

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.S.010

一种基于光谱自适应调控和月壤储热的月夜发电系统

孙文淦, 赵斌, 石凌峰, 胡茂彬, 李木军, 裴刚

(中国科学技术大学工程科学学院, 合肥 230026)

摘要: 针对月球基地的能量储存及月夜期间能量供应问题, 提出了一种基于光谱自适应吸收/发射平板和月壤储热的月夜发电系统。该系统通过使用加工后的月球土壤以实现月昼期间储存太阳辐射能量、月夜期间放热发电的功能。此外, 该系统通过使用一种光谱自适应吸收/发射平板, 在月昼期间实现太阳辐射波段(0.3~2.5 μm)高吸收和红外波段(3~30 μm)低发射特性、在月夜期间实现红外波段(3~30 μm)高发射特性, 将太阳能集热平板与辐射散热平板合二为一, 极大地减少了地月运输的有效载荷, 降低了发射成本。模拟结果显示, 该系统的比功率约为 5.12 W/kg, 而光伏-锂电池系统的比功率约为 0.83 W/kg。此外, 与储能总量相同的光伏-锂电池系统相比, 该系统的发射总质量降低了约 83%。

关键词: 月壤储热; 太阳能热发电; 光谱自适应调控

中图分类号: V11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2022)S-0061-07

A Lunar Night Power Generation System Based on Spectral Adaptive Regulation and Lunar Soil Heat Storage

SUN Wengan, ZHAO Bin, SHI Lingfeng, HU Maobin, LI Mujun, PEI Gang

(School of Engineering Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Aiming at the problem of the energy storage and supply of the lunar base for the lunar nights, a lunar night power generation system based on the spectral adaptive absorption/ emission panel and the lunar soil heat storage is proposed. By using the processed lunar soil, the system can store solar radiative energy during lunar days and generate electricity during lunar nights. In addition, the system achieves high absorption in the solar radiation band (0.3—2.5 μm) and low emission in the infrared band (3—30 μm) during lunar days, and realizes high infrared emission during lunar nights by using a spectrally adaptive absorption/emission panel. The solar collector panel and the radiation heat dissipation panel are combined into one to greatly reduce the payload during earth-moon transportation and the launch cost. The simulation results show that the specific power of this system is about 5.12 W/kg, while the specific power of the photovoltaic-lithium battery system is about 0.83 W/kg. Besides, the total launch mass of the system is reduced by about 83% compared with the photovoltaic-lithium battery system with the same amount of energy storage.

Key words: lunar soil heat storage; solar thermal power generation; spectrum adaptive regulation

作为地球唯一的天然卫星, 月球是人类开展深空探测活动的前哨站, 也是潜在的矿产和能源资源

储备库。从 20 世纪 60 年代至今, 人类已经通过向月球发射探测器成功获取了超过 382 kg 的月球土

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1900602)。

收稿日期: 2022-04-21; **修订日期:** 2022-06-28

通信作者: 裴刚, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: peigang@ustc.edu.cn。

引用格式: 孙文淦, 赵斌, 石凌峰, 等. 一种基于光谱自适应调控和月壤储热的月夜发电系统[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(S): 61-67. SUN Wengan, ZHAO Bin, SHI Lingfeng, et al. A lunar night power generation system based on spectral adaptive regulation and lunar soil heat storage[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(S): 61-67.

壤,极大地促进了人类对于月球和宇宙的探索进程^[1]。2020年12月17日凌晨,嫦娥五号探测器携带月壤样品成功返回地球,中国首次实现了月球无人采样返回,这将助力月球成因和演化历史等科学研究。2022年1月28日,中国政府在《2021中国的航天》白皮书中明确指出:“未来五年,中国将继续实施月球探测工程,……,与相关国家、国际组织和国际合作伙伴共同开展国际月球科研站建设。”^[2]月球基地建设相关领域的研究正逐渐成为时代的热点,吸引了国内外众多研究者的目光。

