

火星太阳能电池翼除尘方法综述

袁亚飞, 刘 民, 杨亦强
(北京东方计量测试研究所, 北京 100086)

摘要:“萤火一号”火星探测器即将发射升空, 标志着我国火星探测计划实施的开始。然而, 火星尘埃在范德华力和静电力的作用下积聚在太阳能电池翼的表面, 使其转换效率下降, 影响火星探测器的寿命。因此, 开展火星太阳能电池翼除尘技术的研究是非常有意义的。文章主要介绍了火星太阳能电池翼的除尘方法, 特别是目前最受关注的电帘除尘方法, 并对其基本结构、除尘原理、除尘效率和透光性做了详细的描述, 对开展火星太阳能电池翼除尘技术的研究具有一定的参考作用。

关键词: 除尘方法; 太阳能电池; 火星探测; 电帘除尘

中图分类号: V520.2

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379(2010)05-0604-03

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2010.05.012

0 引言

火星是一颗与地球环境极为相似的行星, 通过火星探测可以探索宇宙的奥秘、寻找生命的痕迹以及了解地球的演变。从1960年10月10日苏联发射第一颗火星探测器(Marsnik-1)起到2008年底, 美国、俄罗斯、欧空局和日本已经进行了40次火星探测任务。“萤火一号”火星探测器即将发射升空, 标志着我国火星探测计划的开始^[1]。火星探测器仍然采用太阳能电池翼提供电能。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能电池翼上, 使电池的性能下降。据火星开拓者(Mars Pathfinder)测试结果表明: 积聚和粘附在太阳能电池翼上的尘埃使太阳能电池翼的转换效率每个火星日下降约0.28%。2年后, 估计太阳能电池翼的电性能下降将可达22%~89%^[2-3]。如表1所示。

表1 积聚的微尘使太阳能电池翼表面模糊的程度
Table 1 Obscureness degree of the solar array surface resulted from the accumulation of Mars dust

	模糊度/%	
	30 d	2 y
基本情况	6.6	77
最好情况	0.5	22
最坏情况	52.2	89

为保证火星探测器的工作寿命, 必须对积聚在

太阳能电池翼表面的火星尘埃进行清除。火星尘埃的清除方法主要有4种: 自然除尘、机械除尘、电动机械除尘和静电除尘^[4-5]。

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^[6-7]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的风速比在地球大气中需要的高。当在火星风速 ≥ 35 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。

探测结果还表明在“海盗号”垂直安装的相机镜头上并没有积聚微尘, 这是一个重要启示。因此, 我们可以采用垂直或倾斜安装太阳能电池翼的方法, 这样可以借助火星的重力作用清除微尘。当然, 我们也可以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; 也可以在夜晚转动太阳能电池翼。如此一来, 太阳能电池翼的安装角度将无关紧要。

2 机械除尘

机械除尘包括擦拭、喷吹、可移除的覆盖膜、

收稿日期: 2010-04-14; 修回日期: 2010-05-10

作者简介: 袁亚飞(1977—), 主要从事太阳能电池、静电除尘、电缆测试、电力电能和供配电项目的研究工作。E-mail: goldkingcast@hotmail.com.

摇动、振动或超声波等方式。

擦拭是指宇航员或机器手臂利用“扫帚”或“羽毛掸子”擦拭太阳电池翼的盖板。由于微尘的尺寸比较小而且又具有很强的粘附性, 故很难清除。另外, 在擦拭过程中, 粒子可能会划伤表面。采用像挡风玻璃刷或布等进行润滑擦拭可能更可取, 但需要保持润滑剂在低气压和低温度下为液态。还可以考虑其他替代方法, 如采用压缩气体直接喷吹工作窗口上的微尘。另外, 利用可移除的薄膜来清除微尘。当微尘积聚过多时, 就可将薄膜移除掉。但这就对薄膜的质量提出更高的要求, 即在太阳紫外线、宇宙射线和其他复杂的环境下其性能不下降^[5, 8]。

