

放射性同位素电池在月球上

蔡善钰



1969年7月20日“阿波罗-11号”宇航员阿姆斯特朗激动地打开着陆舱门，缓缓走下舷梯，踏上宁静而又神秘的月球，首次留下了人类的足印。在这一激动人心而又具有里程碑意义的时刻，对太空人来说，只是迈出了一小步，可对整个人类来说却是跨出了一大步，实现了人类千百年来登月的梦想，也开创了人类从地球登上另一颗星球的历史。

1957年10月4日前苏联发射成功第一颗人造地球卫星Sputnik-1号，揭开了太空时代的序幕。紧接着，苏联宇航员加加林于1961年4月12日乘坐载人飞船东方-1号，实现了人类首次太空飞行。面对在空间技术方面存在的不小差距和承受的巨大压力，时任美国总统的肯尼迪决心实施一项宏大的登月计划，即后来所谓的“阿波罗计划”（阿波罗在古希腊神话中意为“太阳神”），旨在十年内把人送上月球，并安全返回。该计划历时11年，耗资250亿美元，直接参与的工作人员多达420万。经过几次无人探月飞船飞行之后，接连发射了7艘载人飞船，自“阿波罗-11号”至“阿波罗-17号”（其中“阿波罗-13号”发射失败）。先后有6批计21名宇航员参与了登月飞行。其中有12人踏上月球，带回了381kg月球岩石和土样，留下了3辆月球车，安置了一座“早期月面科学试验站”和5座“月面科学试验站”。后者各有一台放射性同位素电池供电，分别带动5台仪器工作，在设计寿命为一年多

的时间内把测试数据源源不断地传回地球。

在月球上为什么要使用这种放射性同位素电池呢？他们又是怎样工作的呢？

从现有获得的知识表明，月球上有着漫长的黑夜（相当于地球的14天），又昼夜温差悬殊，白天温度高达120℃，夜间温度降至零下180℃。月球上没有空气，既不能传导热量，也不能传播声音。为了了解月球及其环境，需要利用多种仪器长期地、自动地观察，这就需要解决能源的问题。显而易见，在如此严峻的环境中化学电池是不能工作的；而太阳能电池必须有日照时方能发电。在这种情况下，放射性同位素电池显示出独特的优越性：它无需依靠外来能源而能长期地、自持地、可靠地提供动力，且对环境具有良好的适应能力和生存能力。

放射性同位素电池(以下简称同位素电池)是一种新型的电池。它是利用放射性同位素衰变时放射出来的高速带电粒子(如 α 粒子、 β 粒子)或 γ 光子与物质相互作用，射线的动能被阻止或吸收后转变为热能，再通过换能器转变为电能的一种装置。图1展示了原型同位素电池的结构。其中心部分是用放射性同位素制成的热源，外围紧贴着换能器，当热量通过换能器时，一部分热转变为电能而输出，

实验和宇宙观测结果。

冰立方能够同时看到北半球和南半球的天空，因为除了那些能量最高的中微子，地球对其他中微子来说几乎是透明的。读者还可把“冰立方”想象成4800台独立工作的计算机，它们时刻向表面传输着它们探测到的光信号。其传感器里的时钟彼此的误差始终控制在纳秒以内。这些信息使得科学家可以重建中微子事件，并且可以推算出它们的到达方向和能量。从2005年南极的夏季开始，科学家在AMANDA的基础上开始建造冰立方，2006年2月

在建造过程中首次探测到了大气中微子事件，按照计划，冰立方将于2012年全部完工。

一旦这台探测器完全正式投入运行，它可能在未来10年内记录下百万次以上的宇宙深处高能中微子事件。这将为科学家们提供一个巨大的数据库，利用这个中微子源，分析一些剧烈的天体事件，人们对宇宙起源和演化的认识必将迈上一个新台阶；此外，冰立方中微子望远镜也将为粒子物理学谱写崭新的篇章。

(北京天文馆 100044)

