DOI: 10.11883/1001-1455(2016)03-0386-05

# 超高速碰撞太阳电池阵诱发放电效应的实验研究*

张书锋[1],柴 昊[1],周玉新[2],张明志[1],刘振风[1],王 田[1]
(1.北京东方计量测试研究所,北京 100086;
2.中国空间技术研究院,北京 100094)

**摘要**:随着空间碎片的日益增多,在轨运行航天器的高压太阳电池阵受到空间碎片撞击的影响需要得到评估。通过二级轻气炮加载弹丸,应用 Langmuir 三探针和电流、电压探针对空间用硅太阳电池阵在不同碰撞速度下产生的放电效应进行了实验研究。结果表明,空间碎片撞击太阳电池阵会诱发产生放电现象,撞击过程产生的高浓度等离子体是放电现象产生的诱因,且碰撞速度越大,对太阳电池阵产生的损伤越严重。

**关键词**:爆炸力学;放电;超高速碰撞;太阳电池阵;空间碎片;等离子体
**中图分类号**:O383 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

对任何一个在轨运行的航天器而言,由于其太阳能电池阵长时间暴露于微流星和空间碎片撞击环境中,受到微流星和空间碎片撞击可能非常大。这种碰撞速度介于 1～20 km/s 的超高速撞击,往往会造成太阳能电池阵穿孔破坏,进而造成输出功率降低,影响航天器正常工作,为此科学家们进行了大量研究[1-5]。在超高速碰撞过程的早期,喷出物的部分物质会发生电离,产生等离子体[6-9]。因此,开展超高速碰撞对太阳电池阵造成的物理损伤及碰撞中产生等离子体对太阳电池输出的研究,有助于更加深入了解超高速撞击对航天器太阳电池阵的影响。本文中利用自行构建的实验电路及诊断方法,对上述问题开展实验研究。

## 1 实验设计

### 1.1 实验系统组成

本实验系统共由 3 部分组成:碎片加载系统、等离子体诊断系统和太阳阵输出监测系统。实验采用二级轻气炮作为发射装置,自行设计了外电路及等离子体诊断装置,如图 1 所示。撞击靶板采用图 2 所示的太阳电池单元。该单元共由 4 片硅太阳电池通过两两串联、串间断开的方式组成,以模拟高压太阳电池阵在空间环境下相邻电池串间的高压差状态,串间距取标准太阳电池片间距 0.6 mm。

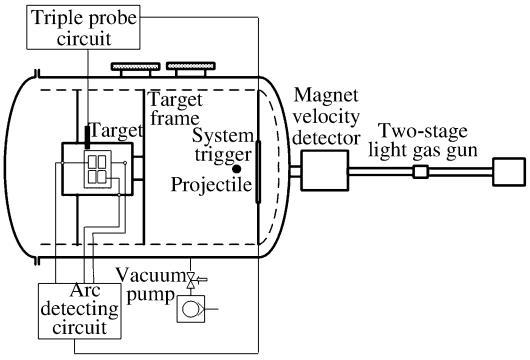


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Configuration of experimental system

电池阵放置于靶室内部可任意调节角度的靶架上,通过对两串电池外加电压来模拟太阳电池阵的输出状态。采用如图 3 所示的测试电路,对碰撞瞬间太阳电池输出状态变化进行监测。其中,电流探针 $CP_1$ 用于对整个回路电流进行测量,电

* **收稿日期**:2014-10-20;**修回日期**:2015-03-23
**基金项目**:国防科工局空间碎片"十二五"专项基金项目(K0201410)
**第一作者**:张书锋(1980— ),男,博士,高级工程师,thuzsf@163.com。

流探针 $CP_2$ 用于相邻串间电池电流测量，电流探针 $CP_3$ 用于电池片与铝蜂窝基板间电流测量，电压探针 V 用于对整个回路中的电压进行测量。在碰撞瞬间，碰撞点附近产生高浓度的等离子体，可能导致相邻电池串间、电池片与基板间形成瞬间短路，在高电压的作用下会对电池产生严重损伤。为模拟高压太阳阵状态，本实验选择外加电压 100 V，弹丸入射方向与靶板放置法线方向夹角为 60°，弹丸为 4.7 mm的铝制球形弹丸。实验共进行 4 组，测得碰撞速度分别为 2.80、4.11、4.36、5.37 km/s。

