

海洋观测设备核能电池研究进展

邵荣雨^{1,2}, 杨毓枢³, 王旭³, 邵剑雄^{1,2}, 杨爱香^{1,2}

(1. 兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000;

2. 教育部稀有同位素前沿科学中心, 兰州 730000;

3. 中国核动力研究设计院第一研究所, 成都 610000)

摘要:对于海洋观测设备, 核能供电有着不可替代的优势。近年来, 由于我国急需发展全方位、多维度地观测、探测海洋装备, 而海洋应用的放射性同位素电池技术可以成功应用于水下观测装备的供能, 在国内处于研究和摸索阶段。本研究总结了海洋同位素电池技术, 根据公开发表的相关研究, 对美国和俄罗斯的海洋观测设备应用的核能电池结构展开分析, 对比其结构因素的优缺点, 不同结构设计的材料环境有所差异, 可对未来海洋放射性同位素电池的设计提供参考。

关键词:海洋观测设备; 同位素电池; 结构设计

中图分类号: TL99

文献标志码: A

文章编号: 1000-7512(2025)01-0113-08

doi: [10.7538/tws.2024.youxian.049](https://doi.org/10.7538/tws.2024.youxian.049)

Research Progress of Nuclear Energy Batteries for Ocean Observation Equipment

SHAO Rongyu^{1,2}, YANG Yushu³, WANG Xu³, SHAO Jianxiong^{1,2}, YANG Aixiang^{1,2}

(1. College of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Frontier Science Center for Rare Isotopes, Ministry of Education, Lanzhou 730000, China;

3. The First Sub-institute, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610000, China)

Abstract: For the ocean observation equipment, nuclear power supply has irreplaceable advantages. In recent years, due to the urgent need to develop all-round and multi-dimensional ocean observation and exploration equipment in China, the radioactive thermoelectric generator applied in the ocean can be successfully applied to the energy supply of underwater observation and exploration equipment, and is in the stage of research and exploration in China. In this paper, the Marine radioisotope thermoelectric generator is summarized, and the structure of radioisotope thermoelectric generator used in Marine observation equipment in the United States and Russia is analyzed according to the relevant published research. The advantages and disadvantages of their structural factors are compared, and the material environment of different structural designs is different, which has important reference value for the future design of radioisotope thermoelectric generator.

Key words: ocean observation equipment; radioisotope thermoelectric generator; structure

近年来海洋水下观测设备逐渐得到重视,但水下能源系统须满足可靠性、安全性、耐低温、抗震动,以及长期性和隐蔽性等条件,制约了探测装备的有效观测时长,放射性同位素电池可将放射性同位素衰变产生的热能转化为电能^[1]。与传统的干电池、化学电池、燃料电池、太阳能电池相比,同位素电池具有寿命长、对环境适应性强、无需维护和可靠稳定等特点^[2],因而常被用于长时间运行且不需要维护的设备,也是极端恶劣环境中重要的供电方案,逐渐成为了国内外学者的研究热点,发展同位素电池技术是未来能源技术的重要研究方向。

美国曾在海底部部署了多种同位素电池,建立了海底传感系统和监听网络;苏联曾在白令海、北极等偏远地区使用过上千个⁹⁰Sr同位素电池,用于无人气象站、灯塔、观测站和监听站的电力供应^[1]。Khajepour 等^[3]设计了一种毫瓦级⁹⁰Sr同位素电池,在300~312 K的温度下工作,设计的RTG产生8 mW的功率,效率为1%。放射源在衰变过程中产生较强的韧致辐射能够造成严重的辐射安全问题^[4],因此在设计同位素电池时,需要根据使用场所考虑热源产生的放射性同位素原料泄漏风险。中国原子能科学研究院马俊平等^[4]利用MCNPX计算⁹⁰SrTiO₃陶瓷源表面的韧致辐射能谱和放射源外空间的剂量当量分布情况,并计算和设计了辐射防护材料。刘诗蕾等^[5]设计在放射源中加入低原子序数的物质石墨,以降低放射源所产生的韧致辐射。杨立群等^[6]分析了⁹⁰Sr同位素热源的韧致辐射分布,研究结果为⁹⁰Sr温差热电池的设计与制造提供了理论依据。当前我国急需发展全方位、多维度观测、探测海洋的各类装备,但是将同位素电池应用于水下探测装备的供能在国内仍处于研究和摸索阶段。合理地设计放射性同位素电池结构,有助于降低重量和成本、提高电池的安全和性能,并对优化新一代同位素电池的结构设计具有重要意义。

本研究介绍了同位素电池的工作原理,讨论了不同结构的水下应用同位素电池的物理特性,对其结构设计进行了详细讨论,从⁹⁰Sr热源、保温隔热材料、辐射防护材料、散热结构方面对海洋放射性同位素电池的设计展开综述,拟对未来设计提供借鉴。

