

发电-储能一体化柔性电源系统结构热特性 仿真研究

陆鸣雷¹, 张 圳¹, 周丽华², 王小顺², 叶晓军¹, 李红波¹, 孙利杰², 吴勇民², 靳 洋², 刘世超²

(1. 华东理工大学 材料科学与工程学院, 上海 200237;

2. 上海空间电源研究所 空间电源技术国家重点实验室, 上海 200245)

摘 要: 基于柔性薄膜砷化镓(GaAs)太阳能电池、全固态薄膜锂电池(TFB)和柔性管理电路组成的发电-储能结构一体化电源系统, 可以用作便携式应急电源, 也可与无人飞行器、便捷式电子设备、无线传感网络节点等结合, 实现自身能源的闭合供给, 满足相关装备对电能源全天候、长时间、模块化等多样化应用的需求。但在实际工作中, 系统的电转化效率只有 30% 左右, 大部分太阳光的能量经太阳能电池吸收后会转化成热, TFB 在充电过程中也会发热。电源系统中, 柔性太阳能电池和 TFB 采用键合的方式结合, 由于薄膜各层材料的热膨胀系数不同, 产生的热量会在电源系统内部导致热应力, 造成键合材料的分离, 甚至破坏整个电源系统。通过计算机模拟柔性电源系统在月球表面环境下的工作状态, 建立电源系统结构模型以及热传递数学模型, 仿真得到不同结构电源系统工作时的温度场和应力场分布情况, 对发电-储能一体化柔性电源系统结构优化和工作状态的掌握具有指导意义。

关键词: 柔性; 太阳能电池; 全固态薄膜锂电池; 一体化电源系统; 应力仿真

中图分类号: TM 615

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2021.06.012

Simulation Research on Thermal Characteristics of Power Generation-Energy Storage Integrated Flexible Power System Structure

LU Minglei¹, ZHANG Zhen¹, ZHOU Lihua², WANG Xiaoshun², YE Xiaojun¹, LI Hongbo¹,
SUN Lijie², WU Yongmin², JIN Yang², LIU Shichao²

(1. School of Materials Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. State Key Laboratory of Space Power-Source Technology, Shanghai Institute of Power-Sources, Shanghai 200245, China)

Abstract: Power generation and energy storage integrated power systems are composed of flexible thin GaAs solar cells, thin film lithium batteries (TFBs), and flexible management circuits. They not only can be used as portable emergency power supply, but also can be combined with unmanned aerial vehicles, convenient electronic devices, wireless sensor network nodes, etc. to achieve energy self-sufficiency and meet the diversified application requirements of energy system related equipment, such as all-weather, long time, and modularization. However, in actual application, the energy conversion efficiency of the system is only about 30%, most energy will be dissipated as heat after being absorbed by the solar cells, and the TFBs will release heat during charging. In power generation and energy storage integrated power systems, the flexible solar cells and TFBs are combined in the form of bonding. Since the thermal expansion coefficients of the materials of different layers of the film are different, the heat generated will lead to thermal stress, which will separate the bonded material and even damage the whole power system. In this paper, a power system structure model and a mathematical heat transfer model are established based on the simulation of the

收稿日期: 2020-10-12; 修回日期: 2021-01-13

基金项目: 载人航天领域预先研究项目(四批 050402); 上海市科学技术委员会项目(19DZ1206500)

作者简介: 陆鸣雷(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光伏组件模拟、缺陷检测。

通信作者: 周丽华(1983—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为太阳能电池。

working conditions of the flexible system on the moon surface, and the distributions of the temperature field and the stress field of the power system with different structures are obtained. The obtained results are of guiding significance for the structure optimization and the working status mastering of power generation and energy storage integrated power systems.

