

^{238}Pu 同位素热/电源的发展及展望

牛厂磊, 唐 显, 李 鑫, 罗志福*

(中国原子能科学研究院 同位素研究所, 北京 102413)

摘要: 作为深空探测任务中热/电能的理想来源, 同位素热源(RHU)/温差型同位素电源(RTG)在人类向空间迈进的进程中占据举足轻重的地位, 很大程度上决定着深空探测任务的深度和广度。本文介绍了RHU/RTG的原理和基本结构, 论述了空间探测领域应用范围最广的 ^{238}Pu RHU/RTG的国内外发展现状, 重点分析了RHU/RTG技术体系中影响其性能的关键科学和技术问题, 在指明RHU/RTG技术发展方向的同时, 对RHU/RTG的应用前景提出了展望。

关键词: ^{238}Pu RHU/RTG; 关键科学问题; 关键技术问题

中图分类号: V442 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2020)S0-0342-09

doi: 10. 7538/yzk. 2020. zhuan. 0409

Development and prospect of RHU/RTG

NIU Changlei, TANG Xian, LI Xin, LUO Zhifu*

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

Abstract: As an ideal source of heat/electricity in deep space exploration missions, RHU/RTG plays a pivotal role in the process of stepping into the space, which largely determines the depth and breadth of deep space exploration missions as well. The principle and basic structure of RHU/RTG were presented, the development status of ^{238}Pu RHU/RTG was discussed, and the key scientific and technical problems affecting its performance in the RHU/RTG technical system were emphatically analyzed. Based on above the application prospect of RHU/RTG is forecasted, and the development direction of RHU/RTG technology is pointed out.

Key words: ^{238}Pu RHU/RTG; key scientific issue; key technical issue

20 世纪 50 年代以来, 航天技术的兴起和发展促使人类逐渐将脚步迈向太空, 空间探索和空间资源的开发成为大国之间竞争的关键^[1-2]。随着火箭和探测器工作效能的不断提高, 人类逐步向更深、更远的深空迈进^[3]。空间

探测已成为科技大国航天科学技术创新的助推器和空间疆域开拓、天体资源开发的前哨站。

由于深空探测任务远离太阳或处于阴影区, 光照严重不足且环境温度过低, 因此空间能源系统成为深空探测任务必不可少的关键系统

收稿日期: 2020-06-18; 修回日期: 2020-07-23

基金项目: 核能开发项目资助

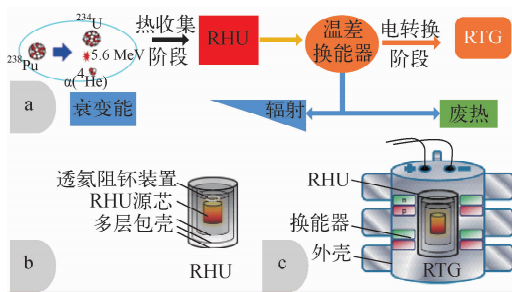
作者简介: 牛厂磊(1985—), 男, 河南许昌人, 高级工程师, 博士, 从事同位素热/电源及相关功能材料研究

* 通信作者: 罗志福, E-mail: luozhifu1001@aliyun.com

之一,是支撑探测器运行、载荷设备发挥效能的重要保证。同位素热/电源是利用放射性同位素衰变时释放的能量来保温或供电的装置,与传统热/电源相比,具有工作寿命长、环境适应性好(能适应无光、低温、高压等环境)、体积小、结构紧凑、能量密度大、可靠性高、寿期内免维护等优点,在空间探测(如月球探测、外行星探测等)、陆地极端环境考察(如极地、荒漠考察站点等)、深海监控(如海洋监测网、深海声呐等)等领域均有广泛的用途^[4-5]。同位素电源的种类很多,按照其转换方式已发展出温差电型、热光伏型、碱金属型、热离子型等十多种类型的同位素电源^[6-7]。其中,技术最成熟、应用最广泛的同位素电源为温差型同位素电源(RTG),同位素热源(RHU)为 RTG 的核心部件,除为 RTG 提供可转化为电能的热量外,还可作为热量来源为极端低温环境中工作的设备供热保温。

1 RHU/RTG 原理及基本结构

RTG 是利用热电材料的塞贝克(Seebeck)效应将放射性同位素的衰变热转化为电能的装置,其发电过程可分为衰变热收集阶段和温差电转换两个阶段,其原理如图 1a 所示(以²³⁸Pu RHU/RTG 为例)。



a——原理;b——RHU 结构;c——RTG 结构

图 1 ²³⁸Pu RHU/RTG 原理及结构

Fig.1 Generation theory and structure of ²³⁸Pu RHU/RTG

1) 衰变热收集阶段:放射性²³⁸Pu衰变时释放 α 射线,根据爱因斯坦质能方程,该 α 射线携带很高的能量,当构成 α 射线的高能 α 粒子与周围物质相互作用时被阻止和吸收,粒子的动能转变成热能,使周围物质温度升高,从而向周围释放热能形成热源^[7-8]。

