

等效同位素热源设计制备及其性能测试

王宏宇¹ 许志恒^{1,2} 王继宇¹ 刘世超³ 陆宏波³ 李欣益³
刘云鹏^{1,2} 汤晓斌^{1,2}

1(南京航空航天大学核科学与技术系 南京 211106)

2(空间核技术应用与辐射防护工业和信息化部重点实验室 南京 211106)

3(上海空间电源研究所 空间电源国家重点实验室 上海 200245)

摘要 通用热源(General-Purpose Heat Source, GPHS)是同位素温差电池(Radioisotope Thermoelectric Generators, RTG)中应用最成熟的热源模块,在同位素电源的研制与测试过程中,GPHS是电加热模拟热源等效性的关键参考。为满足同位素电源系统非核单元等效性测试与验证的需求,基于GPHS的各项实际性能参数,设计并仿制了一种电加热模拟热源。基于仿真计算与实验测试结果,分析评价了仿GPHS模拟热源的热输出特性、等效替代性及其在不同应用场景下的运行效果。当输入功率为250 W时,仿GPHS模拟热源表面平均温度可达515 K,且温度随功率变化的趋势与仿真结果相吻合。经实验测试,在250 W热源功率下,RTG模块的能量转化效率可提升至6%左右。本文提出并构建的仿GPHS模拟热源等效性良好,且可适用于同位素温差电池,对同位素电源的性能评价提供一种有效的、统一的参考标准。

关键词 放射性同位素, 模拟热源, COMSOL 仿真, 通用热源, 同位素温差电池

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.120503

Design and preparation of an equivalent radioisotope heat source and its performance test

WANG Hongyu¹ XU Zhiheng^{1,2} WANG Jiyu¹ LIU Shichao³ LU Hongbo³
LI Xinyi³ LIU Yunpeng^{1,2} TANG Xiaobin^{1,2}

1(Department of Nuclear Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

2(Key Laboratory of Nuclear Technology Application and Radiation Protection in Astronautics,

Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing 211106, China)

3(State Key Laboratory of Space Power, Shanghai Institute of Space Power-sources, Shanghai 200245, China)

Abstract [Background] A general-purpose heat source (GPHS) is the most established heat source module for radioisotope thermoelectric generators (RTGs) and a key reference for the equivalence of electrically heated analog heat sources during the development and testing of radioisotope power supplies. [Purpose] The study aims to develop a highly efficient electric heating simulation heat source to meet the requirements for equivalent testing and verification of non-nuclear units of radioisotope power systems. [Methods] Firstly, an electrically heated analog heat source was designed and imitated based on various actual GPHS performance parameters. Based on the simulation

上海航天科技创新项目(No.SAST2020-097)、江苏省普通高校研究生科研创新计划(No.KYCX21_0205)资助

第一作者: 王宏宇, 男, 1994年出生, 2017年毕业于烟台大学, 现为博士研究生, 研究领域为空间核能源与能量转换技术

通信作者: 汤晓斌, E-mail: tangxiaobin@nuaa.edu.cn

收稿日期: 2023-08-12, 修回日期: 2023-10-13

Supported by Shanghai Aerospace Science and Technology Innovation Project (No.SAST2020-097), Jiangsu Province General University Graduate Student Research Innovation Program (No.KYCX21_0205)

First author: WANG Hongyu, male, born in 1994, graduated from Yantai University in 2017, doctoral student, focusing on space nuclear energy and energy conversion technology

Corresponding author: TANG Xiaobin, E-mail: tangxiaobin@nuaa.edu.cn

Received date: 2023-08-12, revised date: 2023-10-13

calculations, the thermodynamic equivalent substitutability between the simulated heat source and real GPHS in terms of material and dimensional differences was evaluated. Then, the performance of its operation in different application scenarios was analyzed, and an optimized application environment was proposed. Finally, based on the experimental test results, the uniformity of the thermal output characteristics of the imitation GPHS-simulated heat source was compared with that of a real GPHS, and the practical application characteristics of the imitation GPHS in RTGs were also evaluated. **[Results]** At an input power of 250 W, the average surface temperature of the GPHS-simulated heat source reaches 515 K. The temperature variation trend with power is consistent with that of the simulation results. Experimental test results show that the energy conversion efficiency of the RTG module is increased to ~6% with a 250-W heat source power supply. **[Conclusions]** The proposed and constructed good equivalent simulated GPHS heat source with reference to the thermal properties of a real GPHS can be applied to RTGs and provides an effective and unified reference standard for the performance evaluation of radioisotope power sources.

