

# 空间微小碎片对低轨道航天器太阳 电池表面撞击损伤研究

黄建国<sup>†</sup> 韩建伟 李宏伟 蔡明辉 李小银

(中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190)

(2008 年 4 月 11 日收到, 2008 年 9 月 11 日收到修改稿)

低轨道空间微小碎片密度相对较高,对太阳电池等大面积暴露材料的累积撞击损伤效应是航天器设计中应考虑的主要问题之一.以典型的太阳同步轨道为例分析和计算了太阳电池表面所遭遇的微小碎片通量,进行了微小碎片的撞击损伤模拟实验,并建立了撞击损伤方程.根据碎片通量分布及撞击损伤方程计算了微小碎片的超高速撞击所产生的太阳电池表面的面积损伤率.通过光学透射率的实验测试并结合理论模型,对碎片导致的太阳电池光学透射率衰减进行了计算和分析.结果表明,10 a 累积撞击导致的太阳电池表面的面积损伤率平均约为 0.61%,严重时达到 2.3%;光学透射率衰减平均为 0.5%,严重时可达到 1.5%.此外,针对典型实例就太阳电池表面损伤问题给出了一种模式计算和实验模拟相结合的评估方法.

关键词:微小碎片,超高速撞击,太阳电池,玻璃盖片

PACC: 9460M, 6250

## 1. 引 言

随着人类航天活动的增加,空间碎片的数量逐年递增,对空间技术系统产生的威胁日益严重.相对于大碎片而言,空间微小碎片单次撞击不足以产生严重后果,但由于其数量巨大,长期累积撞击所产生的影响是不可忽视的.根据空间碎片模式 MASTER-2005 的计算结果,1000  $\mu\text{m}$  以上的碎片不足百万分之一,而绝大多数碎片来自直径在 1—1000  $\mu\text{m}$  之间的微小碎片,因此对这一尺度范围的空间碎片所产生的撞击损伤效应进行模拟研究就显得至关重要.低地球轨道空间是航天活动的重要区域,大量的科学、军事及应用卫星正运行在这一区域,因而空间碎片影响较为典型.空间碎片相对于航天器速度较高,对于空间碎片碰撞速度约为 1—15 km/s,而微流星体可达 15—30 km/s,因而,即使十分细小的微米级微粒也可在光学设备等精密脆弱材料上产生可观的损伤.从哈勃望远镜(HST)<sup>[1]</sup>、欧洲可回收平台(EURECA)<sup>[2]</sup>、长期暴露装置(LDEF)<sup>[3]</sup>等低轨道卫星返回的太阳电池帆板、热控涂层材料等样品中均

观测到数量巨大的微小碎片撞击坑.

太阳电池直接暴露于空间,由于其面积较大(空间站等大型航天器的太阳电池帆板面积可达 100  $\text{m}^2$  左右),所遭遇的碎片撞击相对较多,特别是对于长寿命卫星问题将更加严重.太阳电池表面覆以起保护作用的玻璃盖片,因此,碎片撞击引起玻璃盖片透射率下降是导致太阳电池功能衰退的重要原因之一.此外,超高速撞击产生的冲击波对电池半导体材料的性能损伤、撞击穿孔使原子氧直接侵入半导体材料、撞击产生的碎片云的二次污染等都有可能对电池性能产生影响,导致输出功率下降.由于玻璃盖片是脆性材料,与金属等延性材料不同,超高速微小碎片撞击所产生的撞击损伤区域远大于撞击坑尺寸,典型的撞击坑形貌为在中心撞击坑周围形成数倍(严重情况下可达到 10 倍左右)于撞击坑尺寸的碎裂区<sup>[4]</sup>,而大于 40°的斜入射方式撞击形成的碎裂区面积更大.因而太阳电池玻璃盖片的面积损伤率(即损伤区域面积与总面积之比)较其他材料高,由此导致的太阳电池输出功率下降需要通过实验进行研究.

本文以典型的太阳同步轨道(高度为 800 km 的

<sup>†</sup> E-mail: huangjg@cssar.ac.cn

圆轨道,倾角为  $98^\circ$ )为例定量分析微小碎片长期累积撞击对太阳电池的表面损伤情况,计算累积撞击产生的面积损伤以及由此导致的透射率衰减.该轨道区域附近碎片通量最高,代表了低轨道空间碎片影响较严重的情况.

