## 等离子体环境非偏置固体表面带电研究\*

曹鹤飞1)2) 刘尚合1)节 孙永卫1) 原青云1)

1)(军械工程学院静电与电磁防护研究所,石家庄 050003)

2)(石家庄学院物理系,石家庄 050035)

(2012年12月3日收到;2013年1月8日收到修改稿)

航天器与等离子体环境中的电子、离子相互作用,表面将出现充放电效应,对航天器产生负面影响.表面充电 电位对充放电影响至关重要.综合考虑等离子体中粒子质量、温度及密度,二次电子效应及非偏置固体的运动速度 等因素,基于气体动理论,利用粒子的麦克斯韦速度分布函数理论推导得出等离子体环境中非偏置固体表面充电电 位一般表达式.分析了等离子体以及非偏置固体特殊状态下的表达式及一般状态下的表达式,总结出不同等离子环 境、不同运动状态下的表面充电规律.

关键词: 等离子体, 非偏置固体, 表面充电 PACS: 94.05.Jq, 51.10.+y

## 1 引 言

宇宙中超过 99%的物质都是等离子体.太阳和 恒星是几乎全部电离的热等离子体,星际空间由于 恒星辐射作用也是电离的,宇宙空间充满了等离子 体[1]. 地球周围大多数的轨道环境都处于等离子体 状态, 航天器与等离子体相互作用, 可能导致航天 器充电. 特别是当发生磁暴情况时会对等离子产生 扰动,可能会使等离子体具有极高的能量,这样会 使航天器具有很高的电位<sup>[2]</sup>.由于航天器表面材料 导电性能的差异,二次电子系数不同,以及光电效 应等因素影响,不同部位、不同材料具有不同的电 位. 当电位差达到材料击穿电压阈值时,将发生电 弧放电,可能会对电源、微电子器件、敏感器件造 成损毁;放电产生的电磁辐射会干扰航天器上各种 电器设备的正常工作,可能会使通信系统在没有地 面指令情况下自动改变,逻辑系统出现故障;光学 传感器出现噪声;天线指向系统失灵,造成天线指 向错误;消旋机构失灵,卫星自动旋转;材料表面放 电可能会使材料性能下降等. 电弧放电可能产生直 接或潜在的灾难性后果,所以表面带电效应理所当

© 2013 中国物理学会 Chinese Physical Society

### **DOI:** 10.7498/aps.62.119401

然受到各方面的关注 [3-10].

非偏置固体在等离子体环境中经过一段时间 后表面电位达到一个动态平衡.此时的电子流和离 子流代数和为零. 对表面电位的计算可以采用等效 电路的方法求解 [11-14], 该方法计算量较小, 处理问 题较为直观,但是计算精度有待提高.另外一种方 法是基于气体动理论,利用粒子的麦克斯韦速度分 布函数对表面电位进行求解.所谓气体动理论是从 物质的微观结构出发,以理想气体为对象,对每个 粒子运用力学原理的基础上,运用统计方法,而建 立的大量粒子热运动所遵循的统计规律. 该方法能 够较为精确地计算出固体表面电位. 本文以该方法 推导出处于等离子体环境下运动的非偏置固体表 面充电点位表达式,对不同空间环境及非偏置固体 不同运动情况进行了讨论,并以地球轨道为例进行 计算,理论结果与实际测量数据一致,验证了模型 的准确性和可行性.

2 等离子体环境非偏置固体表面充电 理论

等离子体一般由电子、离子及中性粒子组成,

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金 (批准号: 51177173) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: liushh@cae.cn

三者的密度分别以  $n_e$ ,  $n_i$  和  $n_0$  表示. 通常情况下为 一价等离子体,并且含有同一种类的中性粒子,此 时有  $n_e = n_i$ ,整体呈现出电中性. 粒子之间由于带 有电荷因此具有电场力的相互作用,对于处于平衡 态的理想等离子体而言,其自身热运动动能远远大 于电场势能,因此可以忽略其电势能. 等离子体中 电子的温度  $T_e$  和离子的温度  $T_i$  不一定相等,对于 低温等离子体  $T_e > T_i$ . 对于高温等离子体,电子和 离子具有近似相同的热力学温度  $T_e \approx T_i$ . 离子质量 远远大于电子质量,处于平衡态的等离子体电子的 速度远远大于离子的速度  $v_e \gg v_i$ .

