



## 运动颗粒流中的摩擦起电

孙旗霞 庄建宏 刘百诚 沈振兴

### Triboelectrification in moving particle flow

Sun Qi-Xia Zhuang Jian-Hong Liu Bai-Cheng Shen Zhen-Xing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 084501 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211647

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211647>

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

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

颗粒物质内自旋小球运动行为的数值模拟研究

Numerical simulation of a spinning sphere moving in granular matter

物理学报. 2018, 67(1): 014702 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171459>

月表尘埃颗粒带电的机理及应用研究

Charging mechanism and application of lunar dust grains

物理学报. 2018, 67(13): 135201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180047>

纳米颗粒布朗扩散边界条件的分子动力学模拟

Molecular dynamics simulation of Brownian diffusion boundary condition for nanoparticles

物理学报. 2021, 70(14): 148201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202240>

带电纳米颗粒与相分离的带电生物膜之间相互作用的分子模拟

Molecular simulation of interaction between charged nanoparticles and phase-separated biomembranes containing charged lipids

物理学报. 2019, 68(2): 028701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181891>

对利用动态光散射法测量颗粒粒径和液体黏度的改进

Improvement of dynamic light scattering method for measurement of particle diameter and liquid viscosity

物理学报. 2018, 67(16): 167801 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180271>

水中颗粒孔洞流的最大休止倾角和流量公式

Maximum ceasing angle of inclination and flux formula for granular orifice flow in water

物理学报. 2020, 69(10): 104501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200217>

## 运动颗粒流中的摩擦起电\*

孙旗霞<sup>1)</sup> 庄建宏<sup>2)†</sup> 刘百诚<sup>3)</sup> 沈振兴<sup>3)</sup>

1) (沈阳理工大学装备工程学院, 沈阳 110159)

2) (兰州空间技术物理研究所, 空间环境材料行为及评价重点实验室, 兰州 730000)

3) (燕山大学, 河北省重型装备与大型结构力学可靠性重点实验室, 秦皇岛 066004)

(2021年9月5日收到; 2021年12月27日收到修改稿)

绝缘颗粒系统的摩擦带电现象是一种普遍现象, 但至今仍未得到很好的认识. 月球及火星表面漂浮着大量尘埃颗粒, 这将严重影响探测设备的太阳能帆板、散热和观察系统等的工作. 近年来, 电帘除尘方法被认为是在月表进行尘埃防护的有效手段, 研究表明颗粒表面摩擦带电对月尘静电来源贡献最大, 因此正确理解颗粒摩擦带电的机理对分析尘埃颗粒的运动规律至关重要. 本文建立了一个基于高能态电子假定的分析模型来预测颗粒间的摩擦电荷分布. 计算了颗粒摩擦生电与颗粒粒度的依赖关系, 以及粒度范围对摩擦电荷产生的概率大小的影响. 揭示了电荷分布的一个上限, 并讨论了可能的原因. 对粒子碰撞过程中的电荷转移进行了粒子动力学模拟, 验证了理论预测结果.

**关键词:** 摩擦带电, 绝缘颗粒系统, 高能态电子, 颗粒动态模拟

**PACS:** 45.70.-n, 45.50.-j, 83.10.Pp

**DOI:** 10.7498/aps.71.20211647

## 1 引言

自然界中, 绝缘颗粒系统内部颗粒的摩擦带电是一种非常普遍的自然现象, 如在沙尘暴以及火山喷发过程中, 经常会发现强大的电场存在<sup>[1-4]</sup>. 除了这些自然现象之外, 在工业生产过程中, 摩擦生电的现象也屡见不鲜, 比如药品粉末的扩散、除尘、以及颗粒的提取和分离等<sup>[5-7]</sup>过程中, 都会存在摩擦生电. 因此弄清颗粒流带电机理对工业生产以及环境保护等都有着十分重要的意义. 此外, 月球及火星表面漂浮着大量尘埃颗粒, 这将严重影响探测设备的太阳能帆板、散热和观察系统等的工作. 月尘颗粒所带的电量主要来源是太阳风、自身相互摩擦、光电效应以及从光散射表面得到电子, 具有随机分布特点. Sickafoose等<sup>[8]</sup>的分析表明, 比起光电效应等诸多因素, 摩擦带电是颗粒带

电最重要的来源, 在颗粒最终带电量中占主导地位. 近年来电帘除尘方法被认为是在月表进行尘埃防护的有效手段, 尘埃颗粒在电帘表面受到库仑力, 介电泳力以及黏附力等的综合作用而发生运动, 研究表明库仑力是尘埃颗粒发生运动的主要驱动力, 因此对尘埃颗粒流的带电机理的研究很有必要.

