

# 超高速空间微小碎片撞击充电材料诱发的放电

高著秀<sup>†</sup> 李宏伟 蔡明辉 刘丹秋 黄建国 韩建伟

(中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190)

(2011年5月20日收到; 2011年6月13日收到修改稿)

空间微小碎片与航天器表面超高速撞击, 能够抛射出等离子体, 在高充电的航天器表面诱发静电放电, 是可能引发航天器异常的一个重要因素. 本文利用等离子体驱动微小碎片加速器对充电材料进行超高速 (3 km/s) 撞击模拟实验, 通过观测放电脉冲信号来研究因撞击产生的等离子体诱发的放电, 得到较好的实验现象, 初步确认了超高速碎片撞击充电材料诱发放电的机理.

**关键词:** 静电放电, 超高速撞击, 充电材料, 微小碎片

**PACS:** 96.50.Pw, 94.05.Jq

## 1 引言

地球同步轨道和太阳同步轨道空间等离子体容易诱发航天器表面充电, 同时又是航天器的密集运行区域. 碎片的超高速撞击可以抛射出稠密的等离子体云团, 其密度和波及范围随撞击速度及碎片尺度增加<sup>[1]</sup>. 撞击抛射的等离子体很可能在不等量带电的材料及部件间建立放电通道, 从而触发表面放电. 近年来, 我们在开展微小碎片撞击实验中观测到: 当微小碎片撞击高充电材料时, 在一定条件下可以触发静电放电<sup>[2]</sup>. 这意味着, 空间微小碎片撞击诱发放电可能成为航天器异常的一个不容忽视的诱因.

大量航天器表面放电故障事件分析结果表明, 诱发表面放电的物理机制尚未完全清楚, 很多放电是在充电环境并不严重的情况下发生的. 在美国国家地球物理数据中心 (NGDC) 收集的 1000 多条表面充放电故障事件中, 也有将近上百条充放电故障并没有表现出与空间等离子体环境的相关性; 我国收集的 173 条充放电事件中, 29 条找不到诱发放电的根源. 例如, 国内  $\times\times$  GEO 轨道卫星的计算机由表面放电引起了多次复位, 但是分析表明即使按照最恶劣的空间等离子体环境计算也只能产生几百伏的电位差, 本身不足以引起放

电. 类似的情况也存在于高压太阳能电池阵等本身带有高压的暴露部件, 有不少已确认的高压电池阵的放电故障并没有表现出与空间等离子体环境扰动的相关性, 这意味着空间微小碎片有可能多次诱发太阳能电池系统故障, 只是被忽视了. 近年来日本航空探测局、大阪大学等多家机构利用二级轻气炮上产生的 2—5 km/s 的超高速微粒撞击偏压 130 V—180 V 的模拟太阳能电池, 初步观测到撞击诱发的放电脉冲以及二次放电现象, 放电的电子密度达到  $10^9/\text{cm}^3$ <sup>[3]</sup>. 而空间等离子体密度最高的等离子体层电子密度仅为  $10^2/\text{cm}^3$ , 这说明碎片撞击诱发 ESD 故障机制不仅是存在的, 而且是严重的, 但由于卫星上普遍不具备对微小碎片撞击的实时监测设备, 难以获得撞击诱发放电的直接证据, 因此, 长期以来航天界一直主要把航天器表面放电故障归因于空间等离子体环境, 而空间微小碎片这一重要诱因却被掩盖了. 空间碎片中 99.9999% 以上的碎片来自 1  $\mu\text{m}$ —1 mm 之间的微小碎片, 速度主要分布在 1—15 km/s<sup>[4]</sup>. 而航天器表面经常处于绝对或相对带电状态, 因此, 基于这种现状, 我们在等离子体驱动微小碎片加速器上, 对接入充电回路中的样品进行高速撞击, 研究因撞击产生的等离子体诱发的放电现象, 得到明显的实验效果, 预示着微小碎片撞击充电材料产生等离子体诱发放电所

<sup>†</sup> E-mail: gzx018@sohu.com

潜在的危害.

## 2 实验设计

### 2.1 实验装置

该实验在等离子体驱动微小碎片加速器上进

行, 实验装置原理如图 (图 1), 它由一对同轴电极构成. 两电极间加脉冲高压, 气体在电极间击穿后形成电弧; 放电电流又形成角向磁场; 流经电弧的电流在磁场的 Lorentz 力  $j \times B$  的作用下, 向外运动, 并不断被加速, 将喷嘴处的微粒样品以超高速发射出去. 实验中, 电极间加 15 kV 电压, 可以将直径为 200  $\mu\text{m}$  的玻璃微粒加速到 3 km/s 左右的速度.

