

空间太阳能电池聚光系统设计及性能分析研究

邵立民, 杨淑利

(中国空间技术研究院, 北京 100092)

摘要:空间聚光太阳能电池阵通过聚光透镜将大面积太阳光聚集到太阳能电池片上,以提高单位面积电池片接收光强,从而减少电池片使用量、降低成本。在聚光条件下,高光强、高温特征使聚光太阳能电池短路电流、开路电压、填充因子、转换效率、工作温度以及热-电耦合特性等不同于常规太阳能电池。开展了聚光太阳能电池模块聚光透镜、太阳能电池和电池散热设计,建立了空间太阳能电池聚光系统热电耦合计算模型,分析了聚光比、基板厚度、基板材料导热率与电池温度、短路电流、开路电压、输出功率间的关系,以解决空间太阳能电池聚光系统工程设计中的多参数合理匹配和选择问题。研究表明:聚光比对太阳能电池开路电压、短路电流、转换效率及工作温度存在全面影响,各个参数存在较强的耦合关系,在工程设计时应权衡聚光特性带来的积极和消极影响。聚光太阳能电池短路电流密度与聚光比成正比;低聚光比条件下,填充因子、转换效率基本不受聚光比影响;最大输出功率、开路电压随聚光比的增大而增大。聚光太阳能电池工作温度升高对开路电压、转换效率和输出功率有不利影响,电池片散热设计是影响聚光电池性能的关键因素,应采用高导热率基板等散热措施以降低电池工作温度。建议聚光比为9~15,即可体现聚光优势,显著降低电池片使用量,又不苛求聚光透镜展开精度,从而降低工程研制难度。

关键词:聚光系统;性能分析;聚光比;太阳能电池温度;基板厚度

中图分类号:V423

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2018)03-0471-09

为航天器供电的空间聚光太阳能电池阵通过聚光系统将大面积太阳光聚集到太阳能电池片上,通过提高单位面积电池片接收光强来降低电池片的使用量,既可提高电池阵光电转换效率,又可较好解决空间太阳能电池阵大功率需求与低成本、低重量之间的矛盾^[1-3],是未来大功率航天器能源的发展方向之一。

聚光太阳能电池组电性能输出特性和线聚焦菲涅耳透镜光学特性是空间太阳能电池聚光系统的主要特性。聚光条件下的太阳能电池具有高光强、高温度的特点,电池扩散层、基区载流子的迁移和复合、热特性会发生很大变化,使得聚光太阳能电池的短路电流、开路电压、填充因子FF、光电转换效率和热-电耦合特性明显不同于常规太阳能电池^[4-5]。因此,有必要进行聚光条件下的太阳能电池输出特性分析,总结规律用于指导聚光太阳能电池设计。

近年来,美、俄等国对菲涅耳透镜的材料光学性能、镜面棱型结构、焦斑位置与尺寸、焦斑能量分布等方面进行了研究^[6-7]。我国一些研究机构也开展了线聚焦菲涅耳聚光透镜的聚光原理分析和光学效率计算^[8-9]。但上述研究缺乏对聚光条件下太阳能电池输出特性规律的系统性分析,也没有涉及不同工作温度、不同基板材料导热率对太阳能电池聚光性能综合影响的研究,而上述内容是评价空间聚光太阳能电池性能优劣和开展工程设计的重要基础。

为此,本文将开展聚光太阳能电池模块各组件设计;建立空间太阳能电池聚光系统热电耦合计算模型,分析不同聚光比、不同基板厚度和不同基板材料导热率下太阳能电池温度、短路电流密度、开路电压及最大输出功率之间的关系和匹配规律;提出合理可行的空间太阳能电池聚光系统工程设计方法,以解决该系统工程设计中的多参数合理匹配和选择问题。

收稿日期:2017-05-08

作者简介:邵立民(1979—),西北工业大学博士研究生,主要从事载人航天器系统设计、飞行器结构与机构设计等研究。

1 聚光太阳能电池模块设计

典型的空空间聚光电池模块主要由线聚焦菲涅耳透镜、支撑组件、聚光太阳能电池片、散热基板组成,如图 1 所示^[10]。

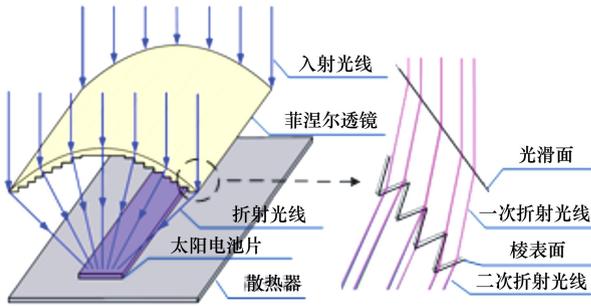


图 1 空间太阳电池聚光系统原理图

1.1 聚光透镜设计

空间太阳电池聚光系统适宜采用线聚焦菲涅耳薄膜透镜,透镜材料选择透光率高、质地柔软可折叠且具有抗紫外辐照、抗原子氧、抗高低温等优良空间环境适应性的硅树脂材料^[11]。透镜表面采用减反射镀膜设计,使接收光线波长覆盖紫外线到红外线范围,使透光率增加到 90% 以上。