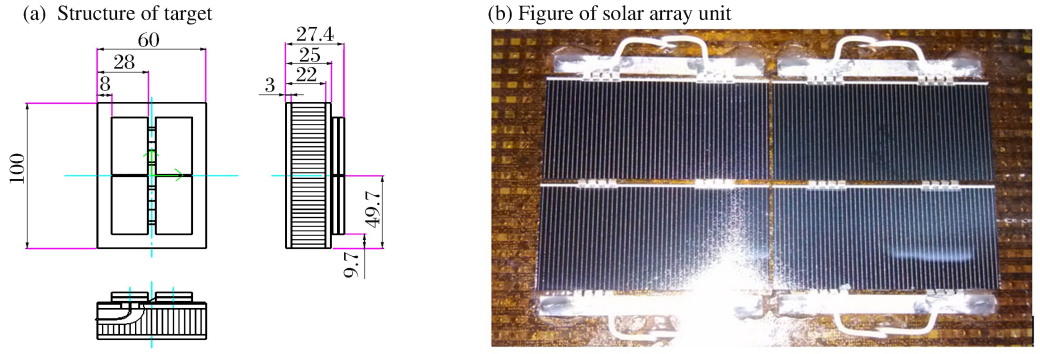


图 2 太阳电池阵单元

Fig. 2 Solar array unit

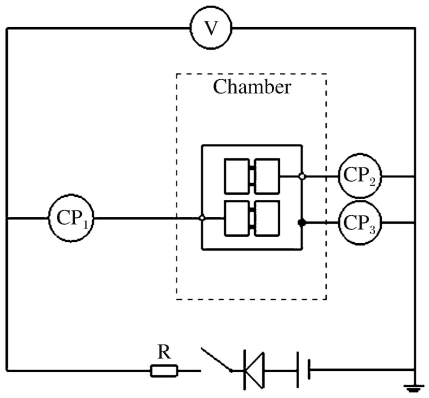


图 3 放电检测电路

Fig. 3 Arc detecting circuit

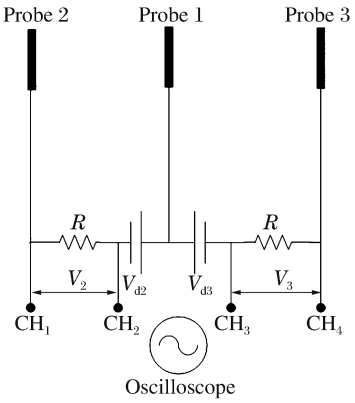


图 4 等离子体诊断原理图

Fig. 4 Mechanism of plasma diagnosis

### 1.2 瞬态等离子体诊断

采用 Langmuir 三探针对碰撞过程产生的等离子体进行诊断，可获得高速碰撞产生的瞬态等离子体的电子密度和电子温度[10]，其结构如图 4 所示，三探针中各个探头位置成等边三角形分布。

其计算公式如下：

电子温度：

$$\frac{I_1+I_2}{I_1+I_3}=\frac{1-\exp(-\phi_{d2})}{1-\exp(-\phi_{d3})} \tag{1}$$

$$I_1=I_2+I_3 \tag{2}$$

式中：$\phi_{d2}=\dfrac{eV_{d2}}{kT_e}$，$\phi_{d3}=\dfrac{eV_{d3}}{kT_e}$，其中 $e$ 为电荷，$k$ 为波尔兹曼常数。

电子密度：

$$I_i=\frac{I_3-I_2\exp(-\phi_{\Delta V})}{1-\exp(-\phi_{\Delta V})} \tag{3}$$

$$N_e=\left[\frac{M^{\frac{1}{2}}}{S}\right]I_i f_1(V_{d2}) \tag{4}$$

$$f_1(V_{d2}) = 1.05 \times 10^{15} \ (T_e)^{-\frac{1}{2}} \ [\exp(\phi_{d2}) - 1]^{-1} \tag{5}$$

式中：$M$ 是离子（由于基体及弹丸材料为铝，因此本实验的离子即为铝离子）质量，g；$S$ 为探针的表面积，$mm^2$；$I_i$ 为离子电流，$\mu A$；$V_{d2}=3$ V，$V_{d3}=18$ V，$R=10$ kΩ。图 5 为本次实验过程中，等离子体温度和密度随碰撞速度的变化规律。可以看出，随着速度的增大，等离子体的密度和温度均随着碰撞速度有显著地增加。