无光电效应发生情况下,非偏置固体置于等离 子体中,由于粒子的随机热运动及固体与等离子体 的相对运动,固体表面将产生粒子聚集.电子平均 速度远大于离子平均速度,因此到达非偏置固体表 面的电子数目将大于离子数目,表面形成大量电子 聚集,产生负场强.随着负场强的增加将对电子向 表面聚集形成阻碍作用,而对离子向表面聚集形成 促进作用,从而使流向非偏置固体表面的电子流密 度逐渐减小,离子流密度逐渐增加.同时由于二次 电子效应及背散射效应,表面将有一定量电子数目 减少.当到达表面的电子流与离子流相等时,表面 电位将达到一个稳定值,保持不变.

设处于等离子环境的非偏置固体表面电位达 到稳定后为 U. 建立如图 1 所示坐标系, 非偏置固 体相对于环境的速度为 v<sub>s</sub> 沿 x 轴正方向.



图1 建立直角坐标系

设电子的速度为 v<sub>e</sub>, 在 x 轴上的分量为 v<sub>ex</sub>. 当 非偏置固体达到稳定的负电位 U 后, 并非所有的电 子都可以到达固体表面, 只有面向固体表面运动即 沿 x 轴负向运动且能量大到足够克服负电位所产 生的势能的电子, 才能够到达固体表面. 因此电子 的最小动能为

$$-Ue = \frac{1}{2}m_{\rm e}(v_{\rm e0} + v_{\rm s})^2, \qquad (1)$$

得到

$$|v_{e0}| = \sqrt{\frac{-2eU}{m_{e}}} - v_{s},$$
 (2)

只有当电子的速度

$$|v_{\rm ex}| \ge \sqrt{\frac{-2eU}{m_{\rm e}}} - v_{\rm s} \tag{3}$$

时,电子才能够到达固体表面.由于离子受到固体 表面电位的吸引作用,所以任何速率的离子均可到 达固体表面.

非偏置固体达到电位稳定后,表面的电子流与 离子流密度相等时,表面电位将达到一个稳定值, 保持不变.即

$$\Gamma_{\rm e} = \Gamma_{\rm i} + \Gamma_{\rm se}, \qquad (4)$$

其中 $\Gamma_e$ 为电子流密度, $\Gamma_i$ 为离子流密度, $\Gamma_{se}$ 为二次 电子流密度.

单位时间内到达非偏置固体表面单位面积上, 速度在 dvex 区间的电子数为

$$\mathrm{d}\Gamma_{\mathrm{e}} = n_{\mathrm{e}} f(v_{\mathrm{ex}}) v_{\mathrm{ex}} \mathrm{d}v_{\mathrm{ex}}, \tag{5}$$

其中电子沿 x 方向的速度分量 vex 的麦克斯韦速度 分布函数为

$$f(v_{\rm ex}) = \sqrt{\frac{m_{\rm e}}{2\pi k T_{\rm e}}} \exp\left(-\frac{m v_{\rm ex}^2}{2k T_{\rm e}}\right),\tag{6}$$

则单位时间内到达非偏置固体表面单位面积上的电子总数为

$$\begin{split} \Gamma_{\rm e} &= \int \mathrm{d}\Gamma_{\rm e} \\ &= \int_{|v_{\rm e0}|}^{\infty} n_{\rm e} \sqrt{\frac{m_{\rm e}}{2\pi k T_{\rm e}}} \exp\left(-\frac{m_{\rm e} v_{\rm ex}^2}{2k T_{\rm e}}\right) v_{\rm ex} \, \mathrm{d}v_{\rm ex} \\ &= -n_{\rm e} \sqrt{\frac{k T_{\rm e}}{2\pi m_{\rm e}}} \exp\left(-\frac{m_{\rm e} v_{\rm ex}^2}{2k T_{\rm e}}\right)\Big|_{|v_{\rm e0}|}^{\infty} \\ &= n_{\rm e} \sqrt{\frac{k T_{\rm e}}{2\pi m_{\rm e}}} \exp\left(-\frac{m_{\rm e} v_{\rm e0}^2}{2k T_{\rm e}}\right). \end{split}$$
(7)

