

月球表面核反应堆电源方案

姚成志, 胡古, 解家春, 赵守智, 郭健

中国原子能科学研究院反应堆工程研究设计所, 北京 102413

摘要 月球基地的建立首先需要解决能源供给问题,核反应堆电源具有功率大、寿命长、环境适应性强等优点,是月球基地及其他深空探测任务的理想能源。分析了目前可用于月球基地的能源情况,针对性地提出 40 kW。月球表面核反应堆电源的设计理念,经初步优化设计,给出该电源的方案和总体设计参数,并从物理、屏蔽、热工、结构方面对电源方案进行分析和论证。结果表明:该电源方案合理可行,能够满足安全和寿期要求。

关键词 月球表面;核反应堆电源;热电转换;斯特林发动机

中图分类号 TL413

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.12.002

A scheme of lunar surface nuclear reactor power

YAO Chengzhi, HU Gu, XIE Jiachun, ZHAO Shouzhi, GUO Jian

Department of Reactor Engineering Research & Design, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China

Abstract To establish a lunar base, the energy supply is a first issue to be solved. The nuclear reactor power has the advantages of high power, long service life and environmental resistance ability. It is an ideal energy solution option for the lunar base and other deep space exploration missions. A brief analysis of the current status of the energy resources that can be used for a lunar base is made. The design idea of a 40 kW_e nuclear reactor power for the lunar surface is proposed. After the preliminary optimization design, the scheme and the overall design parameters of the nuclear reactor power are given. Finally, the power scheme is analyzed and demonstrated from the aspects of the reactor physics, the shielding, the thermal performance and structure. It is shown that the nuclear reactor power scheme is reasonable and feasible. It can meet the requirements of safety and long life service.

Keywords lunar surface; nuclear reactor power; thermoelectric conversion; stirling engine

随着载人航天等空间技术的不断成熟和空间应用需求的扩大,月球已经成为各国 21 世纪深空探测的首要目标。美国、日本、欧空局、俄罗斯、印度及中国等都制定了近期探月计划,并酝酿在近 20~30 年内联合或单独建立永久性月球基地,开发和利用月球的资源、能源和特殊环境,为人类社会的可持续发展服务^[1]。

月球基地的建立首先需要解决电源(能源)供给问题,基地所需电源功率一般介于 10~100 kW_e,寿期 5 年以上^[2],同时需要电源系统具有高比功率、高安全可靠性以及环境适应性,能够在月球的极端环境条件下长期发电。目前可用于月球基地的电源主要有化学电源、太阳能电源、放射性同位素电池以及核反应堆电源。化学电源的功率大,寿命较短,一般需要携带大量的燃料;太阳能电源的功率大、寿命长、可靠

性高,但尺寸较大,使用受环境限制;放射性同位素电池的发电功率较小,一般不超过 10 kW_e,同时 Pu-238 比较昂贵^[3]。与化学电源、太阳能电源及同位素电池相比,核反应堆电源具有功率大、寿命长、生存能力强、不依赖阳光、可全天候工作等特点^[4],被认为是月球基地及其他深空探测任务中电能和热能最理想、可靠甚至是唯一可行的方案。

目前,美国将功率 40 kW_e 的核反应堆电源作为研究重点,该功率可以满足前期月球基地的电源需求,也方便通过多个电源系统组合进行功率提升,以满足后期月球基地的使用需求^[2]。本研究参考国外月球基地核反应堆电源的发展趋势并结合中国技术发展水平,提出电功率 40 kW_e、热电转换效率 23%、寿期大于 8 年的月球表面用核反应堆电源方案,并进行初步分析计算,可为开展该方面工作提供有益参考。

收稿日期:2015-02-03;修回日期:2015-04-15

作者简介:姚成志,工程师,研究方向为反应堆设计,电子信箱:yaochengzhi2006@163.com

引用格式:姚成志,胡古,解家春,等.月球表面核反应堆电源方案[J].科技导报,2015,33(12):19-23.