Key words Radioisotope, Simulated heat source, COMSOL simulation, General-purpose heat source, Radioisotope thermoelectric generator

在深空探测、高寒极地气象观测、深远海资源开发等应用场景中,电源系统至关重要。目前可供选择的电源系统有化学电池、光伏电池和核电源系统^[1-4]。同位素温差电池(Radioisotope Thermoelectric Generator, RTG)因其具有高能量密度、高可靠性、长寿命等独特优势,可以满足深空、极地、深海等极端苛刻环境下的能源供应需求,是重要的电源候选方案之一^[5-8]。RTG的发电原理是利用热电材料的塞贝克效应将放射性同位素衰变产生的热能转化为电能^[9-10],其能量来源为置于电池结构中心的同位素热源(Radioisotope Heat Unit, RHU)。目前,电池常用的同位素热源为²³⁸PuO₂,具有能量密度高(0.56 W·g⁻¹)、半衰期长($T_{1/2}=87.7$ a)、热源外部辐射剂量低等特点,是kW以下空间探测同位素电池的理想热源^[11-13]。目前已经开发了多种型号的²³⁸PuO₂ RHU,并成功应用在各类空间任务中,其典型代表就是美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)设计

的通用热源(General-Purpose Heat Source, GPHS),见图1^[14],在毅力号、好奇号、旅行者和新视野号等航天任务中表现出优秀的应用稳定性^[15-16]。

我国在对空间任务应用的同位素电源研制、测试过程中需要用到同位素热源,然而²³⁸PuO₂热源具有高危毒性,且价格昂贵、难以获取^[17-18],因此,研究人员对同位素热源的等效性替代需求迫切。采用电加热等效源代替RHU以完成各类性能测试与分析是目前的常用方案^[19-20],但受制于所制作模拟热源标准的差异,难以保证其与真实同位素热源各项特性的一致,各组实验结果之间也难以进行有效的对比分析。GPHS在以往多次空间任务中成功应用,具有运行稳定、安全性高、可模块化组装的特点,在未来新一代同位素电池的开发研究中也具有重要位置,也是我国在同位素电源研制、测试过程中对电加热模拟热源的等效性参考。将GPHS作为标准仿制一个电加热模拟源,在标准统一的热源条件下开展热电转换应用探索将非常有必要,在此基础上也可

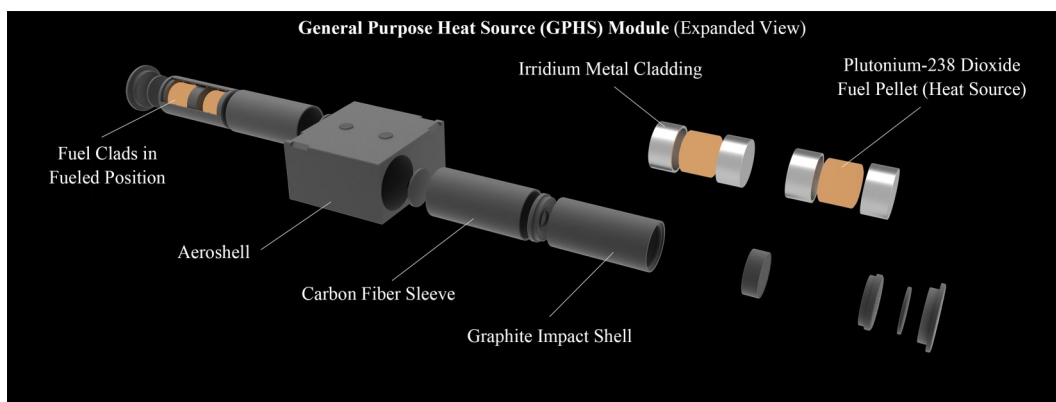


图1 GPHS的结构示意图(GPHS模块为放射性同位素电源系统提供稳定的热量)^[14]
Fig.1 Schematic of the GPHS structure (the GPHS module provides steady heat for a radioisotope power system)^[14]

以获得更加真实、更具对比性的研究结论。

本工作为满足同位素电源系统非核单元等效性测试与验证的需求,研发了一种具有高等效性的电加热模拟热源,以解决现有技术中存在的电加热模拟热源与真实同位素热源的等效性较差的问题。本文基于真实 GPHS 的尺寸、功率、材料参数设计了电加热模拟 GPHS 模型。利用多物理场有限元仿真技术 (COMSOL Multiphysics) 分析了模型内部的热量传输过程,讨论了不同热源功率、材料属性和厚度条件下表面温度变化规律。在此基础上,本工作制备出电加热等效的 GPHS 模拟热源,并进行实验测试,完成电加热 GPHS 与仿真计算之间的功率-温度关系曲线对比分析。在实际应用测试中分析了该热源的性能表现,讨论了在不同应用环境下表面温度的变化规律和运行特性,探讨了仿 GPHS 在同位素温差电池领域的应用前景及其可替代性。

1 原理与方法

1.1 稳态三维傅里叶热传输方法

GPHS 热量来源为内部 4 个 $^{238}\text{PuO}_2$ 燃料芯块,三维稳态热传输方式为热接触、热辐射和热对流。在热源不与其他部件接触时,在热源内部采用三维稳态傅里叶热传导公式^[21]计算热分布,热辐射与热对流是系统热平衡的边界条件,也是影响整体温度分布的关键因素。

$$\frac{\Phi}{\rho C} = \frac{\partial u(t,x,y,z)}{\partial t} - k\Delta \quad (1)$$

$$k = \frac{\lambda}{\rho C} \quad (2)$$

式中: Φ 为内热源功率密度; k 为热扩散率,决定于材料的导热系数 λ 、密度 ρ 和比热容 C ; $u(t,x,y,z)$ 为温度与时间 t 和空间位置参数的相关方程; Δ 为拉普拉斯算子。在式(1)中影响物体热量传输的材料属性为 λ 、 ρ 和 C ,热扩散率 k 由上述三个参数得出,可通过分析 k 对表面温度的影响规律,来评价仿 GPHS 模拟热源的材料选择。

