

文章编号:0254-0096(2019)01-0073-06

月球尘埃对太阳电池主要参数影响研究

庄建宏¹, 高欣¹, 郭兴¹, 崔新宇², 李雄耀³

(1. 兰州空间技术物理研究所真空技术与物理重点实验室, 兰州 730000; 2. 中国电子科技集团公司第十八研究所, 天津 300384; 3. 中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心, 贵阳 550002)

摘要: 月尘是影响月球探测任务及月基太阳能电站(LSP)太阳电池阵列的性能和寿命的因素之一。为预估太阳电池的性能衰减,通过月尘对太阳光遮挡情况的分析,预计出太阳电池主要参数,例如短路电流、开路电压和最大输出功率的理论变化关系。通过模拟实验获得太阳电池主要参数与月尘沉积质量的试验变化关系,并对相关研究进行分析和讨论。结果表明太阳电池性能预估变化趋势与实验结果一致。

关键词: 月球任务; 太阳电池; 短路电流; 开路电压; 最大输出功率; 月尘

中图分类号: V476.3; TK513 **文献标识码:** A

0 引言

自20世纪60年代,由美国提出空间太阳能发电SPS(solar power from space)的构想后^[1,2],人类又提出以月球为基地的太阳电站模型LSP(lunar-based solar power)的构想^[3],以期解决未来的能源问题。在月球建立能够长期稳定发电的太阳电站,需要综合考虑太阳电池的成本、寿命、转换效率、重量体积比功率、抗辐射能力等因素,其中月球上受自然或人为因素影响而悬浮的尘埃也是影响太阳电池发电效率的重要因素。

勘测者3号太阳电池在任务期内的月尘累积量约 1 mg/cm^2 ^[4]。从美国在20世纪登陆月球的探测器上安装的硅太阳电池上看,受自然沉降月尘的影响,太阳电池的输出功率平均每年下降约2.5%。另外尘埃的覆盖能改变表面辐射特性,从而使太阳电池过热,影响输出性能,阿波罗15~阿波罗17号均出现了不同程度的温度异常。美国国家航空航天局(NASA)在对阿波罗任务太阳电池衰减数据进行分析后,通过地面模拟实验估计^[5],在月表每年约累积 $100\text{ }\mu\text{g/cm}^2$ 的尘埃。如果考虑着陆器着陆、火箭发射、月球车行进、采矿等人类活动搅动而引起的月尘沉降的影响,太阳电池输出功率的下降速率还会加大。

研究月尘对太阳电池的影响,对月球长期无人

值守科研站、月球基地、月基太阳能电站在月球尘埃环境下的运行有重要意义。国内在月尘对太阳电池的影响研究方面也开展了多项研究,如对月尘遮挡效应及其模型,月尘累积质量与太阳电池相对输出功率的关系及月尘对太阳电池开路电压的影响等。上述研究主要从实验摸索影响规律,本文研究拟在月尘的遮挡效应分析的基础上,结合太阳电池参数特性,从理论上分析获得太阳电池短路电流、开路电压以及最大输出功率与表面沉积尘埃质量的关系,并通过模拟实验,测试空间常用三结砷化镓太阳电池参数变化情况,结合文献分析,验证所提出的变化规律。

1 月尘遮蔽效应分析

1.1 月尘的遮蔽作用

月尘覆盖在太阳电池表面,尘埃微粒引起光线的透过率下降,如图1所示。

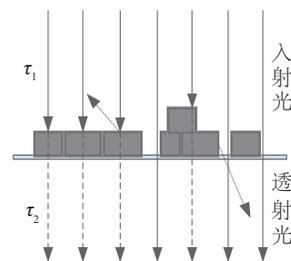


图1 月尘遮挡示意图

Fig. 1 Sketch of occlusion effect of lunar dust

收稿日期: 2017-10-16

通信作者: 庄建宏(1983—), 男, 硕士、工程师, 主要从事空间环境效应方面的研究。zhuangjianhong@spacechina.com

关于月尘对光线的遮挡作用, NASA 等相关研究在基于所有微粒的形状、尺寸、密度、对光的阻挡等特性相同, 且忽略反射和散射光的情况下, 推导出月尘层对光线相对透过率与月尘的质量、几何形状、尺寸、密度及颗粒光学特性之间的关系^[6-9]。对于密度均匀且形状、粒径符合一定统计分布的月尘颗粒来说, 当沉积的月尘颗粒数量足够大时, 相对透过率 t 与灰尘沉积质量之间可用负指数关系来描述, 即:

$$t = \frac{\tau_2}{\tau_1} = \exp(-\alpha \cdot m) \quad (1)$$

式中, τ_1 ——入射光强, W/m^2 ; τ_2 ——透射光强, W/m^2 ; α ——与月尘颗粒物理特性有关的系数; m ——沉积月尘质量, g 。

1.2 基于月尘遮挡关系的太阳电池主要参数变化

月尘对太阳电池的遮挡, 实际上造成了太阳电池入射光强的减少, 即降低了太阳电池接收到的辐照度, 从而引起太阳电池参数的改变。关于太阳电池参数与光强(辐照度)的关系已有诸多研究, 不同电池具体变化的数值不同, 但其变化有大致趋势。以某单晶硅太阳电池为例, 单位面积上变化趋势如图 2 所示^[10]。

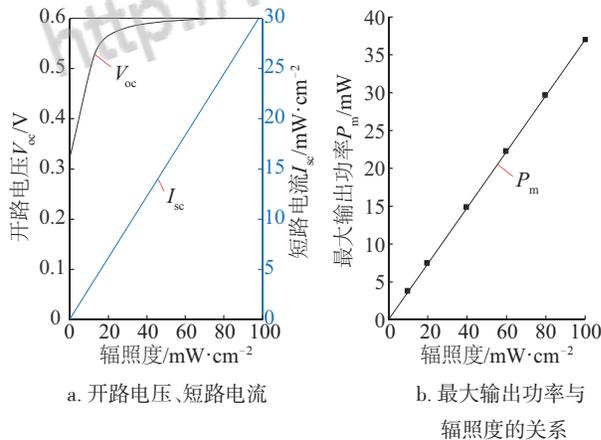


图2 不同光强下太阳电池参数的变化

Fig. 2 Change of solar cell parameters with intensity of light incident

1.2.1 短路电流

在温度一定, 且忽略其他损耗的情况下, 短路电流 I_{sc} 等于其光生电流 I_{ph} , 且与入射光强成正比。

当月尘覆盖在其表面后, 引起入射光强的降低, 进而引起短路电流降低。假设入射光强一定,

则 I_{sc} 正比于光透射率。因此太阳电池短路电流与沉积灰尘量的关系也应是负指数关系:

$$I_{sc} \sim I_{ph} \propto \exp(-\alpha \cdot m) \quad (2)$$

1.2.2 开路电压

太阳电池的开路电压 V_{oc} , 如式(3)所示^[11]:

$$V_{oc} = \frac{nKT}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right) \quad (3)$$

式中, n ——理想系数; K ——玻尔兹曼常数; T ——温度; q ——电子电荷; I_0 ——二极管反向饱和电流。

忽略串、并联电阻的影响, 有:

1) 在光照很弱的条件下, $I_{sc} \ll I_0$, 则:

$$\ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right) \sim \frac{I_{sc}}{I_0} \quad (4)$$

并考虑 $I_{sc} = I_{ph}$, 因此:

$$V_{oc} = \frac{nKT}{q} \frac{I_{ph}}{I_0} = I_{ph} R_0 \quad (5)$$

式中, $R_0 = \frac{nKT}{qI_0}$ 。

可见在较弱阳光时, 太阳电池的开路电压随光的强度作近似直线的变化。因此, 在很弱阳光下:

$$V_{oc} \propto I_{ph} \propto \exp(-\alpha \cdot m) \quad (6)$$

2) 在较强的阳光下, $I_{sc} \gg I_0$, 则:

$$V_{oc} = \frac{nKT}{q} \ln \frac{I_{sc}}{I_0} \quad (7)$$

而当有较强的阳光时, V_{oc} 则与入射光强度的对数成正比。而根据式(2), 则 V_{oc} 与灰尘质量 m 成正比关系, 即:

$$V_{oc} \propto \ln(I_{sc}) \propto m \quad (8)$$

1.2.3 最大输出功率

根据文献[10]所述, 在温度一定的情况下, 太阳电池最大输出功率与光强的关系, 如图 2b 所示, 即最大输出功率与光照强度近似为成正比关系^[12]。不同的太阳电池直线的斜率不一样, 但线性关系不变。因此 P_m 与月尘质量 m 的关系也应类似于 I_{sc} 与 m 的关系, 即:

$$P_m \propto \exp(-\alpha \cdot m) \quad (9)$$

1.3 小结

理论分析得出一定条件下太阳电池输出功率 P 、短路电流 I_{sc} 、开路电压 V_{oc} 、最大输出功率 P_m 和月尘累积质量 m 的关系, 总结为:

$$\begin{cases} I \propto \exp(-\alpha \cdot m) \\ I_{sc} \sim I_{ph} \propto \exp(-\alpha \cdot m) \\ V_{oc} \propto I_{ph} \propto \exp(-\alpha \cdot m) & (\text{弱光}) \\ V_{oc} \propto \ln(I_{sc}) \propto m & (\text{强光}) \\ P_m \propto I \propto \exp(-\alpha \cdot m) \end{cases} \quad (10)$$

2 实验验证

针对式(10)所描述关系,设计相关实验进行验证。

2.1 模拟月尘

沉积在太阳电池表面的月尘会使太阳电池的性能下降。月尘的特性,如粒径分布、组成成分等都会对这一下降程度造成影响。而真实的月尘十分珍贵,因此利用地球岩土材料配比研制的月壤/月尘模拟物进行相关实验是一种较优的选择。

关于月尘粒径的定义有多种论述,有的将月尘定义为粒径月尘小于 $50 \mu\text{m}$ ^[13]的月壤细小颗粒,也有的定义为粒径小于 $20 \mu\text{m}$ 的月壤细小颗粒^[14],具体与其研究目的有关。因本研究考虑到火箭喷射激起的月尘对太阳电池表面的污染,因此采用粒径小于 $100 \mu\text{m}$ 的地球岩石加工颗粒充当模拟月尘。

在本文研究中,采用中国科学院地球化学研究所研制的低钛玄武质模拟月壤 CLRS-1 (Chinese

lunar regolith simulant-1)标准模拟月壤。因筛网孔径限制,筛选出粒径小于 $97 \mu\text{m}$ 月壤颗粒充当模拟月尘。经过筛选的模拟月尘的粒径 $\leq 97 \mu\text{m}$,近似球状颗粒占 54%,松弛状态密度为 1.44 g/cm^3 。

2.2 实验过程

通过扬尘装置使模拟月尘均匀的沉降到电池玻璃盖片上,称量沉积月尘前后的质量差,作为沉积月尘的质量。将沉积月尘的盖片盖到太阳电池上,在总辐照度为 1353 W/m^2 ,光谱类型为 AM0 及垂直入射条件下测试太阳电池相关参数。

实验的三结 GaAs 太阳电池尺寸为 $3 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$ 。主要测试太阳电池的短路电流 I_{sc} 、开路电压 V_{oc} 、最大输出功率 P_{max} 这 3 个参数进行测试,测试不确定度 $\leq \pm 3\%$ (U95)。测试实验室温度: $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。为降低因光照导致太阳电池温度升高影响测量结果,每个数据点测试被要求在 1 min 内完成,且在下一个测试前充分冷却。