近年来, 越来越多的研究工作投入到在颗粒流系统中建立颗粒尺寸大小与颗粒带电量的关系. 然而大多数的工作都集中在实验研究, 而缺乏理论支持<sup>[9-12]</sup>. 摩擦生电的理论知识并不被人们所充分研究, 早些时候提出的表面能理论<sup>[13]</sup>和温差理论<sup>[14]</sup>很难解释同种材料摩擦也能带电的现象以及颗粒群在摩擦生电过程中会出现随粒径极化的现象. 为了解决这一难题, Lowell等<sup>[14]</sup>提出了高能态电子理论的假设, 指出摩擦生电是由于两个接触表面之间电子的不平等交换所引起. 基于这个理论模型, 一些学者<sup>[10,11,15]</sup>结合硬球模型提出了可以解释同

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11702241) 和中国航天科技集团科技创新项目 (批准号: JTKJ2019051001) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhuangjianhong@spacechina.com

种材料之间摩擦生电的高能态束缚电子理论模型, 该模型可以很好地解释颗粒流系统的带电机制和“大颗粒带正电, 小颗粒带负电”这一现象.

本文在高能态电子假定的基础上, 进一步分析了颗粒带电量与粒径分布的关系, 发展了 Lack 模型, 给出了平均意义下颗粒的摩擦带电量随颗粒半径的变化规律. 通过考虑颗粒间的速度分布, 得到了颗粒系统中颗粒间的电荷分布, 给出了电荷分布的一个上限, 并讨论了可能的原因.

## 2 理论模型

本文所考虑的颗粒摩擦传电的理论分析都是基于高能态电子理论展开的. 高能态电子理论是基于 Lowell 和 Truscott<sup>[14]</sup> 在 1986 年提出的电子能态假设, 其认为受自然界辐射、高温等作用, 材料表面的电子既有处于稳定状态的低能态电子, 又有处于不稳定状态的高能态电子. 对于绝缘材料的颗粒, 同一个颗粒表面上的高能态电子受到束缚不能直接转变为低能态电子. 当颗粒与另一个颗粒发生碰撞摩擦时, 两颗粒的间距足够小, 一个颗粒表面的高能态电子能够在界面间向另一个颗粒表面转移, 变成稳定的低能态电子, 在以后的碰撞中不能再次发生转移, 即这种电子转移仅限于高能态向低能态的转移. 低能态到低能态、低能态到高能态、以及高能态到高能态之间是不发生电子转移的. 因此, 在碰撞过程中, 每一个颗粒在得到电子的同时又传递给其他颗粒一部分自己的高能态电子, 颗粒的最终带电量取决于颗粒失去的与得到的电子的差值.

下文将利用高能态电子理论分析颗粒碰撞摩擦时的电荷转移. 假定不同尺寸的颗粒表面的高能态电子密度一致, 考虑在一个体积为  $V$  的空间中包含  $N$  个不同尺寸球形颗粒的颗粒系统, 颗粒的半径为  $r_i$ , 表面高能态电子密度为  $\rho_0$ , 则半径为  $r_i$  的颗粒的表面高能态电子数为  $4\pi r_i^2 \rho_0$ , 这些高能态电子在与其他  $N-1$  个颗粒碰撞过程中转变为低能态电子, 分配到其他  $N-1$  个颗粒上. 在碰撞过程中, 高能态电子从第  $i$  个颗粒转移到第  $j$  个颗粒的概率与第  $i$  个颗粒和第  $j$  个颗粒碰撞的概率有关. 如果用  $p_{i,j}$  表示第  $i$  个颗粒与第  $j$  个颗粒发生碰撞的概率,  $P_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N p_{i,j}$  表示所有与第  $i$  个颗粒

