

月表尘埃颗粒带电的机理及应用研究

薛丹 刘金远 李书翰

Charging mechanism and application of lunar dust grains

Xue Dan Liu Jin-Yuan Li Shu-Han

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 135201 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180047

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180047>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I13>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[非均匀磁场尘埃等离子体中颗粒的复杂运动](#)

Complex motions of grains in dusty plasma with nonuniform magnetic field

物理学报.2015, 64(19): 195202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.195202>

[双麦克斯韦分布尘埃等离子体中尘埃粒子的充电研究](#)

Theoretical study on charging equation of dust plasmas in double Maxwellian distribution

物理学报.2014, 63(21): 215201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.215201>

[两种带电尘埃颗粒的等离子体鞘层玻姆判据](#)

The Bohm criterion for a plasma sheath with two species of charged dust particles

物理学报.2013, 62(17): 175201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.175201>

[修正屏蔽库仑势下二维尘埃等离子体的动力学和结构特性](#)

Dynamical and structural properties of two-dimensional dusty plasma with modified screened coulomb potential

物理学报.2013, 62(9): 095201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.095201>

[等离子体鞘层附近尘埃颗粒特性的数值模拟](#)

Simulation of interaction between dust particles and plasma sheath and its distribution

物理学报.2012, 61(7): 075205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.075205>

月表尘埃颗粒带电的机理及应用研究*

薛丹 刘金远 李书翰†

(大连理工大学物理学院, 大连 116024)

(2018年1月7日收到; 2018年4月20日收到修改稿)

研究月尘颗粒在电子束环境下以及紫外源辐照下的带电机理, 利用数值方法模拟月尘颗粒在不同背景环境下的充电过程, 以探索月表尘埃颗粒的带电机理, 进而便于地面月尘环境模拟装置选择合适的月尘带电方式进行空间模拟实验. 给出了尘埃在电子束环境下的充电方程, 并将紫外辐射带电与具体应用相结合. 通过模拟结果可知, 在电子束环境下, 月尘表面的电荷数随粒径尺寸增大, 随电子枪辐照束斑半径减少, 随电子枪流强的增加而增多; 在紫外源的辐照下, 月尘表面电荷数随颗粒尺寸的增大以及紫外线辐照度的增加而增多. 由月尘颗粒受太阳紫外辐照带电的数值模拟结果可知, 月尘需要在太阳长时间的辐照下才可以带上可观的电荷数, 地面模拟该过程需增加辐照源来加速实验. 通过模拟结果的分析比较并结合“空间环境模拟装置”中对月尘舱的设计要求, 最终优选紫外源辐照带电方式作为月尘颗粒的带电方案.

关键词: 月尘, 带电机理, 充电过程, 空间环境模拟装置

PACS: 52.27.Lw, 78.20.Bh

DOI: 10.7498/aps.67.20180047

1 引言

尘埃颗粒广泛存在于宇宙空间、地球大气层、工业生产和实验室中, 尘埃颗粒带电的研究涉及到空间等离子体物理、等离子体工业应用、磁约束聚变装置等多个方面^[1-4].

本文基于尘埃颗粒带电机理, 研究了月表尘埃颗粒的充电过程, 旨在全面的认识月尘的性质, 有效地规避月尘对人类探月活动的危害. 月球表面经过空间风化, 主要有陨石和微陨石撞击、太阳风和高能宇宙射线、以及昼夜温差的巨大变化等作用, 将岩石逐渐粉化, 形成表面月壤. 月壤中粒径小于1 mm的颗粒被称为月尘, 因此, 月尘主要来源于月球表面风化碎屑物. 在1969—1972年间, 美国完成了6次Apollo载人探月任务(包含Apollo 11, 12, 14, 15, 16, 17)^[5-10]. 通过Apollo登月计划所获得的结果和经验, 美国航空航天局(NASA)指出: 如果人类想要重返月球进行探测活动, 那么, 月尘问

题是急待解决的问题^[11].

因为对月尘颗粒研究的侧重点不同, 按照粒径尺寸可分成1 mm和20 μm 月尘颗粒. 将Apollo登月计划采集到的月壤样品筛选和分类至月尘级别, 得到粒径小于1 mm的月尘颗粒, 其平均粒径在70 μm 左右. 在粒径小于20 μm 的月尘颗粒中, 约有90%的颗粒粒径小于2 μm , 中间值在0.1—0.4 μm 之间. 在月球表面, 月尘粒径分布略有不同, 一般情况下, 高地月尘颗粒较粗, 月海月尘颗粒较细^[12-14].

