

# 月尘累积对太阳能电池阵电帘除尘效率影响的实验研究

贾巍<sup>1</sup>, 黄三玻<sup>1</sup>, 倪家伟<sup>1</sup>, 王建立<sup>1</sup>, 王训春<sup>1</sup>, 肖杰<sup>2</sup>, 陆剑峰<sup>1</sup>

(1. 上海空间电源研究所 物理电源事业部, 上海 200245; 2. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201108)

**摘要:** 月尘在月球探测器太阳能电池阵表面的累积将会导致其输出功率下降甚至功能失效。近年来, 电帘除尘方法被认为是月尘清除防护的有效手段。文章实验研究了月尘累积对三结砷化镓太阳能电池性能影响, 拟合得到了月尘累积质量与太阳能电池相对输出功率的数学模型; 利用电帘除尘装置, 研究了不同月尘累积质量下电帘的除尘效率。研究表明,  $6 \text{ mg/cm}^2$  月尘累积质量是太阳能电池阵电帘除尘装置启动的最佳工作条件。该研究成果可为开发具有自适应除尘能力的太阳能电池阵提供技术支持。

**关键词:** 三结砷化镓; 太阳能电池; 月尘; 电帘

中图分类号: V476.3; V520.7

文献标志码: B

文章编号: 1673-1379(2014)02-0182-04

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2014.02.014

## Experimental study of dust removal efficiency of transparent electric curtain for solar array under lunar dust deposition

Jia Wei<sup>1</sup>, Huang Sanbo<sup>1</sup>, Ni Jiawei<sup>1</sup>, Wang Jianli<sup>1</sup>, Wang Xunchun<sup>1</sup>, Xiao Jie<sup>2</sup>, Lu Jianfeng<sup>1</sup>

(1. Department of Physical Power, Shanghai Institute of Space Power-sources, Shanghai 200245, China;

2. Aerospace System Engineering of Shanghai, Shanghai 201108, China)

**Abstract:** The solar array output power will be decreased, which will lead to its failure, when the lunar dust is accumulated on the surface of the solar array. In recent years, the electric curtain dust removal method is considered as an effective way for the lunar dust protection. In this paper, the performance of the triple-junction gallium arsenide solar cell is analyzed through experiments of the lunar dust accumulation on the solar cell, and a trend exponential fitting function between the relative output power and the dust deposition mass is obtained. Furthermore, the dust removal efficiency of the electric curtain for different amounts of lunar dust accumulation mass is studied. The results show that the optimum operating point of the electric curtain dust removal device is  $6 \text{ mg/cm}^2$ . The research provides a technical support for the solar array with adaptive dust removal capacity.

**Key words:** triple-junction gallium arsenide; solar cells; lunar dust; electric curtain

## 0 引言

月尘具有颗粒小、密度低、带静电的特性, 易附着于月面探测器的光学镜头、辐射板以及太阳能电池阵等表面, 且由于月球的高真空和低重力环境, 月尘很难自行脱落<sup>[1-3]</sup>, 所以分析随时间变化的月尘累积对太阳能电池阵的影响显得尤为重要<sup>[4]</sup>。兰州技术物理研究所通过建模和实验验证研究了月尘

遮挡对单结砷化镓太阳能电池输出功率的影响<sup>[5]</sup>。但是, 现有的三结砷化镓太阳能电池的量子响应与单结砷化镓太阳能电池相比更加复杂, 不能简单采用透过率建立模型, 否者会出现较大偏差。

本文采用“嫦娥三号”计划着陆场模拟月尘开展三结砷化镓太阳能电池性能衰减实验研究; 利用研制的电帘除尘装置研究了太阳能电池阵除尘效率,

以确定电帘除尘装置的最佳启动工作条件, 为探月航天器太阳电池阵设计提供技术支持。

### 1 月尘对太阳电池性能的影响

当月尘沉积太阳电池阵表面时, 入射光线将会发生透射、反射和散射现象, 导致入射到太阳电池的光谱发生变化, 即相对于标准 AM0 太阳光谱, 出现了辐照度的衰减。

为测试月尘累积量对太阳电池性能衰减的影响, 设计如下实验方案试件: 选用效率为 28.31% 的三结砷化镓太阳电池 (其尺寸 40 mm×60 mm), 采用振动筛将模拟月尘均匀撒布在电池表面 (如

图 1 所示); 用电子天平测量月尘质量, 再将均匀撒布了模拟月尘的电池放置于 AM0 太阳模拟器下测试其性能。不同单位面积月尘累积质量 (以下简称月尘累积质量) 下三结砷化镓太阳电池性能的测试结果见表 1。

