

研究简报

## 细颗粒对气固流化床中静电行为的影响

王 芳<sup>1,2</sup>, 徐 怡<sup>1,2</sup>, 于恒修<sup>1,2,3</sup>, 王靖岱<sup>1,2</sup>, 阳永荣<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 化学工程国家重点实验室 (浙江大学), 浙江 杭州 310027; <sup>2</sup> 浙江大学化学工程与生物工程学系, 浙江 杭州 310027;  
<sup>3</sup> 中石化长岭分公司军事代表室, 湖南 岳阳 414012)

关键词: 气固流化床; 静电荷; 摩擦起电; 双极带电

中图分类号: TQ 021.8

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2008) 02-0341-07

### Electrostatic behavior with fines of different sizes added into gas-solid fluidized bed

WANG Fang<sup>1,2</sup>, XU Yi<sup>1,2</sup>, YU Hengxiu<sup>1,2,3</sup>, WANG Jingdai<sup>1,2</sup>, YANG Yongrong<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Chemical Engineering, Hangzhou 310027, Zhejiang, China; <sup>2</sup> Department of Chemical and Biochemical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China; <sup>3</sup> Military Deputy Office, Changling Branch Company, Sinopec, Yueyang 414012, Hunan, China)

**Abstract:** Polymer particles having the same chemical makeup but different sizes would have their own special contributions to the generation of static charges, owing to the differences in catalyst residue and surface properties among them. Experiments were performed in a gas-solid fluidized bed to determine the changes in the electrostatic charges with addition of various fine polyethylene particles, which were the same material as the coarse polyethylene particles, to better understand their role in influencing electrostatic charge generation/dissipation. By measuring the electrostatic potential at different bed axial heights, it was found that the electric field inside the bed was significantly influenced by the size of added fine polyethylene particles, mass fractions and catalyst residue. Consequently, an impact factor of fine particles ( $F_b$ ) was proposed, which was the sum of particle diameter term and catalyst residue term. Within the experimental limits in this paper, after three kinds of fines with  $F_b$  all less than 1 were added in the fluidized bed, the electrostatic potential in the bed was just influenced slightly. However, the bed electrostatic potential changed significantly following the addition of the fines with the smallest particle diameter and highest residual catalyst content. While  $F_b$  of this kind of fines was less than 1, the static potential did not change much but even decreased slightly with the addition of fines. Once  $F_b$  of the fourth kind of fines was more than 1, the electrostatic potential in the bed increased greatly. With  $F_b$  of the fourth kind of fines increasing further, the electrostatic potential fell a little, and meanwhile it was found that a large amount of fine particles adhered to the column wall.

**Key words:** gas-solid fluidized bed; electrostatic charge; triboelectrification; bipolar charging

2007-08-15 收到初稿, 2007-10-22 收到修改稿。

联系人: 王靖岱。第一作者: 王芳 (1980-), 女, 博士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (20490205); 国家自然科学基金-石油化工联合基金项目 (2073611)。

Received date: 2007-08-15.

Corresponding author: WANG Jingdai, associate professor.

E-mail: wangjd@zju.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (20490205) and the National Natural Science Foundation of China-Petrochemical United Foundation (2073611).

## 引 言

气固流化过程中,存在颗粒与颗粒之间以及颗粒与壁面之间的反复接触、碰撞、摩擦以及分离,若固体颗粒为高绝缘性物质,不可避免地会引发静电。静电会改变流化床内的流体行为,导致颗粒团聚、粘壁,形成死区和沟流等<sup>[1-2]</sup>。特别是在聚乙烯生产中,当静电力超过气流对颗粒的曳力时,含有催化剂的聚乙烯细粉会被吸引至器壁形成一不流化层。因聚合反应热无法及时撤出,从而形成热点,使不流化层熔融而形成片状物,达到一定厚度时掉落到分布板上,易堵塞分布板,从而影响床内的流化状态甚至导致停车。据统计,由于静电引发结片而导致流化床停车占到总停车次数的 70%<sup>[3]</sup>,极大地影响了气相流化床装置的长周期运转。

