

空间热离子能量转换技术发展综述

钟武烨, 赵守智, 郑剑平, 吕征, 解家春

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 空间核反应堆电源是未来空间任务大功率、长寿命能源需求的有力保障, 热离子能量转换技术是空间热离子反应堆电源的关键技术之一。概述了空间热离子反应堆电源的总体构造及工作原理, 从热离子能量转换的原理、热离子发电元件的类型及其特点、电极材料、试验装置等方面综述了热离子转换技术的发展现状、存在的问题及发展趋势。

关键词: 空间核反应堆电源; 热离子能量转换; 电极材料; 试验装置

中图分类号: TM915

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2020)01-0047-14

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20200114001

引用格式: 钟武烨, 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.

Reference format: 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.

引言

随着空间技术的发展, 空间资源开发及探索成为大国竞争的重要关注点。深空探测、高轨高分辨勘察、空间科学平台等对空间电源系统的功率、寿命及可靠性提出了越来越高的要求。空间核反应堆电源将持续可控链式反应产生的热量通过热电转换系统发电, 具有能量密度高、不依赖太阳等优点, 可有效突破太阳能电池50 kWe功率上限的瓶颈, 特别适用于大功率、长寿命能量需求或者难以获取太阳能的空间任务^[1,2]。

空间热离子反应堆电源是空间堆电源的重要技术路线之一, 其通过热离子能量转换的方式将反应堆裂变能直接转换为电能, 具有体积小、结构紧凑、比质量小等优点^[3], 且在20世纪80年代经历了两次空间飞行验证^[4], 技术较为成熟可靠。本文对空间热离子反应堆电源的发展历程、总体结构与工作原理, 及其热电转换的核心器件——热离子发电元件的发展现状作简要综述。

1 空间热离子堆电源发展情况

1.1 总体结构及工作原理

空间核电源通常由反应堆本体、热电转换系统、屏蔽体、热辐射器组成, 如图1所示。为减小整体的质量, 空间核电源通常设计为锥形构造, 反应堆布置于

锥角一端, 航天器的仪器仪表及控制系统布置于屏蔽体的阴影, 反应堆余热采用热辐射器排放到外空间。

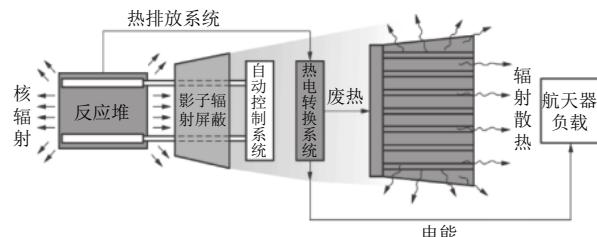


图1 空间核电源的整体构造
Fig. 1 The whole construction of space nuclear power plant

根据热离子发电元件相对于反应堆堆芯的位置, 可将其分为堆外转换和堆内转换。前者需采用高温热管(或冷却剂)将堆芯的热量导出到发射极, 运行温度较低; 而后者则在堆芯内完成了热电转换, 燃料元件兼具了释热元件和发电元件的功能, 称作热离子燃料元件(Thermionic Fuel Element, TFE), 燃料包壳同时作为发电元件的发射极, 利于紧凑布置。这两类发电元件各具优点, 从目前研究发展历程看, 堆内转换占多数, 本文侧重于堆内转换的介绍, 其基本构造如图2所示。与一般的空间核电源相比, 热离子反应堆电源增加了铯蒸气发生器和气体修补系统, 前者用于维持热离子发电元件动力工况的工作气氛, 后者用于修复氢化锆慢化剂裂纹^[5], 以防止氢的渗漏。

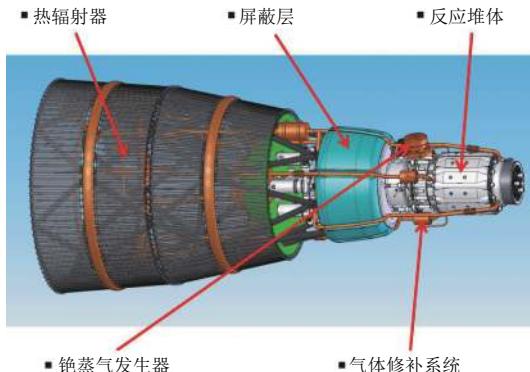


图2 空间热离子反应堆电源的基本构造

Fig. 2 The base construction of space thermionic reactor power plant

1.2 国外发展情况

俄罗斯（前苏联）和美国最先认识到空间核电源在军事和深空探测领域具有不可比拟的巨大优势。自20世纪50年代，以美苏为首的大国积极开展空间核动力的研究，以下主要阐述以热离子反应堆为代表的的空间核电源的发展历程^[6-7]。

1.2.1 俄罗斯发展情况

俄罗斯（前苏联）在1960年代中期就开始空间热离子反应堆电源的研究。TOPAZ计划的热离子核反应堆电源系统总体由红星公司负责，反应堆及热电转换部分由物理动力工程研究院研发，采用的是多节型热离子燃料元件，TOPAZ堆如图3所示。1970年建成世界上第一座热离子反应堆电源地面试验装置，此后至1984年，依托TOPAZ计划在物理动力工程研究院先后共建成了7座采用多节元件的热离子反应堆地面装置，经大量试验后，于1987年和1988年成功发射，分别应用在侦察卫星上（宇宙-1818和宇宙-1867），两次测试都获得了成功，轨道上的运行数据与地面测试结果吻合良好，TOPAZ系统的电功率输出可达约5 kW，总体热电转换效率不足5%。

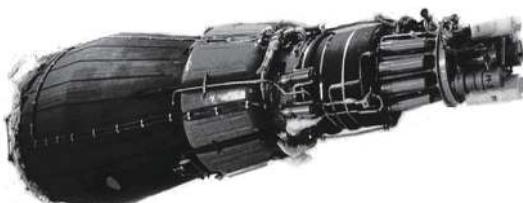


图3 TOPAZ反应堆电源的外观图

Fig. 3 Configuration of TOPAZ reactor power plant

在1960年代开展TOPAZ计划的同时，于1965年开始了ENISEY计划的热离子核反应堆电源，采用的是单节型热离子燃料元件。ENISEY反应堆电源系统由中央机械设计局负责，反应堆的研制单位为库尔恰托夫研

究院（NRC-Kurchatov Institute），ENISEY反应堆电源如图4所示。直到1970年代早期，相应的单位一直在协作开展这两个计划，以至于这两个反应堆的设计有很多相似之处。之后随着协作关系终结，两个计划开始独立发展。第一座ENISEY地面实验堆于1975年建成，到1989年共建成了30座ENISEY反应堆电源地面装置，并已完成地面的所有试验^[8]，地面电源的电功率可达6 kW，总热电转换效率约为5%，由于前苏联国内政治经济环境的改变，并没有进行ENISEY反应堆电源的飞行试验。

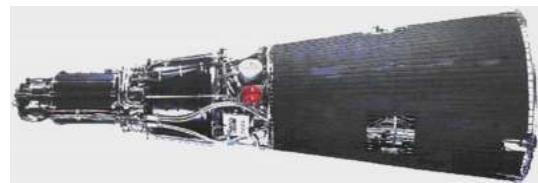


图4 ENISEY反应堆电源的外观图

Fig. 4 Configuration of ENISEY reactor power plant

俄罗斯经过TOPAZ和ENISEY项目的积累，建立了比较完备的研制体系。苏联解体后，俄罗斯把空间核电源从研制调整到研究状态。目前，俄罗斯正研制大功率的热离子燃料元件，设计大功率的电源/推进两用的空间核电源系统^[9]。

1.2.2 美国发展情况

美国从1960年代开始对热离子转换进行了大量的应用基础研究，美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）联合能源部牵头组织了相关的研究计划，参与的单位包括喷气推进实验室（Jet Propulsion Laboratory, JPL）、MIT、热电子公司、通用原子公司等机构，但是美国没有建造过完整的热离子反应堆电源系统。

直至1992年，美国政府通过代理公司租借了两套完整的ENISEY反应堆电源系统（后改称TOPAZ-II），开启了TOPAZ国际合作计划（TIP计划）。TIP研究室位于美国新墨西哥大学（The University of New Mexico），主动战略防御机构（SDIO，后更名为弹道导弹防御机构BMD）开始提供资助研究将TOPAZ-II反应堆系统用于核电推进太空实验计划的可能性。单节热离子燃料元件在俄引进的“里克”热物理台架上进行了发电演练，两个TOPAZ-II试验样机在俄引进的“贝加尔”台架上进行了电加热试验，试验结果符合技术任务书的要求。由于美国国内形势的变化，TIP计划中的飞行计划被取消了。尽管如此，在TOPAZ-II的技术基础上，美国在90年代完成了40 kW

