

深空探测先进电源技术综述

牛厂磊¹, 罗志福¹, 雷英俊², 王文强³, 郑见杰⁴, 乔学荣⁵, 罗洪义¹,
胡文军⁶, 钟武辉¹

(1. 中国原子能科学研究院, 北京 102413; 2. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094;
3. 上海空间电源研究所 物理电源事业部, 上海 200245; 4. 天津空间电源科技有限公司, 天津 300384;
5. 中国电子科技集团公司 第十八研究所, 天津 222500; 6. 中国工程物理研究院 总体工程研究所, 绵阳 621900)

摘要: 先进电源技术是保障深空探测任务顺利进行的前提和基础。在梳理我国后续深空探测任务(月球极区探测、小天体探测、火星探测、木星探测等)对电源系统需求的基础上,对涉及空间应用的电源技术(化学能、太阳能、同位素及空间核反应堆电源)进行概述;针对深空探测对电源系统的需求特点,分别阐述了锂离子蓄电池、太阳能电源、钷-238放射性同位素电源和空间堆核反应电源的特点、发展简史、在深空探测中应用限制及发展建议,重点分析了钷-238同位素电源和空间核反应堆电源技术的关键技术、应用情况及应用前景,为深空探测先进电源技术的长足发展提供参考。

关键词: 深空探测; 先进能源; 太阳能电源; 锂离子蓄电池; 钷-238同位素电源; 空间核反应堆电源

中图分类号: V442

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2020)01-0024-11

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20200002

引用格式: 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.

Reference format: NIU C L, LUO Z F, LEI Y J, et al. Advanced power source technology of deep space exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(1): 24-34.

引言

自20世纪中叶以来,由于航天技术的兴起和不断发展,人类向未知世界探索的脚步逐渐向太空迈进,空间资源的探索及开发成为大国之间竞争的重要关注点^[1-3]。随着载荷火箭和探测器工作效能的不断提高,人类探索空间的脚步越迈越远,从近地轨道不断向更远的深空进行探测^[4]。深空探测已经成为航天科技大国天体资源技术开发和航天技术创新的助推器,成为科技领域极具挑战性和带动性的高科技战略支点,成为航天大国空间疆域开拓与创新技术版图拓展的前哨站。

所谓的深空探测是指脱离地球引力场,进入太阳系空间和宇宙空间的探测^[5]。自1958年8月17日美国发射人类第一颗无人行星探测器“先驱者0号”(Pioneer 0)以来,人类共发射了200多个空间探测器,对月球、类地行星(水星、地球、火星、金星)、小行星、彗星、类木行星(包括木星、土星、天王星和海王星)等多个目标进行探索,世界航天技术大国和大多数发达国家都参与其中,先后开展了多种类型的深空探测活动^[6-9]。

人类已进行的深空探测活动大体分为4类(如图1所示),按照离地球由近及远可以分为:月球探测、火星探测、小天体探测、月球和火星之外的太阳系天体探测(如木星探测)。

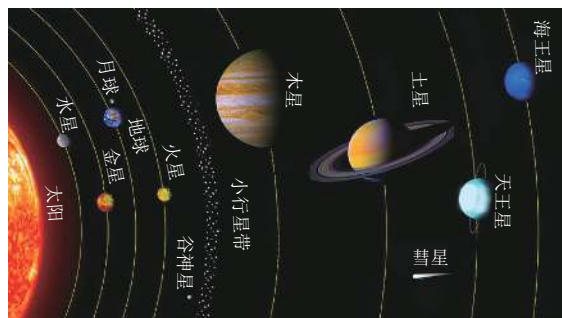


图1 太阳系星体分布示意图

Fig. 1 Sketch map of the astral distribution of the solar system

美国、前苏联/俄罗斯、欧洲、日本以及我国先后对月球进行了123次探测任务,获取了月球表面的基本地貌构造、元素含量和物质类型等大量珍贵数据;火星探测是月球探测之外又一大深空探测热点,美国已

经进行了37次火星探测，还有数项火星探测任务正在进行或筹备中；此外，人类还对除月球、火星之外的太阳系其它天体进行68次探测，获取的数据有助于解答地球起源与演变、行星和太阳系的形成和演化、地球的未来如何等一系列问题，也有利于人类积极开发和利用空间资源。

空间电源系统是各种航天器中必不可少的关键系统之一，决定着深空探测任务执行的深度和广度，是支撑深空探测器运行、空间设备载荷发挥效能的重要保证^[10-11]。美、苏/俄等航天技术发达的国家均极其重视空间电源技术的发展，早在70年代美国就将空间电源系统列为五大航天技术发展项目之一，并制定了相应的发展规划；而苏/俄则成立了一支从事空间电源理论研究、设计开发及生产应用的专业技术队伍，服务于空间探测技术的发展。自空间电源发展至今，先后有化学能电源（蓄电池）、太阳能电源、同位素电源及空间核反应堆（空间堆）电源几种应用于空间探测任务，空间电源的选用与其使用环境、任务周期、比质量及成本控制等方面密切相关。然而，随着深空探测任务深度和广度的拓展，对空间电源的要求也越来越高，先进电源技术成为影响航天技术的发展乃至深空探测任务顺利进行的重要因素。

鉴于此，本文从我国深空探测的任务剖面出发，探讨我国在深空探测领域对先进电源技术的具体需求；根据不同任务的具体需求，对目前应用于深空探测领域的先进电源技术进行列举和分析，讨论不同电源技术在我国深空探测任务中可能发挥的重要作用；通过对先进电源技术的探讨和阐述，以期为我国深空探测电源技术的发展提供参考。

1 我国深空探测电源需求

月球的探测是人类进行深空探测的起点，我国的深空探测任务同样始于探月工程。目前，我国已经完成了月球探测任务“绕、落、回”三步走战略的前两步，实现了绕月探测、月面软着陆和月背巡视，第三步的月球采样返回任务也在紧张的组织实施中。根据我国深空探测任务规划，未来我国将有序开展月球极区探测、火星探测、小天体探测、木星和其它行星探测的深空探测任务，这给深空探测任务的空间电源系统带来重大挑战^[12]。

1.1 月球探测任务

我国探月四期任务瞄准2030年后在月球南极建立中国月球科研站的目标，先期开展极区探测。对电源

系统的关键性技术需求分别为：①不受低温环境影响：能在极区表面光照条件差、温度变化大（高温高达约+120℃，月夜储存温度低至约-190℃）的恶劣环境条件下正常工作；②可靠性高：能在执行复杂任务，多器组合运行的在轨关键阶段提供具有一定裕度的可靠电能；③寿命长：根据探月四期任务规划，月面探测器工作寿命普遍增加至5~8年，要求电源系统的工作寿命不小于8年；④质轻体小：由于运载能力和运载空间的约束，空间电源要在保证能源供应的前提下，尽可能质量轻、体积小。