1 工作原理

目前广泛使用的海洋同位素电池是利用塞贝克效应^[2]:具有不同自由电子密度的两种金属材料在接触时,接触面上会产生电子扩散,电子扩散速度与接触区的温差成正比,能够将热能直接转换成电能。

根据塞贝克效应,可知其发电效率影响因素包括:(1)结点工作温差:电动势取决于两种材料结点的温度,尽可能提高热源的温度和降低热电偶冷端外壳的温度,是提高发电效率的关键因素,合理地设计系统结构,就能够有效提高温差;(2)材料的优值ZT:优值ZT是材料的性质,和塞贝克系数S的平方成正比,与材料的热导率和内阻成反比。ZT值越大,效率越高。

由于单个发电机产生的功率太小,一般需要将多个发电机串联以获得更高的电能。近些年,随着材料的热电性能大幅度提升,一些制备新技术的发展也加速了实用化热电材料性能的快速提升,具备了在同位素电池中应用的条件。结合文献资料,目前瓦级的⁹⁰Sr同位素电池热源表面温度范围是200~800 ℃,热电材料能够实现将热能转换为电能。

2 美国研究的海洋核电池

美国对海洋应用的同位素电池研究始于二十世纪五十年代后期,当时启动了SNAP计划,研究以放射性同位素衰变热为能源的同位素电池,用于太空、海洋和陆地^[7]。海洋和陆地用途的瓦级同位素电池普遍应用⁹⁰Sr放射源^[8],功率从几瓦到几十瓦,寿命均为5~10 a,根据使用场合具体分为水上、海底及陆地应用类型。

在放射性同位素电池的应用过程中,核安全是水下探测装备采用核能的核心和基础,一旦发生核泄漏事故就会造成海洋核污染。考虑到⁹⁰Sr同位素电池在不同场合应用时所面临的风险不尽相同,因此采用的结构和选用的材料不同,分别对几种不同应用场合的典型放射性同位素电池型号的结构设计差异、输出功率密度、存在的不足及未来的发展趋势进行详细介绍。

2.1 在水面采用的结构

2.1.1 整体结构 水上场所包括海上浮动导航浮标、导航灯塔、海上浮动气象站及气井平台,

典型的放射性同位素电池是 SNAP-7^[6]。SNAP-7 型号(SNAP-7A-7F)的具体尺寸类型分两种,一种是 10 W 输出功率^[9],如图 1 所示;另一种是 60 W 输出功率^[8],如图 2 所示。其外观结构类似,均由⁹⁰Sr 热源、保温隔热材料、热电材料、辐射防护材料和外壳组成。

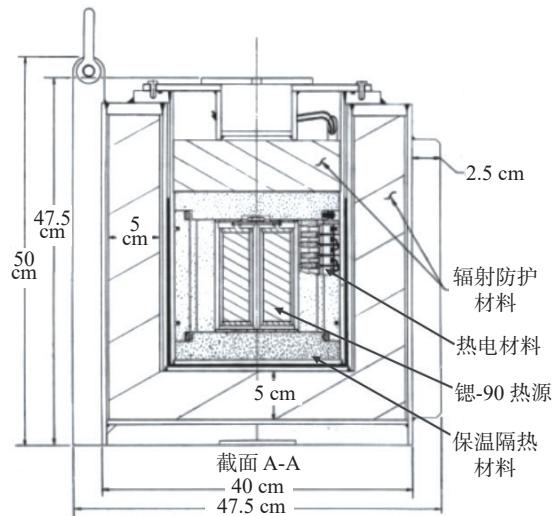


图 1 SNAP-7A 结构^[9]
Fig.1 Structure of SNAP-7A^[9]

2.1.2 ⁹⁰Sr 热源 SNAP-7 型号放射性同位素电池的核热源是由产生热量的放射性同位素原料和封装用的热源包壳两部分构成,在水上应用时需要格外考虑放射性同位素原料在水中不易溶解和扩散,以及热源同位素材料的绝对密封问题。在材料方面,放射性同位素原料选用⁹⁰SrTiO₃,其溶解度为 $3.2 \times 10^{-6} \text{ mg/m}^2$,如果同位

素电池最终在海里最终被废弃,装有⁹⁰SrTiO₃的热源包壳在水中破裂,同位素泄漏不会导致核污染问题。包裹放射性同位素原料的热源包壳选用哈氏合金,一种镍基合金,具有承受至少 3800 psi 的外部静止压力、高速冲击、熔点高、可以耐受 200 °C 的温度梯度产生的热应力冲击及耐海水腐蚀等优势。