Key words: flexible; solar cell; thin film lithium battery (TFB); integrated power system; stress simulation

0 引言

近年来,月球探测已成为各国空间探索的热点,月球探测技术手段从月球飞跃探测、环绕探测,逐步过渡到建立月球基地、载人登月和无人月球车方向发展^[1]。随着未来科学探测活动的不断深入,探测任务范围扩大,宇航员、无人月球车等的活动半径将不断拓宽,活动时间大幅延长,由此对便携式应急能源的需求迫在眉睫。而基于柔性薄膜砷化镓 GaAs 太阳电池^[2]、全固态薄膜锂电池(Thin Film lithium Battery, TFB)^[3],以及柔性管理电路组成的发电-储能结构一体化电源系统,可满足月球工作环境、探月任务特点等对应急电源的系统形态、性能等要求。

由于月球表面的日夜温差大,一体化电源系统内部不同材料之间会产生很大的热应力,破坏相关结构,导致电源系统失效。本文结合电源系统在月球表面的工作环境,通过仿真模拟,掌握太阳电池工

作状态,得到电池组件温度场和热应力场的分布,进而对一体化电源系统结构进行优化。本文仿真采用 ANSYS 有限元分析软件^[4],通过软件对实体系统建模,网格划分构建有限元模型,分析计算电源系统在工作条件下的稳态温度场分布;并且耦合分析应力场分布,得到电源系统内部等效应力与热形变,完成不同结构电源系统在实际工作下的状态评估。

1 一体化电源系统结构设计

1.1 参数化电源系统结构建模

发电-储能一体化电源系统按功能与结构分层,主要分为 11 层(如图 1 所示),从上到下依次为透光耐候层、光学黏结层、光伏电池电路层、过渡材料层、氧化物 SiO₂ 绝缘层、铝 Al 沉积衬底层、过渡材料层、SiO₂ 绝缘层、储能电池电路层、隔热黏结层、PI 基层。

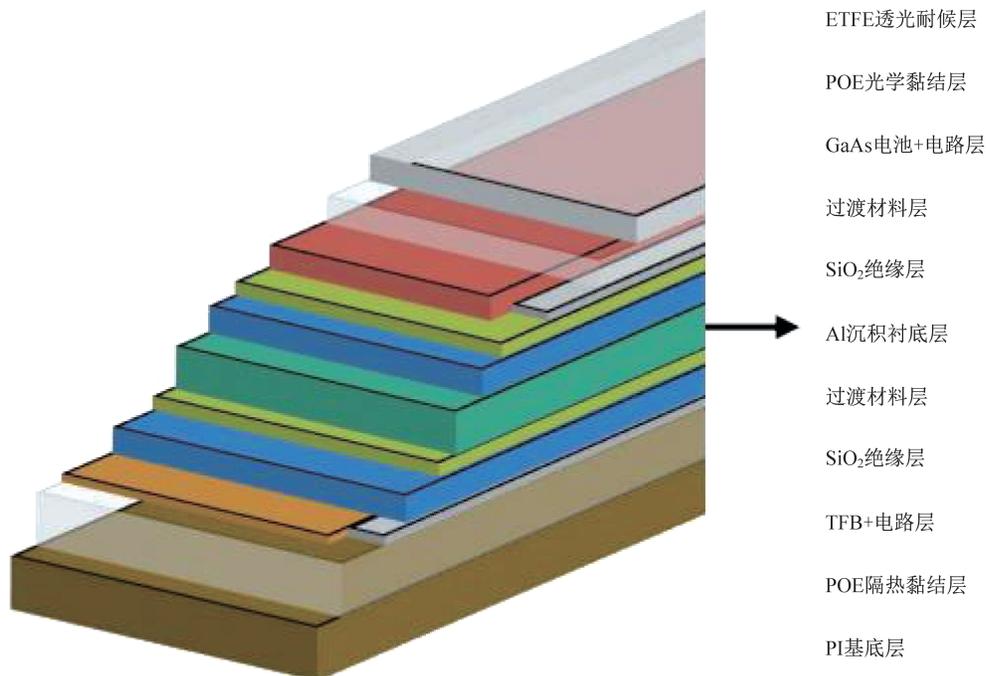


图 1 一体化电源系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of integrated power system

