

文章编号: 1000-4734(2018) 04-0365-07

辉石颗粒的辐射带电特性

张海彬^{1, 2} 李雄耀^{1, 3*} 金宏^{1, 3}

(1. 中国科学院 地球化学研究所 月球与行星科学研究中心, 贵州 贵阳 550081;
2. 贵阳市第一中学, 贵州 贵阳 550081; 3. 中国科学院 太空制造技术重点实验室, 北京 100094)

摘要: 尘埃颗粒带电是月球表面和太阳系空间环境中普遍存在的现象, 是理解月球辉光成因、深入认识月球尘埃环境等的重要基础。本文以月壤和宇宙尘中具有代表性的辉石颗粒为对象, 在电子枪辐射模拟环境中开展带电实验研究, 发现微米大小的颗粒带电量约在 $10^5 \sim 10^8 e$ 之间, $1 \sim 5 \mu\text{m}$ 的辉石颗粒最容易发生带电运动, 产生带电运动颗粒的带电量随着颗粒大小的增大而增大, 相近大小的颗粒由于堆积情况不同也存在较大差异。根据辉石颗粒的最大带电量拟合可以得出其最大吸附带电量与颗粒大小成幂指数关系, 并与辐射电子能量有关。最后, 通过实验数据的拟合, 给出了月球辐射环境中尘埃颗粒最大电量模型, 并根据实际月球表面情况推测了带电尘埃颗粒的迁移高度特征, 发现月面尘埃颗粒的带电运动绝大部分发生在几百米的近月表空间。

关键词: 辉石; 带电; 颗粒大小; 迁移高度; 月球

中图分类号: P68 文献标识码: A doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2018.38.208

作者简介: 张海彬, 男, 2000 年生, 高中学生, 中国科学院地球化学研究所实习生. E-mail: 190893652@qq.com

Charged properties of pyroxene grains in electron irradiation environment

ZHANG Hai-bin^{1, 2}, LI Xiong-yao^{1, 3*}, JIN Hong^{1, 3}

(1. Center for Lunar and Planetary Sciences, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;
2. No.1 High School of Guiyang, Guiyang 550081, China; 3. Key Laboratory of Space Manufacturing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: The electrification of dust particles is a common phenomenon in the lunar surface and solar system space environment. It is an important basis for understanding the formation of lunar horizon glow and deep understanding the dust environment of lunar surface. In this study, pyroxene particles, which are representative particles in lunar soil and cosmic dust, are chosen to undertake the experiment of electric charge in an electron gun radiation environment. Based on the experimental results, it is found that micron sized pyroxene particles have electric charges of about $10^5 \sim 10^8 e$ and the 1-5 microns pyroxene particles are the most susceptible to electric motion. The electric quantity of charged pyroxene particles increases with the increase of particle size. There are also dramatic differences between particles of similar size due to different accumulation conditions. According to the maximum power fitting of pyroxene granule, it can be concluded that According to the maximum charged electric quantity fitting of pyroxene particles, it can be concluded that its maximum adsorption capacity is exponentially related to the size of particles, and is also related to the radiation electron energy. Finally, the maximum power model of dust particles in the lunar radiation environment is given by. According to the actual lunar surface conditions, the migration height of charged dust particles is predicted, and the most part of the charged movement of dust particles in lunar surface occurs in a few hundred meters. The results provide a reference for further understanding the electrostatic migration and dust

收稿日期: 2018-02-26

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 41373067; 41403057; 41490630); 中科院青年创新促进会会员项目(编号: 2014359); 中国科学院太空应用重点实验室开放基金

*通讯作者 E-mail: lixiangyao@vip.skleg.cn

environment of the lunar surface dust. A maximum charged power model of dust particles in lunar radiation environment is finally proposed by fitting the experimental data. According to the actual lunar surface conditions, the migration height of the charged dust particles is predicted, and the most part of the charged movement of dust particles in lunar surface occurs in several hundred meters. The results provide a reference for further understanding the electrostatic migration and dust environment of the lunar dust.