图 3 是对应热源的结构,热源的制备过程复杂,需要改善放射性同位素原料的功率密度。将分离提取的⁹⁰SrTiO₃粉末热压成多个直径为 2.5 cm,厚度为 1.2 cm 的源芯,再将这些源芯封装在哈氏合金材质的圆柱形金属壳中,得到⁹⁰SrTiO₃热压后的功率密度可达到 0.5 W/cm^3 。

为防止热电材料的热端温度过高,在热源的部分空间采用不锈钢片隔开源芯。热源的金属热源包壳在氦气中密封焊接,以防止热源包壳氧化破损。最终在 SNAP-7 电池的 10 W 型号中使用了 4 个上述热源,总热功率为 250 W,每个热源的顶端都有一个凸起,方便远程机械操作和安装热源,最后将上述独立的 4 个热源插入到穿孔哈氏合金制成的热源蓄热器中,并将其安装在图 1 电池系统的中心位置。

2.1.3 保温隔热材料 保温隔热材料对放射性同位素电池提高发电效率具有重要作用,在 SNAP-7 中采用纳米微孔隔热材料包裹在热源蓄热器的顶部,底部和周围角落。在蓄热器其他的表面外接碲化铅热电元件,其冷端和铝制散热器表面紧密接触,并在热电元件周围也填充了保温隔热材料。

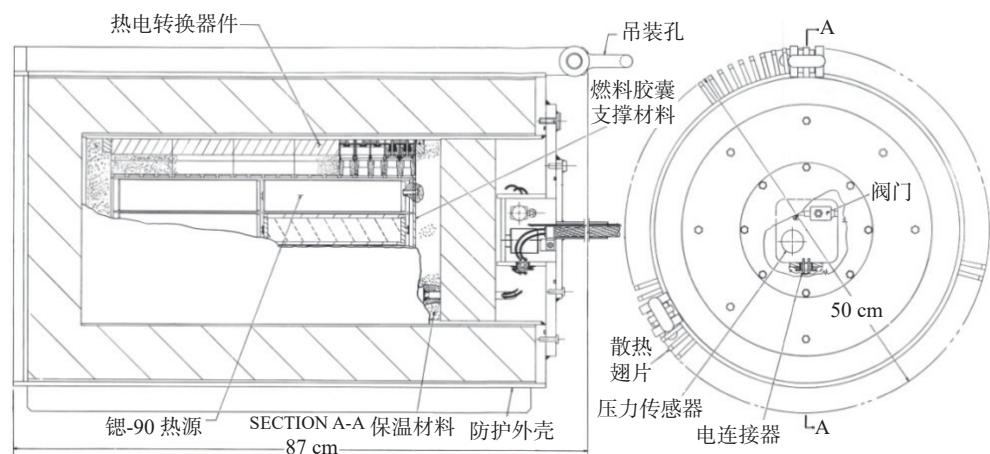
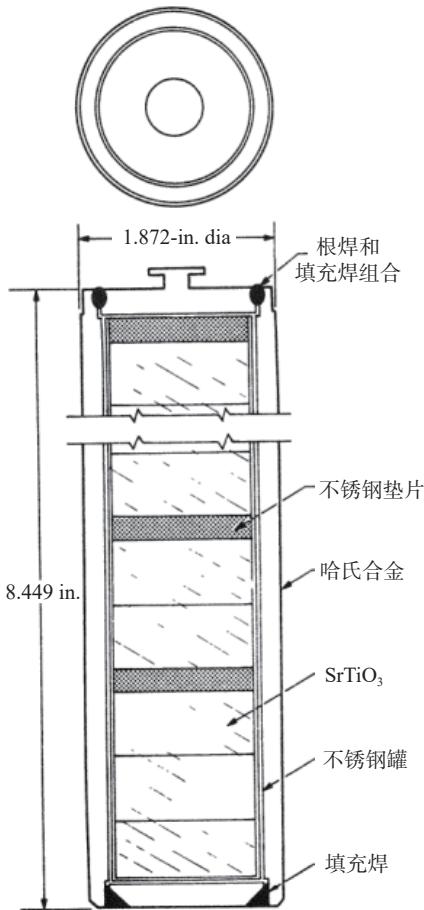


图 2 SNAP-7B 结构^[8]
Fig.2 Structure of SNAP-7B^[8]