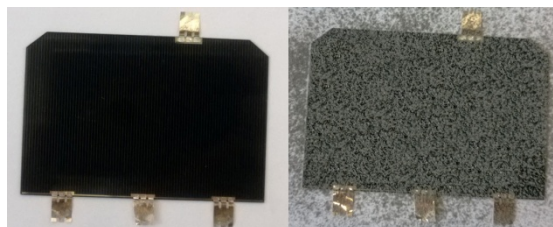
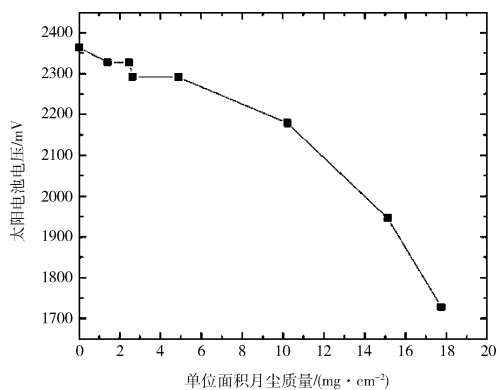


图 1 未撒布和撒布了模拟月尘的太阳电池  
Fig. 1 The solar cells without and with lunar dust

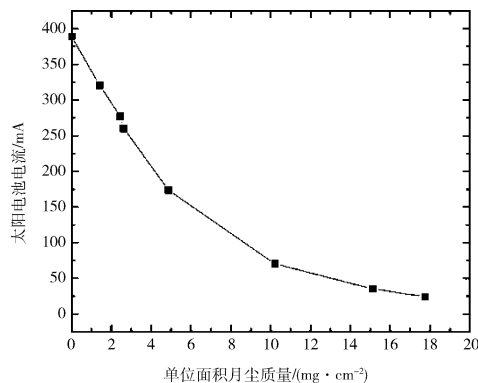
表 1 不同月尘累积质量下太阳电池性能衰减实验测试结果  
Table 1 Solar cell performance degradation for different amounts of lunar dust deposition mass

月尘累积质量/ ( $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	太阳电池开路 电压 $V_{oc}/\text{mV}$	太阳电池短路 电流 $I_{sc}/\text{mA}$	太阳电池工作 电压 $V_m/\text{mV}$	太阳电池工作 电流 $I_m/\text{mA}$	太阳电池相对 输出功率/%
0	2682.3	418.3	2363.2	389.0	100
1.42	2649.6	345.9	2327.3	320.6	81.17
2.46	2615.5	301.1	2327.0	276.8	70.08
2.62	2599.8	281.7	2291.6	260.3	64.89
4.88	2566.5	192.9	2290.9	173.6	43.27
10.21	2491.8	83.1	2178.6	70.3	16.67
15.12	2370.2	43.3	1945.8	35.1	7.42
17.75	2303.6	31.2	1727.9	24.5	4.59

月尘累积质量对太阳电池工作电压和工作电流的影响如图 2 所示, 可见: 在不同累积质量月尘的遮挡下, 三结砷化镓太阳电池的工作电流  $I_m$  和电压  $V_m$  均下降, 但月尘累积对  $I_m$  的衰减影响更大 (近似以指数函数形式衰减), 而  $V_m$  在月尘累积质量  $>6 \text{ mg}/\text{cm}^2$  以后才有明显的下降。



(a) 月尘累积质量与太阳电池工作电压的关系



(b) 月尘累积质量与太阳电池工作电流的关系

图 2 月尘累积质量与太阳电池工作电压和工作电流的关系

Fig. 2 Operating voltage and operating current of solar cell vs. lunar dust cumulative mass

月尘累积质量对相对太阳电池功率的影响如图 3 所示, 可见: 随着月尘累积质量增加, 太阳电池相对输出功率也呈现指数函数衰减, 当月尘累积质量  $>6 \text{ mg}/\text{cm}^2$  时, 相对输出功率将减小到 30% 以

下。对实验结果进行一阶指数衰减拟合,  $y$  为相对输出功率,  $x$  为月尘累积质量, 得到方程为

$$y = A_1 \exp[-(x-x_0)/t_1] + y_0, \quad (1)$$

式中:  $A_1 = 100.096\ 05$ ;  $x_0 = 0.180\ 62\ \text{mg}/\text{cm}^2$ ;  $t_1 = 6.130\ 41$ ;  $y_0 = -1.688\ 95$ 。实验结果和拟合曲线如图 3 所示。

