

月尘静电浮扬现象的理论模拟*

毛子瑞^{1,2}, 邸冰², 张娟娟²

(1. 天津大学 机械工程学院,天津 300072;

2. 河北师范大学 物理科学与信息工程学院,石家庄 050024)

摘要: 对月球上的月尘静电浮扬现象进行了理论研究,对比分析了影响月球表面静电浮扬强弱的主要因素.研究过程分为两个步骤:首先采用一维 PIC (particle in cell) 模拟计算了月尘和月球表面的充电过程,然后基于这一结果引进试验粒子,对月尘的静电浮扬现象进行了分析研究.结果表明月尘的静电浮扬主要受两个因素的影响:太阳角和月尘颗粒的大小.月尘静电浮扬现象在日出日落时分更容易发生,即太阳角越小越容易引起剧烈的月尘浮扬现象;并且月尘粒径越小,其浮扬高度越高.

关键词: 静电浮扬; 月尘; 质点网格法; 月尘充电模型

中图分类号: O31;O142.9 **文献标志码:** A

DOI: 10.3879/j.issn.1000-0887.2013.04.002

引 言

月球上有一个特殊的景观,就是月尘颗粒悬浮在空中,形成带电的“喷泉”.月面软着陆探测器“勘测者”7号曾拍摄到月球西地平线上辉光现象的照片,如图1和图2^[1].“勘测者”5号和“勘测者”6号也拍摄到类似的地平辉光照片.此外,在当地日落时间,Apollo登月航天员从离月面120 000 m的高空观测和前苏联“月球车”拍摄的照片均发现了类似现象.研究发现^[2]:地平辉光现象是由于阳光照射到悬浮在近月球表面(小于1 m)上空直径5~6 μm的月尘颗粒而产生的光散射现象.

月球表面的静电浮扬现象是由太阳辐射和太阳风引起的.月表月尘的带电情况主要取决于太阳辐射引起的光电效应、太阳风中的电子流和离子流作用:在月球的受光面,主要受太阳辐射作用,月尘与光子作用发生光电效应向外发射带负电的光电子,月尘得到相应的正电荷,从而使月球表面上方形成一层电势为正的光电子鞘层;在月球的背光面,没有太阳辐射,月球受太阳风的等离子体流的作用,由于电子的热运动速度远远大于离子的热运动速度,电子更容易被月球表面吸收,从而使月表形成一层电势为负的等离子体鞘层.细小的带电月尘在月表电场的作用下发生静电浮扬现象,解释了图1和图2所示的现象.

研究背景:随着人类科技的发展,各国对外太空的探索力度越来越大.外太空的探索涉及一系列高端技术,是一个国家的综合国力的体现,包括系统控制、航空材料等等.其中,不可避免的一个问题是月球环境中的月尘颗粒对人类设备的腐蚀作用,月尘附着在设备的外壳会影

* 收稿日期: 2013-01-28; 修订日期: 2013-02-21

作者简介: 毛子瑞(1987—),男,河北邢台人,硕士生(通讯作者). E-mail: maozirui@tju.edu.cn).

响设备的抗高温和抗高压性能,附着在摄像仪器镜头上的月尘则会使图像变模糊。因此,探究月球的电磁场环境对月尘分布的影响可以使我们合理避开月尘分布多的区域,降低月尘对探测器的负面影响,对我们的探月工程尤为重要。

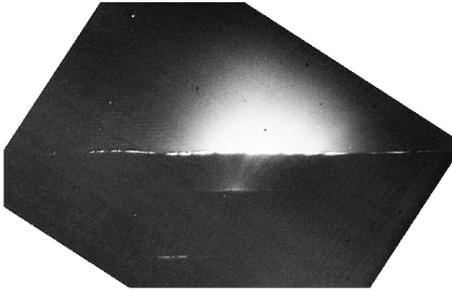


图1 Survey6 观察到的日落时分的明亮光芒^[1]