普朗克黑体辐射公式(3)和热对流公式(4)计算边界条件:

$$E_b(T) = \varepsilon \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 \quad (3)$$

$$Q(T) = h(T)A(T - T_f) \quad (4)$$

式中: ε 为热源表面发射率; h 为热源表面与空气间的对流传热系数; A 为表面积; T 为热源表面温度; T_f 为环境温度。

当处于大空间密闭无风环境下,空气与热源表

面的自然对流传热系数 h 随温度变化,如式(5)所示。

$$h(T) = \frac{\lambda Nu_m}{L} = \frac{\lambda C (GrPr)^n}{L} = \frac{\lambda C \left(\frac{g\alpha_v (T - T_f)L^3}{kv} \right)^n}{L} \quad (5)$$

式中: Nu_m 为努塞尔数; Gr 为格拉晓夫数; Pr 为普朗特数;自然对流常数 C 与系数 n ^[22]; g 为重力加速度; α_v 为流体的体胀系数; L 为特征长度; v 为空气的运动黏度。

1.2 COMSOL 仿真模拟方法

利用 SolidWorks 对本工作仿制的 GPHS 模拟热源与实际 GPHS 进行 3D 建模导入 COMSOL 中。核心热源热功率为 250 W,热源表面辐射热损失系数为实测数值 0.85;对流系数通过式(5)计算获得,环境温度 293 K,大气压强 101.325 kPa。为扩展 GPHS 热源功率应用范围,在 20~500 W 的热源功率范围内进行后续分析。模型与参数设置完毕后,利用有限元方法进行迭代计算,获得热源表面与内部的温度分布,对比评估仿制 GPHS 热源的等效性。

2 热源设计及实验方法

2.1 仿 GPHS 模拟热源设计

GPHS 最外部则是针刺编织的碳-碳复合抗烧蚀包壳,外部包壳的整体尺寸为 9.72 cm×9.32 cm×5.31 cm^[23],内部为多层结构,核心为 4 个封装在铀合金包壳内的 $^{238}\text{PuO}_2$ 同位素热源芯块,为防止放射性物质的泄漏,在合金包壳顶部设计透气孔,将 $^{238}\text{PuO}_2$ 衰变产生的 He 排出。每个芯块产生 62.5 W 的热功率,直径和高度均为 2.75 cm。

本文所仿制的 GPHS 模拟热源沿用真实 GPHS 的外部尺寸和内部多层布局,如图 2(a)所示,源芯是与 GPHS 热源芯块尺寸相同的圆柱块体,其内部等距设置了三个分立排布的电加热棒。4 个热源芯块被套装在碳基复合材料套筒中,两个芯块中间由浮动隔膜隔开,顶端再由碳复合端盖封装。热源芯块外部采用 316 L 不锈钢作为金属包壳,并将其套装在耐高温石墨套筒中,其间采用石墨垫块相隔,顶盖与外部的抗烧蚀包壳都采用耐高温石墨定制,实物组装图如图 2(b)所示。

2.2 仿 GPHS 模拟热源实验测试方法

本工作所搭建的仿 GPHS 模拟热源实验测试平台如图 3 所示。为保证热功率均匀输入,由 4 个专用电源分别独立连接到等效热源的内部芯块,每个专

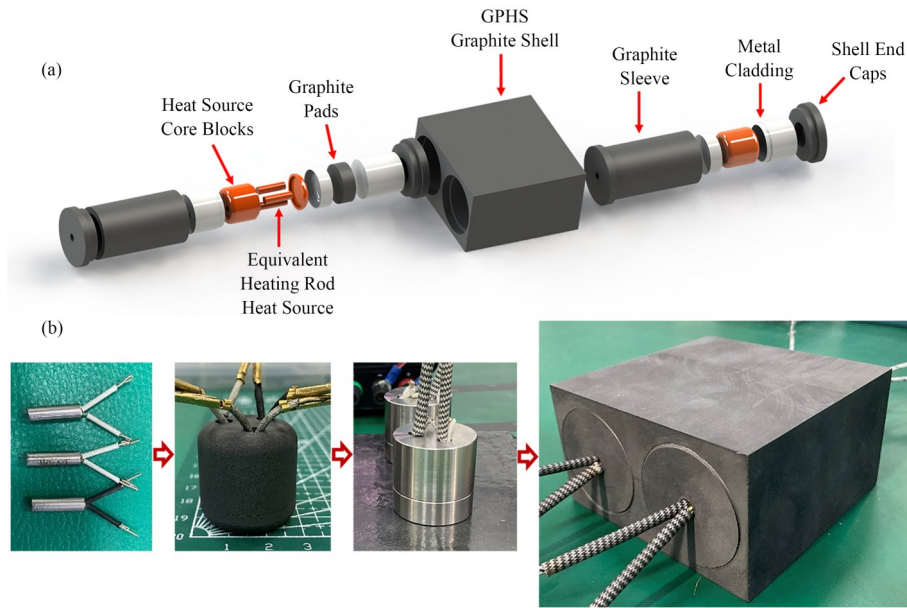


图2 (a) 仿 GPHS 模拟热源的设计解构示意图, (b) 热源各部件组装实物图
Fig.2 (a) Schematic of the design deconstruction of the simulated GPHS, (b) physical photographs of the assembly of each component of the heat source