1.2 火星探测任务

火星探测是人类深空探测的一大热点，迄今为止，人类共有37次火星探测任务取得成功。我国也在组织实施首次火星探测任务，首艘火星探测器计划于2020年发射。对于火星探测任务的电源系统来说，除了要具备工作寿命长、可靠性高、质轻体小和不受低温环境的影响的特点之外，还应具备不受火星表面光照条件和火星尘的影响的显著特点；这是因为火星表面太阳光照强度约为地球的43%，且受到火星表面大气的影响火星表面太阳光谱与AM0（Air Mass 0）光谱存在较大差异，因此电源系统要在这种光照条件正常工作；同时，电源系统还要保证在火星表面大量尘埃状态下和爆发尘暴的条件下仍能正常工作。

1.3 小天体探测任务

小天体探测主要指的是对小行星和彗星的探测，已成为深空探测领域另一备受关注的热点。小天体探测任务逐渐由“飞越探测”向“绕飞-附着-采样”直至“偏转-操控-利用”方向发展。美、欧、日先后完成了标志性的任务，如日本“隼鸟号”（Hayabusa）、欧洲“罗塞塔号”（Rosetta）及美国“黎明号”（Dawn）等。小天体探测的电源系统除具备工作寿命长（10年以上）、可靠性高（可为多种任务的执行提供电源保障）、不受光照条件和温度影响等特点外，还应具备输出功率大且可根据需求自由调整的显著特点，输出功率可达到数百瓦甚至数千瓦，为电推进负载提供足够的电能。

1.4 木星系探测任务

人类对木星的探测始于1972年发射的“先驱者10号”（Pioneer 10），1989年发射的“伽利略号”（Galileo）探测器和2011年发射的“朱诺号”（Juno）^[9]探测器分别于1995年和2016年抵达木星并对其进行环绕探测。我国计划在2030年前后对木星及其星系进行环绕探测。木星探测对空间电源的需求除了包括工作

寿命长（10年以上）、可靠性高（可为多种任务的执行提供电源保障）、不受光照条件（飞行轨道可能受到木星地影期的影响，且木星表面光照强度为地球的3.4%）和温度影响（温度低至 $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）等特点外，最显著特点为不受木星磁场辐射带中强于地球辐射带数千倍的高能粒子影响^[13]。

对比分析我国后续深空探测任务对空间电源系统的需求可以发现，随着我国深空探测深度的拓展，空间电源系统除了要具有寿命长、环境适应性好、可靠性高、体积小、质量轻的共性特点之外，还要具有其任务要求的独特性能，如：火星探测器要其电源能在火星尘埃和时常爆发的尘暴条件正常的特点，小天体探测器电源具备输出功率大且可根据需求自由调整的显著特点，木星探测电源具有不受木星磁场辐射带中强于地球辐射带数千倍的高能粒子影响的显著特点。

2 深空探测先进电源技术

2.1 空间电源技术概述

最初应用于空间的电源是移用其它应用领域的电源，如银锌电池等，只能在早期的地球卫星上执行功率需求小、任务周期短的空间任务；随着航天技术和卫星技术的发展，应用于空间领域的化学能电池、太阳能电源、放射性同位素电源以及空间堆电源都得到了不同程度的发展。

2.2 锂离子蓄电池

化学能电池是将电能以化学能的形式储存，并可以将化学能以电能的形式释放出来的电源装置^[14]。可分为一次性电池（如锰干电池、银锌电池、锂电池、锂氟化碳电池等）、二次可充电池（如镍镉电池、镍氢电池、铅酸电池及锂离子电池等）和燃料电池。其中，锂离子电池是便携式电子设备和电动装备产业崛起的关键，在航空航天领域也多有应用^[15-16]。

作为目前最先进的化学能电池，一次锂电池和二次锂离子蓄电池成为化学能电池领域研究人员关注的热点。一次锂电池可用于执行地球轨道附近任务周期较短的空间探测任务。目前，性能最佳的一次锂电池为锂氟化碳电池，理论上，它的比容量可达 $2\ 180\text{ Wh/kg}$ ，非常容易小型化和轻型化。此外，锂氟化碳电池放电平稳、工作范围宽、自放电低且储存寿命长，因此受到极大的关注^[17]。

二次锂离子蓄电池理论源于20世纪70年代的“摇椅电池”，由可自由嵌入/脱嵌锂离子的正负极材料、电解液、隔膜、外壳及安全绝缘部件组成^[18]。与其它二次电池相比，锂离子电池具有以下突出的优势：工作

电压高（锂离子电池单体的工作电压可达 $3.7\sim 3.8\text{ V}$ ，远高于镍-氢电池单体电压的 1.2 V ；较高的工作电压使得锂离子电池具有更高的功率密度，同时也能在相同体系电压下减少锂离子电池单体的使用数量，提高系统的一致性）、能量密度高（锂离子电池的质量能量密度和体积能量密度可达 150 Wh/kg 、 450 Wh/L ，约是镍-氢蓄电池的2倍，镍-镉蓄电池的3倍）、良好的储存寿命（搁置10年能量损失不大于10%）、循环寿命好（锂离子可以在电池正负极间可逆脱嵌，循环寿命可达1 200次以上，远远超过镍-氢电池）、工作温度范围广（能够在 $-25\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度下工作）、以及具有磁净化特点（不含磁性材料，满足某些探测器装置的磁净化要求）等优势，被认为是深空及星际探测最理想的空间储能电池^[19]。法国SATF公司在锂离子蓄电池方面研究较早，其产品至少被应用于54颗高轨道（GEO）通讯卫星；此外欧洲航天局（European Space Agency, ESA）发射的月球探测器“SMART-1”、火星探测器“火星快车”（Mars Express）；美国的火星探测器“机遇号”（Opportunity）、“勇气号”（Spirit）等深空探测器也装备有锂离子蓄电池。