发生碰撞的概率, 则有

$$f_{i,j} = p_{i,j}/P_i, \quad (1)$$

其中,  $f_{i,j}$  是颗粒  $i$  的所有碰撞的颗粒中包含颗粒  $j$  的概率, 即颗粒  $i$  的高能态电子数转移到颗粒  $j$  上的比例. 同样, 颗粒  $j$  的所有碰撞中包含颗粒  $i$  碰撞的概率:

$$f_{j,i} = p_{j,i}/P_j. \quad (2)$$

对于颗粒  $i$ , 由于碰撞可以失去的高能态电子数为  $4\pi r_i^2 \rho_0$ , 得到的电子数为  $\sum_{j=1, j \neq i}^N 4\pi r_j^2 \rho_0 (p_{j,i}/P_j)$ , 可得到颗粒  $i$  最终的带电量:

$$Q_i = - \left( \sum_{j=1, j \neq i}^N 4\pi r_j^2 \rho_0 (p_{j,i}/P_j) - 4\pi r_i^2 \rho_0 \right). \quad (3)$$

确定在整个颗粒系统中颗粒  $i$  与颗粒  $j$  发生碰撞的概率  $p_{i,j}$  的值时, 根据 Lack 等<sup>[9,13,15]</sup> 的理论, 如图 1 所示, 颗粒  $i$  在有限的时间间隔  $\Delta t$  内以速度  $v$  运动, 如果颗粒  $i$  与颗粒  $j$  发生碰撞, 则颗粒  $j$  与颗粒  $i$  的距离应小于  $r_i + r_j$ , 那么在  $\Delta t$  时间段内, 颗粒  $i$  和颗粒  $j$  在颗粒  $i$  扫掠出的体积  $\pi (r_i + r_j)^2 v \Delta t$  内都可能发生碰撞. 而颗粒  $j$  位于该体积内的概率为  $\pi (r_i + r_j)^2 v \Delta t / V$ , 该概率就是颗粒  $i$  与颗粒  $j$  发生碰撞的概率  $p_{i,j}$ . 对其求和便可得到所有碰撞中包含与颗粒  $i$  发生碰撞的概率, 即

$$p_{i,j} = \pi (r_i + r_j)^2 v \Delta t / V, \quad (4)$$

$$P_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N p_{i,j} = \sum_{j=1, j \neq i}^N \pi (r_i + r_j)^2 v \Delta t / V. \quad (5)$$

因此, 颗粒  $i$  最终的平均带电量为

$$Q_i = -4\pi \rho_0 \left( \sum_{j=1, j \neq i}^N M_{i,j} r_j^2 - r_i^2 \right), \quad (6)$$

其中,  $M_{i,j} = p_{j,i}/P_j = (r_i + r_j)^2 / \sum_{i=1, i \neq j}^N (r_i + r_j)^2$ , 从 (6) 式得知, 颗粒的最终带电量与颗粒碰撞速度和时间间隔无关, 而取决于比值  $p_{i,j}/P_i$  的大小. 在这种情况下, 颗粒的平均带电量完全由其半径确定, 注意到颗粒半径是任意的, 同种半径的颗粒可以有多个, 可以得到颗粒的摩擦平均带电量随半径的变化规律. 不难看出, 如果颗粒总数量足够大, 那么  $M_{i,j}$  的值趋向于  $1/(N-1)$ , 因此经过简化之后, 颗粒  $i$  最终的平均带电量为

$$Q_i = -4\pi \rho_0 \frac{1}{N-1} \sum_{j=1, j \neq i}^N r_j^2 + 4\pi \rho_0 r_i^2, \quad (7)$$

(7) 式第一项是除颗粒  $i$  以外的其他颗粒的平均表面积, 第二项是颗粒  $i$  自身的表面积. 显然当某个颗粒的表面积大于颗粒的平均表面积时, 该颗粒通常会带正电; 反之, 表面积相对较小的颗粒更容易带负电. 因此 (7) 式能更好地解释颗粒群在摩擦生电过程中出现的“大颗粒带正电, 小颗粒带负电”的现象, 并从平均意义上给出了颗粒极化的正、负分界点.