3 结果与讨论

3.1 实验数据分析

根据第 2 节的分析,对实验数据分别进行拟合。测试结果及拟合曲线如图 3 所示。

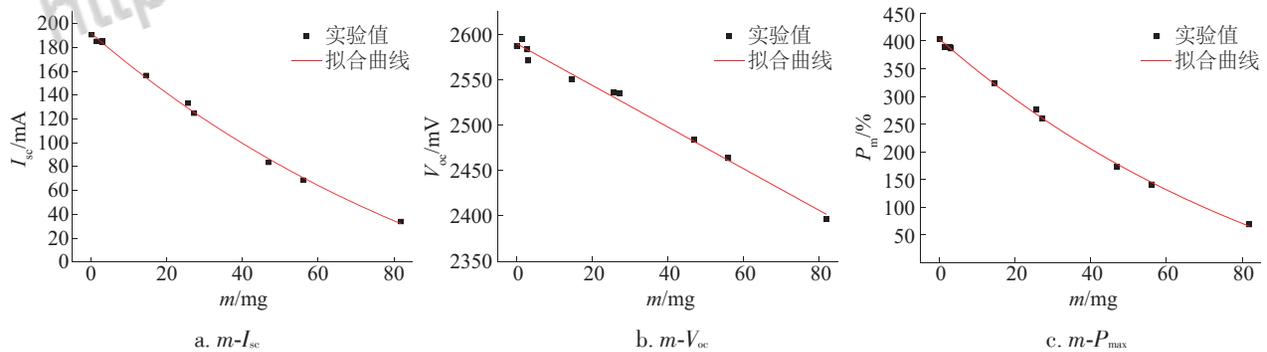


图3 太阳电池主要参数与沉积质量拟合结果

Fig. 3 Fitting results of solar cell parameters with dust mass

因开路电压下降程度较低(约 8%),在对开路电压进行拟合时,采用强光条件模式。参数拟合结果汇总如表 1 所示。

可看到,拟合结果的校正确定系数($\text{Adj.}R^2$)均接近 1,表明拟合与实验的匹配程度较高,即对太阳电池主要参数随尘埃沉积质量的变化趋势预测有较高合理性。

表1 拟合结果汇总一

Table 1 No.1 summary of fitting results

参数	拟合结果	Adj. R^2
I_{sc}	$I_{sc}=310.494 \cdot \exp(-0.881 \times 10^{-2} \cdot m) - 118.883$	0.997
V_{oc}	$V_{oc}=-2.294 \times 10^{-1} \cdot m + 2589.723$	0.988
P_m	$P_m=615.926 \cdot \exp(-0.971 \times 10^{-2} \cdot m) - 212.577$	0.998

3.2 相关研究结果讨论

本节主要对两项相关研究结果进行讨论,进一步证实所提出的变化规律。

文献[15]中采用“CE-3 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,并对太阳能电池的相对最大输出功率进行拟合,其结果与本文的预测趋势一致。文献[15]虽未对 I_{sc} 和 V_{oc} 进

行分析,但给出相应的实验数据,本文对此将进行补充分析。

文献[15]的研究中,开路电压下降程度约为 14%,采用强光模式进行拟合。如图 4 和表 2 所示,短路电流、开路电压、相对最大输出功率与月尘沉积量的拟合校正确定系数分别为 0.997、0.987、0.997。可看到尽管所用模拟月尘、太阳能电池尺寸均不同,但其引起的参数变化趋势与本研究预测趋势基本一致。

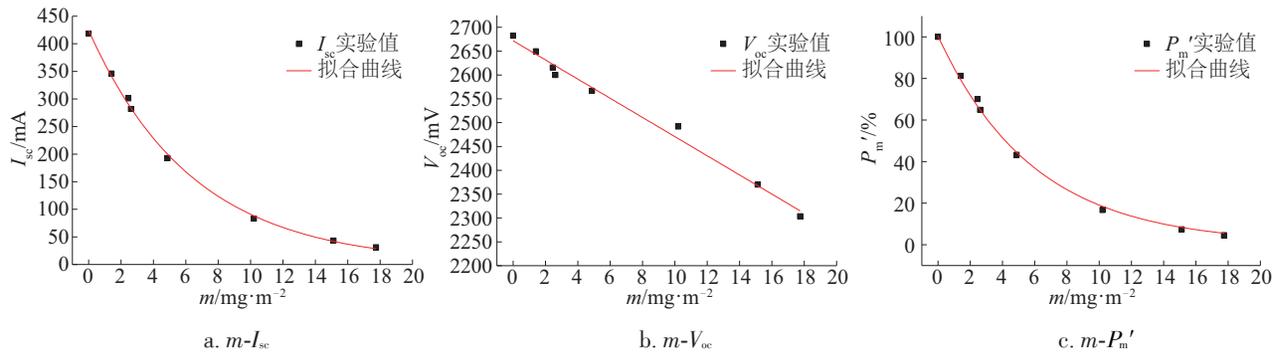


图4 文献[15]中主要参数与沉积质量拟合结果

Fig. 4 Fitting results of solar cell parameters with dust mass from reference [15]

表2 拟合结果汇总二

Table 2 No.2 summary of fitting results

参数	拟合结果	Adj. R^2
I_{sc}	$I_{sc}=423.047 \cdot \exp(-1.555 \times 10^{-1} \cdot m)+1.702$	0.997
V_{oc}	$V_{oc}=-20.103 \cdot m+2671.764$	0.987
P'_m	$P'_m=100.001 \cdot \exp(-1.683 \times 10^{-1} \cdot m)-5.126 \times 10^{-1}$	0.997