月尘是细粒月壤, 主要由胶结质玻璃、斜长石、辉石、钛铁矿、橄榄石等组成, 包含氧、硅、铝、镁、铁、钙、钠和少量其他元素^[15]. 月尘颗粒具有粒径细小、容易悬浮、形态复杂、硬度较高、附着性强、带有电荷等特点. 由于月尘长期受太阳风等离子体的轰击, 颗粒表面活化, 具有较强的黏附性, 并且太阳风的作用也可使月尘颗粒带上电荷. 月尘受太阳紫外辐射的照射会产生光电子发射现象, 导致月尘颗粒带正电荷, 同时也可增加月尘颗粒的黏附

* 国家自然科学基金(批准号: 11375039, 11275034)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lishuhan@mail.dlut.edu.cn

性. 月球环境的压力和温度可以改变月尘和航天设备表面的化学活性, 会增加月尘在设备表面的附着能力.

针对月尘带电的机理一直处于研究阶段. 1975年, Freeman和Ibrahim^[16]研究表明: 月表阳面受太阳紫外辐照形成正电势, 月表阴面受太阳风等离子体作用形成负电势, 从而使月球明暗界线附近区域产生强大的电场. 在电场力的作用下, 带电的月尘颗粒离开月球表面漂浮在空中. Wallis和Hassan^[17]以及Havnes等^[18]认为月尘的充电机理与尘埃颗粒的充电机理相似, Havnes等计算出了球形月尘颗粒接收光电子而形成的电流表达式. 2001年, Sternovsky等^[19]测量了导体月尘颗粒和绝缘体月尘颗粒受真空紫外辐照时的充电特性. 2005年, Colwell等^[20]计算出了球形月尘颗粒由光电发射产生的电流公式和接受太阳风电子而形成的电流公式, 研讨了月尘颗粒在光电子鞘层中运动的规律. 2010年, Abbas等^[21]研究了月尘颗粒由于二次电子发射而带正电的情况, 研究表明, 月尘颗粒的大小和表面电势以及入射电子的能量等参数对月尘带电有影响. 为进一步加强对于月尘的研究, 哈尔滨工业大学的大科学工程“空间环境模拟装置”中设计的月尘舱, 其关键组成部分就是月尘带电系统. 该系统主要由电子加速器、紫外灯阵和测控系统组成, 可以实现月表真空、高低温环境下, 亚微米和微米量级的月尘颗粒在电子辐照源和紫外辐照源辐照作用下的带电过程.

在以上理论研究的基础上, 本文首次给出了尘埃在电子束环境下的充电方程, 并结合月尘舱的设计参数, 利用数值方法分别模拟了尘埃颗粒在电子束环境下、紫外源辐照下的充电过程, 对比讨论了尘埃颗粒的尺寸大小以及不同充电环境参数对充电过程的影响, 结合尘埃颗粒的带电机理, 来研究月尘颗粒的带电情况, 以选择最适合在月尘舱中使用的模拟月表环境的月尘带电方式, 开展空间尘埃物理的理论研究.

2 尘埃颗粒带电的机理

为了方便研究尘埃颗粒在不同环境中带电的机理, 首先约定统一的物理量单位, 并计算尘埃颗粒的特征参量. 尘埃颗粒的半径是 r_d , 单位为微米(μm), 尘埃颗粒的密度是 ρ_d , 单位为克每立方厘米

米($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$). 尘埃颗粒的质量 m_d 为:

$$m_d = \frac{4}{3}\pi r_d^3 \rho_d = 4.19 \times 10^{-12} r_d^3 \rho_d, \quad (1)$$

其中, 尘埃质量的单位为克(g). 尘埃表面电势 ϕ_d 为

$$\phi_d = \frac{q_d}{r_d}, \quad (2)$$

式中, q_d 为尘埃电荷. 将电势无量纲化:

$$\Phi_d = \frac{e\phi_d}{T_e} = \frac{q_d}{ze}, \quad (3)$$

式中, e 为元电荷电荷量 1.6×10^{-19} 库仑(C); T_e 为电子温度, 单位为电子伏(eV); z 是无量纲参数, $z = r_d T_e / e^2 = 695 r_d T_e$. 尘埃表面电荷数 Z_d 为

$$Z_d = |z\Phi_d|. \quad (4)$$

尘埃等离子体频率 ω_{pd} 为

$$\omega_{pd} = \left(\frac{4\pi q_d^2 n_d}{m_d} \right)^{1/2} = 0.578 T_e |\Phi_d| \left(\frac{n_d}{r_d \rho_d} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

式中, n_d 是尘埃颗粒数密度, 单位为每立方厘米(cm^{-3}); 尘埃等离子体频率的单位为弧度每秒(rad/s)^[22].