2) 温差电转换阶段:当衰变热从 RHU 表面向外部传导时,一部分衰变热流经温差电元件,在其热/冷端形成温度差,基于热电材料的 Seebeck 效应,热能直接转换为电能^[9],其转换原理为:当热电器件热/冷端存在温度差时,N 型热电材料的自由电子从热端扩散到冷端,冷端积累电子而带负电,热端带正电,同时 P 型半导体“空穴”由热端扩散到冷端,冷端带正电而热端带负电,热电器件两端产生电位差,在外接电路形成回路从而将热能转换为电能。同时,另一部分未被转换成电能的衰变热通过外壳及散热装置以废热和辐射传热的形式向外界释放,可用于仪器设备的保温。

²³⁸Pu RHU/RTG 的结构示于图 1b、c。由图 1b、c 可看出,²³⁸Pu RHU 主要由放射性同位素制成的热源源芯和多层承载不同功能的热源包壳构成,是²³⁸Pu RTG 的核心部件和能量来源;²³⁸Pu RTG 主要由 RHU、换能器以及外壳(包括散热装置)构成,其中温差电换能器可将衰变热能转换成电能,电源外壳将 RHU、温差电换能器及相应固支结构包裹固定在其内部,同时将大部分热量释放出去。

2 ²³⁸Pu RHU/RTG 的发展现状

²³⁸Pu放射性同位素具有半衰期长($T_{1/2} = 87.7$ a)、比功率较高(0.56 W/g)、100% α 衰变而无需厚重辐射屏蔽等特性,因此²³⁸Pu RHU/RTG 具有工作寿命长、体积小、质量轻的明显优势,是 kW 以下空间探测的理想电源^[10]。自²³⁸Pu RHU/RTG 问世以来,美国一直引领着²³⁸Pu RHU/RTG 技术的发展,先后开发出多种型号的²³⁸Pu RHU/RTG,并广泛应用于空间探测领域。

2.1 美国

1) ²³⁸Pu RHU

美国开发的²³⁸Pu RHU 主要是为²³⁸Pu RTG 提供热量来源,而作为加热器独立使用的任务共有 6 次。1969 年发射的“阿波罗 11 号”月球探测器中,²³⁸Pu RHU 首次被作为加热器独立使用,其初始热功率为 15 W^[11];针对空间探测极端环境中探测器及设备保温的需求,美国专门开发了为探测器及设备保温的²³⁸Pu RHU,初始热功率为 1 W,并充分考虑了 RHU

的安全性和可靠性。在 1989 年发射的“伽利略号”(Galileo)木星探测器中,装配了 120 个 ^{238}Pu RHU;1996 年“火星探路者”火星车上装备有 157 个,1997 年的土星探测器“卡西尼号”(Cassini)安装了 117 个,2003 年发射的“勇气号”和“机遇号”火星车分别安装了 8 个为电子暖箱加热的 ^{238}Pu RHU^[12]。

2) ^{238}Pu RTG

早在 20 世纪六七十年代,美国就在 SNAP (Space Nuclear Auxiliary Power) 计划中组织研制了一系列应用于空间探测任务的 ^{238}Pu RTG,并在 27 次空间探测任务中使用了 47 个,较为典型的有:1961 年,SNAP-3B 型 ^{238}Pu RTG 被成功应用于“子午仪-4A(Transit-4A)”近地轨道导航卫星,这是美国首次将 ^{238}Pu RTG 应用于空间探测领域,该 ^{238}Pu RTG 使用 ^{238}Pu 金属为源芯,电功率约 2.7 W,转换效率不足 4%,服役时间长达 15 年^[13];1963 年 12 月发射的“子午仪-5BN-2(Transit-5BN-2)”导航卫星首次将 RTG 作为其主电源,其初始电功率为 26.8 W,服役时间超过 6 年;1969 年 4 月的“雨云”气象卫星使用的 SNAP-19B3 RTG 是首个有一定空间安全性的 RTG,初始功率为 28.2 W,运行时间超过 2.5 年^[11]。

20 世纪 70 年代后期,由于探测任务的需要, ^{238}Pu RTG 的电功率达到百瓦以上。1976 年发射的“林肯-8”通信卫星首次使用 MHW (Multi-hundred watts)-RTG,其初始电功率约 150 W,采用 $^{238}\text{PuO}_2$ 陶瓷源芯和 Si-Ge 体系温差电换能器,转换效率达到 6.5%,服役寿命超过 30 年^[11];MHW-RTG 也被应用于“林肯-8、9”通信卫星、“旅行者 1、2 号”探测器,其中,“旅行者 2 号”于 2018 年 12 月 10 日飞离太阳风层,进入第二个星际空间,其中 RTG 服役时间超过 41 年^[14]。

