

基于热管散热平台的热光伏系统实验研究

陈雪¹, 王文², 卢军², 钱子劼¹

(1. 上海空间电源研究所, 上海 200245; 2. 上海交通大学, 上海 200240)

摘要: 针对深空探测同位素电源的发展需求, 设计了一套基于热管散热平台的热光伏系统, 采用分离型热管实现了热光伏系统的热控要求, 并实验验证了热光伏系统的热电转换性能。研究了加热功率、充液量对热管启动特性、壁面温度的影响, 分析了辐射器温度、电池温度对系统电输出特性的影响, 并对系统的转换效率进行了评估, 结果表明: 采用热管散热器可有效将半导体电池温度控制在25℃以下, 在辐射器温度为1 173℃时, 系统热电转换效率达到12.1%。

关键词: 分离型热管; 热光伏; 电池功率; 效率

中图分类号: TM914

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2016)03-0288-5

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2016.03.014

引用格式: 陈雪, 王文, 卢军, 等. 基于热管散热平台的热光伏系统实验研究[J]. 深空探测学报, 2016, 3(3): 288-292.

Reference format: Chen X, Wang W, Lu J, et al. Experimental investigation of the RTPV system with heat pipe[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(3): 288-292.

0 引言

在深空探测领域, 美国、前苏联等国家相继发布过自己的星际飞行(深空探测)战略, 其中, 美国把发展核电源系统作为星际飞行的重点方向^[1]。中国在深空探测方面也有自己的发展规划, 预计在不久将实现火星探测, 并希望尽早实现木星、土星等太阳系其他行星的探测以及太阳系外的星际飞行。在深空探测任务中, 随着探测器距离太阳越来越远, 太阳能电池的输出效率也会随之下降, 直至完全丧失作用, 而核电源系统不受太阳光照的限制, 可以更好地满足探测器对能量的需求。

热光伏是应用于同位素电源的一种高效热电转换方式, 通过窄禁带的半导体电池的pn结效应将高温辐射体发出的红外辐射能转换为电能。热光伏系统具有理论效率较高、噪音低、无移动部件、可便携、可靠性高、高体积比功率等优点^[2]。因此, 同位素热光伏发电技术可成为满足深空探测快速发展的又一种有效途径。

目前热光伏技术的研究已在全世界范围成为热点, 美国、俄罗斯、德国、澳大利亚、英国、瑞士和日本等国家的光伏研究机构 and 大学都在积极开展热光伏系统的研究工作, 力图通过基础研究使这项新技术实用化。美国Glenn实验室用同位素燃料PuO₂作为热源设计了热光伏系统, 该系统使用了禁带宽度为0.6 eV的

InGaAs电池, 转换效率达到17%, 输出功率为100 W, 重量比功率可以达到14 W/kg^[3-4]。热光伏系统中的电池冷却主要采用风冷强迫对流的方式以及水冷的散热方式。Qiu等(2009)使用天然气燃料的热光伏系统和小型热电联产光伏系统, 分别采用配有风扇的风冷和冷却肋片的水冷两种冷却方式, 对系统的冷却性能进行了对比分析^[5]。

本文针对空间应用需求, 开展了基于分离式热管散热平台的热光伏系统研制, 根据同位素热光伏系统的结构、热控需求, 确定了热管温控系统蒸发段及冷凝段的形式与结构设计, 组建了热控实验平台, 并开展了热管实验性能的测试研究, 包括启动特性、热均匀性等测试以及各工况下运行性能等, 综合分析了影响系统热性能以及稳定运行的关键因素。同时将热管散热器和热电转换装置相连接, 搭建了大功率热光伏实验系统, 对热光伏系统的电输出性能进行了测试, 为深空探测飞行器的应用奠定了基础。