2.1 电子束带电

尘埃颗粒在低温等离子体中主要通过碰撞效应收集电子和离子而带电, 这种带电机理最为常见. 考虑沉浸在非磁化等离子体中的中性球形尘埃颗粒, 尘埃收集电荷形成的电流受尘埃表面势的影响, 当尘埃表面电势为负时, 尘埃颗粒排斥负电荷而吸引正电荷. 相反, 如果尘埃表面势为正, 则尘埃颗粒吸引负电荷而排斥正电荷. 利用研究尘埃颗粒充电过程最常见的轨道限制理论^[23], 计算由充电粒子形成的充电电流. 设密度为 n , 质量为 m , 电量为 q , 热速度为 v 的充电粒子具有局域平衡温度 T 和定向速度 v_0 , 其速度分布函数满足:

$$f(v) = \left(\frac{m}{2\pi T} \right)^{3/2} \exp \left[-\frac{m(v-v_0)^2}{2T} \right]. \quad (6)$$

充电粒子对尘埃颗粒的充电截面为

$$\sigma = \pi r_d^2 \left(1 - \frac{2qq_d}{r_d m v_0^2} \right), \quad \frac{qq_d}{r_d} < \frac{1}{2} m v_0^2. \quad (7)$$

充电电流可由 $I = nq \int v f(v) \sigma(v) dv$ 求得, 将(6)式和(7)式代入并积分, 可得充电电流的普适表达式:

$$I = nq\pi r_d^2 \bar{v} \left\{ \frac{1}{2} \exp \left[-\frac{m}{2T} (v_0^2 + v_{\min}^2) \right] \left[\frac{v_{\min}}{v_0} \sinh \left(\frac{mv_{\min}v_0}{T} \right) + \cosh \left(\frac{mv_{\min}v_0}{T} \right) \right] + \left(\frac{1}{2} + \frac{mv_0^2}{2T} - \frac{qq_d}{r_d T} \right) \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{\operatorname{erf} \left(\sqrt{\frac{m}{2T}} (v_0 + v_{\min}) \right) + \operatorname{erf} \left(\sqrt{\frac{m}{2T}} (v_0 - v_{\min}) \right)}{2\sqrt{\frac{m}{2T}} v_0} \right\}, \quad (8)$$

式中, $\bar{v} = (8T/\pi m)^{1/2}$ 是充电粒子的平均热速度, $\operatorname{erf}(x) = (2/\sqrt{\pi}) \int \exp(-t^2) dt$ 为误差函数. 对于吸引势, 取 $v_{\min} = 0$; 对于排斥势, 取 $v_{\min} = \sqrt{2qq_d/r_d m}$. 若充电粒子没有定向流动, 则取 $v_0 = 0$.

在此基础上考虑一个球形尘埃颗粒悬浮在电子束的环境下, 大量的电子在尘埃颗粒周围做轨道运动, 若一个电子碰撞到尘埃颗粒的表面, 就会使尘埃颗粒带上一个负电荷. 假设充电粒子具有定向运动速度, 其速度分布函数满足麦克斯韦分布, 尘埃颗粒在这种情况下带负电, 即 $q_d < 0$, 充电粒子电荷 $q = -e$, 因其受带电尘埃的排斥作用, 所以取 $v_{\min} = \sqrt{-2eq_d/r_d m_e}$, 定向运动速度 $v_0 = v_e$. 将以上条件代入充电电流的普适表达式 (8) 式, 得具有定向运动的电子充电电流 I_e 的表达式:

$$I_e = -n_e e \pi r_d^2 \bar{v}_e \left\{ \frac{1}{2} \exp(-\varsigma^2 + \Phi_d) \left[\frac{\sqrt{-\Phi_d}}{\varsigma} \sinh(2\varsigma\sqrt{-\Phi_d}) + \cosh(2\varsigma\sqrt{-\Phi_d}) \right] + \left(\frac{1}{2} + \varsigma^2 + \Phi_d \right) \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{\operatorname{erf}(\varsigma + \sqrt{-\Phi_d}) + \operatorname{erf}(\varsigma - \sqrt{-\Phi_d})}{2\varsigma} \right\}, \quad (9)$$

其中 $\varsigma = v_e \sqrt{m_e/2T_e}$. 因为尘埃颗粒的充电环境中只有电子没有离子, 所以尘埃的充电方程满足 $dq_d/dt = I_e$, 将 (9) 式代入, 并无量纲化, 得到电子束轰击尘埃颗粒的充电方程:

$$\frac{d\Phi_d}{dt} = -\frac{r_d}{\lambda_e} \sqrt{2\pi} \left\{ \frac{1}{2} \exp(-\varsigma^2 + \Phi_d) \left[\frac{\sqrt{-\Phi_d}}{\varsigma} \sinh(2\varsigma\sqrt{-\Phi_d}) + \cosh(2\varsigma\sqrt{-\Phi_d}) \right] + \left(\frac{1}{2} + \varsigma^2 + \Phi_d \right) \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{\operatorname{erf}(\varsigma + \sqrt{-\Phi_d}) + \operatorname{erf}(\varsigma - \sqrt{-\Phi_d})}{2\varsigma} \right\}, \quad (10)$$

式中 $\lambda_e = \sqrt{T_e/4\pi n_e e^2}$ 为电子德拜长度.

