

# 空间微小碎片累积撞击损伤效应加速模拟研究

黄建国<sup>1)†</sup> 刘丹秋<sup>1)2)</sup> 高著秀<sup>1)2)</sup> 李宏伟<sup>1)</sup> 蔡明辉<sup>1)</sup> 韩建伟<sup>1)</sup>

1) (中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190)

2) (中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2011年2月16日收到; 2011年3月16日收到修改稿)

利用等离子体驱动微小碎片加速器对太阳同步轨道上太阳电池在轨 10 年遭遇微小碎片超高速撞击的累积损伤效应进行了加速模拟, 获得了电池性能参数的损伤结果, 并与所建立的损伤评估模型的预测结果进行了分析比较, 二者基本一致.

**关键词:** 微小碎片, 超高速撞击, 太阳电池, 玻璃盖片

**PACS:** 96.25.Pq

## 1 引言

随着人类航天活动的增加, 空间碎片含量与日俱增, 对空间技术系统构成了严重威胁. 根据对哈勃太空望远镜 (HST)<sup>[1]</sup>、欧空局的尤里卡卫星 (EURECA)<sup>[2]</sup>、美国的长期暴露装置 (LDEF)<sup>[3]</sup> 等航天器的返回样品的分析研究结果, 微米至毫米范围的空间微小碎片形成的撞击坑占绝大部分. 该尺度范围的微小碎片产生的单次撞击虽然并不严重, 但长期累积撞击对太阳电池、热控涂层、光学镜头等部件或材料的性能衰退产生重要作用.

利用中科院空间中心的“等离子体驱动微小碎片加速器”设备, 对太阳电池遭遇的撞击损伤特性进行了研究, 基本结论如下<sup>[4-6]</sup>: 1) 微小碎片与玻璃盖片等脆性材料发生超高速撞击形成的撞击坑形貌与金属等延性材料的撞击成坑规律不同, 除形成中心撞击坑外, 还形成直径相当于中心坑 2—10 倍的贝壳状碎裂区, 使破坏面积大大增加; 大多数中心坑周围还伴随有环状粉碎区结构. 2) 撞击坑形状与碎片形状无关. 3) 对于毫米以下空间微小碎片, 撞击损伤基本限于玻璃盖片 (厚 0.15 mm), 极少形成穿孔. 因此, 鉴于以上结论, 毫米以下微小碎片对太阳电池的撞击损伤主要体现在长期累积撞击对玻璃盖片的表面损伤而造成的透射率下降, 以及因

此导致的电池功能下降.

为了定量评估微小碎片累积撞击损伤效应, 针对典型的太阳同步轨道 (圆形轨道, 高度 800 km, 倾角 90°) 太阳电池材料, 加速模拟了在轨 10 年遭遇的微小碎片撞击下太阳电池性能衰退情况, 并且与预测方法模型结果进行了分析对比.

## 2 加速模拟方法及结果

### 2.1 目标轨道的确定

在综合比较了碎片密度在空间区域的分布情况后, 发现在 LEO 范围内约 700—1500 m 区域, 碎片密度最高; 而随着轨道倾角的变化, 碎片通量在 90° 处出现峰值, 对应于太阳同步轨道. 因此, 选择碎片较严重的 800 km 高度、90° 倾角的圆轨道, 即太阳同步轨道作为目标轨道, 以评估空间最严重的碎片撞击损伤情况.

### 2.2 加速模拟方法及结果

为了模拟空间可能存在的恶劣情况, 采用 Master-2005 对 1980—2005 年期间该轨道的碎片通量进行了计算和比较, 结果如图 1 所示. 根据该结果, 选择较为严重的 1980—1985 年期间的碎

† E-mail: huangjg@cssar.ac.cn

片通量做为参考, 将碎片通量分布结果进行离散化和统计分析后, 得到在轨 10 年太阳电池样品 (面积:  $2\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ ) 上遭遇的不同尺寸范围的碎片数量, 如表 1 所示, 依此来设计发射碎片的参数. 空间微小碎片还存在着速度上的分布, 约在  $1\text{—}30\text{ km/s}$  范围, 平均速度约  $15\text{ km/s}$  附近, 但因地面模拟设备能力的限制, 尚无法从尺寸和速度上完全“真实”地模拟累积损伤效应.

