

空间微小碎片超高速撞击诱发的等离子体特性研究*

蔡明辉^{1)2)†} 吴逢时¹⁾ 李宏伟¹⁾ 韩建伟¹⁾

1) (中国科学院空间科学与应用研究中心, 空间环境特殊效应实验室, 北京 100190)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2013年8月28日收到; 2013年10月9日收到修改稿)

空间微小碎片超高速撞击航天器表面可产生稠密的等离子体, 随着等离子体的扩散可导致静电放电及电磁干扰脉冲的发生, 近而威胁航天器在轨安全. 本文利用等离子体驱动微小碎片加速器研究了质量为 10^{-5} g 的空间碎片撞击产生的等离子体基本特性, 给出了等离子体总电荷与微小碎片速度之间的关系, 获得了等离子体扩散速度参数及等离子体电子密度随时间和空间的演化关系, 研究结果对于揭示空间微小碎片撞击诱发放电和电磁干扰脉冲形成的机理具有重要意义.

关键词: 空间碎片, 超高速撞击, 等离子体

PACS: 94.20.Fg, 96.25.Pq

DOI: 10.7498/aps.63.019401

1 引言

航天器充电效应是导致航天器故障的重要原因^[1,2], 而大量空间和地面实验表明空间碎片的超高速撞击可能导致航天器发生放电现象. 1993年8月, 欧空局的 Olympos 卫星在英仙座流星雨高峰期控制陀螺仪出现异常并最终导致卫星失效; 1994年美国导弹防御系统的 Miniature Sensor Technology Integration-2(MSTI-2) 卫星与地面控制系统失去联系, 其故障极有可能是碎片撞击其电缆线引起的电荷释放所致; 2002年3月16日, 美国 Jason-1 卫星遭遇到微小空间碎片撞击, 并导致其电源系统异常持续达 5 h; 2009年在英仙座流星雨高峰期, 美国 Landsat-5 卫星的陀螺仪出现异常^[3]. 在地面模拟实验方面, 日本九州工业大学最早利用轻气炮开展了空间碎片撞击诱发太阳电池放电的模拟实验, 观测到直径 3 mm 空间碎片在撞击速度为

1.4—2.5 km/s 时导致的放电脉冲^[4]; 中国科学院空间科学与应用研究中心利用自主研发的空间微小碎片加速器针对微米级空间碎片的超高速撞击开展了一系列研究^[5-7], 近期研究了空间碎片撞击诱发带电样品放电的基本规律^[8,9]; 沈阳理工大学和北京理工大学利用轻气炮在真空度为 67 Pa 的实验条件下, 研究了 6.4 mm 的铝球加速到 6.1 km/s 的速度后撞击形成的等离子体的密度^[10]; 美国斯坦福大学利用德国马克斯普朗克研究所的静电粉尘加速器开展了大量的实验, 研究了质量在 10^{-16} — 10^{-11} g、速度在 3—66 km/s 的微小碎片撞击产生的等离子体特性^[11]. 2011年3月, 美国宇航局发布的最新航天器充电减缓技术手册中指出, 空间碎片撞击诱发放电是航天器发生放电的重要触发因素之一^[12].

对空间微小碎片来说, 超高速撞击形成的等离子体是导致航天器故障的根本原因. 微小空间碎片超高速撞击直接形成的机械损伤对航天器影响较小,

* 国家自然科学基金(批准号: 41174163)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: caiminghui@nssc.ac.cn

但由于撞击抛射的等离子体引起的电磁效应危害不容忽视^[13,14]. 微小空间碎片撞击航天器的电磁效应对航天器的影响主要有两种机理^[15], 一是撞击形成的致密等离子体覆盖到航天器带电区域, 导致该区域在较低电压下发生静电放电, 放电脉冲冲击航天器的电子系统导致其异常甚至失效; 另一种机理是撞击形成的等离子体在扩散过程中形成电磁脉冲, 该电磁波可能会耦合到航天器的工作电路和天线中, 形成干扰和“虚假”信号.

限于实验条件的限制, 轻气炮实验样品质量一般在 10^{-3} g 量级, 静电粉尘加速器实验样品一般在 10^{-12} — 10^{-15} g 量级. 本文将利用等离子体驱动微小碎片加速器重点研究质量为 10^{-5} g 的玻璃样品以不同速度撞击航天器材料诱发的等离子体特性, 研究结果可填补微克量级空间微小碎片撞击产生等离子体实验数据的空白, 对于揭示空间微小碎片撞击诱发航天器故障机理具有重要意义.