1 设计理念

1.1 堆型

从国际上空间核电源技术的发展趋势看,目前空间用核反应堆电源一般都采用快堆。快堆主要具有以下优势:快堆不需要慢化剂,堆芯布置更加紧凑,方便布置在运载火箭中;快堆能最大程度地将可裂变核素转化成易裂变核素,一定程度上减轻由于易裂变核素浓度降低所产生的影响;快堆的燃料装量多,可以在寿期内获得较为平坦的有效增殖系数 k_{eff} ;快堆中子泄漏率大,适合采用堆外控制方式,可以简化堆芯结构,提高可靠性。采用快堆也存在一定弊端,如燃料装量多、对材料的辐射损伤严重、屏蔽体质量大、在发射失败事故中存在临界安全问题,因此在方案设计时应着重考虑解决这些问题。

1.2 堆芯冷却方式

堆芯冷却方式直接关系结构材料、燃料、包壳材料以及热电转换方式的选择。目前星表核反应堆电源可用的堆芯冷却方式主要有气体、液态金属及热管冷却3种方式。气体冷却方式采用惰性气体作为冷却剂,不会与结构材料相互作用,同时无沸腾问题,可以在高温下使用。但气体的热瞬态反馈性能差,使得堆芯的温度相对较高,易引起结构材料的高温性能问题,同时气体冷却方式存在单点失效问题。液态金属冷却方式具有质量轻、体积小等优点,但存在单点失效问题。热管冷却采用非能动循环,热响应速度快,并可避免因单根热管失效引起的冷却性能下降。因此本方案采用热管冷却方式。

1.3 热电转换方式

热电转换方式必须与堆芯和热排放系统相匹配,在确定电源系统总体方案时起关键作用。可用的热电转换方式主要有静态的温差转换、热离子转换以及碱金属转换,动态的布雷顿循环、斯特林循环、朗肯循环及磁流体转换等。温差转换和热离子转换技术比较成熟,但转换效率较低。碱金属和磁流体转换的效率较高,但目前还处于概念研究阶段,短期内无法实现工程应用。朗肯循环是目前核电厂采用最多的热电转换技术,转换效率接近卡诺循环效率。但朗肯循环时有工质相变,在低重力的月球环境下存在工质冷凝、气液相分离等问题,目前难以解决。斯特林循环和布雷顿循环是目前技术相对比较成熟的两种动态热电转换方式,转换效率一般在20%以上。若在月球表面采用布雷顿循环,则由于月球表面无大气活动,只能采用闭式布雷顿循环模式,在堆芯冷却系统与布雷顿循环装置之间需要增加热交换器,同时由于液态金属的导热率远大于布雷顿循环中的气体工质,会使热交换器的换热面积和质量较大,从而增加核电源系统的质量。斯特林循环的技术相对成熟,与液态金属的连接相对简单,可用于1300 K^[9]左右的高温环境,能够进一步提高热电转换效率,因此本方案采用斯特林循环进行热电转换。

1.4 控制方式

小型快堆常用的控制方式主要是控制棒、移动反射层及

控制鼓。控制棒一般为细长棒,质量相对最小,同时在发射事故时变形和脱落的可能性小,因此可确保事故时安全。但由于控制棒沿堆芯轴向的移动距离大,会增加堆芯轴向尺寸,同时在插入堆芯时也会影响功率分布,使堆内中子通量密度和功率分布产生畸变,不利于堆芯内的功率输出。另外,控制棒的加工精度要求高,结构相对复杂。同时由于堆内快中子注量率和温度较高,对控制棒结构材料的抗辐照和高温性能要求高。移动反射层通过调节中子的泄漏量进行反应性控制,反射层的工作温度低,材料的辐照损伤小。但由于移动反射层布置在堆容器外侧,事故时变形和脱落可能性较大,同时由于反射层沿堆芯轴向直线运动,使得控制系统的结构相对复杂,并影响堆芯的功率分布,不利于中子利用。控制鼓通过改变鼓体上的中子吸收体位置进行反应性控制,主体材料一般与反射层材料一致,布置在径向反射层内,不会增加反射层的尺寸和质量,对堆芯的轴向功率分布扰动小。同时控制鼓在事故时变形和脱落可能性小,利于保证发射安全。因此本方案选用控制鼓作为反应堆控制方式。

