%~30%,然而对于相同的管道和换热器设计,氦氙混合工质的压力损失是纯氦气的 3 倍。因此在较高的循环压比下,采用氦氙混合工质的电站峰值效率相比纯氦降低了 2% 左右。在其后续研究中,针对纯氦气、15 g/mol 的氦氙和氦氮混合气体,在反应堆出口温度 973~1 223 K 条件下进行循环性能分析。结果表明,3 种工质最大循环效率对应的最佳压比均较低(纯氦气、氦氙为 2.6,氦氮为 3.2)。在透平进口温度为 1 123 K 条件下,氦氙、氦氮布雷顿循环效率分别为 45.9% 和 45.8%^[49]。

李智等^[50]分析了不同成分氦氙混合工质对叶轮机以及循环整体热力学性能的影响,发现加入氙气降低了循环热力学性能、循环效率和比功,当氦气摩尔分数由 100% 降至 64.8% 时,循环的最大效率由 36.5% 下降至 19.3%,但氙气的加入能有效降低压气机膨胀功,改善循环气动性能,减少压气机、换热器数量。Liu 等^[51]采用非支配排序遗传算法(NS-GA-II)通过优化系统部件的关键参数来最小化系统总质量,并对氦氙布雷顿循环及各个部件设计模块性能进行计算,给出了特定透平进口温度下系统最小质量对应的关键参数最优值,并利用 Garson 算法对参数进行了敏感性分析。结果表明在 1 400 K 透平进口温度下,最佳循环效率为 16%~28%,最佳压比为 1.9~3.0。Romano 等^[52-53]优化了用于空间堆氦氙布雷顿循环的热管散热器,将冷侧热力模型与布雷顿循环模型耦合可以得到不同循环参数下散热系统的设计方案,同时采用最小比质量(散热器质量和循环功率之比)作为优化目标,最终优化后的气体冷却器的进口温度为 513.2 K,确保了动力系统的高效性和紧凑性。

郭凯伦等^[54]比较了 He、Xe、N₂ 和 CO₂ 工质以及这 4 种工质采用不同混合比例时的物性,并且分析了兆瓦级布雷顿循环核电推进系统(图 4 所示)采用不同工质时的系统性能,结果表明 He-Xe 混合工质的换热系数较高,且透平和压缩机的级数较少,比较适合作为空间核动力系统的循环工质。此外,探究了氦氙作为工质时,叶轮效率、压比、进口温度、压损系数等参数对循环效率的影响,结果表明提高叶轮效率、透平进口温度、减小压损有利于效率的提升,存在最佳压比使效率最高。

张文文等^[55]提出了一种兆瓦级氦氙冷却热管

布雷顿循环研究了 4 种不同的轴承和发电机支路引流冷却方案,分析了循环引气对关键部件和循环性能的影响,并在回热器温度夹点限制下对 4 种冷却方案进行了优化对比,结果表明,冷却气体回收轴承和发电机热损失后汇入透平进口的冷却方案效率最高。

4 氦氙布雷顿循环动态特性与控制策略研究

El-Genk 等^[60]建立了用于能量转换的多布雷顿循环回路的 S^4 空间堆动力系统的动态仿真模型,并对瞬态启动过程进行演示。当采用 40 g/mol 的氦氙混合气体为工质,在功率为 471 kW、转速为 45 000 r/min 和循环温度为 1 149 K/400 K 条件下,全功率运行的瞬态启动的最终系统输出功率为 130.8 kW,循环效率为 27.8%。在其后续研究中,在反应堆系统瞬态运行和启动工况的程序基础上添加了布雷顿循环系统模块与 PID 控制器,建立了一个由气冷堆和 3 个独立的闭式布雷顿循环组成的电力系统动态仿真模型,并用该程序对淹没次临界反应堆 S^4 进行模拟,得到了反应堆稳态运行时的反应堆启动时间、循环效率、输出功率、压缩机和透平的热力参数等^[61]。

