

## 静电技术应用专题系列介绍

# 第一讲 静电引起的力学现象及其应用

鲍重光

(北京理工大学应用物理系)

本文从物理的角度,阐述了粒子在静电场作用下的静力学和动力学现象,并对静电除尘、静电喷涂、静电分选以及电帘等工业应用技术进行了介绍。

由静电引起种类繁多的现象当中,放电现象和力学现象占据着最重要的地位。本文拟由静电引起的力学现象入手,简略地介绍其在工业上的若干应用。

从工业应用角度,可以将静电力分成以下几类:(1)库仑力;(2)电象力;(3)转向极化力;(4)梯度力;(5)念珠形成力;(6)约翰孙-拉贝克力;(7)作用于空间电荷上的库仑力等,其中(3),(4),(5),(6)四类均属于极化力的范畴。

静电力的最大特征之一,是通过场来对其它物体施加力的作用。即使在真空、高温、高压、低温的条件下,也可以用非接触方式对带电物体的运动进行控制。

静电力的工业应用首先是在环境保护中发挥重大作用的静电除尘技术。其装置是由集尘极与外加负高压的放电极构成。在两极间加上高电压时,由放电极发生负电晕,产生负的单极性离子,以辐射状移向集尘极而形成离子电流。由于离子电流的存在,使放电极附近的场强下降,集尘极附近的场强增加。含尘空气进入该集尘空间后,粒状物质因碰撞和扩散而带电,在径向受到库仑力的作用,按照牛顿力学的运动方程运动,其整体的运动轨迹将沿着径向。当该力足够大时,粒子将被集尘极收集起来。带电粒子接近电极面时,电象力变大,在它与范德瓦耳斯力及约翰孙-拉贝克力共同作用下,在集尘极壁上形成粒子层。当集尘层的厚度大到一定程度时,采用不同的振、打方式,使粒子层从集尘极表面剥离下来,落到漏斗中去。但是,在场强变化率大的放电极附近,施加于粒子上

的梯度力将大于库仑力,在某种程度上,也将会有粒子附着于放电极,产生所谓放电线肥大现象,它将对电晕放电产生阻碍,因此也必须不断地对放电极进行振打清扫。

此外,静电喷涂也是一种常用的技术。先用喷枪使涂料微粒带上电荷,并在喷枪与工件之间加上电场。带电涂料粒子沿着电力线方向受到电场力的作用而涂于工件。由于作用于粒子上的力为静电力、惯性力与重力的合力,因而惯性力越小的粒子,沿电力线运动的倾向越显著,附着于工件背面的比率就越大。利用类似的原理,还可以进行静电植绒和喷洒农药。

将微粒状的混合物料,定量而又均匀地输送到回转电极表面,该转鼓电极用导体接地,其上方设置一放电极,并加高压使之产生放电,使转鼓表面的粒子在电晕浴的作用下带电。电导率大的粒子,其电荷逸向转鼓电极;而绝缘性粒子的电荷将残留在粒子表面,荷电的粒子由于与转鼓之间有库仑力的作用,因而被固定在转鼓表面。随着转鼓的转动,由于导电性粒子与鼓间无作用力,故它们将受重力作用而下落,而绝缘性粒子将附着于转鼓的表面。经过机械的掸落,使之进入下方的另一料斗。这样,就完成了对粒径大致相同、而电荷弛豫时间不同的物料进行静电分选的过程。

又如静电复印的显影过程的原理是利用墨粉与带电电荷之间的力学现象。近年来广为应用的喷墨打印等,也是一种利用静电控制带电墨粉粒子并直接在纸面上形成文字或画面的一种非接触、无噪声的打印技术。