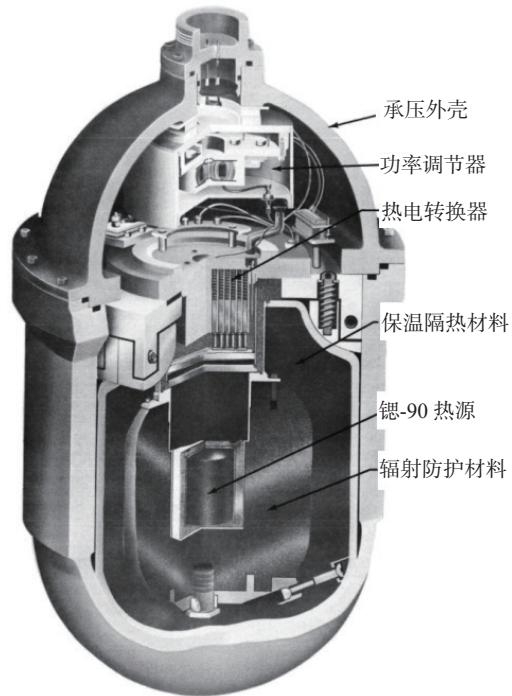
图 3 SNAP-7B 同位素热源结构^[10]Fig.3 Structure of SNAP-7B isotope heat source^[10]

SNAP-21B 的保温隔热材料是由许多层薄金属箔包裹在辐射防护材料周围，每层金属箔由一层石英玻璃布隔开。整个系统在密封安装前被抽真空，内部通过添加吸附剂维持真空，减少同位素电池工作时由于材料放气产生的气体导热，使得系统的漏热损失不超过 45 W，整体热效率达到 75% ~ 80%。

2.2 在海底采用的结构

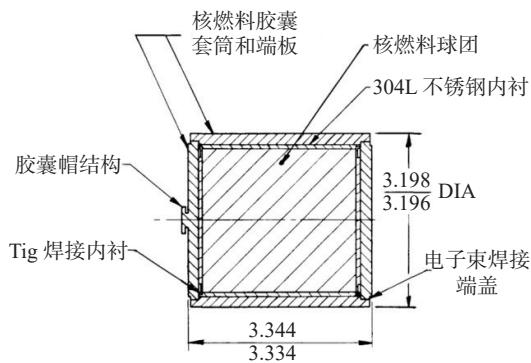
2.2.1 整体结构 海底应用主要是为海底仪器设备供电^[11]，包括海底传感系统和监听网络。典型的放射性同位素电池为 SNAP-21B^[12]，输出电功率为 10 W，可利用海水作为热沉冷却以维持燃料电池外端较低的温度。SNAP-21B 的结构示于图 4，由⁹⁰Sr 热源、辐射防护材料、保温隔热材料、承压外壳、热电转换器组成，除了热源顶部平板形的热电转换器接收热量的区域外，热源和辐射防护材料周围的空间都被耐高温多层隔热组件包裹。此外，在海底的系统所有组件

被封闭在一个承压外壳中，以保护内部组件免受 10000 psi 的海水压力，提高电池系统的工作稳定性。

图 4 SNAP-21B 结构^[12]Fig.4 Structure of SNAP-21B^[12]

2.2.2 ⁹⁰Sr 热源 SNAP-21B 的热源结构示于图 5，由两层金属壳封装，被热压后的⁹⁰SrTiO₃ 热功率密度可达 0.8 W/cm³。ORNL 研究表明，在一定条件下，锶氧化物和高镍或高钴合金之间存在某种反应，和不锈钢完全兼容。因此，热功率共 210 W 的⁹⁰SrTiO₃ 被密封在不锈钢衬垫中，不锈钢衬垫被封装在由哈氏 C-276 制成的热源包壳中，内部不锈钢衬垫采用 TIG 焊接，热源包壳为内部源芯提供了结构和腐蚀保护，采用电子束焊接密封以完全穿透和最小化变形。由于⁹⁰SrTiO₃ 的化学稳定性，⁹⁰SrTiO₃ 和金属外壳之间不存在材料相容性问题。为了在任何事故下仍然能够对⁹⁰SrTiO₃ 密封，对热源在使用前进行了热冲击测试，振动测试和静水压力测试。

2.2.3 辐射防护材料 SNAP-21B 的辐射防护材料采用 U-8%Mo 合金，该合金材料对核辐射屏蔽效率最高。辐射防护材料将热源包裹在内，除了顶端连接热电模块外，其他表面都被包裹在真空隔热组件内。高温下，需要防止辐射防护材料和哈氏合金的接触界面发生共晶反

图 5 SNAP-21B 热源结构^[12]Fig.5 Structure of SNAP-21B isotope heat source^[12]

应,因此将 Al_2O_3 等离子喷涂在哈氏合金表面,然后研磨成厚度为 0.2 mm 涂层,作为上述两种相容性材料的屏蔽。辐射防护材料在使用前,经过表面辐射剂量测试,振动测试,密封和氧化测试,验证了辐射防护材料的屏蔽能力。