前人已经在流化床中的静电研究上做了很多工作<sup>[4-5]</sup>,但由于聚合物粉料粒径的多分散性,以及流化床中气固运动的复杂性和随机性,对气固流化床中静电产生和累积机理的研究相对较少。有研究<sup>[6-8]</sup>表明,加入细粉可以起到减少流化床中静电荷积累量的效果,但却仅对与流化床中的主体大颗粒类型不同的细粉进行了考察。Mehrani 等<sup>[9]</sup>加入各种不同细粉研究了流化床中静电的变化,认为流化床中静电的积累是由于被夹带出去的带电细粉破坏了床内的电荷平衡,同时他们还初步研究了同种材质不同粒径颗粒混合系统的静电特征。以上研究均在一定程度上说明了细粉在流化床静电积累过程中具有不可忽视的作用,但到目前为止,尚未见系统研究同种材质的不同粒径颗粒,特别是细粉对流化床静电行为影响的文献报道。在流化床气相聚合生产聚乙烯的实际过程中,由于催化剂具有一定的粒径分布,催化剂颗粒间的活性并非完全等同,且在反应过程中可能会发生颗粒破碎等情况,最终形成具有很宽粒径分布(直径约 100~5000 μm)的聚合物颗粒,且研究发现不同粒径的粒子会呈现出不同的物性,例如不同粒径的聚乙烯颗粒具有不同的分子量、共聚物含量、表面粗糙度和残余催化剂含量,这些都可能对颗粒的功函数和带电行为产生影响,在很多自然现象<sup>[10-12]</sup>和工业过程<sup>[13-17]</sup>中,都已发现了同种材质、不同粒径的颗粒带电极性不同的“双极带电”现象。另外,颗粒粒度及其分布会对流化床起始流化速度和床层膨胀比产生显著影响,并进一步影响流化状态<sup>[18]</sup>,而流化床中的静

电场与颗粒带电极性和流化状态直接相关,因此聚合物细颗粒的含量必将对床内静电的积累产生影响。针对上述问题,本文将在冷模流化床实验装置中,通过加入不同含量、不同粒径、且与流化床中主体颗粒材质相同的细颗粒,考察粒径及其分布对流化床中静电行为的影响,从而探讨流化床中细颗粒在静电产生和积累中的作用,为更有效地控制并消除静电对聚乙烯生产的不利影响提供理论依据。

## 1 实验装置及方法

## 1.1 实验装置

本文所建立的实验装置如图 1 所示,主要由气固流化床和静电测量系统构成。流化床为内径 150 mm 的有机玻璃床,分布板采用孔径 2 mm 的多孔铁板,开孔率为 2.6%,在实验过程中保持良好接地,流化介质为干燥氮气,床温为室温。

静电采集系统主要由金属棒状探头(材质为黄铜,直径为 1 mm)、 $4 \times 10^{11} \Omega$  大电阻(美国 Ohmite 公司生产,MOX1125-23JE)、电压/电流转换器(美国 ADTECH 公司,MVX-106)、稳压直流电源、多通道数据采集卡(美国 NI 公司,PCI-6071E)以及采样软件构成。频域分析结果表明,静电信号属低频信号,与压力脉动频率相当<sup>[19]</sup>,频率成分一般是在 20 Hz 以下。根据 Shannon 采样定理,本文选取静电测量系统的采样频率为 100 Hz,采样时间为 300 s,以保证足够采样精度。

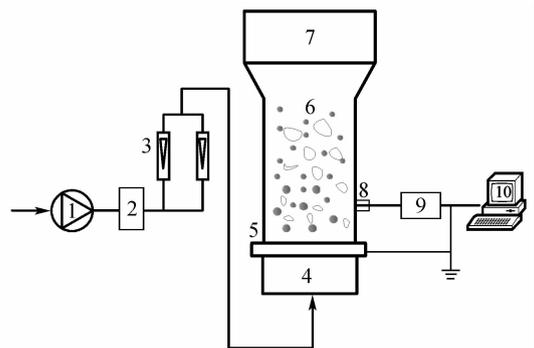


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

- 1—fan; 2—dryer; 3—flow meter; 4—mixing room;  
5—distributor; 6—fluidized bed; 7—expanding section;  
8—static probe; 9—signal transmitter;  
10—computer and data acquisition system