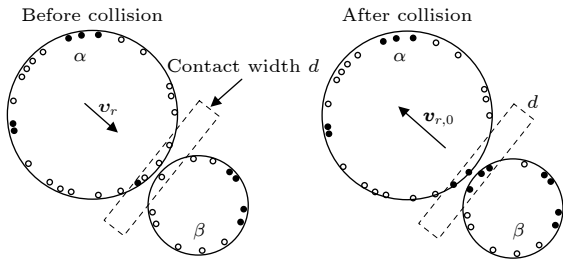


图 1 二维情形下碰撞前后颗粒高能态电子在接触面处发生转移转化为稳定低能态电子的过程 (图中黑点为高能态电子, 黑圈为低能态电子)

Fig. 1. In the two-dimensional case the high-energy electrons of particles transfer to stable low-energy electrons at the interface before and after collision (the black dots are high energy electrons, the black circles are low energy electrons).

讨论颗粒碰撞的过程中忽略了碰撞速度的影响, 分析得到的是颗粒流碰撞过程中的平均带电量. 在某个时间间隔内, 如果两个颗粒以相同的速度和方向运动时, 即使扫掠出的体积是  $\pi(r_i + r_j)^2 v \Delta t$ , 也不会发生碰撞. 因此, 两个颗粒之间碰撞的概率不能简单地认为是与两个颗粒扫掠出的体积成比例关系. 考虑到颗粒流中每个颗粒速度的随机性<sup>[16]</sup>, 为了更好地分析颗粒流中摩擦带电量的分布, 可以在模型中引入随机速度, 即在整个颗粒流系统中, 每当有碰撞发生时, 颗粒的碰撞速度是随机分布的. 那么 (4) 式中的速度应该理解为颗粒  $j$  与颗粒  $i$  的相对速度, 即  $v_{i,j} = v_i - v_j$ , 这样引入相对速度后, 颗粒  $j$  与颗粒  $i$  发生碰撞的概率以及所有碰撞中包含与颗粒  $i$  发生碰撞的概率应为

$$p_{i,j} = \pi(r_i + r_j)^2 v_{i,j} \Delta t / V, \quad (8)$$

$$P_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N p_{i,j} = \sum_{j=1, j \neq i}^N x_j \pi (R_i + R_j)^2 v_i \Delta t. \quad (9)$$

根据 (8) 式和 (9) 式便可得到具有分散形式的

颗粒带电量分布. 然而在整个颗粒流系统中, 某个颗粒的运动速度会随碰撞的发生而频繁地发生变化, 很难确定该颗粒的运动速度. 研究表明<sup>[17]</sup>, 对于一个颗粒流系统来说, 颗粒运动速度的分布趋向于一个稳定分布的模式, 如 Maxwell-Boltzmann 分布等. 因此在本文的计算中, 假定每个颗粒在初始时具有随机的运动速度以及运动方向, 该速度分布服从 Maxwell-Boltzmann 分布. 将 (8) 式和 (9) 式代入 (3) 式, 便可得到颗粒电量随其粒度变化的规律.

### 3 颗粒摩擦带电量的数值模拟

#### 3.1 颗粒间的电荷转移

颗粒离散元方法 (DEM) 是 Cundall 和 Strack 在 1979 年提出的研究非连续性颗粒物质结构和运动规律的一种数值研究方法. 颗粒离散元方法建立于牛顿第二定律的基础上, 分为基于软球和硬球模型的颗粒离散元方法, 前者与冲击速度和冲击粒径有关; 后者较为简单, 无需考虑颗粒间碰撞的接触力, 以动量守恒定律和能量守恒定律为基础. 由于月尘颗粒十分坚硬和尖锐, 月球的表面重力仅为地球的 1/6, 这些尘埃可以在月表数万米高的范围内长时间漂浮, 不断发生相互碰撞而生电, 本文中颗粒碰撞进行的数值模拟都是基于硬球模型建立的, 结合高能态电子理论, 考虑颗粒之间相互碰撞时引起的电荷转移作用, 得到颗粒物质摩擦生电的机理和静电分布规律, 据此计算颗粒在交变电场中所受的库仑力.

