

火星尘埃对太阳电池阵的影响与电帘除尘研究

贾巍¹, 倪家伟¹, 黄三玻¹, 宗魏², 肖杰², 王训春¹, 池卫英¹

(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:火星表面大量尘埃在太阳电池阵表面的累积将会导致其输出功率下降,甚至使太阳电池阵功能失效。近年来,电帘除尘方法被认为是在火星着陆任务中进行尘埃防护最有效的手段之一。本文开展了火星尘埃累积对三结砷化镓太阳电池性能影响的实验研究,得到了火星尘埃累积量与太阳电池电压、电流和相对输出功率数值模型;通过除尘技术分析,确定电帘除尘装置构型;依据制备得到的除尘电帘,对不同火星尘埃累积下电帘的除尘效率进行了研究,为火星着陆太阳电池阵遥测数据分析和开发自适应除尘太阳电池阵提供有力的技术支持。

关键词: 三结砷化镓太阳电池; 火星尘埃; 电帘除尘

中图分类号: V47 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-7777(2014)04-0303-05

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2014.04.010

Experimental Study on Triple Junction Solar Cells Performance and Dust Removal Efficiency with Mars Dust

JIA Wei¹, NI Jiawei¹, HUANG Sanbo¹, ZONG Wei²,
XIAO Jie², WANG Xunchun¹, CHI Weiying¹

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

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

Abstract: In the future manned lunar landing, the solar array output power may be decreased or malfunction when the Mars dust accumulated on the surface of the solar array. In recent years, electric curtain dust removal method is considered an effective means for the Mars dust prevention. In this paper, the performance of triple-junction gallium arsenide solar cell was analysed as Mars dust accumulated on solar cell. From the experimental results, we obtained a trend exponential function between the relative output power and dust deposition mass. Next, the dust removal efficiency of electric curtain under different Mars dust accumulation mass was studied, and the optimum operating point of electric curtain dust removal device was obtained. The research will provide a strong technical support for adaptive dust solar array.

Key words: triple-junction gallium arsenide solar cells; Mars dust; electric curtain dust removed

0 引言

火星大气中含有显著的悬浮尘埃,据估算火星表面大气中尘埃密度约为 $1.8 \times 10^{-7} \text{ kg/m}^3$,这些尘埃与太阳辐射、热辐射的相互作用,关系到火星大气中相关的凝聚和蒸发过程,也影响到火星大气的结构、热平衡和动力学过程,被认为是火星低层大气

环境变化的重要因素之一^[1-2]。火星上经常出现剧烈的火星风暴,在火星风的作用下整个火星弥漫着火星尘埃。火星尘埃通过范德华力和静电力的作用会积聚在太阳电池翼上,使电池的性能下降。据火星开拓者(Mars pathfinder)测试结果表明:积聚和粘附在太阳电池翼上的尘埃使太阳电池翼的转换效率每个火星日下降约 0.28%。2年后,估计太阳电

池翼的电性能下降将可达 22%~89%。而 2004 年着陆的“勇气”号和“机遇”号受火星沙尘暴影响,火星车的每日供电曾分别降至 261 W·h 和 128 W·h。而正常情况下,每辆火星车日均电力供应都可达到 700 W·h 以上^[3]。

火星尘对太阳电池阵的影响可以直接由太阳电池性能决定,因此可以研究太阳电池性能变化来得出太阳电池阵性能变化。火星尘埃对太阳电池的影响主要表现在两个方面:1)火星尘沉积在电池表面并不断积累,影响太阳光的透过率,进而导致其输出功率下降;2)由于火星尘粘附于太阳电池表面,改变了电池表面的热物理性能,从而导致电池温度升高和性能降低。