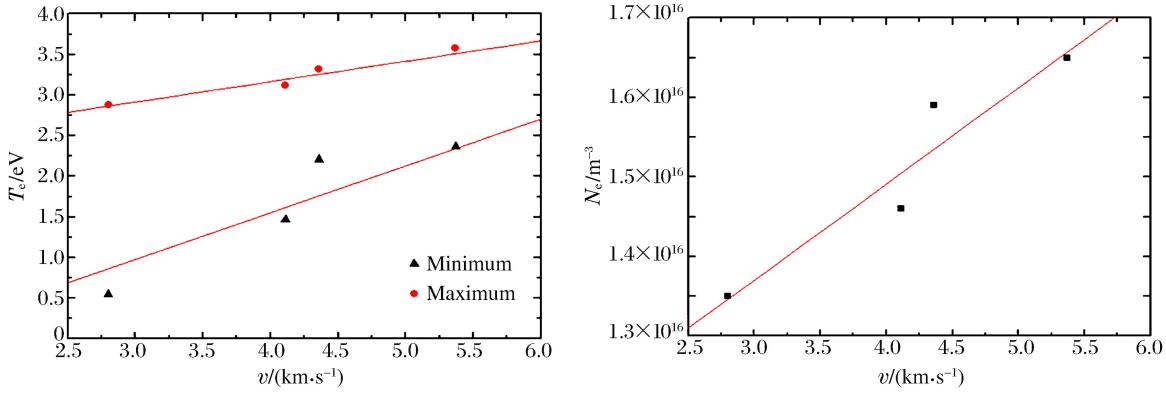


图 5 等离子体参数随碰撞速度变化示意图

Fig. 5 Diagrams of plasma parameters vs. colliding velocity

## 2 结果与分析

图 6 为碰撞后的太阳电池阵单元示意图。从图中可以清楚看出，碰撞点位于四片太阳电池交汇中心，碰撞过程的强大冲击导致了太阳电池片出现不可修复的物理损伤，尤其是弹道入射方向同电池阵单元间夹角为锐角的两个电池片，几乎完全损坏。

