

文章编号: 0253-9993(2007)07-0757-05

# 粉煤灰中灰颗粒的摩擦带电特征

侯新凯, 徐品晶, 徐德龙, 刘辉, 杨圣玮, 曾汉侯

(西安建筑科技大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 利用电位差计配合法拉第圆筒测量2种材料的摩擦电势差及电性符号, 对10种材料进行了摩擦带电研究, 确定了它们的摩擦静电序列为 Pb, Zn, Al, Fe, C, Mn, Cu, SiC, Ag, 粉煤灰; 选出了 Mn, Cu, SiC, Ag 四种作为粉煤灰摩擦带电电选机的荷电摩擦材料. 用 0.5 MPa 除水压缩空气在铁管中进行气力输送摩擦带电试验, 研究了气体流速、管道形式和长度、以及摩擦管道内固气比等因素对粉煤灰摩擦带电量的影响, 增大气体流速能显著提高粉煤灰的带电量, 而管道长度对灰颗粒的荷质比影响不大.

**关键词:** 粉煤灰电选; 摩擦静电序列; 碳粉; 荷质比; 气力输送摩擦带电

**中图分类号:** TQ536.1 **文献标识码:** A

## The triboelectrification characteristics of fly ash component

HOU Xin-kai, XU Pin-jing, XU De-long, LIU Hui, YANG Sheng-wei, ZENG Han-hou

(School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Faraday cylinder and potential difference meter were adopted to test electric potential difference and electrical sign between binary materials being rubbed. The triboelectrification experiment was conducted among 10 types of materials and the sequence of triboelectrification of them was Pb, Zn, Al, Fe, C, Mn, Cu, SiC, Ag, fly ash. Mn, Cu, SiC, Ag were obtained to be suitable for frictional material in fly ash triboelectrostatic separator. Pneumatic triboelectrostatic experiment was performed in four types of iron pipeline driven by 0.5 MPa compressed air removed water respectively. The factors of influencing the electrostatic charge on the fly ash such as the gas flow rate, pipeline form and length, the solids-gas ratio were explored. The electrostatic charge on the fly ash was improved enormously with the gas flow rate increased and maintained at a grade with various pipeline lengths.

**Key words:** electrical separation of fly ash; sequence of triboelectrification; carbon powder; charge-to-mass ratio; pneumatic triboelectrification

粉煤灰是煤粉在燃烧后产生的灰渣残留物, 它包含无机和有机2种组分. 无机部分来源于煤中矿物质, 在煤粉燃烧过程中形成粉煤灰中的灰元, 灰元颗粒形态包括: 珠状颗粒、渣状颗粒、钝角颗粒、碎屑颗粒、黏聚颗粒5类<sup>[1]</sup>. 而有机部分则是未燃尽的残碳和未变化或变化不明显的煤粒, 残碳有空心碳、网状碳、结构碳、未熔碳4种结构类型. 降低粉煤灰的碳含量, 实现粉煤灰中碳灰分离不仅提高了粉煤灰的利用价值<sup>[2]</sup>, 还能回收粉煤灰中价值碳粉.

粉煤灰电选脱碳与粒度分级<sup>[3]</sup>、流态化分选脱碳方案相比, 具有分选效率高, 获得碳颗粒纯度高等优点. 与浮选法<sup>[4]</sup>和流化床燃烧法相比, 既不存在浮选尾灰再烘干问题, 也没有燃烧脱除粉煤灰碳成分对原灰的含碳量以及建厂地址有严格限制的问题. 电选法是以矿物成分的电性差异为基础, 选矿工艺使用

的鼓筒电选机是利用矿物的电导率不同,但是对于平均粒径小于  $30\ \mu\text{m}$  的粉煤灰选别性较差<sup>[5]</sup>. 粉煤灰摩擦带电电选机选择特定材料摩擦粉煤灰使灰元颗粒与碳颗粒带相反电荷,在高压电场中分离. 这种方法的试验和实用国内外已经有报道<sup>[6]</sup>,但未见粉煤灰摩擦带电性基础实验资料.