图中,透光耐候层、黏结胶膜(光学黏结、隔热胶接)使用含氟塑料(Ethylene Tetra Filo Ethylene, ETFE)以及热熔胶膜(Ethylene- α -Olefin Copolymer, POE)材料,背面封装材料选用柔性聚酰亚胺(Polyimide, PI)膜。光伏电池电路层包含多结 GaAs 电池与银导线部件。多结 GaAs 电池各层材料相近,密度取为 5.307 g/cm^3 ,厚度设计为 $15 \mu\text{m}$ 。过渡材料层由多层金属材料组成,靠近 GaAs 电池侧的材料结构为钛 $\text{Ti}(0.1 \mu\text{m})$ +金 $\text{Au}(1 \mu\text{m})$ +钛 $\text{Ti}(1 \mu\text{m})$ +模拟备选材料(本文将铬 Cr 与镍 Ni 作为备选材料),靠近 TFB 一侧的过渡材料层同样需要模拟计算进行筛选。TFB 本身结构较为复杂,本文视作整体进行简化处理。其整体的物理性质按照正极/电解质/负极材料的膜厚作加权平均计算获得,整体厚度为 $7 \mu\text{m}$,密度为 2.990 g/cm^3 。依据键合结合的制作方法,层与层之间设置为不发生相对滑移的绑定模式。

GaAs 与 TFB 通过银电极互联,中间串联芯片实现智能化管理。本文模拟重点为过渡层材料和电池分布方式对整体结构的热应力影响,故不对电极、电池以及电池与管理芯片的局部热应力分布情况进行研究,电极与电池的接触方式在本文中简化为相邻紧密接触,按照绑定方式进行模拟,如图 2 所示。



图 2 银电极与 GaAs 电池及 TFB 的连接方式

Fig.2 Schematic diagram of connection among GaAs cells, silver electrodes, and TFBs

隔热黏结层与基底层可以实现隔热、支撑以及平滑弯曲变形的功能作用。针对不同的应用设备,可以灵活更换基底材料。本文将一体化电源系统视为独立运行器件,PI 薄膜直接暴露在空间环境中。

1.2 热模拟环境分析

飞行器在月球表面工作,使用环境温度为 $-180 \sim 180 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[5],模拟使用的太阳能光谱为 AM0,假设工作时间段太阳光谱保持不变,考虑热量主要来源为 GaAs 电池和 TFB,热量在系统内部以固体传导形式扩散。层与层之间通过键合的方式紧密接触,因此,不考虑额外的接触热阻。热损失途径为一体化电源前表面 ETFE 层与后表面 PI 层面向环境的红外辐射损失。

2 电池组件的产热计算

2.1 热数学模型的建立

在系统正常充电过程中,太阳光辐射的能量由于反射与透射而未被光伏电池所吸收,则实际可以吸收的能量 E_{absorb} 为

$$E_{\text{absorb}} = A_{\text{cell}} \cdot \int (1 - R(\lambda) - T(\lambda)) \cdot E(\lambda) d\lambda = A_{\text{cell}} \cdot \int \alpha(\lambda) \cdot E(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

式中: $\alpha(\lambda)$ 为材料对光谱能量的吸收率,可以通过分光光度计测试获得的反射率 $R(\lambda)$ 与透射率 $T(\lambda)$ 间接计算获得; A_{cell} 为光伏电池面积; $E(\lambda)$ 为光线按波长分布的能量密度,本文特指 AM0 光谱。

GaAs 多结电池的光电转化效率在良好散热的情况下可以达到 35% 以上,而高温环境下,半导体本征载流子浓度增大,电池输出电压的减小导致电池转化效率下降^[6],本文假设电池转化效率恒定为 30%,简化了温度对热学模型的反馈作用。由于封装材料对短波长的光也有吸收作用,假设实际到达电池表面的波长将大于 380 nm,而多结电池的截止波长可以达到 1 700 nm,则实际被光伏电池吸收转化为电能的大小 $E_{\text{electricity}}$ 为

$$E_{\text{electricity}} = \int_{380}^{1700} \alpha(\lambda) \cdot E(\lambda) d\lambda \cdot 30\% \quad (2)$$

其余能量转化为热能 q_{cell} :

$$q_{\text{cell}} = (E_{\text{absorb}} - E_{\text{electricity}}) / A_{\text{cell}} \quad (3)$$

根据文献[3,7-9],电池充电效率与电池本身的荷电状态和充电速率有关,铅酸阀控电池的充电转化效率为 95.6%~99.6%,镍氢电池为 75%~80%,镉镍电池为 80%~85%,以此作为估计 TFB 的充电转化效率的依据,估算电转化效率为 95%,则由固态锂电池引起的热流密度 q_{charge} 为

$$q_{\text{charge}} = E_{\text{electricity}} \cdot (1 - 0.95) / A_{\text{battery}} \quad (4)$$