Fig.1 Sunlight in sunset observed by Surveyor 6^[1]



图2 月球表面的光芒^[1]

Fig.2 Light near the moon surface^[1]

研究现状:Doe 等^[3], Arnas 等^[4], Sickafoose 等^[5]和 Robertson 等^[6]分别用实验方法证实了月尘在背光面的等离子体鞘层作用下会发生静电浮扬现象。美国 Colorado 大学的 Wang 等^[7]模拟了单个月尘在光电子鞘层和等离子体鞘层内的充电过程,并提出了相应的充电模型,结果表明不同大小的月尘带电量和月尘粒径呈线性关系;北航大学的李雯等^[8]以及美国的 Timothy 等^[9]分别基于单粒子轨道理论及等离子体充电方程和经典物理的电磁场理论对月尘的充电过程和空间电场进行了模拟,进而给出了月尘在该空间电场环境中发生静电浮扬的理论分析,得出了月尘浮扬强度的影响因素。

以上理论分析均基于理想化的理论公式的近似,本文拟从空气动力学和等离子体理论出发,采用质点网格法数值模拟计算方法,直接模拟计算月球环境中的空间电场以及电场对月尘的充电过程,进而计算出月尘在该电场环境下的静电浮扬强度,给出影响月尘静电浮扬的主要因素。

1 理论模型

1.1 模型建立及基本假设

该课题研究分为两个部分:月尘和月表的充电过程;带电月尘在月表电场中的静电浮扬过程。关于月尘的充电过程,我们采用 PIC 的方法进行充电模拟, PIC 充电模型见图 3。

基本假设:我们用不同半径的粒子代表月尘颗粒以及太阳风和太阳辐射中的电子流、离子流以及光子微粒。代表电子和光子等的粒子流沿太阳角方向入射,从左边界逸出的粒子将以相同速度从右边界进入,并假定月尘最初静止在月球表面;为保证电子等微粒的热运动的真实性,我们采用真实电子和质子的质量比。

1.1.1 充电过程

月球表面的电场主要受两个因素的影响:太阳辐射中的光子与月球表面风化层物质发生光电效应,向外辐射光电子产生光电电流 I_{ph} ;太阳风中大量的电子流和离子流,考虑到电子的热运动速度远远大于质量更大的离子的热运动速度,电子更容易被月球表面的月尘所吸收,从而产生太阳风电流 I_{sw} 。

月表电势 ϕ_s

根据电荷守恒定律和空间等离子体理论,有

$$I_{sw}(\phi_s) - I_{ph}(\phi_s) = 0, \quad (1)$$

$$I_{sw}(\phi_s) = n_{sw} \sqrt{\frac{k_B T_{sw}}{2\pi m_e}} \left(1 + \frac{q_e \phi_s}{k_B T_{sw}} \right), \quad (2)$$

$$I_{ph}(\phi_s) = I_{ph,0} \exp\left(\frac{-q_e \phi_s}{k_B T_{pe}}\right) \sin \theta, \quad (3)$$

其中, k_B 为 Boltzmann 常数, m_e 为电子质量, q_e 为基本电荷量, θ 为太阳角, T_{sw} 和 T_{pe} 分别为太阳风和太阳辐射的温度. 其他相关参数的含义及其取值见表 1. 根据式(1) ~ (3) 可以得到月球表面电势 ϕ_s .