2.2.4 保温隔热材料 SNAP-21B 的保温隔热材料是由许多层薄金属箔包裹在辐射防护材料周围,每层金属箔由一层石英玻璃布隔开。整个系统在密封安装前被抽真空,内部通过添加吸附剂维持真空,减少同位素电池工作时由于材料放气产生的气体导热,使得系统的漏热损失不超过 45 W,整体热效率达到 75%~80%。

2.2.5 承压外壳 SNAP-21B 的承压外壳是保证海底应用的重要组成部件,包括外壳套筒的顶端和底座两个模块,需要保护内部仪器组件,高效散热降温,抗海水腐蚀的作用。在抗海水压力方面,Berlyco 165 通过热处理后可达到 130~160 ksi 的拉伸屈服强度,设计外壳尺寸厚度时需要考虑外壳不同曲面结构对应的海水静压力存在的差异。在密封方面,外壳安装时在顶端和底部两个压力容器套筒的接口处需设计良好的密封方式。在抗海水腐蚀和海洋污垢方面,Berlyco 165 材料可以成功地用作水下中继器壳体材料,因此能够在海水环境中维持 5 a 的寿命,保持良好的传热效果。

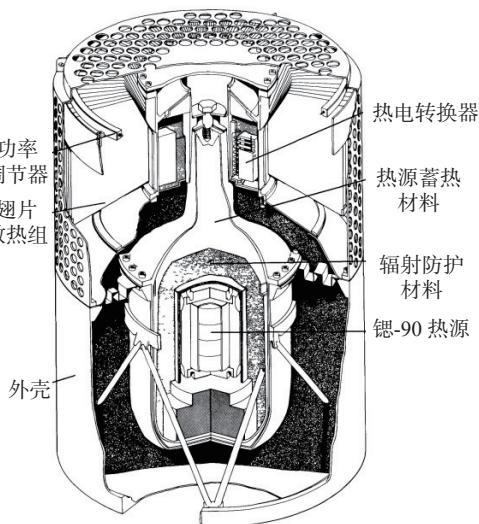
此外,电池系统的外壳表面还需要能够将电力和仪表引线从压力容器中引出连接电插头,设计时需要能够耐海水压力,具有和配套电缆连接插头之间的密封等特性。热电转换器采用 PbTe,理论最高效率可达 10% 以上,实际结构还包括功率调节器,配套电缆等部分,从而保

证了负载电路的正常使用,达到了延长使用寿命的目的,最终 SNAP-21B 输出功率超过 11 W。

2.3 在海岸线采用的结构

2.3.1 整体结构 海岸线应用主要用于无人值守的灯塔,偏远的军事监测站及自动气象站等设施。需考虑热源的密封性及屏蔽防护安全性,不需要考虑海水腐蚀和海水静压力的问题,设计时一般考虑经济性,还要减少同位素电池的体积和重量。典型应用在偏远陆地的放射性同位素电池型号是 SNAP-23A,其初始输出功率为 60 W^[13],设计时保证至少 10 a 的使用寿命,热源产生的热量通过包围在 ^{90}Sr 热源和辐射防护材料周围的铜蓄热器传导到热电元件,废热通过顶部的翅片散热到周围空气中^[14],辐射防护材料在蓄热器内的设计方式能够降低系统的重量和减少成本,通过对热源增加较长的一段蓄热结构一方面降低热点转换器热端温度延长使用寿命,另一方面能够增加热电偶的数量,设计时在蓄热器的顶部增加了较厚的保温隔热材料对热源进行保温。

2.3.2 ^{90}Sr 热源 如图 6 所示,SNAP-23A 的 ^{90}Sr 热源采用双重金属封装结构,热源采用 0.25 cm 厚的 316 不锈钢作为热源内衬;约 0.6 cm 厚的 Inconel 625 合金(高镍合金)作为外衬,共封装了 1180 W 热量的 ^{90}SrO ,其为五个热压的 ^{90}SrO 源芯组合,通过焊接工艺密封,双重封装设计将热源在组装过程中产生的放射性污染降

图 6 SNAP-23A 结构^[13]Fig.6 Structure of SNAP-23A^[13]