2 实验设计

2.1 实验装置

本实验在中国科学院空间科学与应用研究中心自主研制的等离子体驱动微小碎片加速器上进行^[16]. 该装置的组成及工作原理如图 1 所示, 主要由同轴电极、压缩线圈、电容器组、充气阀、放电开关等组成; 当开关导通时, 在同轴枪内充入脉冲气体并在高压下发生击穿放电, 在内外电极间形成等离子体, 放电电流在内外电极间产生环向磁场并与电流形成洛伦兹力, 使等离子体向前加速运动; 超高速等离子体喷入锥形压缩线圈并对线圈放电, 在线圈中形成螺旋状放电电流, 该电流又产生轴向磁场, 同时在等离子体中感应出涡形电流, 产生的洛伦兹力将等离子体压缩, 从而形成高速高密度的等离子体射流, 将喷嘴处的微粒加速形成超高速空间碎片.

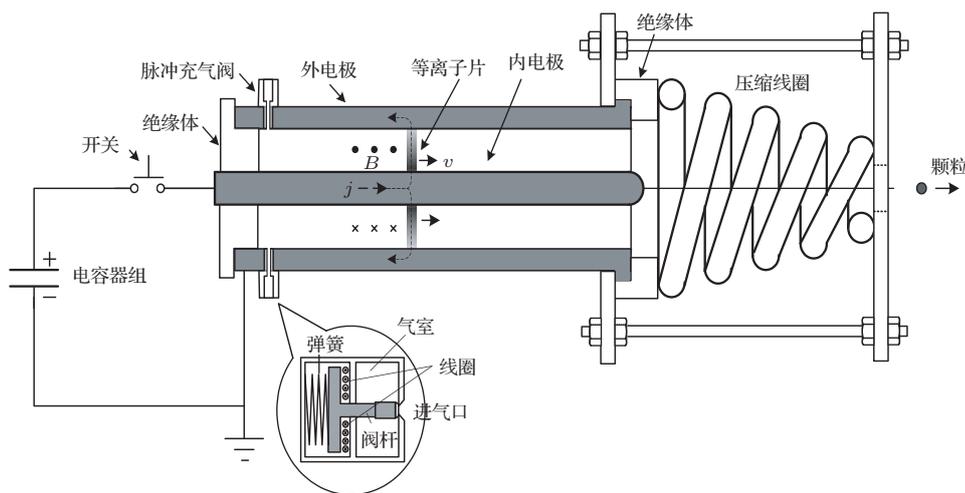


图 1 等离子体驱动微小碎片加速器的组成及原理示意图

2.2 等离子体测量方法

空间碎片超高速撞击产生的等离子体是一种低温、稠密的瞬态等离子体, 其持续时间在微秒量级且发光信号较弱, 因此常用的郎缪尔探针法、光谱法无法满足实验要求, 本实验中将采用阻滞势分析器对空间微小碎片超高速撞击形成的等离子体进行测量.

阻滞势分析器的基本原理是利用带电极网分析空间等离子体能量从而得到电子密度、扩散速度等参数. 图 2 是典型阻滞势分析器的结构示意图,

由屏蔽体、粒子筛选栅网、能量扫描栅网、抑制电子栅网和收集电极组成. 屏蔽体用于屏蔽内部电场, 可避免各层栅网上所加电压对外界等离子体环境造成影响, 一般需要将其接地; 粒子筛选栅网主要用于区分正负粒子, 如果测量带正电荷粒子则加负电, 如果测量电子则加正电; 能量扫描栅网主要通过加扫描偏压获得粒子的能量信息, 只有高于阻滞能量的粒子才能通过能量扫描栅网到达收集电极; 抑制电子栅网既可防止收集电极上二次电子发射, 也可防止对前端电子学的干扰; 收集电极用于收集等离子体中电子或离子电荷.