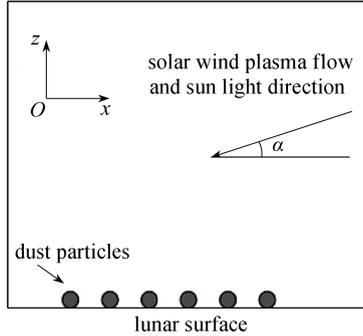


图 3 月尘的充电模型

Fig. 3 Charging model

表 1 参数取值^[10]

Table 1 Value of parameters^[10]

sun angle $\theta / (^{\circ})$	photon current $I_{ph,0} / (e / (m^2 \cdot s))$	velocity of photon $v_{pe} / (m/s)$	photon temperature $k_B T_{pe} / eV$	T of sun wind $k_B T_{sw} / eV$
10	2.8×10^{13}	8.8×10^5	2.2	10.0
electron density $n_{sw} / (e/m^3)$	photon density $n_{pe} / (e/m^3)$	lunar gravity $g_L / (m/s^2)$	dielectric constant $\epsilon_0 / (F/m)$	Boltzmann constant k_B
5.0×10^6	6.4×10^7	1.62	8.85×10^{-12}	1.38×10^{-23}

月表电场强度 $E(z)$

月球表面的电场强度可由下式近似计算得到^[9]:

$$E_0 = \frac{2\sqrt{2}\phi_s}{\lambda_{D0}}, \quad (4)$$

式中的 λ_{D0} 为月球表面的 Debye 长度,

$$\lambda_{D0} = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_{pe}}{q_e^2 n_{pe,0}}}. \quad (5)$$

月球表面的光电子密度可以表示为^[7]

$$n_{pe,0} = \frac{2I_{ph,0} \sin \theta}{v_{pe}}, \quad (6)$$

式中, v_{pe} 为光电子平均速度,

$$v_{pe} = \sqrt{\frac{2k_B T_{pe}}{m_e}}. \quad (7)$$

由式(4)~(7)并结合上一步得到的表面电势可以求得月球表面电场强度 E_0 。

假定光电子的能量服从 Maxwell 分布,则月表带电鞘层内的光电子密度可以表示为距离月球表面高度 z 的关系式:

$$n_{pe} = n_{pe,0} \left(1 + \frac{z}{\sqrt{2}\lambda_D}\right)^{-2}. \quad (8)$$

同理,带电鞘层内的电场分布和月表场强的关系:

$$E(z) = E_0 \left(1 + \frac{z}{\sqrt{2}\lambda_{D0}}\right)^{-1}. \quad (9)$$

从而,可以得到月球表面上空的电场随高度的变化情况。

月尘带电量 Q_d

月表的月尘通过吸收光电效应逸出的光电子、太阳风中的等离子体以及空间电子而获得电荷;相应地,在电荷的传递过程中会形成电荷的光电子电流 $I_{ph,d}$ 、电子电流 $I_{e,d}$ 和太阳风电流 $I_{sw,d}$ 。

由电荷与电流的关系以及电流的定义,有

$$\frac{dQ_d}{dt} = I_{ph,d} - I_{e,d} - I_{sw,d}, \quad (10)$$

$$Q_d = C_d \cdot \phi_d, \quad (11)$$

$$C_d = 4\pi\epsilon_0 r_d, \quad (12)$$

C_d 为月尘颗粒的电容。

基于单粒子轨道理论,并假定光电子能量服从 Maxwell 分布,则对于带正电的月尘颗粒,

$$\begin{cases} I_{ph,d} = \pi r_d^2 q_e I_{ph,0} \exp\left(\frac{-q_e \phi_d}{k_B T_{pe}}\right), \\ I_{sw,d} = \pi r_d^2 q_e n_{sw} \sqrt{\frac{8k_B T_{sw}}{\pi m_e}} \left(1 + \frac{q_e \phi_d}{k_B T_{sw}}\right), \\ I_{e,d} = \pi r_d^2 q_e n_{pe} \sqrt{\frac{8k_B T_{pe}}{\pi m_e}} \left(1 + \frac{q_e \phi_d}{k_B T_{pe}}\right). \end{cases} \quad (13)$$