Keywords: pyroxene; charging; particle size; height of migration; Moon

由于没有大气和磁场的保护,自由电子的沉积和太阳紫外辐射会使月球表面尘埃颗粒带电,并形成月面电势场,导致带电尘埃颗粒在月球表面的迁移运动。这些现象在 Surveyor、Apollo 和 Lunar Prospector 系列探测任务中得到了很好地证实。

早在 1968 年,NASA 的 Surveyor 7 拍摄到了天黑后地平线上的奇特辉光,这种现象后来被认为是由于静电作用迁移致月面上空的尘埃对太阳光的散射所致。在月球光照区,由于太阳紫外辐射激发尘埃颗粒产生光电发射使其带正电,形成区域正电势^[1],而阴暗区由于等离子体电流的作用使颗粒带负电,形成区域负电势,从而在局部或东西半球明暗边界产生几十甚至几千伏的电势差,而带电尘埃颗粒在这种电场作用下发生迁移运动,在距离月面几米到几百米的高度散射太阳光所导致^[2-3]。后来的 Apollo 8、10、12 和 17 探测过程都证实了这种粉红色或者发白的冕状辉光的存在^[4-6]。1972 年,Apollo 17 的 LEAM 实验获得了月尘迁移运动的直接证据。LEAM 月面实验发现^[5,7],在月球的晨线附近存在大量自东向西运动,速度明显比月球溅射物慢的粒子,这些运动粒子被认为是晨昏线附近强电场作用下运动的带电尘埃颗粒。此外,上世纪九十年代,Lunar Prospector 在探测中也发现,月球正面和背面分别存在正几十和负几百伏特的电势,在其穿越地球磁尾时月球背面负电势达到上千伏特,证实了月球表面由于尘埃带电形成了较强区域电势差^[8]。上述探测结果都证实了月尘颗粒存在显著的带电现象。

月球尘埃带电迁移问题一直是月球科学和月球探测关注的重要问题,它不但是理解月球辉光成因,认识月球尘埃环境的重要基础,也是解决尘埃粘附危害的关键前提^[9]。在过去几十年的月球探测中,月球尘埃的粘附危害一直是困扰工程实施的一个重要问题^[10]。在 Apollo 系列探测任务中,由于月球尘埃的粘附出现了表面磨损、机械

阻塞、密封失效、散热性能退化等系列问题。因此,在后 Apollo 时代,月球尘埃的粘附危害问题成为了月球探测需要解决的首要问题之一。月球表面由于尘埃颗粒半径远大于范德华力的作用距离,干燥环境的毛细作用力也可以忽略不计,引起尘埃颗粒粘附的最主要作用力被认为是静电力^[11-12]。而尘埃颗粒的静电力与其带电特性密切相关,深入认识其带电特性有助于解决月球尘埃的粘附危害问题。

除此之外,尘埃颗粒的带电还普遍发生在小行星、无大气行星或卫星表面,也普遍发生于漂浮在宇宙空间的宇宙尘上^[13-16]。研究发现,宇宙尘的带电过程是行星状星云气体加热的一个重要机制,带电后尘埃颗粒的运行轨迹会受到洛伦兹力的影响而改变,而大量尘埃颗粒的带电迁移是形成辉光和土星 B 环辐射条纹等天文现象的重要因素^[3,15,17]。因此,深入认识尘埃颗粒的带电特性也有助于行星科学和天体物理相关问题的解决。

但目前对颗粒带电特性的认识还很欠缺,颗粒大小对月球等离子环境中尘埃颗粒带电特性的影响依然还没有得到很好地认识。Abbas 等^[18]利用 Apollo 11 和 17 样品进行了单个颗粒电子辐射带电实验,发现颗粒表面电势与颗粒大小密切相关。然而,Nemecek 等^[19]在利用高地类型模拟月壤开展带电实验研究中发现,在小于 100 eV 的电子辐射下,模拟月壤颗粒的平衡表面电势与颗粒大小无关。因此颗粒大小对尘埃颗粒带电的影响有待进一步深入。辉石作为月球等固态天体表面土壤尘埃的重要组成部分,也是宇宙尘埃的重要组成部分^[20-23],开展其低能电子辐射带电实验研究可以更好地理解月尘的带电特性,对认识月球辉光成因、月表物质后期演化以及月球尘埃环境特征等问题^[2,24,25],开展月球探测的尘埃防护和除尘技术攻关,解决月尘粘附危害难题具有重要意义^[12],也有助于认识小行星表面尘埃和星际尘埃的带电过程,促进对土星 B 环尘埃辐射纹现