国内,李智^[62]进行了空间堆 He-Xe 布雷顿循环系统在变负荷条件下的动态特性及调控策略研究,其采用了 3 种调控策略:系统充量控制、旁通调节及变转速控制。结果表明,变负荷条件下,充装量调节和分流率调节可维持系统转速不变;充量控制能使循环效率维持较高,而旁通调节虽然可以实现快速变负荷,但其变负荷调节范围较窄;变转速控制原理是通过改变压缩机转速的使系统偏离设计点,从而降低系统输出功率。在事故工况下,由于系统甩负荷转速会快速增加,可采用旁通调节快速降低输出功率,以达到应急处理,从而使系统转速快速下降至安全范围。Ma 等^[63]建立了空间核动力系统多布雷顿循环的热工水力模型,针对具有双布雷顿循环回路系统,提出了同时启动和顺序启动两种方案,并对它们的性能进行比较。结果表明,在初始启动阶段,需要外部动力源提供动力来驱动轴的转动;采用同时启动方案系统稳定且耗时少,但所需外部驱动功率大;采用顺序启动方案所需驱动功率小,但布雷顿循环之间的耦合效应会导致气体流量和功率的波动,系统稳定性变差。

侯捷名^[2]使用 RELAP5 程序建立了 100 kW 空

间锂冷快堆氦氙布雷顿循环控制系统和保护系统,并对整个系统变工况运行、空间堆临界安全以及事故工况瞬态过程进行了模拟,重点研究了系统失流事故、反应性引入、热阱丧失等事故工况下系统的安全性能。Zhang 等^[64]针对兆瓦级空间热管堆氦氙布雷顿循环,建立了包括反应堆、叶轮机、换热设备、管道等在内的所有部件的动态模型,开发了系统瞬态分析程序,对该系统的安全特性进行了分析。此外,也对单回路布雷顿循环机械故障和反应性插入事故下系统的瞬态响应进行了研究。Wang 等^[65]在该系统瞬态分析程序基础上,研究了气冷堆耦合布雷顿循环系统在不同运行条件下的安全特性,结果表明高温气冷堆启动过程需 4 h,在全功率运行下燃料最高温度低于熔点温度且有足够的安全裕度;当紧急情况下关闭高温气冷堆时,可以通过堆芯的热传导和辐射传热来去除反应堆的余热,表明所设计的高温气冷堆由于其负反应特性和被动安全特性而具有较好的固有安全性。

辛杰等^[66]基于 Simulink 平台开展 400 kW 级空间核堆氦氙布雷顿循环系统一维分析,研究了系统稳态运行、反应堆功率快速增加、阶跃及持续引入反应性等不同动态热力过程下的系统动态特性。薛翔等^[67]参考 JIMO 100 kW 动力系统搭建了闭式 He-Xe 循环系统的动态计算模型,研究了不同系统初始压力时,核心机转速快速增加对系统参数及性能的影响规律。结果表明,在调节核心机的转速并改变反应堆加热功率的控制方式下,该动态过程中系统参数能一直保持在稳定运行区间,这表明采用准确的转速控制是核心机的主要控制策略。王浩明等^[68]参考普罗米修斯计划中的系统参数,获得了包括组件特性、管道布局的氦氙布雷顿循环系统动态仿真模型,探究了系统采用旁通阀控制时阀门的开度及响应时间对系统主要热力参数及性能的影响规律。研究表明,采用旁通阀控制时,阀门开启会使得透平转速快速下降,进而使系统输出功率快速降低,其中功率出现了超调现象,而通过增加系统的容积能够降低采用旁通阀调节的敏感度。

总结现有氦氙布雷顿循环动态特性与控制策略研究可以发现,目前主要通过建立特定系统的动态仿真模型或程序开展针对动态特性的研究,包括反应堆及各部件动态模型,研究的典型动态过程主要包括系统瞬态启动、变负荷工况以及事故工况等。针对氦氙布雷顿循环变工况控制策略研究中,主要的控制方式包括充装量调节、旁通阀调节和变转速