## 1 材料摩擦带电序列

(1) 实验原材料及制备 粉煤灰取自西安热电厂,其主要化学成分见表 1, XRD 分析其玻璃体含量大于 80%. 将原灰试样平铺在耐热容器内于  $850\ ^\circ\text{C}$  高温炉中保温 1 h,取出快速搅拌使试样内未燃

表 1 粉煤灰的化学组成

| Table 1 Chemical composition of the original fly ash |                            |                   |                 |                 |      | %     |
|------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|------|-------|
| $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$                           | $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ | $w(\text{SiO}_2)$ | $w(\text{CaO})$ | $w(\text{MgO})$ | 烧失量  | 合 计   |
| 4.95                                                 | 34.34                      | 50.22             | 2.49            | 1.19            | 3.00 | 96.19 |

烧碳颗粒能到达容器的上部. 试样再次放入高温炉内继续燃烧 20 min,反复燃烧搅拌 3 次,制成烧失量小于 0.5% 的纯粉煤灰,称为粉煤灰灰元. 灰元的粒度分布中位径为  $15.5\ \mu\text{m}$ ,密度为  $2.20 \times 10^3\ \text{kg/m}^3$ ,比表面积为  $356\ \text{m}^2/\text{kg}$ . 以焦炭模拟粉煤灰中的碳颗粒,选用西安焦化厂生产的冶金二级焦炭,在  $100\ ^\circ\text{C}$  的干燥箱内烘干后,制成实验所需的摩擦片状材料. 拆取电池内石墨棒作为粉煤灰中残碳的参比材料.

摩擦起电排序实验中用作摩擦材料的金属薄片为化学纯试剂材料 Pb, Zn, Al, Fe, Mn, Cu. 另外制作铁质和铜质同规格圆盘各 1 套,圆盘直径  $\phi_w = 365\ \text{mm}$ ,  $\phi_n = 12\ \text{mm}$ ,厚度  $\delta = 5\ \text{mm}$ . 还有 Ag 质摩擦材料银壶,自结合 SiC 空心管  $\phi_w = 25\ \text{mm}$ ,  $\phi_n = 15\ \text{mm}$ ,  $l = 390\ \text{mm}$ .

(2) 实验装置 摩擦起电装置 1: 在型号 YCT112-4B 的电磁调速电动机输出轴上,通过一个绝缘轴带动上述金属质圆盘,或者安装一个同规格的硬质绝缘树脂转盘,树脂转盘上分别黏贴各种金属薄片,电机带动转盘转动形成一动摩擦面. 另一种摩擦面(长度方向留有手柄)是长为 150 mm、宽为 100 mm 的绝缘板上固定的实验用金属薄片,并引出连接导线. 摩擦起电装置 2: 将 SiC 空心管固定在实验室小型电磁振动给料器的给料槽内,空心管与水平面的夹角为  $10^\circ$ . 从上端向空心管内加入粉体物料,开启振动控制器使粉体与 SiC 管壁摩擦,摩擦后的粉体从空心管的下端流出. 橡胶棒和毛皮、玻璃棒和丝绸 2 套典型摩擦起电器材.

(3) 测试仪器 UJ27C 型直流电位差计. 自制的法拉第圆筒: 外筒钢管尺寸  $\phi_w = 50\ \text{mm}$ ,  $\phi_n = 40\ \text{mm}$ ,  $\delta = 5\ \text{mm}$ ; 内筒钢管  $\phi_w = 32\ \text{mm}$ ,  $\phi_n = 20\ \text{mm}$ ,  $\delta = 6\ \text{mm}$ ; 筒高度  $h = 496\ \text{mm}$ ,用 2 块刻槽的厚度为 33 mm 的有机玻璃板嵌在内外筒两端,组装成法拉第筒. 电容表测量法拉第筒的电容量  $C = 111\ \text{pF}$ .

(4) 实验及讨论 在摩擦起电装置 1 上安装铁板转盘,用一根铁导线与铁转盘摩擦接触,导线的另一端连接到电位差计一个接线端. 分别用 Pb, Zn, Al, Fe, Mn, Cu, 焦炭片(C1)、石墨(C2)材料制成带有绝缘手柄的摩擦面板,摩擦面板的导线连接到电位差计另一接线端. 启动调速电机,用摩擦面板摩擦铁板转盘,调节转盘转速保持在 400 r/min,电位差计的检流指针产生偏转. 调节电位差计的计量旋钮,若检流指针回复到平衡位置,电位差计面板示值即为 2 种材料之间摩擦产生的电势差;若调节使检流计指针偏离平衡位置越远,更换电位差计 2 个接线柱上导线的接线位置,重新摩擦并且调节旋钮使检流计回到平衡位置,记录电位差计的示值和转盘接线的正负位置.