然而，与镉-镍蓄电池相比，锂离子蓄电池在空间探测中的应用历史还较短，尚有大量关键技术需要在研究和实践中解决，集中体现在以下几个方面：①高比容正极材料，由于受到锂离子蓄电池正极材料比容量的限制，电池单次所蓄能量有限，难以独立执行任务周期较长的深空探测任务，需要与其它太阳能电源、同位素电源等空间电源系统组合方能用于执行长周期深空探测任务；②电池安全性，锂离子蓄电池对温度敏感，高温环境可能造成短路发生燃烧或爆炸；③荷电状态（SoC）参数确定，与其它电源（如太阳能电源）组合使用时，锂离子蓄电池处于长期搁置状态，一定的荷电状态（SoC）状态会对电池产生不可逆的损伤，必须对其SoC参数进行研究。因此，开发高比容正极材料、优化电池安全性及工程应用研究（如SoC状态等）成为锂离子蓄电池在深空探测应用的重要方向。

2.3 太阳能电源

太阳能电源主要指的是通过光电效应直接把光能转化成电能的装置，它具有不受星表昼夜光照条件的影响、工作寿命长、功率范围宽、可灵活布置且清洁环保的优势，是目前空间探测中应用最多的电源系统，占据航天器空间电源系统的绝大部分^[20]。

自1958年美国首次将太阳能电源系统应用于“先锋1号”（Vanguard I）人造卫星以来，历经了第1代晶体

硅太阳能电源（采用单晶或多晶硅为原料，具有原料丰富、技术成熟、成本较低的优势，但存在电池厚度大、效率低、抗辐照能力差的不足）、第2代薄膜太阳能电源（采用非晶硅、碲化镉为原料，具有质量轻、抗辐照性能好、成本低的优势，但还存在效率低、寿命短的不足）以及目前第3代聚光太阳能电源。第3代高效太阳能电源综合了第1、第2代太阳能电源的优点，弥补了第1代太阳能电源成本高、第2代薄膜电池转换效率低的不足，并兼具原料丰富、安全环保等特点，目前以三结砷化镓（GaAs）太阳电源为代表的聚光太阳能电源最大转换效率可达44.4%，量产效率达30%以上，已经逐渐取代硅太阳能电源，更高效的GaAs太阳能电源（四结GaAs电池，效率达47.1%）也正在研制中^[21]。

GaAs太阳能电源主要经历了GaAs基系单结、双结叠层、三结叠层的发展历程，目前GaAs太阳能电源主要为三结叠层GaAs^[22]。美国、苏联/俄罗斯等空间技术发达国家在太阳能电池的研发和应用方面走在了世界的前面。早在20世纪80年代，砷化镓太阳电池就被应用于苏联发射的“和平号”空间站上，总功率达10 kW，单位面积比功率达180 W/m²；美国1998年发射的空间技术验证宇宙飞船“深空1号”采用了第2代GaInP/GaAs高效双结聚光电池，效率可达19%；进入新世纪以来，美国的“凤凰号”（Phoenix）、“洞察号”（InSight）火星探测器，“朱诺号”木星探测器，欧洲Marvin火星探测器以及美国Dawn、OSIRIS-REx与日本Hayabusa小行星探测器均选用了太阳电池阵供电。我国的太阳能电池技术起步较晚，但是发展迅速快。中国国电集团公司的柔性GaAs薄膜电池效率达34.5%，国内航天用砷化镓效率约为32%。在我国已进行的深空探测任务中，探测器电源系统均采用“太阳电池阵+蓄电池组”的组合方式，从“嫦娥1号”使用的第1代单晶硅太阳电池片发展到“嫦娥4号”使用的第3代三结砷化镓太阳电池，太阳光电转换效率提升到30%。

从国外对太阳能电池的研制和应用可以看出，太阳能电池可以用于空间探测的大多数任务，如火星探测、小行星探测、木星探测等，但由于航天器在飞行过程中可能要经历变轨、外天体着陆、巡视、采样返回等多种任务，环境条件复杂（如从地球飞向木星过程中，光照条件、辐照环境、温度变化都非常剧烈，偏离或者超出一般太阳能电池服役条件，会造成太阳能电池性能下降或失效；火星表面光谱与AM0光谱存在较大差异，会造成太阳能电池转换效率下降等），给太阳能电源的应用带来极大的限制，因此只能应用于

部分木星内空间探测任务^[23]。

未来深空探测任务的多样化给太阳能电源系统提出了更高的要求，除要求其具备效率高、寿命长、工作温度范围宽、质量轻、体积小等特点之外，还应针对应用场景具备相应的性能特点。因此在深空探测领域太阳能电源还拥有广阔的发展空间。

针对我国后续空间任务，深空探测太阳能电源系统应集中开发以下几方面的关键技术：①开发宽温度和光强适应性、抗辐照的太阳电池阵，由于远离太阳，光照强度低、温度低，应针对性地开展低温低光强太阳能电池设计；②开发轻小型、智能化的电源控制装置，针对质量限制和深空中深远距离的带来的通信时延，应针对性地开展小型化、智能化研究；③开展高功率密度空间电源系统MPPT拓扑研究。

2.4 放射性同位素电池

在深空探测中，由于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，限制了锂离子蓄电池和太阳能电源使用，而空间核电源（放射性同位素电源、空间堆电源）具有不依赖太阳、自主产生能量、能量密度高、环境适应性强、工作寿命长、免维护等显著优势，被认为是深空探测任务的理想能源。

2.4.1 钷-238同位素电源的特点

同位素电源是利用各种能量转换方式将同位素衰变产生的热能转换成电能的电源装置，其中温差型同位素电源技术最为成熟。由于钷-238同位素具有半衰期长（87.7年）、比热功率较高（0.56 W/g）及无需厚重辐射屏蔽（ α 衰变）等特性，钷-238同位素电源（Radioisotope Thermoelectric Generator, RTG），简称钷-238 RTG，成为远日、背日等深空探测任务中1千瓦及以下电能供应的首要甚至唯一选择。图2为钷-238电源的基本结构示意图，主要由钷-238放射性同位素热源（Radioisotope Heat Unit, RHU）、温差电换能

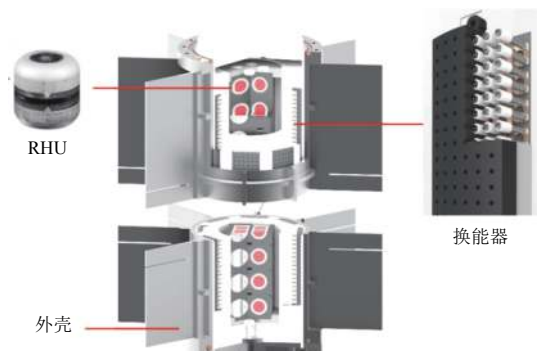


图2 RTG基本结构

Fig. 2 Basic structure of RTG

器和外壳3部分构成。其中钷-238 RHU是将放射性同位素钷-238衰变过程中释放的能量以热量形式收集起来的装置,由放射性同位素芯块和包壳构成,是钷-238电源“心脏”和能量之源;温差电换能器可将衰变热能转换成电能,由半导体温差电材料制成,是将热能转换成电能的核心部件;电源外壳(包括散热装置)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^[24]。