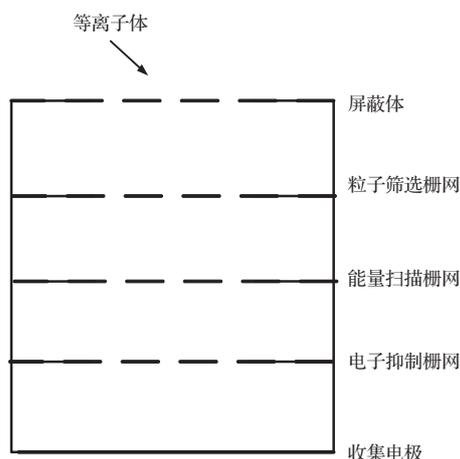


图2 阻滞势分析器结构示意图

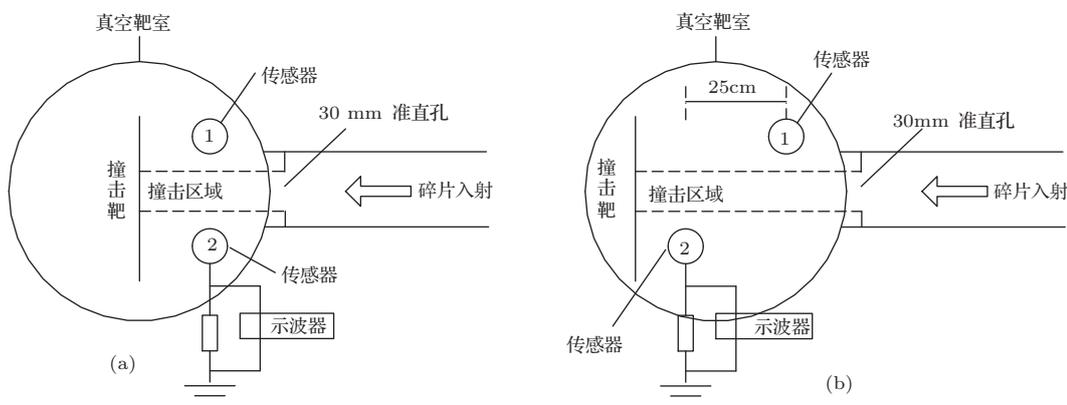


图3 实验布局图 (a) 等离子体密度测量; (b) 等离子体扩散速度测量

2.3 实验布局

实验中的布局如图3所示, 其中图3(a)是开展等离子体电子密度测量时的实验布局, 分别将2个阻滞势分析器置于真空室内撞击靶的前侧, 碎片入射与靶撞击后产生的等离子体将向阻滞势传感器方向扩散, 传感器的收集电极串联一个取样电阻用于示波器采集信号; 图3(b)是测量等离子体电子扩散速度时的布局, 将2个传感器放在撞击靶前不同的位置且距离差为250 mm, 采用飞行时间法可获得等离子体扩散速度. 为控制碎片撞击的入射方向, 在靶室前面加了一个直径为30 mm的准直孔.

3 实验结果

3.1 撞击信号

空间微小碎片加速器会同时发射多颗碎片, 图4是利用质量为 10^{-5} g玻璃样品开展实验时由阻滞势分析器收集等离子体中电子电流的测量结果, 图中同时给出了速度范围在4.3—5.1 km/s

的多颗碎片对应的等离子体电子收集电流的信号, 图4(a)是阻滞势分析器1的信号, 图4(b)是阻滞势分析器2的信号, 二者具有很好的对应性. 图中每个碎片撞击信号对时间取积分, 即可得到阻滞势分析器收集到的电荷总量, 例如4.7 km/s的一个碎片撞击时阻滞势分析器收集的电荷总量为 8.0×10^{-9} C.