象、尘埃运动轨迹变化、尘埃碰撞吸积等问题的深入理解^[15-26]。

1 实验装置和原理

实验研究利用中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心的月球(行星)尘埃环境模拟系统(Simulator of Lunar and Planetary Dusty Environment, SLPDE, 图1)进行。SLPDE 利用三级真空泵系统维持腔体真空度在 10^{-5} Pa 的高真空环境,并配备了1个低能散斑电子枪和1套真空紫外/极紫外光源系统作为辐射源模拟空间环境中的等离子环境和紫外辐射,电子能量在 10~500 eV 之间可调,真空紫外光源的最小波长为 110 nm,并可利用单色器实现光源的单色化调节,极紫外光通过激发不同气体的不同波长特征光实现。样品台温控可在室温到 600 °C 之间调节模拟不同的温度环境,颗粒大小和运动特征参数测量由激光相位多普勒测速系统实现,可测量 0.5~90 μm 之间的颗粒大小和小于 280 m/s 的运动速度。

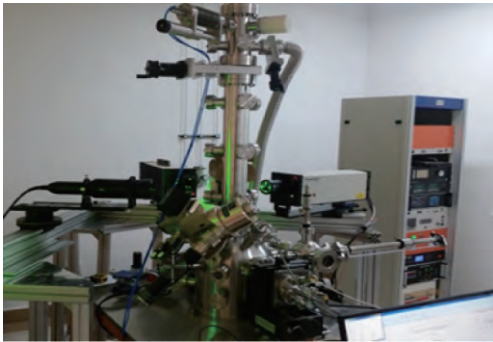


图1 月球(行星)尘埃环境模拟系统(SLPDE)

Fig.1. Simulator of Lunar and Planetary Dust Environment (SLPDE).

实验过程中,采用电子枪照射模拟月球等离子体环境,电子束流密度为 500 μA 。带电颗粒的大小和速度可以根据其对入射光频率和相位的影响直接测量得到。颗粒大小、运动速度和多普勒频移(Δf)、相位差($\Delta\Phi$)之间如下关系^[27]:

$$D = \left(\frac{f_i f_c}{Sd} \right) F(\Delta\Phi) \quad (1)$$

$$v = C \cdot \Delta f \quad (2)$$

式中, C 为与入射激光频率和夹角相关的常数, f_i 和 f_c 分别为干涉条纹间距和接收透镜焦距, S 为散射吸收, d 为检测器间距, $F(\Delta\Phi)$ 为与相位差相关的函数。

颗粒带电量则通过间接计算得到。由于颗粒

粒径很小,所带电量也很少(约 10^5 个电荷)^[28],在静止状态下测量单个颗粒的带电量比较困难。但由于颗粒质量较小,虽然所带电量很少,但仍然具有较高的荷质比,在电场作用下很快可以获得较大的运动速度,因此测量颗粒的带电量可以通过测量颗粒运动速度和颗粒大小间接获得。颗粒带电量(Q)与运动速度(v)、颗粒大小(D)、飞行高度(h)、电场强度(E)、颗粒密度(ρ)、重力加速度(g)之间存在以下关系:

$$Q = \frac{\rho\pi\left(\frac{v^2}{2h} + g\right) D^3}{6E} \quad (3)$$

根据上述原理,以辉石粉末为实验对象,开展了不同电子能量条件下尘埃颗粒的带电实验研究。

2 实验结果和讨论

利用 SLPDE 装置在 10^{-5} Pa 高真空环境中对中值粒径为 10 μm 的辉石粉末进行了电子枪辐照实验,并利用激光相位多普勒测速系统对运动颗粒的大小和运动速度进行检测,进一步根据公式(3)计算出不同颗粒的带电量。Halekas 等^[29]的研究表明,当月球位于磁鞘和磁尾时其表面空间向下运动的电子能量分别平均约为 100 eV 和 500 eV。因此,本研究在这一范围内选取了 180、200、240、300 和 400 eV 的电子能量开展实验测量。