至最低。区别于水中应用同位素电池的⁹⁰SrTiO₃,⁹⁰SrO 的功率密度更高,可以减少热源及系统的尺寸重量。

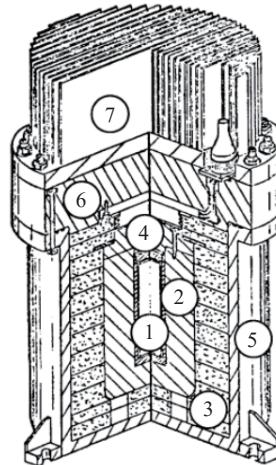
SNAP-23A 的热源除了中心的热源,还包括钛金属薄层、辐射防护材料、蓄热器和热源外壳。⁹⁰Sr 热源首先被密封在一个钛金属薄层内,防止哈氏合金和 U-8%Mo 辐射防护材料间产生化学反应,厚度为 8 cm 的铀合金辐射防护材料包裹钛薄层,铜蓄热器包围辐射防护材料,再将热量传导至热电元件,这样的设计可以减少系统的体积,最后将上述安装完成后的材料部件用不锈钢热源外壳进行密封固定。为了保证 10 a 的使用寿命,需要降低热电材料的热端温度,因此蓄热器增加了较长的一段,在其周围共包裹了 294 个热电偶以实现 60 W 的输出功率。

2.3.3 翅片散热组件 散热器组件将通过热电转换器的余热散发到大气环境,同时在散热器的底座安装了系统电压调节装置,并在热源底座和周围填充了隔热材料,以减少热源的热损失,也能够支持和保护热源及热电元件。在系统外壳密封的容器中填充了纳米微孔隔热材料,但由于对隔热材料长时间高温环境下的力学特性数据不清楚,因此在设计时,在热源的周围和底部搭载了简易的机械支撑装置。

另一种典型海岸线应用的放射性同位素电池为 Sentinel-25,美国空军在阿拉斯加偏远的军事监测站装备了 10 个^[15],由于使用化学电池的费用高,因此使用 Sentinel-25 成为了为监测站提供电力的最安全、最可靠以及最经济的方法^[16]。

Sentinel-25 采用 700 W 的⁹⁰SrTiO₃ 作为热源

的放射性同位素原料,输出功率为 25 W,其结构截面示于图 7,同位素电池系统的热电转换器也设计在热源的顶端。



①—⁹⁰Sr 热源;②—辐射防护材料;③—保温材料;
④—热电转换器;⑤—压力容器;⑥—端盖;
⑦—翅片散热组件

图 7 Sentinel-25 结构^[16]

Fig.7 Structure of Sentinel-25^[16]

综上,对美国应用的⁹⁰Sr 同位素温差电池物理和设计特性总结列于表 1。目前,⁹⁰Sr 放射性同位素温差发电器的设计与制造在美国已日臻完善,针对热电转换效率不足的问题,美国开展了先进温差型同位素电源技术的研发,热电转换效率由早期的 4% 不断上升。在以往的应用过程中,尽管 Sentinel-25 在军事监测站经过一次森林山火,但显示其仍能正常工作;此外,对于极端偏远地区和海底深部,由于光照强度急剧下降,排除了应用太阳能电池的可能性,而且

表 1 美国⁹⁰Sr 同位素电池的物理和设计特性

Table 1 Physical and design characteristics of ⁹⁰Sr isotope batteries in the United States

名称	SNAP-7A	SNAP-7B	SNAP-21B	SNAP-23A	URIPS	BUP-500
输出功率/W	10	60	10	60	1	500
使用寿命/a	10	10	5	10	5	5
源芯化学形态	⁹⁰ SrTiO ₃	⁹⁰ SrTiO ₃	⁹⁰ SrTiO ₃	⁹⁰ SrO	⁹⁰ SrTiO ₃	⁹⁰ SrF ₂
源芯功率/W	250	1 400	210	1 180	46	7 504
直径/cm	47.5	52.5	40.0	60.0	34.2	167
高度/cm	52.5	85.0	87.5	73.2	50.0	133
系统重量/kg	835	2 087	270	510	363	3 266
热结温度/°C	500	502	593	500	204	522
冷结温度/°C	25	54	81	80	24	92
热电材料	PbTe	PbTe	PbTe	PbTe	Bi ₂ Te ₃	PbTe
发电效率	4.0%	4.3%	5.6%	5.1%	2.18%	6.67%

运送化学燃料、维护化学电池的工作及定期更换的成本很高,使放射性同位素电池成为唯一经济适用的能源。

3 俄罗斯研究的海洋核电池

苏联/俄罗斯曾用过1000多个⁹⁰Sr放射性同位素温差电池,大部分用作灯塔和导航信标的电源^[15],有的电池已超过使用寿命。热源均以⁹⁰SrTiO₃陶瓷源芯形式,并采用氩气焊接密封在一个热源包壳中。这些RTG的外壳由不锈钢、铝和铅组成,保护内部热源免受外部冲击。辐射防护材料使设备表面的辐射水平不超过2 mSv/h。

俄罗斯的RTG结构示意图于图8,在过去生产的⁹⁰Sr同位素电池型号列于表2,俄罗斯的Beta-M型号最初是在20世纪60年代末研发的设计方案之一,也是使用最多的型号,甚至在2004年,仍有16台新设备被制造、使用。