2.2 紫外辐照带电

当一组光子的能量大于尘埃颗粒的光电功函数时, 光子入射到尘埃表面, 尘埃颗粒会放出光电子而带正电. 这种带电机理取决于入射光子的波长、尘埃表面积以及颗粒属性. 各种金属的光电功函数通常满足 $W < 5$ eV, 例如 Ag ($W = 4.46$ eV), Cu ($W = 4.45$ eV), Al ($W = 4.2$ eV), Ca ($W = 3.2$ eV), Cs ($W = 1.8$ eV), 碳化物的功函数为 2.18—3.50 eV, 硼化物的功函数为 2.45—2.92 eV, 金属氧化物的功函数范围是从 $W = 1—4$ eV [24]. 考虑尘埃颗粒由于紫外辐射引起光电子发射而带正电的情况, 对于单向光子流, 光电子发射电流为

$$I_{ph} = e\pi r_d^2 Q_{ab} Y_p J_p \exp \left(-\frac{e\Phi_d}{T_{pe}} \right), \quad (11)$$

式中, Q_{ab} 是光子的吸收效率, Y_p 是光电子产额, J_p 是光子通量, 而 T_{pe} 是光电子的平均能量. 其中, 当

$2\pi r_d/\lambda > 1$ 时, $Q_{ab} \sim 1$, λ 为入射光子的波长. 因为考虑到了光电子应有足够的能量克服带正电的尘埃颗粒的势垒, 所以 (11) 式中含有指数因子. 紫外辐照对尘埃颗粒的充电方程为

$$\frac{d\Phi_d}{dt} = e^2 \pi r_d Q_{ab} Y_p J_p \frac{1}{T_{pe}} \exp(-\Phi_d), \quad (12)$$

其中, 无量纲表面势为 $\Phi_d = e\phi_d/T_{pe}$.

3 尘埃颗粒的充电过程

实验装置中的月尘粒子基本是人为产生, 颗粒大小基本一致, 产生后将其散播到实验装置中. 在电子束辐照或紫外源辐照的情况下, 考虑尘埃颗粒稀疏, 可以近似采用单粒子的带电模型, 并忽略月尘之间的相互作用. 根据第2节, 分别对月尘颗粒在电子辐照源和紫外辐照源辐照作用下的尘埃颗粒充电方程编写了计算机数值求解程序, 利用四阶龙格-库塔法求解微分方程, 并对各种情况下影响

充电过程的主要参数做了具体分析, 以选择适合模拟月表尘埃环境的月尘带电方式.

3.1 电子源辐照下的充电过程

首先模拟月尘受到电子源辐照的充电过程, 根据“空间环境地面模拟装置”中对月尘舱的设计要求, 这里使用电子枪作为电子辐照源, 讨论月尘的颗粒大小、电子枪流强以及辐照的束斑半径对月尘表面电荷数和充电弛豫时间的影响.

当电子枪的辐照束斑半径为 5 mm, 到达月尘颗粒处的流强为 5 mA (下文中流强均指月尘颗粒处的电子流强), 辐照月尘的时间为 0.2 s 时, 月尘颗粒大小对其表面电荷数的影响如图 1 所示. 由于电子源辐照环境下月尘颗粒表面电荷受月尘粒径大小影响很大, 所以模拟结果采用了对数坐标系. 由模拟结果可知, 当月尘被电子源辐照 0.2 s 时, 月尘充电过程接近饱和. 然而与等离子体环境下的尘埃充电过程本质不同的一点是: 由于在纯电子环境下月尘颗粒表面没有离子电流来平衡电子电流, 因此充电过程不会达到尘埃表面电荷不再随时间增长的饱和阶段, 所以图 1 曲线在尾部依然存在小幅增长. 粒径为 0.1 μm 的月尘颗粒表面电荷数的数量级为 10^2 , 粒径为 1 μm 的月尘颗粒表面电荷数的数量级为 10^3 , 粒径为 10 μm 的月尘颗粒表面电荷数的数量级为 10^4 , 这说明月尘颗粒半径越大, 表面电荷数越多. 并且从图 1 中还可以看出月尘的充电速度也随粒径尺寸的变大而加快.