用电源最大可提供 200 W 的热功率, 整个测试平台可实现 0~800 W 的功率调控。两个固定支架悬空支撑仿 GPHS 模拟热源, 减少地面接触热损失, 利用接触式测温仪与红外热成像测温仪共同对热源温度进行监测。实验测试过程持续保证环境温度 25 °C, 压强 101.325 kPa。每个功率输入点稳定 30 min 进行温度测试, 分别读取仿 GPHS 模拟热源表面 5 个不同位置的温度, 以减小误差保证测试结果的准确性。

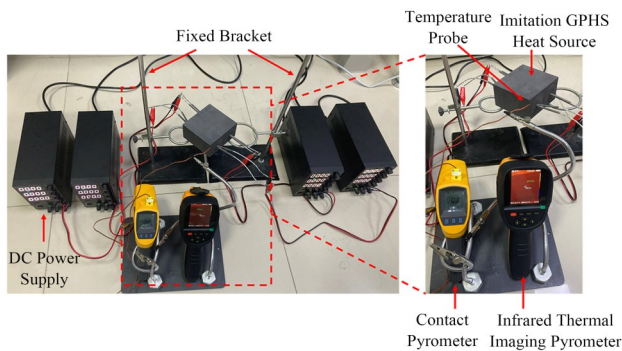


图3 仿 GPHS 模拟热源的实验测试场景图
Fig.3 Photographs of the experimental test scenario simulating the GPHS simulated heat source

3 仿真与实验结果分析

3.1 仿真结果与参数分析

仿真计算所得的热源温度变化如图 4 所示。随着合金与石墨包壳热扩散率 k 的增加, GPHS 的表面温度在 4 K 内变化, 如图 4(c) 所示。当热扩散率不

变, 芯块金属与石墨包壳的厚度对热源整体温度的影响也较小 (3 K 以内), 如图 4(d) 所示。依据文献中的技术参数值数据^[24-25], 对真实的 GPHS 同样进行了模拟仿真计算。在外部环境不变的稳态条件下, 热源内部材料对表面温度的影响很小, 仿制的 GPHS 模拟热源与真实 GPHS 相比, 理论温度差值仅为 1~2 K。

输入功率拓展至 20~500 W 范围, 温度随功率的变化曲线如图 4(e) 所示, 随热源输入功率的提升, 模拟热源与真实 GPHS 相比, 理论温度变化趋势基本一致, 输入功率与热源表面温度的拟合关系式符合对数函数, 如式 (6) 所示。

$$\bar{T} = -859.3 + 199.4 \ln(P + 83.5) \quad (6)$$

3.2 仿 GPHS 模拟热源实验测试分析

从红外测温热区图 5(a) 所示, 各功率输入的仿 GPHS 模拟热源表面温度都较为均一。图 5(b) 展示了热源表面温度随功率提升 (20~500 W) 的变化, 呈现出对数增加趋势, 该现象与仿真结果一致。固定支架所带走的部分热量可能在一定程度上造成了测试结果与仿真结果之间的略微偏差。接触式测试由于测温探针的接触热阻也较红外测温数值更低, 接触式热电偶与红外热成像测温数据随功率变化的拟合函数分别如下:

$$\bar{T}_c = -1557.3 + 324.5 \ln(P + 313.8) \quad (7)$$

$$\bar{T}_i = -1286.1 + 288.6 \ln(P + 252.6) \quad (8)$$

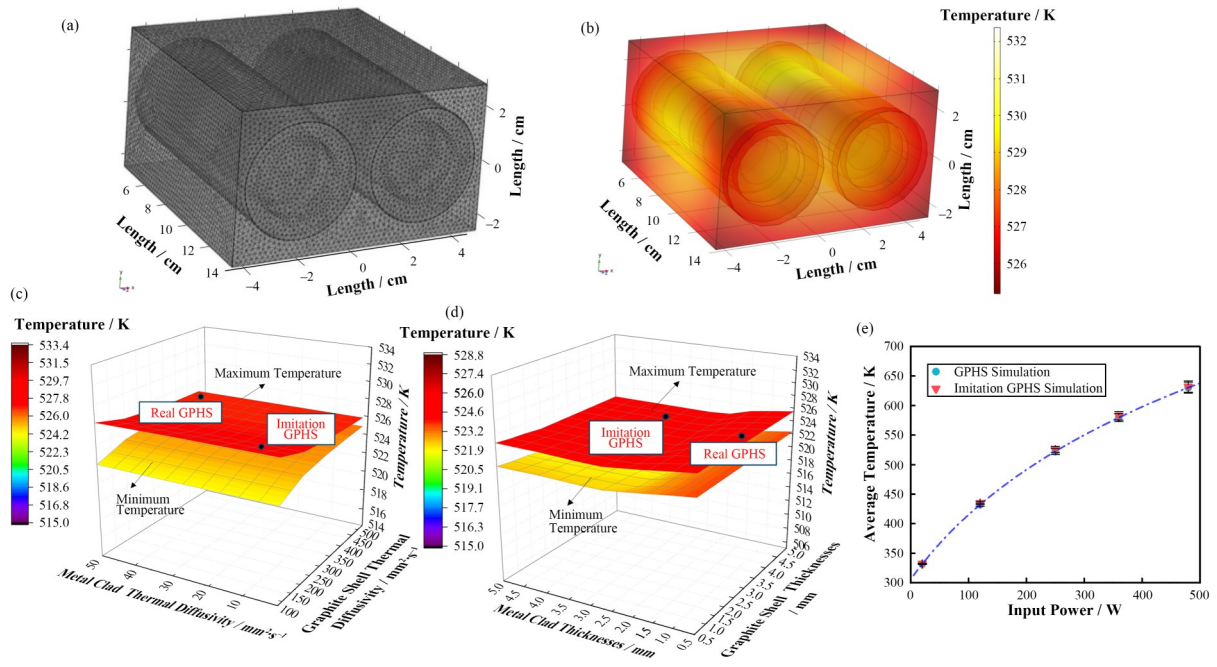


图4 (a) 仿 GPHS 模拟热源的网格模型, (b) 仿真计算温度热图, (c) 250 W 输入功率下热源温度随金属和石墨包壳热传输率变化 3D 图, (d) 热源温度随金属和石墨包壳厚度变化的 3D 图, (e) 仿 GPHS 模拟热源和 GPHS 仿真计算温度随输入热功率变化曲线

Fig.4 (a) The grid model of imitation GPHS heat source, (b) the calculated temperature thermogram of simulation, (c) 3D plot of the variation of the heat source temperature with the heat transfer rate of the metal and graphite cladding for an input power of 250 W, (d) 3D plot of the variation of the heat source temperature with the thickness of the metal and graphite cladding, (e) imitation of GPHS simulated heat source and GPHS simulation to calculate the temperature variation curve as a function of the input thermal power

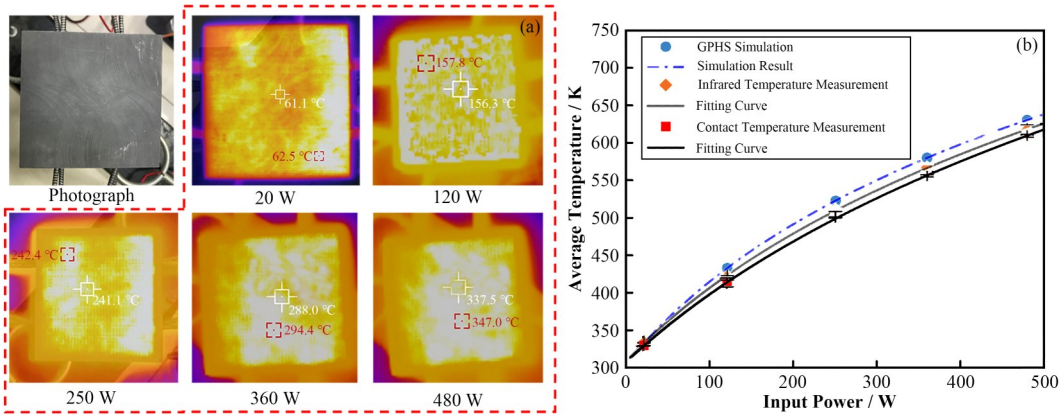


图5 (a) 不同热源输入条件下仿 GPHS 模拟热源表面的红外热成像图, (b) 热源表面测试温度随输入功率变化曲线图
Fig.5 (a) Infrared thermogram of the simulated GPHS heat source surface for different heat source input conditions, (b) plot of the test temperature of the heat source surface versus the input power

3.3 仿 GPHS 模拟热源的应用性能分析

目前, GPHS 的主要工作场景为太空或行星表面, 不同环境对其表面的温度分布会产生较大影响, 环境的具体参数区别主要体现在压强、表面材料的发射特性、环境温度和同位素衰变导致的热源内部热功率变化。仿真模型中, 热源总输入功率为 250 W, 压强为 0~101.325 kPa, 表面辐射散热系数为 0.1~1。仿真结果如图 6(a) 所示, 环境压强与表面材

料发射率对温度影响很大, 压强与发射率越低, 热源表面的温度越高。当处于真空条件下 (0 Pa), 且热源发射率为 0.1 时, 热源表面温度可达 1 055 K, 因此, 仿 GPHS 模拟热源更适合采用低发射率表面并在太空环境中应用。

当仿 GPHS 模拟热源内部热功率和环境温度改变时, 热源表面温度变化如图 6(b) 所示。当内部热功率较高时 (250~500 W), 环境温度 (10~500 K) 对