加速模拟的基本原则是“结果等价”, 因此, 地面加速模拟结果应该是对空间碎片在样品上累积撞击效果的等效复制, 即加速模拟后在电池样品上产生的撞击坑数量和随尺寸分布与空间撞击情况一致. 空间的实际撞击情况是未知的, 但可以根据碎片通量 (图 1) 和撞击损伤的实验规律进行预测, 给出一个基本的撞击坑数量及尺度分布情况, 然后通过与加速模拟结果比较即可对模拟的等效性进行分析和判断.

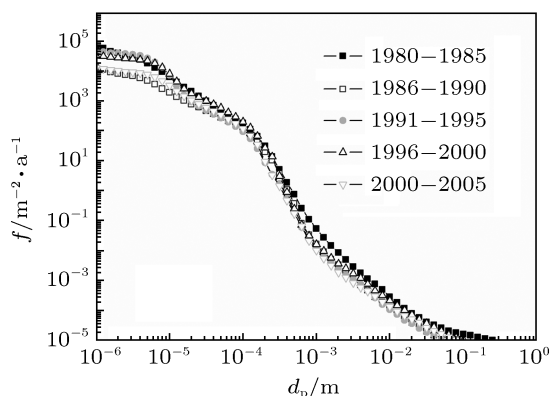


图 1 1980—2005 年间太阳同步轨道碎片通量随尺寸分布

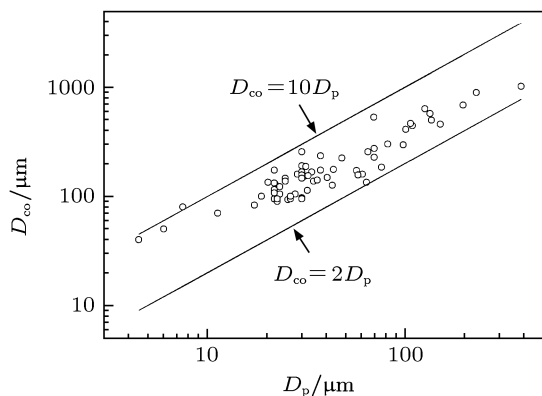


图 2 碎片尺寸 (\$D\_p\$) 与撞击坑尺寸 (\$D\_{co}\$) 的统计规律

碎片在玻璃样品上产生的撞击坑尺寸与碎片尺寸的关系如图 2 所示 [4,5], 该规律为实验统计规律, 撞击坑外径 (即贝壳状碎裂区)  $D_{co}$  与碎片

直径  $D_p$  的关系在 2—10 倍之间, 取  $D_{co}/D_p$  平均值为 6, 根据通量分布 (图 1), 可获得玻璃样品上每 5 年累积的撞击坑数量随尺寸分布, 如图 3 所示 ( $D_{co}/D_p = 6$ ).

参考表 1 的参数发射不同尺寸和速度范围的微粒对电池样品进行累积撞击, 在每一尺寸区间, 尽可能地覆盖较宽的速度范围, 然后对样品上的实际撞击坑的尺寸 (贝壳状碎裂区) 和数量进行统计, 并与由模式估算的撞击坑分布结果进行比较, 获得其等效的累积撞击时间.

通过加速模拟, 共获得 4 片有效样品, 图 4 为 1 号样品上撞击坑尺寸的统计结果以及与根据模式 (图 3) 估算结果的比较.

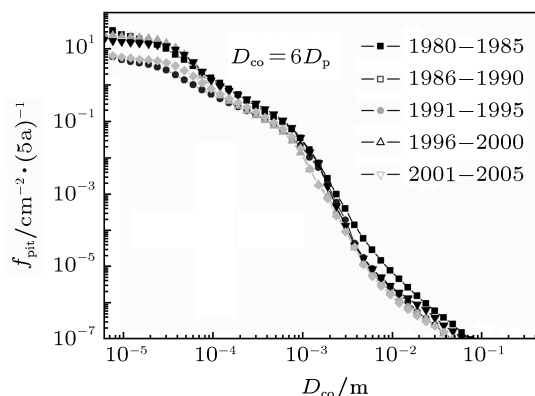


图 3 太阳同步轨道 5 年遭遇的撞击坑数量随坑径的平均分布

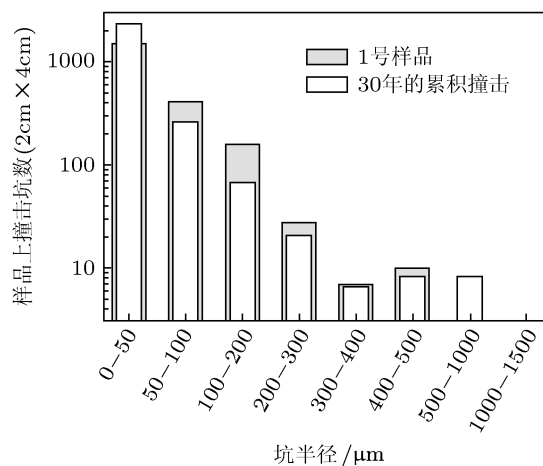


图 4 1 号样品上撞击坑分布统计结果及与估算结果的比较 (等效于 30 年的累积撞击)