20 世纪 80 年代,美国 ^{238}Pu RTG 开始向集成化和模块化方向发展,开发出可根据任务需求进行灵活组装的通用同位素热源(GPHS)-RTG 模块,其结构如图 2 所示。GPHS-RTG 首次应用于 1989 年发射的“伽利略号”木星探测器,并在之后的“尤利西斯”、“卡西尼”等探测器中得到应用,该 RTG 电功率超过 280 W,采用 $^{238}\text{PuO}_2$ 陶瓷源芯和 Si-Ge 体系温差电换能器,

转换效率达到 6.7%,服役寿命超过 14 年^[15]。

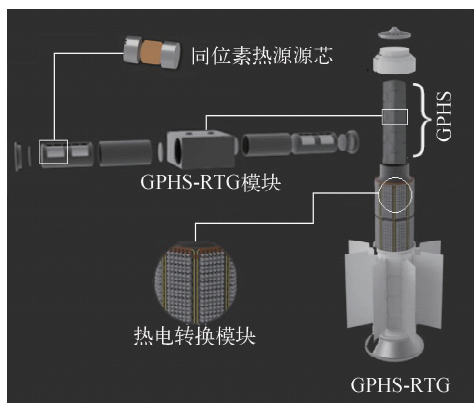


图 2 GPHS 和 GPHS-RTG 结构

Fig. 2 Structure of GPHS and GPHS-RTG

为提升 ^{238}Pu RTG 的空间应用安全性并降低研制成本,美国研发出多任务型同位素电源(MMRTG),其 RHU 和换能器均采用更标准、更灵活的模块化设计,能在空间环境中长期安全工作。2011 年首次被应用于“好奇号”火星探测器中,包括 8 个 GPHS 模块和 16 个温差电模块,初期电功率为 125 W,设计寿命 14 年以上,转换效率为 6.3%^[16]。

21 世纪以来,针对 RTG 转换效率不足的问题,美国开展了先进温差型同位素电源和先进斯特林同位素电源的研发,其中先进温差型同位素电源是通过开发先进温差电材料来提高 RTG 转换效率,目标效率 8%~10%;先进斯特林同位素电源计划通过采用动态斯特林转换技术实现转换效率超过 20%的目标^[17-18]。此外,美国还进行了大量热光电同位素电源的研制工作,该电源利用光伏效应将热源释放的红外辐射转换为电能,目标效率 15%以上^[19]。

2.2 俄罗斯

苏联/俄罗斯早期的 RHU 和 RTG 主要采用 ^{210}Po 同位素原料。1996 年 11 月发射的“火星-96”探测器装备了 4 枚 ^{238}Pu RTG,总输出功率为 0.6 W,其中的 Angel RHU 热功率为 8.5 W,因发射失败未能成功应用^[20]。此后,俄罗斯研制了用于小型自动观察站的 ^{238}Pu RTG,电功率分别为 200 mW 和 400 mW^[21]。2013 年俄罗斯为我国探月工程二期嫦娥三号探测器提供了用于仪器设备保温的 ^{238}Pu

RHU^[22]。2018 年协助我国在嫦娥四号任务中实现 ^{238}Pu RTG 的工程应用。

2.3 中国

我国在 RHU/RTG 方面的研究起步不晚但一度停滞,早在 20 世纪 70 年代就研制出了为“东方红一号”卫星供能的 ^{210}Po RHU/RTG,但未实现工程应用,之后 RHU/RTG 的研制工作便长期处于停滞状态。直到 2004 年后才重新开启,2006 年研制出国内第一枚 ^{238}Pu RHU/RTG^[23],之后,基于探月工程的需要,我国与俄罗斯合作,实现了嫦娥三号、嫦娥四号上 ^{238}Pu RHU/RTG 的工程应用。

3 RHU/RTG 的关键科学和技术问题

根据 RHU/RTG 的原理和基本结构,综合国内外发展现状, ^{238}Pu RHU/RTG 的研制应重点解决 RHU 制备、RHU 安全性试验和评价、高效热电转换等方面存在的问题。其所涉及的关键科学问题主要有 RHU 源芯密度确定、透氦阻钐装置透气率选择、高性能热电材料开发等,所涉及的关键技术问题主要包括透氦阻钐装置制备技术、意外条件下 RHU 的安全试验技术、高效温差电换能器制备技术以及 RTG 可靠性试验及验证技术。

3.1 关键科学问题

1) RHU 源芯密度

安全性是决定 RHU/RTG 应用的前提和基础,比功率是影响 RHU/RTG 应用的重要因素,而 RHU 的源芯密度不但影响 RHU/RTG 的安全性能,对 RHU/RTG 的比功率也有重要影响。