1.2 聚光太阳能电池选取

空间聚光太阳能电池片材料可选取硅太阳能电池或三结砷化镓太阳能电池。其中,硅太阳能电池可在几个到上千个太阳光强下稳定工作。但光电转换效率不高,聚光产生的高温会进一步降低硅太阳效率,不能发挥聚光太阳能电池阵的优势^[12]。三结砷化镓太阳能电池($\text{GaInP}_2/\text{GaInAs}/\text{Ge}$)光电转换效率高,耐高温特性好,可在高光强下工作,但价格较高。因此,三结砷化镓太阳能电池可充分发挥聚光优势,抑制电池片价格和重量较高的劣势,显著降低系统成本和重量,非常适合应用于空间聚光太阳能电池。

1.3 电池散热设计

聚光产生的高温对太阳能电池转换效率和材料的在轨使用寿命存在不利影响。为此,对太阳能电池安装基板开展专门的散热设计,基板通过辐射方式将太阳能电池热量排散到宇宙空间,所采用的散热设计措施包括:采用高导热率基板材料,严格控制电池粘接胶空洞率,提高热传导效率;采用辐射率 达到

0.90~0.98 的表面热控涂层,提高辐射散热能力;尽量增大基板散热面积。

可用于制造基板的 C-C 复合材料具有高导热率和低密度的特点,主要包括气相生长(VGCF)碳纤维、聚丙烯腈(PAN)碳纤维、沥青基碳纤维、碳纳米管复材等^[13]。高温高压成型的 VGCF/环氧树脂复合材料室温导热率一般可达 70~85 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$,最高 695 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ^[14]。同时,VGCF/环氧树脂材料的密度为 1.48 g/cm^3 ,比强度和比模量分别为 1.02 和 95,满足聚光太阳能电池阵电池基板高散热率、高强度和轻量化的需求。

2 太阳能电池阵聚光模块性能分析

建立太阳能电池等效电路如图 2 所示,图中: I_{ph} 为光生电流, I_{d} 为二极管电流, I_{sh} 为漏电流, R_{sh} 为旁路电阻或叫并联电阻, R_{s} 为串联电阻, V_{oc} 为开路电压, I 为输出电流, V 为输出电压, R_{L} 为负载。

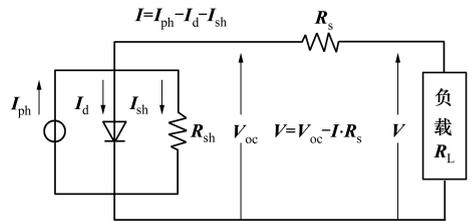


图 2 太阳能电池等效电路

2.1 短路电流 I_{sc}

聚光太阳能电池短路电流 I_{sc} 与太阳投射到太阳能电池上的能量流密度 E_{inc} 成正比,如公式(1)所示,这是聚光太阳能电池设计的基础条件。

$$I_{\text{sc}} = I_{\text{sc-ST}} \cdot c \quad (1)$$

式中, c 为聚光比, $I_{\text{sc-ST}}$ 为 AM0 及标准测试状态下的太阳能电池短路电流。

2.2 开路电压 V_{oc}

太阳能电池开路电压^[15]如(2)式所示。

$$V_{\text{oc}} = \frac{\kappa T}{q} \ln \left(\frac{I_{\text{sc}}}{I_0} + 1 \right) \approx \frac{\kappa T}{q} \ln \left(\frac{I_{\text{sc}}}{I_0} \right) \quad (2)$$

式中, V_{oc} 为开路电压, κ 为波尔兹曼常数, T 为电池绝对温度, q 为电子电荷, I_{sc} 为短路电流, I_0 为反向饱和电流, $I_{\text{sc}} \gg I_0$ 。

根据公式(1),聚光比 c 增大,导致 I_{sc} 增加,开路电压 V_{oc} 也随之增加。

2.3 串、并联电阻 R_s, R_{sh}

串、并联电阻 R_s, R_{sh} 是太阳电池的内在特性,其中 R_s 是电池电极的接触电阻、发射区薄层电阻和体电阻的综合, R_{sh} 由 P-N 结微电阻和工艺缺陷造成。 R_{sh} 对太阳电池工作特性影响较小,可忽略不计。 R_s 会在电池内部损耗电能,降低光电转化效率和填充因子。

对于聚光电池,在低光强范围内 (< 20 倍) R_s 基本不变,高光强下电池内载流子增加,串联电阻 R_s 减小,电池内部电能损耗降低,因此高光强有利于提高电池效率。

一般利用试验方法测量不同光强下的电池负载电流和电压并代入公式(3) 计算 R_s 。

$$R_s = \frac{V_{mx} - V_{m0}}{I_{mx} - I_{m0}} \quad (3)$$

式中, V_{mx}, I_{mx} 分别指在 x 倍光强下太阳电池最佳工作点电压和电流, V_{m0}, I_{m0} 分别为 1 倍光强下太阳电池最佳工作点电压和电流。

2.4 填充因子 FF

填充因子 FF 用来表征太阳电池 $I-V$ 曲线的方形程度,如公式(4)所示。

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} I_{sc}} = \frac{V_{MP} I_{MP}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (4)$$

式中, V_{MP} 为最大功率点 P_{max} 处输出电压, I_{MP} 为最大功率点 P_{max} 处输出电流。

FF 取决于太阳电池串联电阻 R_s , 低光强时可认为 FF 不变;高光强时,在光照均匀的情况下 FF 会增大,在光照不均匀时 FF 不一定增大。当聚光比从 1 增加到 1 000 时, FF 增加 1%~2%, 增加比率可忽略。

2.5 转换效率 η_{sc}

太阳电池转换效率 η_{sc} 与短路电流 I_{sc} 、开路电压 V_{oc} 、填充因子 FF 等存在以下关系

$$\eta_{sc} = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{E_{inc} \cdot S_{sc}} = \frac{P_{max}}{E_{inc} \cdot S_{sc}} \quad (5)$$