表 1 发射微粒的参量范围

尺寸范围 / $\mu\text{m}$	1—20	20—50	50—100	100—1000
碎片数量个	625	16	6	2
微粒密度 / $(\text{g}/\text{cm}^3)$	1.75—7.8			
微粒速度 / $(\text{km}/\text{s})$	1—10			

### 2.3 太阳能电池性能参数衰退测试

对撞击前后太阳能电池样品性能的测试按照国家标准《航天用太阳能电池电性能测试方法》[7]所规定的方法完成. 在标准规定的测试环境下, 采用人造测试光源、电压表、电流表、标准太阳能电池、取样电阻、可变电阻、函数记录仪等进行测量. 除短路电流  $I_{sc}$ 、开路电压  $V_{oc}$  可以直接从仪表读取外, 其余参数, 如最大输出电压  $V_m$ 、最大输出电流  $I_m$ 、最大输出功率  $P_{max}$ 、转化效率  $\eta$  等参数都可以通过测量待测电池的伏安特性而得到, 如图 5 所示.  $V-I$  特性函数为

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{eV}{nkT} \right) - 1 \right]. \quad (1)$$

将样品的性能衰退测试结果 (撞击后与撞击前

性能参数测量结果之差) 用等效时间进行归一化, 得到每片样品在轨 10 年的性能衰退结果及平均结果, 如表 2 所示.

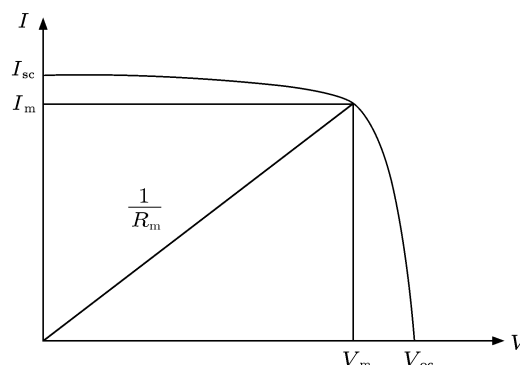


图 5 伏安特性曲线及其与各参量的关系示意图

表 2 太阳能电池在轨 10 年遭遇碎片撞击导致的性能衰退结果

编号	$\frac{\Delta I_{sc}}{I_{sc}} / \%$	$\frac{\Delta V_{oc}}{V_{oc}} / \%$	$\frac{\Delta P_{max}}{P_{max}} / \%$	$\frac{\Delta \eta_{eff}}{\eta_{eff}} / \%$	$\frac{\Delta I_m}{I_m} / \%$	$\frac{\Delta V_m}{V_m} / \%$
Cell-1#	0.43	0.08	0.81	-0.85	0.81	0
Cell-2#	0.48	0.11	0.94	-0.29	0.82	0.12
Cell-3#	0.57	0.05	0.62	-0.66	0.40	0.25
Cell-4#	0.72	0.15	1.09	-0.33	0.95	0.14
平均	0.55	0.10	0.87	-0.53	0.75	0.17

### 3 模拟结果的合理性分析

由于没有关于太阳能电池在轨性能衰退的飞行试验数据, 因此, 对模拟结果的合理性无法进行直接检验. 一种可行的评估方法是, 根据碎片通量及实验建立的碎片撞击损伤方程, 可以预测碎片累积撞击导致的太阳能电池表面损伤率 [5,6,8], 进而估算出透射率的衰减, 再根据太阳能电池的性能参数的表征函数, 可以进一步推断出由此导致的性能参数的改变, 与实验结果比较可知其合理性.