1.5 废热排放方式

月球表面为真空环境,可采用的废热排放方式只能是传导和辐射。由于月球表面月壤或岩石的导热性较差,基本上为绝热,因此不具备传导的条件,只能采用辐射进行废热排放。目前可用的辐射器主要有热管式辐射器、液滴式辐射器以及回路式辐射器,其中液滴式辐射器目前处于概念研究阶段,易受月球表面微重力 and 月尘影响^[6]。回路式和热管式辐射器技术比较成熟,但回路式辐射器存在单点失效问题,空间核电源系统一般不采用。目前月球表面核电源系统基本都采用热管式辐射器,热管式辐射器技术成熟、可靠性高、无单点失效问题,并且中国在热管式辐射器应用方面也有一定的经验,因此选择热管式辐射器进行月球基地核电源系统的废热排放。

1.6 辐射屏蔽模式

屏蔽的目的是为了避免人员及设备的照射剂量超过限制。目前月球基地核电源系统有3种辐射屏蔽模式:全集成屏蔽模式、天然地形屏蔽及月壤屏蔽模式。全集成屏蔽模式采用现有的屏蔽材料,在地球上完成安装,与反应堆一起发射到月球表面,无须现场安装,但是屏蔽体质量大,不利于发射,同时能达到的辐射剂量水平也受限制。天然地形屏蔽模式利用月球表面的天然地形(环形坑等)进行屏蔽,只需部分人造屏蔽,屏蔽体质量较小,但受地形限制明显,使月球基地的选址受限。月壤屏蔽模式以月壤或岩石进行屏蔽,具有屏蔽效果好、系统发射质量轻等优点,缺点是需要专用的月壤移动或挖掘设备,需要一定布置的时间。为了减轻核电源系统质量,本方案采用月壤屏蔽模式。

1.7 燃料

月球基地核电源系统对燃料的要求不同于地面反应堆,设计时除了要满足地面反应堆燃料的一般性要求外,还要考虑寿期内不换料、维护少、燃料装量少等因素。目前星表核

反应堆采用的燃料主要是 UO_2 和 UN ,其中 UO_2 燃料的加工制造技术成熟,性能数据全面,有广泛的应用经验,基于研发周期、风险和成本考虑,在月球基地核电源系统中采用技术成熟的 UO_2 燃料。

1.8 冷却剂

目前可用的液态金属冷却剂主要有 Na 、 K 、 NaK-78 合金以及 Li 金属等,主要物理性能如表1^[7]所示。为了提高堆芯温度,从而提高系统效率,本研究方案选择沸点较高的 Li 作为堆芯冷却剂。 Li 的热物理性能好、密度小,可以减轻系统质量,降低系统循环能耗。

表1 液态金属冷却剂的主要性能参数
Table 1 Main performance parameters of liquid metal coolant

冷却剂	熔点/K	沸点/K	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	工作范围/K
Na	317	1153	0.982	800~1300
K	336	1032	0.828	600~1100
NaK-78	262	1057	1.25	—
Li	454	1615	0.523	1000~1800

1.9 反射层

常用的反射层主要有 H_2O 、 D_2O 、 Be 、 BeO 和石墨等。 H_2O 和 D_2O 常用于水冷动力堆中,但 H_2O 和 D_2O 的熔点和沸点低,应用时需要密封加压,增加了结构的复杂性,另外 H_2O 和 D_2O 在月球表面存在结冰问题。石墨在辐照时的物理和力学性能均会下降,在月球表面核反应堆中一般不采用。 Be 和 BeO 的工作温度较高,反射能力强于石墨,适合于体积较小的堆芯。 Be 的密度小、刚度大、热容量高,同时具有优异的加工性能,但 Be 的塑性以及抗高温氧化和抗辐照肿胀性能差。 BeO 除了具备 Be 的优良性能外,还克服了 Be 的部分缺点,导热性能好,热膨胀系数小,抗高温氧化性能好,并具有良好的耐热冲击性。本方案选择熔点较高的 BeO 作为反射层。