能源问题是月球基地建设的核心问题。目前,太阳能光伏发电技术是深空探测活动的主要能源供应技术。然而,月球的自然环境与地球有很大不同,月球绕地球公转的周期约为29.53天,这导致月球的昼夜时长均超过14天^[3]。因此,在漫长月夜期间用于月球基地供电所需要的储能装置的质量极其庞大^[4],这极大地增加了地月运输的成本,制约着未来月球探测活动与月球基地建设的进程。月球基地的另一个能源供应方案是核动力电池技术。虽然核能可以为月球基地提供持续稳定的能源,但该技术需要额外的辐射屏蔽设备,也会增加地月运载火箭的载荷。此外,核动力技术的安全性及可靠性也是目前人们所担忧的问题。

原位资源利用(In-situ resource utilization, ISRU)技术可以在一定程度上解决月球基地夜间能源供应问题。1968年,Barna等研究了利用月球风化层土壤储存能量的可行性^[5];1991年,Crane在报告中详细介绍了应用原位资源储能技术的月球基地太阳能动力系统^[6];2009年,Robert等分析了利用加工后的月球土壤作为储热材料的月球基地发电系统,并提出可以利用月壤制氧产生的烧结月壤作为储热材料,还提出利用着陆器的废弃推进剂储罐作为储热罐的观点,实现对资源的最大化利用^[7]。除此之外,还有许多国内外团队对月壤储热发电系统开展了研究^[4,8-11]。

本文介绍了一种基于光谱自适应吸收/发射平板和月壤储热的月球夜间发电系统。该系统使用一种基于VO₂的光谱自适应吸收/发射平板,这种平板通过温度控制的光谱自适应调控,分别在月昼和月夜实现太阳能集热和辐射散热两种功能,因此也称作光谱自适应调控平板。该系统可以减少运载火箭的发射重量,降低月球基地夜间能源供应系统的建设成本。本文通过现有理论模型模拟该系统的性能,并比较该系统与光伏-锂电池系统的比功率,为今后月夜储能发电技术的发展提供一定的参考和建议。

1 系统概述与理论模型

1.1 系统概述

本文介绍的基于月壤储热的月夜发电系统如图1所示。该系统主要包括光谱自适应调控平板、月壤储热器、斯特林发电机以及传热管道等辅助设施。在月昼期间,光谱自适应调控平板迅速升温进入集热模式,收集太阳辐射能量并将热量储存在加工后的月壤中(图1(a))。在月夜期间,光谱自适应调控平板迅速降温进入辐射散热模式。此时,储存在月壤储热器中的热量供给斯特林发电机,发电机低温流体端将余热通过光谱自适应调控平板辐射至低温外太空(图1(b))。这样,斯特林发电机就相当于以月壤储热器为热源、以低温外太空为热源发电。

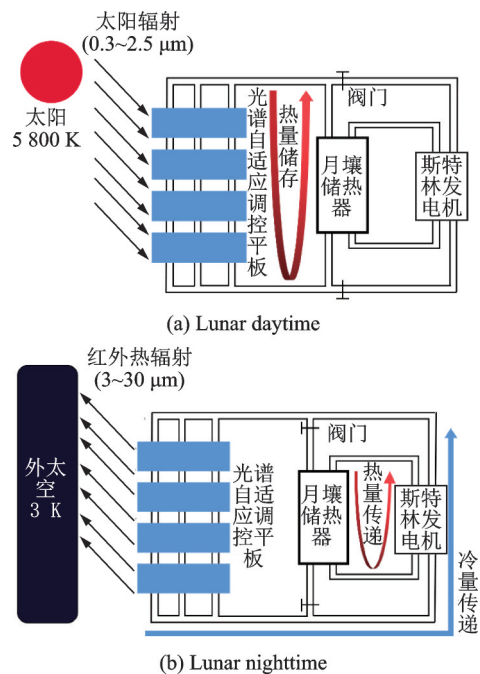


图1 基于月球原位资源利用的太阳能热发电系统示意图
Fig.1 Schematic of a solar thermal power system based on lunar ISRU

1.2 光谱自适应调控平板

本文使用一种基于VO₂光谱自适应光热-辐射制冷(Photothermal-radiative cooling, PT-RC)涂层的自适应调控平板。该涂层主要由VO₂层、红外发射层和辅助层构成。VO₂在68℃左右会发生从绝缘态到金属态的相变,同时其红外波段的光谱特性也由高透过变为高反射^[12]。因此通过光谱调控技术可以设计出根据温度变化自动调控光谱选择特性的PT-RC涂层,图2(a)即为一种基于VO₂的光谱自适应PT-RC涂层示意图^[13],其工作原理为:VO₂和辅助层协同实现涂层在太阳辐射波段(0.3~2.5 μm)的高吸收特性;当温度低于相