把(2)式代入(7)式得

$$\Gamma_{\rm e} = n_{\rm e} \sqrt{\frac{kT_{\rm e}}{2\pi m_{\rm e}}} \exp\left[\frac{m_{\rm e}}{2kT_{\rm e}} \left(\sqrt{\frac{-2eU}{m_{\rm e}}} - v_{\rm s}\right)^2\right].$$
 (8)

又电子的平均热运动速率  $\bar{v}_e = \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}}$ ,得

$$\Gamma_{\rm e} = \frac{1}{4} n_{\rm e} \bar{v}_{\rm e} \exp\left[-\frac{m_{\rm e}}{2kT_{\rm e}} \left(\sqrt{\frac{-2eU}{m_{\rm e}}} - v_{\rm s}\right)^2\right].$$
(9)  
同理,对于离子有

$$\mathrm{d}\Gamma_{\mathrm{i}} = n_{\mathrm{i}} f(v_{\mathrm{i}x}) v_{\mathrm{i}x} \mathrm{d}v_{\mathrm{i}x}, \qquad (10)$$

其中

$$f(v_{ix}) = \sqrt{\frac{m_i}{2\pi kT_i}} \exp\left(-\frac{mv_{ix}^2}{2kT_i}\right), \qquad (11)$$

则

$$\begin{split} \Gamma_{i} &= \int d\Gamma_{i} \\ &= \int_{0}^{\infty} n_{i} \sqrt{\frac{m_{i}}{2\pi kT_{i}}} \exp\left(-\frac{m_{i}v_{ix}^{2}}{2kT_{i}}\right) v_{ix} dv_{ix} \\ &= -n_{i} \sqrt{\frac{kT_{i}}{2\pi m_{i}}} \exp\left(-\frac{m_{i}v_{ix}^{2}}{2kT_{i}}\right) \Big|_{0}^{\infty} \\ &= n_{i} \sqrt{\frac{kT_{i}}{2\pi m_{i}}}. \end{split}$$
(12)

又离子的平均热运动速率 
$$\vec{v}_i = \sqrt{\frac{8kT_i}{\pi m_i}}$$
,得  
 $\Gamma_i = \frac{1}{4}n_i \bar{v}_i.$  (13)

设孤立导体表面材料由电子引起的二次电子 系数为  $\delta_{e}$ ,由离子引起的二次电子系数为  $\delta_{i}$ ,则二 次电子流密度

$$\Gamma_{\rm se} = \delta_{\rm e} \Gamma_{\rm e} + \delta_{\rm i} \Gamma_{\rm i}. \tag{14}$$

把(9),(13),(14)式代入(4)式,整理后得

$$U = -\frac{m_{\rm e}}{2e} \left[ \left( -\frac{2kT_{\rm e}}{m_{\rm e}} \ln \frac{n_{\rm i}(1+\delta_{\rm i})\sqrt{m_{\rm e}T_{\rm i}/m_{\rm i}T_{\rm e}}}{(1-\delta_{\rm e})n_{\rm e}} \right)^{1/2} + v_{\rm s} \right]^2.$$
(15)

3 讨论

当等离子体温度较低时二次电子系数  $\delta_e \approx \delta_i \approx 0, T_e \approx T_i$ ,电子密度与离子密度相等  $n_e \approx n_i$ ,非 偏置固体相对于空间环境静止,即  $v_s = 0$ .则由(15) 式得

$$U = -\frac{kT_{\rm e}}{e} \ln \sqrt{\frac{m_{\rm i}}{m_{\rm e}}},\tag{16}$$

此时  $U \propto T_{\rm e}$ . 若  $v_{\rm s} \neq 0$ , 则

$$U = -\frac{m_{\rm e}}{2e} \left[ \left( -\frac{2kT_{\rm e}}{m_{\rm e}} \ln \sqrt{\frac{m_{\rm e}}{m_{\rm i}}} \right)^{1/2} + v_{\rm s} \right]^2.$$
(17)

地球低轨道环境,在太阳平静期内,等离子体 温度在 0.1 eV—1.0 eV 之间变化.由(17)式得表面 充电电位 U 与非偏置固体速率 vs 的关系,如图 2 所示.