## 2. 空间碎片环境分析

采用空间碎片环境模式 MASTER-2005 全面评估了低轨道空间碎片通量随轨道高度及倾角的变化,最后确定了高度为 800 km、倾角为  $98^\circ$  的典型太阳同步轨道作为分析实例,该轨道上卫星遭遇的碎片通量最大.图 1 所示为该轨道上 1980—2005 年每年有直径  $d_p$  大于  $1 \mu\text{m}$  碎片的积分通量,最严重的 1980—1985 年期间积分通量  $f$  达到近  $6.8 \times 10^4/\text{m}^2\text{a}$ ,其中直径大于  $1000 \mu\text{m}$  的碎片不到百万分之一.因此,累积撞击效应主要来自于  $d_p$  在  $1000 \mu\text{m}$  以下的微小碎片.微小碎片分析中包含了各种来源的空间微粒,包括爆炸解体碎片、撞击产物、固体火箭喷射物、表面剥落等各种碎片,同时也包含了空间微流星体背景.碎片相对于撞击速度  $v$  的分布如图 2 所示,其中空间碎片撞击速度主要集中在  $1\text{--}15 \text{ km/s}$  之间,而速度  $v > 15 \text{ km/s}$  的空间微粒主要来自于微流星体.

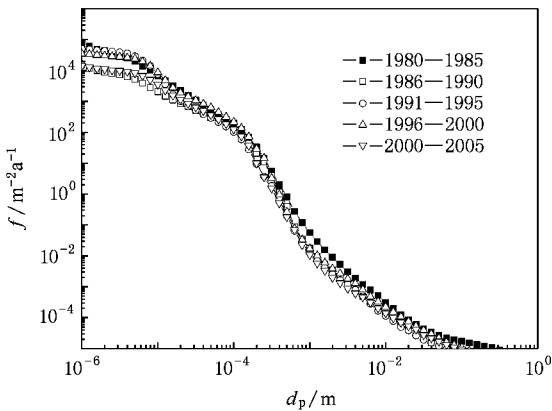


图 1 直径大于  $1 \mu\text{m}$  的碎片(含微流星体)积分通量  $f$  随碎片直径  $d_p$  的变化

## 3. 撞击损伤的实验模拟

为了模拟空间微小碎片对太阳电池的撞击损伤效应,根据上述分析采用直径  $d_p$  为  $20\text{--}1000 \mu\text{m}$ 、速度  $v$  为  $1\text{--}15 \text{ km/s}$  的微粒对太阳电池玻璃盖片进行

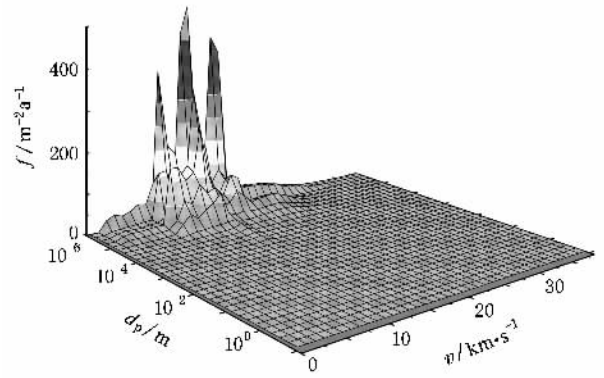


图 2 直径大于  $1 \mu\text{m}$  的微小碎片(含微流星体)积分通量  $f$  随碎片直径  $d_p$  和撞击速度  $v$  的变化

超高速撞击模拟研究.实验是在等离子体驱动微小碎片加速器<sup>[5]</sup>上完成的,该装置采用同轴枪高压放电产生高速等离子体射流,并通过磁压缩线圈把等离子体压缩至高密度,将置于喷嘴处的微粒样品喷射至超高速范围,可将  $d_p$  为  $10\text{--}1000 \mu\text{m}$  的微粒加速到  $15\text{--}18 \text{ km/s}$ .实验中选用了直径为  $200\text{--}1000 \mu\text{m}$  的钢珠丸、 $20\text{--}200 \mu\text{m}$  的刚玉( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )、 $50\text{--}200 \mu\text{m}$  的玻璃珠( $\text{SiO}_2$ )等不同材质的微粒进行加速.通过布置于撞击靶上的压电传感器和飞行管道上的激光散射光路获得微粒产生的撞击脉冲及散射光脉冲信号,利用飞行时间法得到微粒的速度.两种不同原理的测速手段互相印证,确保测量结果的可靠性.