增大 RHU 的源芯密度不但有利于缩小 RHU 源芯体积、提高其力学性能,还有利于提高 RHU 的表面温度,增大 RHU/RTG 的比功率。然而,密度过大不利于释放 ^{238}Pu 同位素 α 衰变产生的 He 气,可能造成 He 气集聚而导致源芯肿胀、破裂等安全隐患,因此应在保证 RHU 源芯安全的前提下尽量提高其密度。反之,密度过小,源芯强度低、易破碎,在产生安全隐患的同时,还会降低 RHU/RTG 的比功率。因此,确定 RHU 源芯密度成为关系 RHU/RTG 安全性和比功率的一个重要科学问题。1975 年以后,美国的 ^{238}Pu RHU/RTG 均采用

$^{238}\text{PuO}_2$ 粉体作为 RHU 的源芯原料,烧制的 ^{238}Pu RHU 源芯密度为理论密度的 80%~90%^[24-25]。

2) 透氦阻钐装置透气率选择

由于 ^{238}Pu 同位素在衰变过程中持续释放 He 气,若 He 气在包壳内部不断集聚则会使包壳内压持续增大,可能导致包壳承压破裂,因此通常采用包壳预留储气空间或加装透氦阻钐装置两种方案来规避该安全风险。对于前一个方案,包壳预留储气空间会增加 RHU 的质量和体积,不利于 RHU/RTG 的减重减容和提高比功率,因此宜采用加装透氦阻钐装置的方式。透氦是指及时释放产生的 He 气,保护包壳内部压力动态平衡,避免因内压过大而破坏包壳;阻钐则是阻止 ^{238}Pu 颗粒泄漏至外部环境。

透氦阻钐装置透气率的选择成为其实现透氦、阻钐功能的决定因素。若透气率过小,不能及时排除 ^{238}Pu 同位素衰变产生的 He 气,存在安全隐患。若透气率过大,可能无法实现阻钐功能,在释放 He 气的同时造成极毒同位素 ^{238}Pu 的泄漏,危及环境及人员健康;此外,从多孔材料过滤机理可知,透氦阻钐装置的透气率会随使用时间的延长而降低,因此在保证其阻钐功能的前提下,确定透气率上限与热源设计寿命的关系也是一个值得深入探讨的科学问题。美国的 ^{238}Pu RTG 采用透氦阻钐装置来保证 RHU/RTG 的安全,其透气率范围在标准温度和压力调节下为 $4.5\sim 7.5\text{ cm}^3/\text{s}$ ^[26]。

3) 高性能热电材料的开发

作为将同位素衰变热转换为电能的核心部件,温差电换能器的转换效率主要取决于热电材料的性能,开发高性能热电材料一直是 RTG 研制过程中备受关注的科学问题之一,直接影响 RTG 的性能和研制成本。由温差电换能器元件的热电转换效率公式(式(1))可知,热电材料的性能决定了温差电换能器元件的转换效率,其热电优值(ZT 值)越大,温差电换能器的转换效率(μ)越高^[27]。

$$\mu_{\max} = ((T_h - T_c)/T_h)((1 + Z\bar{T})^{0.5} - 1) / ((1 + Z\bar{T})^{0.5} + T_c/T_h) \quad (1)$$

其中: T_h 为温差电元件热端温度; T_c 为温差电元件冷端温度; $\bar{T}$ 为平均温度; Z 为热电材料的热电系数。

为提高衰变热的利用率且尽可能降低价格高昂的放射性同位素原料的用量,美国一直致力于开发高性能热电转换材料。20 世纪五六十年代,美国首先采用碲化铅、TAGS 等材料开展 RTG 温差电换能器的研制,转换效率在 4% 左右^[28]。然而,由于碲基热电材料在 825 K 时会产生升华现象,严重影响 RTG 的性能,因此随后的 MHW-RTG、GPHS-RTG 均采用锗硅(Si-Ge)体系温差电换能器,转换效率可达到 6.7%。基于方钴矿材料体系优异的热电性能,2016 年 10 月 13 日,美国国家航空航天局(NASA)表示美国下一代深空探测 RTG 将采用方钴矿温差电换能器,力争将换能器转换效率提高 25%,有望用于“新疆界计划”(New Frontiers)的最新任务^[29]。目前,高性能热电材料的研制依然是 RTG 研制的关键科学问题。

可见,RHU 源芯密度和透氦阻钎装置透气率对 RHU/RTG 安全性和功率密度有重要影响,高性能热电材料的开发是提高 RTG 转换效率的前提,因此应加强基础科学研究,从理论方面解决影响 RHU/RTG 性能的关键科学问题。

3.2 关键技术问题

1) 透氦阻钎装置制备技术

透氦阻钎装置的制备技术是同位素电池研制中的关键技术问题之一。如上所述,由于 α 类的同位素电池会持续释放 He 气,使包壳内压增大,而包壳承压程度有限,增加储气空间会降低电池的比功率,同时影响热源的安全性能,因此必须加装透氦阻钎装置。美国 GPHS 中使用的透氦阻钎装置(CVS,图 3)以金属铱粉末为原料,采用粉末冶金的方法制备而成。该透氦阻钎装置厚度约为 0.41 mm,直径约为 $\phi 9.6$ mm。从图 3b 可看出,该透氦阻钎装置内部孔隙的孔型、孔径、走向不一致,气孔相互连通,孔隙结构复杂,气孔均匀分布在整个透氦阻钎装置内部,整体上是由金属颗粒和孔隙组成的 3D 多孔结构^[30]。根据多孔材料过滤机理可判断,当制备的透氦阻钎装置透气率在某一特定范围时,该装置能有效实现透氦和阻钎的功能。