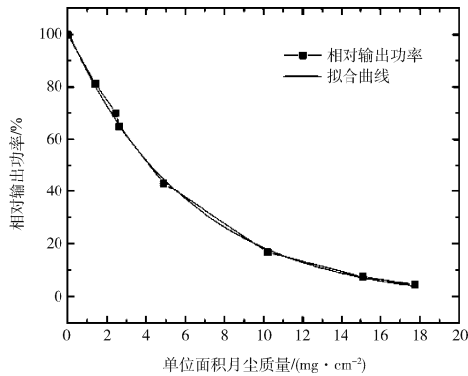


图 3 月尘累积质量对太阳电池相对输出功率的影响  
Fig. 3 The relationship between relative output power and dust deposition mass per unit area

## 2 电帘除尘装置

从上述研究发现, 月尘累积质量将会造成太阳电池输出功率急剧下降。因此, 有必要在太阳电池阵上布置除尘装置。但是除尘装置对太阳电池阵表面有严格的遮挡要求, 而且除尘时不能对电池表面造成任何损伤而影响透过率。相对于其他除尘技术而言, 电帘除尘技术具有高透过率、长寿命以及高稳定性等优点。根据电源的类型, 电帘可分为单相电帘、三相电帘和多相电帘。单相电帘(驻波电帘)构造更简单, 而且与多相电帘一样能够对月尘颗粒进行清除<sup>[6-10]</sup>。本文将以单相电帘为例, 开展月尘累积质量对电帘除尘效率影响的研究。

电帘除尘装置如图 4 所示, 其中, 蓄电池输出电压为直流 12 V, 采用 DC-AC 逆变器将直流电调节为电压 220 V、频率 50 Hz 的交流电, 接着采用变压器将其升压到 1500 V, 然后将 1500 V 电压输送至电帘除尘装置。除尘装置中的电帘(见图 4)是采用湿式刻蚀方法在 ITO 玻璃上刻蚀出电极而制备的, 电极宽度为 1 mm, 占空比为 1:1, 电帘尺寸为 60 mm×60 mm。为了防止发生电极击穿, 在电帘表面均匀涂覆太阳电池盖片胶, 然后覆盖 120 μm 厚的玻璃盖片。

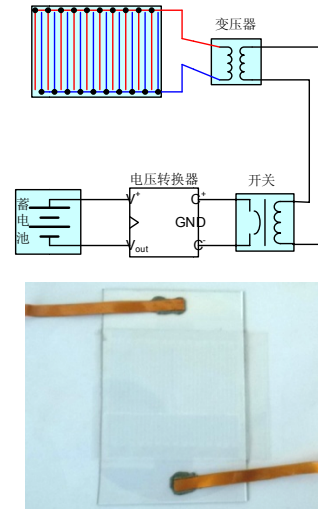


图 4 电帘除尘装置与电帘实物图  
Fig. 4 Dust removal device and the electric curtain

## 3 月尘累积对除尘效率的影响

通常电帘的除尘效率定义为

$$\eta = [(m_0 - m_1)/m_0] \times 100\%, \quad (2)$$

式中:  $m_0$  为电帘表面月尘质量;  $m_1$  为除尘后剩余月尘质量。下面将研究不同的月尘累积质量下电帘除尘效率的变化。

利用上述的电帘除尘装置进行了除尘实验, 表 2 为不同月尘累积质量下电帘除尘效率测试结果, 除尘后太阳电池相对输出功率为用式(1)计算所得到的结果。

表 2 电帘除尘效率测试结果

Table 2 Lunar dust removal efficiency test results of the electric curtain

除尘前月尘累积质量/ ( $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	除尘后月尘累积质量/ ( $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	除尘效率/%	除尘后太阳电池相对输出功率/%	耗时/s
1.42	0.12	91.2	98.75	1
2.46	0.21	91.5	97.49	1
2.62	0.25	90.5	96.86	1
4.88	0.54	88.9	92.56	4
10.21	1.12	89.0	84.41	15
15.12	3.25	78.5	59.39	30
17.75	4.67	73.7	46.34	45

由表 2 可以得出, 随着月尘累积质量的增加, 除尘后月尘累积质量同样增加, 除尘效率也随之而变化。但是从图 5 和图 6 中发现, 在月尘累积质量  $< 10\ \text{mg}/\text{cm}^2$  时, 除尘效率均在 89% 以上; 而当月尘累积质量  $> 15\ \text{mg}/\text{cm}^2$  时, 除尘效率降到 80% 以