式中: A_{battery} 为 TFB 的面积。

除了上述的两种主要热量产生途径以外,另外还有一些次要因素引起的热量,如未覆盖光伏电池的器件区域对光的吸收、器件背面对地面反射光的吸收等因素,本文简化为对 AM0 光谱 E_{AM0} 剩余能量的二次利用,记为 q_{else} :

$$q_{\text{else}} = (E_{\text{AM0}} - E_{\text{absorb}}) \cdot X \quad (5)$$

X 记为次要因素对单位面积照射剩余能量的利用率,在前期的模拟结果比较中得知, X 从 0 到 1 的取值会影响器件最高温度变化最大约 22 °C,最低温度变化最大约 12 °C。因此, X 在本文的模拟工作取 0.5,作为次要因素对模拟结果的贡献。另外,瞬态模拟分析表明,当环境温度发生变化时,作为薄膜化一体系统可以快速恢复稳态,故实验结果主要展示稳态温度场与应力场。

在月球表面,物体主要以热辐射的形式耗散热量,耗散的热流密度记为 q_{rad} ,参照 ETFE 材料的热

辐射率测试结果,假定前背表面都为 0.8,则模型稳态时的整体热流量公式为

$$q_{\text{cell}} + q_{\text{charge}} + q_{\text{else}} - q_{\text{rad}} = 0 \quad (6)$$

2.2 组件产热计算

将多结砷化镓电池样品进行分光光度计测试,吸收率 $\alpha(\lambda)$ 结果如图 3 所示。

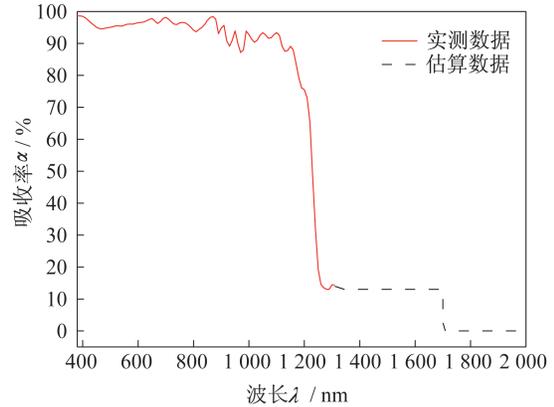


图 3 GaAs 电池吸收率曲线

Fig.3 Absorption rate curve of GaAs cell

在图 3 中,未测试部分 1 310~1 700 nm 波段估算平均吸收率为 13%,1 700 nm 以上假设无吸收。根据 ASTM E-490 的标准光谱数据,按波长区段进行数值积分,结果见表 1。

表 1 按 AM0 各波段计算产热热量结果

Tab.1 Generated heat results of AM0 at different wavelengths

波长	AM0 在该波段能量或产热量/(W·m ⁻²)	备注
≤380 nm	85.2/85.2	默认全吸收
380~2 000 nm	1 197.7/554.5	按吸收率曲线计算,假设多结电池截止波长
380~2 000 nm(次要因素)	1 197.7/232.8×X	X 为次要因素对光吸收的贡献率
≥2 000 nm	85.1/0	默认全反射

380 nm 以下属于紫外光波段,该波段极其容易被物体吸收,可以认为光在到达组件的电池电路层之前,紫外光波段能量已经 ETFE 层和 POE 层所吸收,转化为热能。由于能量占总能量的百分比为 6.23%,占比较少且接近 GaAs 电路层,因此,将这部分热量汇总到 GaAs 层进行模拟。380~2 000 nm 属于近紫外光-可见光-近红外光区域,该波段可以大部分透过组件表面物质层到达电池电路层并转化为电能与热能。2 000 nm 以上属于远红外波段,该

波段能量占比较少,视为全部反射,无热能吸收。

GaAs 电池的总面积与 TFB 保持一致时,TFB 在充电时的热流密度为 $410.4 \times (1 - 0.95) = 20.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,由于位置的特殊性,因此,需要作为第 2 种热流源进行模拟。最终产生的总体热流密度 q_{total} 估算结果为

$$q_{\text{total}} = 85.2 + 554.5 + 0.5 \times 232.8 + 20.5 = 776.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \quad (7)$$