变温度时,VO₂表现出红外波段(3~30 μm)高透过特性,红外发射层的热辐射可以透过VO₂层,涂层整体表现出红外波段高发射特性;当温度高于相变温度时,VO₂层表现出红外波段高反射特性,红外发射层的红外热辐射不能透过VO₂层,涂层整体表现出红外波段低发射特性^[13]。模拟中使用的一种理想的VO₂-PT-RC涂层相变前后的光谱选择特性如图2(b)所示,其相变温度设置为60℃。

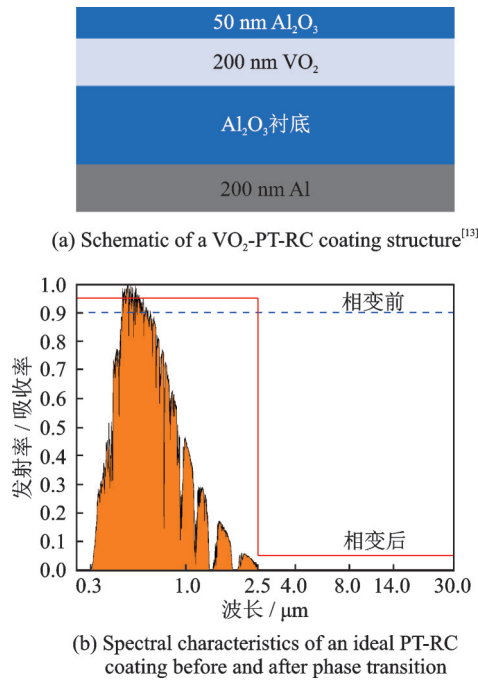


图2 一种基于VO₂的PT-RC涂层结构示意图^[13]及一种理想PT-RC涂层相变前后的光谱特性

Fig.2 Schematic of a VO₂-PT-RC coating structure^[13] and spectral characteristics of an ideal PT-RC coating before and after phase transition

1.3 理论模型

1.3.1 太阳能集热和辐射散热

由于月球自转轴相对于月球黄道的倾角只有1.54°,因此投射到月球表面的太阳辐射强度随季节的变化可以忽略^[14]。在一个月球日(约29.53天)内,月昼期间到达月球赤道表面的太阳辐射强度呈正弦曲线分布,其峰值强度约为1 300 W/m²^[8]。通过使用太阳能跟踪器,光谱自适应调控平板可以在月昼期间收集到更多的太阳辐射能量。

月昼期间,光谱自适应调控平板吸收太阳辐射迅速升温达到相变温度,其红外光谱特性由高发射变为低发射。此时,平板处于集热模式,集热平板与月壤储热器之间的管道阀门打开,与斯特林发电机之间的管道阀门关闭,来自太阳的辐射能量持续不断输入月壤储热器。在忽略太空冷源(3 K)辐射的情况下,光谱自适应调控平板收集到的净能量通

量可以表示为

$$Q = A(\alpha q_{\text{sun}} - \epsilon \sigma T^4) \quad (1)$$

式中: A 为光谱自适应调控平板面积; α 为月昼期间光谱自适应调控平板太阳辐射波段(0.3~2.5 μm)光谱吸收率; q_{sun} 为太阳辐射强度; ϵ 为月昼期间光谱自适应调控平板红外波段(3~30 μm)光谱发射率; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T 为光谱自适应调控平板温度。

