

# 带电塑料梳子吸引纸屑的“跳变”现象\*

张文硕 宋 娇 张 萍

(北京师范大学物理学系 北京 100875)

(收稿日期:2016-11-17)

**摘 要:**用头发摩擦过的塑料梳子带有一定的电荷,将其靠近细小纸屑,距离较远时纸屑纹丝不动,继续移动梳子,发现纸屑开始出现略微的颤动.此时只需将塑料梳子稍作移动,纸屑便被施了魔法一样“噌”地跳上梳子,该过程几乎是在瞬间发生的.分析得到塑料梳子与纸屑之间吸引力的大小与 $r^5$ 成反比,同两个带电物体之间库仑力与 $r^2$ 成反比相比,该吸引力更加依赖于二者的距离,随着距离的减小,力增加得更快,因此出现“跳变”现象.

**关键词:**电荷 极化 电偶极子 纸屑

人教版高中物理教材选修3-1第一节“电荷及其守恒定律”中有这样一段描述:摩擦后的物体所带的电荷有两种,用丝绸摩擦过的玻璃棒所带的电荷是一种,用毛皮摩擦过的硬橡胶棒所带的电荷是另一种.美国科学家富兰克林把前者命名为正电荷,把后者命名为负电荷<sup>[1]</sup>.摩擦后的物体带有一定量的电荷,具有吸引轻小物体的本领.

中学教学时教师通常会让学生尝试这样一个小实验,如图1所示,准备一把塑料梳子(或塑料直尺)和一些细小的纸屑,将梳子用力地在头发上摩擦,然后靠近细小的纸屑,观察会有什么现象发生.学生们可以很直观地看到纸屑被塑料梳子吸引上来.但如果教师引导学生仔细观察纸屑由在桌面上到吸附在梳子上的这一变化过程,会发现如下的奇特现象:将从头发上摩擦过的塑料梳子靠近纸屑,距离较远时纸屑没有任何反应.继续缓慢小心地移动,此时纸屑可能依旧纹丝未动.再次靠近时,发现纸屑开始出现微微的颤动.此时轻轻地将塑料梳子稍作移动,纸屑便像被施了魔法一样“噌”地跳上梳子,该过程几乎是在瞬间发生的.

通常的教学中只是让学生观察摩擦起电后的梳子可以吸引轻小纸屑,并没有引导学生关注这一现

象的细节.发现该奇特现象后,接下来可以引导学生思考,带电梳子吸引纸屑的力究竟有什么样的特点,才导致这一瞬间“跳变”现象的发生呢?经过观察后学生可能会提出猜想,塑料梳子给纸屑的力一定与距离有关,距离越小,力就越大.知道库仑定律的学生可能会提出,塑料梳子给纸屑的力是不是也和距离的平方成反比呢?如果不是,那应该依赖于距离的几次方呢?



图1 塑料梳子吸引轻小纸屑

接下来,我们将进一步探讨带电梳子与纸屑之间相互作用力的本质和大小,揭秘二者相互吸引过程中“跳变”现象的真正原因.

## 1 吸引力的微观解释

轻小纸屑属于电介质,其内部不存在可以自由移动的电子,无法用静电感应去解释所产生的现象<sup>[2]</sup>.

\* 2015年度北京高等学校教育教学改革项目,项目编号:2015-lh02

作者简介:张文硕(1992-),女,在读硕士研究生,研究方向为物理课程与教学论.

通讯作者:张萍(1964-),女,博士,教授,主要从事高等物理教育.

带电塑料梳子吸引轻小纸屑的过程,可以从原子尺度上抽象为图2所示的物理模型.周围没有电场时,纸屑原子的正负电荷中心重合,电偶极矩为零<sup>[3]</sup>,如图2(a)所示.用头发摩擦过的塑料梳子带有负电荷,当不带电的纸屑原子处于粒子 $-Q$ 产生的非匀强电场中时,带负电的粒子会排斥纸屑原子的电子云,吸引其中带正电的原子核,从而导致纸屑原子正负电荷分离,形成了电偶极子,如图2(b)所示.距离 $-Q$ 粒子近的地方场强大,距离它远的地方场强小,因此电偶极子中正电荷受到 $-Q$ 的吸引力 $F_{p^+}$ 大于负电荷受到的排斥力 $F_{p^-}$ ,从而相互吸引,如图2(c)所示.