## 1.2 实验方法

实验中用到的不同粒径颗粒均由同一种聚乙烯粉料 (LLDPE, 中国石油化工股份有限公司天津分公司生产) 筛分获得, 其中颗粒 CP 作为流化床中的主体介质, 颗粒 SP1、SP2、SP3、SP4 则作为添加剂以不同质量分数分别加入, 各颗粒的主要物性如表 1 所示。

表 1 聚乙烯颗粒的性质

Table 1 Properties of LLDPE particles

Particle type	MI /g · (10 min) <sup>-1</sup>	$\rho$ /g · cm <sup>-3</sup>	$\bar{d}_p$ /μm	Mass fraction of residual catalyst/%
CP	2.0	0.92	1275	0.026
SP1			855	0.028
SP2			620	0.032
SP3			402	0.034
SP4			185	0.050

每次实验开始前, 首先将聚乙烯颗粒放于干净器皿中, 置于 70℃ 下的真空干燥箱中 24 h, 随后在真空条件下冷却 12 h, 备用。

通过在床层不同高度上设置采样点, 固定静床高和流化风速, 首先考察只有较大颗粒 CP 在流化床中流化时的静电压。在相同操作条件下, 且保证床内颗粒质量恒定, 采用相同方法分别测量加入不同质量分数细颗粒后的静电情况, 并与无细颗粒时加以比较。令较大颗粒 CP 流化时的静电压稳态值为  $U_0$ , 加入细颗粒后的静电压稳态值为  $U$ , 则可采用  $U/U_0$  值比较加入细颗粒后静电压的变化。

## 2 结果与讨论

图 2~图 5 分别是加入 4 种细颗粒后聚乙烯流化床中静电压随细颗粒添加量的变化情况。  $H_c$  为探头在分布板以上的高度, 表观气速为  $0.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 静床高为 200 mm, 其中 80 mm 和 160 mm 高度处测点位于流化床料位以下, 380 mm 处测点则在料位以上。从图中可以看出, 细颗粒 SP1、SP2 的加入基本没有引起流化床中静电压的改变, 细颗粒 SP3 的加入对床中静电压产生了一定影响, 而细颗粒 SP4 的加入则引起了床内静电压的明显改变。实验结果表明, 加入细颗粒的粒径不同, 对流化床中静电压的影响不同, 因此证实了颗粒粒径及其分布与床内静电行为的相关性, 将在 2.2 节中对此做进一步分析。

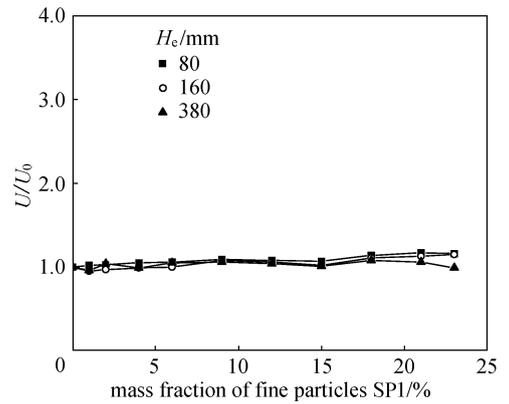


图 2 加入不同质量分数 SP1 颗粒后流化床中静电压的变化

Fig. 2 Changes of electrostatic potential in fluidized bed after different mass fraction SP1 particles added