的SPACE-R空间热离子核反应堆电源设计及关键材料验证^[10]。此后, 美国逐渐将热离子转换技术的研究调整为应用基础研究, 积极地尝试某些新的改进措施^[11-12]。

2 热离子发电元件技术研究现状

热电转换技术是热离子反应堆电源的核心技术之一。热离子发电元件是热电转换的器件, 其效率的高低、寿命的长短、质量和可靠性的好坏, 对空间热离子反应堆电源的总体性能起着决定性的影响。

2.1 热离子能量转换原理及早期历史

热离子反应堆电源工作的基本原理是热离子能量转换。在爱迪生发现热电子发射现象(1885年)、汤姆森发现电子(1887年)、理查森定量描述了热电子发射电流(1902年)后, 采用热电子发射的方式来进行能量转换成为可能。1915年, 施利希特发表了第一篇通过热电子发射发电的科研论文; 1940年, 苏联的A.Ф.约飞和H.Д.莫尔古利斯等最先开始进行真空热离子能量转换器的理论和实验研究工作。但受空间电荷、材料的高温寿命约束等因素的影响, 其热电转换的效率很低, 并不具备应用价值。1947年, H.Д.莫尔古利斯和П.М.马尔丘克发现, 向热离子能量转换器电极间隙内充入铯蒸气可以大大增加电流密度。1950年代中期, 随着高温材料及反应堆技术的发展, 以及空间任务对于紧凑高效电源的需求, 俄罗斯(前苏联)和美国最早开始了热离子转换技术在空间的应用研究, 其运行原理^[13-14]如图5所示, 热离子转换器采用相互靠近的金属电极对绝缘密封, 发射极被加热到高温产生热电子发射, 铯蒸气被充入电极的间隙(1 mm以内)并在其中受电子碰撞电离形成等离子体, 消除了

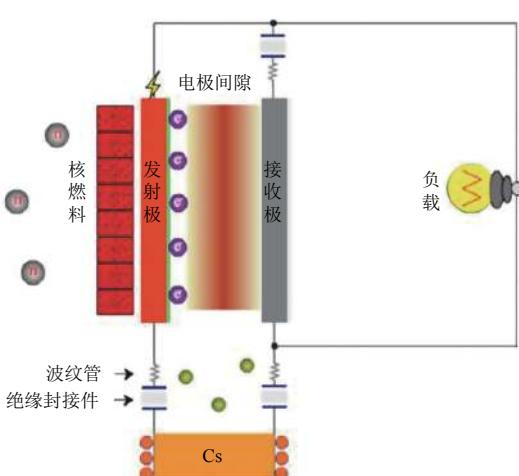


图5 热离子能量转换的工作原理

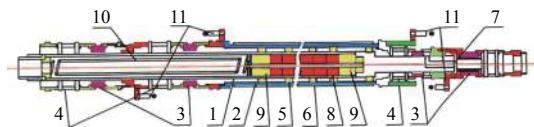
Fig. 5 Operating principle of thermionic energy conversion

电子输运的势垒, 电子输运通过等离子体区后达到接收极; 发射极与接收极形成电源的两极, 对外输出电功。采用反应堆热源输入可获得可观的电功输出, 俄罗斯、美国逐渐加大了对热离子反应堆电源的研发投入, 而西德、法国等也相继开展过堆内转换型热离子转换技术的研究^[15]。

2.2 发电元件分类及特点

2.2.1 单节热离子转换技术

单节热离子燃料元件的结构及实物如图6~图7所示, 电极长度等于核反应堆的堆芯高度。整体由核燃料、发射极、接收极、陶瓷隔离定位块、金属陶瓷封接件、电流输出线和其它辅助部件组成。发射极与接收极同轴套装, 间隙约为0.5 mm, 两者绝缘密封; 铯蒸气由右端引入; 发射极内孔为核燃料腔室, 它与电极间隙隔离, 腔室内装有环形的燃料芯块和反射层, 核燃料腔室左端是敞开的。每根TFE有4个电流导线, 电流由元件发射极和接收极的左右端并接后输出, 减小电极上的欧姆损失。



1-发射极; 2-接收极; 3-金属陶瓷封接件; 4-波纹管; 5-电极间隙定位块; 6-接收极外部绝缘层; 7-铯蒸气供应通道; 8-核燃料; 9-端部中子反射层; 10-芯块压紧固定及气体排放装置; 11-电流输出端

图6 单节热离子燃料元件结构简图

Fig. 6 Structure chart of single cell thermionic fuel element



图7 单节热离子燃料元件样件(外层为Al2O3涂层)

Fig. 7 Prototype of single cell thermionic fuel element

单节TFE整体上只含1根发电元件, 可靠性好; 沿TFE发射极的温度场非常均匀, 利于维持工况的一致; 发射极具有敞开的内腔(贯通至外太空), 裂变气体产物可通过该通道排放, 排气通道与铯通道隔离, 有利于保持电极间隙的铯蒸气不被污染, 利于维持元件发电性能的稳定性; 在地面的实验可以用电加热器代替核燃料进行全尺寸的元件发电演练, 核燃料可以在发射前或在核动力装置进入辐射安全轨道时装入, 有利于降低研制和试验成本, 保障了热离子空间核反应堆在制造和运输阶段的安全性。

单节TFE电极长, 输出电流大, 高温电极上的欧姆损耗大。由于元件电极长, 受制造工艺限制发射极

径向尺寸较大，有限的堆芯尺寸下可装载的元件少，总电极表面积必然小，因此单节TFE不适合用于大功率的核动力电源装置。从制造装配的角度看，需要制备难熔金属单晶薄壁管发射极，需要将约600 mm的电极对按0.5 mm的间距同轴套装，并且涉及大量的异种材料连接与密封（金属之间、陶瓷与金属之间），因此单节TFE的研制难度较大。

2.2.2 多节热离子转换技术

多节TFE的结构示意如图8所示，由多个（5~13个）相对较短的热离子发电单元串联而成，前一节的接收极通过换向连接件与后一节的发射极连接，实现电子的连续发射，获得串联相加的较大输出电压。串联后的总长与核反应堆堆芯高度相等。由于电路串联，流过各节的电流是相等的，在单个发电单元内是通过发射—接收的过程维持通路，因此最终的串联电流取决于最小的发射—接收电流。而全长TFE的轴向温度分布不均匀，中心温度较高，发射电流密度大，为防止扼流，需保证每节发电单元有相同的发射电流，因此串联的发电单元的长度要取从中心到两端逐渐递增的最优设计。

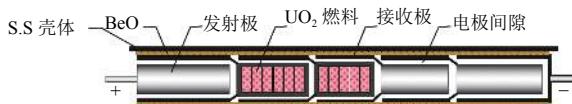


图8 多节热离子燃料元件的结构简图

Fig. 8 Structure chart of multi-cell thermionic fuel element

多节TFE由于每节的长度较短，加工径向尺寸较小的元件成为可能，可在堆芯密集布置，适合用于大功率的核动力电源装置。原则上，单晶TFE的材料及工艺技术对多节TFE有支撑作用，而多节TFE的结构较复杂，多节TFE接收极是一个多层管（至少是3层）的结构，以3层为例，制备紧密结合的接收层-绝缘层-支撑管的工艺难度较大。若裂变气体的排放通道与电极间隙相通，对元件性能稳定性有影响。经过改进、有裂变气体排放装置的元件结构则增加了装置的复杂性^[16]，如图9所示。此外，多节TFE通常不能用电加热代替核加热进行试验，制备和试验过程中必须带着核燃料操作，研制和试验成本高。

2.2.3 单通道多节热离子转换技术

单通道多节热离子燃料元件最早于1969年被提出来并经过几次试验，但高温电绝缘的发射极组件和低热阻多层接收极组件的制造工艺当时难以解决。随着制备工艺的不断改进，到90年代中期，为了开发高功率的空间核动力装置，俄罗斯又重新提出单通道多节