基于颗粒之间摩擦带电的高能态电子理论模型以及颗粒碰撞的 DEM 模型, 可建立一个二维颗粒离散元数值模拟程序. 程序中所用的参数与前面分析时的参数相同. 考虑  $N = 1000$  的球形颗粒系统, 程序采用了周期性边界条件, 即当一个颗粒从左边界移出时, 会对应地从右边界进入. 由于碰撞时的表面接触, 每对碰撞颗粒表面上的高能态电子在接触面间转移, 转移后成为稳定的低能态电子, 如图 1 所示. 假定高能态电子在颗粒表面随机分布, 宏观上密度一定. 对于二维颗粒, 根据周长把颗粒分成  $N_{si}$  小段, 设有一个很小的长度  $l_0$ , 程序中任何一个球的周长为  $l_0$  的  $\Gamma_i$  倍, 每段上的高能态电子数为 1 到 10 之间的随机数  $\delta_\gamma$ , 那么每个颗粒初始拥有可用来交换的电子数为  $\sum \delta_\gamma$ . 由于  $\delta_\gamma$  的均值是 5, 可知每个颗粒的高能态电子数

在  $5N_{si}$  上下浮动, 因此颗粒的等效高能态电子密度为  $\rho_0 = 5N_{si}/(l_0N_{si}) = 5/l_0$ . 计算过程中, 定义时间步长  $dt$ , 而两个颗粒之间的距离为  $d_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} - (r_i + r_j)$ .

在程序运行过程中, 如若发现  $d_{i,j} \leq 0$ , 说明两个颗粒已经发生重叠碰撞, 此时重新更新时间步长  $dt = |d_{i,j}|/|v_{i,j}|$ , 发生碰撞的两个颗粒以原来的速度反弹回到刚要发生碰撞的位置. 如果  $d_{i,j} = 0$ , 说明此时的两个颗粒正要发生碰撞. 在每一次碰撞时, 根据碰撞前相对速度的方向, 确定碰撞点是位于哪个方向上的小段. 由于每段长度很小, 根据碰撞前的相对速度大小, 假设存在一个碰撞宽度  $d$ , 在该宽度内的两颗粒表面位于该段内的高能态电子发生交换, 成为对方的低能态电子. 程序的终止条件设定为 99.99% 的高能态电子发生转移.

### 3.2 摩擦带电的分布规律

图 2(a) 给出了颗粒群的平均带电量随粒径变化的规律, 对比图 2(a) 中给出的黑实线与 Lack 等 [9,15] 的模拟结果发现, 两者吻合得很好. 图 2(a) 中还给出了当颗粒群中大尺寸颗粒比例相对较多或者小尺寸颗粒比例相对较多时, 颗粒的平均带电量随粒径的变化规律. 结果表明, 当大尺寸颗粒比例较大时, 带上负电的颗粒会相对较多. 反之, 当小尺寸的颗粒比例较多时, 带上正电的颗粒就会相对较多. 这是因为在颗粒群中, 当大尺寸颗粒较多时, 小颗粒从大颗粒中得到的高能态电子的机会就会越多, 积少成多, 带负电的小颗粒就会越来越多. 从 (7) 式可以看出, 当颗粒群中每个尺寸的颗粒比例相同时, 颗粒的摩擦带电量分布将会在半

径为  $(\sum_{j=1, j \neq i}^N r_j^2)/(N-1)$  处为分界点, 半径大于  $(\sum_{j=1, j \neq i}^N r_j^2)/(N-1)$  的颗粒带正电, 反之则带负电. 图 2(a) 中的圆圈略有偏差是由于  $M_{i,j}$  比  $1/(N-1)$  略大.

图 2(b) 中, 考虑了速度的随机任意分布, 曲线给出的是平均意义下每种尺寸颗粒的带电量随粒径的变化规律, 圆点给出了随机情况下每个颗粒可能的带电情况. 对比图 2(b) 中的曲线和圆点可以看出, 尽管具有相同半径的颗粒, 其摩擦带电的分布是分散的, 整个颗粒群的摩擦电荷分布的趋势仍与平均意义下带电量随粒度变化的规律一致.

从图 2(b) 还可以揭示颗粒群中摩擦带电的两个特征: 首先是高能态电子在大颗粒与小颗粒之间的转移是非平衡的. 对于一组具有某特定半径的颗粒, 如果其半径很小, 则很难带上正电荷. 这是由于小尺寸颗粒初始时带有的高能态电子总数很少, 能够失去的电子是确定的且与表面积有关, 而能够获取的电子总数是不受限制的, 只要周边有高能态电子就有机会获取. 另一个特征是, 即使一个颗粒在颗粒群中属于最大的类别, 其最终的带电量也可能是负数. 大尺寸的颗粒即使在“定向”地向小尺寸颗粒转移高能态的电子, 但对于某些“幸运”的大颗粒, 仍然有可能从其他大颗粒表面得到比自己失去数要多的电子, 从而最终带上负电. 因此, 那些最终带有最多正电荷的大尺寸颗粒, 是同时“非平衡”地向小尺寸颗粒转移了很多电子, 又“不巧”从其他大颗粒得到了部分电子.