2 总体方案设计

2.1 电源方案

根据上述设计思路,确定核反应堆电源采用斯特林转换、 Li 热管冷却的快堆,采用 K 热管式辐射器进行废热排放、月壤屏蔽、转动控制鼓控制反应性。核反应堆电源的各个部件采用一体化布置方式,可以减少电源在月球表面的安装工作。为了避免系统单点失效,热电转换方面考虑采用8个独立工作的自由活塞式斯特林发动机,废热排放方面考虑采用4个独立的辐射器。经过反应堆物理、热工和结构等优化设计后的核反应堆电源总体设计参数见表2。

2.2 堆芯

核反应堆电源的堆芯为正六边形结构,对边距为21 cm,活性区高40 cm,如图1所示。

表2 核反应堆电源的总体设计参数

Table 2 Main design parameters of nuclear reactor power system

参数	数值
反应堆热功率/ kW	210
堆芯冷却剂	Li-7
热管蒸发段温度/ K	1350
斯特林发动机热端温度/ K	1300
斯特林发动机冷端温度/ K	700
斯特林发动机额定功率/ kW	6
热电转换效率/%	23
辐射器表面平均温度/ K	630
辐射器面积/ m^2	36(单面18)
燃料芯块材料	UO_2
燃料富集度/%	90
燃料芯块直径/ cm	1.28
燃料芯体长度/ cm	40
燃料包壳材料	Mo-14\%Re
反射层材料	BeO
控制鼓数量	6
吸收体材料	B_4C
电功率/ kW	40
寿命/a	8

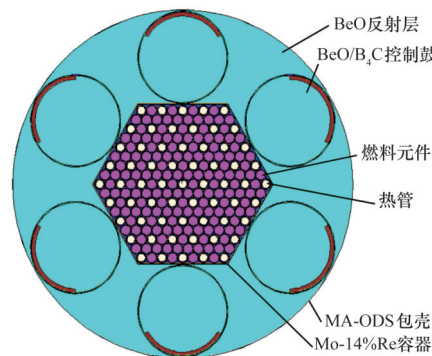


图1 堆芯结构模型

Fig. 1 Scheme of reactor core

堆芯共有156根燃料元件和61根热管,燃料元件与热管的外径相同,采用相对紧凑的正三角栅格布置。为了保证在单点失效时堆芯性能不降低,每根燃料元件都至少由两根热管冷却。燃料芯体材料为 U-235 富集度90%的 UO_2 ,密度为 10.42 g/cm^3 (取理论密度的95%),包壳材料为 Mo-14\%Re 合金。燃料元件总长52 cm,外径1.39 cm,包壳壁厚0.05 cm,芯体直径1.28 cm,与包壳间有0.005 cm的 He 气间隙。芯体两端各有5 cm的 BeO 反射层,同时在元件上端有2 cm的空腔,用于容纳裂变气体。

活性区的外围为轴向和径向 BeO 反射层,其中轴向反射层厚3 cm,径向反射层外径46 cm,反射层包壳为0.2 cm的 MA-ODS 956 合金。6个外径为12.1 m的 $\text{BeO/B}_4\text{C}$ 控制鼓均

匀布置在径向反射层内,控制鼓包壳为 MA-ODS 956 合金, B_4C 吸收体厚为 0.5 cm。为了确保在发射失败事故中反应堆不临界,堆芯容器及栅板材料采用 Mo-14%Re 合金,同时在反射层包壳和堆芯容器外围均涂覆一层厚度为 0.01 cm 的 Gd_2O_3 。Re 和 Gd_2O_3 均是性能优异的谱移吸收体材料^[8],对于热中子具有较大的吸收截面,对快中子的吸收截面较小,因此当反应堆发射过程中因事故跌入水中或湿沙子中时,该材料有利于使反应堆处于次临界状态。