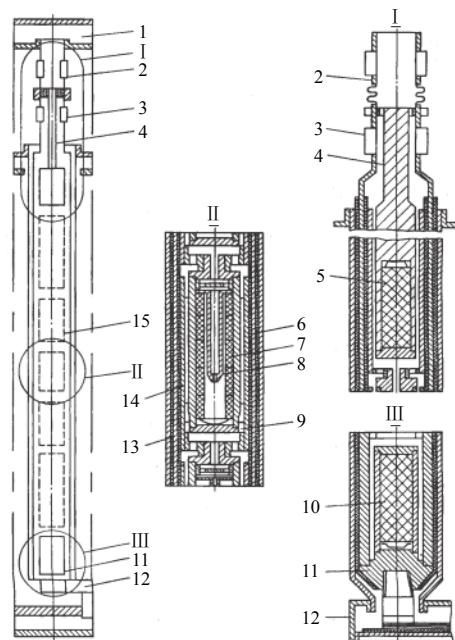


图9 改进型的多节热离子燃料元件

Fig. 9 Modified multi-cell thermionic fuel element

TFE的设计并与美国展开联合研制。单通道多节TFE的主要结构和功能单元包括发射极组件、接收极组件、金属陶瓷封接组件、绝缘定位件和电极间连接件。通过与单节型TFE的对比可以看出^[17]（图10），单通道多节TFE综合了单节TFE和多节TFE的结构优点，可以获得串联相加的输出电压，欧姆损耗较小，又可以利用中心燃料腔排放裂变气体，并能在研制阶段采用电加热代替核加热，在准备发射的最后阶段才装入燃料。

由于结构设计及组件的工作环境比较相似，单节TFE和多节TFE的很多相关材料及组件都可以直接应用到单通道多节TFE上（如接收极的多层管工艺），而对于单通道多节TFE的开发工作来说，电极组件和电极间连接件的制备工艺和性能是关键。其中，单通道多节TFE的发射极起初采用的是3层管结构，见图11（a）^[18]，最内层的包壳管为W单晶合金，发射极涂层为多晶W发射极，中间陶瓷层保证发射极之间以及发射极与包壳之间的绝缘。考虑到绝缘层材料需要有足够的机械强度、高温稳定性、化学稳定性、辐照稳定性和绝缘强度，中间绝缘层最终选择了Sc₂O₃。通用原子公司（General Atomics）采用热喷涂工艺在单晶W管外圆上制备出Sc₂O₃绝缘层，继而与最外层的多晶W管热等静压连接，制备出了单通道多节TFE 3层管

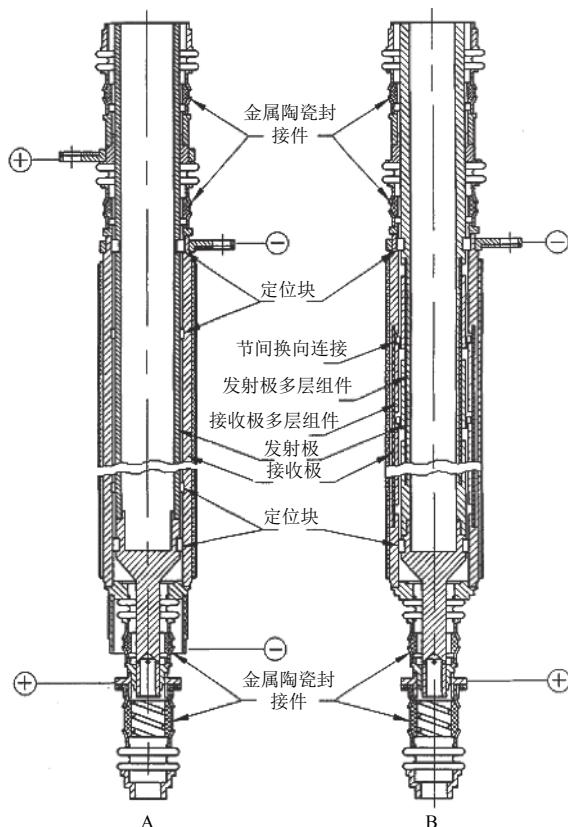


图 10 热离子发电元件结构比较: A-单节型; B-单通道多节型

Fig. 10 The structure comparison of thermionic cell: A-single cell TFE; B-conductively coupled multi-cell TFE

发射极试验件。由于 Sc_2O_3 与W的热膨胀系数相差太多, 在二者连接的界面处设计了多层不同比例的W- Sc_2O_3 金属陶瓷功能梯过度层以缓解热膨胀不匹配所造成的应力。但是, 在热等静压冷却过程中, 因 Sc_2O_3 与W之间收缩程度的差异而导致 Sc_2O_3 层中出现很多径向裂纹(图11(b))。虽然后续的热循环以及电绝缘强度试验都证实了径向的裂纹不会对发射极3层管的性能造成明显的负面影响, 但是之后的发射极结构设计还是放弃了这种方案, 而采用了新的5层管设计, 如图12所示^[19]。

在成功探索关键部组件制备工艺并验证相应使用性能的基础之上, 通用原子公司在2000年后研制了单通道3节TFE的原理样件并进行了电加热发电性能试验^[20-21], 单通道3节元件结构及实物见图13。总的来说, 单通道多节TFE由于综合了单节与多节的结构优点, 是一种很有前途的发电元件设计方案, 尤其是如将低温高效的新型电极对材料^[22]应用于单通道多节TFE, 将进一步提升单通道多节TFE的电输出性能与寿命, 有助于提升热离子反应堆电源在大功率空间核电源领域的竞争力。

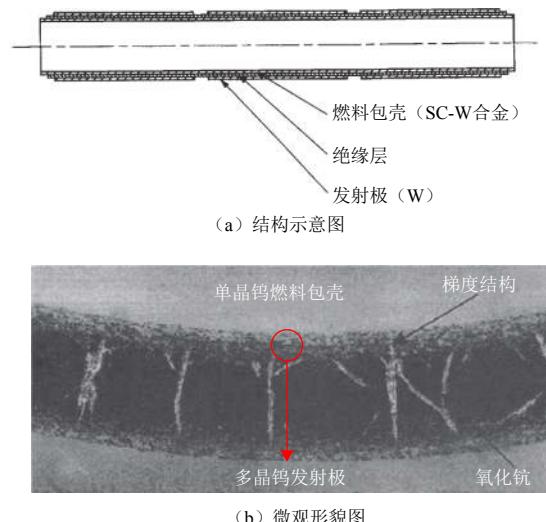
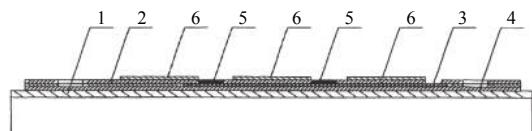


图 11 发射极3层管组件结构

Fig. 11 Structure of three layers tube for emitter module



1-包壳; 2, 4-Nb过渡层; 3-Al₂O₃层; 5-Sc₂O₃层; 6-W单晶发射极涂层

图 12 发射极5层管组件结构

Fig. 12 Structure of five layers tube for collector module

2.3 电极材料的研究现状

2.3.1 发射极材料

1) 发射极材料的要求

在堆内型热离子反应堆中, 热离子燃料元件既作为释热元件, 也作为发电元件。发射极材料既作为燃料的包壳, 也作为热电子的发射材料。在运行过程中, 发射极材料处于高温、辐照、受燃料肿胀的应力、铯腐蚀等环境。发射极的选材应满足以下的基本要求: 高温(1 600 °C)蠕变速率较低; 高的真空功函数, 以优化电输出参数; 与铯蒸气和核燃料具有相容性, 并且对燃料和裂变产物的扩散渗透率低; 韧脆转变温度低, 加工制造容易; 小的热中子俘获截面, 使热堆的尺寸和质量参数最小化; 低密度, 低电阻。

2) 发射极材料的性能

因为使用温度高(约1 600 °C), 钼、钨等难熔金属常被用作热离子反应堆的发射极材料。在美国, 大部分的开发和研究是多晶材料和时效硬合金, 主要的强化机理是弥散强化^[23]; 而俄罗斯则开发了Mo、W难熔金属的单晶及其合金材料, 表1给出了俄罗斯鲁奇研究院开发的发射极材料^[24]。单晶材料被提出是基于以下的理由。