要充分发挥或改进这类技术应用,就必须

对静电引起的力学现象作更仔细的分析。

静电引起的力学现象,从物理的观点看,大致可以分为静力学(物体的附着、凝聚等)现象和动力学(物体的分离、捕集以及涂敷等)现象两大类。

从静力学的观点看,在实用上特别重要的是粉尘层附着或凝聚在其它物体上的情形。这与两段式电集尘器的捕集过程或粉体喷涂工艺中粉体涂料的涂敷过程相对应。由外电场及带电粉尘层的空间电荷电场合成为粉体层内的电场,由该电场产生第一类库仑力,再加上电象力及接触带电产生的库仑力,构成了附着力。因此,当外电场方向反转时,或者当碳黑之类的电阻率甚低的粉尘因静电感应而被荷以相反极性的电荷时,第一类库仑力的方向反转,形成二次飞扬等现象,这也是高温运转下的工业电除尘器不能采用两段式的原因。但是,这时的库仑力将为粉体粒子提供更多的相互碰撞的机会,使微细粉尘凝聚为粗大的粒子,这些粒子可以通过在两段式电集尘装置后面加上旋风分离器等等捕集系统来加以捕集,这样就可以得到很高的收尘效率。例如用于燃烧重油锅炉的收尘,可获得很好的效果。对于粉体喷涂用的涂料树脂,由于它的电阻率甚高,粉尘层内的电导电流很小,不会产生约翰孙-拉贝克力,因而随粉体带来的离子在喷涂过程中将被埋入层中,层中的空间电荷密度大幅度提高,层内场强显著增强,从而产生极大的附着力。而对于电阻率低于涂料的粉尘,由于粉尘层的弛豫时间在1s以下,层内的初始电荷将消失,出现了由于导电而形成的约翰孙-拉贝克力。这个效应将产生很大的电附着力。在工业用的高温电除尘器中,它是使粉尘堆集到集尘极上的一种不可缺少的作用力。此外,处于外电场中的介质粒子,因极化而在物体表面或者空间按照电场方向渐渐凝集成念珠状,这称为空间凝集现象。粒子的相对介电常数越大,念珠形力越强。利用这种现象,可以使钢铁厂所产生的微小氧化铁尘埃大粒化,从而提高收尘效率。在电摄影过程中,利用粒子的接触带电过程,可以使墨粉

附着于载体粒子表面,这也是技术实践中应用静电的静力学效应的一个例子。

近年来,工业上利用带电微粒的动力学现象的研究工作已获得很大进展。我们已经知道,在粘性媒质中的带电球形粒子的行为是由牛顿力学建立的运动方程来描述。在场方程中出现的外电场项,在空间上可以是均匀的或非均匀的,在时间上可以是直流的或交变的。它们之间的不同的组合,可以产生种类繁多的有趣的动力学现象,其中有些已在工业生产中扮演着重要的角色。现举例如下:

在静止的粘性媒质中形成均匀电场时,由库仑力引起带电球形粒子的平动,是静电力引起的动力学现象的基本形态。这时,粒子的运动将受到带电量、离子迁移率、粘性系数等众多因素的支配。在电除尘、静电喷涂以及电摄影等应用技术中,通常采用直流电晕荷电方式。其荷电机理有两种:一是电场荷电机理,即由电晕放电形成的单极性离子被电场驱动,碰撞粒子表面,而使其荷电;另一是扩散荷电机理,即离子由于热运动而碰撞粒子表面,从而使其荷电。

在电场荷电机理下<sup>[1]</sup>,粒子电量为

$$q_1 = q_\infty \frac{t/\tau_1}{1+t/\tau_1},$$

饱和带电量为

$$q_\infty = 4\pi\epsilon_0 \frac{3\epsilon_r}{\epsilon_r + 2} a^3 E,$$

荷电时间常数为

$$\tau_1 = \frac{4\epsilon_0}{\mu\rho} = \frac{4\epsilon_0 E}{i},$$

其中 $\epsilon_r$ 为粒子的相对介电常数, $E$ 为荷电部分的场强, $\mu$ 为粒子的迁移率, $\rho$ 为离子空间电荷密度, $i$ 为离子电流密度。

这时, $q_1$ 随时间急剧上升,在 $t = 3\tau_1$ 时达到 $q_\infty$ 的75%,以后上升变缓,在 $t = 10\tau_1$ 处达到 $q_\infty$ 的91%。在实际应用时,将 $3\tau_1$ 作为有效荷电时间,这时粒子的带电量称为有效荷电量。由上面的式子可以看出,为了在短时间内给粒子带上尽可能多的电荷,就必须增大 $E$ 和

$i$ . 取电除尘器中的典型值  $E = 3 \text{ kV/cm}$ ,  $i = 0.2 \text{ mA/m}^2$  时,  $\tau_1 = 53 \text{ ms}$ , 故在  $159 \text{ ms}$  内, 粒子将获得  $\frac{3}{4} q_\infty$  的电荷.

在扩散带电机理下<sup>[2]</sup>, 粒子电量为

$$q_2 = q^* \ln(1 + t/\tau_2),$$

电荷常数为

$$q^* = \frac{4\pi\epsilon_0\mu kT}{e},$$

荷电时间常数为

$$\tau_2 = \frac{4\epsilon_0 kT}{acne^2} = \frac{4\epsilon_0 kT \mu E}{acei},$$

其中  $k$  为玻耳兹曼常数,  $e$  为电子电量,  $c$  为离子热运动均方根速率,  $n$  为离子数浓度.