当火星尘埃沉积在太阳电池上时,由于火星尘埃形状、粒径不同,光将会分为透射光、反射光和散射光,入射到太阳电池的光谱将发生变化,与 AM0 光谱相比不仅仅是辐照度的衰减。因此对于三结砷化镓太阳电池来说,采用透射率变化等效遮挡面积来研究三结砷化镓太阳电池性能变化将会出现较大偏差。本文将首先分析火星尘埃累积量与太阳电池电压、电流和相对输出功率的关系,通过性能分析确定除尘电帘的最佳工作条件。

1 火星尘对太阳电池阵影响分析

为测试火星尘埃累积量对太阳电池性能衰减的影响,设计如下实验方案:选用效率为 29% 的三结砷化镓太阳电池(电池尺寸 40 mm×60 mm),采用振动筛将模拟火星尘埃均匀撒布在三结砷化镓太阳电池表面。然后采用电子天平测量火星尘埃质量,再将试样放置于 AM0 太阳模拟器下对太阳电池性能进行测试。

1.1 火星尘埃累积对太阳电池工作电压 V_m 影响分析

图 1 为覆盖不同尘埃后太阳电池工作电压 V_m 的变化曲线。从图中可以看出,当单位面积火星尘埃质量少于 1 mg/cm² 时,太阳电池工作电压 V_m 仅下降 2%;单位面积火星尘埃质量 5 mg/cm² 时,太阳电池工作电压 V_m 下降 8%;单位面积火星尘埃质量达到 6.5 mg/cm² 时,太阳电池工作电压 V_m 下降 18%。从实验结果看出,火星尘埃累积对太阳电池工作电压 V_m 性能影响较小,但是针对太阳电池阵工况,当太阳电池电路输出电压低于母线电压值时,太阳电池阵将无法为电源系统提供功率输出,不满

足航天器输出功率要求。因此当太阳电池工作电压 V_m 下降至 90% 时(单位面积火星尘埃质量 ≤ 5 mg/cm²),必须清除太阳电池阵沉积的火星尘埃。

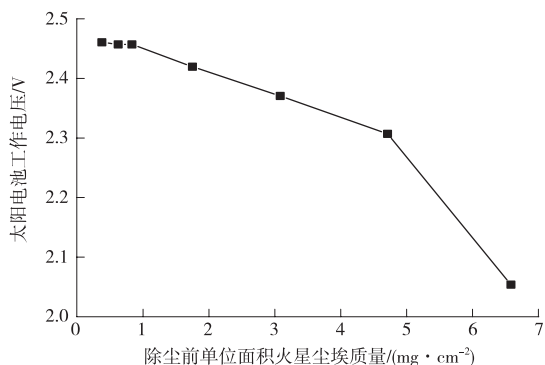


图 1 尘埃累积对太阳电池工作电压 V_m 的影响

Fig. 1 Relationship between dust cumulative mass and operating voltage V_m

1.2 火星尘埃累积量对太阳电池工作电流 I_m 影响分析

火星尘埃累积量对太阳电池工作电流 I_m 的影响如图 2 所示,与太阳电池工作电压 V_m 明显不同,随着火星尘埃累积增加,太阳电池工作电流 I_m 呈现指数函数衰降的趋势。当单位面积火星尘埃质量达到 6.5 mg/cm² 时,太阳电池工作电流 I_m 下降了 89%。对火星尘埃累积太阳电池工作电流 I_m 变化实验结果进行一阶指数衰减拟合,火星尘埃累积量为 x (单位为 mg/cm²),太阳电池工作电流 I_m 为 y (单位为 mA)。拟合得到方程为

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

其中 $y_0 = -6.21296$, $A_1 = 148.07096$, $t_1 = 3.30783$, 实验结果和拟合曲线如图 2 所示。从图 2 可以看出,实验测试曲线与拟合方程之间相关度达到了 0.99917,具有较高吻合度,因此可以认为火星尘埃累积量对太阳电池工作电流 I_m 的影响可以采用拟合得到的经验公式进行分析,可以为未来分析火星着陆器遥测数据提供支持。