#### 3.1 太阳能电池的表面损伤率

定义单位面积样品上所有撞击坑面积之和为表面损伤率  $\beta$ , 则有

$$\beta = \iint \pi (D_{co}/2)^2 \cdot f(D_p, v_p) dD_p dv_p, \quad (2)$$

其中,  $f(D_p, v_p)$  是碎片微分通量, 它是碎片直径  $D_p$  和速度  $v_p$  的函数, 可以由碎片环境模式得到;  $D_{co}$  是贝壳状碎裂区的直径, 可由撞击损伤方程 (即撞击坑尺寸对撞击参量的依赖关系) 得到. 根据模

拟实验结果拟合得到的撞击损伤方程具有如下形式 [4,5,6]:

$$D_{co} = \alpha E_p^{0.35}, \quad (3)$$

其中,  $\alpha$  是损伤方程系数, 平均及严重情况下分别取  $\alpha_{avr} = 3708$  和  $\alpha_{max} = 7128$ ; 而

$$E_p = \frac{1}{2} \rho \left[ \frac{4}{3} \pi (D_p/2)^3 \right] v_p^2. \quad (4)$$

将 (3), (4) 式代入 (2) 式, 并对  $D_p$  和  $v_p$  积分后即得到  $\beta$ .

如果单个撞击坑区域内玻璃盖片的平均透射率衰减为  $\Delta T_{co}$ , 可以证明单位面积太阳能电池的透射率衰减为

$$\Delta T = \beta \cdot \Delta T_{co}. \quad (5)$$

分析结果表明 [4,6], 平均情况下, 10 年累积撞击导致的太阳能电池透射率衰减为 0.61%, 最严重为 2.3%.

#### 3.2 太阳能电池性能衰退预估

根据实验结果, 毫米以下微小碎片在太阳能电池

玻璃盖片上(厚 0.15 mm)极少造成穿孔,因此,微小碎片撞击导致的太阳能电池性能衰退主要来自于表面损伤导致的透射率下降.利用电池性能参数的表征函数,即可推测出电池性能衰退情况.

1) 短路电流  $I_{sc}$ : 输出短路时的工作电流,等于电池的光生电流,正比于光照强度,因此,  $I_{sc}$  衰减正比于透射率衰减,即

$$\frac{\Delta I_{sc}}{I_{sc}} \propto \frac{\Delta T}{T} = \Delta T. \quad (6)$$

根据上述结果,平均情况下,10年的透射率衰减为 0.61%,则  $\Delta I_{sc} = 0.61\%$ ,与测试结果(0.55%)符合.

2) 开路电压  $V_{oc}$ : 电池开路时的输出电压

$$V_{oc} = \frac{nkT}{e} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right), \quad (7)$$

其中,  $I_0$  为反向饱和电流,  $e$  为电子电量,  $k$  为玻尔兹曼常数.根据  $\frac{\Delta I_{sc}}{I_{sc}}$  可以近似确定  $\frac{\Delta V_{oc}}{V_{oc}}$ :

$$\begin{aligned} \Delta V_{oc} &= \frac{nkT}{e} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right) - \frac{nkT}{e} \ln\left(\frac{I'_{sc}}{I_0} + 1\right) \\ &= \frac{nkT}{e} \ln\left(1 + \frac{\Delta I_{sc}}{I'_{sc} + I_0}\right), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{\Delta V_{oc}}{V_{oc}} = \frac{\ln(1 + \Delta I_{sc}/(I'_{sc} + I_0))}{\ln(1 + I'_{sc}/I_0)}, \quad (9)$$

其中,  $I'_{sc}$  为撞击后的短路电流,  $I'_{sc} \approx I_{sc}$ ,  $I_0$  与  $I_{sc}$  之比一般在  $10^{-5}$ — $10^{-7}$  量级,这里取  $10^{-6}$ ,有

$$\frac{\Delta V_{oc}}{V_{oc}} \approx \frac{\ln(1 + \Delta I_{sc}/I_{sc})}{\ln(1 + I_{sc}/I_0)}. \quad (10)$$

如果断路电流相对衰减为 0.61%,则开路电压的平均相对衰减约为 0.06%.

3) 最佳工作电流  $I_m$  和最佳工作电压  $V_m$ .

假定  $I$ - $V$  特性曲线形状不变,则最佳工作电流  $I_m$  和最佳工作电压  $V_m$  的相对衰减分别等于  $I_{sc}$  及  $V_{oc}$  的衰减.

4) 最大输出功率  $P_{max}$ .

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P_{max}}{P_{max}} &= \frac{I_m V_m - I'_m V'_m}{I_m V_m} \\ &= \frac{I_m(V_m - V'_m) + V'_m(I_m - I'_m)}{I_m V_m} \\ &\approx \frac{\Delta V_m}{V_m} + \frac{\Delta I_m}{I_m}, \end{aligned} \quad (11)$$

$I_m$  及  $V_m$  的相对衰减分别为 0.61% 和 0.06%,则  $P_{max}$  的相对衰减为 0.67%.预估结果与实验测试结果的比较如表 3 所示,最大相对误差为 65%,所以实验测试结果是合理的.