固体理论指出,2 种金属紧密接触时它们的费米能级重合,接触面间出现电势差,电子将从功函数低的金属表面转移到功函数较高的金属表面,从而在 2 块金属物体上建立接触电势差. 图 1 是用电位差计测定的 7 种材料与铁的相对电势( $U_x - U_{\text{Fe}}$ ),相对电势的大小和符号与 2 种材料接触分离过程中电子转移的数量和方向有关,因此相对电势的符号和

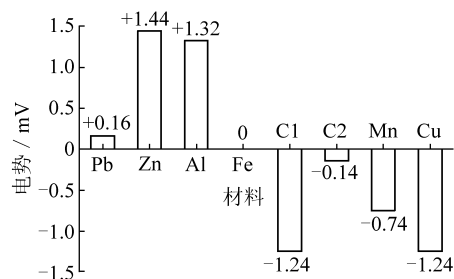


图 1 转动铁盘与 7 种材料摩擦产生的电势  
Fig. 1 Potential generated on seven kinds of materials rubbed against spinning iron disk

大小取决于2种导体的性质和功函数<sup>[7]</sup>、材料的纯度、无定性度、接触面积大小和粗糙程度<sup>[8]</sup>、摩擦所消耗的能量。

Pb, Zn, Al 软质金属, 在铁盘上摩擦时容易脱落并附着到铁盘上, 摩擦几秒钟后电势会减小甚至发生极性反转, 图1中数据是在实验初始采集的。同时, 用这些材料进行摩擦时手柄压力都比较小, 尤其是Pb质地最软, 摩擦时所用的压力很小, 在摩擦过程中只有很小一块面积得以接触。总之, 图1中静电电势实验数据不是在完全等同的实验条件下(摩擦面积和压力)获得的, 不能单纯以摩擦电势的高低来判定静电起电序列, 只能以电势的正负号确定Pb, Zn, Al是排列在Fe之前, C(焦碳和石墨), Mn, Cu排列在Fe之后。应该指出的是, Pb, Zn, Al化学性质活泼、易氧化, 实验前必须快速用棉布擦净金属表面, 若用有表面氧化层的金属实验, 可能会产生与表1中极性相反的电势。为确定位于铁前3种金属在静电起电序列中确切位置, 用Zn手板分别与Pb, Al手板摩擦, 测得Pb, Al两种金属对Zn的相对电势分别为+0.24, -0.18 mV, 从而确定4种金属静电起电序列是Pb, Zn, Al, Fe。

为确定Fe, Cu, Mn, SiC, Ag, C的摩擦起电序列, 将Fe, C(焦碳和石墨), Mn, Cu, Ag, SiC分别与转动盘Cu摩擦。其中Ag, SiC材料的实验是戴绝缘手套用银壶、SiC管材直接摩擦操作的。6种材料和Cu板摩擦产生的相对电势( $U_x - U_{Cu}$ )如图2所示, Fe, C(焦碳和石墨), Mn三种材料与Cu摩擦产生的静电电势为正, 它们在静电序列中位于Cu的前面。 $U_{Fe} - U_{Cu} = +0.64$  mV, 与上述 $U_{Cu} - U_{Fe} = -1.24$  mV表明的摩擦电势序列是一致的。在上述两轮摩擦实验中, 焦碳与石墨产生的极性相同, 作为粉煤灰中碳颗粒的两种代用实验材料产生了相近的摩擦静电排序位置。用焦碳块与Mn手柄摩擦,  $U_C - U_{Mn} = +0.3$  mV; 摩擦SiC管与银壶,  $U_{SiC} - U_{Ag} = +0.09$  mV。至此, 可以确定实验材料的静电序列为: Pb, Zn, Al, Fe, C, Mn, Cu, SiC, Ag, 位于C(焦碳或石墨)之后有4种材料。