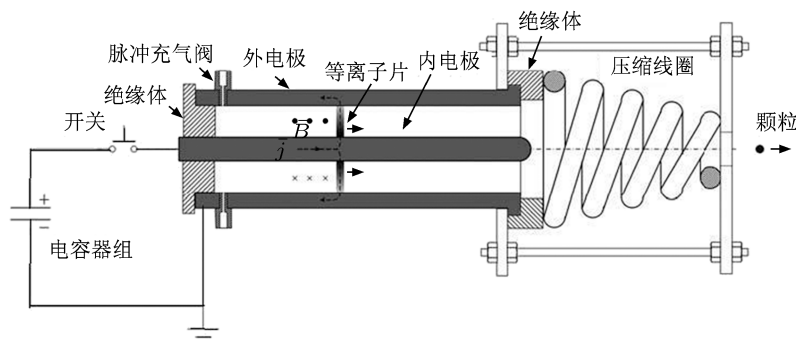


图 1 实验装置示意图

### 2.2 实验原理

实验中, 先闭合电源开关, 如 (图 2) 所示, 对回路中的电容器充电一段时间, 使得取样电阻  $R_2$  上有一个初始电位, 此时未发生击穿放电, 在开启加速器撞击样品前, 断开充电回路中的电源, 由于电容器的放电时间远大于撞击微粒所需的时间, 取样电阻  $R_2$  上可以暂时保持该电位一段时间, 当高速飞行的微粒撞击充电材料产生等离子体时, 将充电回路瞬间导通,  $R_1$  上即有脉冲电流通过, 取样电阻  $R_2$  上电位有台阶式下降, 通过测量放电脉冲电流  $I$  和取样电阻  $R_2$  上电压  $U_2$  的跳变, 可以观测放电现象.

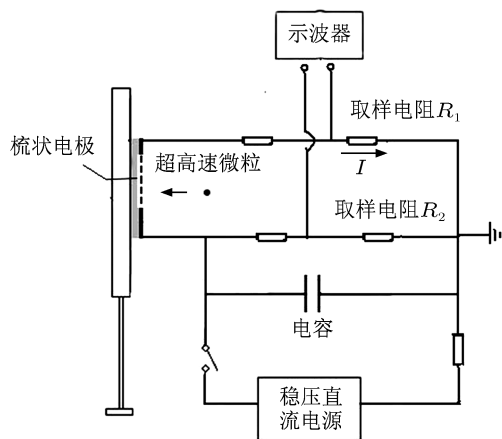


图 2 实验原理示意图

### 2.3 测量方法

用示波器的两路通道分别采集取样电阻上  $R_1$  上的脉冲电流和取样电阻  $R_2$  上的电位信号, 由加在样品背部的压电传感器记录微粒撞击样品的时刻, 用飞行时间法 ( $v = l/\Delta t$ ,  $l$  为微粒飞行管道长度,  $\Delta t$  为飞行时间) 计算微粒飞行的速度 [5].

### 2.4 实验样品

图 3 为实验中采用的充电材料, 在电路板上镀梳状 Ag 线, Ag 线宽度为 0.5 mm, 相邻 Ag 线的间距为 0.5 mm, 1 mm, 2 mm 不同规格, 由于撞击位置是随机分布的, 所以做如图 3 所示的梳状电极, 以提高实验效率.

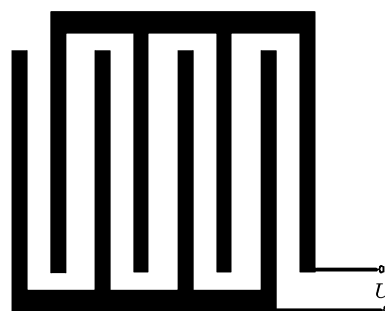


图 3 充电材料样品图样

为了说明撞击时发生的放电不是由电极间击

穿引起的(当阳极和阴极间的电压加至某一临界值时,电极间的气体就会发生放电<sup>[6]</sup>),对放电样品在真空中的 Paschen 曲线进行了测量(图4).由图中的数据可以得到,当电压为750 V左右时,发生击穿的真空气度约为9 Pa.我们实验中的真空气度为 $10^{-3}$ 量级,而发生放电时加在放电材料两端的电压小于700 V,因此,可以排除是击穿放电.