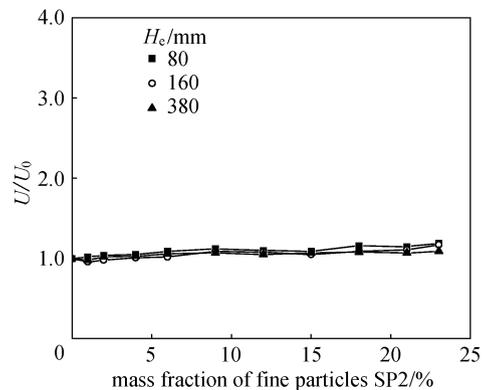


图 3 加入不同质量分数 SP2 颗粒后流化床中静电压的变化

Fig. 3 Changes of electrostatic potential in fluidized bed after different mass fraction SP2 particles added

### 2.1 细颗粒作用因子的提出

在聚乙烯的生产过程中, 催化剂颗粒会残留在聚乙烯颗粒的内部或被聚乙烯颗粒吸附在表面, 这些残留的催化剂在工业中称为灰分。纯净的聚乙烯颗粒为高绝缘性的物质, 其价电子带和传导带之间有一个非常宽的禁带, 价电子很难穿越禁带到达传导带, 因此在接触和摩擦时不会产生静电。而极性催化剂在颗粒内部的残留和表面的吸附形成了许多局部能级, 为价电子的跃迁提供了台阶。由于粒径不同的聚乙烯颗粒中灰分含量不同, 因此形成的局部能级数目也不等, 并直接导致电子迁移至颗粒表面所需能量 (即颗粒的功函数)、电子迁移的难易

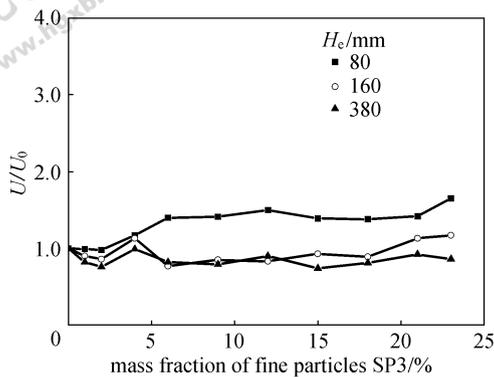


图 4 加入不同质量分数 SP3 颗粒后流化床中静电电压的变化

Fig. 4 Changes of electrostatic potential in fluidized bed after different mass fraction SP3 particles added

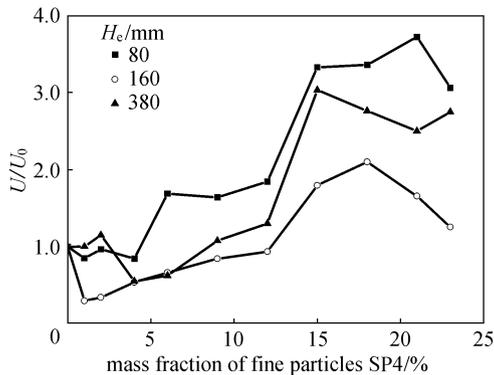


图 5 加入不同质量分数 SP4 颗粒后流化床中静电电压的变化

Fig. 5 Changes of electrostatic potential in fluidized bed after different mass fraction SP4 particles added

程度和迁移数量不同。由此可知即使是在同样操作条件下生产的聚乙烯颗粒，也会由于粒径的不同而具有不同的静电性质，从而在流化过程中产生较高的静电。同时，粒径的不同会对流化床中的流化状态、颗粒之间的接触形式和接触面积等造成直接影响。

实验结果（图 2~图 5）已经表明，不同粒径细颗粒的加入对于流化床中静电的影响不同，而实验中所采用的各种颗粒均属同种材质，唯一的差别就在于颗粒粒径和颗粒中灰分含量不同。鉴于实验结果和以上的分析，提出由颗粒粒径作用项  $F'_b$  和灰分含量作用项  $F''_b$  组成的细颗粒作用因子  $F_b$ ，以进一步分析不同粒径聚乙烯颗粒对流化床中静电的

贡献。

$$F_b = F'_b + F''_b = \sum_i \frac{\bar{d}_b \omega_{SPi}}{d_{SPi}} + \sum_i \frac{c_{SPi} \omega_{SPi}}{c_{CP} \omega_{CP} + c_{SPi} \omega_{SPi}} \quad (1)$$