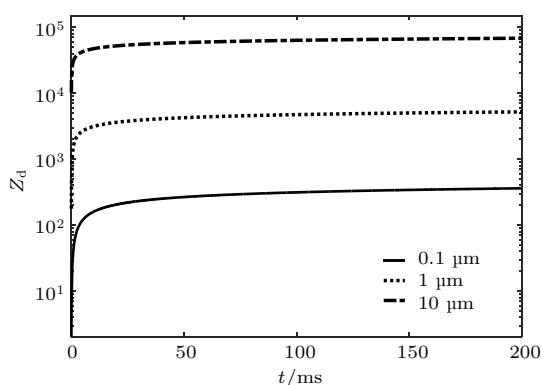


图 1 月尘在电子辐照源下带电, 电子枪辐照束斑半径为 5 mm、流强为 5 mA 时, 粒径分别为 0.1, 1 和 10 μm 的月尘颗粒表面电荷数与充电时间的关系曲线 (y 轴为对数坐标)

Fig. 1. The relationships between the surface charge number of lunar dusts with particle radius of 0.1, 1 and 10 μm respectively and the charging time, using an electron gun with 5 mm of beam spot radius and 5 mA of current intensity (logarithm coordinate for y axis).

当电子枪的辐照束斑半径为 5 mm、月尘颗粒半径为 1 μm 、电子枪辐照的流强分别为 5, 30 和 60 mA 时, 数值模拟月尘颗粒受电子源辐照 0.2 s 的充电过程, 结果如图 2 所示. 可以看出, 月尘颗粒在 高能电子枪的情况下所带的电荷数更多. 因此得到结论: 增加电子枪的流强, 月尘颗粒表面所带的电荷数就增多, 相应的, 月尘充电速度也随之提升.

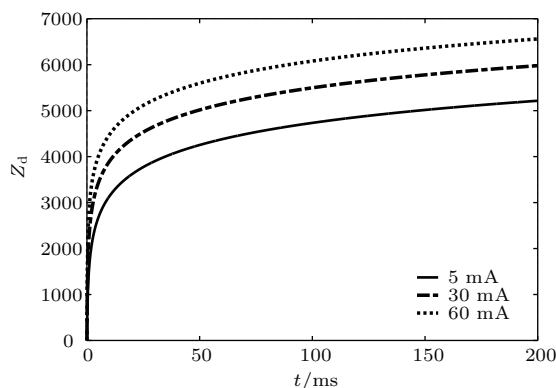


图 2 月尘在电子辐照源下带电, 电子枪辐照束斑半径为 5 mm、月尘颗粒半径为 1 μm 、流强分别为 5, 30 和 60 mA 时月尘颗粒表面电荷数与充电时间的关系曲线

Fig. 2. The relationships between the surface charge number of the lunar dust with the particle radius of 1 μm and the charging time, using electron guns with 5 mm of beam spot radius, 5, 30 and 60 mA of current intensity, respectively.

通过提高电子枪的流强来提高月尘表面所带电荷数本质上是提高了月尘所处电子环境中的电子密度. 所以想要使月尘带电量在一定的辐照时间内增多, 除了使用高能电子枪, 还可以缩小电子枪辐照束斑的半径. 对于粒径大小为 1 μm 的月尘颗粒, 电子枪辐照的流强为 5 mA、电子枪辐照束斑的半径分别为 1, 3 和 5 mm 时, 月尘颗粒受电子源辐照 0.2 s 内的充电情况如图 3 所示. 可见缩小辐照束斑半径, 月尘颗粒表面电荷数和充电速度大大增加.

由以上的数值模拟结果可以看出, 月尘在电子源辐照下的带电情况较好. 月尘颗粒表面电荷数随颗粒尺寸的增大而增加. 缩小电子枪的辐照束斑半径以及增加电子枪的流强, 都会提高月尘所处电子环境的电子密度, 进而提高月尘表面电荷数和月尘充电过程的速度.

然而, 这里考虑月尘颗粒在电子源辐照作用下带电的模型主要是收集电子, 忽略了二次电子发射、背散射、透射等其他物理作用. 由于实际实验操作中, 月尘颗粒受高能电子束辐照会激发二次电子

导致表面电荷逃逸;同时,电子枪束斑半径较小,难以使较多的月尘颗粒全部带电,并且散射和透射过程也都会造成很多电子枪能量的损失和浪费.