调节3种。充装量调节通过外部储罐改变循环工质充量以实现变工况,这种控制方式可以保持较高的循环效率,但变负荷速率较慢;旁通阀调节通过改变流经透平的工质流量来实现变负荷,变负荷速率快但调节范围较窄,适合在事故工况下使用;变转速调节通过转速的变化使系统偏离额定工作点,降低循环输出功,从而实现精确调节,但其适用于透平和压缩机分轴布置的情形。后续研究有待开展耦合反应堆和动力系统的氦氩布雷顿循环全局动态特性研究,包括启停堆/机、变负荷运行、反应堆临界安全、事故工况等动态过程,并据此提出容量控制、旁路控制、转速控制等多种方式有机结合的动态调控策略,建立灵活、可靠的控制系统与保护系统,以达到安全、快速、灵活的调节目标,从而提升氦氩布雷顿循环的全工况适应性和系统安全性。

5 结论与展望

随着深空探索技术飞速发展,氦氩布雷顿循环的应用场景不断拓展,把握氦氩布雷顿循环的研究进展及未来发展趋势,对推动空间能量转换技术的进步具有重要意义。本文在深入调研空间堆氦氩布雷顿循环的发展历史和国内外研究进展的基础上,对其关键技术问题和重点研究方向的相关进展进行了综述,所获主要结论及未来展望如下。

(1)对于氦氩混合物工质特性研究,目前重点关注40 g/mol和15 g/mol这两个特定摩尔质量浓度的混合工质,前者可以改善压缩性能,减小压缩机尺寸和级数,降低系统总质量,更适合作为空间布雷顿工质,后者能够达到更大对流换热系数。在后续研究中,建立适用于温度、压力和混合比例大范围变化下氦氩混合气体的高精度物性及流动传热模型,确定适用于不同功率等级和工作场景的氦氩工质最佳混合比例,是深入开展氦氩布雷顿循环研究的重要方向。

(2)对于氦氩布雷顿循环关键部件研究,目前叶轮部件主要针对特定应用场景进行了相关研究设计工作,且大多数为小功率径流式叶轮设计,也有对冷却器、回热器、散热器等换热设备的研究设计。未来应围绕不同氦氩布雷顿循环功率、转速和运行条件,形成一系列成熟的高性能压缩机和透平设计方案,并开展相应试验研究,针对换热设备开展高性能紧凑式换热器研究。

(3)对于氦氩布雷顿循环性能提升,目前大多采用简单回热循环构型,追求更加高效、紧凑的设备和

整体布置,研究温度、压比、回热度等参数对系统的影响,并采用效率、比功率等指标来进行评价。但综合考虑冷源条件、循环压力和功率等变化对循环性能和整体尺寸的影响目前较少,有待开展全功率等级、全工况的氦氩布雷顿循环多目标、多参数优化设计和评估工作。

(4)对于氦氩布雷顿循环动态特性及控制策略研究,目前一些研究者针对特定系统建立了系统动态仿真模型,并对系统瞬态启动、部分负荷工况以及事故工况等动态过程进行了研究。后续研究有待开展耦合反应堆和冷却系统的氦氩布雷顿循环全局动态特性研究,提出安全、灵活、高效的动态调控策略,以提升氦氩布雷顿循环的全工况适应性和系统安全性。

参考文献:

- [1] 王志伟. 基于空间核电源系统的氦氩混合工质布雷顿循环特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
- [2] 侯捷名. 100 kW_e级锂冷空间快堆耦合布雷顿循环系统运行特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- [3] GALLO B M, EL-GENK M S. Brayton rotating units for space reactor power systems [J]. *Energy Conversion and Management*, 2009, 50(9): 2210-2232.
- [4] CHUPRINA M. Thermal-transient analysis of the Brayton isotope power system(BIPS) recuperator [J]. *Astrometriia I Astrofizika*, 1977, 3(32): 145-158.
- [5] ASHCROFT J, BELANGER S, BURDGE W, et al. Key factors influencing the decision on the number of Brayton units for the prometheus space reactor [C]// AIP Conference Proceedings. Melville, NY, USA: AIP, 2007: 522-540.
- [6] 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.
- [7] 朱安文, 刘飞标, 杜辉, 等. 核动力深空探测器现状及发展研究[J]. *深空探测学报*, 2017, 4(5): 405-416. ZHU Anwen, LIU Feibiao, DU Hui, et al. Current status and development for deep space nuclear power explorer [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(5): 405-416.
- [8] 薛冰. 小型氦氩冷却反应堆关键参数设计优化研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- [9] DAVIS J E. Design and fabrication of the Brayton rotating unit [EB/OL]. (1972-03-01) [2022-10-01]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19720012386>.
- [10] HARTY R B. SP-100 program: space reactor system and subsystem investigations [EB/OL]. (1983-09-30) [2022-09-01]. <https://www.osti.gov/biblio/5658625/>.
- [11] BARRETT M J, JOHNSON P K. Performance and

- mass modeling subtleties in closed-Brayton-cycle space power systems [C]//3rd International Energy Conversion Engineering Conference. Reston, VA, USA: AIAA, 2005: AIAA 2005-5700.
- [12] 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.
- [13] TOURNIER J M, EL-GENK M S, GALLO B. Best estimates of binary gas mixtures properties for closed Brayton cycle space applications [C]//4th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC). Reston, VA, USA: AIAA, 2006: AIAA 2006-4154.
- [14] 杨谢, 石磊. 氦-氙混合气体物性对布雷顿循环影响分析 [J]. *原子能科学技术*, 2018, 52(8): 1407-1414.
YANG Xie, SHI Lei. Analysis of helium-xenon mixture property influence on Brayton cycle [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2018, 52(8): 1407-1414.
- [15] XU Chi, KONG Fanli, YU Dali, et al. Influence of non-ideal gas characteristics on working fluid properties and thermal cycle of space nuclear power generation system [J]. *Energy*, 2021, 222: 119881.
- [16] EL-GENK M S, TOURNIER J M. Selection of noble gas binary mixtures for Brayton space nuclear power systems [C]//4th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC). Reston, VA, USA: AIAA, 2006: AIAA 2006-4168.
- [17] TAYLOR M F, BAUER K E, MCELIGOT D M. Internal forced convection to low-Prandtl-number gas mixtures [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1988, 31(1): 13-25.