图 3(a) 所示为不同粒度范围的颗粒群系统摩擦带电量的分布概率. 如果在一个颗粒群系统中, 最小的颗粒与最大的颗粒差别不明显, 如 2—5  $\mu\text{m}$ ,

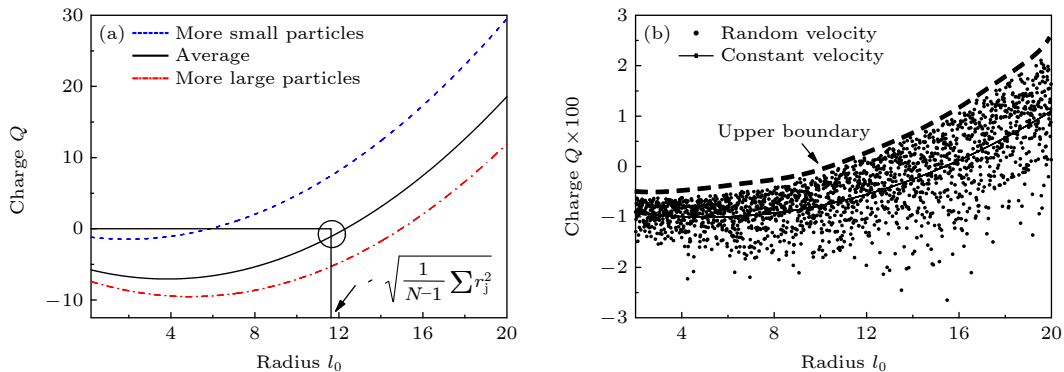


图 2 (a) 不同粒径分布下, 平均摩擦电荷随粒径的变化规律; (b) 考虑任意速度时颗粒间的摩擦电荷分布

Fig. 2. (a) The average tribo-charge variation when increasing of the particle size for different size distributions; (b) the tribo-charge distribution among particles considering the arbitrary velocity.

可以发现摩擦电荷的最大值很小,如图中黑实线所示,很大比例的颗粒带电量都为0.如果增大粒度范围,如2—20  $\mu\text{m}$ ,颗粒的最大带电量明显增加,电荷的分布曲线变得更宽广,更大比率的颗粒带正电或负电.可以想象,对于一个所有颗粒都具有同样尺寸的系统,只有极少部分的颗粒会带上少量的电荷.而这并不意味着高能态电子没有在同尺寸颗粒间转移,只是同尺寸颗粒彼此得、失电子的能力接近,很难大量出现得或失电子占很大优势的颗粒.在颗粒流系统中,当颗粒半径范围相同时,如果大颗粒的含量较高,那么就会有更多的颗粒带电,图3(b)给出了颗粒尺寸比例不同时,颗粒带电量的概率分布.

根据上述讨论,可以看出颗粒的尺寸是影响颗粒最终摩擦带电量的主要因素,图2(b)中的虚线表示颗粒摩擦带电量的分布存在上限,这就意味着相同尺寸的颗粒碰撞摩擦带电量存在着一个极限值.假定初始受限的高能态电子数量与颗粒表面积

成正比,那么在碰撞过程中得到电子数越多的颗粒最终带电量就会越低.也就是说,在碰撞过程中颗粒得到的电子数不会低于某一个特定值.但是颗粒能得到的最大电子数目是有限制的,因此颗粒最终摩擦带电量的下边界是模糊的,这个特性对于通过电场来控制颗粒的运动非常有意义.

此外,文中还计算了二维情况下颗粒流系统中颗粒的最终带电量,如图4(a)所示.由于颗粒的表面积与半径成正比,从图中可以看出颗粒的带电量随半径的增大而线性变化.与图2(b)类似,得到了一个上边界,其存在原因非常复杂,但颗粒的最终带电量与颗粒间发生碰撞的次数息息相关,图4(b)给出了颗粒流中发生碰撞次数随颗粒尺寸的变化规律,如果一个颗粒发生碰撞的次数很少,那么得到高能态电子的概率就会越小.在模拟碰撞的过程中,一些颗粒可能很“不幸”地碰撞到了已经失去过高能态电子的其他颗粒,那么它的最终带电量也是不会发生变化的,因此存在着图4(a)中的上边界.