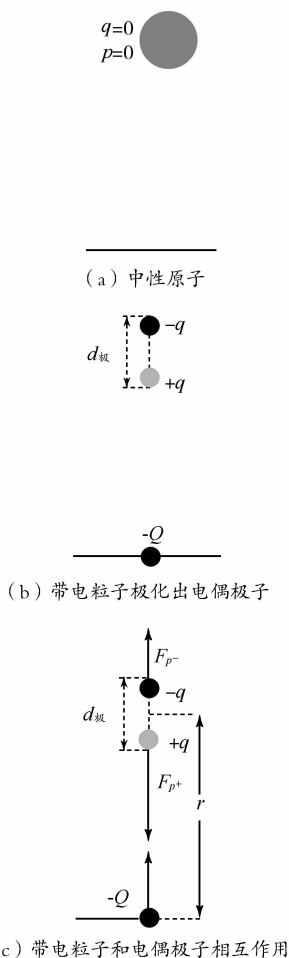


图2 带电粒子与极化出的电偶极子相互作用过程

电介质在外电场中发生如上的极化现象,极化时出现的电荷叫束缚电荷<sup>[3]</sup>.纸屑被带电梳子极化后,在其表面一边有净剩余的正束缚电荷,另一边有净剩余的负束缚电荷.从宏观上来看,纸屑出现了“极性”,靠近带负电梳子的一端为“正极”,远离梳子的一端为“负极”,“正极”受到梳子的吸引力大于

“负极”受到的排斥力,整体上表现出吸引的相互作用,如图3所示.

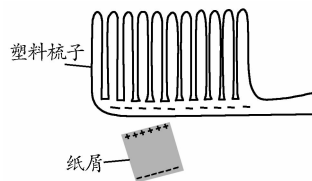


图3 塑料梳子吸引纸屑原理示意图

## 2 梳子吸引纸屑的“跳变”现象

知道了带电梳子吸引纸屑的本质后,下一个问题就是,该吸引力究竟有什么样的规律,才导致“跳变”现象的产生?

回到第1部分的情境中,如果带电粒子施加在极化出的电偶极子正负电荷上的力不是很大,那么该电偶极子电荷间距和所受到电场力的大小成正比,这和“胡克定律”的表达形式十分类似,满足

$$F_e = cd_{极}$$

其中 $c$ 等效于原子的“弹性系数”, $d_{极}$ 为电场“拉伸”出来的电偶极子电荷间距<sup>[4]</sup>.进一步改写成

$$d_{极} = \frac{1}{c}F_e$$

由于偶极矩 $p_{极}$ 与电荷间距 $d_{极}$ 成正比,施加在偶极子上的电场力和偶极子所处位置的场强 $E$ 的大小成正比,得到

$$p_{极} = \alpha E = \alpha k \frac{Q}{r^2} \quad (1)$$

其中 $\alpha$ 是电介质的极化率.

图2(c)中电偶极子受到 $-Q$ 的合力大小 $F_p$ 为

$$F_p = F_{p^+} - F_{p^-} = k \frac{Qq}{\left(r - \frac{d_{极}}{2}\right)^2} - k \frac{Qq}{\left(r + \frac{d_{极}}{2}\right)^2} = k \frac{Qq}{r^2} \left[ \left(1 - \frac{d_{极}}{2r}\right)^{-2} - \left(1 + \frac{d_{极}}{2r}\right)^{-2} \right] \quad (2)$$