2) 意外条件下 RHU 的安全试验技术

在 RTG 的技术体系中,RHU 的安全性是 RHU/RTG 应用的基础和前提。安全性主要

考察 RHU/RTG 在意外事故(包括爆炸、冲击、火烧、和撞击等)条件下的安全状况,为确保 ^{238}Pu RHU/RTG 在意外条件下不会发生放射性同位素泄漏事故,通常在工程应用前采用一系列地面模拟意外事故来考察和评估 RHU 的安全性。因此,恰当合理的安全性试验是考察和评估 RHU 安全性的关键技术。

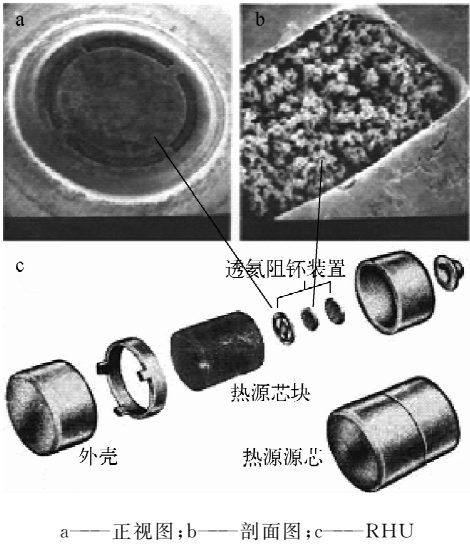


图 3 美国 RHU 装配的透氦阻钎装置及位置
Fig.3 CVS and assembly location of RHU of USA

在 ^{238}Pu RHU 空间应用安全性方面,美国重点开展了发射阶段的火箭爆炸冲击试验、火箭推进剂燃烧试验和高速碎片撞击试验,发射失败后的再入热试验、坠落地面的高速撞击试验和坠入海中的海水腐蚀试验。

火箭爆炸冲击试验模拟的是发射阶段运载火箭发生爆炸的场景,以加热至 1 090 $^{\circ}\text{C}$ 的 GPHS 为试验对象,使用含 5% TNT 的 C-4 炸药开展不同超压比冲量的爆炸冲击试验,测试超压最高达 15.25 MPa(2 212 psi)。火箭推进剂燃烧试验对象为模拟 RHU,模拟的是 RHU 在火箭推进剂燃烧环境中的场景,该燃烧试验使用 UTP-3001 型固体推进剂,试验时间为 10.5 min。高速碎片撞击试验模拟的是火箭爆炸产生的碎片撞击 RHU/RTG 的安全性试验,以加热至 1 090 $^{\circ}\text{C}$ 的模拟 RHU 和裸露金属包壳的不同部位(正面、边缘等)为试验对象,开展了铝弹、钛弹、大碎片等不同类型碎片以不同速度撞击的试验。铝弹、钛弹用气枪发射,最高撞

击速度分别达 550 m/s 和 684 m/s。大碎片撞击采用火箭助推器加速,分别以正面和侧面两个角度撞击 RTG 模拟件(内含 8 个模拟 GPHS),正碰最高撞击速度达 212 m/s^[31-32]。

再入热试验模拟的是 RHU/RTG 高速再入稠密大气层经历高温烧蚀环境的试验,以模拟 GPHS 为试验对象,试验最高温度约 1 570 ℃,历时约 10 min^[33]。高速撞击试验模拟的是火箭发射失败后,RHU/RTG 再入大气层以高温高速状态撞击地面的试验,美国洛斯阿拉莫斯国家实验室分别采用空气炮和火箭推进装置进行了一系列撞击试验^[34],试验对象包括加热至 1 090 ℃ 的裸露金属包壳和加热至 700 ℃ 的模拟 GPHS 组件。其中,裸露金属包壳分别撞击混凝土和钢靶,撞击混凝土的最高速度为 90.45 m/s,破裂临界速度约为 65 m/s;撞击钢靶的破坏临界速度约为 54 m/s;模拟 GPHS 组件分别以 0°、15°、30° 和 90° 角度撞击靶件,速度约为 54 m/s,经过试验评估,认为泄漏情况在可接受范围内。海水腐蚀试验模拟的是 RHU/RTG 再入大气层掉入海中经受海水腐蚀的试验,分别在 0.25 m 深的浅海和压力达 68.9 MPa 的深海开展试验,试验时长分别为 640 d 和 639 d,试验结果表明²³⁸Pu 同位素不会发生泄漏^[35]。