- [18] LEONTIEV A I, LUSHCHIK V G, YAKUBENKO A E. Compressible turbulent boundary layer on a permeable plate with injection of foreign gas [J]. *High Temperature*, 2007, 45(4): 488-496.
- [19] SZALMÁS L. Flows of rarefied gaseous mixtures in networks of long channels [J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2013, 15(6): 817-827.
- [20] 李杨柳, 赵守智, 孙征, 等. 氦氙混合气体冷却反应堆单通道程序开发 [J]. *原子能科学技术*, 2017, 51(1): 41-45.
LI Yangliu, ZHAO Shouzhi, SUN Zheng, et al. Development of single channel program for helium and xenon mixture cooled reactor [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2017, 51(1): 41-45.
- [21] 余霖. 氦氙混合比例对堆内通道流动换热特性影响研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
- [22] 黄笛, 李仲春, 余霖, 等. 氦氙混合比例对堆内通道流动换热特性影响 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2021, 42(5): 745-750.
HUANG Di, LI Zhongchun, YU Lin, et al. Influence of helium-xenon mixing ratio on flow heat transfer characteristics of reactor channels [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2021, 42(5): 745-750.
- [23] 周彪, 孙倩, 孙俊, 等. 基于 RELAP5 的氦氙流动换热计算模块开发与验证 [J]. *原子能科学技术*, 2021, 55(11): 1959-1966.
ZHOU Biao, SUN Qian, SUN Jun, et al. Development and verification of calculation module for He-Xe flow and heat transfer based on RELAP5 [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2021, 55(11): 1959-1966.
- [24] HUANG D, LI Z, YU L, et al. Influence of helium-xenon mixing ratio on flow heat transfer characteristics of reactor channels [J]. *Journal of Harbin Engineering University* 2021, 42, (5): 745-750.
- [25] DITTUS F W, BOELTER L M K. Heat transfer in automobile radiators of the tubular type [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 1985, 12(1): 3-22.
- [26] COLBURN A P. A method of correlating forced convection heat-transfer data and a comparison with fluid friction [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1964, 7(12): 1359-1384.
- [27] NOTTER R H, SLEICHER C A. A solution to the turbulent Graetz problem: III Fully developed and entry region heat transfer rates [J]. *Chemical Engineering Science*, 1972, 27(11): 2073-2093.
- [28] CHURCHILL S W. Comprehensive correlating equations for heat, mass and momentum transfer in fully developed flow in smooth tubes [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1977, 16(1): 109-116.
- [29] CHEN Fei, HUAI Xiulan, CAI Jun, et al. Investigation on the applicability of turbulent-Prandtl-number models for liquid lead-bismuth eutectic [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2013, 257: 128-133.
- [30] LYON R N. Liquid metal heat-transfer coefficients [J]. *Chemical Engineering Progress*, 1951, 47(2): 75-79.
- [31] RIBEIRO G B, BRAZ FILHO F A, GUIMARÃES L N F, et al. Thermodynamic analysis and optimization of a Closed Regenerative Brayton Cycle for nuclear space power systems [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 90: 250-257.
- [32] GALLO B M, EL-GENK M S. Performance analyses