式中, S_{sc} 为太阳电池面积, $P_{max} = V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF$, E_{inc} 为单位面积太阳辐射强度。

η_{sc} 受太阳电池结构损失和电学损失两大因素影响,其中结构损失 P_L 取决于太阳电池片材料,如砷化镓电池结构损失小于单晶硅电池,电学损失 P_s 由太阳电池串联电阻 R_s 引起。因此 η_{sc} 可进一步表达为

$$\eta_{sc} = \frac{P_{max}}{P_{max} + P_s + P_L} \quad (6)$$

聚光电池 I_{sc} 很大,而 $P_s = I_{sc}^2 R_s$, 因此高串联电阻必然导致电学损失增加显著,故必须选择低串联电阻电池以保证高光强下光电转换效率。

2.6 电池工作温度 T_{sc}

T_{sc} 对太阳电池 $I-V$ 曲线存在影响,如图 3 所示。随着 T_{sc} 升高,太阳电池短路电流略有增加,而高温会降低电池材料禁带宽度,进而显著降低开路电压,导致 $I-V$ 曲线下的面积减小,转换效率和输出功率下降。

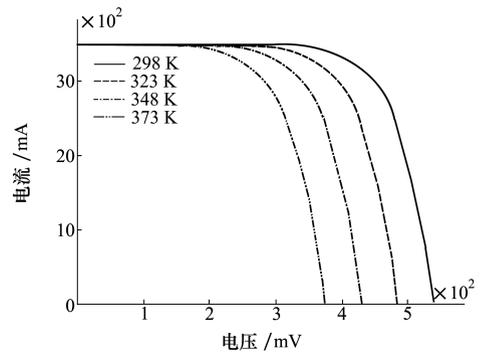


图 3 硅太阳电池 $I-V$ 随温度变化曲线

考虑工作温度 T_{sc} 影响的关联性,可建立如图 4 所示的聚光比、工作温度、开路电压、短路电流、转换效率及输出功率的耦合关系。因此,计算聚光条件下太阳电池输出特性就必须考虑多个因素的综合影响,特别是热电耦合特性。

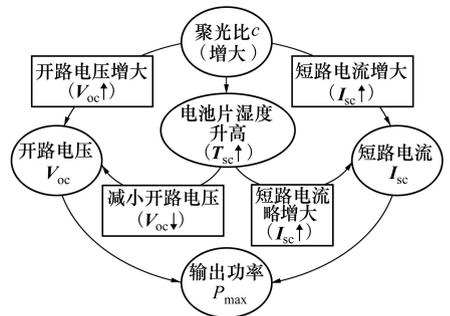


图 4 聚光太阳电池参数关联特性

3 太阳电池热电耦合分析

宇宙空间工作的太阳电池片只能通过传导和辐

射传热,系统传热原理如图 5 所示。在空间聚光太阳电池稳定工作中,太阳电池处于热平衡状态,吸收的热量等于散失的热量,此时的电池温度为工作温度 T_{SC} 。

AMO 光照条件下,不考虑透镜光学效率,太阳电池产热 Q_h 按公式(7) 计算。

$$Q_h = (\alpha_s - \eta_{SC}) E_{inc} \cdot c \cdot S_{SC} \quad (7)$$

式中, α_s 是太阳电池吸收比,与太阳电池表面镀层热辐射特性有关,硅电池 $\alpha_s = 0.75$,砷化镓电池 $\alpha_s = 0.89$,三结砷化镓电池 $\alpha_s = 0.92$ 。

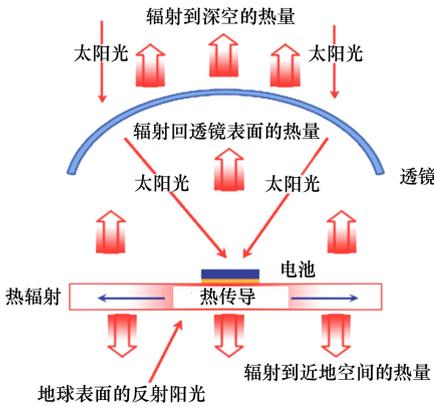


图 5 聚光系统的传热模型

3.1 工作温度对太阳电池输出性能影响分析

在本文 2.6 节给出的工作温度对太阳电池输出特性定性影响分析基础上,可进一步通过公式(8) 计算电池工作温度 T_{SC} 对开路电压 V_{oc} 影响。

$$\frac{dV_{oc}}{dT_{SC}} = - \frac{V_{go} - V_{oc} + \gamma(q/\kappa T_{SC})}{T_{SC}} \quad (8)$$

式中, $V_{go} = E_{go}/q$, E_{go} 为绝对零度时电池半导体材料禁带宽度; γ 与温度有关,通常取 1 ~ 2。

按照公式(8) 及文献[16] 方法计算得到工作温度 $T_{SC} = 300$ K 时电池输出特性如表 1 所示。可见,三结砷化镓电池温度特性优于单晶硅和砷化镓电池,因此其更适用于空间聚光太阳电池。

表 1 工作温度 $T_{SC} = 300$ K 时电池输出特性

| 电池类型 | V_{oc}/V | dV_{oc}/dT_{SC} /((mV · K ⁻¹)) | $d\eta_{SC}/dT_{SC}$ /((%) · K ⁻¹) |
|-------|------------|---|---|
| 单晶硅 | 0.6 | -2.3 | -0.35 |
| 砷化镓 | 1.05 | -2.0 | -0.21 |
| 三结砷化镓 | 2.6 | -0.6 | -0.19 |