实验过程中对应 180、200、240、300 和 400 eV 电子能量条件,分别检测到了 24、128、64、149、158 个运动颗粒,这些颗粒绝大部分小于 10 μm ,大于 10 μm 的颗粒仅在电子能量为 200、240 和 400 eV 时分别检测到 4 个、2 个和 4 个。虽然,在不同电子能量辐射条件下,检测到的运动颗粒总数从几十个到一百多个不等,但大小在 1~5 μm 之间的颗粒却占总数的 70% 以上,说明在电子枪辐射模拟的等离子环境中 1~5 μm 的颗粒最容易发生带电运动(图2)。

根据公式(3)对实验测量得到的所有颗粒带电量进行计算得出其吸附带电量,图3给出了不同颗粒大小的带电量分布,实线为测量数据最大带电量拟合曲线,虚线为颗粒克服重力向上迁移所需的理论最小带电量。可以看出,所有实测数据点均位于虚线之上,说明产生静电运动颗粒的带电量均大于克服重力所需的最小带电量,与

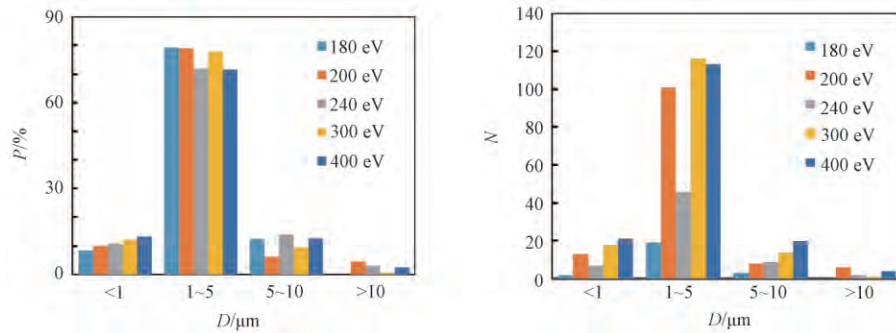


图2 多普勒系统检测到的不同大小颗粒百分数(左)和颗粒数量(右)

Fig.2. Percentage (left) and quantity (right) of various sized grains measured by the Doppler system.

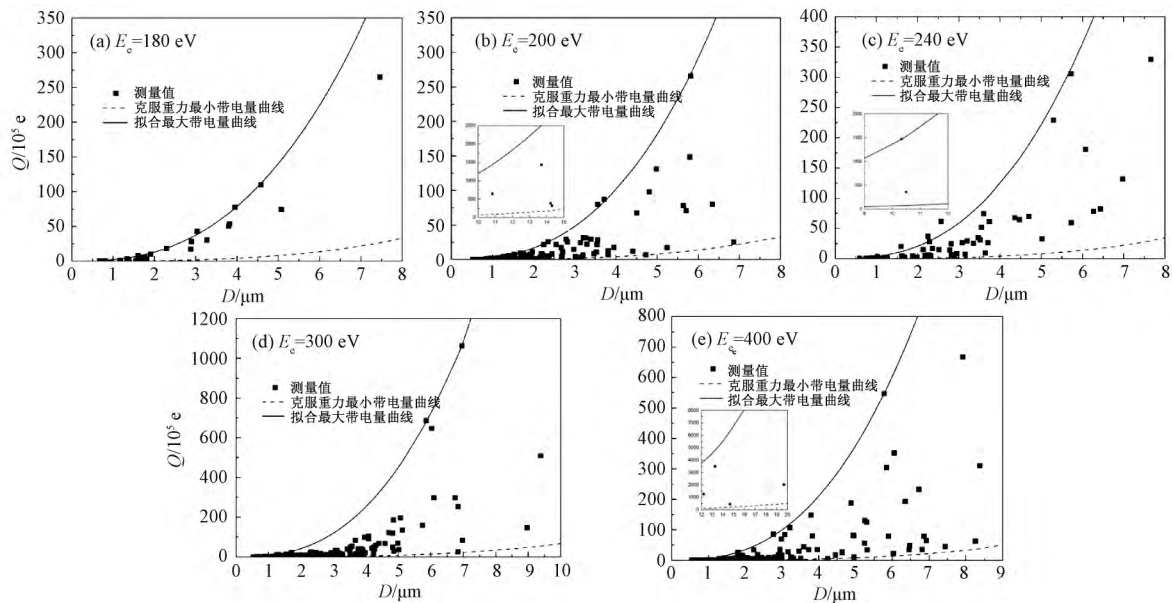


图3 不同电子能量辐射下辉石颗粒的带电特征: 实验过程中多普勒系统的焦点位于样品上方 6 mm 处 ($h=6$ mm), 电场强度可以根据实验测得样品台的电势 (1 V) 计算得出 $E=41.38$ V/m

Fig.3. Charging characteristics of pyroxene particles under conditions of various electron energy radiation.