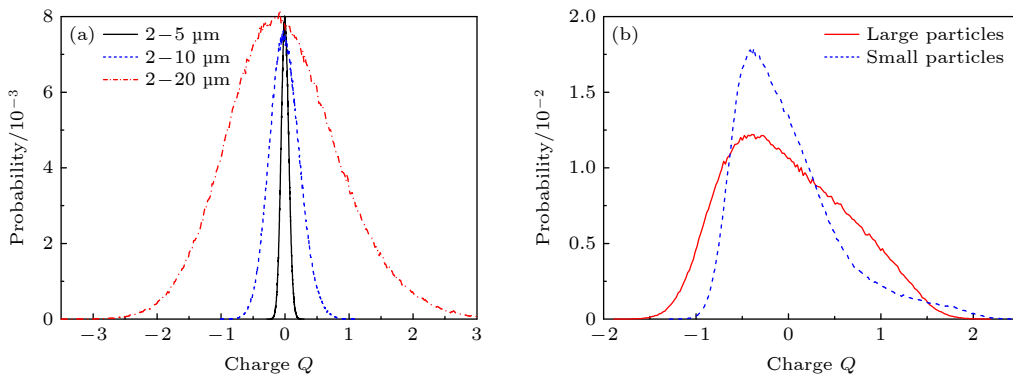


图3 (a) 不同粒度范围颗粒系统的摩擦电荷分布; (b) 不同体积密度的大颗粒和小颗粒体系的摩擦电荷分布

Fig. 3. (a) The tribo-charge distributions in granular systems with different particle size range; (b) the tribo-charge distribution in granular systems with different volume density for large particles and small particles.

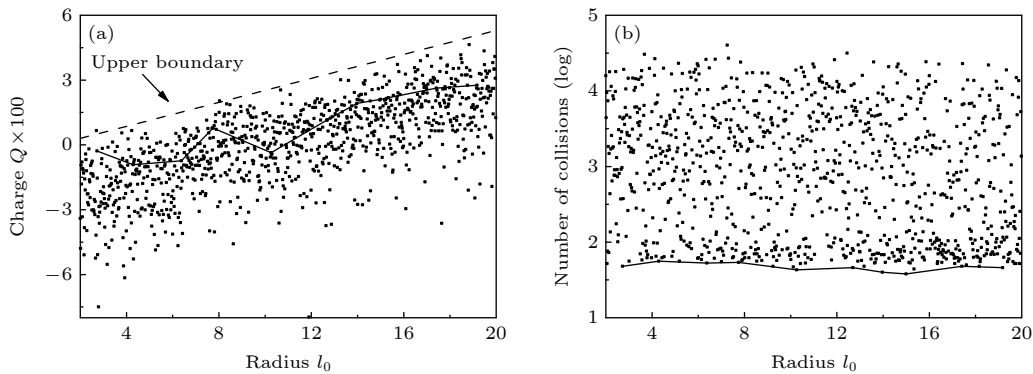


图4 (a) 二维平面碰撞时颗粒流系统中颗粒的最终带电量; (b) 颗粒流中的碰撞次数随颗粒尺寸的变化规律

Fig. 4. (a) The simulated randomly tribo-change dispersion in two-dimensional granular systems; (b) the number of collisions undergone by particles as a function of particles size.

## 4 结 论

基于高能态电子理论假设,研究了颗粒流系统中摩擦带电量的分布情况,扩展了高能态电子理论的解析模型来预测颗粒流系统中的摩擦生电现象.基于颗粒之间的硬球碰撞模型,考虑到颗粒碰撞速度的随机性,给出了平均意义下颗粒的摩擦带电量随颗粒半径的变化规律.结果表明颗粒大小差异越大,颗粒的带电量就越大;颗粒半径范围相同时,大颗粒含量越高,颗粒带电量越大.此外还通过颗粒动态模拟程序研究了在颗粒碰撞过程中电荷的具体转移量,得到的结果与理论分析模型预测的结果吻合.尽管颗粒系统中单个颗粒的具体带电量无法准确预测,但在本文最后分析给出了其因摩擦带电可能具有的电荷的上限值.