当带电粒子与偶极子距离较远,即 $r \gg +\frac{d}{2}$ 时,将式

(2)展开成

$$F_p = k \frac{Qq}{r^2} \left[ \left(1 + \frac{d_{极}}{r}\right) - \left(1 - \frac{d_{极}}{r}\right) \right] = k \frac{Qq}{r^2} \left( \frac{2d_{极}}{r} \right) = \frac{2kQqd_{极}}{r^3} = \frac{2kQp_{极}}{r^3} \quad (3)$$

将极化出来的电偶极矩式(1)代入式(3)中,可

以得到带电粒子施加在极化电偶极子上合力的大小为

$$F_p = 2k \frac{Qp_{\text{极}}}{r^3} = ak^2 \left( \frac{2Q^2}{r^5} \right) \quad (4)$$

由式(4)可以看到,带电粒子和极化电偶极子之间的相互作用力大小与 $r^5$ 成反比,这与两个带电粒子之间库仑力同 $r^2$ 成反比的结果显然不同.

### 3 结果与讨论

带电梳子吸引不带电的轻小纸屑只是一个例子,一切带电体吸引不带电的轻小物体从本质上看都是相同的,即带电物体产生非匀强电场,将电介质极化,使其近端和远端出现异种电荷.带电体对轻小物体近端电荷的吸引力大于对远端电荷的排斥力,从而将轻小物体吸引过来.

经过理论分析发现,带电梳子对轻小纸屑的吸引力的确和距离有关,距离越小,力越大,然而不同于两个带电粒子之间库仑力与 $r^2$ 成反比的规律,带电梳子与纸屑的作用力是与 $r^5$ 成反比的.该相互作用力更加依赖于二者之间的距离,因此出现文章开头所描述的一幕:当纸屑与梳子距离较远时,纸屑纹丝不动.小心地将梳子向着纸屑处移动,此时吸引力再次变大,但还是小于重力,纸屑有少许的颤动.接

着梳子只需略微移动一点儿,力就会以 $r^5$ 的关系迅速增大,如果前一秒钟吸引力还不足以克服重力,那么下一秒钟吸引力就变得足够大,足以将纸屑完全吸起来.正是在这个与 $r^5$ 成反比的吸引力的作用下,才导致了文章开头纸屑的“跳变”现象.可以预想,吸引力与距离的关系中, $r$ 的指数越大,这种“跳变”的现象就会越明显,只不过从实验观察的角度来讲,已经无法用肉眼区别开.

教师可以利用本文提供的素材,引导学生动手操作和观察带电梳子吸引轻小纸屑时“跳变”的现象,通过建立合适的物理模型理解该吸引力的本质,培养学生的科学思维能力.从实验现象出发,深入思考背后蕴含的理论知识,用科学的解释阐释生活中的现象,培养学生从生活中“悟”理,感受物理与生活实际的联系,从而增加学生对物理的兴趣,开阔学生的思维.

### 参考文献

- 1 人民教育出版社.物理选修3-1.北京:人民教育出版社,2010.2
- 2 李茂.带电体吸引轻小物体的物理模型.中国现代教育装备,2011(4):68~69
- 3 梁灿彬.电磁学.北京:高等教育出版社,2004.84~92
- 4 Eric Mazur. Principle & Practice of Physics. Addison-Wesley Professional, 2014:634~638

## The *Jumping* Phenomenon of Paper Shreds Attracted by a Charged Plastic Comb

Zhang Wenshuo Song Jiao Zhang Ping

(Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875)

**Abstract:** A plastic comb rubbing against the hair carries a certain amount of charge. Put the comb near to small scraps of paper. When it's not close enough, paper shreds do not move. Being closer, paper shreds appear slightly fibrillation. At this point if the plastic comb moves a little, paper shreds will jump to the comb instantaneously as magic. After analysis, we know that the attraction between the plastic comb and paper shreds is inversely proportional to the fifth power of the distance. Different from the Coulomb's law, which is inversely proportional to the twice power of the distance, this attraction is more dependent on the distance between the plastic comb and paper shreds. So with the reduction of distance, the attraction increases quickly and the paper suddenly jumps to the comb.

**Key words:** charge; polarization; dipole; paper shreds