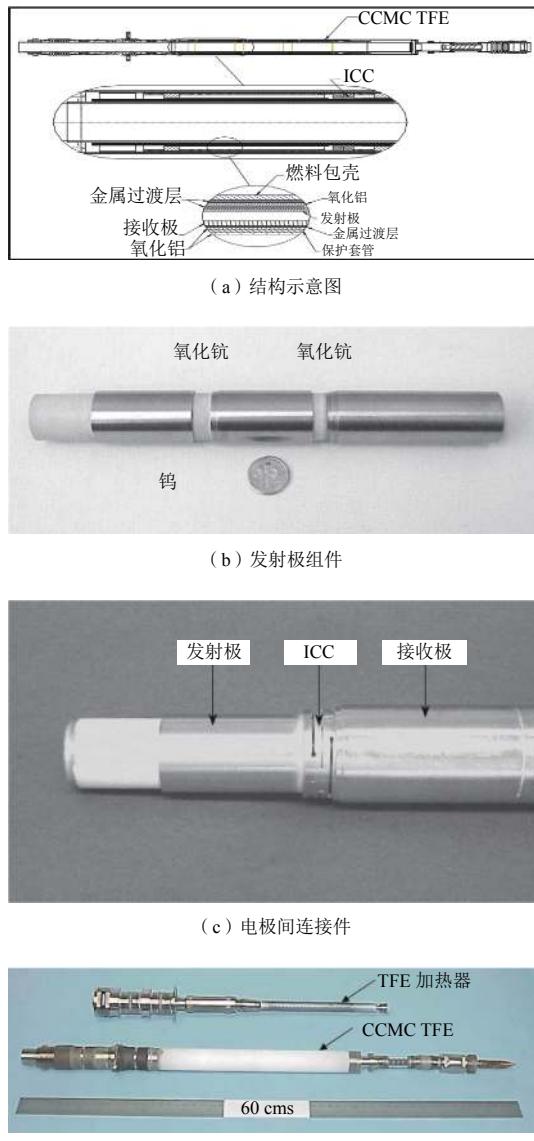


图 13 单通道三节发电元件结构及实物图

Fig. 13 Structure and prototype of conductively coupled multi-cell

表 1 鲁奇研究院研发的发射极材料

Table 1 Emitter material developed by Lutch Institute

开发年代	发射极材料
1968—1970	Mo-Nb合金单晶
1970—1972	[111]轴向的单晶Mo
1972—1976	涂敷 ¹⁸⁴ W多晶涂层的Mo单晶
1976—1977	涂敷 ¹⁸⁴ W单晶涂层的Mo单晶
1977—1982	涂敷 ¹⁸⁴ W单晶涂层的合金单晶Mo-3Nb
1982—1985	¹⁸⁴ W单晶
1985—现在	¹⁸⁴ W-Nb合金单晶

(1) 不存在晶界, 因此, 铀渗透进单晶钼比渗透进多晶钼要低2个数量级以上; 单晶钼比多晶钼的蒸发速率降低一半。

(2) 不会再结晶, 这在热离子燃料元件工作温度的整个范围内能够提供结构和性能的稳定性。

(3) 韧脆转变温度低, 因此具有较好的加工性能。

(4) 电子功函数和机械性能各向异性, 使得利用该材料最好的参数成为可能。

W合金单晶的高温力学性能(屈服强度、蠕变强度)优于Mo合金单晶^[25], 为了更全面地比较分析W、Mo合金单晶作发射极材料的应用特点, 其性能参数如表2所示, 其中有3点差异值得注意:

表 2 W、Mo合金单晶的其它性能参数
Table 2 Other parameters of W、Mo alloy monocrystal

性能	Mo合金单晶	W合金单晶
亚晶粒的消角/ (°)	<2	<2
在20 °C时的电阻率/ (Ohm·m)	5.0~5.5 × 10 ⁻⁸	7.5~8.0 × 10 ⁻⁸
在20 °C时的热导率/ (W/m·K)	160~170	100~120
(110) 晶面的功函数/ (eV)	5.0	5.2
韧脆转变温度/ (°C)	<-100	<20
纯金属单晶的密度/ (kg·m ⁻³)	10.22	19.25

(1) W(110)晶面的真空功函数比Mo(110)晶面高0.2 eV, 这使得W单晶不仅作为结构材料, 在高温蠕变强度上有优势; 作为电子发射的功能涂层, W单晶发射层同样具有优势。有研究者在Mo单晶合金表面制备W单晶涂层^[26-27]。

(2) W材料的密度几乎是Mo的两倍, 而W合金单晶作发射极所需的厚度较小, 可弥补W的高密度缺点。

(3) 在讨论Mo、W的合金性能时, 通常需要包括加工性和可塑性的问题, 而韧脆转变温度 T_{bd} 在一定程度上可以作为加工准则。俄罗斯鲁奇研究院Nikovaev等^[28]采用3点弯曲法对Mo、W的单晶及多晶合金的 T_{bd} 进行了测量: 单晶材料的 T_{bd} 较低, 单晶W的 T_{bd} 值略高于室温; 而多晶材料的 T_{bd} 普遍较高, 并且再结晶后 T_{bd} 还有所增大, 不利于加工。

2.3.2 接收极材料

热离子发电元件接收极材料的使用要求归纳如下: 工作温度下(500~700 °C)长期服役的稳定性; 较低的吸铯功函数, 以优化电输出参数; 低蒸发速率, 与铯蒸气和核燃料具有相容性; 小的热中子俘获截面, 使热堆的尺寸和质量参数最小化; 低密度, 低电阻。从作为结构材料的选材看, 能用作发射极的材料理论上也能应用于接收极, 但发射极单晶材料的制备成本过高, Nb、Mo、Ni、Re以及不锈钢等金属的多晶都曾研究用作接收极^[29]。

1) 传统接收极材料

1970年代中期, 俄罗斯TOPAZ计划的接收极材料采用BH-2合金(俄牌号, 钨基合金), 而ENISEY则采用CM-4合金(俄牌号, 钼基合金), 表3给出了这两种接收极材料的化学成分^[30]。从作为电子功能的材料看, 接收极极吸铯功函数决定于接收极内表面的浅层, 当时并没有考虑到它们的表面成分和近表层的特征, 以及它们与热离子转换器电极间环境的相互作用。

后来俄罗斯的研究者在接收极内表面成分组成及对功函数影响方面做了深入的研究发现^[31]: 接收极材料的表层和近表层所含的杂质与电极间介质(包括气体铯、氧、及裂变性气体等)发生反应可以影响其功函数。值得注意的是, 热离子转换器电极间从发射极到接收极的质量迁移也将极大地改变接收极本身发射特性, 产生质量迁移后, 接收极的功函数将由其内表面的沉积物所决定^[32]。

表3 俄罗斯接收极材料的化学成分组成

Table 3 Chemical composition of collector material used in Russian

牌号	成分/(wt.%)								
	Nb	Ru	Al	Mg	N ₂	Cr	Fe	Ni	Si
BH-2	the basis	-	-	-	-	31×10^{-2}	-	5×10^{-3}	3×10^{-2}
CM-4	-	2×10^{-1}	1×10^{-3}	1×10^{-2}	1×10^{-3}	1.4×10^{-2}	2.5×10^{-2}	1×10^{-2}	-
	Y/B		Mo	W	Ti	Zr	V	C	O
BH-2	-		4.4	-	1.21×10^{-2}	7×10^{-1}	-	7×10^{-2}	2×10^{-2}
CM-4	-		the basis	$<10^{-3}$	-	-	-	4×10^{-3}	1×10^{-3}

2) 接收极材料的研究趋势

在接收极的运行温度下(约600 °C), 表面被铯蒸气充分覆盖, 其电子发射在很大程度上受铯的影响, 其功函数接近于铯本身的功函数(1.89 eV), 量值在1.6~2.0 eV之间^[33], 如图14。降低接收极的吸铯功函数, 有利于降低势垒指数, 提高热电转换效率, 以拓宽热离子转换技术空间应用的前景。近年来, 研究者改变了金属表面对铯的吸附形态, 获得了更低的吸铯功函数:

(1) 控氧接收极材料

根据金属功函数的CLLV模型^[34-35], 在金属表面与铯之间增加一个电负性的介电层(如氧层)将使得铯原子的吸附密度减少, 达到降低金属吸铯功函数的目的。俄罗斯Kurchatov的研究者S S Gerashchenko^[36]于1994年开展过Mo单晶接收极的氧离子注入改性, 但由于氧在高温服役过程的析出, 导致发射极材料蒸发加快, 发电性能没有达到预期的效果。随后物理动力工程研究院(IPPE)的V I Yarygin等^[37]采用低掺杂的钒铬合金(俄牌号VKh2U)获得了低功函数的接收极, 其吸铯功函数的最小值为1.4 eV(如图15所示)。为了获得最佳的电输出, IPPE的研究者尝试了一系列发射极与VKh2U合金组成电极对进行了发电性能测试实验, 最终选定了Mo基体涂覆Pt作为发射极, 其发电性能曲线如图16所示, 转换器的势垒指数为1.88 eV($T_E=1504$ K), 发电效率高达13%~17%($T_E=1600\sim1800$ K), 这两项指标均优于TOPAZ项目的热离子发

电元件(如图17所示, TOPAZ的电极对: W_F<111>-VN-2)。应该注意的是, 从热离子发电元件集成到电源系统的过程中, 存在热损失、导线连接电损耗等因素, 因此, 电源系统的转换效率普遍低于发电元件的效率。