In the experiment, the focus of the Doppler system is 6 mm above the sample ($h=6$ mm), and the intensity of electric field can be calculated based on the measured electric potential of sample holder, with result of 41.38 V/m ($E=41.38$ V/m).

现实情况相符,亦即颗粒发生带电运动必须满足其所受向上电场力大于重力;运动颗粒带电量随着颗粒增大均呈现迅速增大的趋势,同时相同大小颗粒的带电量差异也变得更为明显。带电量随着颗粒变大而增大是由于大颗粒具有更大的表面积,容易沉积更多的电荷,同时在达到饱和电荷密度时其所带绝对电荷量会更大。相同大小颗粒的较大带电量差异是由于部分颗粒,尤其是位于最表面的颗粒在没有达到饱和电荷密度时就克服重力的约束产生运动,而部分下层颗粒则可能积累更多的电荷,接近或达到饱和电荷密度后才产生运动。根据实验数据统计,微米级颗粒的带电量

约在 $10^5 \sim 10^8 e$ 之间,最大带电量与颗粒大小和辐射电子能量有关。

2.1 颗粒的最大吸附带电量

为了讨论颗粒最大吸附带电量 (Q_{max}) 与颗粒大小 (D) 的关系,排除非饱和电荷密度颗粒的影响。本研究根据实际测量带电量 (Q_m) 和克服重力所需的理论最小带电量 (Q_{min}) 定义颗粒的充电系数 (α):

$$\alpha = Q_m / Q_{min} \quad (4)$$

根据不同颗粒大小区间选取 α 最大的 5~8 个数据分析,通过拟合发现在颗粒粒径小于 $10 \mu\text{m}$

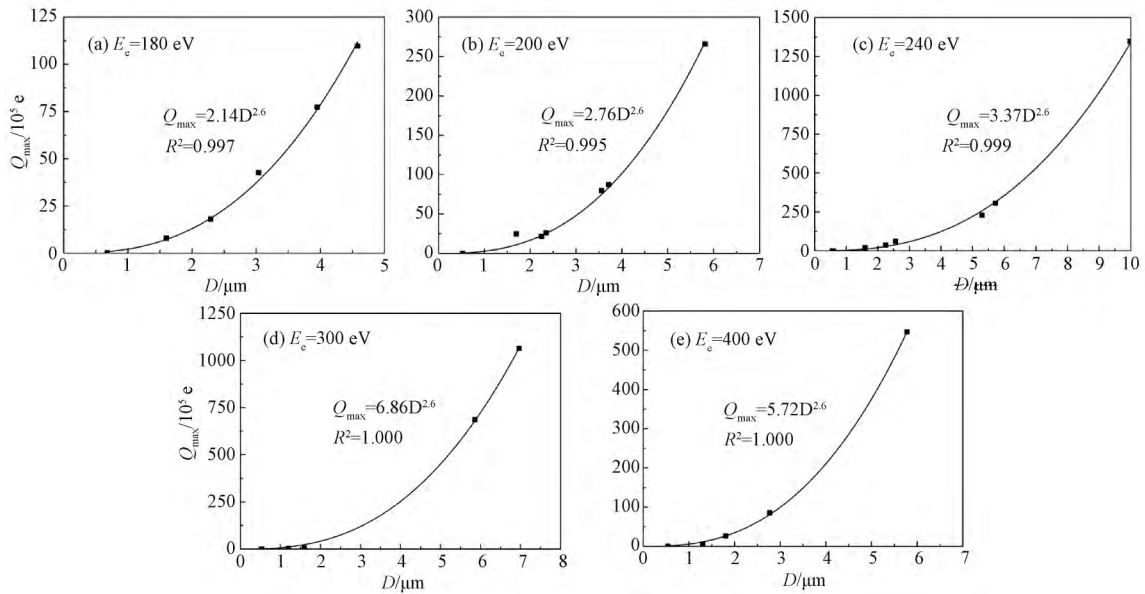


图 4 不同电子能量辐射下辉石颗粒的最大带电量与颗粒大小的拟合关系

Fig.4. The fitted exponential relationships between the maximum charged quantity and the size of pyroxene particles under conditions of various electron energy radiations.