1.3 火星尘埃累积量对太阳电池相对输出功率影响分析

太阳电池输出功率由太阳电池工作电流 I_m 和太阳电池工作电压 V_m 决定($P = V_m \cdot I$),虽然太阳电池工作电压 V_m 变化较小,但是太阳电池工作电流 I_m 为指数衰降,因此太阳电池相对输出功率也呈现指数函数衰降的趋势(如图 3 所示)。当单位面积火星尘埃质量达到 6.5 mg/cm² 时,太阳电池相对输出功率也下降了 89%。对火星尘埃累积太阳电

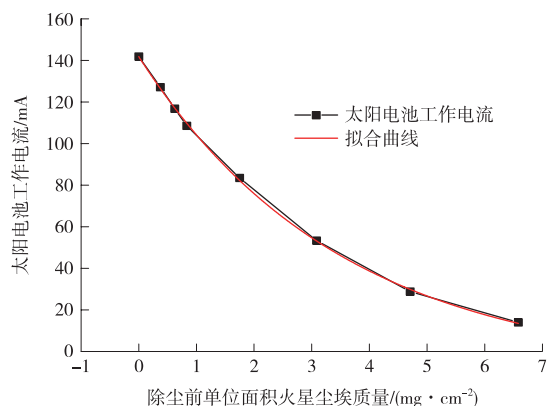
图2 尘埃累积对太阳能电池工作电流 I_m 影响

Fig. 2 Relationship between dust cumulative mass and operating current

池相对输出功率变化实验结果进行一阶指数衰减拟合,火星尘埃累积量为 x (单位为 mg/cm^2),太阳能电池相对输出功率为 y (单位为%)。拟合得到方程为

$$y = A_1 \exp(-x/t_1) + y_0 \quad (2)$$

其中 $y_0 = -4.20634$, $A_1 = 104.20634$, $t_1 = 3.08457$,实验结果和拟合曲线如图3所示。由于太阳能电池工作电压也有所变化,因此太阳能电池相对输出功率下降较太阳能电池工作电流下降多,因此实验测试曲线进行指数函数拟合时,相关度有所下降,但是由于太阳能电池工作电压变化不大,因此测试曲线与拟合方程之间相关度为0.998,仍具有较高吻合度。

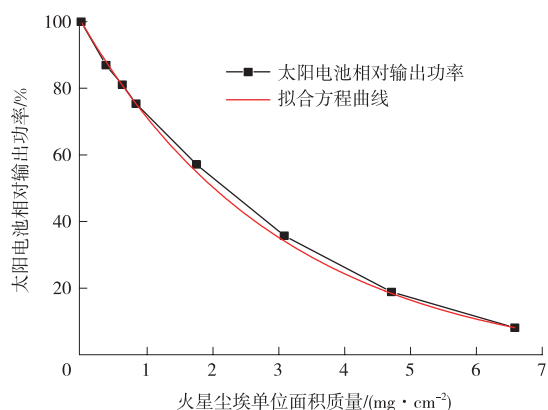


图3 尘埃累积对太阳能电池相对输出功率影响

Fig. 3 The relationship graph of relative output power and dust deposition mass per unit area

通过对火星尘埃累积对太阳能电池性能影响进行分析,可以直观反映了航天器太阳能电池阵输出性能变化。根据试验结果可以看出,火星尘埃对太阳能电池阵性能影响十分明显,因此必须对太阳能电池阵除尘技术进行研究,才能确保航天器太阳能电池阵稳定

输出。

2 除尘技术介绍

通过上述分析可以看出,尘埃严重影响着太阳能电池阵统的正常工作。因此,如何及时有效地去除太阳能电池阵表面沉积的大量尘埃以保障其高效率、高清晰工作已成为着陆器中亟需解决的问题。所以针对太阳能电池阵表面的自清洁技术研究也越来越引起人们的关注。NASA 重点关注的除尘技术主要有4种:自然除尘、机械振动除尘、电帘除尘和莲叶效应除尘^[4-7]。