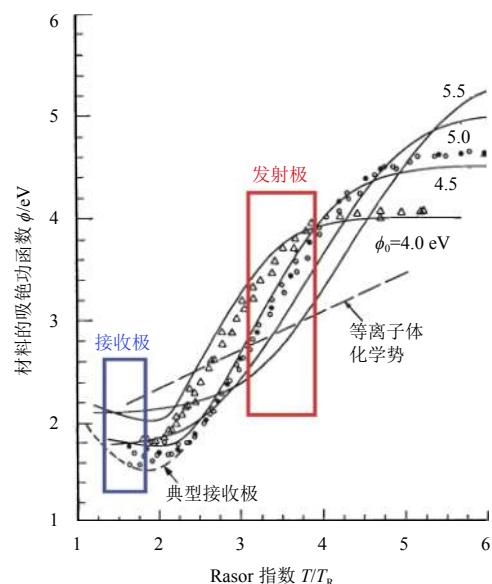


图14 若干金属电极的吸铯功函数
Fig. 14 Cesium work function of some metal electrode

VKh2U合金的化学成分如表4所示, 研究分析表明, 该合金的吸铯功函数较低的原因在于其表面形成的金属-氧-铯体系, 相对于金属-铯的体系具有更低的功函数。利用Auger电子光谱学和接触电位差/高分辨率全电流光谱的方法, 对VKh2U合金在真空退火过程

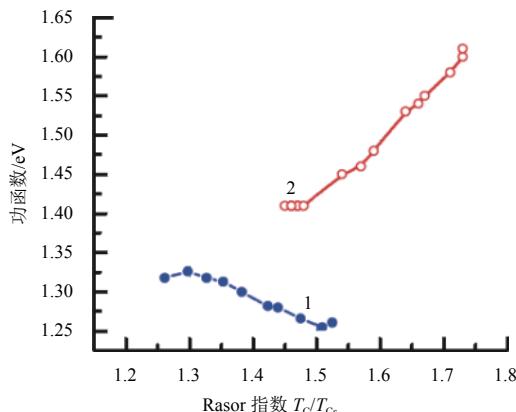


图 15 VKh2U 合金的功函数: 1-总电流法测定; 2-有效功函数
Fig. 15 Work function of VKh2U alloy: 1-total current method; 2-effective work function

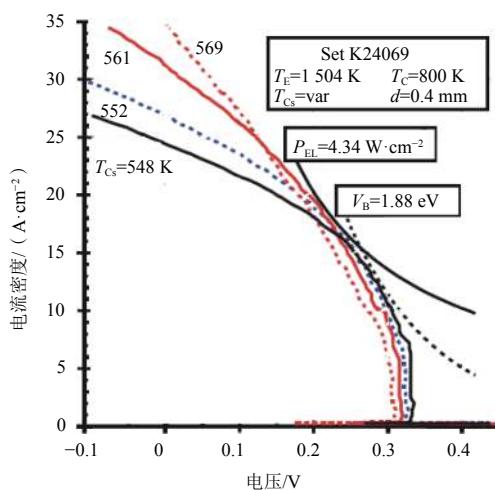


图 16 Mo-Pt、VKh2U 合金电极对的伏安特性
Fig. 16 Voltage-Ampere characteristic of Mo-Pt and VKh2U alloy electrode pairs

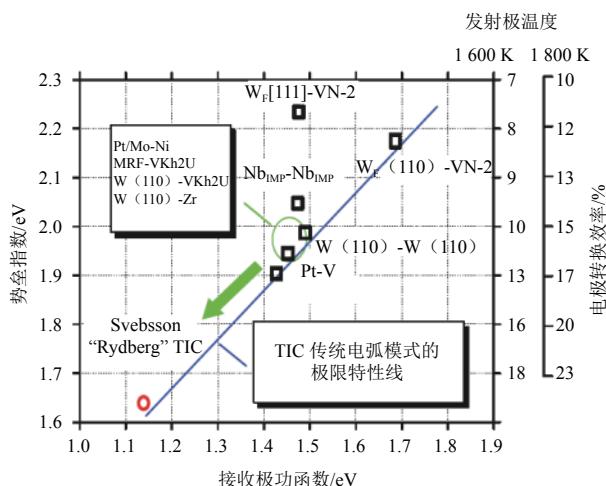


图 17 采用先进接收极材料的TEC发电性能
Fig. 17 TEC output characteristic based on advanced collector material

中材料表面成分及真空功函数进行分析, 结果表明: 高温服役过程中, 材料表面的成分构成、真空功函数值还不稳定, 工艺还需进一步优化, 应用性能的稳定性还需进一步研究确认。

表 4 VKh2U合金的主要成分组成
Table 4 The major chemical composition of VKh2U alloy

成分/ (wt.%)						
Y	Ti	Zr	V	C	O	Cr
0.5	<0.1	2	<0.6	剩余		

应该指出, 如前所述, 从发射极到接收极将产生蒸发迁移, 若接收内表面的覆盖层足够厚则将改变接收极的发射性能。为避免这个趋势, 与VKh2U合金接收极配对的Mo-Pt发射极具有较强的抗氧化能力, 其较低的工作温度也有利于遏制蒸发。IPPE还设计了热管导热的堆外转换热离子反应堆, 该电极对材料的低温适用性正好契合了热管的使用温度, 并且堆外热离子能量转换意味着电极间隙可以设计得更小, 从而获得更优的电输出性能^[38]。

(2) 基于铯里德伯物质的接收极

为了进一步降低接收极的功函数, 获得更低的势垒指数, 研究者开展了铯的里德伯态物质的应用研究。里德伯态是原子的一种激发态(亚稳态)。当涂覆碳的接收极吸附铯蒸气时, 碳与铯会反应生成铯的碳化物, 这种形态的铯具有较高的能量状态, 即形成了铯的里德伯态。

20世纪90年代, 瑞典哥德堡大学(University of Gothenburg)的Holmlid等^[39]在穿孔的Ni表面上采用机械涂覆石墨胶体制得碳涂层作为接收极, 获得了更低的吸铯功函数。2002年后, 俄罗斯IPPE的V. I. Yarygin等^[40]继续开拓了该项研究, 针对电极对为Pt(发射极)和涂覆碳的Ni(接收极)的热离子转换器进行了研究, 含铯里德伯态接收极的吸铯功函数降至1.0~1.2 eV, 其势垒指数的最小值为1.59 eV($T_E = 1 300$ K, $T_C = 696$ K, $d = 0.3$ mm), 此时热电转换效率提升到20%~26%(见图17中Rydberg TIC), 发电性能得到很大的提升, 系目前报道的该运行条件下的实验室最高效率。应该指出, 含铯里德伯态的激发机制、铯里德伯态物质长期应用的稳定性, 以及转换装置的设计等问题仍需要继续研究。

2.4 热离子发电试验装置

热离子发电元件的研究和试验需要在专门的装置上开展, 根据研究和试验目的的不同, 本节对最主要的设施进行分类阐述。

2.4.1 原理性实验装置

原理性实验装置的主要研究任务包括: ①研究电极间隙等离子体内和电极上的物理过程; ②论证所选电极材料的正确性, 为发电元件的电特性设计提供等温伏安特性曲线; ③寻求提高热离子能量转换效率和寿命的途径。为开展以上的研究任务, 俄罗斯和美国自1960年代起就建立起大量的原理性实验装置, 原理性实验装置的电极要求处于等温等势的状态, 其发电的表面积通常较小, 根据电极的形状, 一般可分为平板型电极($1\sim2\text{ cm}^2$)和圆管型电极(约 10 cm^2), 如图18~图19所示。

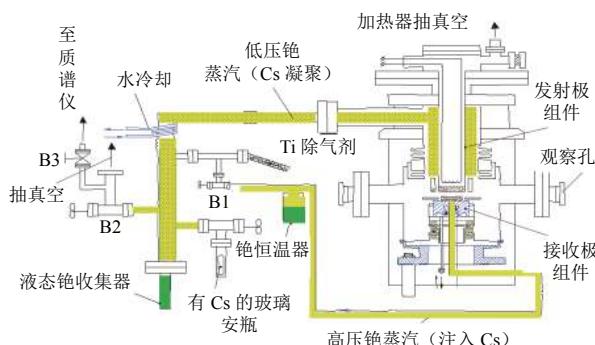


图18 平板电极型热离子能量转换实验装置

Fig. 18 Thermionic energy conversion experimental apparatus with planar electrode

原理性实验装置通常包括如下的部件或系统:

1) 电极系统: 发射极与接收极处于等温等势, 通常与密封件集成为电极组件。为消除等离子体外溢的边缘效应导致的电流测量偏大, 通常在电极上增加陶瓷保护环^[41-42]。