1 分离式热管散热平台

1.1 实验装置

热管散热系统由分离型重力平板热管换热器以及辐射冷板两部分组成, 如图1所示。电池贴在蒸发段内壁上, 电池吸收部分红外辐射能转换为电能, 其

余热量由电池传导给热管平板蒸发段。蒸发段腔体内的液相工质发生沸腾相变成为气相，气相工质沿上升绝热管向上流动至热管辐射冷板入口，辐射冷板向外辐射散热使气相工质被冷凝成液相，从辐射冷板出口流出后沿下降绝热管流回蒸发器内再次参与沸腾，这样就完成了一次工质流动循环。通过工质在分离型重力平板热管换热器内的循环，多余的热量不断被带走，从而使得电池温度处于正常工作温区之内^[6]。

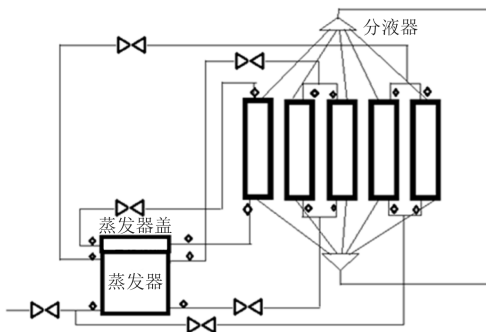


图 1 热管散热装置
Fig. 1 Heap pipe cooling system

分离型重力平板结构热管蒸发段由上密封盖、圆柱壳体及上下端盖组成。圆柱壳体在 8 个面各有一个弧形腔体，在腔体内靠近壁面处放入 8 层 200 目的不锈钢丝网，以提高蒸发段温度的均匀性。在蒸发段腔体内增加 14 条突起的矩形肋用以固定丝网。在八边形内壁转角处设计了突起的柱状结构，在柱状结构两侧开有凹槽用以固定电池片及滤光片。热管蒸发段的具体结构如图 2 所示。

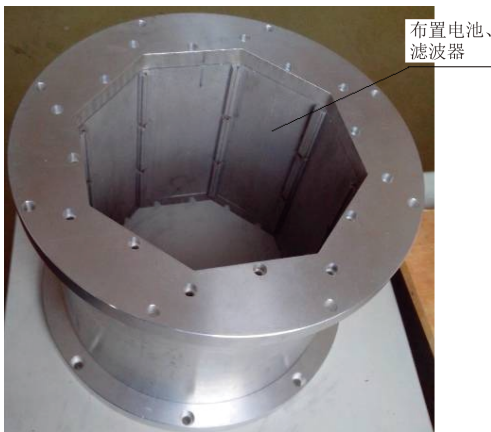


图 2 热管蒸发段示意图
Fig. 2 Diagram of the evaporation of the heat pipe

本实验所使用测试系统由计算机、K 型热电偶、压力变送器、电源以及数据采集器组成，其中数据采集器采用吉时利 2 700 型，以实现对其壁面温度与管内工

作压力的实时监测。采用 K 型热电偶进行温度的测量。在热管蒸发段壁面、蒸发段进出管管壁面及分液器冷却水进出口端均布置了热电偶以进行温度监测。在进出口管道上设置了压力变送器，冷却液充注前采用旋片真空泵对热管回路进行抽真空。

1.2 热管工作性能测试结果

在管壁上沿着工质的流动方向从低到高每隔 0.025 m 布置 6 个热电偶 T1、T2、T3、T4、T5、T6。

在实验过程中，首先充入工质 450 g，充液率为 40.9%。设置冷源温度为 10 °C，运行一段时间后，改变中心加热棒加热功率，从 200 W 开始，每次增加 200 W，一直升至 2 kW，每个工况大约持续运行 15 min，记录温度和压力信号，观察热管蒸发段变工况运行状况。之后每次增加 150 g 充注量进行相同的变工况运行。不同充注量不同工况下热管壁面温度曲线如图 3~图 5 所示。