为了获得撞击坑形貌参量与碎片参量的实验规律,需要尽可能确定每一微粒的尺寸、速度以及所对应的撞击坑.为此,通过减少微粒发射数量以及在飞行管道上设置多级限束孔栏等办法将撞击在样品靶上的微粒尽量控制在单次撞击水平.发射的超高速微粒实际尺寸通过拦截薄膜( $3 \mu\text{m}$  厚的 Myler 膜)上形成的穿孔确定,撞击坑的形貌是利用 100 倍的体视显微镜及扫描电子显微镜测量得到.

与金属等塑性材料不同,太阳电池玻璃盖片的撞击坑形貌包含两个典型区域,即中心撞击坑以及撞击坑周围呈贝壳状剥落损伤区域,该区域主要是由于玻璃的剪切强度较低因而在撞击产生的径向冲击波作用下大片剥落而形成,其直径通常数倍于撞击碎片的尺寸,在超高速撞击条件下两个区域均大致呈圆形.图 3 是通过大量单次撞击获得的实验规律, $D_\infty$  为撞击坑最大损伤区域——贝壳状碎裂区的直径, $D_\infty$  随着超高速微粒能量  $E_p$  的增加而增大.

根据撞击损伤试验数据进行拟合,得到如下的撞击损伤方程(对应图3中的拟合曲线):

$$D_{co} = 3708 E^{0.35}. \quad (1)$$

式中  $D_{co}$  的单位为  $\mu\text{m}$ ,  $E$  的单位为 J.

同一撞击能量下获得的撞击坑尺寸具有离散性,如果只考虑各撞击能量下的最大撞击坑尺寸,对数据的上边界用类似方程(1)的形式进行拟合,则得到损伤最严重的撞击损伤方程(对应图3中的最大曲线)

$$D_{co-max} = 7128 E^{0.33}. \quad (2)$$

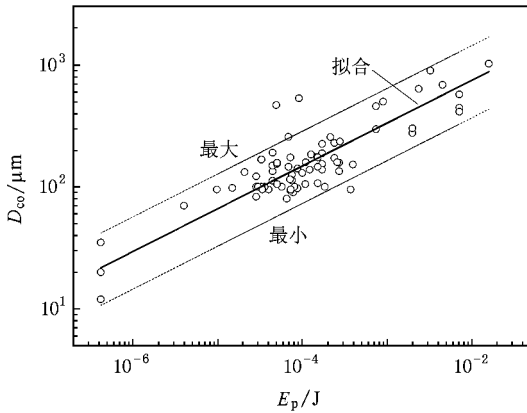


图3 玻璃样品上撞击坑直径  $D_{co}$  随撞击微粒能量  $E_p$  的变化

## 4. 太阳能电池的面积损伤率

定义单位面积上撞击损伤区域的面积总和为面积损伤率  $\beta$ .  $\beta$  的表达式如下:

$$\beta = \frac{A_{co}}{A} = \iint \pi \left( \frac{D_{co}(E)}{2} \right)^2 f(d_p, v) dd_p dv, \quad (3)$$

式中  $A_{co}$  和  $A$  分别为损伤面积和取样面积,  $f(d_p, v)$  表示直径为  $d_p$ 、速度为  $v$  的碎片微分通量,  $E$  为碎片的动能,

$$E = \frac{1}{2} \left( \frac{4}{3} \pi \left( \frac{d_p}{2} \right)^3 \rho \right) v^2. \quad (4)$$

方程(3)对速度和尺寸空间积分即可得到面积损伤率  $\beta$ , 尺寸积分区间取 1—1000  $\mu\text{m}$ , 速度积分区间取 1—40 km/s, 微粒密度  $\rho = 2.6 \text{ g/cm}^3$ . 计算结果如表1所列.

平均情况下,即采用撞击损伤方程(1)进行计算,10 a 累积的面积损伤率为 0.61%、严重情况下,即采用撞击损伤方程(2)进行计算,10 a 累积的面积

损伤率达到 2.3%. 上述两种情况下微流星体所造成的面积损伤约占 50%. 文献[6]依据 ORDEM 碎片环境模式就 700 km 高度、45°倾角的低轨道微小碎片对石英玻璃的面积损伤进行了评估,认为微小碎片及微流星体 10 a 累积造成最严重的面积损伤率为 3.5%.