测得粉煤灰颗粒的电阻率为 $4.2 \times 10^8 \Omega \cdot m$ , 属于绝缘材料, 以酚醛树脂酒精溶液为黏结剂挤出成型制成粉煤灰棒, 在 $N_2$ 气氛炉中脱脂并固化成有一定强度的材料(简称F1), F1与上述任何材料摩擦, 直接用电位差计都测不到2种材料之间有电势差。然而粉煤灰与其它导体是禀功函数不同的2种材料, 在摩擦点之间应该形成电势差, 由于非导体的粉煤灰棒不能将电子从摩擦点传导到电位差计显示, 因此摩擦材料中有一种属于非导体就不能用电位差计直接测量。由于静电感应法拉第筒中存在静电荷, 内外筒(外筒接地)之间能出现电势差, 测量内筒的电势可以间接测量法拉第筒内物体静电荷的极性。将法拉第筒内、外筒分别与电位差计的+、-极连接, 毛皮摩擦过的橡胶棒插入过程中电位差的检流计指针向左偏转; 橡胶棒在法拉第筒内静止, 检流计指针回到平衡位置; 抽出橡胶棒过程中检流计指针向正方向偏转。橡胶棒插入、抽出过程中尽量避免与法拉第筒接触, 它在法拉第筒中的运动越快, 检流计偏转越大。丝绸摩擦过的玻璃棒重复上述在法拉第筒的插入、静止、抽出过程, 检流计偏转方向相反, 因此, 用带电粉体加入到法拉第筒中检流计偏转的方向可以判定粉体带电的极性。启动摩擦起电装置2, 将纯粉煤灰连续地加入SiC空心管内, 经摩擦后的粉煤灰流入法拉第筒过程中, 检流计指针持续向左偏转; 停止向法拉第筒下料, 检流计指针回到平衡位置; 倒出法拉第筒内粉煤灰, 检流计指针产生强烈的右偏转, 然后恢复到平衡位置。粉煤灰加入、倒出法拉第筒内产生的作用与带负电的橡胶棒相同, 粉煤灰在静电序列中位于SiC之后。将粉煤灰灰元加入银壶中摇动使之充分摩擦后倒入法拉第筒, 粉煤灰倒入、倒出法拉第筒与SiC材料摩擦过粉煤灰的现象一致, 即灰元在静电序列中还位于Ag之后。因此, 粉煤灰摩擦电选时, 至少有Mn, Cu, SiC, Ag四种材料可以作为摩擦材料, 粉煤灰中残碳颗粒与它们摩擦后带正电, 而灰元颗粒摩擦后带负电。

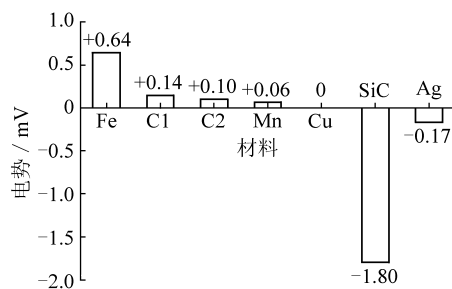


图2 铜转盘与6种材料摩擦产生的电势

Fig.2 Potential generated on six kinds of materials rubbed against spinning copper disk

## 2 粉煤灰摩擦带电的动力学特性

粉体的摩擦带电方式通常采用气力输送管道摩擦法、振动摩擦法和辊挤压摩擦法。其中气力输送管道摩擦法克服了细小粉体黏附管壁的现象；同时属于密闭系统作业，没有细小粉尘的泄露，由于小颗粒荷质比较大，泄露的小颗粒会对测量结果造成显著的影响；再者，气力管道摩擦系统便于操作控制，工作参数稳定。上节实验确定 Mn, Cu, SiC, Ag 四种材料可以作为摩擦材料，由于它们都比较贵重，特别是 SiC 陶瓷加工制作周期长，先选用普通 A3 钢的标准管材作为气力输送摩擦材料，获取粉煤灰以气力输送管道摩擦带电的一般规律，以便确定下一步所制作摩擦材料的基本尺寸规格。

### 2.1 实验装置和测量仪器

实验装置如图 3 所示，空气压缩机产生的压缩空气经过  $1.27 \text{ m}^3$  储气罐，稳定系统的工作压力，静置冷却后的压缩空气能分离出部分水气，降低气体的湿含量。压缩空气从储气罐排放依次经过离心式无滤芯油水分离器、GYL-3/8 高效除油过滤器，这三级分离除水装置分别以冷却沉降、离心分离和过滤方式降低空气的湿含量。净化空气从气力输送泵的喷嘴 ( $\phi_n = 6.5 \text{ mm}$ ) 喷出，引射螺旋管式喂料器喂入的粉煤灰进入输送钢管 ( $\phi_w = 33.4 \text{ mm}$ ,  $\phi_n = 24.3 \text{ mm}$ )。粉煤灰颗粒与钢管摩擦后同气流一起直接进入法拉第圆筒内。法拉第圆筒尺寸  $\phi_w = 580 \text{ mm}$ ,  $\phi_n = 540 \text{ mm}$ ,  $h = 1\,000 \text{ mm}$ 。用滤布密封法拉第筒的两端，滤出法拉第筒内的粉尘气体，将带电荷粉尘滞留在筒内。法拉第内外筒分别与 EST111 型数字电荷仪的 +、- 接线柱连接，仪表可直接读出法拉第筒内的静电荷总电量。在摩擦带电过程中摩擦管道和法拉第外筒都保持很好的接地状态。