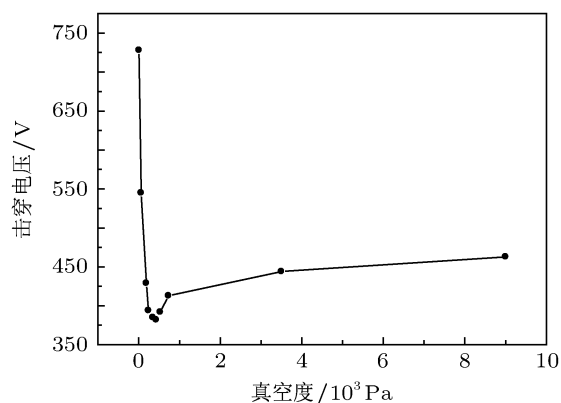


图4 样品材料在空气中的 Paschen 曲线

### 3 实验结果

#### 3.1 微粒速度

图5所示为一次发射中的微粒速度信号,其中包含了5组速度不同的微粒,分别为2.7 km/s, 17 km/s, 1.4 km/s, 1.2 km/s 和 1.1 km/s.由图6对照可知每组微粒的撞击均产生了放电.实验证明,小于1 km/s的微粒撞击充电材料时未能引发放电,说明并非由于颗粒带电导致放电,而是超高速撞击产生的等离子体诱发了放电.

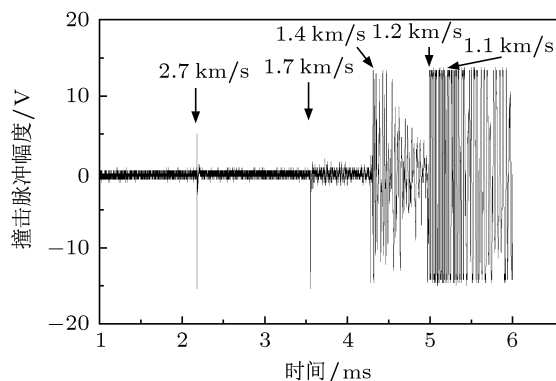


图5 压电传感器上微粒的速度信号

为了与空间背景等离子体密度相比较,对我们撞击试验中产生的等离子体密度做估算,由文献[1]

中的经验公式  $Q \propto m^\alpha v^\beta$ ,  $\alpha = 0.85$  ( $v > 1$  km/s),  $\beta = 3.2 \pm 0.1$ , 对比文献[3]中的数据:3 mm直径的铝球以2.5 km/s的速度撞击铜板,测到的电子密度为  $9.1 \times 10^9$  /cm<sup>3</sup>.不考虑靶材的电离能差异,我们用直径200 μm的玻璃以2.5 km/s的速度撞击充电材料,产生的电子密度估算值为  $10^6$  /cm<sup>3</sup>,远大于空间背景等离子体的密度.

#### 3.2 放电电压及电流脉冲

图6中上图为取样电阻  $R_2$  上采集的电压信号,下图为电阻  $R_1$  上采集的电流脉冲信号.可以看到,在颗粒撞击充电材料样品的同时,由于高速撞击产生的等离子体瞬间将  $R_1$  支路导通,电阻  $R_1$  上产生脉冲放电,电量被泄放,所以电阻  $R_2$  上的电压信号出现台阶式的降幅,两个电阻上的信号时间对应性很好,相互佐证,证明了数据的可靠性.图7为图6中第二个放电脉冲的展宽,可见等离子体的生存时间接近30 μm,在一组撞击放电实验中,共10次撞击,其中有3个放电脉冲时间跨度达到20 μm.未来我们将通过改变放电参数和环境参数,继续摸索因撞击诱发持续放电的产生条件和机理.