2.4.2 钷-238电源国内外研究现状

自19世纪50—60年代人类开展深空探测以来,钷-238 RHU/RTG已经被广泛应用于空间探测任务中。其中,钷-238 RHU既可以单独使用为探测器长期保温,又可作为能量之源制成钷-238 RTG为空间探测器长期供电,被誉为是深空探测装备的“生命之源”。在钷-238 RHU/RTG应用方面,美国走在了世界的最前沿。迄今为止,美国在空间探测领域使用了超过200个钷-238 RHU,并在发射的26艘空间探测器中装备了47个钷-238 RTG;截止到2015年7月,装备有钷-238 RTG电源(工作时长达40余年)的“旅行者1号”(Voyager 1,于1977年9月5日发射)外太阳系探测器,访过木星及土星后,已经飞到了太阳系边缘,仍能保持工作状态,充分说明了钷-238 RTG在空间探测任务中应用的可靠性。

钷-238 RTG发展至今,历经了RTG、MHW (Multihundred Watt)-RTG、GPHS (General Purpose Heat Source)-RTG以及MM (Multi-mission)-RTG几代。随着深空探测任务对电源功率需求的增大,钷-238 RHU的热功率和结构也随之发生重大变化;RHU的结构从单体结构变为模块化结构,输出热功率由数十瓦增加到数千瓦;同时,热电换能器的效率也随着钷-238 RTG研究的深入而不断增加,从初始的4%左右增加到了6.7%,因而钷-238 RTG的输出电功率从最初的2.7 W增至300 W,功率密度从约1.22 W/kg提高到5.36 W/kg^[25]。以美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)为代表所开发的新一代高效钷-238 RTG (Enhanced Multi-Mission RTG, eMMRTG)采用方钴矿材料、宽温域器件,热电转换效率大于7.5%,效率较“好奇号”(Curiosity)提高了24%,有望应用于“新疆界计划”的最新深空探测任务^[26]。俄罗斯的空间核电源研究主要集中于空间堆电源领域,在钷-238 RTG方面研究较少。基于任务对长工作寿命电源系统的需求,俄罗斯在1996年发射的“火星96”(Mars 96)火星探测器中采用4个钷-238 RTG,

但由于任务失败未在轨运行。我国在“嫦娥4号”使用了中俄合作研制的钷-238 RHU和RTG,实现人类首次在月背着陆和巡视勘察,帮助着陆器和巡视器安全渡月夜并成功唤醒;截止到2019年12月21日,在钷-238同位素热源和同位素电源的帮助下,“嫦娥4号”自主唤醒进入第13月昼工作期。

2.4.3 影响钷-238 RTG应用的关键因素

基于钷-238 RTG的发电原理及系统组成,结合其国内外发展和应用情况,应着重考虑钷-238 RTG在安全性、功率密度、转换效率、可靠性等方面的问题。钷-238 RTG在研制、生产及应用过程中的安全主要在于钷-238 RHU的安全,其原因是钷-238 RHU由极毒放射性同位素钷-238构成,它的安全是RTG安全的基础和前提条件^[27-28],功率密度与钷-238 RTG各个组成部分的质量、体积等参数指标密切相关,是评价钷-238 RTG在深空探测设备中适用性的综合指标;高转换效率的换能器是研制高效钷-238 RTG的关键,在节省昂贵放射性同位素原料和延长RHU使用寿命等方面起着决定性作用^[29],具体见下。

1) 安全性是钷-238 RHU/RTG的应用基础和前提

由于钷-238 RHU/RTG固有的放射性,装载钷-238 RHU/RTG的航天器一旦发生事故,有可能对地球生物圈带来极大的危害,如美国1964年发射失败的Transit-5BN-3卫星在再入大气层过程中燃烧,其装备的SNAP-9A钷-238 RTG将携带的17 000 Ci的金属钷燃料释放到大气层,造成严重污染。因此保证在研制、贮存、运输、发射、在轨运行及废弃处置等全生命周期的正常和事故环境下的安全性是钷-238 RHU/RTG应用的基础和前提。

为了保证钷-238 RHU/RTG的应用安全,美国和俄罗斯均制定了空间核能应用相关的安全政策、安全要求以及安全准则等,其中包含大量钷-238 RHU的安全性试验,而且在空间探测器发射前根据安全性试验内容进行大量安全性试验。美国重点开展了以下安全性试验项目包括:火箭爆炸冲击试验(模拟火箭发射阶段火箭爆炸冲击波对钷-238 RHU/RTG产生的冲击的试验)、火箭推进剂燃烧试验(模拟火箭发射阶段火箭爆炸,钷-238 RHU/RTG暴露在火箭推进剂燃烧环境中的试验)、高速碎片撞击试验(模拟火箭发射阶段火箭爆炸产生的碎片对钷-238 RHU/RTG可能产生撞击的试验)、再入热试验(模拟火箭发射失败,钷-238 RHU/RTG高速再入稠密大气层的空气动力学高温烧蚀试验)、高速撞击试验(模拟火箭发射失败,钷-238

RHU/RTG再入大气层在高温高速状态撞击地面的试验)以及海水腐蚀试验(模拟火箭发射失败,钷-238 RHU/RTG掉入深海同时经受高外压和海水腐蚀的试验)。

自1978年苏联COSMOS 954时间后,世界各国更加关注空间核动力源的应用安全。联合国大会于1992年通过了《关于在外层空间使用核动力源的原则》,对有关国际权利、技术见解、利用责任和损失赔偿等问题做出规定;此外,2009年联合国外层空间委员会与国际原子能机构制定的《外层空间核动力源应用的安全框架》为各国提供了相关的安全标准和技术指南^[30-31]。

2) 功率密度是影响钷-238电源质量、体积的关键参数

功率密度是评价钷-238电源性能的综合性指标,基于对钷-238电源结构的分析,钷-238 RHU研制技术和温差电转换技术均影响钷-238电源的功率密度。

钷-238 RHU研制技术包括钷-238 RHU源芯芯块的选择、芯块密度的确定、包壳结构与材料的选取、透氦阻钷功能的实现几个方面。其中,芯块原料的材料类型和理化形式影响源芯的密度和尺寸,进而影响RTG的功率密度;包壳材料类型决定RHU包壳的结构及厚度,进而影响RTG功率密度^[32]。温差电转换技术包括温差电材料技术、温差电单体连接技术及模块集成技术。