表1 10 a 累积的面积损伤率

	总损伤率/%	微流星体损伤率/%
平均情况	0.61	0.31
严重情况	2.30	1.16

图4给出了面积损伤率在速度区间的分布,对于空间碎片(不含微流星体)形成有效损伤的碎片速度  $v$  主要在 17.5 km/s 以下,而  $v$  在 15 km/s 以上的超高速撞击产生的面积损伤主要来自微流星体.

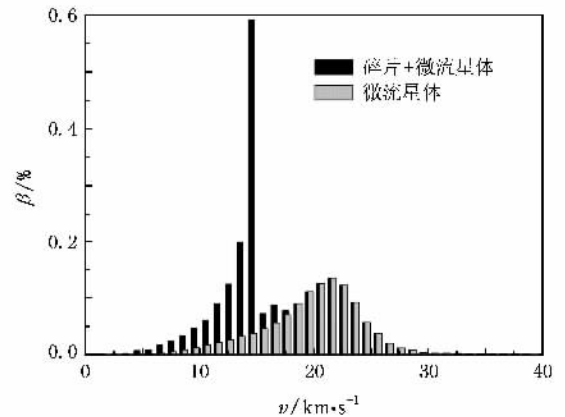


图4 面积损伤率在不同速度区间的分布

## 5. 光学透射率的衰减

在面积损伤率确定的基础上,可以进一步确定由面积损伤导致的光学透射率衰减. 首先通过一个覆盖单个典型撞击坑的圆形光斑测量单个撞击坑区域的透射率,然后根据面积损伤率计算得到整个样品的透射率. 图5为放大后的单个撞击坑及测试光斑,假设光斑面积为  $A_0$ ,其中撞击坑面积为  $A_{co}$  ( $A_0 > A_{co}$ ). 玻璃样品的本底透射率为  $T_0$ ,撞击坑区域的透射率为  $T_{co}$ ,则光斑测试区域的透射率为

$$T = \frac{A_{co} T_{co} + (A_0 - A_{co}) T_0}{A_0}. \quad (5)$$

从而由光斑测试区域的透射率  $T$  可得到典型撞击坑区的透射率  $T_{co}$ . 假设样品(总面积  $A$ )上有  $n$  个撞击坑,每个坑区的透射率都是  $T_{co}$ ,则整个样品的透

射率为

$$T = \frac{T_{\infty} \sum_{i=1}^n A_i + T_0 (A - \sum_{i=1}^n A_i)}{A} = T_{\infty} \beta + T_0 (1 - \beta). \quad (6)$$

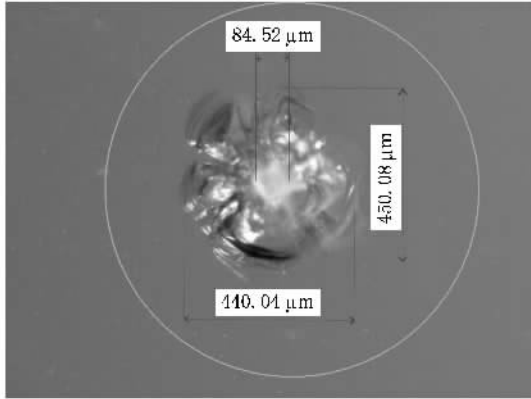


图5 撞击坑及测试光斑放大照片

测量中分别采用了直径为 0.6—2 mm 不等的光斑,光斑尺寸越接近撞击坑尺寸,则撞击坑导致的透射率变化越显著,图 6 给出了采用直径为 0.6 mm 光斑测量得到单个撞击坑的透射率  $T_{\infty}$  及其与本底透射率  $T_0$  的比较,波长范围为 300—900 nm.从图 6 可以看出,在 850 nm 以下波长范围内,透射率为 20%—30%.图 7 给出了面积损伤率分别为 0.61%,

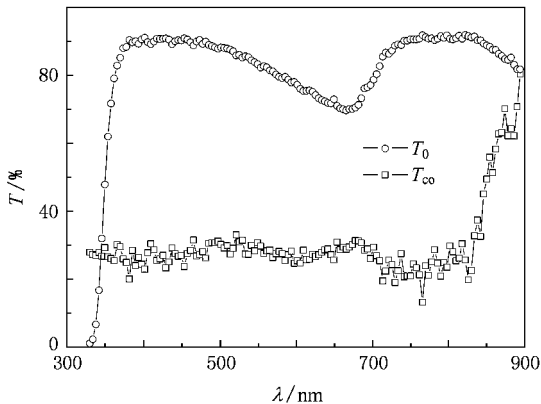


图6 单个撞击坑的透射率测量结果

2.3% 情况下的样品透射率衰减.从图 7 可以看出,透射率衰减随波长而变化,一般情况下总衰减在 0.5% 左右,严重情况下达到约 1.5%.