公式(9) 给出了电池温度 T_{SC} 与 I_{SC} 的关系。

$$\frac{dI_{SC}}{dT_{SC}} = A\gamma T_{SC}^{\gamma-1} e^{\frac{q(V_{oc}-V_{go})}{\kappa T_{SC}}} +$$

$$AT_{SC}^{\gamma} \left(\frac{q}{\kappa T_{SC}} \right) \left[\frac{dV_{oc}}{dT_{SC}} - \frac{(V_{oc} - V_{go})}{T_{SC}} \right] e^{\frac{q(V_{oc}-V_{go})}{\kappa T_{SC}}} \quad (9)$$

式中, A 为二极管品质因子,与温度无关。

由公式(9) 计算可得,硅太阳电池 $\frac{dI_{SC}}{dT_{SC}} = 0.107$

$\text{mA} \cdot \text{cm}^2/\text{K}$;三结砷化镓太阳电池 $\frac{dI_{SC}}{dT_{SC}} = 0.26 \text{ mA} \cdot \text{cm}^2/\text{K}$ 。可见短路电流 I_{SC} 不强烈依赖于温度^[16],与图 3 所示测试结果一致,为简化计算,可认为 I_{SC} 不随电池工作温度变化。

3.2 太阳电池工作温度计算

考虑到聚光比、太阳电池特性与电池工作温度的强相关性,在进行聚光太阳电池模块设计时,必须计算太阳电池热平衡时的工作温度。本文在图 5 传热原理基础上进行如下简化假设:

- 1) 沿电池和基板厚度方向上的温度梯度为零;
- 2) 航天器结构与电池阵间不存在热相互作用;
- 3) 地球辐射和反照对电池阵热影响忽略不计;
- 4) 忽略太阳电池遮挡对基板散热面积的影响。

根据上述条件建立太阳电池-散热基板传热模型见图 6,温度平衡关系如公式(10) 所示。

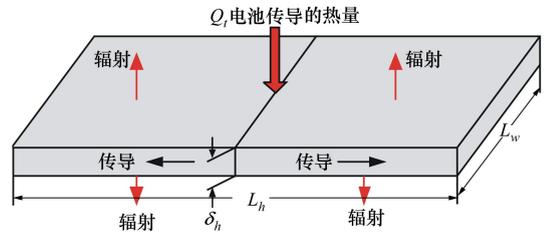


图 6 太阳电池-散热基板简化传热模型

$$(\alpha_s - \eta_{SC}) E_{inc} \cdot c \cdot S_{SC} = \varepsilon_{SC} \kappa \Delta T_{SC}^4 S_{SC} + Q_1 \quad (10)$$

式中, $\varepsilon_{SC} \kappa \Delta T_{SC}^4 S_{SC}$ 是太阳电池辐射热量, ε_{SC} 是太阳电池发射率; κ 是波尔兹曼常数,一般取 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; ΔT_{SC} 是温升; Q_1 为太阳电池向基板传导的热量^[17],通过(11) 式计算。

$$Q_1 = 2L_h L_w \varepsilon_t \kappa T_{SC}^4 \eta_{\Omega} \quad (11)$$

式中, L_h 为基板长度, L_w 为基板宽度, ε_t 是基板发射率, T_{SC} 是太阳电池工作温度, η_{Ω} 为散热效率,通过(12) 式计算

$$\eta_{\Omega} = - \frac{\sigma_0 \delta_h}{2\varepsilon_t \kappa T_{SC}^4 L_h} \left(\frac{dT_{SC}}{dL} \right)_{L=0} \quad (12)$$

引入无因次参数 ξ 作为传导参数,表示为

$$\xi = \frac{2\varepsilon_1 \kappa T_{sc}^3 L_h^2}{\sigma_0 \delta_h} \quad (13)$$

则传导效率 η_Ω 可表示为

$$\eta_\Omega = -\frac{1}{\xi} \frac{L_h}{T_{sc}} \left(\frac{dT_{sc}}{dL} \right)_{L=0} \quad (14)$$

可见,传导效率 η_Ω 与基板截面积 ($\delta_h L_w$)、表面积 ($L_h L_w$)、材料导热系数 σ_0 、表面辐射性质 ε_1 、电池温度 T_{sc} 和温度梯度有关。

根据上述公式,Chang 等利用计算机数值计算得到 η_Ω 与 ξ 的关系如公式(15)所示。

$$\eta_\Omega = \begin{cases} 1 - 1.25\xi + 2.54\xi^2 & 0.01 \leq \xi \leq 0.2 \\ -0.4049 \log \xi + 0.5321 & 0.2 \leq \xi \leq 2.0 \end{cases} \quad (15)$$