月夜期间,在没有太阳辐射能量输入的条件下,光谱自适应调控平板的温度迅速降低至相变温度以下,其光谱特性由红外低发射转变为红外高发射,光谱自适应调控平板与月壤储热器之间的管道阀门关闭,与斯特林发电机之间的管道阀门打开。此时,光谱自适应调控平板充当斯特林循环的冷源,以红外辐射的形式向外太空散失热量。在忽视太空背景辐射的情况下,其辐射热通量为

$$q_{\text{rad}} = \epsilon A \sigma T^4 \quad (2)$$

式中 ϵ 为月夜期间光谱自适应调控平板红外波段(3~30 μm)光谱发射率。

1.3.2 月壤储热

由于原始月壤的孔隙率大,其热导率只有约0.012 W/(m·K),因此需要对月壤进行压实、烧结或熔融处理增加其导热率^[15]。月壤富含大量氦-3、氧及众多金属元素,Balasubramaniam等提出可以通过热化学或电化学的方法还原月壤,生产富含金属或氧气的产品,其副产品即可用于储热^[16]。以往关于月壤储热的模拟研究表明,一维模型可以比较准确地模拟月壤储热^[16]。因此,简化的储热层控制方程可以表示为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad 0 \leq x \leq h \quad (3)$$

边界条件为

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = q \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=h} = 0 \quad (5)$$

式中: a 为加工后月壤的热扩散率; k 为加工后月壤的热导率;月昼期间, q 为从集热平板传入月壤储热器的能量;月夜期间, q 为从月壤储热器传入斯特林热机的能量。

1.3.3 斯特林发电机

轮机的高热效率将减少必须的储热量,并减少太阳能集热平板和辐射散热平板的质量,从而降低包括月地运输、系统搭建在内的建设成本。因此,许多研究者考虑使用热效率较高的斯特林发电机作为月壤储热发电的参考发电单元^[7]。斯特林循环

是一种采用定容下回热、热力学理论上最完善的闭式概括性卡诺循环。理想的斯特林循环由两个定容过程和两个定温过程组成,其T-S曲线如图3所示。

从状态1到状态2,工质在 T_h 的等温工况下从温度为 T_H 的热源吸热膨胀并推动活塞做功;从状态2到状态3,高温工质在定容条件下在回热器中放热;从状态3到状态4,工质在 T_c 的等温工况下向温度为 T_C 的冷源放热并被活塞压缩;从状态4到状态1,低温工质在定容条件下在回热器中吸收2~3过程中高温工质放出的热量。

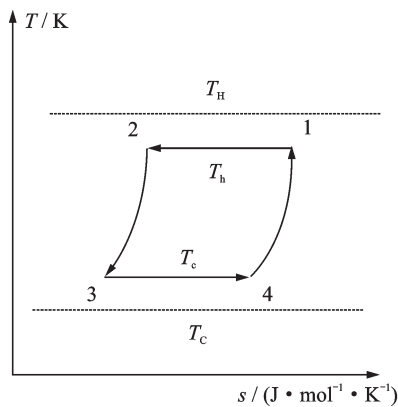


图3 斯特林循环温度-熵图

Fig.3 T-S diagram of Stirling cycle

在实际循环中,回热器中不可避免地存在传热损失 ΔQ_R ,此外,循环过程中还存在从热源到冷源之间的热泄漏损失 Q_0 ^[17],即

$$\Delta Q_R = nC_v(1 - \epsilon_R)(T_h - T_c) \quad (6)$$

$$Q_0 = k_0(T_H - T_C) \quad (7)$$

式中: n 为工质的摩尔数; C_v 为工质的定容摩尔比热; ϵ_R 为回热器的有效性; T_h 、 T_c 分别为工质在高温和低温两个等温过程中的温度; k_0 为斯特林发电机热源到冷源的热泄漏系数; T_H 、 T_C 分别为热源和冷源的温度; τ 为经历一次斯特林循环所需要的时间,包括两个等温过程与两个等容过程所需要的时间,则 τ 可以表示为

$$\tau = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \quad (8)$$

其中 t_1 和 t_2 可分别通过等温吸热和放热过程计算,即

$$Q_h = U_H A_H (T_H - T_h) t_1 = nR_h \ln \lambda \quad (9)$$

$$Q_c = U_C A_C (T_c - T_C) t_2 = nR_c \ln \lambda \quad (10)$$

式中: Q_h 和 Q_c 分别为两个等温过程中的吸热量和放热量; $U_H A_H$ 和 $U_C A_C$ 分别为热源和冷源的换热系数与换热面积的乘积; R 为通用气体常数, $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; λ 为循环体积比。