对于带负电的月尘颗粒,

$$\begin{cases} I_{ph,d} = \pi r_d^2 q_e I_{ph,0}, \\ I_{sw,d} = \pi r_d^2 q_e n_{sw} \sqrt{\frac{8k_B T_{sw}}{\pi m_e}} \exp\left(\frac{q_e \phi_d}{k_B T_{sw}}\right), \\ I_{e,d} = \pi r_d^2 q_e n_{pe} \sqrt{\frac{8k_B T_{pe}}{\pi m_e}} \exp\left(\frac{q_e \phi_d}{k_B T_{pe}}\right). \end{cases} \quad (14)$$

综合以上式子可以得到月尘的带电情况。

1.1.2 静电浮扬过程

根据物理学中的运动学定律,很容易得到月尘在竖直方向上的运动方程为

$$\frac{dv_z}{dt} = \frac{Q_d}{m_{\text{grain}}} E(z) - g, \quad (15)$$

$$z = \sqrt{2} \lambda_D \left(\frac{3E_0 \phi_{\text{eq}}}{4\pi\rho_d g r_d^2} - 1 \right). \quad (16)$$

1.2 PIC 计算方法

基于以上理论计算公式,具体到 PIC 方法,可以得到相应的离散化公式如下, p 下标表示第 p 个模拟带电粒子。

以时间步为变量的月尘颗粒运动方程为

$$x_p^{n+1} = x_p^n + \Delta t v_p^{n+1/2}, \quad (17)$$

$$v_p^{n+3/2} = v_p^{n+1/2} + \Delta t \frac{q_p}{m_s} E_p. \quad (18)$$

电荷密度 ρ_i 为

$$\rho_i = \sum_p \frac{q_p}{\Delta x} W(x_i - x_p). \quad (19)$$

由 Poisson 方程和场强与电势的关系得

$$\varepsilon_0 \frac{\varphi_{i+1} - 2\varphi_i + \varphi_{i-1}}{\Delta x^2} = \rho_i, \quad (20)$$

$$E_i = -\frac{\varphi_{i+1} - \varphi_{i-1}}{\Delta x}. \quad (21)$$

最后,通过电荷处的电场 E_p 与节点电场 E_i 的关系有

$$E_p = \sum_i E_i W(x_i - x_p), \quad (22)$$

其中, $W(x_i - x_p)$ 是我们定义的插值方程,

$$W(x_i - x_p) = \int S_x(x - x_p) b_0 \left(\frac{x - x_i}{\Delta x} \right) dx. \quad (23)$$

以上方程组是封闭有解的;从而可以得到月尘的带电量、运动情况等物理量。

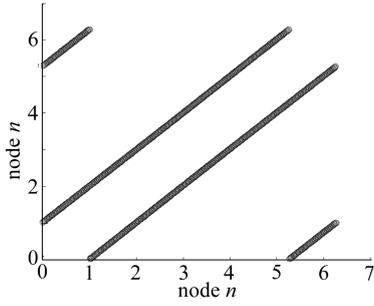
2 计算结果及分析

2.1 模拟电子的分布随 PIC 步长的变化情况

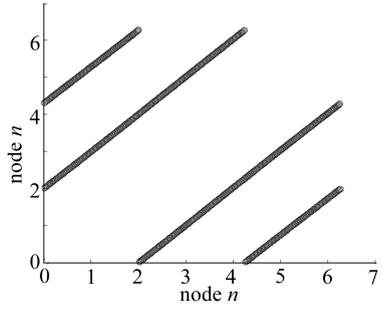
月球上空的电场环境是由太阳风和太阳辐射所致,在太阳风和太阳辐射影响月表环境之前,月球表面不带电,没有电势差.简单起见,我们假设模拟电子位置分布的初始条件是电子均匀地分布在各个节点位置,从而模拟月表无电势差的环境(见图4).由于受到电场力的作用,从图中可以看到模拟电子在电场力的作用下在整个空间内趋于均匀分布,并在30 000个时间步内达到均匀,此时电场保持恒定,整个空间场和电子的分布达到平衡状态。