时 Q_{max} 和 D 之间存在幂指数相关性(图 4), 具有以下函数关系:

$$Q_{max} = CD^{2.6} \quad (5)$$

式中 C 为拟合常数, 与辐射电子的能量有关。

2.2 颗粒最大带电量模型

根据 Q_{max} 与 D 的拟合结果看出, 拟合系数与辐射电子能量相关, 对应 E_e 为 180、200、240、300 和 400 eV 时, 其系数分别为 2.14、2.76、3.37、6.86 和 5.72。利用多项式拟合得出系数 C 与电子能量(E_e) 的关系(图 5):

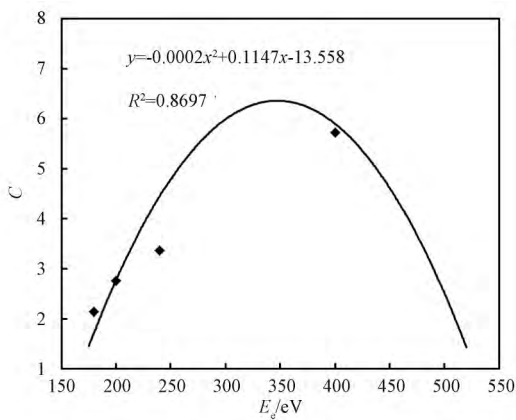


图 5 拟合系数 C 与辐射电子能量的关系
Fig.5. A fitted relationship between coefficient C and electron energy.

$$C(E_e) = -0.0002(E_e)^2 + 0.1147E_e - 13.558 \quad (6)$$

由公式(5)和(6), 可以得到辉石颗粒关于颗粒大小和辐射电子能量的模型,

$$Q_{max}(E_e, D) = \left[-0.0002(E_e)^2 + 0.1147E_e - 13.558 \right] D^{2.6} \quad (7)$$

根据模型对小于 10 μm 的辉石颗粒在辐射电子能量为 180~400 eV 时的最大带电量进行数值模拟, 发现颗粒的最大带电量在颗粒较大, 电子能量为约为 300 eV 时达到最大(图 6)。

2.3 带电颗粒的静电迁移高度

在实际月球表面, 带电颗粒在月面电场的作用下产生迁移运动, 而月面电场强度则由月面电

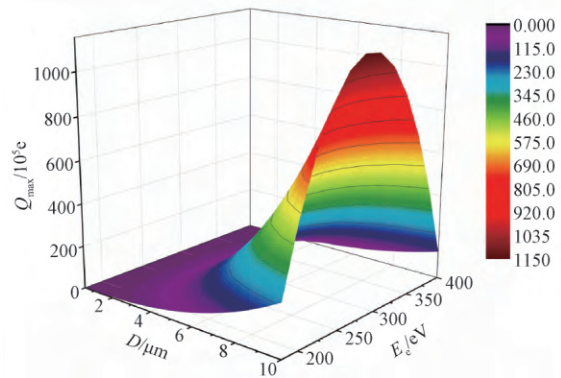


图 6 Q_{max} 模型数值模拟结果
Fig.6. Theoretical simulated results of the Q_{max} model.

势和等离子鞘厚度决定。在等离子鞘内部,带电颗粒受电场力作用产生向上的加速度,而当带电颗粒穿越等离子鞘后,受重力作用减速运动,最后回落到月面。因此,带电颗粒在月球表面的最大迁移高度(H)由等离子鞘厚度(H_D)和减速运动高度(H_S)构成,可表示为:

$$H = H_D + H_S = \frac{6QU}{mg} \quad (8)$$

式中, U 为月面电势, m 为带电颗粒质量。

研究表明,在月球表面较低层(几百米高度以内)存在大量由月面物质激发的光电子,其在背阳面形成厚度约为10~250 m的离子鞘^[30-31]。月球勘探者号探测结果表明,月球夜晚月表形成的绝对电势约为-100 V^[29]。根据上述结果,以等离子鞘厚度为10 m,月面电势为-100 V为参数,实验测量到的带电颗粒在实际月球表面的迁移高度绝大部分小于500 m(图7)。考虑到太阳高能粒子事件,月球夜晚的电势达到-4000 V^[32],绝大部分的带电颗粒最大迁移高度依然小于20 km。因此,在2013年美国的LADEE任务中,LDEX探测器在20 km以上的轨道高度并未探测到明显的尘埃颗粒的静电迁移运动^[33]。另一方面也说明了月球表面的带电尘埃的静电迁移主要发生在近月表空间的几百米范围,对月面巡视器和月基观测设备存在更大的潜在危害。