3) 转换效率是先进钷-238电源研制的关键

作为放射性同位素电源研制的关键技术之一,热电换能器的转换效率一直备受研究人员的关注^[33-34]。转换效率不但对电源的功率密度具有重要影响,还直接影响放射性同位素衰变热的利用率,决定节省昂贵放射性同位素原料的用量;此外,高效热电换能装置在延长RHU使用寿命方面也起着决定性作用。

热电换能器的转换效率主要是由热电转换材料的性质决定的。按使用温度划分,热电材料可分为低温、中温和高温热电材料。由于放射性同位素原料高昂的价格和供应量的限制,自20世纪50—60年代开始,美国一直致力于开发高效热电转换材料。美国首先采用碲化铅、碲化锗TAGS等材料开展RTG换能器的研制工作,转换效率在4%左右。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(SiGe)材料热电转换模块,其最高热电转换效率达到6.6%。在最新的报道中,美国将采用方钴矿热电材料研制转换效率达7.5%以上的钷-238电源,并将该电

源应用于最新空间探测任务。

除高效热电材料的开发之外,开发先进的温差电单体连接技术、模块集成技术以及高性能保温材料在提高钷-238电源转换效率方面起到重要作用。

4) 可靠性是钷-238电源在恶劣条件下工作的保证在深空探测任务中,钷-238电源要经历储存、运输、发射、在轨、星表工作等多个阶段,每个任务阶段环境条件(光照条件、温度条件、辐射条件等)不同,因此在电源装置应用之前,必须开展环境与可靠性试验对其在各个阶段环境条件下的工作状态进行评价,发现电源的薄弱环节并采取针对性的设计和工艺改进等措施来提高环境适应性和可靠性,以保障电源在全寿命周期内能够正常工作。美国钷-238电源所进行的环境与可靠性试验包括:温差电单体材料性能测试试验、温差电模块的环境适应性和可靠性、全模型温差电组件工程单元飞行验收(Flight Acceptance)试验、电源工程单元(电模拟)整体研制试验、电源质量鉴定件鉴定级试验及电源飞行件验收级试验^[35-37]。

2.4.4 钷-238电源的应用限制及发展建议

钷-238 RHU/RTG能够在恶劣环境下长时间自持运行,既可以用来发电又可以用来保温,是深空探测任务必不可少的能源装备。然而,由于其输出电功率较小(不大于500 W),应用于对电源功率需求较大的空间探测器时还有很大的局限性。此外,钷-238电源的研制生产又严重受限于钷-238原料。因此,为适应未来更为深远的深空探测任务的需求,应集中开发以下几方面的关键技术:①大力发展钷-238原料生产能力,钷-238原料是钷-238电源研制、生产及应用的前提和重要保障;②开展大功率模块化热源研制技术,大功率模块化热源是研制钷-238电源的技术前提;③提高高性能热电材料的研制能力,开发高性能热电材料是提高热电转换装置同位素衰变热利用率的一个有效途径,是开发高功率密度高可靠性钷-238电源的重要举措;④开发高效热电转换技术,除提高热电材料性能外,开发高效热电转换技术也是提高同位素衰变热利用率的重要发展方向,如美国以动态斯特林转换方式开发的斯特林同位素电源(SRTG),可将同位素衰变热利用率提高到25%以上。

2.5 空间堆电源

与钷-238电池相比,空间堆电源具有输出电功率大、输出功率可调的显著特点,可应用于电功率需求在千瓦级及以上的深空探测器。

2.5.1 空间堆的特点及分类

空间堆电源是指运行于外层空间的核反应堆电

源,是将可控链式核反应产生的热量通过转换系统用来发电的装置,具有能量密度高、不依赖太阳、输出功率可调范围大且迅速、环境适应性强等优点,能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、功率需求多变或者难以获取太阳能且环境条件恶劣的空间任务,是大功率需求深空探测器不可替代的电源系统^[38]。

按照功率划分可分为小型(千瓦)、中型(几千瓦到几十千瓦)、较大型(百千瓦级)和大型(兆瓦级)空间堆。按热电转换系统划分为静态转换和动态转换两大类,其主要热电转换方式如图3所示。

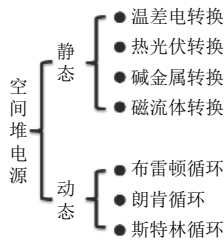


图3 空间堆电源

Fig. 3 Classification of space power system

2.5.2 空间堆电源国外研究现状

苏联/俄罗斯、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。与美国集中发展钷-238电源不同,苏联/俄罗斯在空间核电源方面的研究主要集中于空间堆电源,共成功研发4种型号,在轨运行的2种典型空间堆电源分别为采用温差电转换的BUK型空间堆电源和采用热离子转换的TOPAZ-1型空间堆电源。截止到1989年,在其空间任务中共发射了35个空间堆电源(33个BUK型、2个TOPAZ-1型)。BUK型空间堆电源采用铀钚快堆,转换方式为温差电转换,电功率约3 kW,最长任务持续时间135 d; TOPAZ-1型采用堆内多节热离子转换方式,电功率约7 kW,发射的2颗TOPAZ-1型空间堆电源工作时长分别为142和342 d^[39]。此外,苏联/俄罗斯对采用堆内单节热离子转换方式的TOPAZ-2型空间堆电源进行了研究,其设计电功率4.5~5.5 kW,设计寿命1.5~3年。根据俄罗斯2008年公布的《2020年前及以后俄罗斯联邦在空间活动领域政策的原则》,俄罗斯将开发转换效率可达10%以上的新型热离子转换器,能为空间核动力飞行器提供1MW的电输出^[40]。此外,俄罗斯还进行了兆瓦级气体布雷顿循环空间堆电源技术的开发工作,目前已完成了空间堆电源初步设计、燃料元件入堆考验等工作。