下, 导致有较多月尘团聚在电帘表面, 即使延长除尘时间也难以清除。

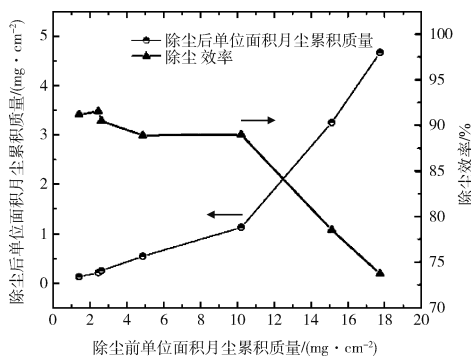
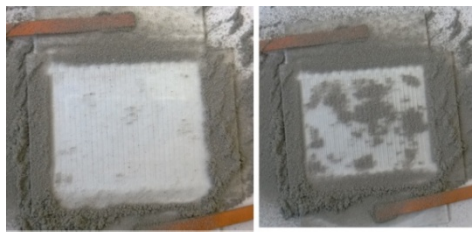


图5 除尘效率和除尘后太阳能电池相对输出功率

Fig. 5 Dust removal efficiency and the relative output power of solar cell after dust removal measures



(a) 2.62 mg/cm<sup>2</sup> (b) 15.12 mg/cm<sup>2</sup>

图6 对不同累积质量的月尘清除后的电帘

Fig. 6 Electric curtain after dust removal measures

由图6(b)可以看出, 月尘累积质量过高时, 月尘容易发生团聚现象而难以完全清除, 导致电帘除尘效率下降。因此必须设定工作条件, 在月尘累积质量达到一定程度时电帘及时开机工作, 以实现太阳能电池阵长期高效率输出。

针对太阳能电池阵, 当其电路输出电压低于母线电压值时, 将无法为电源系统提供功率输出。因此在确定电帘工作条件时, 必须考虑月尘对太阳能电池工作电压  $V_m$  的影响。结合以上研究, 可以看出当月尘累积质量  $>6 \text{ mg/cm}^2$  时, 工作电压  $V_m$  才有明显的下降, 而此时电帘除尘仍具有很高的效率 ( $\geq 90\%$ ), 所以可以设定当月尘累积质量为  $6 \text{ mg/cm}^2$ , 即太阳能电池阵输出电流下降至  $30\%$  左右时, 开启电帘进行除尘。

#### 4 结束语

本文主要研究了月尘累积对三结砷化镓太阳能电池性能和电帘除尘效率的影响。利用模拟月尘进行遮

挡实验, 拟合得到了月尘累积质量与三结砷化镓太阳能电池性能的函数关系; 并利用自行研制的电帘除尘装置, 研究了不同月尘累积质量下电帘除尘效率的变化, 确定了太阳能电池阵电帘除尘启动的最佳工作条件。

#### 参考文献 (References)

- [1] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005
- [2] 姚日剑, 王先荣, 王鹤. 月球粉尘的研究现状[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(6): 512-515  
Yao Rijian, Wang Xianrong, Wang Yi. A review on lunar dust researches[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2008, 25(6): 512-515
- [3] Gaier J R. The effects of lunar dust on EVA systems during the Apollo missions, NASA/TM-2005-213610[R]
- [4] Katzan C M, Edwards J L. Lunar dust transport and potential interactions with power system components, NASA-LeRC CR1991-4404[R]
- [5] 庄建宏, 王先荣, 冯杰. 月尘对太阳电池的遮挡效应研究[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(4): 409-411  
Zhuang Jianhong, Wang Xianrong, Feng Jie. Overlapping effect of lunar dust sediment on solar cell[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010, 27(4): 409-411
- [6] 刘关卿, 李水清, 柳冠青, 等. 模拟火星灰在行波电帘中的运动特性[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(12): 2073-2075  
Liu Guanqing, Li Shuiqing, Liu Guanqing, et al. Characteristics of the motion of martian dust simulant on the travelling-wave electric curtain[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(12): 2073-2075
- [7] Sun Q X, Yang N N, Cai X B, et al. Mechanism of dust removal by a standing wave electric curtain[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2012, 55(6): 1-8
- [8] Mazumder M, Sharma R, Biris A, et al. Self-cleaning transparent dust shields for protecting solar panels and other devices[J]. Particulate Science and Technology, 2007, 25(1): 5-20
- [9] Ali M, Reddy R N, Mazumder M K. Electrostatic charge effect on respirable aerosol particle deposition in a cadaver based throat cast replica[J]. Journal of Electrostatics, 2008, 66(7): 401-406
- [10] Sharma R, Wyatt C A, Zhang J, et al. Experimental evaluation and analysis of electrodynamic screen as dust mitigation technology for future mars missions[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(2): 591-596

(编辑: 许京媛)