表 3 太阳能电池性能衰退估算结果与测试结果的比较(太阳同步轨道,10年)

电池参量	相对衰减 $\Delta A/A$		相对误差/%
	测试结果/%	估算结果/%	
短路电流 $I_{sc}$	0.55	0.61	11
开路电压 $V_{oc}$	0.10	0.06	40
最佳工作电流 $I_m$	0.75	0.61	19
最佳工作电压 $V_m$	0.17	0.06	65
最大输出功率 $P_{max}$	0.87	0.67	23

## 4 讨论

上述的分析计算中未考虑撞击穿孔的影响,下面进行粗略的分析估算.研究表明<sup>[9,10]</sup>,撞击坑深度取决于撞击速度、碎片及靶材料密度,当碎片与靶材密度相当时,撞击坑深度  $x_p$  与碎片直径之比  $x_p/D_p$  随着撞击速度的提高趋向于 1.典型的低轨道太阳能电池玻璃盖片厚度为 125  $\mu\text{m}$ ,因此,可以认为尺寸大于 150  $\mu\text{m}$  的碎片即可能在玻璃盖片上形成穿孔而对太阳能电池的半导体材料造成损伤.

根据图 1 的碎片通量,可以估算出每年每  $\text{cm}^2$  样品上穿孔数量约为 0.01 个,则 10 年每个太阳能电池样品上(2 cm  $\times$  4 cm)可形成近 1 个穿孔.

如果按最坏结果考虑,认为每个穿孔所透过的电池区域全部失效,并假设穿孔尺寸与碎片尺寸相当,则由于穿孔引起的电池失效区域占电池面积的比率约为  $(150 \mu\text{m})^2 / (2\text{cm} \times 4\text{cm}) < 0.01\%$ ,导致的短路电流下降也相应  $< 0.01\%$ ,因此,平均而言,微小碎片造成的穿孔所引起的电池性能下降可以忽略不计.

- [1] Graham G A, Kearsley A T, Drolshagen G 2001 *Adv. Space Res.* **28** 1341
- [2] Paul K G, Igembergs E B, Berthoud L 1997 *Int. J. Impact. Engng.* **20** 627
- [3] See T H, Allbrooks M K, Atkinson D 1990 *NASA JSC Report#24608*
- [4] Huang J G, Han J W, Li H W, Cai M H, Li X Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7950 (in Chinese) [黄建国, 韩建伟, 李宏伟, 蔡明辉, 李 小银 2008 物理学报 **57** 7950]
- [5] Li H W, Huang J G, Han J W, Cai M H, Li X Y, Gao Z X 2010 *Chinese Science Bulletin* **55** 2576
- [6] Huang J G, Han J W, Li H W, Cai M H, Li X Y, Gao Z X 2010 *J. Spacecrafts and Rockets* **47** 380
- [7] [航天用太阳能电池性能测试方法, GB/T 6494-1986, 1987]
- [8] Frank K S, Toblas G, Eberhard E S 2001 *Int. J. Impact. Engng.* **26** 683
- [9] Kadono T, Fujiwara A 2005 *Int. J. Impact. Engng.* **31** 1309
- [10] Ishibashi T, Fujiwara A, Fujii N 1990 *Jpn. J. Appl. Phys.* **29** 2543

## Simulation of culmulated microimpacts of micro debris to solar cells and function degradation

Huang Jiam-Guo<sup>1)†</sup> Liu Dan-Qiu<sup>1)2)</sup> Gao Zhu-Xiu<sup>1)2)</sup> Li Hong-Wei<sup>1)</sup>  
Cai Ming-Hui<sup>1)</sup> Han Jian-Wei<sup>1)</sup>

1) (Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

2) (2Graduated University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(Received 16 February 2011; revised manuscript received 16 March 2011)

### Abstract

The cumulated impacts of the space micro debris on the solar cells is experimentally simulated on the plasma dynamic accelerator in CSSAR. For a duration of ten years on the typical sun synchronous orbit, the solar cell functional degradation due to the micro impacts is measured, and the result accords well with the predicted result according to the impacting damage equation.

**Keywords:** micro debris, hypervelocity impact, solar cell, glass cover

**PACS:** 96. 25. Pq

† E-mail: huangjg@cssar.ac.cn