2) 发射极加热系统: 为保证发射极的局部高温, 采用热流密度高且释放区域小的加热器。对于平板型电极系统, 通常需要采用钨丝高温辐射和电子轰击联合加热的方式实现。

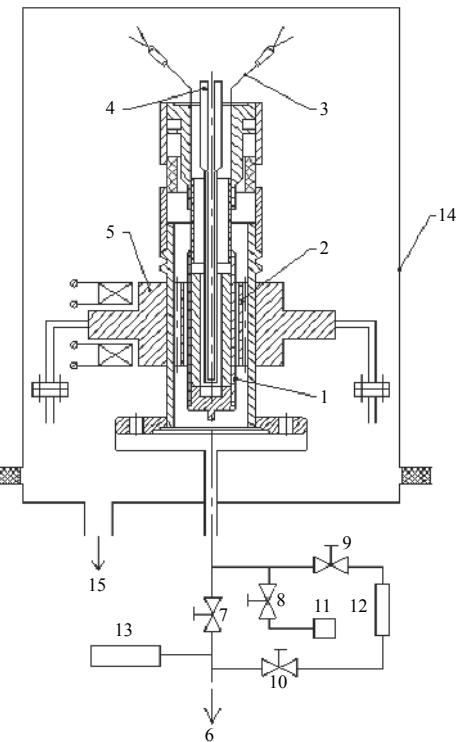
3) 接收的控温系统: 为了载带多余的热量并对接收极实现控温, 通常需要在接收极上配置冷却管路和绕制加热丝。

4) 真空系统: 电极间隙以及真空-铯管路的内腔应用无油的真空泵。此外, 还配备质谱仪来监督热真空内的残余气体成分。

5) 测量系统: 除了真空、电极温度、伏安特性测量外, 为了研究热离子能量转换的效率, 有的发电装置还在接收极上配置了专门的量热器。

2.4.2 里克台架

里克台架是采用电加热代替核加热的方式, 进行



1-发射极外壳; 2-接收极; 3-热电偶; 4-发射极加热装置; 5-接收极加热系统/冷却系统; 6-排气系统; 7~10-预热阀; 11-Cs-恒温调节器; 12-蒸馏系统Cs; 13-质谱检测器; 14~15-保护真空室及其排气系统

图19 圆管电极型热离子能量转换实验装置

Fig. 19 Thermionic energy conversion experimental apparatus with cylindrical electrode

单节热离子发电元件性能试验和寿命考验的专用设备。根据俄罗斯TOPAZ-II热离子反应堆大纲, 鲁奇研究院、苏霍米物理技术研究院和库尔恰托夫研究院都在电加热台架上对单节热离子发电元件的发电性能进行大量的研究, 解决了热离子燃料元件的大量问题, 并以较低的成本开展长时间考验, 弄清了单节热离子燃料元件结构和制造工艺上的不足。在此基础上, 完成有限数量的堆内考验后即可开展全尺寸的反应堆电源的考验, 降低了研发总成本。里克台架的用途包括: ①单节热离子燃料元件的真空除气和密封性检查; ②单节热离子燃料元件电极热物理和电物理特性(如电极的黑度系数和功函数)的测量和计算; ③研究单节热离子燃料元件电输出性能与运行参数的关系; ④进行单节热离子燃料元件的性能试验和寿命考验。

里克台架的系统组成如图20所示, 主要包括真空室、工作段、真空系统、铯系统、测控与电性能测试系统等。其中, 工作段是为热离子燃料元件的堆外考验提供热工条件的部件, 是里克台架的核心部分, 如图21所示。钨电加热器放置于发射极的内孔, 加热器电连接端头在上氦气室引出。上下氦气室给工作段部

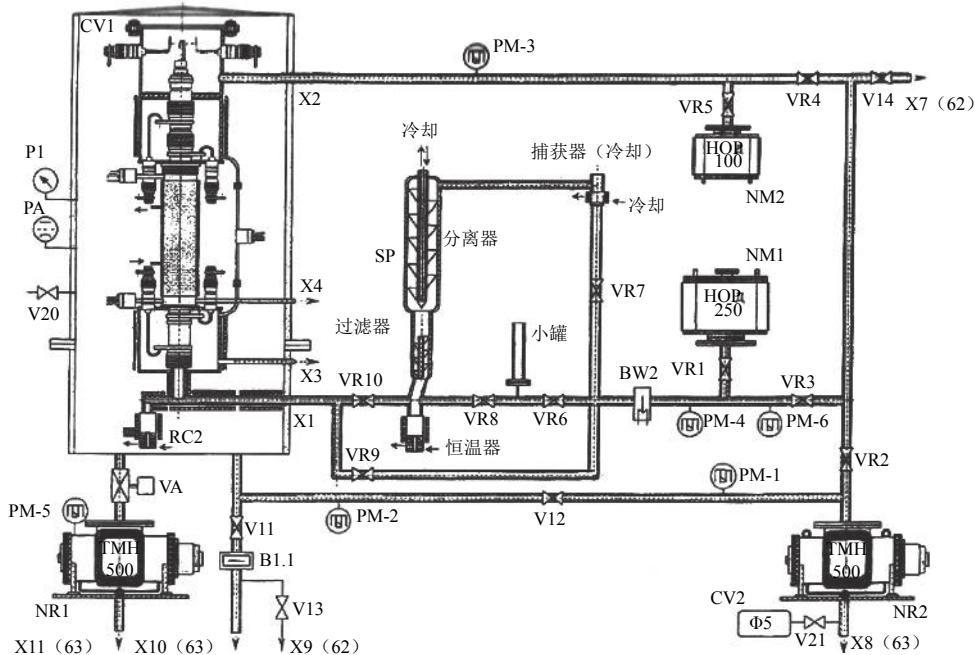


图 20 里克台架的系统组成示意图

Fig. 20 System composition schematic of RIG stand

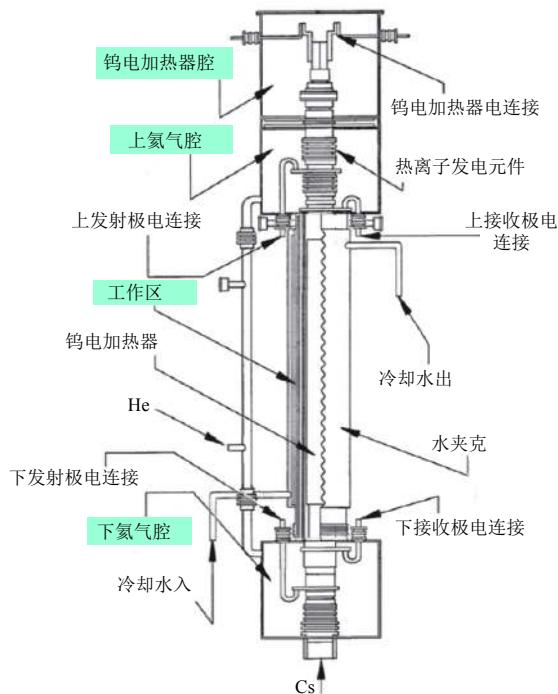


图 21 里克台架工作段的示意图

Fig. 21 Operating section schematic of RIG stand

分的不可调间隙提供氦气，以此加大间隙间的热交换。铯经由下氦气室提供。发射极和接收极引导的电连接位于2个氦气室之间。工作段的最外层是冷却水包套。工作段的加热核心轴向截面如图22所示，国外研究者对工作段的热工设计都进行过详细的分析计算^[43]。

2.4.3 堆内试验装置^[44]

热离子燃料元件堆内试验是热离子燃料元件研制的重要阶段，堆内试验的主要目的是了解引起热离子燃料元件动力特性和寿命特性变化的过程和因素，以及引起部件或整个元件损坏的原因，从而提出改进措施，实现在寿期内维持稳定和可重复的特性。从试验研究的阶段来看，热离子燃料元件的堆内试验包括2个阶段：第1阶段具有展示的特性，主要关注回路孔道各部件的演练以及回路装置系统的演练，了解、研究各单个发电单元以及多个发电单元的动力特性；第2阶段是为了验证设计参数所进行的热离子燃料元件的堆内试验。