3) 高效温差电换能器制备技术

高效温差电换能器制备技术包括温差电元件制备技术和温差电换能器集成技术,是影响 RTG 输出功率和可靠性的关键技术。根据温差电元件输出功率公式(式(2))可知,影响温差电元件的因素主要有热电单臂(N 型或 P 型)的尺寸和形状、热/冷端的温度差以及内阻和负载电阻几个方面。

$$P = \frac{S_{NP}^2 (T_h - T_c) R_{in}}{(R_{in} + R_{out})^2} \quad (2)$$

其中: P 为温差电元件的输出功率; S_{NP} 为温差电元件热电单臂(N 型或 P 型)的横截面积; R_{in} 为温差电元件内阻; R_{out} 为负载电阻。

典型的温差电换能器元件及其局部微观结构示于图 4。电极与热电材料之间采用多层界面连接,连接界面的质量决定着温差电元件内阻和应用可靠性。为保证温差电器件的转换效率及可靠性,在温差电元件制备过程中要充分考虑电极材料、焊料(过渡层材料)以及热电材

料的热导率、电导率和热膨胀率等性质,并对多层连接界面的强度、热阻、电阻、物理化学稳定性等性质进行分析和评价,因此温差电元件的制备技术是直接影响温差电换能器性能的关键技术^[36]。美国早期的 RTG 中采用中温 PbTe、PbTe/TAGS 体系热电材料,该温差电元件采用一步热压烧结法、扩散焊等方式将 Fe 电极与热电材料连接,过渡层为 SnTe、PbTe-Fe 等材料^[37];高温 Si-Ge 体系温差电元件的电极材料主要是 MoSi₂、W 等,连接方式包括扩散焊、等离子烧结等。

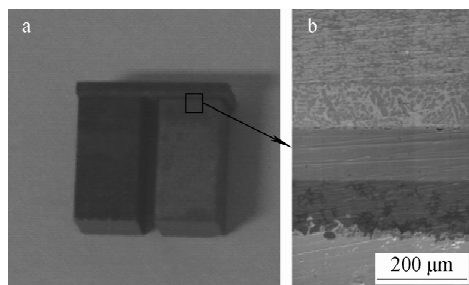


图 4 典型的温差电换能器元件(a)及其局部微观结构(b)

Fig. 4 Overall diagram (a) and local microscopic structure (b) of typical thermocouple

温差电换能器是由若干个温差电元件以串联或并联的形式连接构成的。温差电换能器集成技术中要求温差电元件具有平行度高($<30 \mu\text{m}$)、尺寸和性能一致性高、与冷端接触电阻低等特点,可通过低漏热结构优化、使用轻质高强支撑结构、加装隔热材料等措施来提升温差电换能器的性能。

4) 可靠性试验及验证技术

²³⁸Pu RHU/RTG 空间应用过程将经历储存、运输、发射、在轨、星表工作几个阶段,环境条件复杂多变,开展 RHU/RTG 环境适应性和可靠性地面模拟试验是发现 RHU/RTG 不足,进而进行设计和制备工艺改进的关键环节,也是验证 RHU/RTG 在任何条件下均能正常工作的关键环节。

美国 RHU/RTG 空间应用环境适应性与可靠性试验包括各级试验件的可靠性试验,分别为温差电单体、温差电模块、全模型温差电工程单元、电模拟 RTG 工程单元、质量鉴定件和

飞行件的可靠性试验^[38]。

为验证“卡西尼号”任务中温差电单体性能与“尤里尼斯号”、“伽利略号”任务的一致性,首先开展温差电单体性能测试试验,经确认后转入温差电模块的装配与试验测试^[2]。温差电模块的环境适应性和可靠性试验包括温差电模块振动试验、加速寿命试验和常规寿命试验,验证完成后转入下一阶段可靠性试验。在全模型温差电工程单元试验中,开展了全模型温差电组件工程单元的飞行验收试验,包括 y 和 z 两个方向的随机振动和瞬态振动,以考核温差电模块的结构强度与质量特性。电模拟 RTG 工程单元可靠性试验流程为振动试验→性能测试→热真空试验→性能测试,该试验发现了“尤里尼斯号”和“伽利略号”任务 RTG 的薄弱环节,提出了增加支撑结构的设计改进。质量鉴定件可靠性试验顺序为初始性能测试→振动试验及性能测试→质量特性检测→辐射剂量检测→热真空试验的鉴定级试验。RTG 飞行件试验顺序为:初始性能测试→振动试验及性能测试→磁场性能检测→质量特性检测→核辐射检测→热真空试验^[38-39]。

透氦阻钷装置的制备技术是实现其透氦和阻钷功能的关键,RHU 的安全性试验和验证是 RHU/RTG 实现工程应用的前提和基础,高效温差电换能器制备技术能实现热电材料性能的有效应用,可靠性试验及验证技术则是 RHU/RTG 设计和制备工艺改进的关键环节,应针对关键技术问题进行重点攻关,以技术突破解决影响 RHU/RTG 性能的关键技术问题。