3 稳态温度场的模拟分析结果

假设一体化电源模块基本单元的尺寸为 $10\text{ cm} \times 12\text{ cm}$, 柔性多结 GaAs 电池和 TFB 的分布图如图 4 所示。在模拟过程中, 对管理芯片区域用封装材料进行填补。

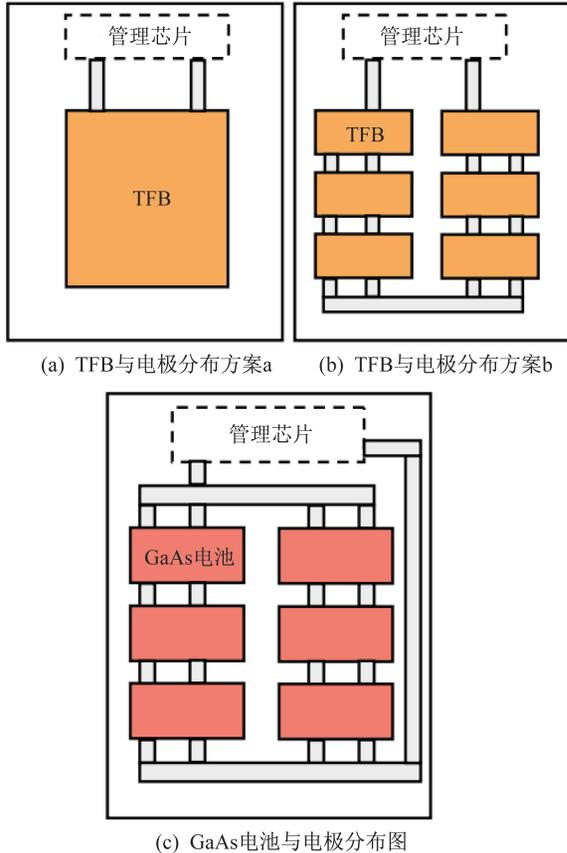


图 4 TFB、GaAs 电池与电极分布图

Fig.4 Distributions of TFBs, GaA cells, and electrodes

TFB 由钛酸盐与钴酸锂组成正负电极, 钴酸锂的弹性模量可以达到 $172\text{ GPa}^{[10]}$, 镧系钛酸盐的弹性模量在 $140\sim 189\text{ GPa}^{[11]}$ 。以此为依据, 结合各层材料膜厚加权平均估算 TFB 的弹性模量约 179 GPa 左右, 大于本系统中大部分材料, 仅次于 GaAs 电池的弹性模量。GaAs 电池的弹性模量以 GaAs 强度为依据, 设置为 $9\ 100\text{ GPa}^{[12]}$, 可见 GaAs 电池与 TFB 的分布方式将极大程度影响器件热应力分布情况。

不同分布方案模拟过程中选用的过渡层材料为镍, 其弹性模量大于 TFB, 为 $209\text{ GPa}^{[13]}$, 厚度为 $2\ \mu\text{m}$ 。当环境温度为 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 时, ANSYS 的温度场分布模拟结果如图 5 所示。

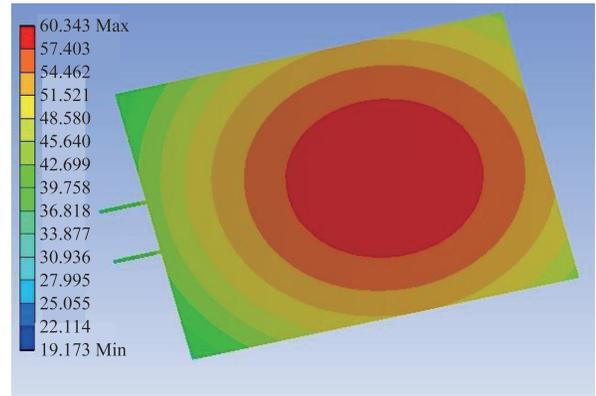


图 5 环境温度 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 分布方案 a 中 TFB 的温度场分布 (单位: $^\circ\text{C}$)