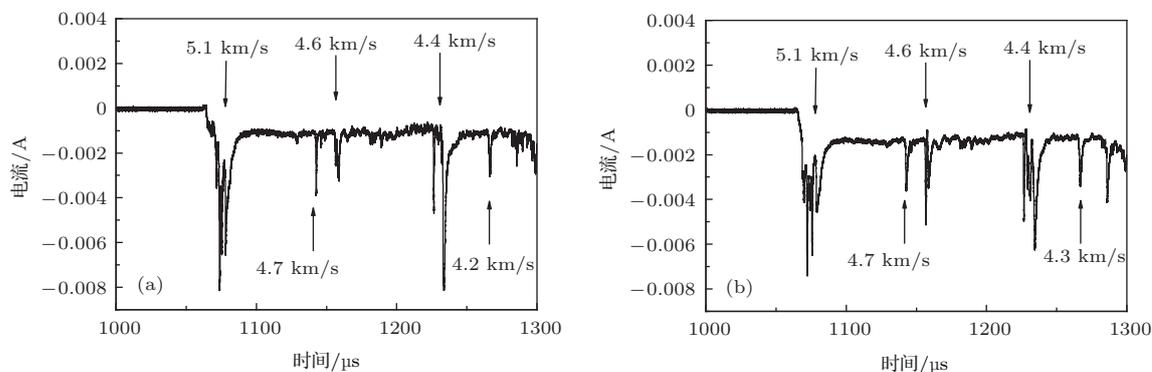


图4 空间碎片撞击收集的等离子体电子电流信号 (a) 传感器1的信号; (b) 传感器2的信号

3.2 等离子体总电荷

通过对上百颗空间碎片撞击信号的统计分析,可以得到质量为 10^{-5} g 的玻璃碎片以不同速度撞击金属铝靶时形成等离子体总电荷的分布规律,如图 5 所示.

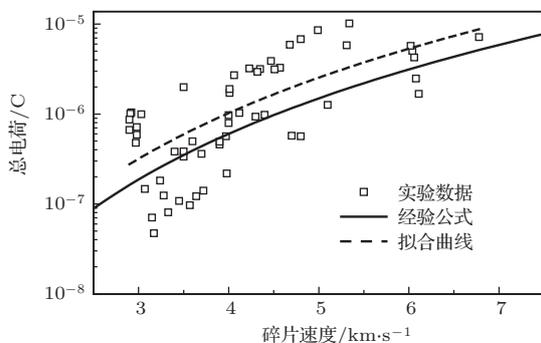


图 5 不同速度空间碎片撞击形成的等离子体总电荷

图中散点为实验测量数据,虚线为实验拟合曲线,实线为 McBride 和 McDonnell 的经验公式^[3].其中,McBride 和 McDonnell 的经验公式为 (1) 式,利用实验数据拟合后得到的公式为 (2) 式.

$$Q = 0.1m(m/10^{-11})^{0.02}(V/5)^\alpha, \quad (1)$$

$$Q = 3.634 \times 10^{-9} \times V^{4.069}, \quad (2)$$

式中 Q 为总电荷量, m 为碎片质量, V 为碎片速度,指数 α 与碎片化学组成、撞击靶材料相关,数值范围一般在 2.5—4.7 之间,图中实线是 α 取值为 4.069 的结果.从图中可以看到,实验数据具有一定的离散性,主要原因是初始玻璃样品质量差别所致;根据实验数据获得的拟合曲线与经验公式误差在 2 倍左右,考虑到经验公式实验数据更多来自于轻气炮和静电粉尘加速器,因此本文实验结果能够很好弥补质量在微克量级时实验数据的缺乏,并对经验公式进一步修正.

3.3 等离子体扩散速度

测量空间碎片撞击产生的等离子体扩散速度的实验布局如图 3(b) 所示,将 2 个阻滞势分析器位置分开并使间距为 250 mm.图 6 是 4.5 km/s 和 3 km/s 的空间碎片撞击下采集的信号,二者时间间隔均为 7 μ s,根据飞行时间法可得等离子体扩散速度约为 35.7 km/s.