图 6 所示为 4 种细颗粒的作用因子随其质量分数的变化。从中可以看出，在实验条件范围内，在相同的质量分数下，颗粒粒径越大，其作用因子越小，颗粒 SP1、SP2、SP3 的  $F_b$  均小于 1，而颗粒 SP4 的作用因子随添加量的变化幅度明显大于另外 3 种颗粒，且当 SP4 的质量分数大于 10% 后，其影响因子超过了 1。与实验结果相对应，作用因子小于 1 的 3 种细颗粒均未对流化床中的静电造成太大影响，而颗粒 SP4 的加入则引起了静电的明显改变。当  $F_b < 0.5$  时，各测点的静电电压首先有些许降低；当  $F_b > 1.0$  后，静电电压开始急剧升高；而当  $F_b$  继续增大，静电电压又有所下降。

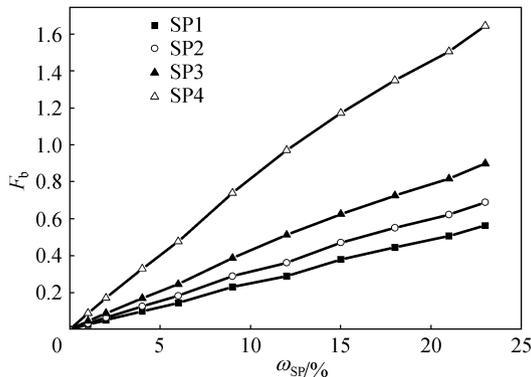


图 6 不同粒径聚乙烯细颗粒作用因子  $F_b$  随质量分数的变化

Fig. 6 Relationship between  $F_b$  and mass fraction of fine particles with different sizes

## 2.2 细颗粒在静电产生和积累中的作用分析

如式 (1) 所示，细颗粒对流化床中静电的影响主要来自两个因素的作用：① 由于粒径和表面状态的不同，细颗粒的加入在一定程度上改变了颗粒之间的接触面积和模式；② 由于所含灰分不同，不同粒径颗粒中能为电荷载体迁移提供“台阶”的局部能级数量不同，从而导致其对静电的贡献不同。

图 7 给出了流化床的床层结构和其中的接触模式随细颗粒含量增加的变化趋势。如图 7 所示，当只有较大颗粒流化时，只可能存在大颗粒与大颗粒间 (C-C) 和大颗粒与壁面间 (C-W) 的接触。而加入少量细颗粒后，由于细颗粒黏附在大颗粒表面，降低了 C-C 和 C-W 的接触概率，同时大颗粒

与细粉 (C-S) 以及细粉与壁面 (S-W) 间的接触概率随之增大。随着细颗粒加入量的增加, 细颗粒与细颗粒 (S-S) 之间以及 S-W 的接触成为主导。因此, 细颗粒加入量决定了流化床中主要的接触模式, 可以对静电的产生和积累造成直接影响。

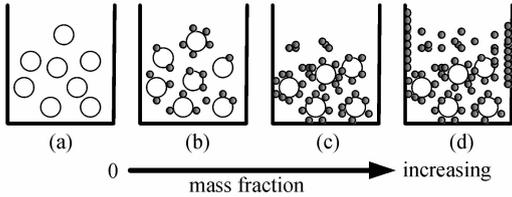


图 7 粗颗粒床中加入细颗粒时床层结构随添加量的变化

Fig. 7 Transition of bed structure with increase of fine particles added in fluidized bed including only coarse particles