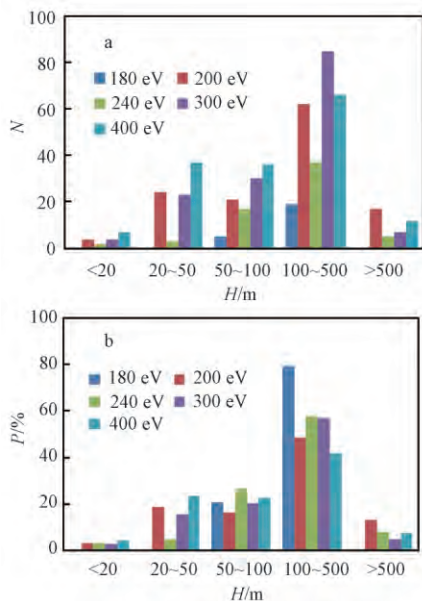


图7 实验测量带电颗粒在实际月表的迁移高度统计

Fig.7. The statistics of the migration heights on the lunar surface for the charged particles measured in the experiment.

3 结 论

通过对辉石粉末的实验研究,发现电子枪辐射模拟的月球等离子环境中微米大小的颗粒带电量约在 $10^5 \sim 10^8 e$ 之间,1~5 μm 的辉石颗粒最容易发生带电运动,产生带电运动颗粒的带电量随着颗粒大小的增大而增大,相近大小的颗粒由于堆积情况不同也存在较大差异。根据辉石颗粒的最大带电量拟合可以得出其最大吸附带电量与颗粒大小成幂指数关系,并与辐射电子能量有关。根据实验数据拟合的 Q_{max} 模型,小于10 μm 的颗粒在辐射电子能量约为300 eV时,大的颗粒所带电荷量最大。根据实验结果和月球表面实际情况推测,带电颗粒的迁移高度约在几百米的尺度,对月面探测和长期月球观测存在较大的影响,在后续工程任务中需要考虑这一空间范围中带电尘埃运动带来的危害。

参 考 文 献:

- [1] Gan H, Li X Y, Wei G F, et al. Work function measurements of olivine: implication to photoemission charging properties in planetary environments[J]. *Advances in Space Research*, 2015, 56(11): 2432-2438.
- [2] Rennilson J J, Criswell D R. Surveyor observations of lunar horizon-glow[J]. *The Moon*, 1974, 10(2): 121-142.
- [3] Stubbs T J, Vondrak R R, Farrell W M. A dynamic fountain model for lunar dust[J]. *Advances in Space Research*, 2006, 37(1): 59-66.
- [4] McCoy J E, Criswell D R. Evidence for a high altitude distribution of lunar dust[M]. New York: Pergamon Press, 1974: 2991-3005.
- [5] Elsässer H, Fechtig H. Interplanetary dust and zodiacal light[M]. New York: Springer, 1976.
- [6] Zook H A, McCoy J E. Large scale lunar horizon glow and a high altitude lunar dust exosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 1991, 18(11): 2117-2120.
- [7] Berg O E, Richardson F F, Burton H. Lunar ejecta and meteorites experiment[M]. Washington D C: NASA, 1973, SP-330.
- [8] Halekas J S, Delory G T, Lin R P, et al. Lunar prospector observations of the electrostatic potential of the lunar surface and its response to incident currents[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2008, 113(A9): A09102.
- [9] Grün E, Horanyi M, Sternovsky Z. The lunar dust environment[J]. *Planetary and Space Science*, 2011, 59(14): 1672-1680.
- [10] Mateo-Velez J C, Sarraillh P, Hess S, et al. Lunar dust migration by electrostatic charging: numerical modelling[M]. Texas: LPI, 2015: 1792.