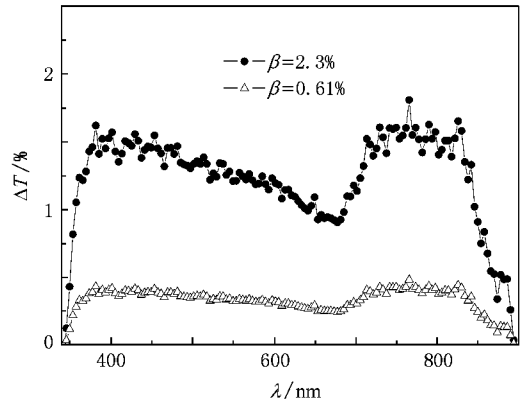


图7 样品透射率的衰减情况

## 6. 结 论

根据 MASTER-2005 空间碎片环境模式对低轨道碎片通量及分布进行了计算,结果表明,对于碎片分布较密集的太阳同步轨道碎片通量主要来自 1—1000 μm 范围的微小碎片.对于太阳电池而言,玻璃盖片上形成的撞击坑所引起的透射率下降是空间碎片导致太阳电池输出功率下降的重要原因之一.根据模式分析结果,在轨 10 a 由微小碎片累积撞击引起的面积损伤率平均情况下为 0.61%,严重时可达 2.3%,其中约 50% 来自于微流星体的撞击.玻璃盖片面积损伤导致的透射率下降平均情况下约为 0.5%,严重时达 1.5%.随波长有所变化.

本文的分析是基于空间环境碎片模式的计算结果,考虑到模式本身的不确定性以及空间碎片总量不断增长的总体趋势,未来影响可能会比估算结果更加严重.另一方面,本文计算结果在很大程度上依赖于撞击损伤方程的准确性和精度,由于试验装置的局限,试验数据中缺乏尺寸更大和速度更高的数据.如果试验数据的范围能拓展到更高的能量区间,损伤方程的准确度会更好,评估结果也会更加准确.

[1] Graham G A, Kearsley A T, Drolshagen G, McBride N, Green S F, Wright I P 2001 *Adv. Space Res.* **28** 1341

[2] Paul K G, Jgembergs E B, Bert 1997 *Int. J. Impact Eng.* **20** 627

[3] See T H, Allbrooks M K, Atkinson D 1990 *NASA JSC Report* 24608

[4] McDonnell J A M 1987 *Cosmic Dust* (New York: Wiley)

[5] Han J W, Zhang Z L, Li X Y, Chen Z F, Quan R H, Li H W 2006 *Spacecr. Envir. Eng.* **23** 205 (in Chinese) [韩建伟, 张振龙, 李

小银、陈赵峰、全荣辉、李宏伟 2006 航天器环境工程学报 23  
205 ]

[ 6 ] Frank K S ,Tobias G ,Eberhard E S ,Martin R ,Eduard I 2001 *Int. J. Impact Eng.* **26** 683

## Investigation on the surface damage to solar cells by impacts of space micro-debris on low earth orbit

Huang Jian-Guo<sup>†</sup> Han Jian-Wei Li Hong-Wei Cai Ming-Hui Li Xiao-Yin

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

( Received 11 April 2008 ; revised manuscript received 11 September 2008 )

### Abstract

Cumulative damage to the exposed spacecraft materials by the micro-debris on low earth orbit , where the debris is densely populated , is one of the crucial problems calling for due consideration in designing of spacecrafts. The flux of micro-debris encountered by a typical sun-synchronous vehicle was calculated , the associated hypervelocity impact simulation experiment was carried out , and the damage equation was established. Based on the flux result and the damage equation , the surface damage ratio of the solar cell due to micro-impacts was calculated , and the associated optical transmittance decrease of the cell was evaluated according to optical measurement and theoretical model. The result showed that the surface damage ratio of solar cell after 10 a cumulative micro-impacts reaches 0.61% on average , and up to 2.3% in the worst case. The optical transmittance decreases by 0.5% on average , and up to 1.5% in the worst case. In this paper , a quantitative method of evaluation for the issue of solar cell's surface damage due to micro-impacts was demonstrated through a concrete example.

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

**PACC** : 9460M , 6250

<sup>†</sup> E-mail : huangjg@cssar.ac.cn