热离子燃料元件的堆内试验通常是在研究堆的回路孔道上进行。从1960年代起，俄罗斯持续在研究堆上进行了大量的热离子燃料元件堆内试验。回路孔道的设计要考虑研究堆的特点，保证接近热离子燃料元件考验的真实条件，确保对热离子燃料元件主要参数进行调节和测量的可能性。图23~图24展示了俄罗斯在BP-B反应堆上早期回路孔道以及在AM反应堆上改进后的回路孔道示意图。图23所示的回路孔道类似于辐照罐装置，在某种程度上就是一般的热离子能量转换器实验室装置的复制，其中包括一般安置在回路孔道下部的铯恒温器，在回路孔道中采用吸气装置或独立的真空泵，有接收极的电加热器。为了提高回路孔道的可靠性和考验高功率元件，新近的回路孔道已经对结构进行了完善，回路孔道内增加了传感器的数量

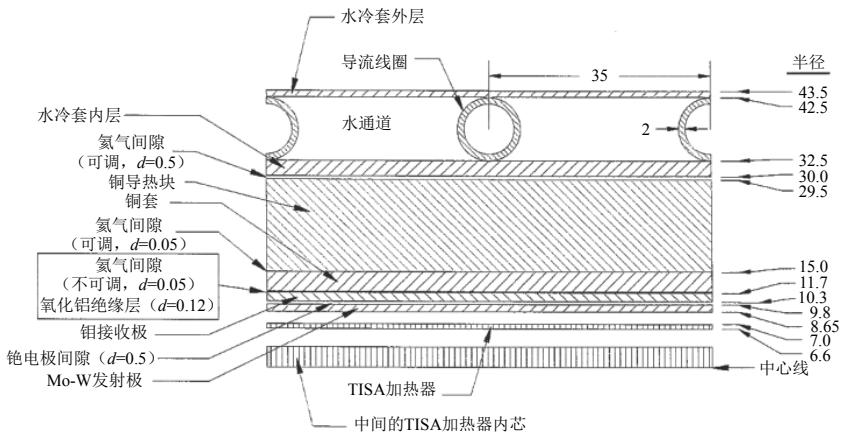
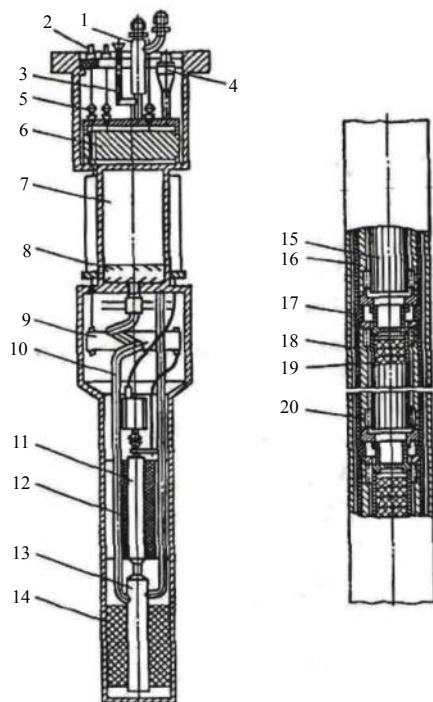


图 22 工作段的加热核心轴向截面图

Fig. 22 Axial sectional view of operating section heating zone



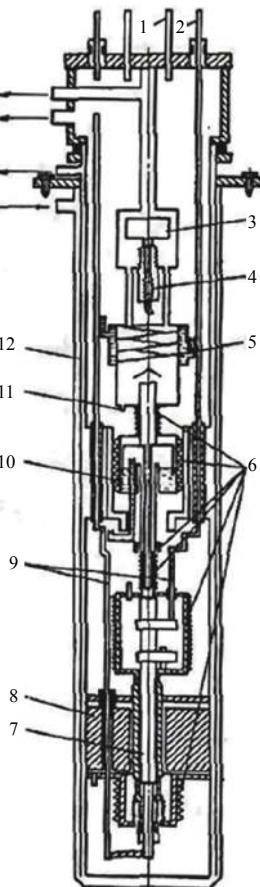
1-电极间隙真空系统不加热的阀门；2-电插座；3-测量真空的传感器；4-插销；5-陶瓷密封件；6-生物屏蔽；7-内装的离子泵；8-铯捕获器；9-旁通管；10-抽吸管道；11-热离子燃料元件；12-接收极的电加热器；13-铯恒温器；14-铯恒温器的电加热器；15-发射极；16-接收极；17-隔离环；18-绝缘层；19-燃料块；20-定位隔离器

图 23 在 BBP-M 反应堆上最早考验的回路孔道方案

Fig. 23 The early test loop scheme at BBP-M reactor

以便增加所获取的信息量，并且回路孔道内可增加液态金属回路。

为确保热离子燃料元件回路孔道试验的开展，所有类型的回路装置通常需要包括以下的系统：热工水力系统，气体-真空系统，电加热器，热离子燃料元件伏安特性的测量系统，确保辐射安全的系统，考验和研究的自动化采集与测控系统，回路装置组成如图 25 所示。



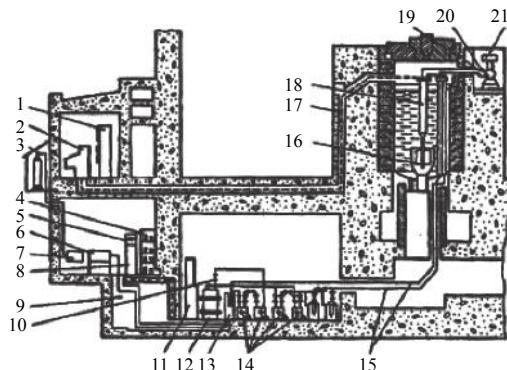
1-密封插头；2-动力密封插头；3-液铯小罐；4-打开液铯小罐的装置；5-铯蒸气凝结器；6-电加热器；7-热离子燃料元件；8-专门的排热系统；9-电流输出端；10-循环型铯蒸气源；11-冷凝铯回收管；12-费尔达热管交換器。

图 24 在 AM 反应堆上考验的一种现代方案

Fig. 24 The modern test scheme at AM reactor

3 结束语

空间热离子能量转换技术是热离子反应堆电源的关键技术之一。本文介绍了空间热离子反应堆电源的



1-监督配电盘；2-操纵台；3-气罐；4-电加热器的电源台架；5-负载电阻；6-地区气体操纵台；7-减速装置；8-控制器台架；9-气体系统管道；10-阀门；11-真空系统操纵台；12-沉淀罐；13-存储器；14-真空泵；15-机械泵管道；16-反应堆活性区；17-电缆配线；18-有热离子燃料元件的回路孔道；19-涡轮分子泵；20-安装质谱仪的地点；21-机械真空泵

图 25 BBP-K 反应堆回路装置设备布置示意图

Fig. 25 Arrangement diagram of experimental apparatus at BBP-K reactor loop

总体结构及工作原理, 从热离子能量转换的原理、热离子发电元件的类型及其特点、关键材料、试验装置等方面阐述了热离子转换技术的发展现状、存在的问题及发展趋势。分析表明: 单通道多节热离子发电元件是新型高效的发电元件, 多层管的制备工艺是难点; 高强度W-Nb单晶合金发射极材料、低功函数接收极材料的研发是新一代材料研发的方向; 热离子能量转换技术的研究需要经历原理性实验—里克台架实验—堆内试验3个阶段。