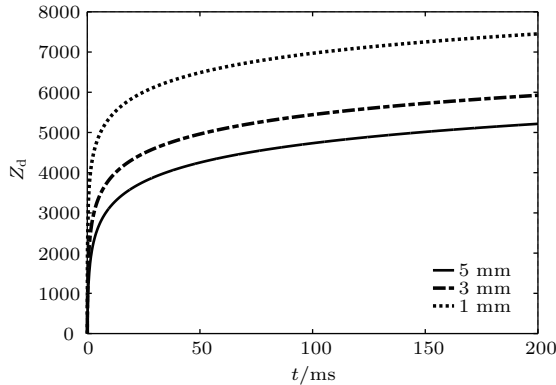


图3 月尘在电子辐照源下带电,电子枪辐照束斑半径分别为1, 3和5 mm、流强为5 mA时,粒径为1 μm的月尘颗粒表面电荷数与充电时间的关系曲线

Fig. 3. The relationship between the surface charge number of the lunar dust with the particle radius of 1 μm and the charging time, using electron guns with 1, 3 and 5 mm of beam spot radius, 5 mA of current intensity.

3.2 紫外源辐照下的充电过程

数值模拟月尘在紫外源辐照下的充电过程,根据月尘舱的设计要求,使用滨松L1835氙灯作为辐照源,已知氙灯的波长为160 nm,单只氙灯的辐照度为0.0091 W/m².月尘的主要成分是二氧化硅,二氧化硅的逸出功 $W = 6$ eV.当使用74只氙灯辐照月尘颗粒时,颗粒大小对月尘表面电荷数的影响如图4所示,并且图4中也采用了对数坐标系.由模拟结果可知,相比电子束对月尘充电,紫外辐照使其带电的弛豫过程非常长,在10⁴ s的充电时间内,月尘颗粒一直处于持续的充电状态.并且对于小于微米量级的月尘颗粒,在短时间内很难使其带上电荷.对于微米量级和更大的月尘颗粒,在其被紫外源辐照的10⁶ s内,表面电荷量接近饱和,随颗粒半径变大,月尘表面所带电荷数变多.

接下来模拟了同一粒径的月尘颗粒在不同强度辐照源下的充电过程,讨论不同辐照度对月尘表面电荷数的影响.月球表面上的尘埃颗粒所受的紫外辐照主要来自于太阳,已知月球表面总太阳辐照度是1367 W/m²,其中紫外区域能量只占0.01%.所以,月尘颗粒受太阳的紫外辐照度约为0.1367 W/m²,通过计算,实验采用74只氙灯对月尘的紫外辐照强度约为5个太阳的紫外辐照强度.不同数量的氙灯和太阳紫外辐照对月尘颗粒充电

过程影响的模拟结果如图5所示.由图5可知,辐照月尘颗粒的氙灯数量越多,即辐照度越大,月尘表面电荷数越多.太阳对月表尘埃的紫外辐照效果大约相当于16只氙灯对其辐照的强度.

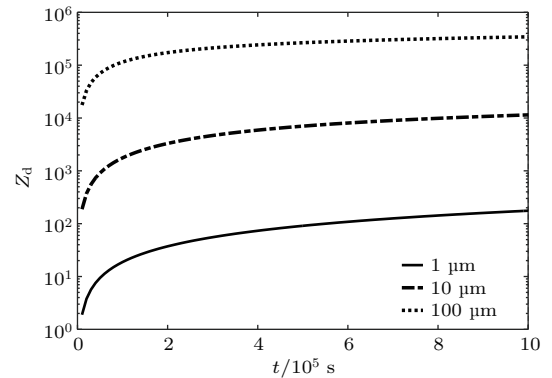


图4 月尘在紫外辐照源下带电,采用74只氙灯同时辐照,粒径分别为1, 10和100 μm的月尘颗粒表面电荷数与充电时间的关系曲线(y轴为对数坐标)

Fig. 4. The relationship between the surface charge number of lunar dusts with particle radius of 1, 10 and 100 μm respectively and the charging time under UV radiation with 74 deuterium lamps (logarithm coordinate for y axis).

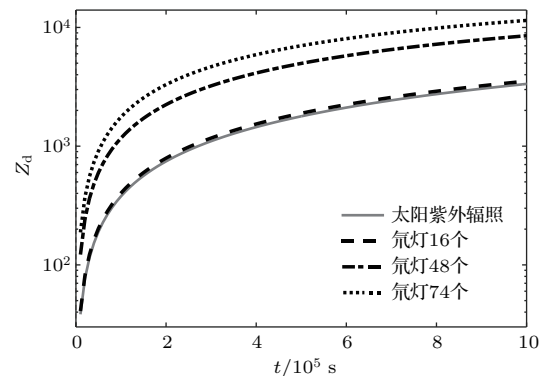


图5 半径为10 μm的月尘颗粒在不同辐照度的辐照源下充电,月尘表面电荷数与充电时间的关系曲线(y轴为对数坐标)

Fig. 5. The relationship between the surface charge number of the lunar dust with radius of 10 μm and the charging time, under radiation with different irradiance (logarithm coordinate for y axis).