计算回热过程所需时间 t_3 和 t_4 的一种方法为^[18]

$$t_3 = t_4 = (T_h - T_c)/M \quad (11)$$

式中 M 为比例常数,它与温差无关,只依赖回热材料的性质,称为回热时间常数。

考虑主要的传热损失和热泄漏损失,则工质从热源吸收的热量和到冷源散失的热量可以表示为

$$Q_H = Q_h + Q_0 + \Delta Q_R \quad (12)$$

$$Q_C = Q_c + Q_0 + \Delta Q_R \quad (13)$$

循环功率输出和热效率可以表示为

$$P = \frac{W}{\tau} = \frac{Q_H - Q_C}{\tau} \quad (14)$$

$$\eta = \frac{Q_H - Q_C}{Q_H} \quad (15)$$

P 、 η 是变量 T_h 和 T_c 的函数,因此通过令 $\partial P/\partial T_h = 0$ 及 $\partial P/\partial T_c = 0$,可以优化 P 和 η ,得到式(16~19)。

$$P_{\max} = \frac{K(\sqrt{T_H} - \sqrt{T_C})^2}{1 + B_1 K(\sqrt{T_H} - \sqrt{T_C})} \quad (16)$$

式中: $B_1 = 2/(nRM \ln \lambda)$, $K = U_H A_H U_C A_C / (\sqrt{U_H A_H} + \sqrt{U_C A_C})^2$

最优热效率为

$$\eta_{\max} = \frac{\eta_{CA}}{(1 + A_1 \eta_{CA}) + \frac{k_0(T_H - T_C)(1 + B_1 K T_H \eta_{CA}^2)}{K T_H \eta_{CA}}} \quad (17)$$

式中

$$A_1 = C_v(1 - \epsilon_R)/(R \ln \lambda), \eta_{CA} = 1 - \left(\frac{T_H}{T_C}\right)^2$$

此时,工质在两个等温过程中的最佳工作温度分别为

$$T_h = \frac{T_H \sqrt{\frac{U_H A_H}{U_C A_C}} + \sqrt{T_H T_C}}{1 + \sqrt{\frac{U_H A_H}{U_C A_C}}} \quad (18)$$

$$T_c = \frac{T_C + \sqrt{T_H T_C} \frac{U_H A_H}{U_C A_C}}{1 + \sqrt{\frac{U_H A_H}{U_C A_C}}} \quad (19)$$

2 结果与分析

利用式(1~19)建立了基于月壤储热的太阳能发电系统的简化模型并对系统性能进行了模拟,模拟中使用的一些参数的设定值见表1。

当使用太阳能跟踪器作为辅助设备时,可以假定月昼期间到达平板集热器表面的太阳辐射强度恒定为 $1300 \text{ W}/\text{m}^2$,在此条件下对系统性能进行模拟。

图4为月壤储热器温度、光谱自适应平板温度以及斯特林发电机工质两个等温过程的温度随时

间的变化曲线。月壤储热器初始温度设置为 100 K,在经历一个月球日的预储热之后,斯特林发电机开始在月夜期间利用储存的热量发电。从图 4 中可知,系统在 5 个月球日之后运行状况比较稳定。在系统运行稳定之后,月壤储热器在月昼期间的最高温度约为 786 K,其最低温度约为 558 K。在月夜,斯特林发电机中工质的最高温度从 619 K 降低到 466 K,最低温度从 355 K 降低到 311 K;平板散热器的温度从 260 K 降低到 250 K。

表 1 模拟中使用的参数值

Table 1 Parameter values used in the calculation

参数	数值
平板面积 A / m^2	30
平板月夜期间红外波段(3~30 μm) 发射率 ϵ	0.9
平板月昼期间红外波段(3~30 μm) 发射率 ϵ	0.05
平板月昼期间太阳辐射波段(0.3~2.5 μm) 吸收率 α	0.95
加工后月壤密度 $\rho / (kg \cdot m^{-3})$	3 000
加工后月壤比热容 $C / (J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	1 300
加工后月壤热导率 $k / (W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	2.1
加工后月壤热扩散率 $a = k / \rho C / (m^2 \cdot s^{-1})$	5.4×10^{-7}
回热器的有效性 ϵ_R	0.9
冷、热源换热系数与换热面积的乘积 $U_H A_H, U_C A_C / (W \cdot K^{-1})$	200
循环体积压缩比 λ	2
热泄漏系数 $k_o / (W \cdot K^{-1})$	2.5
回热时间常数 $M / (K \cdot s^{-1})$	8 000