2.3 中子物理

经 MCNP(monte carlo neutron and photo transport code) 程序计算得到反应堆在初始冷态和事故时的临界参数如表 3 所示,可以看出反应堆在初始冷态及寿期末的有效增殖系数 $k_{eff} > 1.005$,卡棒及事故时的 $k_{eff} < 0.98$,满足正常运行和事故时安全要求及寿期要求。反应堆在初始冷态时的有效增殖系数大于初始热态时的有效增殖系数,反应堆的温度系数为负值,因此可以认为该反应堆具有固有安全性。

表 3 反应堆临界参数计算结果
Table 3 Critical parameters of nuclear reactor power system

状态	k_{eff}	$\Delta k/k/\%$
初始冷态堆芯(控制鼓全旋转至外侧)	1.01399	1.38
初始热态堆芯(控制鼓全旋转至外侧)	1.01258	1.24
冷态堆芯(控制鼓全旋转至内侧)	0.87994	-13.64
寿期末热态堆芯(控制鼓全旋转至外侧)	1.00613	0.61
一个转鼓卡在外侧,其余转鼓旋转至内侧	0.90091	-11.00
反应堆掉入干沙子中	0.88943	-12.43
反应堆掉入湿沙子中(堆芯未进水)	0.88347	-13.19
反应堆掉入湿沙子中(堆芯内进水)	0.96622	-3.50
反应堆掉入水中(堆芯未进水)	0.88261	-13.30
反应堆掉入水中(堆芯内进水)	0.96589	-3.53
裸堆(反射层脱落)掉入干沙子中	0.94405	-5.93
裸堆掉入湿沙子中(堆芯未进水)	0.81296	-23.01
裸堆掉入湿沙子中(堆芯内进水)	0.91087	-9.79
裸堆掉入水中(堆芯未进水)	0.75461	-32.52
裸堆掉入水中(堆芯内进水)	0.86288	-15.89

计算得到寿期初堆芯内主要是能量大于 0.1 MeV 的快中子,平均中子注量率为 $2.35 \times 10^{13} / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,最大中子注量率在活性区中心位置附近,约为 $3.4 \times 10^{13} / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,8 年寿期内堆芯部件的最大中子注量为 $8.57 \times 10^{21} / \text{cm}^2$,最大快中子注量为 $7.42 \times 10^{21} / \text{cm}^2$ 。