根据上述分析可知, 随着细颗粒的加入, 流化床的床层结构和其中的接触模式均会发生相应改变, 这种变化首先会对颗粒与颗粒之间以及颗粒与壁面之间的接触面积发生直接影响, 进而会影响床内的带电情况。流化床中发生一次碰撞 (包括颗粒之间和颗粒与壁面之间) 时的接触面积与参与碰撞的颗粒粒径直接相关。加入的小颗粒与大颗粒的直径相差越多, 对接触面积的影响越大, 又因为接触时转移电荷量正比于接触面积<sup>[20-21]</sup>, 则对静电荷的产生、转移和累积影响越大。细粉加入后, 小颗粒间的团聚和小颗粒在大颗粒表面的吸附不可避免。但由于在实验风速下床内湍动剧烈, 可在一定程度上减轻团聚和吸附的程度, 同时可认为发生团聚和吸附的过程其实是颗粒与颗粒之间发生了接触/碰撞。而且在流化过程中, 颗粒聚集体无论是在形状、尺寸, 还是在空间分布上, 都处于动态的变化过程之中<sup>[22]</sup>, 即颗粒聚集体会不断破碎又不断形成, 因此即使颗粒的团聚和黏附现象确实存在, 颗粒之间接触/碰撞-分离的过程仍然会不断发生, 颗粒粒径对接触面积的影响仍然存在。

此外, 由于烯烃催化剂为高效催化剂, 聚合反应后催化剂残留分散在聚乙烯颗粒内, 且粒径不同, 聚乙烯颗粒中残留催化剂量不同。根据工厂提供的灰分检测数据 (表 1) 可知, 灰分随粒径的减小呈增大趋势。这是因为催化剂颗粒活性越高, 则聚乙烯颗粒生长得越充分, 其中所含灰分含量越小, 而如果催化剂颗粒由于毒物等的作用活性降低, 则只能得到粒径较小的聚乙烯颗粒, 即细粉, 相应地, 细粉中的灰分含量较大。灰分含量越大,

颗粒中局部能级的数目越多, 可发生迁移的电荷载体浓度越高, 则发生一次碰撞时转移的电荷量越多。

颗粒 SP1 和颗粒 SP2 的粒径和灰分含量均与颗粒 CP 差距较小, 从而引起的接触面积和发生碰撞时转移的电荷量变化较小, 因此这两种颗粒的加入对流化床中的电荷积累量影响甚小, 几乎不会对静电压产生影响。

颗粒 SP3 的加入对接触面积的影响较大, 但因与颗粒 CP 的灰分含量相差不多, 故加入此种颗粒对静电压的影响主要来自颗粒粒径的改变。当加入细颗粒的量比较少时, 少量细颗粒会吸附在粗颗粒表面, 一方面阻挡了 C-C 的直接接触, 导致总的接触面积减少; 另一方面由于粒径对颗粒有效功函数的影响, 使得不同粒径颗粒所带静电极性相反<sup>[17]</sup>, 当细颗粒吸附到大颗粒上时发生了电荷的中和, 从而使颗粒总体带电量减少。因此, 开始时, 加入少量细颗粒后, 床内静电荷积累量反而减少 (图 4); 随着加入量的增多, 细颗粒数目的增加使得碰撞次数增加, 弥补了因细粉加入造成的接触面积的减少, 床内静电压又恢复至加入细颗粒前的水平甚至会略有升高。

对颗粒 SP4 而言, 不仅其粒径远小于较大颗粒 CP, 且灰分含量也约为后者的 2 倍, 故这种颗粒加入后对静电压的改变将是这两种因素共同作用的结果。如图 5 所示, 当加入质量分数小于 5% ( $F_b < 0.5$ ) 时, 这时与颗粒 SP3 情况类似, 床内静电压首先下降, 这是因为细颗粒数目较少, 导致碰撞频率很低, 细颗粒单次碰撞时转移电荷量的增多不足以弥补因接触面积减小和电荷中和引起的静电荷产生量的减少。随着细颗粒加入量的增多, 细颗粒数目明显增加, 粗颗粒表面吸附更多的细粉, 发生 S-S 和 S-W 碰撞的概率和频率增加, 从而总接触面积增加, 电荷转移和积累量增加, 静电压升高。特别是当 SP4 的质量分数超过 10% 后 ( $F_b > 1.0$ ), 静电压开始大幅度升高。随着细颗粒的继续加入至含量超过 15%, 静电压的升高使得将细颗粒吸引至壁面的静电力超过了将其拉离壁面的气体曳力, 细颗粒开始黏附在器壁上。此时, 尽管流化床中含有更多的细颗粒, 但粘壁的发生阻碍了 S-W 之间的接触, 对带电有贡献的接触面积相应减少, 床内主要接触形式为 S-S 碰撞。同时, 由于颗粒 SP4 中较多的极性杂质含量, 在细颗粒含量较