2.2 空间电场随高度的的变化

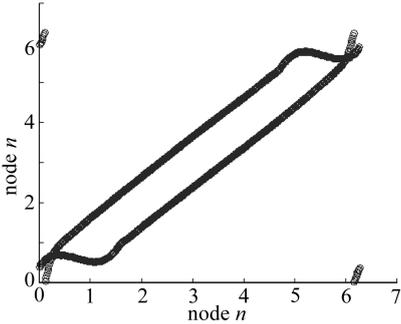
图5是平衡状态下电场强度和电子密度随高度的变化情况.我们可以看到,在月球表面($z = 0$ m)电场强度达到最大值5 V/m,并随高度呈倒数形式下降,在20 m左右高度趋近于0;图5中的实线代表电子密度的变化曲线,电子在静电场力的作用下,发生静电浮扬现象.从图中也可以看到,在30 m高度下的月表环境中充满了大量的悬浮和运动中的月尘颗粒,并且高度越高,月尘越少,密度随高度呈指数形式递减.这是因为高度越高,出现在这一高度的月尘需要的逃逸月球表面的初速度就越大。



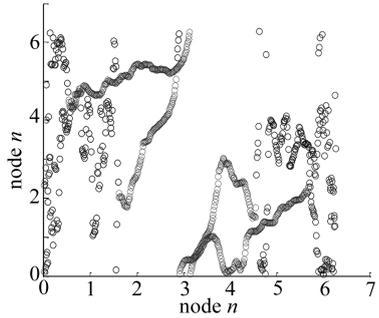
(a) 100 个步长时的电子分布
(a) Dusts distribution at 100th step



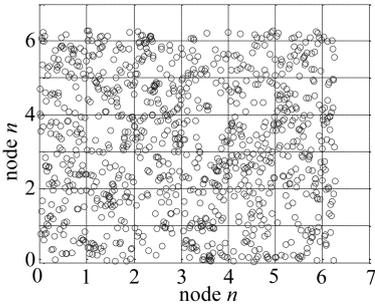
(b) 500 个步长时的电子分布
(b) Dusts distribution at 500th step



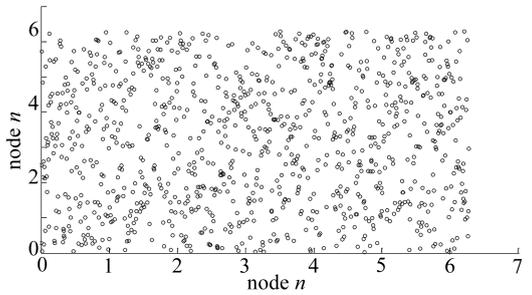
(c) 2 000 个步长时的电子分布
(c) Dusts distribution at 2 000th step



(d) 10 000 个步长时的电子分布
(d) Dusts distribution at 10 000th step



(e) 20 000 个步长时的电子分布
(e) Dusts distribution at 20 000th step



(f) 30 000 个步长时的电子分布
(f) Dusts distribution at 30 000th step

图 4 模拟电子的分布随 PIC 步长的变化情况

Fig. 4 The distribution of lunar dusts with PIC time step

图 6 是电势随高度的变化曲线。如图所示,3 m 左右是一个临界点。在 3 m 以下的月表上空环境的电势为负,而 3 m 以上的上空电势为正。这是因为在一个 Debye 长度内光电效应中放出的大量光电子被月尘所吸收,使得在一个 Debye 长度内的电势为负;而超过一个 Debye 长度后,月尘和光子之间的光电效应占主流,月尘放出电子,从而使该区域内的电势为正。根据曲线斜率可以得出 Debye 长度内的区域电势变化更剧烈,因为电势的变化反映了电场强度的大小,所以可以得到 z 越小电场强度越大的结论,这与图 5 中的结果是相符的。