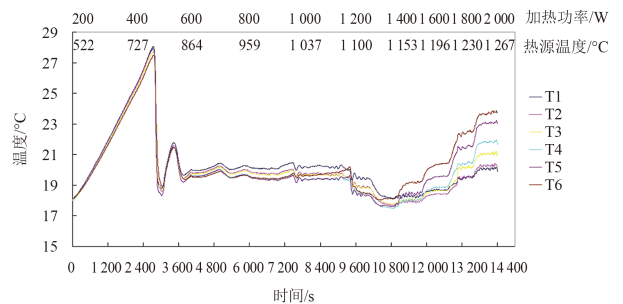


图 3 450 g (40.9%充液率) 充注量沿程壁温变工况实验曲线
Fig. 3 Temperature variation along the wall under the filling amount of 450 g

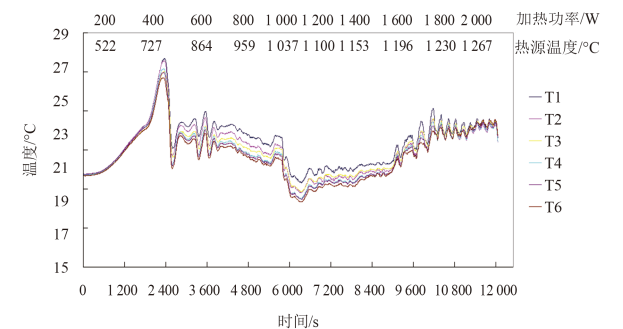


图 4 600 g (54.5%充液率) 充注量沿程壁温变工况实验曲线
Fig. 4 Temperature variation along the wall under the filling amount of 600 g

由图 3~图 5 可见，当加热功率升至 200 W 时，温度不断上升，当加热功率从 200 W 升至 400 W 后，温度先随之升高而后出现大幅下降。在热源温度较低时，蒸发段未进入充分的两相沸腾换热区域，此时热量主要由其显热带走，热管内工质温度不断上升。当热源温度不断升高，蒸发段工质沸腾量增多，进入两相沸腾换热区域，换热系数温差减小，温度下降。充注量

较小且加热功率较高时,热管蒸发段上部出现明显的过热现象,工质进入蒸发器后很快就被蒸干,两相区较短,上部基本处于过热状态,工质过热比较严重;随着加热功率增大,热管过热度也不断增大。充注量增大后热管内工质进入充分发展的两相沸腾状态,两相区变长,整体温度比较均匀,温差较小,即使在较高的功率下也未出现过热现象。充注量在热源温度达1500 K (1.8 kW) 时壁温稳定在22 °C附近,沿程温差很小,在0.5 °C以内。