4 发展建议及前景展望

放射性同位素能源是走向外部空间、开发空间资源、开拓空间疆域的战略装备,在深空探测任务中占举足轻重的地位。尽管²³⁸Pu RHU/RTG 已在空间探测任务中得到大量应用,但²³⁸Pu RHU/RTG 的研制过程中还存在大量有待深入研究的关键科学问题和关键技术问题,应在 RHU 制备、RHU 安全性试验和评价、高效热电转换以及 RTG 可靠性试验及评价等方面重点突破,因此加强基础研究,解决关键科学问题,着眼应用开发,突破关键技术问题成为我国同位素电源的发展方向。

展望未来,随着我国深空探测任务需求的增加和 RHU/RTG 研究的深入,RHU/RTG 必将成为实现我国空间战略的强力臂助。

参考文献:

- [1] 吴伟仁,刘旺旺,唐玉华,等. 深空探测几项关键技术及发展趋势[J]. 国际太空,2013(12):45-51.
WU Weiren, LIU Wangwang, TANG Yuhua, et al. Several key technologies and development trends of deep space exploration[J]. Space International, 2013(12): 45-51(in Chinese).
- [2] MARSHALL A C. Space nuclear safety[M]. Malabar, Florida: Krieger Publishing Company, 2008.
- [3] 叶培建,彭兢. 深空探测与我国深空探测展望[J]. 中国工程科学,2006,8(10):13-18.
YE Peijian, PENG Jing. Deep space exploration and its prospect in China[J]. Engineering Sciences, 2006, 8(10): 13-18(in Chinese).
- [4] FULLAM H T. Development program and the terrestrial radioisotope application program[R]. US: Pacific Northwest Laboratory, 1978.
- [5] Power sources for remote arctic applications, OTA-BP-ETI 129[R]. US: U. S. Congress, Office of Technology Assessment, 1992.
- [6] National Research Council Radioisotope Power Systems Committee. Radioisotope power systems: An imperative for maintaining US leadership in space exploration[M]. US: National Academies Press, 2009.
- [7] PRELASA M A, WEAVER C L, WATERMANN M L. A review of nuclear batteries[J]. Progress in Nuclear Energy, 2014, 75: 117-148.
- [8] SCHMIDT G R, SUTLIFF T J, DUDZINSKI L A. Radioisotope power: A key technology for deep space exploration[M]//SINGH P N. Radioisotopes Applications in Physical Sciences. US: [s. n.], 2011.
- [9] BENNETT G L, LOMBARDO J J, ROCK B J. US radioisotope thermoelectric generators in space[J]. Nuclear Engineer, 1984, 25(2): 49-58.
- [10] 郝少昌,卢振明,符晓铭,等. 核电池材料及核电池的应用[J]. 原子核物理评论,2006,23(3): 353-358.
HAO Shaochang, LU Zhenming, FU Xiaoming,