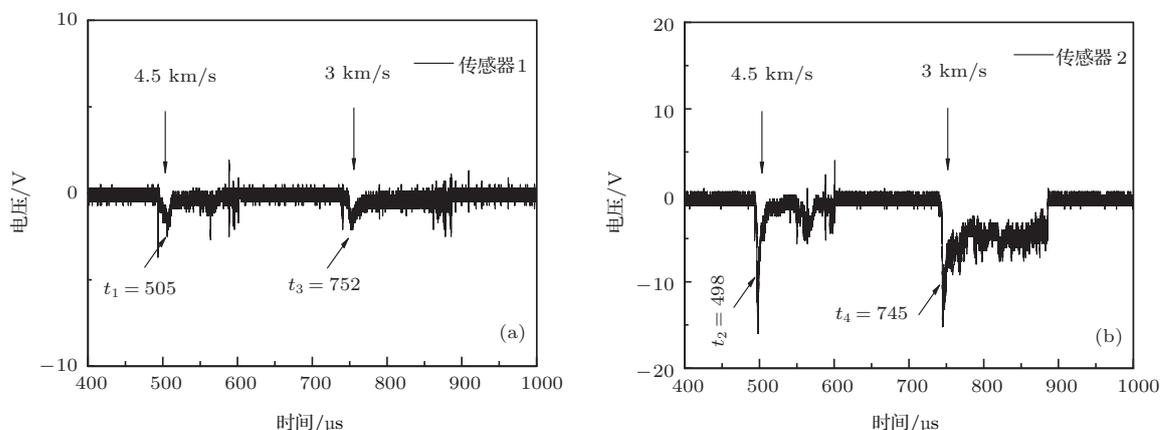


图 6 等离子体扩散速度测量结果

3.4 等离子体电子密度时空演化规律

根据前面等离子体总电荷、扩散速度的实验结果和等离子体扩散的半球模型^[3],以质量 10^{-5} g、速度 3 km/s 的玻璃样品为例,分析计算了超高速撞击金属铝靶所产生的等离子体电子密度随时间和空间的演化关系,如图 7 所示.从图中可以看到,

等离子体初始密度大约在 $1.2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$,随着时间和空间的推移迅速减小,例如在距离撞击点 1000 mm 位置等离子体电子瞬时密度仍可达 $8.0 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$,足以对带电材料形成放电回路.结合航天器结构和表面带电情况,此实验结果可用于分析等离子体扩散过程中导致静电放电和电磁脉冲干扰的机理和危害.

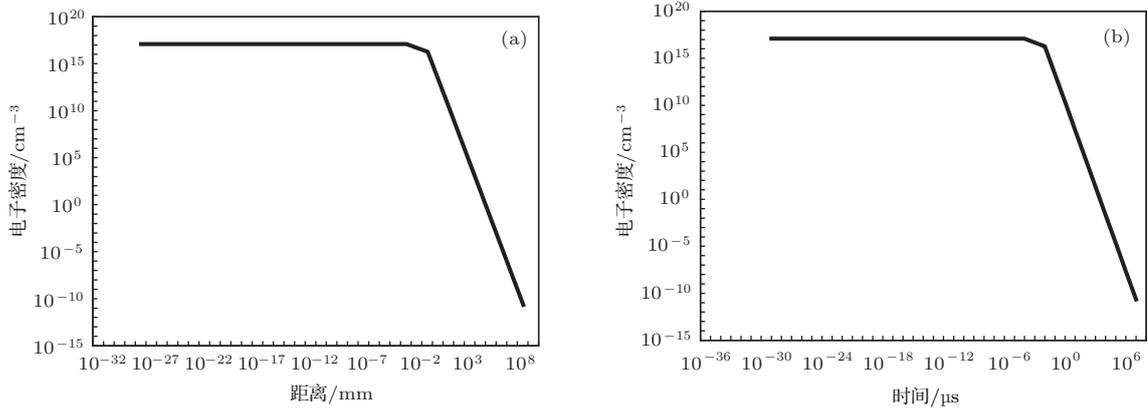


图7 等离子体时空演化关系 (a) 随撞击点距离的变化; (b) 随时间的变化

4 结 论

本文利用等离子体驱动微小碎片加速器研究了质量为 10^{-5} g、速度范围在 3—7 km/s 的玻璃样品超高速撞击铝靶产生的等离子体特性, 填补了国内外在微克量级的空间微小碎片撞击产生等离子体实验数据的空白. 实验结果表明, 对于质量为 10^{-5} g 的空间微小碎片来说, McBride 和 McDonnell 的经验公式低估了撞击所产生的等离子体总电荷; 速度为 4.5 km/s 和 3 km/s 的碎片撞击所产生的等离子体扩散速度约为 35.7 km/s, 等离子体扩散过程中电子密度随时间和空间推移迅速减小. 以质量 10^{-5} g、速度 3 km/s 的玻璃样品为例, 在距离撞击点 1000 mm 位置等离子体电子瞬时密度仍可达 $8.0 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$, 足以对航天器上带电材料形成放电回路, 威胁航天器在轨安全. 本文实验结果对于揭示空间微小碎片撞击诱发航天器表面放电机理, 等离子体扩散形成电磁脉冲干扰的物理机理具有重要意义.