1) 自然除尘

利用火星风进行尘埃清除的方法为自然除尘法。Gaier Perez-Davis 和 Marabito 研究了此方法。通过试验表明:在低气压的火星环境下除尘所需要风速比在地球大气中需要的高。当在火星风速 $\geq 35 \text{ km/s}$ 时,才能清除大部分微尘。而从“海盗号”探测器对风速100多天的探测结果表明:其着陆点的最大风速仅为 25 m/s 。因此,在火星上不太可能仅仅利用风速就能清除大量的微尘。

2) 机械振动除尘

NASA's Jet Propulsion Laboratory 最初提出太阳翼抖动技术方案,即将太阳能电池翼设计为可转动的,在早晨或傍晚太阳光线几乎是水平时,转动太阳能电池翼使其为垂直或倾斜状态,来清除微尘。但是经过 JPL 通过几年的研究发现机械振动除尘技术存在以下几种难以克服的问题:①火星尘埃通过范德华力和静电力的作用在太阳能电池翼,使其具有较强吸附力,必须具有较大振动幅度才能达到效果;②火星气压较低,重力较小,难以形成有效的剪切力,抖动效果不佳;③电池阵旋转结构复杂,电机振动产生对太阳能电池阵结构存在影响;④火星表面存在较多沙地,容易导致火星车下陷。

3) 电帘除尘

电帘除尘工作的基本原理是将电极连接到多相(或单相)交流电源上,从而产生交流电场的行波(或驻波),沉积在电极的灰尘由于接触或者与绝缘介质摩擦而带电荷,因此,在电场的作用下灰尘粒子随行波(或驻波)被举起并沿着垂直于电极轴线的方向运动,从而达到除尘的目的^[8]。1967年 Tatom 等人提出用电帘除尘来解决 Apollo 任务的除尘问题,但报告中并没有进行深入探讨。20世纪70年代, Masuda 等人对电帘除尘技术理论进行分析研究,

并且在大气环境中证明了利用电帘结构产生行波的方法可以成功地进行无接触式搬运尘埃,尘埃根据所带电荷的极性顺着或逆着电场的方向移动,最终被移除。但是随着美国登月计划停止,该研究也随之搁浅。直到美国重返月球计划的提出,电帘除尘技术才重新引起广泛的关注。NASA 有关实验室已经进行了大量的试验,并获得了宝贵的数据。特别值得关注的是近几年来美国波士顿大学 M. K. Mazumder 教授课题组在 NASA 基金的支撑下已经在进行电帘除尘装置应用模拟实验,以便能够将该装置应用于火星、月球等火星航天登陆器上。

4) 莲叶效应除尘

一种处于研究中的被动防尘方法,是借鉴自然界荷叶的疏水原理,在散热面上增加细小的纹路,这些纹路的尺寸比火星尘颗粒的特征尺寸还要细小,当火星尘与这种散热面接触时就相当于与一个纳米级的“针床”接触而不是与一个平面接触,这大大减小了火星尘颗粒与散热面之间的接触面积,从而减弱了它们之间的附着力,达到防尘的目的。

由于着陆器的光学系统及太阳能电池阵表面不但需要具有高透过率而且不能被磨损,所以对其光学系统表面的除尘要求相对其他非光学表面显得更为苛刻。通过对上述除尘技术分析可以看出,采用电帘的除尘技术相对其他技术而言,具有高透过率、高寿命以及高稳定性等优势。所以电帘除尘技术研究对月球与火星着陆探测任务很有必要。

3 除尘电帘工况研究

依据北京理工大学胡更开教授课题组优化结果^[9]得到的相对最佳工作条件和结构参数;接下来根据相关参数,制备设计的除尘电帘。本文中用光刻 ITO 透明导电玻璃或透明导电薄膜得到电帘,达到除尘并且对光学透过率影响小的目的^[10]。

当航天器着陆于火星后,随着任务需要,航天器将会在不同地貌的火星表面行走,而且也会面临不同的气候条件,但与地球不同,火星恶劣气候主要为沙尘暴、大风等天气,并无降雪、降雨以及结冰等气候天气,因此在完成除尘电帘制备封装后,需对除尘组件的不同尘埃累积工况进行分析研究,以检验除尘组件在不同工况下的工作效能以及相应控制策略。