从图 2 中可以看出在太阳平静期内,非偏置固体表面仅仅能够带上较低的负电位.电子温度越高

表面负电位也就越高,在相同的电子温度下,表面 负电位随着固体运动速度的增加而呈现增加趋势.



图 2 表面电位与非偏置固体运动速率关系(电子温度较低)

以地球低轨道等离子环境参数为例进行航 天器表面充电计算,其高度为 350 km,轨道速度  $v_{\rm s} = 7.5 \times 10^3$  m/s,离子为氧离子

 $m_{\rm i} = 2.657 \times 10^{-26} \, {\rm kg}, \quad n_{\rm i}/n_{\rm e} \approx 1, \quad T_{\rm i}/T_{\rm e} \approx 1,$ 

电子温度 T<sub>e</sub> 变化范围 (7.04×10<sup>-2</sup>—2.34×10<sup>-1</sup>)<sup>[13]</sup>,由 (15) 式得到地球低轨道非偏置固体 表面电位与电子温度关系,如图 3 所示.



图 3 地球低轨道非偏置固体表面电位与电子温度关系

当非偏置固体速率保持不变的情况下,表面充 电负电位随着电子温度的增加而增加,几乎为线性 关系,但总体电压水平较低.

当等离子体的温度较高时,粒子具有较高的能量.太阳剧烈活动时太阳风会带来大量高能等离子体,能量范围为1—20 keV,此时将不能忽略二次电子效应.不同材料特性、不同表面电位及不同入射

粒子能量等因素影响造成二次电子系数复杂变化. 为简化计算设二次电子系数为固定值,如 SiC 材料  $\delta_e = 0.83^{[15]} \pm \delta_e \approx \delta_i$ ,由 (15)式得表面充电电位 U与非偏置固体速率  $v_s$ 的关系,如图 4 所示.



图 4 表面电位与非偏置固体运动速率关系(电子温度较高)

从图 4 中可以看出电子温度越高表面负电位 也就越高,表面电位达到上千伏,在极端条件下甚 至能够达到上万伏.此时非偏置固体的运动速度对 表面电位的影响相对较小,电位基本呈现直线状态. 当电子的温度达到 14 keV 极端条件时,表面充电

- Huang B C, Tong J Y 2010 Space Environment Enginering (Beijing: Chinese Science and Technology Press) p445 (in Chinese) [黄本诚, 童靖宇 2010 空间环境工程学 (北京:中国科学技术出版社) 第 445页]
- [2] Zhong J, Jiao W X, Zong Q G, Zhang J C, Michelle F. Thomsen, Tian T 2009 Spacecraft Environment Engineering 26 4 (in Chinese) [钟俊, 焦维新, 宗秋刚, 张继春, Michelle F. Thomsen, 田天 2009 航天器环 境工程 26 4]
- [3] Lai S L 1998 AIAA 36th Aerospace Sciences Meeting Reno, NV, January 12–15, 1998 p98–1042
- [4] Katz I, Davis V A, Snyder D B 1998 AIAA 36th Aerospace Sciences Meeting Reno, NV, January 12–15, 1998 p98–1002
- [5] Tajmar M 2002 Journal of Spacecraft and Rockets 36 6
- [6] Kim H J, Lee J J, Rhee J G, Lee E S, Min K W, Sung D K 2003 Journal of Spacecraft and Rockets 40 6
- [7] Lai S T 2003 IEEE Transactions on Plasma Science 31 6
- [8] Jin Z, Zhang J 2001 Acta Phys. Sin. 50 2 (in Chinese) [金展, 张杰 2001 物理学报 50 2]
- [9] Tong J Y, Sun L C, Jia R J, Liu Y N 2008 Chinese Journal of Vacuum Science and Technology 28 3 (in Chinese) [童靖宇, 孙立臣, 贾瑞金,

电位为1.9334×10<sup>4</sup> V. 与高轨带电试验 ATS-6 卫星 飞行试验探测结果一致<sup>[16]</sup>.此时的光照面由于光 电流的影响,表面将充到相对较低的电位,造成航 天器不同部位表面较大的电势差.当该电势差达到 放电阈值时,将发生不同表面间放电以及航天器表 面向空间等离子体放电.