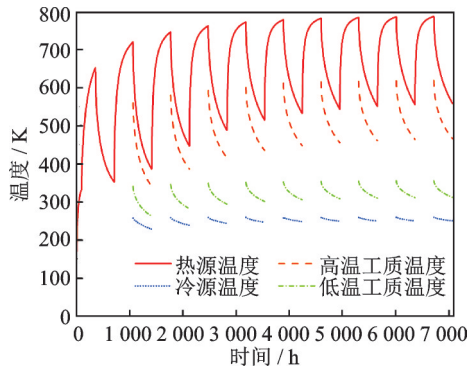


图 4 有太阳能跟踪器的月壤储热发电系统温度随时间变化图

Fig.4 Temperature variation of lunar soil thermal storage power generation system with solar tracker with time

图 5 展示了系统在稳定运行的一个月夜期间的输出功率变化。从图 5 可以看到,月夜期间系统输出功率从约 5 661 W 降低到 2 621 W 左右,平均输出功率约为 3 459 W。

目前,每平方米平板太阳能集热器的质量在 15~38 kg 不等。以型号为 FPC-E20 的 Apricus 平板太阳能集热平板为例,该集热平板总面积为

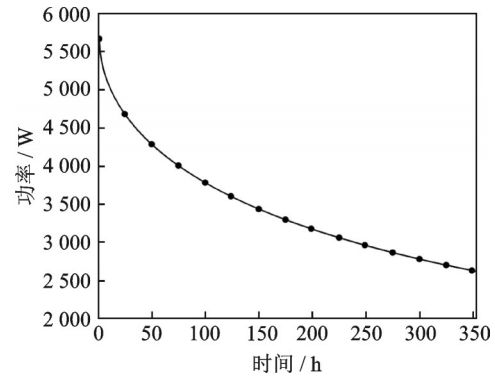


图 5 有太阳能跟踪器的月壤储热发电系统功率随时间变化图

Fig.5 Power variation of lunar soil thermal storage power generation system with solar tracker with time

2 m²、总干重为 30 kg。此外,由于月球表面为真空环境,不需要玻璃盖板降低对流热损,因此月球环境下 30 m²上述太阳能集热平板的质量约为 210 kg (每块集热平板玻璃盖板厚 3.2 mm,质量为 16 kg);由于月球重力仅为地球重力的六分之一,且月表无空气,因此太阳能跟踪系统对于承重与防风的需求减弱。以一款 15 组件的太阳能跟踪系统为例,其总质量约为 900 kg,则可以假设月球环境下的太阳能跟踪系统的质量为 150 kg;斯特林发电机质量取 115 kg,管道等其他设备质量取 200 kg^[4],则系统总质量约为 675 kg,储热发电系统的比功率约为 5.12 W/kg。一个月夜约为 354 h,因此系统理论上可以达到 1 812 Wh/kg 的储能密度。

相较于使用锂电池储能的光伏发电系统,要满足月夜期间 354 h、平均 3 459 W 的功率输出,即使取 300 Wh/kg 的储能密度,也需要至少 4 081.6 kg 的电池质量^[19]。在配备光伏电池之后,光伏-锂电池系统的比功率低至 0.83 W/kg。因此,使用月壤储热的太阳能热发电系统理论上可以极大地减少地月之间的运输重量,降低发射成本。

当不使用太阳能跟踪装置时,集热平板收集到的太阳辐射强度随时间大致呈正弦曲线变化,可以简化为

$$q_{\text{sun}} = \sin\left(\frac{\pi t}{1\,274\,400}\right) \quad 0 < t < 1\,274\,400 \quad (20)$$

图 6 为无太阳能跟踪器时,月壤储热发电系统温度随时间变化曲线。与跟踪式发电系统不同,在月昼期间,当太阳辐射强度降低到一定程度时,非跟踪式系统将关闭集热平板与储热器之间的管道阀门,此时储热器进入保温模式。从图 6 中可以看到,在经过两个月球日的预储热之后,斯特林发电机开始在月夜期间利用月昼储存的热量发电。在无太阳能跟踪装置的情况下,系统在 5 个月球日之