在用摇动、振动或超声波等方式清除微尘时, 需要太阳电池翼倾斜一定的角度。

3 静电除尘

静电除尘是一种最简单的电子除尘方法。火星微尘带电的原因主要有: 在紫外射线和宇宙射线作用下会使微尘带上正电荷; 另外, 运动的微尘在与大气摩擦中也会带上电荷。如果太阳电池翼表面具有很高的电位, 将会吸引带有异性电荷或中性电荷的微尘。那些被吸附到表面的微尘, 最终也会带上与太阳电池翼同符号的电荷, 在电场力的排斥作用下离开太阳电池翼的表面^[9]。如果太阳电池翼表面是良导体, 比如在表面镀上一层氧化铟锡 (ITO) 薄膜, 带电的微尘将被中和, 从而减少了微尘的静电粘附力, 便于除尘^[10]。也可以利用离子束、电子束、放射性粒子源在较远处改变微粒带电的性质^[11], 使其与太阳电池翼表面的电位同性。因此可以利用静电放电 (如辉光放电、帕刑放电) 方式清除灰尘。目前, 最受关注的静电除尘方法是电帘除尘。

3.1 电帘的基本结构

电帘是由许多平行电极组成。通常采用标准PCB板制作而制成。在电极的表面喷涂一层聚酯薄膜, 防止电极之间被击穿。电帘一般可分为2种: 不透明的和透明的。不透明的一般以聚酯材料为衬底, 以铜作为电极, 表面喷涂聚酯薄膜; 透明的是以玻璃或柔性聚酯材料为基底, 以氧化铟锡 (ITO) 为电极, 表面喷涂聚酯薄膜, 如图1所示。透明的电帘可以作为火星太阳电池翼表面盖板, 也可以应

用到其他的光学系统上^[12]。

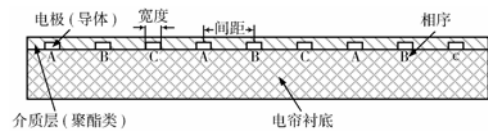


图1 电帘的基本结构

Fig. 1 The basic structure of electric screen

3.2 电帘的除尘原理

电极通过单相或多相时基电压信号 (正弦或方波) 激励。在单相电极电帘模型中 (如图2所示), 单相电极被植入衬底中, 电极连接到单相电源上。当电源极性变换时, 试验板表面将产生相反的电场。但在试验板表面产生驻波电场, 带电粒子在驻波电场的作用下来回移动, 而没有定向移动, 无法有效地从试验板表面清除微尘。Pierre Atten 和他的同事在火星模拟环境中验证了单相电极存在的问题, 虽然能清除部分的微尘, 这主要归因于气体放电的缘故^[13]。

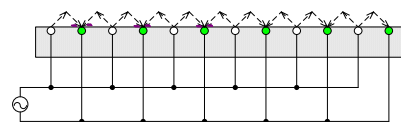


图2 单相电极电帘模型

Fig. 2 Model of single-phase electrode for the electric screen

图3所示的是多相电极电帘模型, 当电极连接到三相电压信号时, 将产生行波电场。

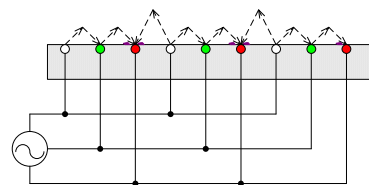


图3 多相电极电帘模型

Fig. 3 Model of multi-phase electrodes for the electric screen

A相接正电压 ($V_A > 0V$), B相接地 ($V_B = 0V$), C相接负电压 ($V_C < 0V$), 正负电压相等。带电微粒在行波电场的作用下将沿着垂直于电极轴的方向定向移动而被清除。即使不带电的微粒落在电帘表面, 也会被移除。这是因为不带电的微粒在降落到电帘的过程中通过静电感应和摩擦而使其带上某种电荷; 或者是因为微粒在电帘的非均匀电场中被极化, 产生电偶极矩, 具有内部电偶极矩的微粒在非均匀电场中受的力统称为介电泳力, 微粒在介电泳力的作用下被移除^[12, 14]。同时, 也验证了在真空和低重力环境下微粒也可以被有效地移除^[15]。

3.3 电帘的除尘效率

电帘的除尘效率 (Clearing Factor, CF) 定义为电帘加电 15 s 后剩余的微尘质量除以最初堆积电帘上微尘的质量, 可表示为^[16]

$$CF = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: m_i 是堆积在电帘上的最初的质量; m_f 是电帘加电 15 s 后剩余的质量。