大部分热则通过外壳和散热器释放到周围环境。为了减少漏热，在热源和电池外壳之间的空间常填充绝热材料。另外，为了使换能器输出的电能与外电路负载相匹配，还必须配备电压变换与功率调节装置。若同位素热源的辐射剂量较高，还需予以适当屏蔽，以确保附近仪器正常运转和工作人员的辐射安全。

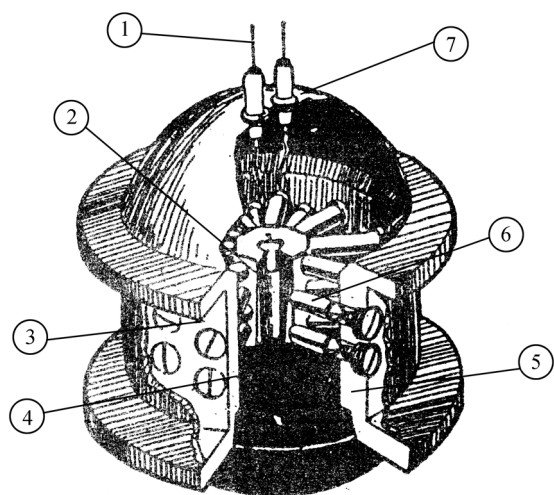


图1 原型放射性同位素电池结构
①两个输出接头；②放射性同位素热源；③热接点环；
④冷接点；⑤绝缘材料；⑥热电偶元件；⑦外壳

由图1可见，同位素热源是同位素电池的一个核心部件。主要由产生热量的放射性同位素燃料和封装燃料用的包壳，即源壳（又称“燃料盒”）构成。根据放射性同位素燃料选择时应具有稍长的半衰期、较高的功率密度、较轻的辐射屏蔽、较小的生物毒性和较低的生产成本等原则加以考虑，现有3000余种放射性同位素经逐一筛选，可用作同位素热源的燃料也不过十余种。他们是 ^{60}Co 、 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 、 ^{144}Ce 、 ^{147}Pm 、 ^{170}Tm 、 ^{210}Po 、 ^{238}Pu 、 ^{242}Cm 、 ^{244}Cm 等。根据这些放射性同位素燃料的衰变特性不同，同位素热源大致可分成 α 热源、 β 热源和 γ 热源三类。

作为陆地和海洋用同位素电池常选用 β 热源或 γ 热源。其中采用 ^{90}Sr 燃料作热源（属 β 热源）居多，因为其来源丰富、价格低廉。但是需要有较重的辐射屏蔽（铅或贫铀）。而 α 热源，其最大特点是所需屏蔽重量小，可大大减少火箭的发射费用，因此作为空间应用最为合适。在 α 热源中， ^{210}Po 和 ^{242}Cm 比功率均很高，分别为141.3Wt/g和120Wt/g，但半衰期较短（ ^{210}Po 为138.4天， ^{242}Cm 为162.5天），

故适用于示范装置或短期的航天任务； ^{238}Pu 和 ^{244}Cm 的比功率虽然较低，分别为0.55Wt/g和2.8Wt/g，但是半衰期较长（ ^{238}Pu 半衰期为87.7年， ^{244}Cm 半衰期为18.1年），因此可用于长期的航天任务。20世纪发射至空间的同位素电池，大多选用 ^{210}Po 和 ^{238}Pu 热源，其中后者则占绝大多数。

热源燃料的物理化学形式直接关系到热源的稳定性、可靠性和安全性。除了满足不溶于水、不挥发、不易被生物吸收，不易在人体内积聚等要求外，在航天应用时还要符合“外层外空气使用核动力原则”：一旦发生撞击，封闭系统和同位素物理形态应确保没有放射性物质散入环境，以使用一次回收作业即可完全清除撞击区的放射性。