参考文献

[1] Quan R H, Zhang Z L, Han J W, Huang J G, Yan X J, 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1206 (in Chinese) [全荣辉, 张振龙, 韩建伟, 黄建国, 闫小娟 2009 物理学报 **58** 1206]
 [2] Cao M, Wang F, Liu J, Zhang H B, 2012 *Chin. Phys. B* **21** 127901
 [3] Garrett H, Close S 2012 12th *Spacecraft Charging Technology Conference* Kitakyushu, Japan, May 14–18, 2012

[4] Akahoshi 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.* **35** 12
 [5] Huang J G, Han J W, Li H W, Cai M H, Li H W 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 12 (in Chinese) [黄建国, 刘丹秋, 高著秀, 李宏伟, 蔡明辉, 韩建伟 2008 物理学报 **57** 12]
 [6] Li H W, Han J W, Huang J G, Cai M H, Li X Y, Gao Z X 2012 *Acta Phys. Sin.* **59** 2 (in Chinese) [黄建国, 刘丹秋, 高著秀, 李宏伟, 蔡明辉, 韩建伟 2010 物理学报 **59** 2]
 [7] Huang J G, Liu D Q, Gao Z X, Li H W, Cai M H, Han J W 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** (in Chinese) [黄建国, 刘丹秋, 高著秀, 李宏伟, 蔡明辉, 韩建伟 2012 物理学报 **61**]
 [8] Gao Z X, Li H W, Cai M H, Liu D Q, Huang J G, Han J W 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 3 (in Chinese) [高著秀, 李宏伟, 蔡明辉, 刘丹秋, 黄建国, 韩建伟 2012 物理学报 **61** 3]
 [9] Hongwei Li, Jianwei Han, Jianguo Huang, Minghui Cai, and Zhuxiu Gao. 2012 *Spacecraft Charging Technology Conference* Kitakyushu, Japan, May 14–18, 2012
 [10] Tang E L, Zhang Q M, Huang Z P 2007 *Transactions of Beijing Institute of Technology* **27** 5 (in Chinese) [唐恩凌, 张庆明, 黄正平 2007 北京理工大学学报 **27** 5]
 [11] Lee N, Close S, Goel A, Lauben D, Linscott I, Johnson T, Strauss D, Bugiel S, Mocker A, Srama R 2013 *Phys of Plasmas* **20** 3
 [12] Albert W 2010 11th *Spacecraft Charging Technology Conference* Albuquerque, NM, Sep 20–24, 2010
 [13] Li H W, Huang J G, Han J W, Cai M H, Li X Y, Gao Z X 2010 *Spacecraft Environment Engineering* **27** 3 (in Chinese) [李宏伟, 黄建国, 韩建伟, 蔡明辉, 李小银, 高著秀 2010 航天器环境工程 **27** 3]
 [14] Close S, Kelley M C, Fletcher A, Lee N, Colestock P 2011, 3rd *AIAA Atmospheric Space Environments Conference*, Honolulu, USA, June 27–30, 2011
 [15] Crawford D, Schultz P 1999 *Int. J. Impact Eng.* **23** 1
 [16] Han J W, Zhang Z L, Huang J G 2006 *Spacecraft Environment Engineering* **23** 4 (in Chinese) [韩建伟, 张振龙, 黄建国 2006 航天器环境工程 **23** 4]

Study on plasma characteristics from hypervelocity impacts by small space debris*

Cai Ming-Hui^{1)2)†} Wu Feng-Shi¹⁾ Li Hong-Wei¹⁾ Han Jian-Wei¹⁾

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

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

(Received 28 August 2013; revised manuscript received 9 October 2013)

Abstract

Dense plasma cloud can be produced by small debris impact on spacecraft surface, with the diffusion of plasma which can induce the electrostatic discharge (ESD) and electromagnetic interference (EMI). By this way, spacecraft will experience electrical anomalies. In this paper, a plasma drag particle accelerator is used to study the characteristics of impact-generated plasma due to crash of small debris with mass 10^{-5} g. The relation between plasma charge and debris velocity is acquired by analyzing experimental data. In addition, the diffusion velocity of the impact-generated plasma is observed by two retarding potential analyzers. By theoretical analysis, the change law of the electron density with time and dimension is calculated. Experiment results will be helpful to reveal the physical mechanism of spacecraft anomalies by small debris impacts.

Keywords: space debris, hypervelocity impacts, plasma

PACS: 94.20.Fg, 96.25.Pq

DOI: [10.7498/aps.63.019401](https://doi.org/10.7498/aps.63.019401)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41174163).

† Corresponding author. E-mail: caiminghui@nssc.ac.cn