Fig.5 Distribution of the temperature field of the TFB in Scheme a when the ambient temperature is $0\text{ }^\circ\text{C}$ (unit: $^\circ\text{C}$)

由于两种分布方案中 TFB 的厚度与总面积保持不变, 产热量一致, 模型的温度场分布趋势不变。温度的极值随分布方案变化差值小于 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 。系统温度极值随环境温度变化的结果见表 2。

表 2 一体化系统的极值温度随环境温度变化

Tab.2 Extreme temperatures of the integrated system at different ambient temperatures

环境温度/ $^\circ\text{C}$	最高温度/ $^\circ\text{C}$	最低温度/ $^\circ\text{C}$
-180	10.64	-41.14
0	60.35	19.18
180	200.09	178.40

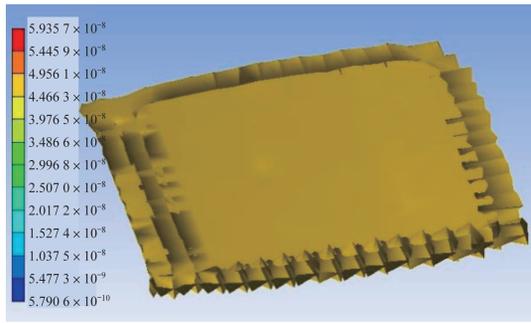
观察形变模拟结果, 两种分布方案的最大形变在不同环境温度下都出现在 GaAs 层靠近管理芯片处的电极处, 其次是 TFB 层靠近管理芯片处的电极处, 见表 3, 分布方案 a 在极端温度的使用条件下的电极形变量相对较小。

表 3 不同方案在不同环境温度下的电极最大形变量

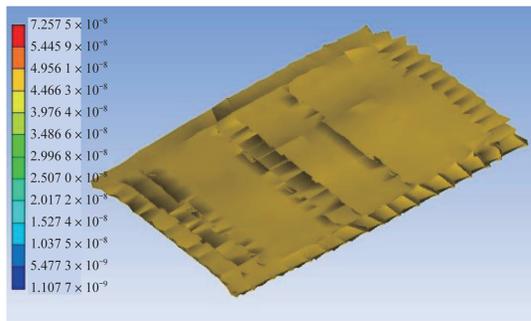
Tab.3 Maximum deformation results of electrodes in different schemes at different ambient temperatures

环境温度/ $^\circ\text{C}$	方案 a/ μm	方案 b/ μm
-180	170.26	172.86
0	92.88	92.75
180	799.89	805.99

GaAs 电池层到固态锂电层之间的各层材料的形变随温度变化相对不大, 过渡层的形变分布位置随分布方案变化明显, 如图 6 所示。



(a) 分布方案a形变示意图



(b) 分布方案b形变示意图

图 6 环境温度 0 °C 时,不同方案的过渡材料层形变示意图 (单位:m)

Fig.6 Deformation diagrams of the transition material layer in different scheme at the transition material layer of 0 °C (unit: m)

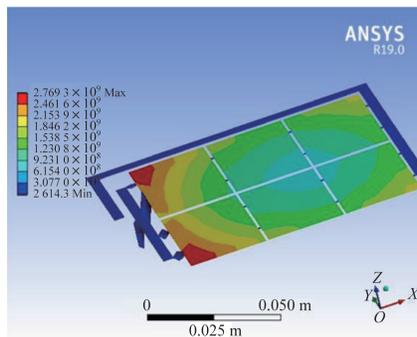
由于模型中的 GaAs 电池材料的弹性模量远高于其他材料,在热应力分布的模拟中,系统的热应力主要集中在光伏电池电路层。当环境温度为 0 °C 时,两种 TFB 分布方式对热应力分布影响不大。但在极端温度条件下,方案 a 的应力分布相对更加均匀,最大应力值比方案 b 的最大应力值小,如表 4 和图 7 所示。