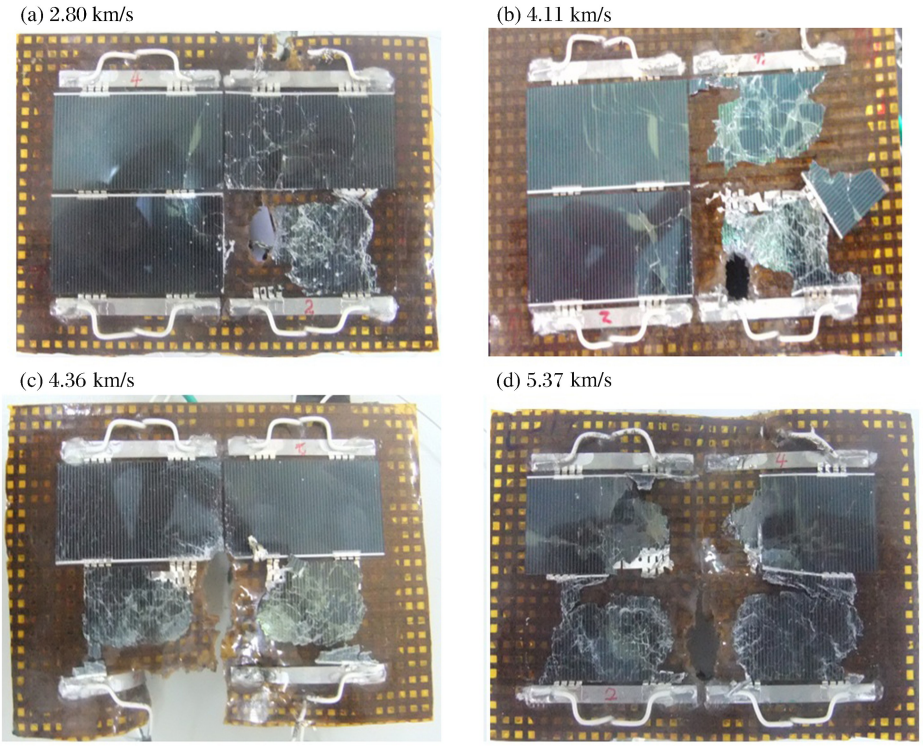


图 6 撞击完成后的太阳阵单元实物图

Fig. 6 Solar array unit after impact

以碰撞速度为 4.36 km/s 的实验结果对本次实验进行分析。图 7 为等离子体密度随时间的演化规律。随着等离子体在碰撞点附近的产生、膨胀、冷却和复合，探针测得的等离子体密度符合实际情况。高浓度的等离子体成为电池阵单元片间以及片与基板间产生电弧放电现象的诱因，测得的等离子体密度高达 $1.62\times10^{16}$ $m^{-3}$，远高于近地轨道空间等离子体的密度。虽然持续时间在微秒级，但伴随着高电压，其能量足以引起电弧放电，并导致了电池阵单元基板上的铝蜂窝产生燃烧，造成基板结构的严重损伤。

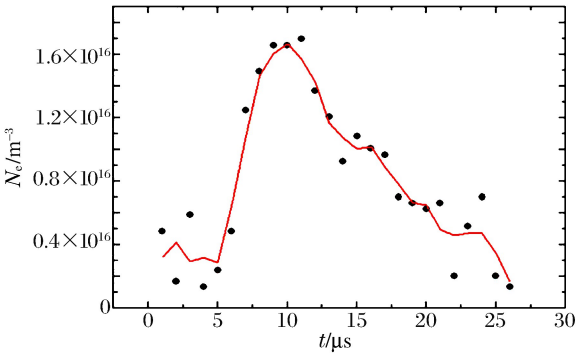


图 7　等离子体密度随时间的变化

Fig. 7　Variation of plasma density with different times

图 8 所示为放电监测电路电流、电压探针测得的信号。从图中可以看出，撞击导致了电池阵单元电池片间、电池片与基板间瞬间导通，由于基板铝蜂窝的导电性优于电池片与电池片间，其产生的放电要更强，因而造成的损伤亦更大。