- of 38 kWe turbo-machine unit for space reactor power systems [C]//AIP Conference Proceedings. Melville, NY, USA: AIP, 2008: 625-636.
- [33] EL-GENK M S, TOURNIER J M P. Small size turbo-machines for HTR plants [C]//ASME 2009 Power Conference. New York, USA: ASME, 2009: 665-674.
- [34] 刘学峥. 氦氙工质离心压气机气动设计及流动特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [35] 田志涛, 郑群, 姜斌. 氦氙混合离心压气机设计与分析 [J]. 风机技术, 2018, 60(3): 14-19.
TIAN Zhitao, ZHENG Qun, JIANG Bin. Design and analysis of helium and xenon binary mixture gas centrifugal compressor [J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2018, 60(3): 14-19.
- [36] 徐森铭, 罗磊, 杜巍, 等. 618 kW 氦氙混合工质离心透平气动设计及分析 [J]. 节能技术, 2021, 39(2): 138-143.
XU Senpei, LUO Lei, DU Wei, et al. Aerodynamic design and analysis of 618 kW radial turbine with helium-xenon mixture gas [J]. Energy Conservation Technology, 2021, 39(2): 138-143.
- [37] 徐森铭, 罗磊, 杜巍, 等. 618 kW 氦氙工质离心透平流场及气动特性研究 [J]. 汽轮机技术, 2020, 62(5): 351-354, 373.
XU Senpei, LUO Lei, DU Wei, et al. Research on flow field and aerodynamic characteristics of 618 kW radial turbine with helium-xenon mixture gas [J]. Turbine Technology, 2020, 62(5): 351-354, 373.
- [38] YUAN Ze, ZHENG Qun, YUE Guoqiang, et al. Performance evaluation on radial turbines with potential working fluids for space closed Brayton cycle [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 243: 114368.
- [39] MALIK A, ZHENG Qun, FAWZY H, et al. Evaluation of helium xenon gas mixture as working fluid in highly loaded axial compressor [J]. 风机技术, 2019, 61(2): 10-15.
- [40] MALIK A, ZHENG Qun, LIN Aqiang. The design and performance analysis of highly loaded compressor of closed Brayton cycle HTGR power plant with helium xenon gas mixture as working fluid [J]. Progress in Nuclear Energy, 2019, 117: 103084.
- [41] MALIK A, ZHENG Qun, QURESHI S R, et al. Effect of helium xenon as working fluid on the compressor of power conversion unit of closed Brayton cycle HTGR power plant [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(16): 10119-10129.
- [42] MALIK A, ZHENG Qun, QURESHI S R, et al. Effect of helium xenon as working fluid on centrifugal compressor of power conversion unit of closed Brayton cycle power plant [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(10): 7546-7557.
- [43] EL-GENK M S, TOURNIER J M. High temperature water heat pipes radiator for a Brayton space reactor power system [C]//AIP Conference Proceedings. Melville, NY, USA: AIP, 2006: 716-729.
- [44] QIN Hao, WANG Chenglong, TIAN Wenxi, et al. Energy allocation optimization of the gas-cooled space nuclear reactor [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 196: 117289.
- [45] DE ARAÚJO É F, RIBEIRO G B, GUIMARÃES L N F. Design optimization of a cross-flow He-Xe recuperator through second law analysis [J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2020, 19: 100568.
- [46] 杨夷, 霍红磊. 高温氦氙气体微通道回热器的传热流动特性分析 [J]. 原子能科学技术, 2018, 52(12): 2156-2163.
YANG Yi, HUO Honglei. Analysis of heat transfer and flow characteristic for high temperature helium-xenon gas microchannel regenerator [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(12): 2156-2163.
- [47] 马文魁, 杨小勇, 王捷. 空间堆闭式 Brayton 循环回热器传热-阻力耦合特性 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(10): 1660-1667.
MA Wenkui, YANG Xiaoyong, WANG Jie. Heat transfer-resistance coupling characteristics of recuperator in closed Brayton cycles for space reactors [J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2022, 62(10): 1660-1667.
- [48] EL-GENK M S, TOURNIER J M. Noble gas binary mixtures for gas-cooled reactor power plants [J]. Nuclear Engineering and Design, 2008, 238(6): 1353-1372.
- [49] EL-GENK M S, TOURNIER J M. Performance analyses of VHTR plants with direct and indirect closed Brayton cycles and different working fluids [J]. Progress in Nuclear Energy, 2009, 51(3): 556-572.
- [50] 李智, 杨小勇, 王捷, 等. 空间反应堆 Brayton 循环的热力学特性 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(5): 537-543, 549.
LI Zhi, YANG Xiaoyong, WANG Jie, et al. Thermodynamic analysis of a Brayton cycle system for a space power reactor [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2017, 57(5): 537-543, 549.
- [51] LIU Haiqing, CHI Zhongran, ZANG Shusheng. Optimization of a closed Brayton cycle for space power sys-