表 4 不同方案在极端环境温度下的最大等效热应力

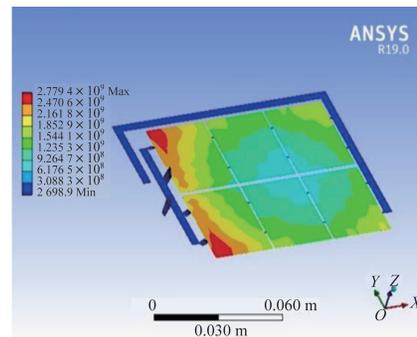
Tab.4 Maximum equivalent stress results of the GaAs cell layer in different schemes at extreme ambient temperatures

环境温度/°C	方案 a/GPa	方案 b/GPa
-180	2.76	2.78
180	13.06	13.61

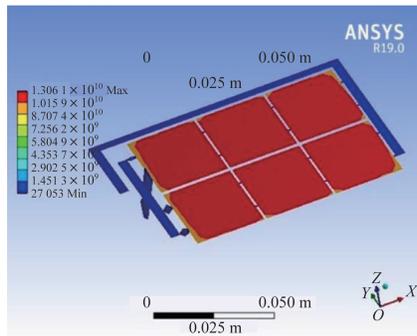
经过模拟结果的对比,分布方案 a 在形变和内部等效应力方面与分布方案 b 相比有一定的优势。推测原因是 TFB 数量更多的分布方案 b 有更多的电极/电池接触,电极的形变导致热应力的分布更加集中。



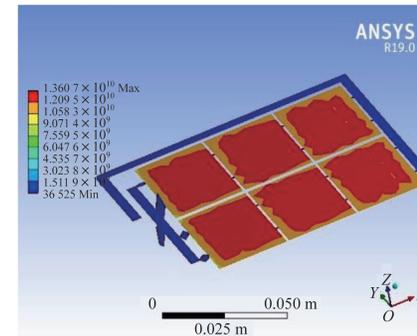
(a) -180 °C 环境温度分布方案a



(b) -180 °C 环境温度分布方案b



(c) 180 °C 环境温度分布方案a



(d) 180 °C 环境温度分布方案b

图 7 极端环境温度下,不同分布方案的碲化镓层的等效应力图对比(单位:Pa)

Fig.7 Equivalent stress results of the GaAs cell layer in different schemes at extreme ambient temperatures (unit: Pa)

通过在功能材料之间设置热性能梯度变化的过渡层材料,可以减少不同功能层之间的热失配问题^[14]。本文备选的过渡层材料 Ni 与 Cr 的热性能参

数在 GaAs 与 TFB 之间。Cr 相较于 Ni,热膨胀系数更低,但弹性模量较高,导热系数较低,见表 5。其作为过渡层材料的模拟结果见表 6。

表 5 Ni 与 Cr 的物理性能表^[14]

Tab.5 Physical properties of Ni and Cr^[14]

材料	导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	热膨胀系数/(10 ⁻⁶ ·K ⁻¹)	弹性模量/GPa	泊松比
Ni	92.1	13.5	209.18	0.31
Cr	67.0	6.2	244.90	0.30

表 6 不同厚度、不同过渡层的模拟项目极大值

Tab.6 Maximum results of simulated items of different transition layers with different thicknesses

模拟项目	过渡层材料	环境温度	1 μm	2 μm	6 μm	10 μm
最大温度/°C	Ni	180	200.19	200.09	199.74	199.45
		-180	10.99	10.64	9.42	8.47
	Cr	180	200.22	200.14	199.87	199.67
		-180	11.09	10.82	9.88	9.13
GaAs层最大应力/GPa	Ni	180	13.08	13.06	12.99	12.95
		-180	2.79	2.77	2.68	2.61
	Cr	180	13.06	13.05	13.01	12.98
		-180	2.79	2.78	2.72	2.66
电极最大形变量/μm	Ni	180	788.37	799.89	674.52	831.35
		-180	168.44	170.26	154.52	171.70
	Cr	180	783.38	789.75	658.78	802.89
		-180	167.54	168.45	152.35	167.50

当过渡层材料厚度较小时,热力学缓冲作用不够明显,无法体现材料种类之间的差异性。在厚度为 6 μm 左右,Cr 与 Ni 都可以获得相近的温度极值与最大应力。由于 Cr 的热膨胀系数更低,层与层之间的应变缓冲作用更明显,从而使电极的形变更小。当过渡层厚度继续增大,导热系数更低的 Cr 会增加热量传导的热阻,器件的温度最大值下降更慢。电极的形变会随着厚度的增加而再次增加,从薄膜器件设计角度考虑,也不宜采用厚度更高的设计方案。