式(10)中,对 V_{oc} 的衰减分为强光和弱光 2 种情况,但本研究和文献[15]研究中太阳能电池表面覆盖的灰尘量较小,因此 V_{oc} 下降程度均较低 (<20%),因此利用强光条件趋势(线性关系),进行预测均能取得较好的结果。

至于在何种条件下, V_{oc} 与尘埃质量符合弱光条件趋势(指数关系),孙永卫等^[16]的研究给出了参考。其对不同尘埃沉积厚度下太阳能电池开路电压的变化趋势进行了研究。由于尘埃沉积厚度正比于沉积质量,因此本文所预计的沉积质量与参数的规律类似于沉积厚度与参数的关系。本文对文献[16]实验数据进行粗略定性分析,如图 5 所示。为分析开路电压与沉积尘埃厚度的关系,将实验数据分别在直角线性坐标和 y 轴对数坐标下进行定

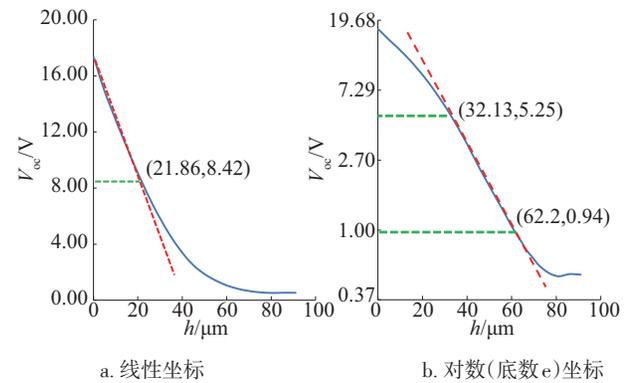


图5 开路电压变化趋势^[16]

Fig. 5 Change trend of open-circuit voltage^[16]

性分析。由图 5a 可知,在 V_{oc} 从初始值下降至约 50% 范围内时,可以用直线较好的拟合逼近,表明此范围内 V_{oc} 的变化符合强光模式,即 $V_{oc} \propto m$; 而由图 5b 可知,当 V_{oc} 下降至初始值的 30%~5% 范围内时,在对数坐标下, V_{oc} 可用直线进行较好的拟合逼近,表明此范围内可用弱光模式对其变化进行描述,即 $V_{oc} \propto \exp(-\alpha m)$ 。

4 结 论

通过理论分析和实验验证,表明所提出的变

化趋势可较好地符合实验结果。另外,相关研究尽管实验条件不完全相同,但其总体变化趋势与本文研究提出的规律基本符合。因此可认为本文所提出的变化规律具有较好的普适性,可用于未来月球探测、月基太阳电站和火星探测中太阳电池在尘埃环境下的性能预估。同时,研究对地面电池阵在沙尘条件下性能衰减预估也有一定参考价值。

致谢:感谢中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心提供的 CLRS-1 模拟月尘及技术指导。

[参考文献]