- [11] Grossman J J , Ryan J A , Mukherjee N R , et al. Micro-chemical, microphysical and adhesive properties of lunar material [M]. New York: Pergamon Press ,1970: 2171.
- [12] Gaier J R , Berkebile S P. Implications of adhesion studies for dust mitigation on thermal control surfaces [J]. *New European Union* ,2013 ,51(1) : 55-57.
- [13] Mendis D A , Rosenberg M. Cosmic dusty plasmas [J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* ,1994 ,32: 419-463.
- [14] Kimura H , Mann I. The electric charging of interstellar dust in the solar system and consequences for its dynamics [J]. *The Astrophysical Journal* ,1998 ,499(1) : 454-462.
- [15] Ma Q Y , Matthews L S , Land V , et al. Charging of aggregate grains in astrophysical environments [J]. *The Astrophysical Journal* ,2013 ,763(2) : 77-85.
- [16] Borisov N D , Zakharov A V. Electrostatic charging and motion of dust near the surface of an asteroid [J]. *Solar System Research* ,2014 ,48(1) : 22-32.
- [17] Mitchell C J , Horányi M , Haves O , et al. Saturn's spokes: lost and found [J]. *Science* ,2006 ,311(5767) : 1587-1589.
- [18] Abbas M M , Tankosic D , Craven P D , et al. Lunar dust grain charging by electron impact: complex role of secondary electron emissions in space environments [J]. *The Astrophysical Journal* ,2010 ,718(2) : 795-809.
- [19] Němeček Z , Pavlí J , Šafránková J , et al. Lunar dust grain charging by electron impact: dependence of the surface potential on the grain size [J]. *The Astrophysical Journal* ,2011 ,738(1) : 14.
- [20] Heiken G , Vaniman D , French B M. Lunar sourcebook - a user's guide to the moon [M]. Cambridge: Cambridge University Press ,1991.
- [21] Brownlee D E. Cosmic dust: building blocks of planets falling from the sky [J]. *Elements* ,2016 ,12(3) : 165-170.
- [22] Flynn G J , Nittler L R , Engrand C. Composition of cosmic dust: sources and implications for the early solar system [J]. *Elements* ,2016 ,12(3) : 177-183.
- [23] Jaeger C , Mutschke H , Begemann B , et al. Steps toward interstellar silicate mineralogy. I: laboratory results of a silicate glass of mean cosmic composition [J]. *Astronomy and Astrophysics* ,1994 ,292: 641-655.
- [24] Johnson S W , Taylor G J , Wetzel J P. Environmental effects on lunar astronomical observatories [M]. Houston: Johnson Space Center ,1992: 329-335.
- [25] Liu Y , Taylor L A. Characterization of lunar dust and a synopsis of available lunar simulants [J]. *Planetary and Space Science* ,2011 ,59(14) : 1769-1783.
- [26] Sharma J , Gahlot A , Sharma S C , et al. Effect of dust charge fluctuations on upper hybrid wave instabilities in magnetized dusty plasma [M]. New Delhi: Jawaharlal Nehru University ,2014: 1460350.
- [27] 沈熊,魏乃龙,彭涛. 应用激光相位-多普勒系统测量雾化液滴颗粒和流动特性 [J]. *流体力学实验与测量* ,2000 ,14(2) : 54-60.
- [28] Horányi M , Walch B , Robertson S , et al. Electrostatic charging properties of Apollo 17 lunar dust [J]. *Journal of Geophysical Research* ,1998 ,103(E4) : 8575-8580.
- [29] Halekas J S , Lin R P , Mitchell D L. Large negative lunar surface potentials in sunlight and shadow [J]. *Geophysical Research Letters* ,2005 ,32(9) : L09102.
- [30] 丁锋,万卫星. 月球电离层探测与研究 [J]. *地球化学* ,2010 ,39(1) : 11-14.
- [31] Freeman J W , Ibrahim M. Lunar electric fields , surface potential and associated plasma sheaths [J]. *The Moon* ,1975 ,14(1) : 103-114.
- [32] Halekas J S , Delory G T , Lin R P , et al. Lunar prospector observations of the electrostatic potential of the lunar surface and its response to incident currents [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* ,2008 ,113(A9) : A09102.
- [33] Horányi M , Szalay J R , Kempf S , et al. A permanent , asymmetric dust cloud around the Moon [J]. *Nature* ,2015 ,522(7556) : 324-326.