热源燃料盒作用是包裹和封装同位素燃料，以防止放射性物质向外泄漏。因此，在热源设计时，除考虑结构、尺寸、包壳层数和材料选择等影响热源性能的诸多因素外，确保安全至关重要。因为整个燃料盒需能承受作用其上的所有应力，包括热的、化学的和机械的应力。尤其用于空间时，遇到情况更为复杂。不仅要能适应火箭力学环境（如冲击、震动、加速度和可能出现的发射事故），又要经受严峻的空间环境（如高真空、电离层、辐射带和宇宙粒子），还要考虑过早重返大气，空气动力热，很高的地面撞击速度，乃至撞击后环境的氧化、腐蚀等。因此单层包壳和单一材料难以满足航天任务要求，而常需采用多层结构、不同材料和适宜的焊接技术进行封装。

同位素热源可以直接应用。如前苏联在1969年和1973年发射了“月球车-1号”和“月球车-2号”，装置有800瓦的 ^{210}Po 热源，为月面观察仪器建立恒温环境。美国“早期月面科学试验站”（EASEP）使用了2台15瓦的 ^{238}Pu 热源，专供月震仪保温用。美国为“月面科学试验站”提供动力的 ^{238}Pu 热源内装3.735kg $^{238}\text{PuO}_2$ 微球燃料，发出热功率平均为1480W。燃料盒是成双设计的，由一对圆柱形包壳构成。 ^{238}Pu 同位素燃料装填在环状间隙内。燃料盒中间设置了很大的空腔，以容纳 ^{238}Pu 燃料衰变时不断释放的氦气，使其内部压力减低。燃料盒内衬和外壳材料均为Haynes-25合金，这种材料具有高强度和抗氧化能力的优良性能，且易于实施焊封。SNAP-27热源总重量（带后座）为7kg，外形尺寸为6.37×34.95cm。

换能器是同位素电池的另一个主要部件。其功能是将同位素热源释放的热能转变为电能。按照工作原理，对于热转换型换能器可分为静态转换和动态转换两大类。前者主要有温差电型（俗称“同位素温差发电机”）和热离子型（俗称“同位素热离子发电机”）。后者是一种间接的热电转换方式，有布雷顿循环、兰金循环和斯特林循环三种体系。业已成熟并已实用的是同位素温差发电机（简称 RTG）。虽然转换效率较低，介于 4%~8%，但优点是无运动部件、发电可靠。近年来美国能源部正在开发的“先进同位素发电体系”，包括碱金属热电转换器（借助液态金属离子将红外辐射转换成电能）和热-光光伏打转换器（利用铋化镓等半导体材料的光生伏打效应将同位素热源发出的红外光转换成电能），转换效率比目前使用的 RTG 要高出 2~3 倍。

热电型换能器的基本原理基于 1821 年西贝克发现的温差电现象。然而早期的热电偶由两种不同的金属或合金组成，热电转换效率只有千分之几，直至 21 世纪半导体材料的出现，才获得实用价值。现今是将两种不同类型的半导体，即 N 型（电子型）和 P 型（空穴型）半导体联结起来，构成了半导体换能器的一个基本单元见图 2。当两端建立起温差时，电子在 N 型半导体内从热端扩散至冷端，使冷端积累电子而带负电，热端带正电；空穴在 P 型半导体内从热端扩散至冷端使冷端带正电，热端带负电。这样，两种不同类型的半导体组成的温差电偶，两端间的电压即等于两种半导体元件所产生的电位差之和。若将 n 对热电偶串联构成一个半导体换能