- et al. Nuclear battery materials and application of nuclear batteries[J]. Nuclear Physics Review, 2006, 23(3): 353-358(in Chinese).
- [11] CATALDO R L, BENNETT G L. U. S. space radioisotope power systems and applications: Past, present and future[M]. US: NASA Glenn Research Center, 2011.
- [12] 孙佳慧. 同位素核能源的空间应用前景分析[J]. 电源技术, 2014, 38(2): 401-404.
SUN Jiahui. Prospect of radioisotope heating unit in space applications[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2014, 38(2): 401-404 (in Chinese).
- [13] DICK P J, DAVIS R E. Radioisotope power system operation in the transit satellite[C]// American Institute of Electrical Engineers Summer General Meeting. US: American Institute of Electrical Engineers, 1962.
- [14] KOSKINEN T T, SANDEL B R, YELLE R V, et al. Saturn in Lyman α : A comparison of Cassini and Voyager observations[J]. Icarus, 2020, 339(3): 113594.
- [15] VINING C B, BENNETT G L. Power for science and exploration: Upgrading the general-purpose heat source radioisotope thermoelectric generator (GPHS-RTG)[C]// 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibi. Nashville: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [16] HAMMEL T E, BENNETT R, OTTING W, et al. Multi-mission radioisotope thermoelectric generator (MMRTG) and performance prediction model[C]// 7th International Energy Conversion Engineering Conference. Denver: Pratt & Whitney Rocketdyne, Inc., 2009.
- [17] CAILLAT T, HUANG C K, CHENG B, et al. Advanced thermoelectric materials for radioisotope thermoelectric generators[C]// 25th Symposium on Space Nuclear Power Albuquerque. California: Jet Propulsion Laboratory, 2008.
- [18] EDWARD J L, JEFFREY G, SALVATORE M O, et al. Design of a facility to test the advanced stirling radioisotope generator engineering unit, NASA/TM-2010-216742[R]. US: NASA, 2010.
- [19] NELSON R E. A brief history of thermophotovoltaic development[J]. Semicond Sci Technol, 2003, 18: S141-S143.
- [20] O'BRIEN R C. Radioisotope and nuclear technologies for space exploration[D]. Leicester: Department of Physics Astronomy University of Leicester, 2010.
- [21] 崔萍, 李歆, 张楠, 等. 前苏联和俄罗斯同位素温差发电机发展状况[J]. 电源技术, 2004, 28(12): 803-806.
CUI Ping, LI Xin, ZHANG Nan, et al. The development of radioisotope thermoelectric generator in USSR & Russia[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2004, 28(12): 803-806 (in Chinese).
- [22] 陈媛媛, 任保国, 刘锐, 等. 嫦娥三号同位素热源环境辐射场分布研究[J]. 电源技术, 2016, 40(9): 1 818-1 825.
CHEN Yuanyuan, REN Baoguo, LIU Rui, et al. Research on environment radiation field distribution of Chang'e-3 radioisotope heat source [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(9): 1 818-1 825 (in Chinese).
- [23] 彭慧, 陈栋梁, 王晓涛, 等. 空间用铀-238 放射源辐射影响分析[J]. 核安全, 2014, 13(3): 7-10.
PENG Hui, CHEN Dongliang, WANG Xiaotao, et al. Radiological protection of space Pu-238 radioactive source[J]. Nuclear Safety, 2014, 13(3): 7-10 (in Chinese).
- [24] KENT R A. LASL fabrication flowsheet for GPHS fuel pellets, LA-7972-MS[R]. New Mexico: Los Alamos Scientific Lab, 1979.
- [25] KUTTY T R G, KHAN K B, HEGDE P V, et al. Densification behavior and sintering kinetics of PuO_2 pellets[J]. Journal of Nuclear Materials, 2001, 297: 120-128.
- [26] PETERSON D E, FRANTZ C E. Reentry thermal testing of a general purpose heat source fueled clad, LA-9227[R]. New Mexico: Los Alamos Scientific Lab, 1982.
- [27] CAILLAT T, HUANG C K, CHENG B, et al. Advanced thermoelectric materials for radioisotope thermoelectric generators[C]// 25th Symposium on Space Nuclear Power Albuquerque. California: Jet Propulsion Laboratory, 2008.
- [28] LANGE R G, CARROLL W P. Review of recent advances of radioisotope power systems[J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49: 393-401.
- [29] ELIZABETH L. Spacecraft 'Nuclear Batteries'

- Could Get a Boost from New Materials[N/OL]. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, Calif. (2016). <https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=6646>.
- [30] JOHNSON E W. Current helium venting technology for $^{238}\text{PuO}_2$ heat source, LM-3625-OP[R]. Miamisburg: Mound Applied Technologies, 2010.
- [31] SNOW E C. Safety test NO. S-6, launch pad abort sequential test phase II: Solid propellant fire, LA-6034-MS[R]. New Mexico: Los Alamos Scientific Lab, 1975.
- [32] GEORGE T G, TATE R E, AXLER K M. General purpose development safety verification test program: Bullet/fragment test series, LA-1036-MS[R]. New Mexico: Los Alamos Scientific Lab, 1985.
- [33] PETERSON D E, FRANTZ C E. Reentry thermal testing of a general purpose heat source fueled clad, LA-9227[R]. New Mexico: Los Alamos Scientific Lab, 1982.
- [34] GRIGSBY C O. Comparison of general purpose heat source testing with the ANSI N43.6-1997 (R 1989) sealed source standard, LA-UR-98[R]. New Mexico: Los Alamos Scientific Lab, 1998.
- [35] TATE R E, LAND C C. Environmental safety analysis tests on the light weight radioisotope heater unit (LWRHU), LANL[R]. New Mexico: Los Alamos Scientific Lab, 1985.
- [36] 张琪昊, 柏胜强, 陈立东. 热电发电器件与应用技术: 现状、挑战与展望[J]. 无机材料学报, 2019, 34(3): 279-293.
- ZHANG Qihao, BAI Shengqiang, CHEN Lidong. Technologies and applications of thermoelectric devices: Current status, challenges and prospects[J]. Journal of Inorganic Materials, 2019, 34(3): 279-293(in Chinese).
- [37] LEAVITT F A, MCCOY J W, MARUDHACHALAM P, et al. Segmented thermoelectric module with bonded legs: US, 2012/0103381 A1[P]. 2012-05-03.
- [38] BENNETT G L, LOMBARDO J J, HEMLER R J, et al. Mission of daring: The general-purpose heat source radioisotope thermoelectric generator [C]//4th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC). San Diego: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [39] HAMMEL T E, BENNETT R, KEYSER S, et al. Multi-mission radioisotope thermoelectric generator (MMRTG) performance data and application to life modeling[C]//11th International Energy Conversion Engineering Conference. [S. l.]: [s. n.], 2013.