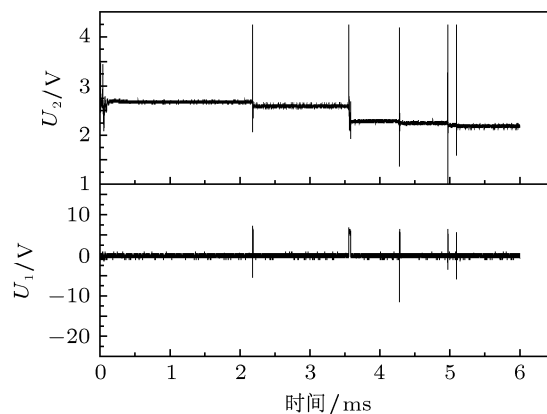


图6 取样电阻信号

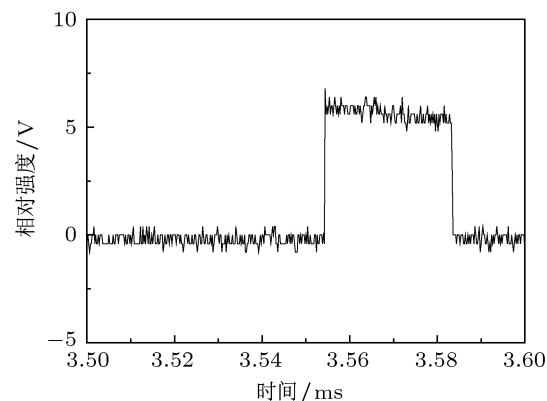


图7 单个电流脉冲信号

### 3.3 放电阈值范围

为寻找诱发放电的参数范围,我们对间隔分别为 1 mm 和 2 mm 的样品做撞击放电实验,对微粒速度和发生放电的场强进行统计,得到图 8 中的放

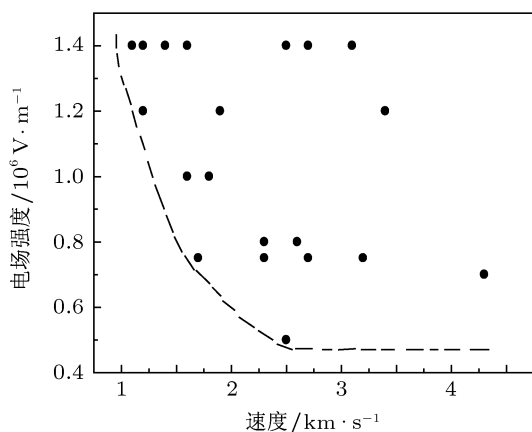


图 8 可以诱发放电的场强和速度区域

电阈值范围. 点线上方的区域就是可以发生放电的区域. 当碎片撞击充电材料时, 微粒的速度和加在

充电材料相邻导线之间的场强位于点线上方的区域时, 就可以发生放电. 可见, 当电场强度越大时, 越容易诱发放电, 发生放电所需要速度的阈值就越低; 速度越高时, 撞击抛射出的等离子体就越稠密, 放电所需要的电场强度的阈值就越低.

## 4 结论

实验表明: 当充电材料充以几百伏的电压时, 被直径为几百微米、速度为几 km/s 的微粒撞击的时候, 会产生等离子体云团并诱发放电. 接下来的工作中, 我们需要对充以不同电位的绝缘介质之间、充电绝缘介质与地之间、带电悬浮导体与地之间等情况分别做静电放电实验, 还需要安装静电探针, 并配合光谱拍摄等手段 [7], 来测量撞击产生的等离子体的密度和温度等参数, 进一步明确因碎片撞击产生的等离子体而诱发放电的机理, 为航天器故障诊断提供理论和实验依据.

- [1] Smith D, Adams N G 1973 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **6** 700
- [2] Huang J G, Han J W 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2907 (in Chinese) [黄建国, 韩建伟 2010 物理学报 **59** 2907]
- [3] Akahoshia Y, Nakamura T, Fukushige S, Furusawa N, Kusunoki S, Machida Y, Koura T, Watanabe K, Hosoda S, Fujita T, Cho M 2008 *Int. J. Impact Eng.* **48** 1
- [4] Huang J G, Han J W, Li H W, Cai M H, Li X Y, Zhang Z L, Chen Z F, Wang L, Yang X Z, Feng C H 2008 *Chin. Sci. Bull.* **54** 150 (in Chinese) [黄建国, 韩建伟, 李宏伟, 蔡明辉, 李小银, 张振龙, 陈赵峰, 王龙, 杨宣宗, 冯春华 2008 科学通报 **54** 150]
- [5] Li H W, Han J W, Huang J G, Cai M H, Li X Y, Gao Z X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1385 (in Chinese) [李宏伟, 韩建伟, 黄建国, 蔡明辉, 李小银, 高著秀 2010 物理学报 **59** 1385]
- [6] Zhao Q, Liu S Z, Tong H H 2009 *Plasma Technology and Its Applications* (1st Ed) (Beijing: National Defence Industrial Press) p57 (in Chinese) [赵青, 刘述章, 童洪辉 2009 等离子体技术及应用 (第一版) (北京: 国防工业出版社) 第 57 页]
- [7] Gao X, Song X W, Guo K M, Tao H Y, Lin J Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 025203 (in Chinese) [高勋, 宋晓伟, 郭凯敏, 陶海岩, 林景全 2011 物理学报 **60** 025203]

# Discharging of charged material initiated by impacting of hypervelocity small debris

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

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

(Received 20 May 2011; revised manuscript received 13 June 2011)

## Abstract

It may cause the generation of plasma and induce the electro-static discharge (ESD) phenomenon when the super-hypervelocity small debris impact the charged spacecraft surface. This is a important factor that may cause spacecraft abnormality. In this article, a kind of charged material impacts the plasma driven accelerator and the discharging signal induced by impact is collected. The effect of the simulating test is obvious. By theoretical analysis, we verify the hidden trouble of ESD induced by space debris impacting on the charged materials.

**Keywords:** electro-static discharge, super-hypervelocity impact, charged material, small debris

**PACS:** 96.50.Pw, 94.05.Jq

---

<sup>†</sup> E-mail: gzx018@sohu.com