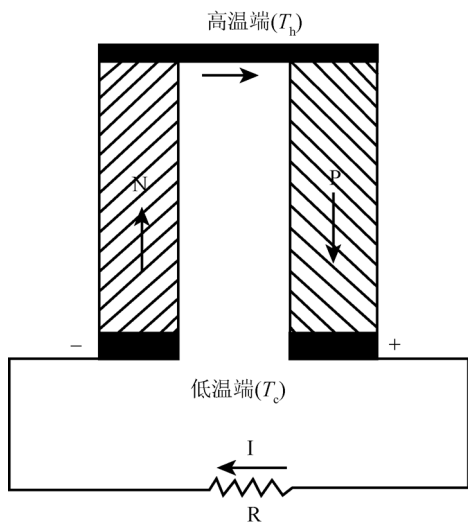


图 2 同位素温差发电机工作原理图

器，则换能器的端电压便是 n 对热电偶的端电压之和。若将其接入电路，便可对负载供电（见图 2），换能器主要由半导体材料和电极两部分组成。现有半导体换能材料主要有三种。

(1) 低温换能材料：以 BiTe 为代表，工作温度在 300℃ 以下。

(2) 中温换能材料：以 PbTe 为代表，最佳工作温度在 300~600℃ 之间。

(3) 高温换能材料：以 SiGe 为代表，工作温度可达 1000℃。

近年来还出现了其他一些新型半导体材料。至于换能器的性能主要取决于半导体材料的质量，同时也要重视装配工艺和操作环境气氛。美国在月球上使用的同位素温差发电机 (SNAP-27) 配置了 442 对半导体热电偶。P 型元件是 PbSnTe，N 型元件是 PbTe。填充气体为氩气。热接点和冷接点温度分别为 593℃ 和 274℃。电功率介于 70~75W，热电转换效率为 ~5.0%。比功率达到 2.34We/kg。其外形尺寸为 40cm（直径）×46cm（高度），重量不到 20kg。为了确保核安全，热源和换能器是分开运送的。热源放置在一个石墨桶内，登月舱着陆后，由宇航员手持 SNAP-27 热源将其直接插入换能器中，此时同位素温差发电机即开始发电（见图 3）。

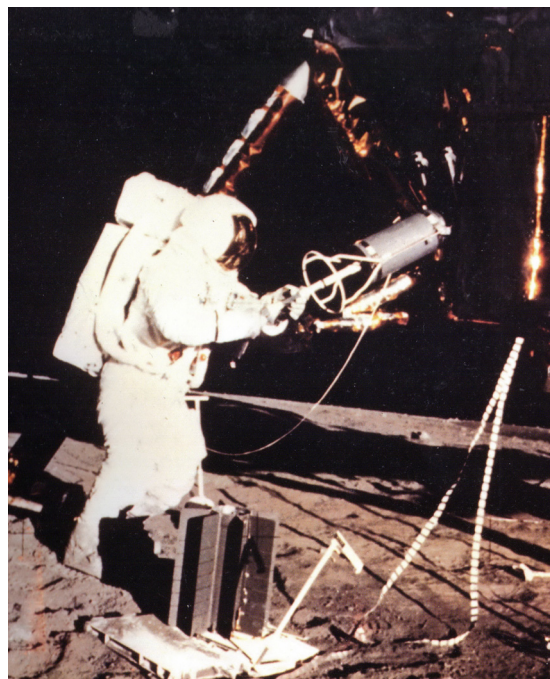


图 3 阿波罗 12 号宇航员在月球上装配同位素电池

迄今为止，钷-238 同位素温差发电机已应用于

人造卫星（如导航卫星、气象卫星和通信卫星），月球观察站，火星登陆器和外层行星探索等航天使命。随着同位素热源制造技术和热电转换技术的不断进步，发射至空间的同位素温差发电器的总电功率已由早期的 2.7W 提升至 850W。比功率由 1.48We/kg 增加至 5.14We/kg。最近十几年美国开发成功的“通用型同位素温差发电机”采用模块式热源设计，其优点是每个“通用型热源”（GPHS）模块各自独立（热功率为 250W），根据电功率的需要可灵活加以组合。如将 18 个模块组装在一起，可提供初始热功率达 4500W。热源四周装有 576 对半导体热电元件，输出初始电功率可接近 290W。1989 年发射的木星探测器——伽利略号使用了 2 台 GPHS RTG；1990 年发射的太阳极区探测器——尤里西斯号使用了 1 台 GPHS RTG；1997 年发射的土星探测器——克西尼号使用了 3 台 GPHS RTG；2006 年发射的冥王星探测器——新视野号使用了 1 台 GPHS RTG。