### 2.2 实验及讨论

以  $0.5 \text{ MPa}$  的干燥压缩空气为输送动力，采用如图 4 所示 a, b, c, d 四种构造管道，测定气体的质量流量分别为 63, 66, 69,  $71 \text{ g/s}$ ，即管道越短质量流速越大。管道中气体流速约为  $120 \text{ m/s}$ 。固定气体流速，调节粉煤灰的质量流量，测量粉煤灰的静电荷电量，并根据粉煤灰的质量，计算粉煤灰的荷质比。4 种管道中摩擦粉煤灰颗粒荷质比及质量流量如图 5 所示。① 带 2 个弯头的管道 a 摩擦的粉煤灰颗粒荷质比明显低于其它 3 种管道，粉体摩擦带电量是摩擦接触带电和分离过程中电荷回流两种效应综合产生的结果。隧道效应或空气击穿可使带相反电荷的一对接触物体之间在分离过程中产生电荷回流。当二物体表面间距大于  $1 \text{ nm}$  时隧道效应终止。a 管路中有 2 个弯道，一方面颗粒与管壁的撞击加剧；另一方面带电颗粒在弯管处出现滞留，与管壁分离速度降低可能会使静电荷的回流作用增强，因此，采用直角弯管粉煤灰颗粒的剩余静电量比直管明显偏小。② b, c, d 三种直段管道中，随着管道长度的缩短，粉煤灰颗粒的荷质比依次增大。虽然缩短摩擦管道粉煤灰与管壁的摩擦几率减小，使摩擦带电量有减小的趋势；但由于管道缩短气流速度依次增大，颗粒对管壁的碰撞强度提高，分离过程速率度加快，静电荷回流量减小，粉体带电量随管道的缩短而增加。试验结果表明，后者是影响粉体摩擦带电量的主要因素，气力输送中固气质量比在  $0.004 \sim 0.140$  范围内，摩擦管道长度在  $0.28 \text{ m}$  以上，摩擦管道长度对粉体摩擦带电量不会产生明显的作用。③ a, b, c 三条曲线在总趋势上是下降的，即摩擦管道中气流平均速度小于  $120 \text{ m/s}$ ，粉煤灰的荷质比随着固气比的增加而减小，在固气比较小时这种现象愈加明显。当摩擦管道中气流平均速度大于  $123 \text{ m/s}$ ，即对应于图 4 的 d 曲线，粉煤灰颗粒的荷质比在  $2.0 \mu\text{C/g}$  上下

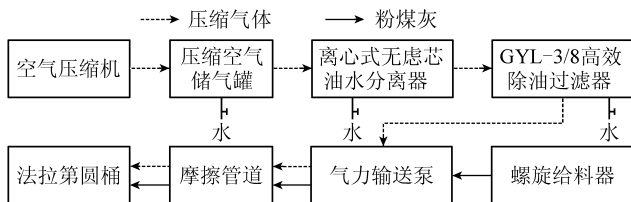


图 3 气力输送管道摩擦带电试验装置

Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus for fly ash triboelectrification in pneumatic piping

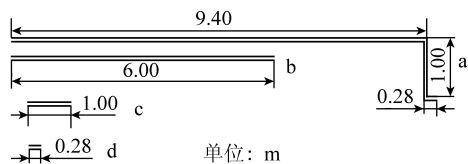


图 4 气力输送摩擦起电管道

Fig. 4 Dimensional of pneumatic piping for triboelectrification

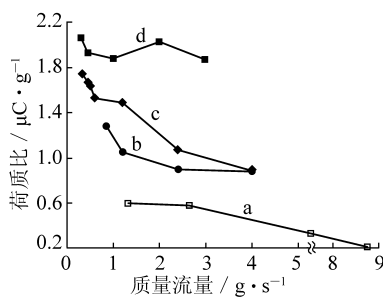


图5 0.5 MPa 气压时粉煤灰荷质比与质量流量的关系

Fig. 5 The relational of specific mass charge versus mass flow rate at 0.5 MPa pneumatic pressure