基板散热设计中,在确定基板材料及 δ_h, L_w, L_h

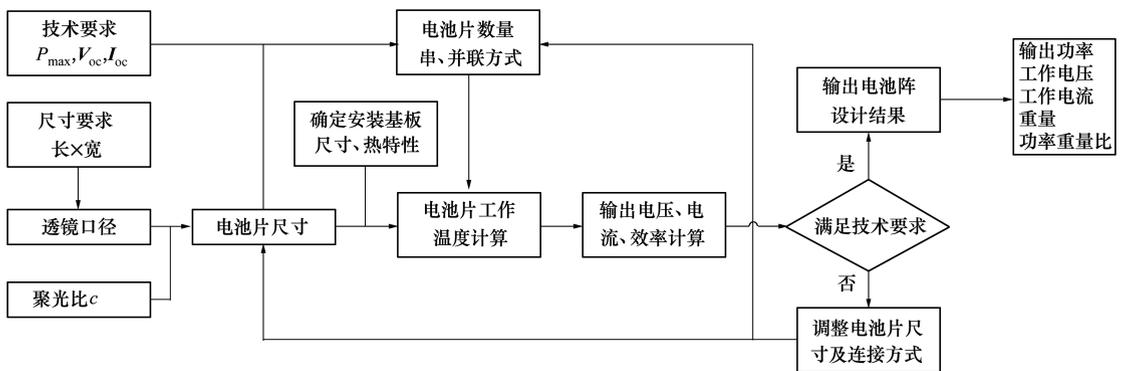


图7 聚光太阳能电池模块参数计算流程

4.2 设计输入

1) 设计要求

聚光太阳能电池模块设计要求:模块尺寸 400 mm × 100 mm, 额定功率 ≥ 8 W, 额定电压 ≥ 10 V。

2) 太阳能电池

太阳能电池片采用表面粘贴掺铈硼硅玻璃盖片的三结砷化镓电池, AM0 辐射强度、300 K 工作温度下 $\eta_{sc} = 32\%$, $\alpha_s = 0.92$, $J_{sc} = 14.4 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc} = 2.62 \text{ V}$, $FF = 85\%$, $dV_{oc}/dT_{sc} = -0.6 \text{ mV/K}$, $d\eta_{sc}/dT_{sc} = -0.19\%/K$, $V_{MP} = 2.3 \text{ V}$, 密度为 4.4 g/cm^3 , $\delta_h = 0.2 \text{ mm}$ 。

3) 聚光透镜

聚光透镜采用 DC93-500 硅树脂线性菲涅耳透镜, 透光率为 92%, 密度为 1.1 g/cm^3 。

4) 透镜支架

透镜支架采用 VGCF/环氧树脂复合材料, 密度

后, 根据公式(13) 计算得到 ξ , 代入公式(15) 得到 η_Ω , 通过计算机迭代求解公式(10) 得到 T_{sc} 。

4 聚光太阳能电池模块性能计算

4.1 计算模型

聚光太阳能电池模块包括太阳能电池、透镜、基板、透镜支架, 在分析计算时进行如下假设: 不考虑电池互联片、电缆重量及遮挡影响; 考虑电池片粘接剂重量、尺寸及导热影响; 透镜有效通光面积与几何面积相同; 太阳偏角为 0° , 辐射强度 $E_{inc} = 1353 \text{ W/m}^2$ 。

由于聚光太阳能电池模块各个参数高度耦合, 故在满足技术指标要求的约束下, 通过逐次迭代计算聚光电池模块设计参数, 迭代计算流程如图7所示。

为 1.48 g/cm^3 。

5) 安装基板

电池片安装基板采用 VGCF/环氧树脂复合材料, 密度为 1.48 g/cm^3 , 传热系数为 $75 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, 热控涂层采用高发射率 ZKS 无机白漆, $\varepsilon_1 = 0.93$ 。

4.3 参数设计

按照图7所示流程及4.2节条件进行聚光太阳能电池模块参数计算, 结果如下:

1) 透镜尺寸为 $400 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 厚度为 0.14 mm , 重量为 6 g ;

2) 2个透镜支架为拱形结构, 厚度为 1 mm , 通过调整透镜-电池间距离获得不同的聚光比 c , 透镜支架重量随上述距离增大而增加;

3) 太阳能电池片长度 $L_{sc} = 400 \text{ mm}$, 宽度 $B_{sc} = (100/c) \text{ mm}$, 聚光比 c 为设计变量; 300 K 温度下保证输出电压 ≥ 24 V, 太阳能电池最佳工作电压为 2.3 V

时,需要 12 个串联,则单块太阳能电池尺寸 $L_{SC} = 400/12 = 33.3 \text{ mm}$, $B_{SC} = 100/\text{cmm}$;