## 参考文献

[1] Gilbert J S, Lane S J, Koyaguchi T, Sparks R S J 1991

*Nature* **349** 598

- [2] Stow C D 1969 *Weather* **24** 134  
 [3] Mills A A 1977 *Nature* **268** 614  
 [4] Eden H F, Vonnegut B 1973 *Science* **180** 962  
 [5] Calle C I, Mazumder M K, Immer C R, Buhler C R, Clements J S, Lundeen P, Chen A, Mantovani J G 2008 *J. Phys.* **142** 012073  
 [6] Kawamoto H, Hasegawa N 2004 *J. Imaging Sci. Techn.* **48** 404  
 [7] Watanabe H, Ghadiri M, Matsuyama T, Ding Y L, Pitt K G, Maruyama H, Matsusaka S, Masuda H 2007 *Int. J. Pharm.* **334** 149  
 [8] Sickafoose A A, Colwell J E, HoraiNy M, Robertson S 2001 *J. Geophys. Research: Space Phys.* **106** S343  
 [9] Lacks D J, Levandovsky A 2007 *J. Electrostat.* **65** 107  
 [10] Lacks D J, Duff N, Kumar S K 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 188305  
 [11] Forward K M, Lacks D J, Sankaran R M 2009 *J. Geophys. Res-Space* **114** A10109  
 [12] Hu W W, Li X, Zheng X J 2012 *Eur. Phys. J. E* **35** 1  
 [13] Kok J F, Lacks D J 2009 *Phys. Rev. E* **79** 051304  
 [14] Lowell J, Truscott W S 1986 *J. Phys. D-Appl. Phys.* **19** 1281  
 [15] Duff N, Lacks D J 2008 *J. Electrostat.* **66** 51  
 [16] Zon R V, Cohen E G D 2006 *J. Stat. Phys.* **123** 1  
 [17] Forward K M 2009 *Ph. D. Dissertation* (Ohio: Case Western Reserve University)

# Triboelectrification in moving particle flow<sup>\*</sup>

Sun Qi-Xia<sup>1)</sup> Zhuang Jian-Hong<sup>2)†</sup> Liu Bai-Cheng<sup>3)</sup> Shen Zhen-Xing<sup>3)</sup>

1) (*School of Institute of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China*)

2) (*Science and Technology on Performance Evaluating in Space Environment  
Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China*)

3) (*Key Laboratory of Mechanical Reliability for Heavy Equipment and Large Structures of  
Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*)

( Received 5 September 2021; revised manuscript received 27 December 2021 )

## Abstract

Triboelectrification in an insulative granular system is a common natural phenomenon, but until now it has not been well understood. The space on the moon or Mars is suffused by a large amount of fine dust. These tiny dust particles are so adhesive that they can easily stick to any exposed surfaces, which may provoke serious problems, such as reducing the efficiency of solar panels, and resulting in the thermal control failure and the false instrument readings. In recent years, dust removal by using an electrodynamic field is considered as an effective method to mitigate dust pollution. Research shows that the triboelectrification on the particle surface contributes most to the electrostatic source of lunar dust. Consequently, the study of the mechanism of triboelectrification is very important in removing dust particles. In this paper, an analytical model based on the high-energy electron hypothesis is developed to predict the triboelectric charge distribution among particles. The particle size dependence of the tribo-charge is obtained, and the influence of the size range on the tribo-charge probability is also demonstrated. An upper limit for the charge distribution is revealed, and its possible cause is discussed. The particle dynamics simulation is carried out to investigate the charge transfer during particle collisions, thereby verifying the prediction results obtained by theoretical analysis.

**Keywords:** triboelectrification, insulative granular system, high-energy state electron, particle dynamics simulation

**PACS:** 45.70.-n, 45.50.-j, 83.10.Pp

**DOI:** [10.7498/aps.71.20211647](https://doi.org/10.7498/aps.71.20211647)

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11702241) and the Independent R&D Project by China Aerospace Science and Technology Corporation (Grant No. JTKJ2019051001).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [zhuangjianhong@spacechina.com](mailto:zhuangjianhong@spacechina.com)