- tems [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 179: 115611.
- [52] ROMANO L F R, RIBEIRO G B. Optimization of a heat pipe-radiator assembly coupled to a recuperated closed Brayton cycle for compact space power plants [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 196: 117355.
- [53] ROMANO L F R, RIBEIRO G B. Cold-side temperature optimization of a recuperated closed Brayton cycle for space power generation [J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2020, 17: 100498.
- [54] 郭凯伦, 王成龙, 秋穗正, 等. 兆瓦级核电推进系统布雷顿循环热电转换特性分析 [J]. *原子能科学技术*, 2019, 53(1): 16-23.
- GUO Kailun, WANG Chenglong, QIU Suizheng, et al. Analysis on thermoelectric conversion characteristic of Brayton cycle in megawatt-class nuclear electric propulsion system [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2019, 53(1): 16-23.
- [55] 张文文, 刘逍, 田文喜, 等. 兆瓦级空间热管反应堆动力系统概念设计 [J]. *原子能科学技术*, 2017, 51(12): 2160-2164.
- ZHANG Wenwen, LIU Xiao, TIAN Wenxi, et al. Conceptual design of megawatt class space heat pipe reactor power system [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2017, 51(12): 2160-2164.
- [56] 胡文桢, 邓坚, 刘晓晶, 等. 小型氦氙冷却反应堆关键参数初步研究 [J]. *核技术*, 2021, 44(1): 83-88.
- HU Wenzhen, DENG Jian, LIU Xiaojing, et al. Study on key parameters design of small helium xenon cooled reactor [J]. *Nuclear Techniques*, 2021, 44(1): 83-88.
- [57] 王佳宾, 徐虎, 董平, 等. 基于金属燃料的 SOFC/氦氙布雷顿双闭式循环联合动力系统优化设计 [J]. *水下无人系统学报*, 2021, 29(6): 659-666.
- WANG Jiabin, XU Hu, DONG Ping, et al. Optimization for design of SOFC and helium xenon Brayton double-closed cycle combined power system based on metal fuel [J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2021, 29(6): 659-666.
- [58] 刘维新, 石凌峰, 裴刚. 空间核能布雷顿循环系统热力学参数分析及优化 [J]. *新能源进展*, 2022, 10(2): 87-94.
- LIU Weixin, SHI Lingfeng, PEI Gang. Thermodynamic parameter analysis and optimization of the space nuclear Brayton cycle system [J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2022, 10(2): 87-94.
- [59] MA Wenkui, YE Ping, ZHAO Gang, et al. Effect of cooling schemes on performance of MW-class space nuclear closed Brayton cycle [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2021, 162: 108485.
- [60] 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.
- [61] EL-GENK M S, TOURNIER J M P. DynMo-CBC: dynamic simulation model of a space reactor power system with multiple CBC loops [C]//7th International Energy Conversion Engineering Conference. Reston, VA, USA: AIAA, 2009: AIAA 2009-4596.
- [62] 李智. 空间反应堆动态能量转换系统特性研究 [D]. 北京: 清华大学, 2017.
- [63] MA Wenkui, YE Ping, GAO Yue, et al. Comparative study on sequential and simultaneous startup performance of space nuclear power system with multi Brayton loops [J]. *Acta Astronautica*, 2022, 199: 142-152.
- [64] ZHANG Ran, GUO Kailun, WANG Chenglong, et al. Thermal-hydraulic analysis of gas-cooled space nuclear reactor power system with closed Brayton cycle [J]. *International Journal of Energy Research*, 2021, 45(8): 11851-11867.
- [65] WANG Chenglong, ZHANG Ran, GUO Kailun, et al. Dynamic simulation of a space gas-cooled reactor power system with a closed Brayton cycle [J]. *Frontiers in Energy*, 2021, 15(4): 916-929.
- [66] 辛杰, 卢瑞博, 方华伟, 等. 400 kW 空间堆布雷顿循环系统运行特性分析 [J]. *上海航天(中英文)*, 2021, 38(2): 98-105.
- XIN Jie, LU Ruibo, FANG Huawei, et al. Operation characteristic analysis of 400 kW Brayton cycle space reactor system [J]. *Aerospace Shanghai (Chinese & English)*, 2021, 38(2): 98-105.
- [67] 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 Xiang, DU Lei, WANG Haoming, 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.
- [68] 王浩明, 薛翔, 张银勇, 等. 空间闭式布雷顿循环旁路调节特性分析 [J]. *火箭推进*, 2021, 47(2): 61-67.
- WANG Haoming, XUE Xiang, ZHANG Yinyong, et al. Analysis of bypass regulation characteristics for space closed Brayton cycle system [J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2021, 47(2): 61-67.

(编辑 亢列梅)