参 考 文 献

- [1] 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]. SciSin Tech, 2019, 49(1): 1-12.
- [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, 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] 杨继材, 柯国士, 郑剑平, 等. 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] GRYAZNOV G M. 30th anniversary of the start up of TOPAZ - the first thermionic nuclear reactor in the world[J]. *Atomic Energy*, 2000, 89(1): 510-515.
- [5] 陈伟东, 闫淑芳, 钟学奎. 氢化锆在450~600 °C下氧化动力学的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(6): 1038-1040.
CHEN W D, YAN S F, ZHONG X K. Study on Oxidation Kinetics of Zirconium hydride at 450-600 °C[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(6): 1038-1040.
- [6] 胡古. 空间热离子反应堆瞬态分析方法研究[D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2008.
- [7] 杨启法, 卢浩琳. 空间核反应堆电源研究和应用[J]. 航天器工程, 1995, 4(4): 11-20.
YANG Q F, LU H L. Research and application of space nuclear reactor power[J]. Spacecraft Engineering, 1995, 4(4): 11-20.
- [8] 古哈尔金 H E, 波诺马廖夫 H H, 乌索夫 B A. 热电转换和热离子转换式空间核电源“罗马什卡”和“叶尼塞”[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2016: 61-66.
- [9] YARYGIN V I, SIDELNIKOV V N, MIRONOV V S, et al. Energy conversion options for NASA's space nuclear power systems initiative—underestimated capability of thermionics[C]//2nd International Energy Conversion Engineering Conference. [S.I.]: NASA, 2004.
- [10] SAN FRANCISCO FIELD OFFICE. Space-R thermionic space nuclear power system design and technology demonstration. Semiannual Technical Progress Repor[R]. [S.I.]: San Francisco Field Office, 1993.
- [11] EL-GENK M S, LUKE J R. Performance comparison of thermionic converters with smooth and macro-grooved electrodes[J]. Energy Conversion & Management, 1999, 40: 319-334.
- [12] EL-GENK M S, MOMOZAKI Y. An experimental investigation of the performance of a thermionic converter with planar molybdenum electrodes for low temperature applications[J]. Energy Conversion and Management, 2002, 43: 911-936.
- [13] BAKSHT F G, DYUZHEV G A, et al. Thermionic converters and low temperature plasma[M]. Moscow: Acad. Sci. USSR, 1973.
- [14] HATSOPOULOS G N, GYFTOPOULOS E P. Thermionic energy conversion, volume I : processes and devices[M]. USA: The MIT Press, 1979.
- [15] HATSOPOULOS G N, GYFTOPOULOS E P. Thermionic energy conversion, volume II : theory, technology, and application[M]. USA: The MIT Press, 1979.
- [16] RASOR N S. Thermionic energy conversion plasmas[J]. *IEEE Transaction on Plasma Science*, 1991, 19(6): 1191-1193.
- [17] NIKOLAEV Y V, KUCHEROV R Y, ERYOMIN S A, et al. Conductively coupled multi-cell TFE with electric heating pretest ability[C]//AIP Conference. [S.I.]: AIP, 1998(420): 318-423.
- [18] STRECKERT H, BEGG L, PELESSONEND D. Design of conductively coupled multi-cell thermionic fuel element[C]//AIP Conference. [S.I.]: AIP, 1999(458): 1458-1463.
- [19] GIRALDEZ E, DESPLAT J L. Emitter tri-layer technology[C]//AIP Conference. [S.I.]: AIP, 1999(458): 1603-1608.
- [20] STRECKERT H H, BEGG L L, NIKOLAEV Y V, et al. Development and testing of conductively coupled multi-cell TFE components[C]//AIP Conference. [S.I.]: AIP, 2000(504): 1307-1312.
- [21] DESPLAT J L, STRECKERT H, TAMORIA T. Tests of a conductively coupled multi-cell thermionic fuel element[C]//AIP Conference. [S.I.]: AIP, 2001(552): 1119-1124.
- [22] MARTINEZ M, STRECKERT H, IZHVANOV O, et al. Development and testing of a conductively coupled three cell thermionic converter[C]//1st International Energy Conversion Engineering Conference(IECEC). Portsmouth, Virginia: AIAA, 2003.
- [23] YARYGIN D V, MIRONOV V S, SOLOV'EV N P, et al. High-output thermionic converter based on a metal-oxygen system on the collector[J]. *Atomic Energy*, 2000, 80(1): 546-554.
- [24] NIKOLAEV Y V, KOLESOV V S, et al. Molybdenum and tungsten

- single crystal alloys with abnormally high creep strength for space nuclear power and propulsion systems[C]//Proc. 10th symp. on space nuclear power and propulsion. Albuquerque: [s.n.], 1993: 267-274.
- [25] GONTAR A S, NELIDOV M V, NIKOLAEV Y V, et al. Fuel elements of thermionic converters[M]. [S.l.]: Sandia Report, 1997.
- [26] GONTAR A S, KUCHEROV R Y, NIKOLAEV Y V, et al. Merits of the refractory metals single crystals in application to the TFE[C]// Proceedings of the 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. USA: IEEE, 1996: 951-956.
- [27] LV Y W, YU X D, TAN C W, et al. Deposition temperature effects on tungsten single-crystal layer by chemical vapor transport[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2011, 329: 62-66.
- [28] 吕延伟. 化学气相运法制备特定择优取向的钨单晶涂层研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2012.
- LV Y W. Study of tungsten monocrystal layers with a preferred crystallographic orientation obtained by chemical vapor transportation deposition[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2012.
- [29] NIKOLAEV Y V, KOLESOV V S, ZUBAREV P Z, et al. Molybdenum and tungsten single crystal alloys with abnormally high creep strength for space nuclear power and propulsion systems[C]// Proc. 10th symp. on space nuclear power and propulsion. Albuquerque: [s.n.], 1993, 1: 267-274
- [30] 乌沙考夫 Б А(著), 李耀鑫(译). 热离子能量转换器的理论基础[M]. 北京: 中国原子能科学研究院内部资料, 1999: 192-201.
- [31] ЯРЫГИН В И, РУЖНИКОВ В А, СИНЯВСКИЙ В В. Космические и Наземные Ядерные Энергетические Установки Прямого Преобразования Энергии[M]. Russia: [s.n.], 2016.
- [32] 西尼亞夫斯基В В. 热离子燃料元件堆内考验和实验研究的方法和手段[M]. 北京: 中国原子能科学研究院内部资料, 2005: 52-53.
- [33] RASOR N S. Thermionic energy conversion plasmas[J]. *IEEE Transaction on Plasma Science*, 1991, 19(6): 1201-1202.
- [34] SIDELNIKOV V N. On the Electron-from-Metals work function[J]. *Surface Roentgen and Neutron Research*, 2000(8): 42-44.
- [35] SIDELNIKOV V N. Non-monotonous potential barrier for electrons inside adsorbed layer on thermionic converter collector[J]. *Atomic Power*, 2000, 89(1): 67-70.
- [36] GERASHCHENKO S S, GUSEVA M I, KORYUKIN V A, et al. Investigation of the characteristics of thermionic converters with a Mo(110)single-crystal collector with ion-implanted oxygen[J]. *Atomic Energy*, 1994, 76(2): 147-149.
- [37] YARYGIN V I, SIDELNIKOV V N, MIRONOV V S. Energy conversion options for NASA's space nuclear power systems initiative—underestimated capability of thermionics[C]//2nd International Energy Conversion Engineering Conference.[S.l.]: NASA, 2004.
- [38] YARYGIN V I, IONKIN V I. New-generation space thermionic nuclear power systems with out-of-core electricity generating systems[J]. *Atomic Energy*, 2000, 89(1): 528-540.
- [39] US. Collector for thermionic energy converter covered with carbon like material and having a low electronic work function: US, 5578886[P]. 1996.
- [40] YARYGIN V I. Experimental studies of properties of excited states of cesium(rydberg matter) in the interelectrode plasma of a low-temperature thermal to electric energy thermionic converter[J]. *J Clust Sci*, 2012(23): 77-93.
- [41] EL-GENK M S, MOMOZAKI Y. An experimental investigation of the performance of a thermionic converter with planar molybdenum electrodes for low temperature applications[J]. *Energy Conversion and Management*, 2002(43): 911-936.
- [42] HATSOPOULOS G N, GYFTOPOULOS E P. Thermionic energy conversion, volume II :theory, technology, and application[M]. USA: The MIT Press, 1979: 510.
- [43] BENKE S M. Operational testing and thermal modeling of a TOPAZ-II single cell thermionic fuel element test stand[D]. [S.l.]: Naval Postgraduate School, 1994.
- [44] 西尼亞夫斯基 В В. 热离子燃料元件堆内考验和实验研究的方法和手段[M]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2005: 101-177.

作者简介:

钟武烨(1987-), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向: 空间核电源及热电转换。

通讯地址: 北京市275信箱51分箱(102413)

电话: (010)69357304

E-mail: zhongwuye23@ciae.ac.cn

赵守智(1966-), 男, 研究员, 主要研究方向: 空间核动力技术。**本文通讯作者**。

通讯地址: 北京市275信箱(102413)

电话: (010)69359204

E-mail: zhaosz@ciae.ac.cn

A Review of Technology Development of Thermionic Energy Conversion for Space Application

ZHONG Wuye, ZHAO Shouzhi, ZHENG Jianping, LV Zheng, XIE Jiachun

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: Space nuclear reactor power can supply the large output and long life power required by future space missions. The technology of thermionic energy conversion is one of the major key points of space thermionic nuclear reactor power. The whole construction and operating principle of space thermionic nuclear reactor power are summarized. And the development state, existing issues, and trend are reviewed for the technology of thermionic energy conversion, including the principle of thermionic energy conversion, varieties and characteristic of thermionic cell, electrode material, and experimental apparatus.

Keywords: space nuclear reactor power; thermionic energy conversion; electrode material; experimental apparatus

Highlights:

- Manufacturing difficulties of the advanced and efficient conductively coupled multi-cell are analyzed.
- The development electrode material and major methods for improving the performance of thermionic energy conversion are reviewed.
- Key experimental apparatus used for thermionic energy conversion research are reviewed.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 朱恬]