分析月尘颗粒受紫外源辐照带电的数值模拟结果,可以得出以下结论:在相同紫外辐照源的辐照下,月尘颗粒半径越大,表面所带电荷数越多,但是微米量级的月尘颗粒受短时间的紫外辐照是很难带电的;同一粒径的月尘颗粒受不同辐照度的紫外源辐照,辐照度越大,月尘表面电荷数越多,若使月尘的带电量可观,同样需要足够长的辐照时间.因此这种带电方式在实际应用中可以通过延长辐照时间,提高辐照度等方法增加颗粒表面电荷数.

4 结 论

本文根据尘埃颗粒带电的机理,首次解析得到了尘埃在电子束环境下的充电方程,并结合“空间环境地面模拟装置”中对月尘舱的设计要求数值模拟了月尘颗粒在电子辐照源和紫外辐照源辐照下的充电过程,分别讨论了月尘颗粒大小,电子枪辐照束斑半径和流强,以及紫外源的辐照度等参数对充电过程的影响.结合月球表面尘埃的实际带电环境,对数值模拟结果进行分析,选择适合在地面实验装置中使用的月尘充电方式并得到以下结论.

1) 在电子源的辐照下,月尘颗粒的充电情况相当可观.粒径尺寸越大,月尘表面所带的电荷数就会越多.通过改变电子枪的设计参数可以得到:月尘表面电荷数随着电子枪辐照束斑半径的减少而增多,随着电子枪的辐照流强的增加而增多,相应地,月尘的充电速度也随之增加.由于月尘颗粒受电子源辐照带电的充电模型主要是收集电子,只要电子克服了月尘颗粒的排斥势,就认为月尘俘获了电子并增加了表面电荷数,这样就会忽略了其他粒子间的物理作用,例如,月尘舱中使用高能电子枪,具有高能电子与月尘颗粒撞击会产生二次电子发射现象,另外,也会存在背散射和透射等非带电过程.因此,月尘颗粒受高能电子源辐照的这种带电方式不作为模拟月表尘埃带电的最佳方式.

2) 在紫外源的辐照下,月尘表面电荷数随颗粒尺寸的增大而增多.由于月尘舱中设计采用的紫外辐照源的辐照度很小,入射的光子通量很小,所以在短时间的辐照下,小于微米量级的月尘颗粒带电量很小,微米量级以上的月尘充电情况较好.对于相同大小的月尘颗粒,在不同数量的紫外源的辐照下带电,表面电荷数随着辐照度的增加而增多.由月尘颗粒受太阳紫外辐照带电的数值模拟结果可知,太阳的辐照度很小,月尘需要在长时间的辐照下才可以带上可观的电荷数.在“空间环境地面模拟装置”的月尘舱中,可以使用较多的紫外辐照源同时辐照月尘颗粒,增加辐照度,从而增加月尘表面带电量来加速实验.紫外辐照带电方式可以作为月尘颗粒的带电方案.

通过分析比较月尘颗粒在电子源和紫外源辐照下的充电过程,结合“空间环境地面模拟装置”中对月尘舱的设计要求,最终优选紫外源辐照带电方式作为月尘颗粒的带电方案.