通常电帘的除尘效率定义为

$$\eta = [(m_0 - m_1) / m_0] \times 100(\%) \quad (3)$$

其中: m_0 为电帘表面尘埃质量; m_1 为除尘后剩余尘埃质量; η 体现了电帘的尘埃清除能力。当 $m_1 = 0$ 时, η 为 100%,表明尘埃全部被清除。当颗粒直径太小时,无论时间多长,仍将有一部分尘埃难以被清除。

随着单位面积火星尘埃累积质量增加,除尘效率也随之变化。但是从图 4 和图 5 中发现,在单位面积火星尘埃累积质量 $< 3 \text{ mg/cm}^2$ 时,除尘效率均在 90% 以上;而当火星尘埃累积质量 $> 4 \text{ mg/cm}^2$ 时,除尘效率下降到 80% 以下,导致有较多火星尘埃团聚在电帘表面难以清除,即使延长除尘时间也难以搬运。由图 5 可以看出,当尘埃累积达到 2 mg/cm^2 时,电帘除尘效率较高,但是受表面能影响已经在局部区域出现聚集;当尘埃累积达到 3 mg/cm^2 时,电帘工作后,火星尘埃发生团聚现象,电帘除尘效率下降,难以完全清除。因此必须设定工作条件,在单位面积火星尘埃累积质量达到一定程度时电帘及时开机工作,以确保太阳能电池阵长期高效率输出并减少能量损耗。

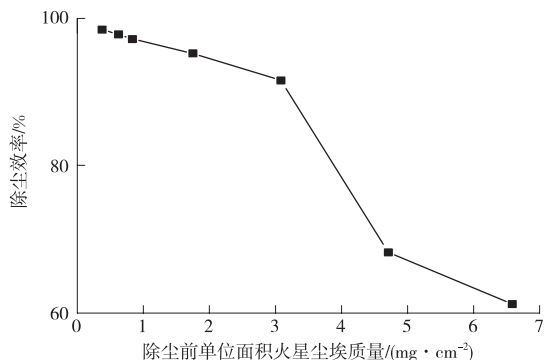


图 4 不同尘埃累积对除尘效率影响

Fig. 4 Relationship between dust cumulative mass and dust removal efficiency

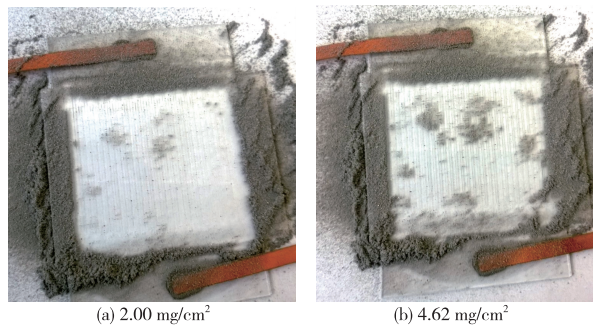


图 5 不同尘埃累积除尘后电帘照片

Fig. 5 Electric curtain after dust removal work

从图 6 可以看出,当单位面积火星尘埃累积质量 $> 3 \text{ mg/cm}^2$ 时,太阳能电池阵相对输出功率下降至

30%左右,而此时电帘除尘仍具有很高的效率($\geq 90\%$)。所以可以设定当单位面积火星尘埃累积质量达 $3 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 时,即太阳电池阵相对输出功率下降至 30%左右时,开启电帘进行除尘,既可保证航天器长期有效的能源供应,也可降低除尘电帘功耗。