#### 4 结 论

基于气体动理论,利用粒子的麦克斯韦速度分 布函数对非偏置固体表面电位进行求解,得到了具 有一般意义的等离子体环境下非偏置固体表面充 电电位表达式.经过讨论发现当非偏置固体静止不 动,电子离子浓度及温度均相等的理想情况下,其 表面充电电位与等离子体温度呈现正比例线性关 系.在等离子体环境下,表面充电电位随着运动速 度的增加而增加,当等离子体的温度较低时,表面 电位受运动速度的影响较大. 当等离子体的温度较 高时,表面电位受运动速度的影响较小.地球同步 轨道等离子体环境电子温度相对较高,表面电位与 电子温度几乎为线性关系,电位随着温度的增加而 增加. 在极端电子温度下非偏置固体表面充电将达 到上万伏.在实际应用过程中表面材料的二次电子 系数与空间环境参数、表面电位等因素有关,这将 是下一步需要考虑的问题.

刘业楠 2008 真空科学与技术学报 28 3]

- [10] Cai M H, Han J W, Li X Y, Li H W, Zhang Z L 2009 Acta Phys. Sin. 58 9 (in Chinese) [蔡明辉, 韩建伟, 李小银, 李宏伟, 张振力 2009 物 理学报 58 9]
- [11] Gong B, Gu S F, Huang W G 2001 Chinese Journal of Space Science 21 1 (in Chinese) [龚斌, 古士芬, 黄文耿 2001 空间科学学报 21 1]
- [12] Jiang C H, Zhao Z Y 2008 Spacecraft Environment Engineering 25 2 (in Chinese) [姜春华, 赵正予 2008 航天器环境工程 25 2]
- [13] Yang F, Shi L Q, Liu S Q, Gong J C 2011 Chin. J. Sace Sci. 31 4 (in Chinese) [杨昉, 师立勤, 刘四清, 龚建村 2011 空间科学学报 31 4]
- [14] Tian L C, Shi H, Li J, Zhang T P 2012 Spacecraft Environment Engineering 29 2 (in Chinese) [田立成, 石红, 李娟, 张天平 2012 航天器 环境工程 29 2]
- [15] Tian L C, Shi H, Li J, Zhang T P 2012 Journal of Solid Rocket Technology 35 2 (in Chinese) [田立成, 石红, 李娟, 张天平 2012 固体火 箭技术 35 2]
- [16] Bartlett R O, De Forest S E, Goldstein R 1975 AIAA 11th Elecric Propulsion Conference New Orleans, La, March 19–21, 1975 p75– 0359

# Unbiased solid surface charging research in plasma environment\*

Cao He-Fei<sup>1)2)</sup> Liu Shang-He<sup>1)†</sup> Sun Yong-Wei<sup>1)</sup> Yuan Qing-Yun<sup>1)</sup>

1) (Electrostatic & Electromagnetic Protection Institute, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

2) (Department of physics, Shijiazhuang College, Shijiazhuang 050035, China)

(Received 3 December 2012; revised manuscript received 8 January 2013)

#### Abstract

Within the plasma environment of spacecraft, the interaction between electrons and ions may cause surface charging and discharging and may degrade the performance of spacecraft. The charging potential is a key factor for discharging process. By considering the comprehensive effects of particle mass, temperature, density of plasma, secondary electrons and the velocity of unbiased solid, a general equation of surface charging potential of unbiased solid has been derived using Maxwell velocity distribution function. The expressions under some special and general conditions have been also analyzed. The surface charging and discharging properties are summarized under different plasma environment and motion states of unbiased solid.

Keywords: plasma, unbiased solid, surface charging

**PACS:** 94.05.Jq, 51.10.+y

DOI: 10.7498/aps.62.119401

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51177173).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: liushh@cae.cn