大的情况下, S-S 碰撞过程中会大量发生电荷中和与电荷逸散, 当电荷耗散量超过静电产生量时, 床内静电的累积减少, 静电压也相应降低。但值得注意的是, 在这种情况下, 尽管静电压有所降低, 但由于细粉含量过大, 粘壁现象变得非常严重, 如果是在工业流化床聚合反应器中, 则很容易发生器壁结片现象, 因此应该予以避免。此外, 还可以发现测点高度不同, 加入相同含量 SP4 细粉后静电压的变化程度有所差异, 其中  $H_e = 80$  mm 测点处的  $U/U_0$  最大。这主要是由于在流化床中存在颗粒的离析和大小颗粒接触分离后的双极带电现象。随着带一种电荷的细颗粒逐渐被带至床层上部, 剩余的相反极性电荷则存在于床层下部的粗颗粒上, 且粗颗粒含量越多, 与细粉接触过程中交换的电荷量越大, 从而导致了距离分布板最近且粗颗粒含量最多的  $H_e = 80$  mm 测点处加入细粉前后的电压变化值  $U/U_0$  最大。

### 3 结 论

在  $\phi 150$  mm 的流化床冷模装置中, 以干燥氮气作流化气体, 对聚乙烯颗粒体系进行了流态化实验。通过向单一粒径的较粗聚乙烯颗粒中添加同种类型但不同粒径的细颗粒, 考察了颗粒粒径分布对流化床中静电压的影响。实验结果表明, 聚乙烯颗粒的粒径分布发生改变, 不仅会影响颗粒与颗粒之间以及颗粒与壁面之间的接触面积, 同时由于大小颗粒中灰分含量的差异, 使得接触过程中转移电荷数目也不相同, 因此不同粒径的颗粒对流化床中静电产生和积累的贡献并不相同。提出了包含颗粒粒径作用项和灰分含量作用项的细颗粒作用因子  $F_b$ , 并发现床内静电压与所加细颗粒的  $F_b$  密切相关。鉴于本文的实验结果, 在聚乙烯生产过程中, 为了更有效减少静电积累和器壁结片, 须严格控制产品粒径分布, 特别是  $d_{SP} \leq 185 \mu\text{m}$  的细粉含量在 10% 以下, 且以小于 5% 为最优, 这也对催化剂的活性及粒径分布提出了进一步的要求。

#### 符 号 说 明

$c_{SPi}, c_{CP}$ ——分别表示第 SP $i$  种细颗粒和较大颗粒 CP 中灰分的质量分数, %

$\bar{d}_p, d_{SP}$ ——分别表示混合颗粒的平均粒径、细颗粒平均粒径, mm

$F_b, F'_b, F''_b$ ——分别表示细颗粒作用因子、颗粒粒径作用

项和灰分含量作用项

$H_e$ ——测点高度, mm

$i$ ——表示细颗粒类型 ( $i=1, 2, 3, 4$ )