通过增加电极宽度可以减弱电极形变集中的问题。在分布方案 a 中,电极宽度改变前后的最大形变量值见表 7。将电极宽度从原来的 1 mm 增加至 4 mm,电极的最大形变量下降。

表 7 不同电极宽度在极端温度下的最大形变量

Tab.7 Maximum deformation results for different widths of electrodes at extreme ambient temperatures

过渡层材料	环境温度/°C	最大形变量/mm	
		电极宽度 1 mm	电极宽度 4 mm
6 μm Ni	180	674.52	4.88
	-180	154.52	1.85
6 μm Cr	180	658.78	4.80
	-180	152.35	1.86

银的导热系数较大,可达 418.6 W·m⁻¹·K⁻¹,与发热源 GaAs 处于同一层平面内,有助于热量均匀

化,因此增宽的电极有效地减小了应力集中的问题。电极集中形变的问题被有效避免后,需要重新评估过渡层材料的种类和厚度对温度分布和应力分布的影响,在 $6\sim 10\ \mu\text{m}$ 的厚度范围内,Ni比Cr更具有性能上的优势。

4 结束语

本文通过建立应用于月球表面环境的光伏-储能一体化系统的结构模型和热传导的数学模型,分析得到系统器件的产热能量密度为 $776.6\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,并仿真获得器件在极端温度下稳态工作的温度分布图,在此基础上仿真模拟得到了器件在不同锂电池分布方式下的材料形变情况与热应力分布。

模拟结果表明,整体化的TFB分布设计对于热应力分布更加友好。器件的形变主要来自于银电极弯曲,增加电极宽度可以减少电极的集中形变的现象。过渡层材料的选取需要综合考虑导热系数、弹性模量等因素对结果的影响。随着过渡层厚度的增大,原先的积极影响反而会成为失配的原因,需要进行不断地尝试才可以获得最优的设计方案。仿真的结果对于一体化组件的结构优化和工作状态的掌控具有指导意义,为后续的结构参数选取工作提供参考方案。

参考文献

[1] 姚雨迎,焦宇晟,颜萌.嫦娥四号中继星供配电分系统可靠性设计与验证[J].宇航总体技术,2019,3(4):

9-14.

- [2] 薛超,姜明序,高鹏,等.柔性砷化镓太阳能电池[J].电源技术,2015,39(7):1554-1557.
- [3] 吴勇民,田文生,周罗增,等.全固态薄膜锂电池的制备与电化学性能表征[J].电源技术,2020,44(1):4-8.
- [4] 黄居坤,王勇,曾捷,等.空间伸展臂热应变与热变形光纤监测技术[J].上海航天,2020,37(1):70-78.
- [5] 欧阳自远.月球科学概论[M].北京:中国宇航出版社,2005:46-48.
- [6] 朱艳青,黄华凇,史继富,等.不同散热方式对多结太阳能电池影响的研究[J].太阳能学报,2014,35(12):2438-2443.
- [7] 宿站寰,汪笃达.阀控式铅酸蓄电池充电效率检测及分析[J].蓄电池,2002,39(2):60-61,67.
- [8] 帕特尔.航天器电源系统[M].北京:中国宇航出版社,2010:227-228.
- [9] 张遥,白杨,刘兴江.动力用锂离子电池热仿真分析[J].电源技术,2008,32(7):461-463,487.
- [10] 谢凯,郑春满,洪晓斌,等.新一代锂二次电池技术[M].北京:国防工业出版社,2013:274-275.
- [11] 刘晨光.镧系钛酸盐烧绿石掺Ce行为及弹性模量的第一性原理研究[D].兰州:兰州大学,2016.
- [12] 季秀峰.LED用砷化镓抛光片表面状态研究[D].天津:天津大学,2008.
- [13] 刘祥.铸造合金力学及物理性能[M].北京:机械工业出版社,1982:45-46.
- [14] 韩国凯,解维华,孟松鹤,等.防隔热一体化复合材料整体性能优化设计方法[J].复合材料学报,2019,36(2):450-460.