2.3 太阳角对月尘浮扬的影响

根据物理上的运动学定律不难得到,月尘的浮扬高度取决于它离开月球表面的初速度,而

初速度的产生是因为月表的月尘受力不平衡所致。当月尘受到的方向向上的静电力大于月尘的重力和月表对月尘颗粒的粘附力(忽略)之和时,月尘就获得了向上浮扬的初速度。所以初速度的大小取决于电场力和电势。从图6可以看出电势的临界位置是一个 Debye 长度,而图7给出了 Debye 长度受太阳角的影响(上)。因此,太阳角通过影响 Debye 长度从而影响了空间的电场分布(见图7下面的线)和月尘的静电浮扬高度。结果表明,太阳角越小(0° 和 180°) Debye 长度越大,带电鞘层越后,越容易引起月尘浮扬现象的发生。

2.4 粒径对静电浮扬的影响

处于相同电场条件下的不同大小的月尘颗粒,粒径越大受到的月球向下的重力作用越大,从而浮扬高度越小。从图8可以看出月尘最高可以浮扬至1000 m左右的高空,浮扬高度随粒径呈倒数形式下降。粒径大于 $1\ \mu\text{m}$ 时,平均运动高度在10 m以下。当微粒的半径大于 $100\ \mu\text{m}$ 时,很难发生静电浮扬现象。正是由于发生静电浮扬的月尘的粒径非常小,才导致悬浮在月球上空的月尘颗粒无孔不入,对人类设备的腐蚀作用更严重。