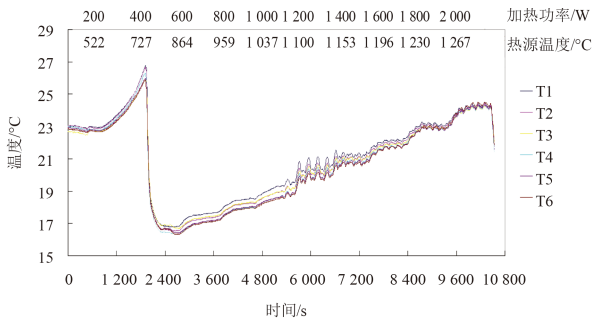


图5 750 g (68.2%充液率) 充注量沿程壁温变工况实验曲线

Fig. 5 Temperature variation along the wall under the filling amount of 750 g

使用红外热像仪拍摄热管外壁温度云图,如图6所示,热管壁面除入口底部外温度基本都处在19~22 °C的区间范围之内,具有良好的温度均匀性。

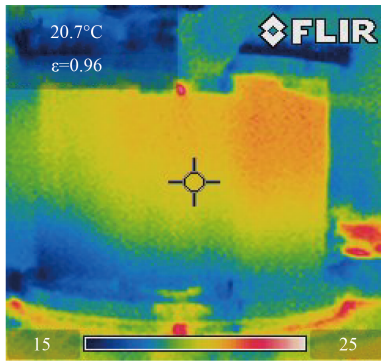


图6 热管红外热像图

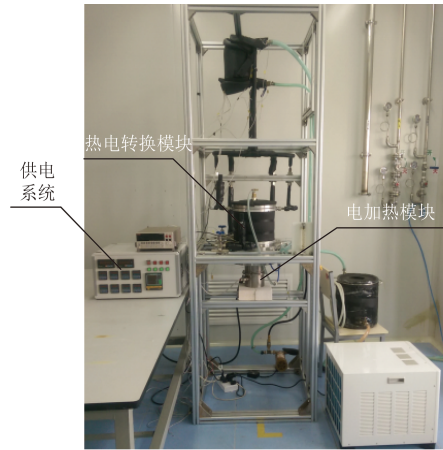
Fig. 6 Thermography of the heat pipe

2 基于热管散热平台的热光伏系统

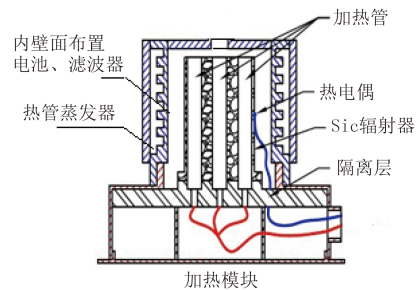
2.1 热光伏实验装置

基于电加热热光伏系统实验装置的结构如图7所示,主要包括供电系统、电加热模块、热电转换模块、冷却系统、自动控制系统等。通过调压器控制输入电压,以控制输入功率,加热管由于使用电流很大,因此采用继电器控制接触器进行开合控制。

图7(b)为出热电转换模块示意图,热电转换器



(a) 热光伏实验系统



加热模块

(b) 热电转换模块示意图

图7 热光伏系统实验装置图

Fig. 7 Schematic diagram of the thermophotovoltaic system

件都是通过冷却系统支撑的。电池采用基于Zn扩散工艺的GaSb电池,GaSb电池直接贴于氧化铝陶瓷片上,并固定于散热器内壁面。在靠近电池表面处布置光子晶体结构滤波器, SiC辐射器置于整个装置中央,在高温条件下对外发出红外辐射能,经滤波器光谱调控,部分红外光子通过GaSb电池转换为电能对外输出,其余辐射能量返回辐射器重新利用。

光伏电池组件的输出短路电流、开路电压和最大输出功率采用Keithley2400进行测量,辐射器壁面温度采用K型热电偶连接数据采集仪进行记录,辐射器辐射热流密度用TRHFS-10C型辐射热流计来测量,信号通过HP数据采集仪和电脑来显示及记录。

2.2 实验结果分析

实验采用了2个组件,每个组件布置8片电池,通过调整输入电功率,控制辐射器温度,测试电池输出电性能。实验测试结果如图8~11所示,图8为不同温度条件下的I-V曲线,图9~11所示开路电压、短路电流、输出功率随辐射器温度的变化。其中 T_e 为辐射器表面3个测试点的平均值。由图9~图11可见,随着辐射器温度的上升,到达电池的辐射热流密度不断增加,电池短路电流和辐射器温度的四次方成正比,短

路电流随着辐射器温度的升高而上升；而开路电压却随辐射器温度变化很小甚至略有下降，这是由于当辐射器辐射功率达到一定程度时，电池开路电压随辐射功率的增加变化很小，主要取决于电池自身温度，因此随着电池温度的升高，其开路电压反而有所下降。电池输出功率随着温度的升高逐渐增大，当辐射器温度达到1 173 °C时，16片串联电池组件输出功率达到16.76 W。