在人类首次登月 30 年后，各国对月球的探测和开发再度升温。这是因为月球具有独特的环境和丰富的资源所产生的吸引力所致。月球可以作为人类在其他星球上生活和工作的实验场所，并且可以作为奔向火星和其他星球的跳板。另外，根据探测表明，月球南极的陨石坑下埋藏有冰层，这就有望为人类提供水、氧气和燃料；月球上拥有藏量约 100 多万吨的 ^3He （可作为核燃料），100 万亿吨的钍-铁矿（能生产钍、铁、水和液氧）以及丰富的太阳能资源。

2004 年 1 月 14 日布什正式宣布美国在 2015 年到 2020 年将重返月球，建立月球基地；2030 年之前将宇航员送上火星（注：重返月球计划美国面临巨大资金缺口，奥巴马向国会递交 2011 年度财政预算报告中建议放弃该计划）。2005 年 7 月 14 日俄罗斯联邦航天局宣布了 2006 年至 2015 年航天计划，打算 2010 年左右建立月球基地，2015 年向火星发射载人飞船。欧洲航天局打算在 2010 年左右建立长期工作的月球站。随后，印度、日本也先后宣布了登月计划。

中国在 2000 年 11 月发表了航天白皮书，明确提出开展以月球探测为主的深空探测预先研究，我国月球探测计划由此浮出水面。在 2003 年 10 月，神舟 5 号载人航天取得成功后，我国启动了探索月球的“嫦娥工程”。设想分“绕”、“落”、“回”三步

走。一期工程发射月球探测卫星，进行绕月飞行并实施遥测（2007 年 11 月 26 日“嫦娥 1 号”传回月球三维影像标志我国首次月球探测已圆满完成）。二期工程将发射一艘月球着陆器，并携带一辆月球车，实施月球软着陆和越野巡测，计划在 2013 年前后进行（2010 年 10 月 1 日作为二期工程的先导星——“嫦娥 2 号”的发射将为后续探测器实现落月奠定技术基础）。三期工程将发射一艘月球着陆器，采集月球样品并返回地球，计划在 2017 年前后进行。月球探测任务完成后，将根据我国经济实力择机实现载人登月飞行，并建立月球基地。为了克服着陆器在月夜超冷环境下长期生存的难题，“嫦娥 3 号”和“嫦娥 4 号”正在考虑使用放射性同位素电池。相信我国日益丰富多彩的航天活动必然对空间核电源（包括小功率同位素电池和大功率反应堆电源）提出更多的需求，而空间核电源的研制成果又必将为航天活动的展开提供更为广阔的空间。

承蒙天津电源研究所任保国高工（研究员级）对本文初稿提出了一些删改建议，在此谨表谢意！

（中国原子能科学研究院同位素研究所 102413）

作者简介

蔡善钰，浙江嘉兴人，研究员级高工。1961 年毕业于华东理工大学，长期从事放射源的研发工作。20 世纪 80 年代作为访问学者，先后在美国劳伦斯-伯克利国家实验室

和美国同位素制品实验室从事有关研究工作。曾任中国原子能科学研究院科技委委员，同位素研究所科技委委员，中国核学会同位素学会理事，《同位素》杂志副主编。现任北京北方生物技术研究所、天津电源研究所技术顾问。撰写科技文章 110 余篇，科普文章 8 篇。先后获得 13 项国家专利（含 6 项发明专利）。个人专著有《人造元素》，合著有《放射性同位素技术》、《空间核电源研究》、《国家级医疗器械开发指南（第四辑）》、《实用临床核医学（第二版）》、《放射性核素治疗学》、《前列腺增生 β 射线腔内治疗新技术》等。