后稳定运行,此时,储热器中加工后的月壤的温度变化区间为 478~663 K。在斯特林发电机工作期间,工质的最高温度从约 535 K 降低到约 409 K;工质最低温度从约 332 K 降低到约 291 K;平板散热器的温度从 255 K 降低到 242 K。

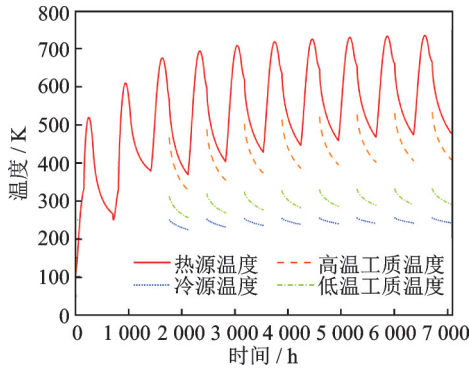


图6 无太阳能跟踪器的月壤储热发电系统温度随时间变化图

Fig.6 Temperature variation of lunar soil thermal storage power generation system without solar tracker with time

图7为非跟踪式系统在稳定运行的一个月夜期间的输出功率变化。从图中可以看到,月夜期间系统输出功率从约 4 016 W 降低到 1 750 W 左右,平均输出功率约为 2 377 W。非跟踪式储热发电系统的输出功率比跟踪式系统的输出功率降低了约 1 082 W。尽管减少了太阳能跟踪系统的重量,但相较于跟踪式储热发电系统,非跟踪式系统的比功率降低至 4.53 W/kg。

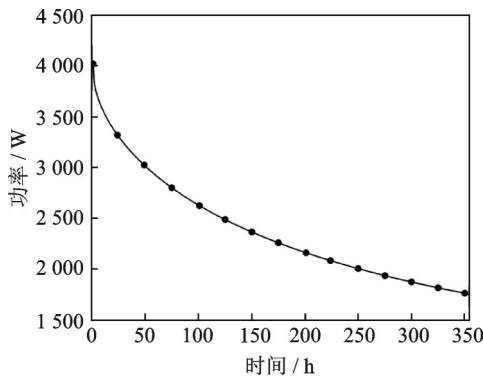


图7 无太阳能跟踪器的月壤储热发电系统功率随时间变化图

Fig.7 Power variation of lunar soil thermal storage power generation system without solar tracker with time

图8为跟踪式月壤储热发电系统的比功率随光谱自适应平板面积变化曲线。如图所示,在其他参数相同的情况下,系统在平板面积为 30 m² 的条件下实现了最大比功率,约为 5.12 W/kg。

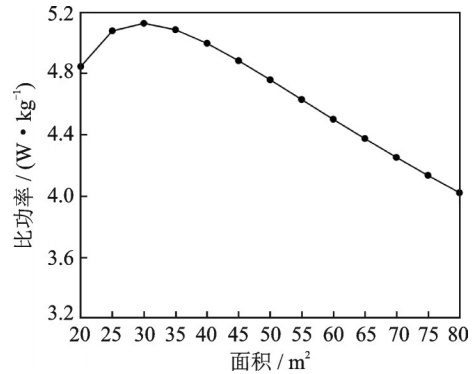


图8 月壤储热发电系统比功率随平板面积的变化

Fig.8 Variation of specific power of lunar regolith thermal storage power generation system with panel area

3 结 论

本文提出了一种基于光谱自适应调控平板和月壤储热的月夜发电系统;介绍了该系统的结构组成、工作原理及运行模式;模拟了系统在使用太阳能跟踪器和不使用太阳能跟踪器两种情况下的发电性能;分析了光谱自适应调控平板面积对于太阳能跟踪式发电系统比功率的影响。

研究表明,使用加工后的月壤储热发电可以作为月球基地在夜间的能量来源;从地月运输的成本角度分析,通过使用本文介绍的光谱自适应调控平板,可以将太阳能集热平板与辐射散热平板合二为一,可以极大地降低系统所需的运载负荷。模拟结果显示,该系统的比功率约为 5.12 W/kg。此外,与光伏-锂电池系统相比,月壤储热发电系统的发射质量降低了约 83%,极大地减少了发射成本。