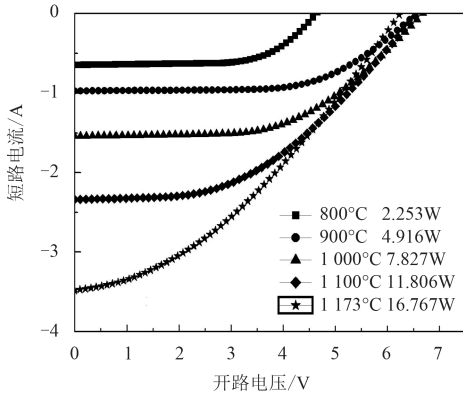


图8 热光伏电池阵列输出I-V曲线

Fig. 8 I-V curve of the cell array

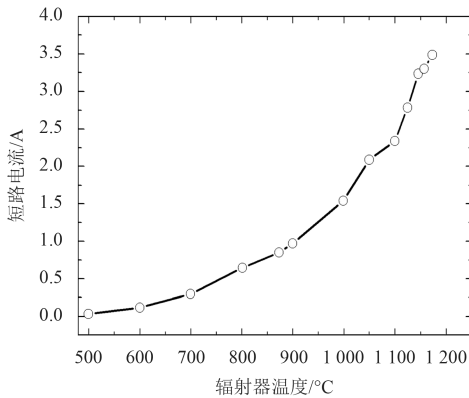


图9 短路电流随辐射器温度的变化

Fig. 9 Variation of the short-circuit current with the emitter temperature

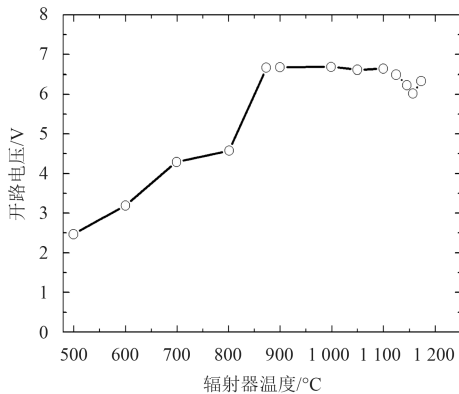


图10 开路电压随辐射器温度的变化

Fig. 10 Variation of the open-circuit voltage with the emitter temperature

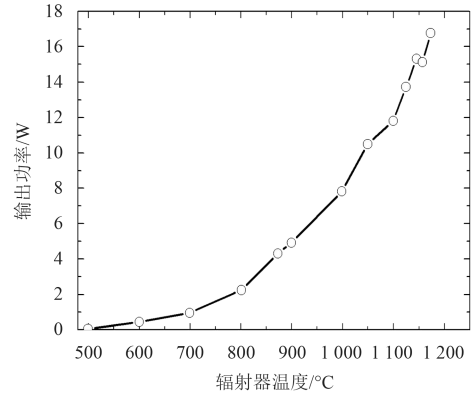


图11 电池输出功率随辐射器温度的变化

Fig. 11 Variation of the output power with the emitter temperature

2.3 系统性能评估

水冷散热器内壁面共8个面，每个面可布置2个组件，则热光伏系统单机输出功率可达到130 W。TPV系统热电效率定义为系统净输出电功率和辐射器发出的有效辐射能的比值

$$\eta_{STPV} = \frac{P_{electricity}}{Q_{net}} = \frac{P_{electricity} \times N}{\int_0^{\infty} \frac{2\pi\epsilon}{\lambda^5} \frac{hc_0^2}{\exp(\frac{hc_0}{\lambda T_e}) - 1} F_c(\lambda) A_e d\lambda} \quad (1)$$

其中： $P_{electricity}$ 为电池组产生的电功率； N 为系统采用的电池组件数； F_c 为辐射器和电池组件的辐射传递系数。

根据前面测得电池输出性能，代入式(1)计算得到热光伏系统转换效率随辐射器温度变化，如图12所示，系统热电转换效率最高达到12.1%。按照理论计算，转换效率应该随着辐射器温度的升高而增大，而在实验过程中，由于电池温度的升高，引起电池短路电流增长趋势减缓，随着辐射器温度的升高，电池输出功率的增长梯度可能小于输入能量的增幅，因此效率呈现减小的变化情况。