美国对空间堆的研究始于1954年美国空军的“诱骗

者”计划,1965年4月3日发射了美国唯一一个发射的空间堆电源SNAP-10A,设计功率500 W,寿命1年,是人类发射的第一个空间堆电源系统^[41]。由于热离子反应堆运动部件最少、功率范围大、冗余性高,可填补数千瓦到兆瓦之间的功率空挡,因此美国在SNAP计划的同时还开展了热离子反应堆的研发^[42]。SP-100计划是在1983年战略防御倡议计划的背景下提出的,其显著特点是热电转换系统位于反应堆的外部,可以根据具体用途和功率需求变换使用不同的热电转换方式^[43]。为解决SP-100计划概念选择阶段热离子空间堆存在的技术问题,20世纪90年代从俄罗斯购买了TOPAZ-2型空间堆电源进行测试和评价,设计出功率为40 kW,寿命为10年的SPACE-R空间堆电源^[39]。为了促进核推进和空间堆技术的开发,2002年美国公布了太空核能新计划——“普罗米修斯”计划,计划研制一种利用气冷快堆与直接布雷顿循环技术的空间堆电源,设计功率200 kW,寿命为15~20年,但由于技术复杂度过高于2006年被终止。2006年4月,美国启动预期成本较低的先进星体表面裂变反应堆电源系统(AFSPS)的开发工作。由于美国Sunpower公司在先进斯特林转换装置方面研究的突破,美国决定将斯特林转换装置应用于星体表面裂变反应堆电源(FSP),重点研发型号为40 kW,应用定位为月球或火星表面人类居住地^[44]。此外,美国还积极开发kW和10 kW级空间堆电源,以填补同位素电源(< 1 kW)与40 kW之间的功率空挡,该kW和10 kW级空间堆电源采用钠热管冷却,斯特林热电转换方式,设计指标分别为电功率1 kW,转换效率28.57%,总质量390 kg;电功率10 kW,转换效率25%,系统质量1 800 kg^[45]。

2.5.3 影响空间堆应用的关键技术

与RTG类似,空间堆电源主要包括反应堆(能量来源)、热电转换系统、散热系统及阴影屏蔽几个部分。其中反应堆部分主要包括燃料选型、堆芯冷却技术以及反应堆控制技术几个方面。

1) 反应堆技术

空间堆是空间堆电源能源供应的源头,通过中子诱发持续的链式反应释放能量。不同于在地面上的应用,应用于空间探测任务的反应堆在质量、体积、辐射、输出性能等方面均有一定的限制,因此必须对影响反应堆技术的因素进行考虑。由于快中子增殖反应堆(简称快堆)具有结构紧凑、体积小、质量轻、堆芯温度高有利于提高空间堆效率的特点,因此在美国公布的27个FSP中有22个选用快堆为空间堆堆型;应用于空间堆的燃料主要有UN燃料和UO₂燃料两种,

UN燃料铀含量高、热物理性能好，很适用于空间堆电源，但其加工难度较高； UO_2 燃料高温性能好，制造工艺成熟，但其热导率较差；反应堆冷却技术主要包括碱金属热管冷却、液态金属回路冷却及气体冷却3种；反应堆控制技术主要有控制鼓、控制鼓加安全棒、滑移反射层、滑移反射层加安全棒几种^[46]。

2) 转换技术

目前应用于空间堆电源的转换技术主要有温差电技术、热离子转换技术、布雷顿循环转换技术以及斯特林转换技术。

温差电转换系统结构简单、技术成熟在BUK反应堆电源已经安全运行3 000 h以上，具有工作范围宽、适用性强、可靠性高的特点，但其转换效率较低（BUK反应堆电源3%），目前研究人员多关注于其它高效转换技术^[46]。热离子转换技术是利用金属高温下发射电子这一现象将热能直接转换为电能的技术，是空间堆电源的重要技术路线之一，具有体积小、结构紧凑、比质量小、无活动部件、可靠性高等优点。根据理论分析，热离子转换效率可达35%，实验室获得的效率达到25%^[47]。热离子发电元件是热离子反应堆热电转换的关键器件，决定着空间热离子反应堆电源的总体性能。热离子发电元件可分为单节热离子燃料元件、多节热离子燃料元件、单通道多节热离子燃料元件几个类型。其中单通道多节TFE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。布雷顿循环技术是以气体为工质的热力循环，与燃气轮机原理类似，转换效率可达25%，地面技术较为成熟，但尺寸小、寿命长、耐高温且转速高的布雷顿循环涡轮机研制较为困难^[48]。斯特林转换技术是利用工质加热膨胀，带动线性交流发电机发电的一种热电转换技术，具有转换效率高（25%以上）的显著特点，在深空探测领域具有独特的竞争力^[49]。

3) 安全与可靠性技术

尽管空间堆电源在国家航空、航天技术发展领域具有巨大的带动能力，但是如果发生事故可能给环境

和人类带来巨大危害，因此空间堆电源的安全性与可靠性备受研究人员和公众关注，形成了相应的国际规则^[50]。

空间堆电源安全的主要目标是保护地球生物圈内的人与环境不受放射性物质的危害。在空间堆的地面阶段、发射准备阶段、发射部署阶段及可能产生的废弃处理情况下均要保证其安全性，实现方式包括轨道足够高、轨道寿命足够长、到达轨道前正常状态下不启动、发生事故或返回时不会达到临界状态等几个方面^[51]。

空间堆电源的可靠性是保障产品指标的前提，是实现规定功能重要保障。产品的可靠性设计应从可靠性建模、可靠性预计、可靠性分配、故障分析几个方面来考虑。产品的可靠性评价从可靠性试验、评价方法、试验数据分析几个方面来综合评价空间堆的可靠性。俄罗斯在空间堆电源可靠性评价中采用的评价方法包括无故障工作概率定量评价方法、随机故障时无故障工作概率定量评价方法和基于试验结果统计分析库的故障发生频率信息。

2.5.4 空间堆的应用限制及发展建议

空间堆电源技术存在技术难度大、技术流程复杂、开发周期长、成本高等不足，在深空探测领域受到严重限制。然而，空间堆电源又是未来执行大功率需求空间探测任务不可或缺的电源系统。因此，应在加强空间堆电源以下几个方面的研制工作：①先进快堆设计优化；②开发高效转换技术；③完善我国空间堆电源安全和可靠性评价方法和评价技术。

2.6 空间探测先进电源系统对比

从表1空间探测领域电源系统对比中可以看出，锂离子蓄电池一般与太阳能电源结合使用，可用于具有一定光照条件的空间探测；钷-238 RTG因具备性能稳定、寿命长、不受环境影响等因素，能执行任务周期在10年以上的空间探测任务；针对大功率空间探测装备，开发空间堆电源系统是保证未来复杂任务深空探测顺利进行的有效途径。

表1 空间探测领域电源系统对比

Table 1 Comparison of advanced power source technology for deep space exploration