MI——聚乙烯的熔融指数,  $\text{g} \cdot (10 \text{ min})^{-1}$

$U$ ——加入细颗粒后流化床中的静电压, V

$U_0$ ——只有较大颗粒时流化床中的静电压, V

$\rho$ ——聚乙烯的密度,  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$

$\omega_{CP}, \omega_{SPi}$ ——分别表示流化床中较大颗粒和第 SP $i$  种细颗粒的质量分数, %

### References

- [1] Ciborawski J, Woldarski A. On electrostatic effects in fluidized beds. *Chemical Engineering Science*, 1962, **17**: 23-32
- [2] Boland D, Geldart D. Electrostatic charging in gas fluidized beds. *Powder Technology*, 1971/1972, **5**: 289-297
- [3] Li Yanhui (李延辉). Simple analysis on the treatment eliminating static charges in LLDPE plants. *Zhejiang Chemical Engineering* (浙江化工), 2001, **32** (suppl.): 82-86
- [4] Gregory H. Electrostatics and gas phase fluidized bed polymerization reactor wall sheeting. *Chemical Engineering Science*, 2006, **61** (4): 1041-1064
- [5] Yu Hengxiu (于恒修), Wang Fang (王芳), Wang Jingdai (王靖岱), Yang Yongrong (阳永荣). Progress in study of electrostatics and wall sheeting in gas phase polymerization fluidized bed reactor. *Petrochemical Technology* (石油化工), 2007, **36** (2): 206-211
- [6] Wolny A, Opalinski I. Electric charge neutralization by addition of fines to a fluidized bed composed of coarse dielectric particles. *Journal of Electrostatics*, 1982, **14** (3): 279-289
- [7] Wolny A, Kazmierczak W. Triboelectrification in fluidized bed of polystyrene. *Chemical Engineering Science*, 1989, **44** (11): 2607-2610
- [8] Park A H, Bi H T, Grace J R. Reduction of electrostatic charges in gas-solid fluidized beds. *Chemical Engineering Science*, 2002, **57** (1): 153-162
- [9] Mehrani P, Bi H T, Grace J R. Electrostatic behavior of different fines added to a Faraday cup fluidized bed. *Journal of Electrostatics*, 2007, **65** (1): 1-10
- [10] Stow C D. Atmospheric electricity. *Reports on Progress in Physics*, 1969, **32**: 1-67
- [11] Ette A I I. The effect of the Harmattan dust on atmospheric electric parameters. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1971, **33** (2): 295-300
- [12] Melnik O, Parrot M. Electrostatic discharge in Martian dust storms. *Journal of Geophysics Research*, 1998, **103** (A12): 29107-29118
- [13] Ali F S, Ali M A, Ali R A, Inclulet I I. Minority charge separation in falling particles with bipolar charge. *Journal*

- of *Electrostatics*, 1998, **45** (2): 139-155
- [14] Steve T, Nick G, Caner U Yurteri, *et al.* Effects of surface properties on the tribocharging characteristics of polymer powder as applied to industrial processes. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, **39** (1): 79-86
- [15] Zhao H, Castle G S P, Incullet I I, Bailey A G. Bipolar charging of poly-disperse polymer powders in fluidized beds. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, **39** (3): 612-618
- [16] Zhao H, Castle G S P, Incullet I I. The measurement of bipolar charge in polydisperse powders using a vertical array of Faraday pail sensors. *Journal of Electrostatics*, 2002, **55** (3/4): 261-278
- [17] Incullet I I, Castle G S P, Aartsen G. Generation of bipolar electric fields during industrial handling of powders. *Chemical Engineering Science*, 2006, **61** (7): 2249-2253
- [18] Wang Zhangmao (王樟茂), Zhang Nianying (张年英), Chen Gantang (陈甘棠), *et al.* Influence of particle size and its distribution on the critical parameters and expansion of fluidized beds. *Chemical Reaction Engineering and Technology* (化学反应工程与工艺), 1985 (1/2): 47-57
- [19] Yao L, Bi H T, Park A H. Characterization of electrostatic charges in freely bubbling fluidized beds with dielectric particles. *Journal of Electrostatics*, 2002, **56**: 183-197
- [20] Elsdon R, Mitchell F R G. Contact electrification of polymers. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1976, **9**: 1445-1460
- [21] Ahuja S K. A collision model of charge exchange between metal and polymer spheres. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1976, **9**: 1305-1314
- [22] Jin Yong (金涌), Zhu Jingxu (祝京旭), Wang Zhanwen (汪展文), Yu Zhiqing (俞芷青). *Fluidization Engineering Principles* (流态化工程原理). Beijing: Tsinghua University Press, 2001: 123