参考文献

- [1] Ma J X 2006 *Physics* **35** 224 (in Chinese) [马锦绣 2006 物理 **35** 224]
- [2] Whipple E C 1981 *Rep. Prog. Phys.* **44** 1197
- [3] Ma J X, Liu J Y, Yu M Y 1997 *Phys. Rev. E* **55** 4627
- [4] Liu J Y 1998 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [刘金远 1998 博士学位论文 (合肥: 中国科学技术大学)]
- [5] Low G M 1969 *Apollo 11 Mission Report* (Houston: NASA Manned Spacecraft Center) MSC-00171
- [6] McDivitt J A 1969 *Apollo 12 Mission Report* (Houston: NASA Manned Spacecraft Center) MSC-01855
- [7] Shepard Jr A B 1971 *Apollo 14 Mission Report* (Houston: NASA Manned Spacecraft Center) MSC-04112
- [8] Scott D R 1971 *Apollo 15 Mission Report* (Houston: NASA Manned Spacecraft Center) MSC-05161
- [9] Morris O G 1972 *Apollo 16 Mission Report* (Houston: NASA Manned Spacecraft Center) MSC-7230
- [10] Morris O G 1972 *Apollo 17 Mission Report* (Houston: NASA Manned Spacecraft Center) JSC-07904
- [11] Gaier J R 2005 *The Effects of Lunar Dust on EVA Systems During the Apollo Missions* (Cleveland: NASA Glenn Research Center) NASA/TM-2005-213610/REV1
- [12] Zhang S S, Wang S J, Li X Y, Li S J, Tang H, Li Y, Yu W 2013 *Earth Sci.: J. China Univ. Geosci.* **38** 339 (in Chinese) [张森森, 王世杰, 李雄耀, 李世杰, 唐红, 李阳, 于雯 2013 地球科学: 中国地质大学学报 **38** 339]
- [13] Shi X B, Li Y Z, Huang Y, Wang J 2007 *Chin. J. Space Sci.* **27** 66 (in Chinese) [石晓波, 李运泽, 黄勇, 王浚 2007 空间科学学报 **27** 66]
- [14] Sun H, Shen Z G, Zhang X J, Ma S L 2015 *Manned Spaceflight* **21** 642 (in Chinese) [孙浩, 沈志刚, 张晓静, 麻树林 2015 载人航天 **21** 642]
- [15] Tong J Y, Li M, Bai Y, Tian D B 2013 *Chin. Space Sci. Technol.* **4** 78 (in Chinese) [童靖宇, 李蔓, 白羽, 田东波 2013 中国空间科学技术 **4** 78]
- [16] Freeman J W, Ibrahim M 1975 *Earth, Moon, and Planets* **14** 103
- [17] Wallis M K, Hassan M H A 1983 *Astron. and Astrophys.* **121** 10
- [18] Havnes O, Goertz C K, Morfill G E, Grun E, Ip W 1987 *J. Geophys. Res.* **92** 2281
- [19] Sternovsky Z, Horanyi M, Robertson S 2001 *J. Vacuum Sci. Technol. A: Vacuum, Surfaces, and Films* **19** 2533
- [20] Colwell J E, Gulbis A A S, Horanyi M, Robertson S 2005 *Icarus* **175** 159
- [21] Abbas M M, Tankosic D, Craven P D, LeClair A C, Spann J F 2010 *Astrophys. J.* **718** 795
- [22] Liu J Y, Chen L, Wang F, Wang N, Duan P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8692 (in Chinese) [刘金远, 陈龙, 王丰, 王楠, 段萍 2010 物理学报 **59** 8692]
- [23] Delzanno G L, Tang X Z 2015 *Phys. Plasmas* **22** 113703
- [24] Shukla P K, Mamun A A 2002 *Introduction to Dusty Plasma Physics* (Bristol: Institute of Physics Publishing) pp36-69

Charging mechanism and application of lunar dust grains^{*}

Xue Dan Liu Jin-Yuan Li Shu-Han[†]

(School of Physics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

(Received 7 January 2018; revised manuscript received 20 April 2018)

Abstract

Since the moon has an extremely rarefied atmosphere, the full spectrum of the electromagnetic radiation of the sun reaches the surface, charging the surface dust and affecting its current charge state. Lunar surface dust thus remains electrostatically charged at all times. Charged lunar dust will adversely affect the operations of most mechanical systems required by manned and unmanned exploration missions. Charged dust will also stubbornly adhere to solar panels and thermal radiators, thus reducing their efficiencies. Researches on the charged lunar dust can help to investigate lunar dusty environment as well as to solve those particle-induced problems by both simulation and experiment in laboratory. In this work, two different charging processes of charged lunar dust in the environment of electron beam and the radiation of ultraviolet source are considered. The computer numerical simulation method is used to analyze these two different charging processes of lunar dust, to explore the charging mechanisms of lunar dusts, and to choose an appropriate way of charging for the lunar environment simulation device in laboratory. On the basis of the classic dust charging equation, the charging equation of a dust in pure electron environment is given for the first time in this work. Meanwhile, the charging process under ultraviolet radiation is discussed and combined with the specific application of charging dusts. A solver of fourth-order Runge-Kutta algorithm is made to solve differential equations under two different irradiation sources. The main simulation results show that: 1) in electron environment, the surface dust charge number increases as the particle size and the current intensity of electron guns increase, while the charge number increases as the beam spot radius of electron guns decreases; 2) under ultraviolet radiation, the dust charge number increases with the particle size and irradiance increasing, but charging efficiency is slow. A great dust charge number needs a long time radiation from sun (equivalent to 74 deuterium lamps), which means that more ultraviolet radiation sources are essential to speeding up the experiment in laboratory. Although the calculated efficiency of ultraviolet radiation is lower than electron irradiation, the secondary-electron emission, the scattering and the transmission process of electron irradiation are ignored, which can greatly reduce the efficiency of charging by energetic electron guns in the actual experiment. Therefore, comparing these two charging mechanisms and considering the actual design requirements for the space environment simulation device, charging by lots of ultraviolet radiation is an appropriate scheme for electrification of lunar dusts.

Keywords: lunar dust grains, charging mechanism, charging process, space environment simulation device

PACS: 52.27.Lw, 78.20.Bh

DOI: 10.7498/aps.67.20180047

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11375039, 11275034).

[†] Corresponding author. E-mail: lishuhan@mail.dlut.edu.cn