电源形式	优势	不足	适用范围
锂离子蓄电池	高效储能，长期使用	不能单独执行长期空间探测任务	短期任务（一个月内）或与太阳能电池联用执行长期任务
GaAs太阳能电源	利用阳光，功率范围宽	易受环境条件（光照、辐照、温度）影响	可用于木星以内具有一定光照条件的空间探测
钷-238电源	不受环境影响、寿命长、可靠性高	功率较小（1 kW以下）	长期（10年以上）深空探测任务，
空间堆电源	输出功率大，功率可调	技术难度大、成熟度不高	针对大功率空间探测装备应用

3 结 论

随着各种高精尖航天技术和深空探测技术的发展,我国将不断加快向更远深空迈进的步伐。由于锂离子蓄电池受工作寿命的限制,在深空探测任务中应与其它电源系统(太阳能电源、钷-238电源)结合应用;太阳能电源系统已被应用于多种深空探测任务中,但其在应用中容易受到光照、辐射、尘埃(星球表面可能存在的)及温度条件的制约,应用范围受限;空间堆电源具有输出功率大且可快速调节的显著特点,是大功率需求的复杂深空探测任务不可替代的电源系统;由于不受外界环境条件(光照、低温、辐射等)的影响,钷-238电源被认为是目前小功率无人深空探测的理想电源。因此,大力发展钷-238同位素电源技术和空间堆电源技术是我国后续深空探测任务有序进行的重要保障,是推进我国航天科技技术和天体资源利用技术发展的关键支撑,是提升我国在空间技术领域与创新技术版图中话语权的关键环节。

参 考 文 献

- [1] AGHA R. Space exploration-surgical insights and future perspectives[J]. *International Journal of Surgery*, 2005, 3(4): 263-267.
- [2] EHRENFREUND P, MCKAY C, RUMMEL J D, et al. Toward a global space exploration program: a stepping stone approach[J]. *Advances in Space Research*, 2012, 49(1): 2-48.
- [3] TOM S. Space exploration resources[J]. *MAC Newsletter*, 2011, 38(3): 1-10.
- [4] 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 P J, PENG J. Deep space exploration and its prospect in China[J]. *Engineering Science*, 2006, 8(10): 13-18.
- [5] 申振荣, 张伍, 贾阳, 等. 嫦娥三号巡视器及其技术特点分析[J]. *航天器工程*, 2015, 24(5): 8-13.
SHEN Z R, ZHANG W, JIA Y, et al. System design and technical characteristics analysis of Chang'e-3 lunar rover[J]. *Spacecraft Engineering*, 2015, 24(5): 8-13.
- [6] CARDELL G, ULLOA-SEVERINO A, GROSS M. The design and operation of the Dawn power system[C]//Proceedings of the 10th annual International Energy Conversion Engineering Conference. Washington D. C.: AIAA, 2012: 414-420.
- [7] REYNIER P. Survey of aerodynamics and aerothermodynamics efforts carried out in the frame of Mars exploration projects[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2014, 70: 1-27.
- [8] STARR S O, MUSCATELLO A C. Mars in situ resource utilization: a review[J]. *Planetary and Space Science*, 2020, 182: 104824.
- [9] YOUNG R E. The Galileo probe: how it has changed our understanding of Jupiter[J]. *New Astronomy Reviews*, 2003, 47(1): 1-51.
- [10] EL-GENK M S. Deployment history and design considerations for space reactor power systems[J]. *Acta Astronautica*, 2009, 64(9): 833-849.
- [11] WARMANN E C, ESPINET-GONZALEZ P, VAIDYA N, et al. An ultralight concentrator photovoltaic system for space solar power harvesting[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 170: 443-451.
- [12] 新华. 中国未来将实施四次重大深空探测任务[J]. *太空探索*, 2017(3): 5-5.
XIN H. China will carry out four major deep-space exploration missions in the future[J]. *Space Exploration*, 2017(3): 5-5.
- [13] 王建昭, 田岱, 张庆祥, 等. 木星环绕探测任务中的内带电风险评估[J]. *深空探测学报*, 2017, 4(6): 564-570.
WANG J Z, TIAN D, ZHANG Q X, et al. Internal charging evaluation in Jupiter exploration mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(6): 564-570.
- [14] LAZZARI M, SCROSATI B. Rechargeable lithium batteries with non-metal electrodes[J]. *J. Electrochem. Soc.*, 1980, 127: 773-776.
- [15] DAN P, MENERITSKY E, GERONOV Y, et al. More details on the new LiMnO₂ rechargeable battery technology developed at Tadiran[J]. *J. Power Sources*, 1997, 54: 443-447.
- [16] MIZUSHIMA K, JONES P C, WISEMAN P J, et al. Li_xCoO₂ (0 < x < 1): a new cathode material for batteries of high energy density[J]. *Mater. Res. Bull.*, 1980, 15: 783-789.
- [17] NAKAJIMA T, HAGIWARA R, MORIYA K, et al. Discharge characteristics of poly (carbon monofluoride) prepared from the residual carbon obtained by thermal decomposition of poly (dicarbon monofluoride) and graphite oxide[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 1986, 133(9): 1761-1766.
- [18] HUTZENLAUB T, THIELE S, ZENGERLE R, et al. Three-dimensional reconstruction of a LiCoO₂ Li-ion battery cathode[J]. *Electrochim. Acta*, 2012, 15: A33-A36.
- [19] TARASCON J M, ARMAND M. Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries[J]. *Nature*, 2001, 414: 359-367.
- [20] JONES P A, SPENCE B R. Spacecraft solar array technology trends[J]. *Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2011, 26(8): 17-28.
- [21] Best research-cell efficiency chart[R]. [S. l.]: National Renewable Energy Laboratory, <http://nrel.gov/pv/cell-efficiency.html#>.
- [22] STELLA P, MUELLER R, DAVIS G, et al. The Environmental Performance at Low Intensity, Low Temperature (LILT) of High Efficiency Triple Junction Solar Cells[C]//Proceedings of the 2nd IECEC. Providence, RI, USA: IECEC, 2004.
- [23] 张文佳, 刘冶钢, 张晓峰, 等. 木星环绕探测器电源系统设计研究[J]. *航天器工程*, 2019, 28(02): 97-103.
ZHANG W J, LIU Z G, ZHANG X F, et al. Research of power system design of Jupiter orbiting probe[J]. *Spacecraft Engineering*, 2019, 28(02): 97-103.
- [24] LANGE R G, CARROLL W P. Review of recent advances of radioisotope power systems[J]. *Energy Conversion and Management*, 2008(49): 393-401.
- [25] O'BRIEN R C. Radioisotope and nuclear technologies for space exploration[D]. Leicester: Physics Research In the Department of Physics Astronomy University of Leicester, 2010.
- [26] CAILLAT T, HUANG C K, CHENG B, et al. Advanced Thermoelectric materials for radioisotope thermoelectric generators[C]//25th Symposium on Space Nuclear Power. Albuquerque, NM: [s.n.], 2008.
- [27] GEORGE T G. General Purpose Heat Source safety verification test