影响电帘除尘效率的主要因素有激励的电压幅值、频率和波形等。只要调整激励的电压幅值、频率和波形, 除尘效率很容易达 90% 以上。

3.4 ITO 电帘的透光性

当 ITO 电帘应用到太阳电池翼或者光学镜头上时, 其透光性将是一个重要的参数。利用光谱仪测试到玻璃的透光性为 88%, 平铺 ITO 电极的电帘为 83%, 而光刻 ITO 电极的电帘为 58%。如图 4 所示。同时, 也在 MER 和 MOST 太阳电池上进行了试验。MER 电池为典型的太空太阳电池。MOST 是专为火星探测而设计的太阳电池。试验结果表明, 利用 ITO 电帘后太阳电池的短路电流和最大功率都下降了 15% 左右^[17]。

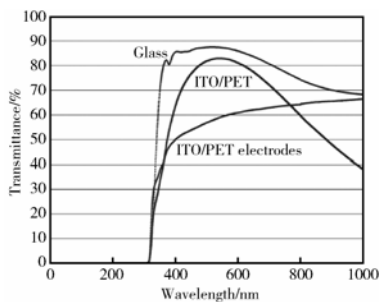


图4 ITO 电帘的透光性

Fig. 4 The transparency of ITO electric screen

4 结束语

太阳电池翼的转换效率直接关系到火星探测任务的寿命, 而火星风吹浮着火星微尘不断的积聚在太阳电池翼的表面, 降低了转换效率。NASA 已经全面开展了火星太阳电池翼除尘的研究工作, 并取得了一定的成果, 为我国火星探测器的除尘提供了研究依据。积极借鉴国外的宝贵经验, 对这些方法进行深入分析和实践, 可以使我们少走弯路, 早日研究出自己的、切实可行的火星太阳电池翼的除尘方法。

参考文献 (References)

- [1] 陈昌亚. 火星探测技术的发展[J]. 科学, 2009, 61(5)
- [2] Landis G, Jenkins P. Dust on Mars: materials adherence experiment results from Mars Pathfinder[C]//Proceedings of the 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference Anaheim CA, 1997: 865-869
- [3] Landis G, Jenkins P. Measurement of the settling rate of atmospheric dust on Mars by the MAE instrument on Mars Pathfinder[J]. J Geophysical Research, 105(E1): 1855-1857
- [4] Atten P, Pan Hailong, Reboud J L. Study of dust removal by standing-wave electric curtain for application to solar cells on Mars[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(1)
- [5] Geoffrey A, Landis G, Jenkins P. Dust mitigation for Mars solar arrays, 0-7803-7471-1/02 2002 IEEE[R]
- [6] Gaier J R, M. Davis P, Marabito M. Aeolian removal of dust types from photovoltaic surfaces on Mars[C]//16th AIAA/NASA/ASTM/IES Space Simulation Conference. NM: Albuquerque, 1990
- [7] Gaier J, Davis Perez. Effect of particle size of Martian dust on the degradation of photovoltaic cell performance, NASA TM-105232[R], 1992
- [8] Geoffrey A, Landis G. Dust mitigation removal technology[J]. Journal of Propulsion and Power, 1998, 14(1)
- [9] Clark P E, Minetto F A, Keller J, et al. Finding a dust mitigation strategy that works on the lunar surface[R], Lunar and Planetary Science XXXVIII, Texas: 2007
- [10] Berkelman P M, Chen J, Easudes, et al. Design of a day/night lunar rover, CMU RI TR 95 24[R], 1995
- [11] Gaier J R, Jaworske D A. Lunar dust on heat rejection system surfaces: problems and prospects[C]//AIP Conference Proceedings, 2005: 27-34
- [12] Calle C I, Buthler C R. Controllable transport of particulate materials for in-situ characterization[J]. IEEEAC paper, 2006(3)
- [13] Atten P, Pan Hailong, Reboud J L. Study of dust removal by standing-wave electric curtain for application to solar cells on Mars[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(1)
- [14] Calle C I, Buthler C R. Electrodynamic dust shield for solar panels on Mars[R], Lunar and planetary science XXXV, 2004
- [15] Calle C I, Buthler C R. Reduced gravity flight demonstration of the dust shield technology for optical systems[J]. IEEEAC paper, 2008(2)
- [16] Biris A S, Saini D. Electrodynamic removal of contaminant particles and its applications, IAS 2004, 0-7803-8486-5/04 2004 IEEE[R]
- [17] Rajesh Sharma. Experimental evaluation and analysis of electrodynamic screen as dust mitigation technology for future Mars missions[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(2)