这时,  $q_2$  随时间迅速上升, 以后上升速度变缓. 从理论上讲, 扩散带电不存在饱和值. 但是, 根据对数函数的性质, 在  $t/\tau_2$  足够大时,  $q_2$  的上升缓慢到可以忽略的地步. 实用上取  $500 \tau_2$  为有效荷电时间, 这时的带电量  $q'_2 = 6.2 q^*$ , 并被称为有效荷电量.

计算表明, 对  $a > 1 \mu\text{m}$  的粒子, 电场荷电占支配地位. 对  $a < 0.1 \mu\text{m}$  的粒子, 扩散荷电占支配地位. 据此, 即可根据具体处理对象, 按照不同的带电机理去探讨改进技术的方向.

现在, 我们来讨论在非均匀电场中, 梯度力引起的动力学现象.

在场强  $E$  随场所而变动的电场中, 物体受到由

$$\mathbf{F} = \left(\frac{v\alpha}{2}\right) \text{grad} E'$$

所给出的梯度力, 其中  $v$  是物体的体积,  $\alpha$  是由外场引起的感应极化. 无论外场是直流还是交流, 物体是带电还是不带电, 这种作用均存在. 在直流电场下, 物体通常移向电场最大处. 梯度力在气体、液体当中也会出现. 在液体中所引起的动力学现象称为介电泳现象, 通常用于对介电常数不同的物体实行静电分离. 这时, 往往需要设计出使梯度力的大小不随场所而变动的电场. 例如, 采用图 1 所示的电极结构, 其中一个电极是由  $\theta = 0$ ,  $\theta = \frac{3}{2}\pi$  的两

个平面形成的电位为零的等位间, 另一个电极

则形成  $V = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2K}{\alpha}} \sqrt{r^3} \sin\left(\frac{3}{2}\theta\right)$  的等位

面. 这样, 梯度力的径向分量不随场所变更而取一定值  $K$ . 在此电极系统中, 粒子在力线方向形成念珠状, 并被搬运到  $A$  或  $B$  处. 当取媒质的介电常数为两种待分离物质的中间值时,  $\epsilon_r$  小的物质难于形成念珠, 从而可将两种物质 (例如不同的细胞) 分离开来.

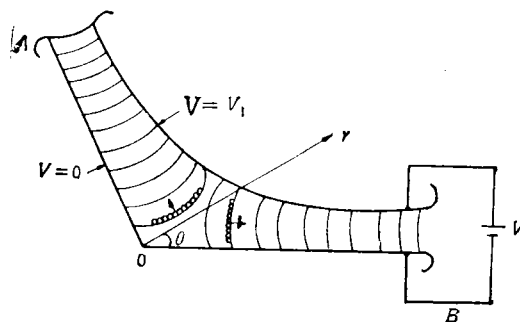


图 1 利用梯度力进行细胞分离

利用面状排列的电极群, 外加单相或多相电压, 形成交流非均匀电场, 以实现对粒子进行控制, 这是利用动力学现象实现技术上的特定目标的典型例子. 这样的电极列将会对粒子形成排斥阻止力, 可以实现对粒子无接触的阻止或搬运. 这种作用称为电帘作用. 当外加单相交流电压时, 形成的是驻波电帘; 而当外加多相交流电压时, 将形成行波电帘, 如图 2 所示.

在驻波电帘的情况下, 一般地说, 电场的方向及大小均在空间上变化. 与方向的变化相对应的是电力线发生弯曲, 与电场的大小变化相对应的则是越靠近电极的地方, 电力线的密度越大. 当带电粒子进入该电场后, 作为一级近似, 它将沿着弯曲的电力线, 以其曲率中心为中心进行振动. 其振动位移相对于电场有一个位相延迟. 由于电场在空间上的不均匀, 振动位移在靠近电极的半波范围内, 电场较振动中心处大; 在远离电极的半波范围内, 电场较该值小. 因此, 带电粒子在电力线方向上, 并在远离电极的指向上受到平均排斥力  $F_1$  的作用, 该力称为平均梯度力. 此外, 带电粒子沿弯曲轨道振动, 在电力线的凸方向上还要受到脉动的离