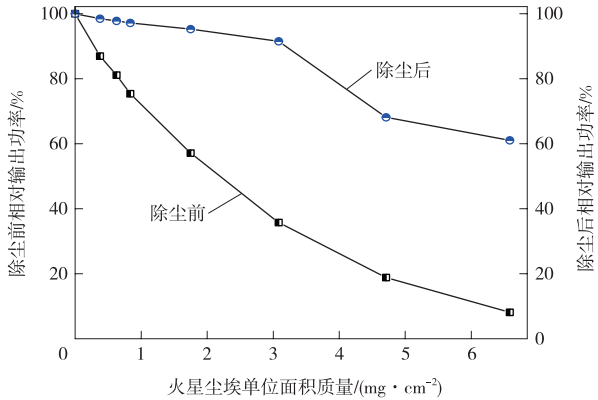


图6 除尘前后太阳电池阵相对输出功率

Fig. 6 The relative output power of solar cell before and after dust removal work

4 结 论

本文通过对火星尘埃累积对三结砷化镓太阳电池性能影响进行分析,建立了火星尘埃累积与三结砷化镓太阳电池性能函数模型,为未来火星着陆航天器遥测数据分析提供支持。依据电帘优化设计结果,制备透明除尘电帘。通过搭建一体化电路,完成电帘除尘演示系统搭建,研究了不同火星尘埃累积质量下电帘除尘效率的变化,确定了太阳电池阵电帘除尘启动的最佳工作条件。

致谢

感谢北京理工大学胡更开教授课题组与清华大学李水清教授课题组提供技术支持。

参 考 文 献

[1] 孙丽琳,秦国泰,朱光武. 火星尘埃与探测[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(1): 28-32. [Sun L L, Qin G T, Zhu G W. Characteristic and detection of Mars dust[J]. Journal of

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(1): 28-32.]

- [2] Calle C I, Clements J S, Willis J, et al. Paschen breakdown experiments in a Martian atmosphere[J]. NASA Technical Memorandum, 2004(211535): 86-87.
- [3] Paul M S, Jennifer A H. The Mars surface environment and solar array performance[C]// [S. l.]: IEEE, 2010.
- [4] Geoffrey A L. Mars dust-removal technology[J]. Journal of Propulsion and Power, 1998, 14(1): 126-128.
- [5] Krauss C E, Horányi M, Robertson S, et al. Experimental evidence for electrostatic discharging of dust near the surface of Mars[J]. New Journal of Physics, 2003, 5(7): 71-79.
- [6] Calle C I, Mantovani J G, Buhler C R, et al. Embedded electro-static sensors for Mars exploration missions [J]. Journal of Electrostatics, 2004(61): 245-257.
- [7] Mazumder M K, Saini D, Biris A S, et al. Mars dust: characterization of particle size and electrostatic charge distributions[C]// League City: 35th Lunar and Planetary Science Conference, 2004.
- [8] 柳冠青. 范德华力和静电力下的细颗粒离散动力学研究[D]. 北京:清华大学, 2011. [Liu G Q. Discrete element methods of fine particle dynamics in presence of van der Waals and electrostatic forces[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.]
- [9] 孙旗霞, 杨宁宁, 蔡小兵, 等. 基于交变电场的月表除尘方法研究进展[J]. 力学进展, 2012, 42(6): 785-803. [Sun Q X, Yang N N, Cai X B, et al. Advance in lunar surface dust removal method by electrodynamic field[J]. Advances in Mechanics, 2012, 42(6): 785-803.]
- [10] 贾巍, 黄三玻, 倪家伟, 等. 月尘累积对太阳电池阵电帘除尘效率影响的实验研究[J]. 航天器环境工程, 2014, 31(2): 182-185. [Jia W, Huang S B, Ni J W, et al. Experimental study of dust removal efficiency of transparent electric curtain for solar array under lunar dust deposition[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2014, 31(2): 182-185.]

作者简介:

贾巍(1985—),男,博士,上海空间电源研究所物理电源事业部,工程师。主要研究方向为新型太阳电池阵研发与新型光伏技术。

通信地址:上海市东川路 2965 号

电话:13651628209

E-mail:njustjw@126.com

[责任编辑:宋宏]