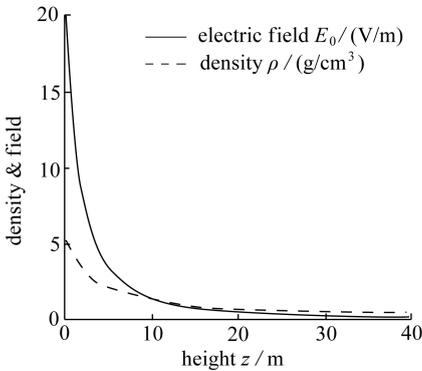


图5 竖直电场强度和电子密度随高度的变化曲线

Fig. 5 Variation of electric field and density vertically

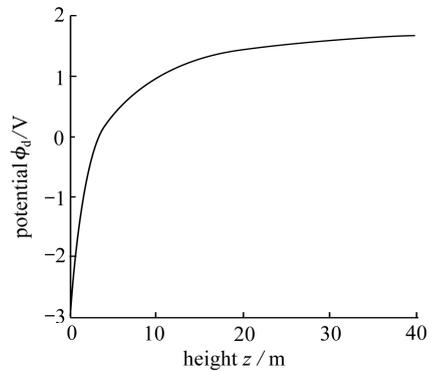


图6 充电过程完成后月尘电势随高度的变化曲线

Fig. 6 Variation of lunar dusts potential over height z

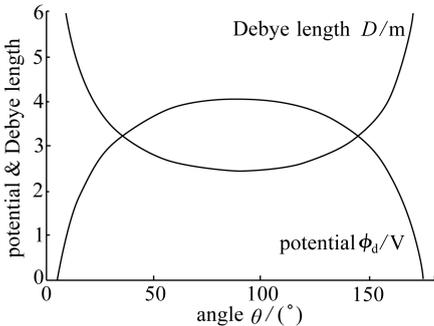


图7 Debye 长度(上)和电势(下)随太阳角的变化曲线

Fig. 7 Variation of Debye length and potential over sun elevation angle

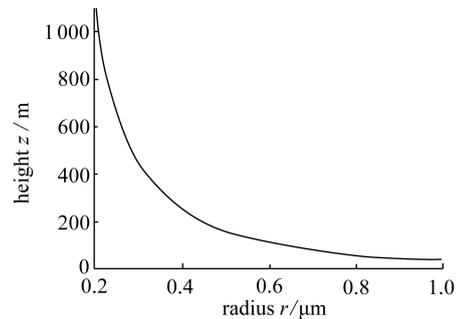


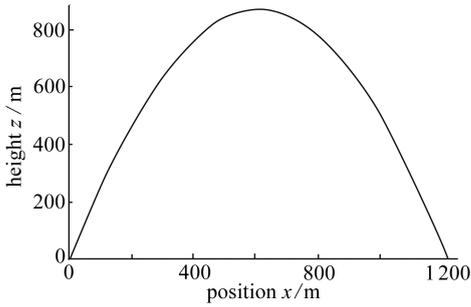
图8 月尘浮扬高度随粒径的变化曲线

Fig. 8 Variation of levitation height of lunar dusts over radius

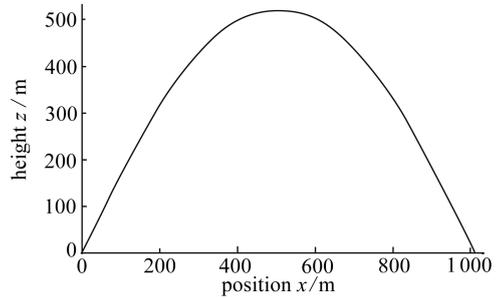
2.5 月尘浮扬初速度对浮扬高度的影响

相同电场条件下,不同大小的月尘颗粒获得的初速度不同,从而影响了月尘的浮扬高度。我们对比计算了不同初速度下的同一月尘微粒的最大浮扬高度,结果如图9所示。初速度为

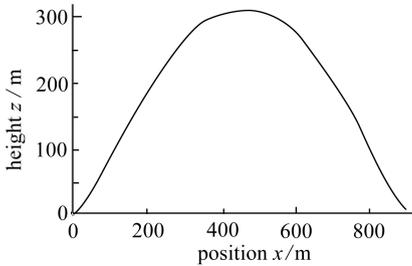
2.5 m/s 时,最大浮扬高度达到 800 m 以上,而 0.5 m/s 的初速度的月尘的最大浮扬高度锐减到 250 m。结合分析图 8 和图 9 可以看出,最大浮扬高度从 800 m 降到 250 m 对应的粒径变化为 $0.25 \mu\text{m}$ 增为 $0.35 \mu\text{m}$,可见浮扬初速度随月尘大小的变化很强烈。



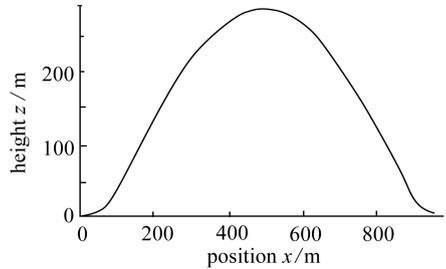
(a) 初速度为 2.5 m/s 时月尘颗粒的运动轨迹
(a) Motion of dusts in initial velocity of 2.5 m/s



(b) 初速度为 1.5 m/s 时月尘颗粒的运动轨迹
(b) Motion of dusts in initial velocity of 1.5 m/s



(c) 初速度为 1.0 m/s 时月尘颗粒的运动轨迹
(c) Motion of dusts in initial velocity of 1.0 m/s



(d) 初速度为 0.5 m/s 时月尘颗粒的运动轨迹
(d) Motion of dusts in initial velocity of 0.5 m/s

图 9 不同初速度对浮扬高度的影响

Fig.9 Influence of initial velocity on levitation height

3 结 论

通过本文的计算结果可以得到如下结论:日出和日落时分的月尘静电浮扬现象最剧烈。为了避免受到月尘的强腐蚀作用,人类着陆器不应选择在月球表面的明暗交界处(太阳角最小的地方)着陆;粒径越小越容易发生静电浮扬。半径越大,月尘受到的月球吸引力就越大,越不容易发生静电浮扬现象。悬浮在空间中的月尘都是细微物,极易进入人类的探索设备,对设备的危害作用更严重;太阳角和粒径是影响静电浮扬强度的主要因素,不是所有因素。其他因素还包括光照强度、月表地貌等等。