4) 基板长度为 $L_w = 100 \text{ mm}$ 、宽度为 $L_h = 400 \text{ mm}$ 、厚度 δ_h 为设计变量。

4.4 参数计算

4.4.1 T_{SC} 计算

本文利用 FLUENT 软件进行聚光太阳能电池工作温度仿真分析,计算得到的聚光比为 4, 10, 20 的电池-基板组合温度分布如图 8 所示。

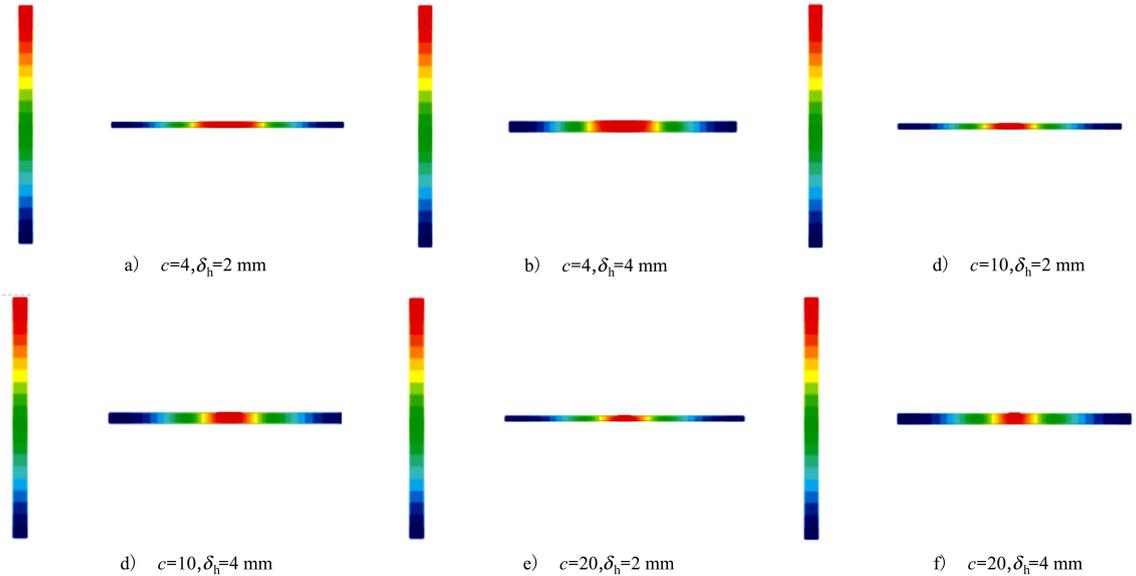


图 8 不同聚光比和基板厚度的太阳能电池工作温度分析

由此得到的不同聚光比 c 和不同基板厚度 δ_h 时的电池温度如图 9 所示。其中, $\delta_h = 2 \text{ mm}$, $c = 4$ 时, 太阳能电池产热量 $Q_h = 3\ 336 \text{ W/m}^2$, 电池工作温度 $T_{SC} = 324 \text{ K}$, 基板温度为 318 K ; 当 $\delta_h = 3 \text{ mm}$, $c = 10$ 时, 太阳能电池产热量 $Q_h = 8\ 340 \text{ W/m}^2$, 电池工作温度 $T_{SC} = 317.6 \text{ K}$, 基板温度为 312 K 。

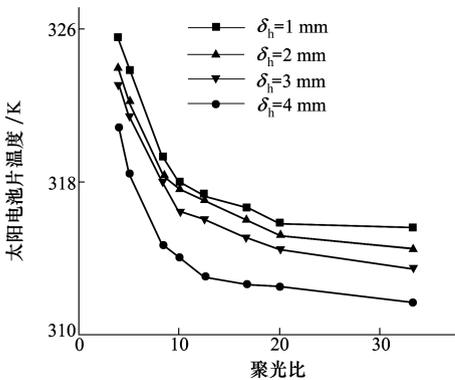


图 9 T_{SC} 随聚光比和基板厚度的变化趋势

基板导热系数较大 ($75 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) 时, 基板散热效率较高, 故电池工作温度不升反降。

为了验证上述推论, 对采用 T300 碳纤维复合材料基板 (导热率 $6.5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, 厚度 2 mm) 的太阳能电池工作温度进行计算, 并与 VGCF/环氧树脂复合材料基板进行对比, 如图 10 所示。

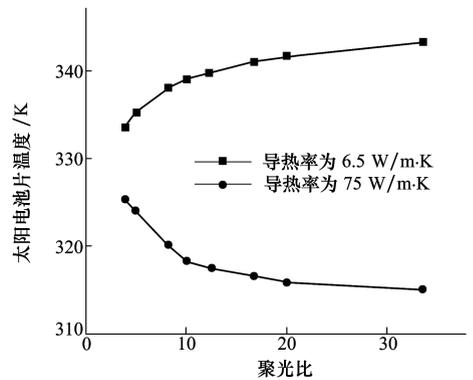


图 10 不同导热率基板的 T_{SC} 随聚光比的变化趋势

由图 9 可知, 随着聚光比 c 增大, 虽然电池表面热流密度增大, 但由于基板散热面积也显著增加, 在

由图 10 可知:

1) 低导热率基板电池工作温度随着聚光比的

增加而上升,而高导热率基板电池工作温度呈下降趋势。在聚光比为 10 且其他条件相同时,6.5 W/m · K 导热率基板电池模块最大功率 P_{max} 相比 75 W/m · K 导热率基板下降 17.7% ;

2) 当聚光比为 10 时,采用 2 mm 厚度的 C-C 复合材料基板可保证电池稳定工作在 315.7 K,相比 293 K 常温工作状态,电池电压衰减 3%,效率衰减 3.15%,满足电池工作要求;

3) 在高聚光比条件下,采用高导热率的碳纤维-环氧树脂板材并涂覆高发射率涂层,可有效控制电池工作温度在可接受范围内,有利于聚光电池高效工作。

4.4.2 J_{sc} 随聚光比和基板厚度的变化

按照公式(1)计算得到短路电流密度随聚光比变化如图 11 所示。

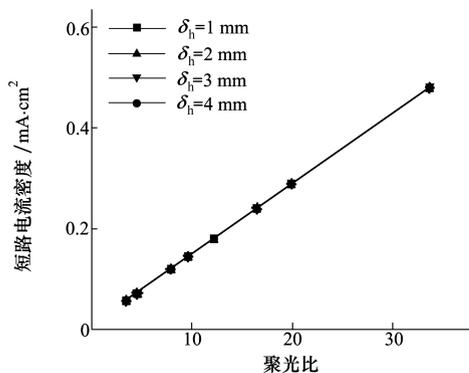


图 11 J_{sc} 随聚光比和基板厚度的变化趋势

由图 11 可知:

1) 相同厚度基板下,短路电流密度随聚光比的增大而线性增大;

2) 改变基板厚度对 J_{sc} 随聚光比的变化曲线影响甚小;在本文中 4 种基板厚度下短路电流密度随聚光比的变化曲线基本重合。

4.4.3 V_{oc} 随不同聚光比和不同基板厚度的变化

按照公式(2)计算得到不同基板厚度下电池 V_{oc} 随聚光比变化如图 12 所示。

由图 12 可知:

1) 在相同基板厚度下, V_{oc} 随聚光比的增大而增大。当聚光比 ≤ 15 时,开路电压增大明显;当聚光比 > 15 时,开路电压的增大较平缓;

2) 在相同聚光比下,开路电压随基板厚度的增加而增加。当 $c = 10$,基板厚度从 1 mm 变为 4 mm 时,开路电压增大了 0.09%,说明基板厚度对电池开

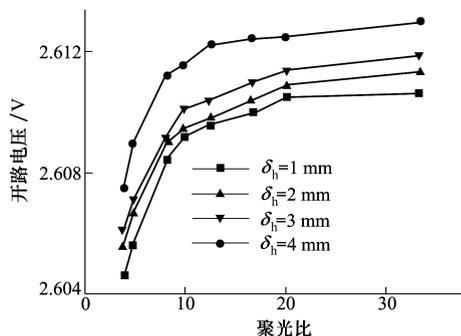


图 12 V_{oc} 随不同聚光比和不同基板厚度变化的趋势

路电压 V_{oc} 影响不大。

4.4.4 P_{max} 随聚光比和基板厚度的变化

依据表 1 中 $d\eta_{sc}/dT_{sc} = -0.9\%/K$ 以及公式(5)计算得到聚光电池效率。由于 FF 不随聚光比变化,可采用移动 $I-V$ 曲线的方式,通过 FF 所框面积计算得到不同基板厚度下聚光电池最大功率 P_{max} 随聚光比变化如图 13 所示。

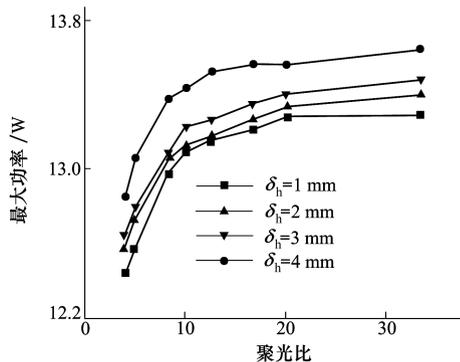


图 13 P_{max} 随聚光比和基板厚度的变化趋势

由图 13 可知:

1) 在相同基板厚度下, P_{max} 随聚光比的增大而增大。当聚光比 ≤ 15 时, P_{max} 增大明显;当聚光比 > 15 时, P_{max} 增大较平缓;

2) 在相同聚光比下,最大功率随基板厚度的增加而增加。当 $c = 10$,基板厚度从 1 mm 变为 4 mm 时,最大功率增大了 2.6% ;

3) 在保证以最大功率输出情况下,所用太阳能电池的数量显著减少,采用 10 倍聚光比可节约 92% 太阳能电池,体现了聚光技术的优势。

5 结 论

本文对聚光比、工作温度和电池输出参数等空

间太阳能电池特性进行了设计和分析,主要研究结果总结如下:

1)建立了聚光太阳能电池热电耦合计算模型,系统性的提出了空间太阳能电池聚光系统设计流程、计算方法和性能参数变化规律,可用于指导聚光太阳能电池系统设计;

2)阐明了聚光比对空间太阳能电池聚光系统各个性能参数的全面影响规律,各个参数是有关联的,必须综合考虑并进行优化。聚光太阳能电池短路电流密度与聚光比成正比;低聚光比条件下,填充因子、转换效率基本不受聚光比影响;最大输出功率、开路电压随聚光比的增大而增大,当聚光比 ≤ 15 时,最大功率和开路电压增大明显,当聚光比 >15 时,最大功率和开路电压增加平缓;

3)聚光太阳能电池工作温度升高对开路电压、效率和输出功率有不利影响,电池片散热设计是影响聚光电池性能的关键因素,采用高导热率基板可显著降低电池工作温度、提高最大功率,推荐使用高温高压成型的 VGCF/环氧树脂基板材料;

4)采用10倍聚光比可节约92%太阳能电池使用量。考虑到太阳能电池安装时的导线、二极管、互联片还要占用一定的有效受光面积。因此聚光比不能太高,否则太阳能电池有效活性面积相对更小,不利于电池性能的发挥。而且高聚光比会导致焦斑与窄电池片需要很高的对准精度,进而对太阳能电池阵对日定向机构精度要求高,会使得系统更为复杂。因此,建议聚光比为9~15时即可体现聚光优势,又可降低聚光透镜组件展开精度以利于工程实现。

参考文献:

- [1] Luque A, Hegedus S. 光伏技术与工程手册[M]. 王文静,译. 北京:机械工业出版社,2011
Luque A, Hegedus S. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering[M]. Wang Wenjing, Translator. Beijing, China Machine Press, 2011(in Chinese)
- [2] 刘志全,杨淑利,濮海玲. 空间太阳能电池阵的发展现状及趋势[J]. 航天器工程,2012,21(6):112-118
Liu Zhiquan, Yang Shuli, Pu Hailing. Development and Trend of Space Solar Array Technology[J]. Spacecraft Engineering, 2012, 21(6):112-118 (in Chinese)
- [3] Pachon D, Anton I, Sala G. Rating and Modeling of Concentrator Systems[C]//29th Photovoltaic Specialists Conference, New Orleans, 2002:1600-1603
- [4] 杨淑利,刘志全,濮海玲. 空间聚光电池阵用拱形菲涅耳透镜设计与分析[J]. 宇航学报,2014,35(1):106-114
Yang Shuli, Liu Zhiquan, Pu Hailing. Design and Analysis of Arched Fresnel-Lens for Spacial Concentrating Solar Array[J]. Journal of Astronautics, 2014, 35(1):106-114 (in Chinese)
- [5] Green M A. 太阳能电池工作原理、工艺和系统的应用[M]. 李秀文,译. 北京:电子工业出版社,1987
Green M A. Solar Cells Operating Principles, Technology, and System Applications[M]. Li Xiuwen, Translator. Beijing, Electronic Industry Press, 1987 (in Chinese)
- [6] Salim A A, Huraib F S, Khoshaim B. Four Year Performance Summary of 350kW Concentrating Photovoltaic Power System[C]//18th IEEE PV Conference, Las Vegas, Nevada, 1985:1545-1552
- [7] Markvart T, Luis C. Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications[M]. New York, Elsevier Science Inc, 2003
- [8] 吴贺利. 菲涅耳太阳能聚光器研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2010
Wu Heli. Research of Solar Energy Fresnel Concentrator[D]. Wuhan, Wuhan University of Technology, 2010 (in Chinese)
- [9] 张明,黄良甫,罗崇泰,等. 空间用平板形非涅耳透镜的设计和光学效率研究[J]. 光电工程,2001,28(5):18-25
Zhang Ming, Huang Liangfu, Luo Chongtai, et al. Study on Design and Optical Efficiency of Flat Type Fresnel Lens for Space Application[J]. Opto-Electronic Engineering, 2001, 28(5):18-25 (in Chinese)
- [10] O'Neill M J, McDaniel A J, Howell J, et al. Stretched Lens Array Squarerigger Technology Maturation[R]. NASA/CP-2007-214494
- [11] Ralf L, Akio S, Atsushi A, et al. Nonideal Concentration of Nonimaging Linear Fresnel Lenses[C]//Proceedings of the SPIE International Symposium on Optical Science and Technology, San Diego, CA, 2001
- [12] Sweet C, Bosco N, Kurtz S. Correlations in Characteristic Data of Concentrator Photovoltaics(Poster)[C]//The 2011 Photovol-

taic Module Reliability Workshop, Golden, Colorado, 2011

- [13] Chen Y M, Ting J M. Ultra High Thermal Conductivity Polymer Composites[J]. Carbon, 2002, 40(3):359-363
- [14] 赵建国, 李克智, 李贺军, 等. 碳/碳复合材料导热性能的研究[J]. 航空学报, 2005, 26(4):501-504
Zhao Jianguo, Li Kezhi, Li Hejun, et al. Research on the Thermal Conductivity of C/C Composites[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(4):501-504 (in Chinese)
- [15] Green M A, Emery K, King D L, et al. Solar Cell Efficiency Tables (Version 28)[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2006, 14: 455-461
- [16] 王艳, 康志龙, 刘赫, 等. 光强和温度对多结太阳能电池的影响研究[J]. 电子设计工程, 2011, 19(5):57-59
Wang Yan, Kang Zhilong, Liu He, et al. Research of Temperature and Light Intensity on Multi-junction Solar Cell[J]. Electronic Design Engineering, 2011, 19(5):57-59 (in Chinese)
- [17] 闵桂荣, 郭舜. 航天器热控制[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 1998
Min Guirong, Guo Shun. Spacecraft Thermal Control[M]. Second Edition. Beijing, Science Press of China, 1998 (in Chinese)

Concentrating System's Design and Performance Analysis for Spacial Solar Array

Shao Limin, Yang Shuli

(China Academy of Space Technology, Beijing 100092, China)

Abstract: A large area of sunlight onto solar cells is gathered by concentrating system for spacial concentrating solar array, which reduces the amount of solar cells by increasing light intensity onto the solar cells of the unit area. Under concentrating conditions, the short-circuit current, open-circuit voltage, fill factor, efficiency, operating temperature and strong thermal-electrical coupling characteristics of concentrating solar cells are different from the conventional solar cells because of the high intensity and high operating temperature. The concentrating module design, solar cell selection, and design of solar cell heat-dissipation have been carried out. The thermal-electric coupling model of special concentrating photovoltaic system has been established. The relationships among concentrated ratio, substrate-thickness, thermal conductivity of substrate-material and solar cell's temperature, density of short-circuit current, open-circuit voltage, maximum output power have been analyzed, which provide a view to a reasonable match and selection of multi-parameters in engineering design. Results show that the concentrated ratio has an overall effect on the open-circuit voltage, short-circuit current, efficiency and operating temperature of the solar cell. There is a strong coupling relationship among the parameters, and the positive and negative impacts caused by the concentrating characteristics should be weighed in the engineering design. The short-circuit current density of concentrating solar cells is proportional to the concentrated ratio. Under the lower concentrated ratio circumstance, fill factor and efficiency is not substantially affected by the concentrated ratio. The maximum output power and open-circuit voltage increase with the increase of concentrated ratio. Temperature of concentrating solar cells has an adverse effect on the open-circuit voltage, efficiency and output power, which needs high efficient radiator measures to be taken. The operating temperature of solar cells could be decreased significantly by the high thermal conductivity of the substrate-material. The concentrated ratio between 9~15 is recommended for spacial solar array, which not only embodies the advantage of concentrator like improving the cell-efficiency and decreasing the cost, but also doesn't exact the deploying precision of concentrating system.

Keywords: concentrating system; performance analysis; concentrated ratio; solar cell's temperature; thickness of substrate