在未来,可以通过研制更优性能的光谱自适应调控平板来提升系统比功率;此外,使用轻型材料和优化斯特林发电机的发电性能也是月壤储热发电系统未来的研究方向。

参考文献:

[1] 果琳丽. 载人月球基地工程[M]. 北京:中国宇航出版社, 2013.
 [2] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 2021 中国的航天[N]. 人民日报, 2022-01-29(005).
 [3] WILLIAMS D R. Moon fact sheet[EB/OL]. (2021-12-20). <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/moonfact.html>.
 [4] HU Dinghua, LI Mengmeng, LI Qiang. A solar thermal storage power generation system based on lunar in-situ resources utilization: Modeling and analysis[J]. Energy, 2021, 223(2):120083.
 [5] BARNAL G J, IOHNSON R L. Investigation of the use of the lunar surface layer to store energy for generating power during the lunar night[C]//

- Proceedings of Conference on Lasted International Conference on Artificial Intelligence & Applications. [S.l.]: [s.n.], 1968.
- [6] CRANE R A. Evaluation of in-situ thermal energy storage for lunar based solar dynamic systems[D]. Tampa: University of South Florida, 1991.
- [7] ROBERT S W, PAUL H H, JAMES H S, et al. Thermal energy storage and power generation for the manned outpost using processed lunar regolith as thermal mass materials[C]//Proceedings of AIAA SPACE 2009 Conference & Exposition. [S.l.]: AIAA, 2009.
- [8] BLAI C, OSCAR T, RICARD G, et al. Heat storage and electricity generation in the moon during the lunar night[J]. *Acta Astronautica*, 2014, 93: 352-358.
- [9] LU Xiaochen, MA Rong, CHAO Wang, et al. Performance analysis of a lunar based solar thermal power system with regolith thermal storage[J]. *Energy*, 2016, 107: 227-233.
- [10] PATRICK F, AIDAN G, ALBERTO C P, et al. In-situ approach for thermal energy storage and thermoelectricity generation on the moon: Modelling and simulation[J]. *Planetary and Space Science*, 2019, 181: 104789.
- [11] MARIO F, POL S, SONIA F, et al. Lunar ISRU energy storage and electricity generation[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 170: 412-420.
- [12] LIU Dongqing, JI Haining, PENG Renfu, et al. Infrared chameleon-like behavior from VO₂(M) thin films prepared by transformation of metastable VO₂(B) for adaptive camouflage in both thermal atmospheric windows[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018, 185: 210-217.
- [13] 敖显泽. 基于二氧化钒的光谱自适应光热-天空辐射制冷综合利用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
- AO Xianze. Study on integrated utilization of spectrally self-adaptive photo-thermal and radiative sky cooling based on vanadium dioxide[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.
- [14] MARCIN K, MARCIN G, GRZEGORZ P. Global database of direct solar radiation at the Moon's surface for lunar engineering purposes[J]. *E3S Web of Conferences*, 2018, 49(6): 00053.
- [15] BRIAN T, HUNTSVILLE A. Regolith thermal energy storage for lunar nighttime power[C]//Proceedings of AIAA/NASA/OAI Conference on Advanced SEI Technologies. [S.l.]: [s.n.], 1991.
- [16] BALASUBRAMANIAM R, GOKOGLU S A, SACKSTEDER K R, et al. Analysis of solar-heated thermal wadis to support extended-duration lunar exploration[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2011, 25(1): 130-139.
- [17] KAUSHIK S C, KUMAR S. Finite time thermodynamic evaluation of irreversible Ericsson and Stirling heat engines[J]. *Energy Conversion & Management*, 2001, 42(3): 295-312.
- [18] CHEN Jincan, SCHOUTEN J A. The comprehensive influence of several major irreversibilities on the performance of an Ericsson heat engine[J]. *Applied Thermal Engineering*, 1999, 19(5): 555-564.
- [19] WEN Jianping, ZHAO Dan, ZHANG Chuanwei. An overview of electricity powered vehicles: Lithium-ion battery energy storage density and energy conversion efficiency[J]. *Renewable Energy*, 2020, 162: 1629-1648.

(编辑:王静)