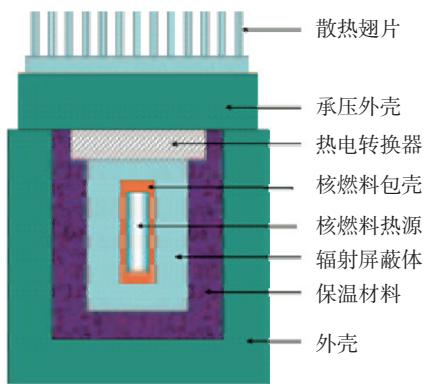


图8 俄罗斯⁹⁰Sr同位素电池结构^[17]

Fig.8 The structure of Russian ⁹⁰Sr radioactive thermoelectric generator^[17]

表2 俄罗斯⁹⁰Sr同位素电池型号^[17]

Table 2 Russian ⁹⁰Sr isotope battery models^[17]

型号名称	热源功率/W	活度/kCi	输出电压/V	系统重量/kg
Efir-MA	720	111	35	1250
IEU-1	2200	49	24	2500
IEU-2	580	89	6	600
Beta-M	230	35	无	560
Gong	315	49	14	600
Gorn	1100	170	7	1050
IEU-2M	690	106	14	600
Senostav	1870	288	无	1250
IEU-1M	2200	340	28	1050

4 结论

根据上述美国与俄罗斯的应用实例,对海洋设备采用的同位素电池进行总结如下。海洋应用的同位素电池作为独立的电源系统,按照功能进行分类,通常由⁹⁰Sr热源、辐射防护材料、保温结构、温差发电机、外壳和辅件等构成。根据同位素电池应用场合和环境不同,在使用时的关注点不同,在设计⁹⁰Sr同位素电池时,重点考虑热源和辐射防护材料。在水上应用和海底应用时需要考虑热源被海水腐蚀和放射性同位素泄漏扩散的风险,而海底应用还需要注意外壳的抗压,但以上两种的散热翅片不需要很多;对于海岸线应用,则需要考虑经济性、体积和重量,而且空气散热的效果不如海水冷却,需要更多的散热翅片,有利于增大温差,进一步提高热电转换效率。

热源通常需要置于同位素电池的中心,并能够不断释放热量,研制⁹⁰Sr热源面临两个主要的安全性问题:(1)选择合适、稳定、不溶性⁹⁰Sr化合物,以排除相关的放射性同位素泄漏问题;(2)采用一种金属或合金作为热源的包壳材料,确保在热源暴露时能够对内部⁹⁰Sr化合物进行完全密封。对于热源,⁹⁰SrTiO₃是一种陶瓷材料,化学性质稳定,纯⁹⁰SrTiO₃几乎不可燃,熔点高,机械强度大,且几乎没有毒性,能够在最大程度上降低风险。但在热功率密度方面,相比于⁹⁰SrO及⁹⁰SrF₂,⁹⁰SrTiO₃热功率密度偏低,因此在某些陆地应用,也曾使用过⁹⁰SrO及⁹⁰SrF₂。对于热源包壳,通常要求其与⁹⁰Sr化合物能够具备化学相容性、耐淡水或海水腐蚀、需要具有高熔点、抗热震性和易加工性。因此⁹⁰Sr热源通常采用高强度的哈氏合金(高镍材料)对源芯进行密闭封装和保护。

⁹⁰Sr同位素温差电池还需要选择合适的辐射防护材料以降低电池表面的辐射强度,在材料方面,辐射防护材料通常选用贫铀(如SNAP-7),铀的热导率较高,但铀在高温下容易和其他金属发生共晶反应造成失效,因此,在安装辐射防护材料时,表面需要用其他材料进行包裹,或是辐射防护材料选用铅(如URIPS)、钨合金(如BUP-500)等。

随着我国海洋探测计划的不断发展,放射性同位素能源是走向开发极端地区资源的战略性装备,在探测任务中占举足轻重的地位。国

内目前研究了与⁹⁰Sr热源相关降低辐射屏蔽分析^[16],同位素电池整体结构设计缺少相关研究论证。尽管海洋观测设备的放射性同位素电池已在国外许多探测任务中得到大量应用,但其研究过程中还有很多问题有待进一步思考。

(1)同位素电池的结构设计目前普遍仅有实例结构,还需要开展国内不同瓦级模块化⁹⁰Sr放射性同位素电池的结构设计和热源研制。

(2)目前针对⁹⁰Sr放射性同位素电池普遍存在效率低的问题,可开展转换效率更高的热光发电技术研究。

参考文献:

- [1] 彭子龙, 阎述学, 殷建平, 等. 水下观探测装备核供能方案的思考[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(7): 888-897.
Peng Zilong, Yan Shuxue, Yin Jianping, et al. Thinking on nuclear energy supply scheme for underwater observation and exploration equipment[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(7): 888-897 (in Chinese).
- [2] 沈天健, 梁代骅, 蔡建华, 等. 具有独特用途的放射性同位素电池[J]. 核技术, 2010, 33(8): 625-630.
Shen Tianjian, Liang Daihua, Cai Jianhua, et al. Radioisotope battery for particular application[J]. Nuclear Techniques, 2010, 33(8): 625-630 (in Chinese).
- [3] Khajepour A, Rahmani F. An approach to design a ⁹⁰Sr radioisotope thermoelectric generator using analytical and Monte Carlo methods with ANSYS, COMSOL, and MCNP[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2017, 119: 51-59.
- [4] 马俊平, 何虎, 罗志福. 锶-90同位素放射源屏蔽结构设计[J]. 同位素, 2017, 30(4): 243-248.
Ma Junping, He Hu, Luo Zhifu. Shielding structure design of ⁹⁰Sr isotope radiation source[J]. *Journal of Isotopes*, 2017, 30(4): 243-248 (in Chinese).
- [5] 刘诗蕾, 李鑫, 马俊平, 等. 锶-90同位素放射源韧致辐射降低方法模拟计算[J]. 同位素, 2019, 32(5): 322-326.
Liu Shilei, Li Xin, Ma Junping, et al. Simulated calculation of bremsstrahlung reduction method for Sr-90 isotope radiation source[J]. *Journal of Isotopes*, 2019, 32(5): 322-326 (in Chinese).
- [6] 杨立群, 贾楠楠, 周剑, 等. 锶-90同位素电池放射源的设计模拟与辐射优化[J]. 同位素, 2024, 37(1): 49-54.
Yang Liqun, Jia Nannan, Zhou Jian, et al. Design simulation and radiation optimization of radioactive sources for strontium-90 isotope batteries[J]. *Isotopes*, 2024, 37(1): 49-54.
- [7] 李潇祎, 陆景彬, 郑人洲, 等. 核电池概述及展望[J]. 原子核物理评论, 2020, 37(4): 875-892.
Li Xiaoyi, Lu Jingbin, Zheng Renzhou, et al. An overview and prospect of nuclear battery[J]. *Nuclear Physics Review*, 2020, 37(4): 875-892 (in Chinese).
- [8] Information T. Snap 7B: Strontium-90 fueled thermoelectric generator power source, thirty-watt U.S. coast guard automatic light station. final report[J]. Technical Report Archive & Image Library, 1963: 114008684.
- [9] Phillip M B. Final safety analysis: ten-watt strontium-90 fueled generator for an unattended light buoy, SNAP-7A [R]. Oak Ridge, Tennessee, United States: Martin Company, 1961.
- [10] Bloom J L. Production of strontium-titanate radioisotope fuel for snap 7B thermoelectric generator [R]. United States: Martin-Marietta Corp. Aerospace Div., Baltimore, 1963.
- [11] Wickenberg R F. SNAP-21 program, Phase II. Deep sea radioisotope-fueled thermoelectric generator power supply system. Final design description [R]. St. Paul, Minnesota: Minnesota Mining and Manufacturing Company, 1969.
- [12] Benson D. Deep sea radioisotope-fueled thermoelectric generator power supply system. SNAP-21B program, phase I. Final Summary Report [R]. United States: Minnesota Mining and Mfg. Co., St. Paul. Isotope Power Lab, 1966.
- [13] Field D R. SNAP-23A program post-test analysis plan and report volume II analysis report [R]. United States: Minnesota Mining and Mfg. Co., St. Paul. Isotope Power Lab, 1967.
- [14] Henderson W B. SNAP-23A, PHASE 1. Quarterly Progress Report, December 1, 1967- February 29, 1968 [R]. United States: Westinghouse Electric Corporation. Astronuclear Laboratory, 1968.
- [15] Lamp T, Donovan B. Unattended power sources for remote, harsh environments[C]//Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. Reston, Virginia: AIAA, 1994: 4206.
- [16] U. S. Congress, Office of Technology Assessment. Power Sources for Remote Arctic Applications, OTA-BP-ETI 129[R]. Washington, DC: 1994.
- [17] Standring WJF, Selnes Ø G, Sneve M, et al. NRPA (2005) Assessment of environmental, health and safety consequences of decommissioning radioisotopic thermal generators (RTGs) in Northwest Russia[R]. Strålevern-Rapport 2005: 4. Østerås: Norwegian Radiation Protection Authority, 2005.