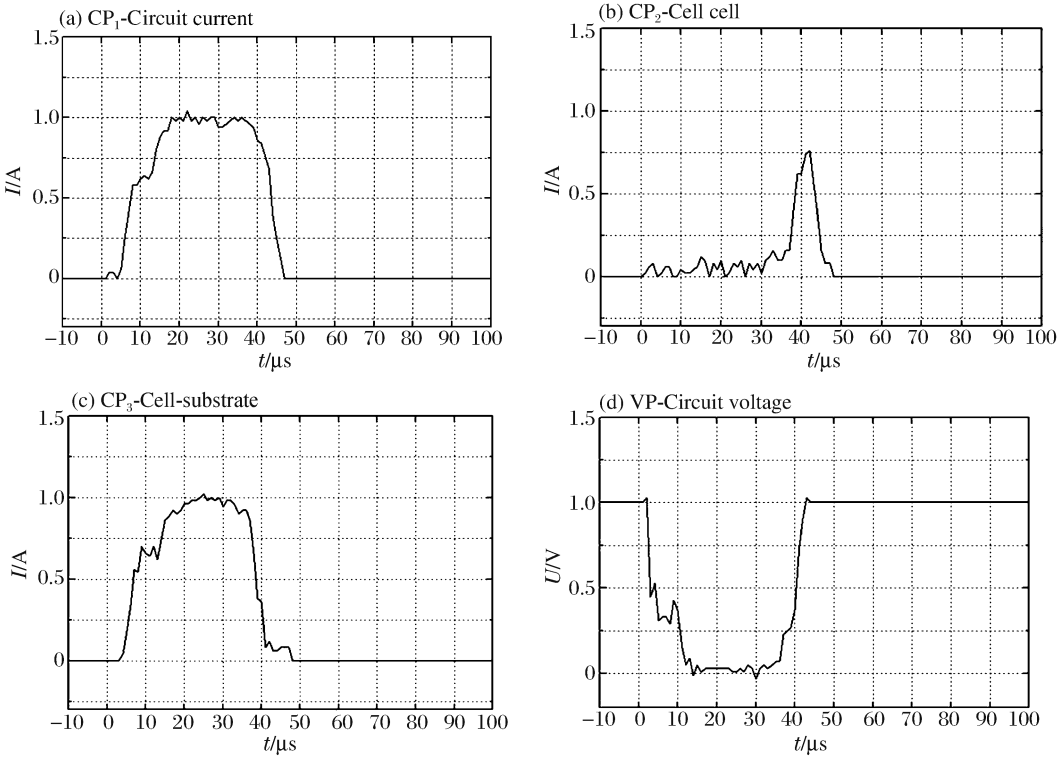


图 8　放电监测电路电流、电压探针波形

Fig. 8　Current and voltage waveforms of arc detecting circuit

## 3　结　论

空间碎片撞击太阳电池阵会产生高浓度的等离子体，进而诱发产生瞬间短路现象，对太阳电池阵单元产生机械损伤的同时，亦会产生严重的电损伤，导致基板铝蜂窝产生严重烧毁的现象；且随着碰撞速度的增大，产生的损伤效应也更加严重。

感谢沈阳理工大学唐恩凌教授在实验过程中给予的指导和帮助。

## 参考文献:


[1] Christie R J, Best S R, Center C A. Hypervelocity impact testing of space station freedom solar cells[R]. NASA-TM-106509,1994.

[2] Burt R, Christiansen E. Hypervelocity impact tests on hubble space telescope (HST) solar array cells[R]. NASA Report JSC-28307, 2001.

[3] Graham G A, Kearsley A T, Grady M M, et al. The rapid identification of impact residues in solar array panels of the HST by digitised back-scattered electron and X-ray elemental imaging[C]// Proceedings of 2nd European Conference on Space Debris. 1997:183-189.

[4] Graham G A, Kearsley A T, Grady M M, et al. Natural and simulated hypervelocity impacts into solar cells[J]. International Journal of Impact Engineering, 1999,23(1):319-330.

[5] Akahoshi Y, Nakamura T, Fukushige S, et al. Influence of space debris impact on solar array under power generation[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008,35(12):1678-1682.

[6] Harano T, Machida Y, Fukushige S, et al. Preliminary study on sustained arc due to plasma excited by hypervelocity impact of space debris on the solar array coupon[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006,33(1):326-334.

[7] Chen S, Sekiguchi T. Instantaneous direct display system of plasma parameters by means of triple probe[J]. Journal of Applied Physics, 1965,36(8):2363-2375.

[8] Crawford D A. The production and evolution of plasma associated magnetic fields during hypervelocity impacts: Implications for planetary paleomagnetism[D]. Providence, RI, USA: Brown University, 1992.

[9] 唐恩凌,张庆明,黄正平.超高速碰撞产生等离子体的电子温度诊断[J].北京理工大学学报,2007,27(5):381-384.
Tang Enling, Zhang Qingming, Huang Zhengping. Electron temperature diagnosis of plasma generated during hypervelocity impact[J]. Transaction of Beijing Institute of Technology, 2007,27(5):381-384.

[10] Ratcliff P R, Reber M, Cole M J, et al. Velocity thresholds for impact plasma production[J]. Advanced Space Research, 1997,20(8):1471-1476.


# Experimental study for discharge effect of hypervelocity impact on solar array


Zhang Shufeng[1], Chai Hao[1], Zhou Yuxin[2],
Zhang Mingzhi[1], Liu Zhenfeng[1], Wang Tian[1]

(1. *Beijing Oriental Institute of Measurement & Testing*, *Beijing* 100086, *China*;
2. *China Academy of Space Technology*, *Beijing* 100094, *China*)



**Abstract**: As the increasing quantity of space debris has become a great hazard to the high-voltage solar array of the spacecraft in orbit, there is a more urgent need to evaluate the discharge effect of hypervelocity on the solar array as a result of the impact by space debris. In this paper, using projectiles loaded by a two-stage light gas gun, and employing the Langmuir triple probe and the probes of the current and the voltage, we explored the discharge effect on the space solar array at different impact velocities. Results showed that the impact may give rise to solar array discharge, which is induced by high density plasma generated by the impact, and that the increasing impact velocities can lead to more serious damage to the solar array.



**Key words**: mechanics of explosion; discharge; hypervelocity impact; solar array; space debris; plasma


(责任编辑 曾月蓉)