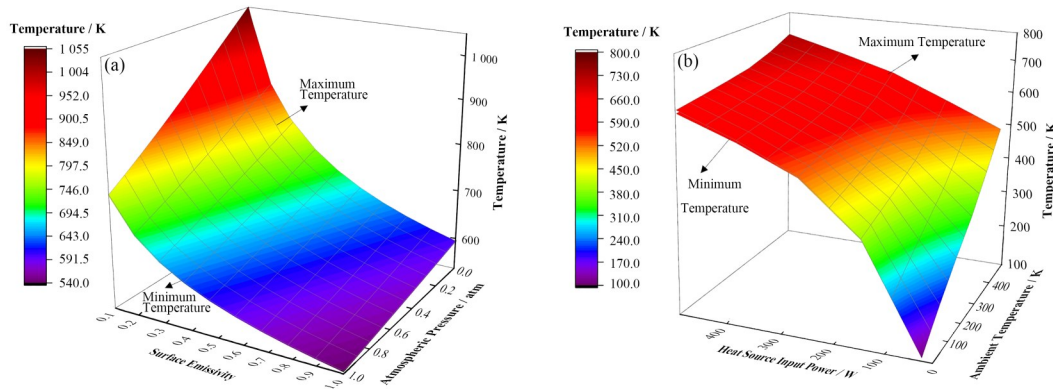


图6 (a) 热源表面温度随应用环境中的大气压强和表面发射率变化的3D图, (b) 热源表面温度随环境温度和热源输入功率变化的3D图

Fig.6 (a) 3D plot of the heat source surface temperature versus atmospheric pressure and surface emissivity in the application environment, (b) 3D plot of the heat source surface temperature versus ambient temperature and internal power of the heat source

表面温度的影响较小。当内部热功率下降250 W以下时,环境温度对表面温度的影响开始显著。在实际应用中,仿 GPHS 模拟热源的热功率应保持在250 W 以上,以减少环境温度对热源表面温度的影响。

仿 GPHS 模拟热源在 RTG 的应用评估实验如图7(a)所示。内阻为 10 Ω、面积为 4 cm×4 cm 的 RTG 模块置于模拟热源上侧,背部贴合等面积的散热翅片进行辅助散热。仿 GPHS 模拟热源的输入功率从

10 W 逐渐增加至 60 W。利用双通道 Keithley 4200 SCS 数字源表采集 RTG 模块的 $I-V$ 和 $P-V$ 曲线,如图7(b)所示。

$$P_{\max} = \text{MAX}(I \cdot V) \quad (9)$$

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P} \quad (10)$$

当仿 GPHS 模拟热源输入功率在 10~60 W 范围内变化时, P_{\max} 和 η 都随输入功率呈线性变化,如图7(c)所示。经过拟合推算后,仿 GPHS 模拟热源为

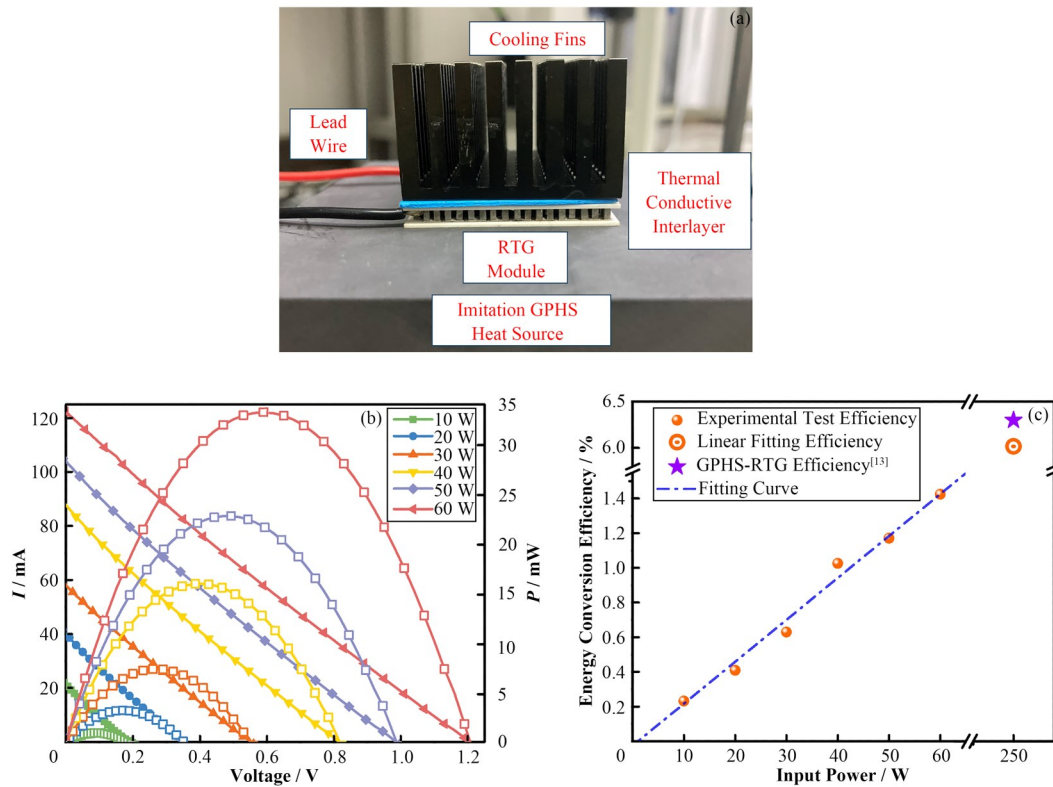


图7 (a) 热电模块测试实物图, (b) 热电模块的 $I-V/P-V$ 测试数据曲线图, (c) 热源输入功率与能量转化效率关系曲线图
Fig.7 (a) Physical photograph of the thermoelectric module test, (b) graph of the $I-V$ and $P-V$ test data of the thermoelectric module, (c) graph of the heat source input power versus energy conversion efficiency