- program: edge-on flyer plate tests: LA-10872-MS[R]. New Mexico: Los Alamos National Laboratory, 1987.
- [28] GEORGE T G, TATE R E, AXLER K M. General purpose development safety verification test program: bullet/fragment test series: LA-1036-MS[R]. 1985.
- [29] U. S. Congress. Office of technology assessment, power sources for remote arctic applications: OTA-BP-ETI 129[R]. USA: U. S. Congress, 1994.
- [30] IAEA. Safety framework for nuclear power source applications in outer space: A/AC. 105/934[R]. Vienna: IAEA, 2009.
- [31] SUMMERER L, WILCOX R E, BECHTEL R. The international safety framework for nuclear power source applications in outer space-useful and substantial guidance[J]. *Acta Astronautica*, 2015, 111(1): 89-101.
- [32] Cassini RTG program final technical report: No. RR18[R]. USA: Department of Energy, 1998.
- [33] LIAO C N, LEE C H, CHEN W J. Effect of interfacial compound formation on contact resistivity of soldered junctions between bismuth telluride-based thermoelements and copper[J]. *Electrochem. Solid-state Lett.*, 2007, 10(9): 23-25.
- [34] CAILLAT T, SAKAMOTO J, JEWELL A, et al. Status of skutterudite-based segmented thermoelectric technology components development at JPL[C]//23rd Symposium on Space Nuclear Power and Propulsion STAIF 2006. USA: JPL, 2006.
- [35] 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, California: IECEC, 2006.
- [36] Final report for the general purpose heat source-radioisotope thermoelectric generator program: FESP-7209[R]. Philadelphia, USA: General Electric Company, 1991.
- [37] 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. San Jose, CA: [s.n.], 2013.
- [38] NASA. NASA technology roadmaps-TA3: space power and energy source[R]. USA: NASA Technical Report. 2015.
- [39] STANCULESCU A. The role of nuclear power and nuclear propulsion in the peaceful exploration of space[R]. Vienna: IAEA, 2005.
- [40] ANDREEV P V, GULEVICH A V. Physical and engineering potential of thermionics for advanced projects of sub-megawatt SNPS[C]//Nuclear and Emerging Technologies for space CNETS-2012. USA: ANS, 2012.
- [41] STAUB D W. SNAP programs: summary report: AI-AEC-13068[R]. Canoga Park, Calif: Atomics International Div., 1973.
- [42] DIX G P, VOSS S S. Pied piper: a history overview of the US space nuclear reactor program[M]. Malabar, Florida: Orbit Book Company, Inc. 1985.
- [43] DEMUTH S F. SP-100 space reactor design[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2003, 42(3): 323-359.
- [44] SHALTENS R K, WONG W A. Advanced stirling technology develop at NASA Glenn research center[C]//NASA Science Technology Conference. Maryland: NASA, 2007.
- [45] 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.
- SU Z T, YANG J C, KE G T. Space nuclear power[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2016.
- [46] ANDERSON R V, ATKINS D F, BOST D S, et al. Power plant system assessment-final report[R]. USA: Technical Report. SP-100 Program. NASA, 1983.
- [47] AUGUST W C, WILLIAM C M. Irradiation effects on fuels for space reactors[M]. Malabar, Fl: Orbit Book Company, 1985.
- [48] HARTY R B, MASON L S. 100 kW Lunar/Marr surface power utilizing the SP-100 reactor with dynamic conversion[C]//26th Intersociety Energy Conversion Engineering Conf.. Boston: [s.n.], 1991.
- [49] GIBSON M A, MASON L, BOWMAN C. Development of NASA's small fission power system for science and human exploration[C]//12th International Energy Conversion Engineering Conference. Cleveland: [s.n.], 2014.
- [50] POSTON D. Space nuclear reactor engineering: LA-UR-17-21903[R]. Los Alamos, USA: [s.n.], 2017.
- [51] United Nations. Principles relevant to the use of nuclear power sources in outer space[C]//85th Plenary Meeting. VIENNA: United Nations, 1992.

作者简介:

牛厂磊(1985-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向: 放射性同位素技术应用及相关功能材料研究。

通讯地址: 北京市房山区新镇中国原子能科学研究院(102413)

电话: (010)69357704

E-mail: nncell01@126.com

罗志福(1962-), 男, 研究员, 主要研究方向: 放射性同位素技术。

本文通讯作者:

通讯地址: 北京市275信箱12分箱(102413)

电话: (010)69357795

E-mail: Luozhifu1001@aliyun.com

Advanced Power Source Technology of Deep Space Exploration

NIU Changlei¹, LUO Zhifu¹, LEI Yingjun², WANG Wenqiang³, ZHENG Jianjie⁴, QIAO Xuerong⁵,
LUO Hongyi¹, HU Wenjun⁶, ZHONG Wuye¹

(1. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China; 2. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;
3. Department of Physical Power, Shanghai Institute of Space Power, Shanghai 200245, China;
4. Tianjin Space Power Technology Co., Ltd, Tianjin 300384, China; 5. Tianjin Institute of Power Sources, Tianjing 222500, China;
6. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

Abstract: Advanced power supply technology is the prerequisite for deep space exploration mission. Based on the requirements of power supply system of China's follow-up deep space exploration missions, such as the explorations of polar region of Lunar, small celestial bodies, Mars, Jupiter, and so on, the advanced power source technologies for deep space exploration are reviewed, including the chemical battery, solar cell, radioisotope thermoelectric generator (RTG) and space nuclear reactor power. According to the requirements of power supply system of deep space exploration, the remarkable feature, brief history, application limits and development proposals of Lithium ions battery, solar cell, Pu-238 RTG and space nuclear reactor power are presented, and focusing on the analysis of the key technology, practical application, application prospects of Pu-238 RTG and space nuclear reactor power, providing a reference for long-term development of advanced power source technology of deep space exploration.

Keywords: deep space exploration; advanced energy; solar power system; Lithium ions battery; Plutonium-238 RTG; space nuclear reactor power

Highlights:

- The requirements of power supply system of China's subsequent deep space exploration missions are analyzed.
- The advanced power source technologies of deep space exploration missions are reviewed.
- The Pu-238 RTG and space nuclear reactor power is analyzed in detail.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 朱恬]