- [1] Glaser P E. Power from the sun: It's Future [J]. *Science*, 1968, 162(1): 857—866.
- [2] 侯欣宾, 王立, 朱耀平, 等. 国际空间太阳能电站发展现状[J]. *太阳能学报*, 2009, 30(10): 1443—1448.
- [2] Hou Xinbing, Wang Li, Zhu Yaoping, et al. Summary of the international space solar power systems [J]. *Acta Energeticae Solaris Sinica*, 2009, 30(10): 1443—1448.
- [3] Criswell D R. Lunar Solar Power System: Review of the technology base of an operational LSP system [A]. 47th International Astronautical Congress [C], 1996, Beijing, China, Paper IAF-96-R.2.04.
- [4] Carroll W F, Blair P M. Lunar dust and radiation darkening of Surveyor 3 surfaces, analysis of Surveyor 3 materials and photographs returned by Apollo 12 [R]. NASA SP-284, 1972: 23—28.
- [5] Hollick M, O'Brien B J. Lunar weather measurements at three Apollo sites 1969-1976 [J]. *Space Weather*, 2013, 11(11): 651—660.
- [6] Katzan C M, Edwards J L. Lunar dust transport and potential interactions with power system components [R]. NASA-LeRC CR-4404, 1991.
- [7] 庄建宏, 王先荣, 冯杰. 月尘对太阳电池遮挡效应研究[J]. *航天器环境工程*, 2010, 27(4): 409—411.
- [7] Zhuang Jianhong, Wang Xianrong, Feng Jie. Overlapping effect of lunar dust sediment on solar cell [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2010, 27(4): 409—411.
- [8] 庄建宏, 王先荣, 王鹤, 等. 一种监测月球尘埃沉积质量的方法[J]. *真空与低温*, 2010, 16(2): 78—80.
- [8] Zhuang Jianhong, Wang Xianrong, Wang Yi, et al. Lunar dust accumulated mass monitor by solar cell [J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2010, 16(2): 78—80.
- [9] 马子良, 王志浩, 白羽, 等. 太阳电池月尘遮蔽模型分析及试验研究[J]. *航天器环境工程*, 2016, 33(4): 408—412.
- [9] Ma Ziliang, Wang Zhihao, Bai Yu, et al. Modelling and testing of lunar dust overlapping solar cell [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2016, 33(4): 408—412.
- [10] 安其霖, 曹国琛, 李国欣, 等. 太阳电池原理与工艺 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984.
- [10] An Qilin, Cao Guochen, Li Guoxin, et al. Principle and technology of solar cells [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1984.
- [11] 靳瑞敏. 太阳能电池原理与应用 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2011.
- [11] Jin Ruimin. Principle and applications of solar cells [M]. Beijing: Peking University Press, 2011.
- [12] 车孝轩. 太阳能光伏系统概论 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2006.
- [12] Che Xiaoxuan. Introduction of solar photovoltaic system [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2006.
- [13] 童靖宇, 李蔓, 白羽, 等. 月尘环境效应及地面模拟技术[J]. *中国空间科学技术*, 2013, 33(2): 78—83.
- [13] Tong Jingyu, Li Man, Bai Yu, et al. Research for lunar dust effects and its ground simulation methods [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2013, 33(2): 78—83.
- [14] 张森森, 王世杰, 李雄耀, 等. 月尘的性质及危害评述[J]. *中国地质大学学报: 地球科学*, 2013, 38(2): 339—350.
- [14] Zhang Sensen, Wang Shijie, Li Xiongyao, et al. Properties and harmfulness of lunar dust: A Review [J]. *Journal of China University: Geosciences Earth Science*, 2013, 38(2): 339—350.
- [15] 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.
- [15] Jia Wei, Huang Sanbo, Ni Jiawei, 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.
- [16] 孙永卫, 曹鹤飞, 原青云. 月尘对太阳电池阵开路电压影响研究[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(3): 551—

555.
[16] Sun Yongwei, Cao Hefei, Yuan Qingyun. Effect of lunar

dust to open circuit voltage of solar cell array [J]. *Acta
Energiae Solaris Sinica*, 2015, 36(3): 551—555.

EFFECTS OF LUNAR DUST ON MAIN PARAMETERS OF SOLAR CELLS

Zhuang Jianhong¹, Gao Xin¹, Guo Xing¹, Cui Xinyu², Li Xiongyao³

(1. *Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China;*

2. *Tianjin Institute of Power Sources, Tianjin 300384, China;*

3. *Lunar and Planetary Science Research Center, Institute of Geochemistry, Chinese Academy, Guiyang 550081, China*)

Abstract: Lunar dust is one of the factors that would reduce the performance and the service life of solar cell for lunar missions and Lunar-based Solar Power. To predict the degree of this reduction, a theory model was built to describe the main parameters change of solar cells, such as short-circuit current, open-circuit voltage and maximum power, based on an analysis of occlusion of the covering lunar dust. The experiment, by covering the solar cell with lunar dust simulant, has been carried out to test this change with different deposition mass. Then some relative research result has been analyzed and discussed. It shows a consistent relationship between the theory models and the experiment results.

Keywords: lunar missions; solar cells; short-circuit current; open-circuit voltage; maximum power; lunar dust

<http://www.cnki.net>



知网查重限时 **7折** 最高可优惠 **120元**

本科定稿，硕博定稿，查重结果与学校一致

立即检测

免费论文查重: <http://www.paperyy.com>

3亿免费文献下载: <http://www.ixueshu.com>

超值论文自动降重: http://www.paperyy.com/reduce_repetition

PPT免费模版下载: <http://ppt.ixueshu.com>