250 W 的标准输入功率时, 预计可实现 6.0% 的能量转化效率。接近于 GPHS-RTG 的能量转化效率 6.3%^[13], 本工作所制作的仿 GPHS 模拟热源在 RTG 的应用研究上具备较好的等效替代性。

4 结语

本文研发了一种具有高等效性的电加热模拟热源, 以解决现有技术中存在的电加热模拟热源与真实同位素热源的等效性较差的问题, 围绕 GPHS 电加热模拟热源的设计制作、性能分析、应用探索开展研究。基于真实 GPHS 尺寸、结构和热功率设计的模拟热源模型, COMSOL 仿真计算的结果显示, 热源内部材料对表面温度影响较小, 本工作所制的仿 GPHS 模拟热源与真实 GPHS 在不同热输入功率下的温度变化趋势与实验值一致。

仿 GPHS 模拟热源在不同应用环境下的结果表明, 真空和低表面发射率可使热源温度得到大幅提升, 最高可达 1 055 K。当热源内部热功率保持在 250~500 W 时, 环境温度对表面温度的影响较小, 当热功率在 250 W 之下时, 环境温度的影响开始明显。仿 GPHS 模拟热源可应用于 RTG 设计研究, 热源功率 250 W, RTG 的能量转化效率预计可达 6%, 与 GPHS-RTG 的 6.3% 接近, 证实了仿 GPHS 模拟热源在 RTG 应用研究中的等效性。本工作所提出的仿 GPHS 模拟热源, 对构建同位素电池标准的热源测试条件具有积极的参考价值与借鉴意义, 进一步推动了同位素电池的研发与技术进步。

作者贡献声明 王宏宇负责实验方案的设计、数据分析、数据处理和论文撰写; 许志恒、刘云鹏、汤晓斌提供理论指导和论文的完善意见; 王继宇参与实验材料的制备; 刘世超、陆宏波、李欣益提供理论指导和论文的数据分析。

参考文献

- 季庚午, 张晓楠, 杨迎国, 等. 前驱体混合比例对 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 钙钛矿薄膜微观结构及光伏器件性能的影响[J]. 核技术, 2016, **39**(12): 120101. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.120101.
- JI Gengwu, ZHANG Xiaonan, YANG Yingguo, *et al.* Influences of precursor ratio on microstructure of perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ film and photoelectric conversion properties of perovskite solar cell[J]. Nuclear Techniques, 2016, **39**(12): 120101. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.120101.
- 雷金勇, 黄旭锐, 崔景赠, 等. 双钙钛矿氧化物中 B 位掺杂对固体氧化物燃料电池性能的影响[J]. 核技术, 2023, **46**(6): 060502. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.060502.
- LEI Jinyong, HUANG Xurui, CUI Jingzeng, *et al.* B-site doping effect of double perovskite for cathodes of solid oxide fuel cells[J]. Nuclear Techniques, 2023, **46**(6): 060502. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.060502.
- 靳占刚, 汤晓斌, 周大勇, 等. 双重效应 γ 射线核电池的制备与性能研究[J]. 上海航天, 2019, **36**(1): 79 - 85. DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2019.01.012.
- JIN Zhangang, TANG Xiaobin, ZHOU Dayong, *et al.* Preparation and performance of dual-effect nuclear batteries based on γ -ray[J]. Aerospace Shanghai, 2019, **36**(1): 79 - 85. DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2019.01.012.
- 张明旭, 秦李鑫, 赵嫄, 等. 辐射伏特效应核电池换能器件中的 β 粒子能量沉积行为[J]. 核技术, 2021, **44**(2): 020202. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.020202.
- ZHANG Mingxu, QIN Lixin, ZHAO Man, *et al.* Simulation of energy deposition of β particles in betavoltaic battery transducer materials[J]. Nuclear Techniques, 2021, **44**(2): 020202. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.020202.
- Prelas M A, Weaver C L, Watermann M L, *et al.* A review of nuclear batteries[J]. Progress in Nuclear Energy, 2014, **75**(1): 117 - 148. DOI: 10.1016/j.pnucene.2014.04.007.
- 何虎, 罗志福, 武伟名, 等. 基于 $^{241}\text{AmO}_2$ 驱动放射性同位素温差发电器在月球表面输出性能模拟计算[J]. 同位素, 2018, **31**(6): 335 - 342. DOI: 10.7538/tws.2018.31.06.
- HE Hu, LUO Zhifu, WU Weiming, *et al.* The simulated calculation of the output of a $^{241}\text{AmO}_2$ fueled radioisotope thermoelectric generator on the Moon's surface[J]. Journal of Isotopes, 2018, **31**(6): 335 - 342. DOI: 10.7538/tws.2018.31.06.
- 牛厂磊, 罗志福, 雷英俊, 等. 深空探测先进电源技术综述[J]. 深空探测学报, 2020, **7**(1): 24 - 34. DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20200002.
- NIU Changlei, LUO Zhifu, LEI Yingjun, *et al.* Advanced power source technology of deep space exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, **7**(1): 24 - 34. DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20200002.
- Lange R G, Carroll W P. Review of recent advances of radioisotope power systems[J]. Energy Conversion and Management, 2008, **49**(3): 393 - 401. DOI: 10.1016/j.enconman.2007.10.028.
- 郑海山, 赵国铭. 放射性同位素温差电池的空间应用及