寿期初的堆芯功率分布如图 2 和图 3 所示。

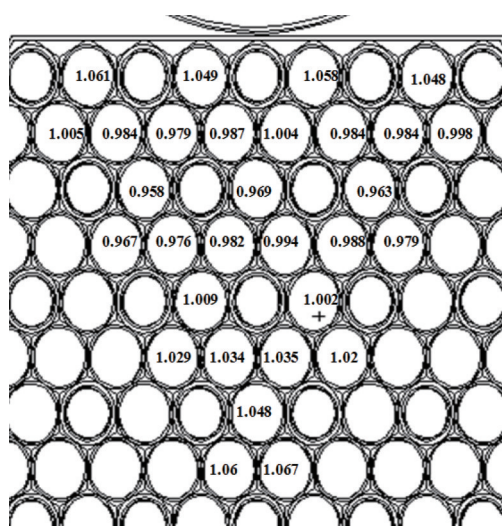


图 2 1/6 堆芯相对功率分布

Fig. 2 Relative power distribution of 1/6 reactor core

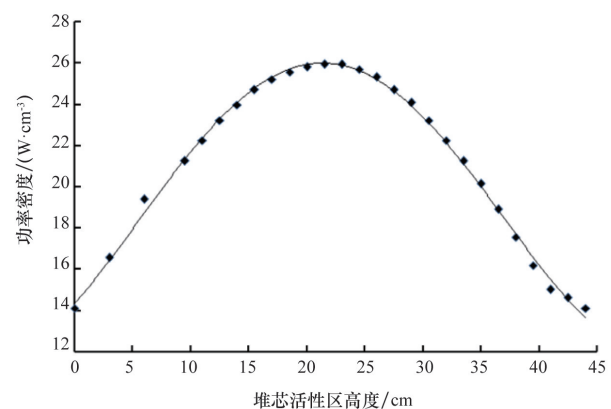


图 3 堆芯轴向功率分布

Fig. 3 Axial power distribution of reactor core

其中图 2 为堆芯径向相对功率分布,由于堆芯为正六边形,对称布置,因此径向功率分布仅计算 1/6 堆芯即可,轴向功率分布计算堆芯内全部燃料芯体。可以看出燃料元件的功率密度随着径向距离的增加缓慢下降,在靠近反射层区域时功率密度又呈现上升趋势,主要由于径向反射层返回了较多的中能中子,使功率产生上扬现象。燃料元件的轴向功率密度分布与中子注量率分布趋势一致,近似于余弦分布,最大轴向功率密度在堆芯中平面附近。从具体数值看,燃料

元件的径向和轴向功率分布较为平缓,不均匀系数分别为1.067和1.22,燃料元件的平均功率密度为 21.34 W/cm^3 ,最大功率密度为 25.94 W/cm^3 ,功率输出能力较好。相关参数将作为热工水力分析的输入参数。

2.4 热工分析

热工分析的目的在于验证系统方案的合理性,确保核反应堆电源在正常和事故工况下温度在允许限值内,保证电源在额定工况下可以产生 40 kW 的电功率以及在8年寿期的条件下能够安全地排放废热。经分析计算得到堆芯内燃料芯块的最高温度为 1550 K ,包壳最高温度为 1400 K ,均小于 UO_2 和 Mo-14\%Re 的使用温度,可满足安全要求。废热排放分析时,考虑月球表面灰尘以及辐射器自身老化对散热能力的影响,预留20%裕量。计算时取辐射器表面的平均温度为 630 K ,在8年寿期内可以将 162 kW 的废热有效排出,满足热工要求。

2.5 屏蔽分析

屏蔽分析是为了确保月球基地上人员和机电设备所受辐射剂量在合理范围内。采用月壤屏蔽时在堆芯径向和顶部均设置4层屏蔽材料,屏蔽材料由内至外分别是 B_4C 、 W 、 B_4C 和 LiH 。 B_4C 和 LiH 用于屏蔽中子, W 用于屏蔽 γ 光子。经计算得出核反应堆电源外围剂量随反应堆所埋的深度增加而减少,当反应堆所埋深度为 1.6 m 时,距离堆芯 100 m 处的月球表面年剂量值为 0.2 mSv ,堆芯上方月球表面 γ 剂量为 3.6 Mrad ,中子注量为 $2.3 \times 10^{14}/\text{cm}^2$,可以满足剂量限值要求^[9]。

2.6 总体结构

月球表面核反应堆电源的总体结构如图4所示,系统总高 4.2 m ,6个控制鼓由6个独立的电机驱动,4个辐射器在水平方向均匀布置,展开时的系统辐射器总长 10 m ,折叠后系统的包络尺寸约为 $\phi 2.8 \text{ m}$ 。8个斯特林发动机的热端均匀分布在 Li 热管加热的换热器内,采用换热器一方面可以使热量均匀分配给8个斯特林发动机,同时可以起到部分屏蔽的作用。经估算得到核反应堆电源的总质量约为 2.3 t ,比功率为 17 W/kg 。