摩擦模型中延长摩擦时间, 提高粉煤灰颗粒的荷质比, 输送摩擦气体的风速是强作用因子. d 管道风速最大颗粒荷质比几乎趋近一个常数, c, b 管道中降低固体流量向左外延曲线应该与 d 管的荷质比曲线相交点, 对应于粉煤灰管道摩擦作用的表观饱和带电量. 一定的粉煤灰颗粒群, 它的表观饱和带电量主要体现在  $\beta$  值的差异, 即摩擦过程与管壁的撞击分离速率和空气湿度造成电荷泄露路径电阻. 实验采用 3 道除水装置, 压缩气体的水含量很低并趋于稳定, 即有一个确定的  $RC$  值, 用很短的管路就可以实现球形大颗粒较长时间实现的表观饱和和电荷, 这可能由于微细粉体在高压气流中分散程度高所表现出的摩擦带电力特征.

### 3 结 论

几种材料的摩擦静电序列为: Pb, Zn, Al, Fe, C (焦炭或石墨), Mn, Cu, SiC, Ag (粉煤灰). 制作粉煤灰摩擦电选设备时, 选择 Mn, Cu, SiC, Ag 作为摩擦材料, 使粉煤灰中碳元与灰元摩擦产生相反电荷. 粉煤灰在钢管中用 0.5 MPa 高压气流以约 120 m/s 的速度与管壁摩擦, 在直管道中摩擦的粉煤灰荷质比明显比直角弯管的高. 摩擦管道长度在 0.28 ~ 6.00 m 之间, 其长度增加不会对粉煤灰的荷质比产生明显的影响, 增加气流速度粉煤灰的荷质比会显著增加. 降低摩擦管道内的固气比粉煤灰的带电量增加, 达到表观饱和电荷量 2.0  $\mu\text{C}/\text{g}$ .

### 参考文献:

- [1] 沈旦申. 粉煤灰混凝土 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989. 7 ~ 29.
- [2] Joshi R C, Malhotra V M. Relationship between pozzolanic activity and chemical and physical characteristics of selected Canadian fly ashes [A]. Materials Research Society Symposia Proceedings [C]. Pittsburgh; Pennsylvania, 1987. 113 ~ 125.
- [3] Foner H A, Robl T L, Hower Y C, et al. Some characteristics and potential uses of coal fly ash from Israel [A]. International Ash Utilization Symposium [C]. Lexington; Kentucky, 1997. 730 ~ 737.
- [4] Marcin Niewiadomski, Jan Hupka, Romuald Bokotko, et al. Recovery of coke fines from fly ash by air sparged hydrocyclone flotation [J]. Fuel, 1999, 78: 161 ~ 168.
- [5] 王常任. 磁电选矿 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005.
- [6] Denker Jeffrey, Whittlaw William. AN adjustable gap in an electrostatic separator [P]. WO Patent, 97/20633. 1997 - 06 - 12.
- [7] Lowell J, Rose - Innes A C. Contact electrification [J]. Adv. Phy, 1980, 29 (6): 947 ~ 1 023.
- [8] Vladykina T N, Deryagin B V, Toporov Y P. The effect of surface roughness on triboelectrification of insulators [J]. Chem. Mech. Surf, 1985, 3: 2 817 ~ 2 821.
- [9] William D. Greason. Investigation of a test methodology for triboelectrification [J]. Journal of Electrostatics, 2000, 49: 245 ~ 256.

波动, 固气比的变化似乎对粉体的摩擦带电量没有明显的影响. ④ 粉体颗粒(电介质)摩擦带电过程的动力学模型<sup>[9]</sup>假设充电速率与颗粒的未带电面积成正比, 电荷泄露速率与颗粒总带电量成正比, 颗粒净电荷量方程为:  $dq/dt = \alpha(q_s - q) - \beta q$ , 其中,  $q_s$  为无泄露时饱和电荷量;  $1/\alpha$  为充电时间常数; 电荷泄露系数  $\beta$  与颗粒电荷泄露路径电阻 ( $R$ )、颗粒电容量 ( $C$ ) 的乘积成反比 ( $\beta = 1/RC$ ). 方程积分形式  $q = q_s [1 - e^{-(\alpha + \beta)t}] / (1 + \beta/\alpha)$ , 当  $t \rightarrow \infty$ ,  $q = q_m = q_s / (1 + \beta/\alpha)$  达到表观饱和和电荷量. 气力输送管道摩擦中, 提高管道内的风速和延长管道长度, 相当于单球恒速