本文借助于质点网格法分析计算了月球上的静电浮扬问题,验证了太阳角和粒径大小是影响月尘静电浮扬剧烈程度的两个最主要因素。

参考文献 (References):

- [1] Colwell J E, Robertson S R, Horányi M, WANG Xu, Poppe A, Wheeler P. Lunar dust levitation[J]. *Aerospace Engineering*, 2009, **22**(1): 2-9.
- [2] 陈磊, 李飞, 任德鹏, 蔡振波. 月面和近月空间环境及其影响[J]. *航天器工程*, 2010, **19**(5): 76-81. (CHEN Lei, LI Fei, REN De-peng, CAI Zhen-bo. Lunar surface and lunar field surroundings and influence[J]. *Spacecraft Engineering*, 2010, **19**(5):76-81. (in Chinese))

- [3] Doe S, Burns J O, Pettit D, Blacic J, Keaton P W. The levitation of lunar dust via electrostatic forces[J]. *Engineering, Construction, and Operations in Space*, 2007, **6**(12): 907-915.
- [4] Arnas C, Mikikian M, Doveil F. High negative charge of a dust particle in a hot cathode discharge[J]. *Phys Rev E*, 1999, **60**(5): 7420-7425.
- [5] Sickafoose A A, Colwell J E, Horányi M, Robertson S. Experimental levitation of dust rains in a plasma sheath[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2002, **107**(A11): 1408-1417.
- [6] Robertson S, Gulbis A A S, Colwell J E, Horányi M. Dust grain charging and levitation in a weakly collisional sheath[J]. *Physics of Plasmas*, 2003, **10**(10): 3874-3880.
- [7] WANG Xu, Colwell J E, Horányi M, Robertson S. Charge of dust on surfaces in plasma[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2007, **35**(2): 271-279.
- [8] 李雯, 崔琰, 王浚, 郑玮琳. 月球受光面月尘静电浮扬特性分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, **36**(10): 1199-1202. (LI Wen, CUI Yi, WANG Jun, ZHENG Wei-ling. Analysis of electrostatic levitation character of lunar dusts in the moon[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2010, **36**(10): 1199-1202. (in Chinese))
- [9] Timothy J S, Richard R V, William M F. A dynamic fountain model for lunar dust[R]. *Advances in Space Research*, 2005.
- [10] Grün E, Horanyi M, Sternovsky Z. The lunar dust environment[J]. *Planetary and Space Science*, 2011, **59**(14): 1672-1680.
- [11] Joshua E C, Amanda A G, Scott R. Dust transport in photoelectron layers and the formation of dust ponds on EROS[J]. *Icarus*, 2005, **175**(1): 159-169.

Theoretical Simulation of Electrostatic Levitation of Lunar Dust

MAO Zi-ru^{1,2}, DI Bing², ZHANG Juan-juan²

(1. *Mechanical Engineering School, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China;*

2. *Physics Science and Information Engineering School, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, P. R. China)*

Abstract: The electrostatic levitation of lunar dust particles in the lunar terminator region was simulated. The main factors influencing levitation were analyzed. The research included two steps: PIC (particle-in-cell) simulations were carried out by using real ion to electron mass ratio to obtain plasma sheath, lunar surface charging, on the basis of which test particle simulations were adopted to simulate the levitation of dust particles from lunar surface. Results show that the solar elevation angle and dust grain radius are main controlling parameters for the levitation of lunar dust particles. The electrostatic levitation of lunar dust occurs during sunrise and sunset when the sun angle is small. The smaller the dust grain is, the higher it elevates due to electrostatic levitation on the same condition.

Key words: electrostatic levitation; lunar dust; particle-in-cell(PIC); lunar dust charging