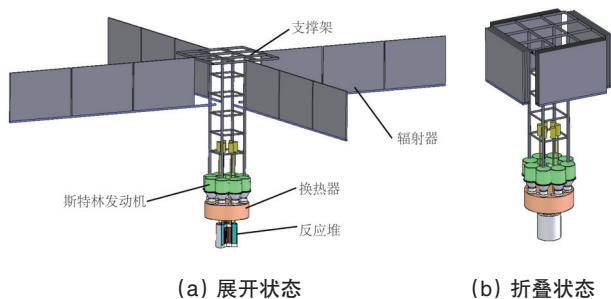


图4 核反应堆电源的总体结构示意图

Fig. 4 General configuration of nuclear reactor power system

3 结论

核电源系统具有功率大、寿命长、环境耐受能力强等优点,是未来星球表面基地及其他深空探测任务中的理想能

源。本文提出了功率 40 kW 、寿期大于8年的月球基地核电源系统的设计理念,采用斯特林转换、液态金属 Li 冷却堆芯、热管式辐射器散热、月壤屏蔽和转动控制鼓控制反应性,并从堆芯物理、屏蔽、热工、结构等方面对系统进行了初步的计算和分析。该方案具有工作温度高、转换效率高、可靠性高、尺寸小、结构紧凑等特点。系统通过采用一体化布置方式,减少了在月球表面的安装工作。通过采用热管冷却堆芯,避免冷却剂的结冰-融化问题。通过将斯特林发动机的热端均布在换热器中,简化了热管与斯特林发动机的连接,同时可以使热量均匀分配给8个斯特林发动机。在给定电功率的情况下,通过采用热电转换效率较高的斯特林发动机,降低了堆芯的热功率,从而使得需要排放的废热量大大减小,降低了 K 热管的需求量,有利于减小电源系统的体积和质量。通过设置8个独立工作的斯特林发动机、4个垂直布置的辐射器以及采用热管冷却堆芯,可以有效避免热电转换、废热排放及堆芯冷却系统的单点失效问题,提高了系统的可靠性。最终分析结果表明,该系统方案合理可行,能够满足月球基地电源需求以及安全和寿期要求。下一步需完善系统参数,优化系统结构,同时对系统安全性进行深入研究。

参考文献 (References)

- [1] 邓连印, 郭继峰, 崔乃刚. 月球基地工程研究进展及展望[J]. 导弹与航天运载技术, 2009, 300(2): 25-30.
- [2] Deng Lianyin, Guo Jifeng, Cui Naigang. Progress and prospects of engineering for lunar bases[J]. Missile and Space Vehicle, 2009, 300 (2): 25-30.
- [3] Lee Mason, David Poston, Louis Qualls. System concepts for affordable fission surface power[R]. Brook Park, Cleveland, and Fairview Park, Ohio: Glenn Research Center, 2008.
- [4] Shaltens R K. Future opportunities for dynamic power systems for NASA missions[C]. International Stirling Forum 2006, Osnabruck, Germany, 2006.
- [5] 冉旭, 单建强, 朱继洲. 空间核反应堆概述[J]. 国外核动力, 2004, 25 (5): 1-5.
- [6] Ran Xu, Shan Jianqiang, Zhu Jizhou. Summary of space nuclear reactor power[J]. Foreign Nuclear Power, 2004, 25(5): 1-5.
- [7] Lee M. A comparison of fission power system options for lunar and Mars surface applications[R]. Brook Park, Cleveland, and Fairview Park, Ohio: Glenn Research Center, 2006.
- [8] Bushman A, Carpenter D M, Ellis T S, et al. The Martian surface reactor: An advanced nuclear power station for manned extraterrestrial exploration[R]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [9] 李桂云, 屠进. 高温热管工质的选择[J]. 节能技术, 2001, 19(105): 42-44.
- [10] Li Guiyun, Tu Jin. Working fluid choicing for high temperature heat pipe[J]. Energy Conservation Technology, 2001, 19(105): 42-44.
- [11] King J C, El-Genk M S. Submersion criticality safety of fast spectrum space reactors potential spectral shift absorbers[J]. Nuclear Engineering and Design, 2006, 236(3): 238-254.
- [12] Fission Surface Power Team. Fission surface power system initial concept definition[R]. Brook Park, Cleveland, and Fairview Park, Ohio: Glenn Research Center, 2010.

(编辑 陈华姣)