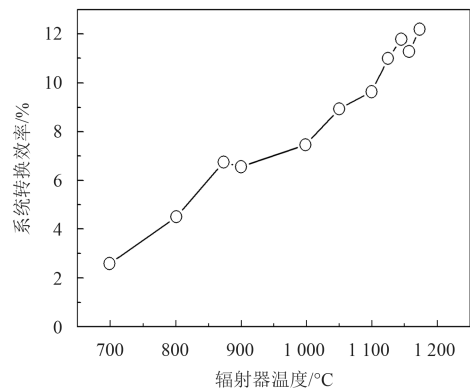


图12 系统热电转换效率随辐射器温度的变化

Fig. 12 Variation of the thermo-electric conversion efficiency with the emitter temperature

3 总结

本文设计了一台基于热管散热平台的热光伏系统,采用分离型热管作为热光伏系统的热控方式,实现热光伏系统半导体材料温度的控制,并搭建了热光伏转换系统,研究了不同输入条件下的系统输出功率。实验中,研究了加热功率、充液量对启动特性、热均匀性、壁面温度的影响,分析了不同热辐射器温度条件下的电池温度及输出特性,对热光伏系统的转换效率进行了评估,主要结论如下:

1) 随着加热功率增大,需增加充液量,75%充注量在热源温度达1 500 K (1.8 kW) 时壁温稳定在22 °C附近,沿程温差很小,在0.5 °C以内。

2) 采用热管散热器有效实现了半导体材料的温度控制,使得电池输出性能有了较大的提高。电池输出功率随着辐射器温度的升高逐渐增大,当辐射器温度达到1 173 °C时,电池组件输出功率达到16.76 W,系统热电转换效率最高达到12.1%。

参 考 文 献

[1] 侯欣宾,王立.美国空间同位素能源装置发展现状[J].航天器工程,

2007, 16 (2): 41-49.

HOU X B, Wang L. Introduction of US space radioisotope power systems[J]. Spacecraft Engineering, 2007, 16 (2): 41-49.

[2] Demichelist F, Agnellom M, Tresso E. Evaluation of thermophotovoltaic conversion efficiency[J]. J Appl. Phys, 1982, 53 (12): 9098-9104.

[3] Wilt D, Wolford D. Progress in radioisotope thermophotovoltaic power system development[C]//5th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit. Missouri, USA: [s. n.], 2007.

[4] Wayne A W. Advanced radioisotope power conversion technology research & development[C]//2th International Energy Conversion Engineering Conference. Rhode Island: [s. n.], 2004.

[5] Qiu K, Hayden A C S. Increasing the efficiency of radiant burners by using polymer membranes[J]. Applied Energy, 2009, 86: 349-354.

[6] 唐强. IGBT元件热管冷却传热性能的实验与数值研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2013.

Tang Q. Experimental and numerical analysis on heat transfer performance of heat pipe cooling for IGBT component[D]. Lanzhou: Jiaotong University, 2013.

作者简介:

陈雪(1983-),女,高级工程师,主要研究方向:新型热光伏发电技术、空间核电源技术。

通信地址:上海市闵行区东川路2965号

电话:(021) 24187661

E-mail: 89473323@qq.com

Experimental Investigation of the RTPV System with Heat Pipe

CHEN Xue¹, WANG Wen², LU Jun², QIAN Ziqing¹

(1. Shanghai Institute Of Space Power, Shanghai 200245, China; 2. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Aiming at the power requirements of the deep-space exploration, a set of the thermo-photovoltaic system with heat pipe is designed in this article. The separate gravity heat pipe is employed to realize the thermal control requirement, and the thermo-electric conversion capability of the TPV system is confirmed. The effect of the thermal power, amount of the working fluid on the startup performance, wall temperature is investigated. Also the influence of the temperature of the emitter and the cell on the system electrical output performance is analyzed. The results indicate that the heat pipe can control the cell temperature below 25 °C. While the emitter temperature reaches 1 173 °C, the thermal-electric conversion efficiency reaches 12.1%.

Key words: separate heat pipe; thermo-photovoltaic; electric power; efficiency

[责任编辑:高莎]