- 前景分析[J]. 电源技术, 2013, **37**(7): 1278 - 1280. DOI: 10.3969/j.issn.1002-087X.2013.07.059.
- ZHENG Haishan, ZHAO Guoming. Space application and prospects analysis of radioisotope thermoelectric generators[J]. Power Sources, 2013, **37**(7): 1278 - 1280. DOI: 10.3969/j.issn.1002-087X.2013.07.059.
- 10 张建中, 任保国, 王泽深. 空间应用放射性同位素温差发电器的发展趋势[J]. 电源技术, 2006, **30**(7): 525 - 530. DOI: 10.3969/j.issn.1002-087X.2006.07.002.
- ZHANG Jianzhong, REN Baoguo, WANG Zeshen. Development trend of radioisotope thermoelectric generator for space application[J]. Power Sources, 2006, **30**(7): 525 - 530. DOI: 10.3969/j.issn.1002-087X.2006.07.002.
- 11 罗洪义, 牛厂磊, 吴胜娜, 等. 深空探测中的钚-238同位素电源[J]. 深空探测学报, 2020, **7**(1): 61 - 72. DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20191129001.
- LUO Hongyi, NIU Changlei, WU Shengna, *et al.* The plutonium-238 radioisotope thermoelectric generator in the deep space exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, **7**(1): 61 - 72. DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20191129001.
- 12 牛厂磊, 唐显, 李鑫, 等. ^{238}Pu 同位素热/电源的发展及展望[J]. 原子能科学技术, 2020, **54**(S1): 342 - 350.
- NIU Changlei, TANG Xian, LI Xin, *et al.* Development and prospect of ^{238}Pu RHU/RTG[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2020, **54**(S1): 342 - 350.
- 13 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. DOI: 10.3969/j.issn.1673-8748.2013.02.001.
- WU Weiren, WANG Qian, REN Baoguo, *et al.* Application of RHU/RTG in space missions[J]. Spacecraft Engineering, 2013, **22**(2): 1 - 6. DOI: 10.3969/j.issn.1673-8748.2013.02.001.
- 14 NASA. General purpose heat source[ED/OL]. <https://rps.nasa.gov/power-and-thermal-systems/thermal-systems/general-purpose-heat-source/>.
- 15 Bennett G L, Lombardo J J, Hemler R J, *et al.* General-purpose heat-source radioisotope thermoelectric generator: a true general-purpose space RTG[J]. American Institute of Physics, 2008, **969**(1): 663 - 671. DOI: 10.1063/1.2845028.
- 16 Mason L S. Realistic specific power expectations for advanced radioisotope power systems[J]. Journal of Propulsion and Power, 2007, **23**(5): 1075 - 1079. DOI: 10.2514/1.26444.
- 17 Wang X W, Liang R R, Fisher P, *et al.* Critical design features of thermal-based radioisotope generators: a review of the power solution for polar regions and space [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, **119**: 109572. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109572.
- 18 Gusev V V, Pustovalov A A, Rybkin N N, *et al.* Milliwatt-power radioisotope thermoelectric generator (RTG) based on plutonium-238[J]. Journal of Electronic Materials, 2011, **40**(5): 807 - 811. DOI: 10.1007/s11664-011-1579-z.
- 19 Emrich Jr W J. General purpose heat source simulator[C]// International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP08). 2008.
- 20 Deng W, Wang X J, Pan X D, *et al.* Geometry design and performance optimization of a terrestrial radioisotope thermoelectric generator based on finite element analysis [J]. Annals of Nuclear Energy, 2021, **151**: 107883. DOI: 10.1016/j.anucene.2020.107883.
- 21 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. 4th Ed. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- 22 罗森诺 W M. 李荫亭, 译. 传热学手册[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- Rohsenow W M. LI Yinting, Tran. Handbook of heat transfer[M]. Beijing: Science Press, 1985.
- 23 Rinehart G H. Design characteristics and fabrication of radioisotope heat sources for space missions[J]. Progress in Nuclear Energy, 2001, **39**(3 - 4): 305 - 319. DOI: 10.1016/S0149-1970(01)00005-1.
- 24 Kruger O L, Savage H. Heat capacity and thermodynamic properties of plutonium dioxide[J]. The Journal of Chemical Physics, 1968, **49**(10): 4540 - 4544. DOI: 10.1063/1.1669909.
- 25 Light-weight radioisotope heater unit (LWRHU): a technical description of the reference design[R]. Los Alamos National Laboratory (LANL), NM (USA), 1982. DOI: 10.2172/5253319.