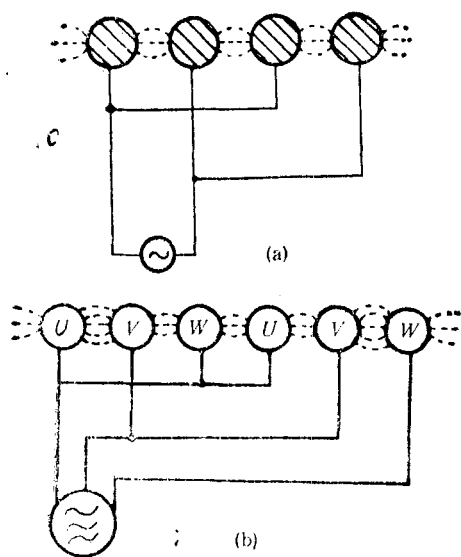


图2 电帘的示意图

(a) 驻波电帘; (b) 行波电帘

心力, 这相当于在电力线的法线方向上有一个平均离心力. 这个平均离心力与平均梯度力的合力构成了驻波电帘对粒子的排斥力, 该力与极化效应产生的梯度力方向相反. 关于行波电帘的排斥阻力和输送推力也可由同样的方法得出. 电帘可以在其内部长期以非接触状态封闭住带电粒子云, 因此驻波电帘可以安置在电除尘器的后段, 以防止二次飞扬现象. 若使其轴倾斜, 并沿轴向通以气流时, 则可以输送粒子. 在行波电帘的情况下, 粒子在行波前进的方向上一边画出小的圆形轨道一边往前行进.

由于加上气流或其它外力, 电帘中的粒子在接近电极列时, 振幅将会变大, 从而与电极发生碰撞. 或者其运动将进入不稳定区域. 为了防止这类现象发生, 常在驻波或行波电帘的电极列表面放置电介质层, 以构成所谓接触型电

帘. 即使是未经预荷电的粒子, 也会由于与介电层的接触而带电, 被强烈荷电的粒子受交流非均匀场的作用而跳动着, 并沿行波方向被输送. 这种接触型电帘已在工业上获得广泛应用. 除了可以输送粉体物料外, 在新型的静电粉体喷涂工艺中也发挥了重要的作用. 在粉体静电喷涂过程中, 最大的问题在于附着于喷粉柜上的涂料的回收, 对于必须频繁更换颜色的汽车行业, 为了防止混色, 可以在喷粉柜的内壁上安装接触型电帘, 它对附着在内壁上的高阻带电涂料粒子施加剥离力, 使得粘壁的粉尘被掸落至输送部分, 并同样通过电帘的作用, 把这些粉尘输送到外部.

在进行海水淡化时, 热交换器管道内部的腐蚀是一个急待解决的问题. 这时, 需在管道内部表面喷涂上一层含氟的树脂. 类似这样的管道内部的喷涂, 可以利用接触型电帘来完成. 粉体涂料通过设有接触型电帘的喷枪, 并由于电帘输送粒子的作用而进入管内, 经电晕放电而被再次荷电, 并紧紧地附着在管壁上. 用这种方法可以在 30—50 s 时间内, 在内径 15 mm、长 5.5 m 的管子内部涂上厚度为 100—200  $\mu\text{m}$  的均匀涂层. 经过热处理之后, 成为无针孔的良好涂膜.

利用接触型电帘还可对棉花等进行分选. 用电帘及四极场将 D-T 燃料送入热核反应堆等离子体中心部位的技术也日臻完善. 静电力正在众多的领域中发挥它独特的作用.

(上接第402页)

679.  
 [6] Chun-Ting Zhang, *Phys. Rev. A*, **35**(1987), 886.  
 [7] 张春霆, 生物数学学报, **2**(1987), 7.  
 [8] 张春霆, 自然杂志, **10**(1987), 841.  
 [9] 张春霆, 杨建宇, 第一届全国分子生物物理学术讨论会论文集, 中国生物物理学会, (1988), 114.  
 [10] B. A. Malomed, *Phys. Lett.*, **A123**(1987), 459.  
 [11] S. Takeno, S. Homma, *J. Phys. Soc. Japan*, **55**(1986), 2547.  
 [12] Jia-Xin Xiao, Jia-Tih Lin, *J. Phys. A*, **20**(1987),

[1] Pauthenier and Moreau-Honot, *J. Phys. Radium*, Ser. 7, No. 12(1932), 590.  
 [2] H. J. White, *AIEE, Trans*, Pt. I, **70**(1951), 1186.  
 2425.  
 [13] J. A. Krumhansl et al., in: *Structure and Dynamics of Nucleic Acids and Proteins*, Eds. E. Clementi et al., Adenine Press, N. Y., (1983), 61.  
 [14] G. S. Edwards et al., *Phys. Rev. Lett.*, **53**(1984), 1284.  
 [15] A. C. Scott, *Physica Scripta*, **32**(1985), 617.  
 [16] E. Balanovski, *Phys. Rev., A*, **32**(1985), 3059.  
 [17] J. Ladik et al., *Phys. Rev., A*, **37**(1988), 4428.  
 [18] M. Gueron et al., *Nature*, **328**(1987), 89.  
 [19] C. Gabriel et al., *Nature*, **328**(1987), 145.  
 [20] S. J. Webb, *Phys. Rep.*, **60**(1980), 201.