

研究论文

气固流化床中静电压分布及料位检测

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); <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)

**摘要:** 应用自行开发的静电压在线测量系统, 对聚乙烯气固流化床中不同床高处的静电压进行测量, 发现床内的静电场为一非均匀电场, 静电压沿床层轴向呈“Z”形分布, 且在床层稀密相分界面, 即料位附近会发生极性的改变。实验同时发现, 提高流化气速和静床高, 稀密相分界面上升, 极性改变位置也随之出现较明显的升高。而颗粒的粒径发生改变后, 若颗粒在流化过程中存在较明显的料位, 则极性改变现象明显, 反之这种现象不会发生。在此基础上, 提出了流态化颗粒的双极带电理论, 指出不同粒径的颗粒在有效功函数、表面结构、吸附杂质的能力以及表面能等方面均存在差异, 导致大小颗粒在接触带电中所带电荷极性相反, 进而影响了整个流化床中的静电分布。最后, 基于静电压的分布特征提出了一种确定流化床料位高度的新方法, 实验结果表明, 该方法计算得到的料位高度值与实测值之间的最大相对误差为 4.08%, 平均相对误差为 2.02%, 具有较高精度, 能替代现有对人体具有致命伤害的  $\gamma$  射线, 且可实现床内静电压和料位高度的双重监控。

**关键词:** 气固流化床; 静电压; 摩擦起电; 双极带电; 料位

**中图分类号:** TQ 021.8

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0438-1157 (2008) 03-0574-08

**Electrostatic potential distribution in gas-solid fluidized  
beds and measurement of bed level**

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; 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:** An on-line measurement technique, which consisted of electrostatic probe, signal transmitter and data acquisition systems, was developed to study the electrostatic characteristics in gas-solid fluidized beds. By measuring the electrostatic potential at different bed heights, it was found that the electric field inside the bed was non-uniform. The axial profiles of electrostatic potential were Z-shaped, and the voltage polarity would reverse near the interface between dense and dilute phases. The heights where voltage polarity reversal happened would increase with the increase of gas velocity and static bed level. Comparing the fluidization of particles with different sizes, it was discovered that the polarity reversal would change significantly when there was an obvious interface between dense and dilute phases, and the converse was not true. Subsequently, the principle on bipolar charging of different sizes fluidizing particles was presented. Work function, surface structure, selective adsorption of contaminants and surface energy were all dependent on the particle size, which resulted in finer and coarser particles charged reversely, consequently

2007-06-19 收到初稿, 2007-08-17 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); 国家高新技术研究发展计划项目 (G20070040); 国家自然科学基金-石油化工联合基金项目 (2073611)。

**Received date:** 2007-06-19.

**Corresponding author:** WANG Jingdai. E-mail: wangjd@zju.edu.cn

**Foundation item:** supported by the National Natural Science Foundation of China (20490205), the High-tech Research and Development Program of China (G20070040) and the National Natural Science Foundation of China-Petrochemical United Foundation (2073611).

influencing the electrostatic potential profile in fluidized beds. A new method to determine bed level based on the characteristics of electrostatic potential in fluidized beds was proposed. The results showed that bed level could be successfully predicted with the maximum relative error 4.08% and the mean relative error 2.02% with the method in this work. The novel electrostatic approach to measuring the bed level in gas-solid fluidized bed could replace the  $\gamma$ -ray method in the future, and could monitor electrostatic potential in the bed and bed level simultaneously.

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

引 言

在气固流态化过程中，颗粒与颗粒之间、颗粒与壁面之间以及颗粒与气体之间存在反复碰撞、摩擦及分离，若固体颗粒为高绝缘性物质，则不可避免地会发生静电的产生与积累。产生的静电场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>[1-4]</sup>。当静电积累到一定程度，达到周围介质的击穿场强，还可能引起火花放电甚至爆炸。

由于聚合物粉料的多分散性，以及流化床中气固运动的复杂性和随机性，流化床中产生的静电场呈现出非均匀特性<sup>[1, 5-7]</sup>。Ciborowski 等<sup>[1]</sup>发现以聚乙酸乙烯酯、聚苯乙烯和沙子作为固体粒子进行流化时，电极置于静床高度之上时测得的静电电压最大；Fujino 等<sup>[5]</sup>则指出流化床壁面附近径向电场最强，而轴向电场强度为零，因此粒子很容易在器壁附近的电场中聚集；Fulks 等<sup>[6]</sup>和 Goode 等<sup>[7]</sup>则都指出流化床底部和顶部的静电流/压极性不同。由于不同研究者采用的测量方法和研究体系不同，目前在流化床中静电的分布特征上还未能得出一个统一的结论，更无通用的理论可对其做出解释。在流化床中静电产生机理仍不甚明确的情况下，静电场分布的不均匀性给其中静电的控制带来了极大困难。针对以上问题，本文采用自行研发的静电电压测量系统，研究了气固流化床中静电场的分布特征，考察了流化气速、静床高和颗粒粒径等变量对静电电压分布的影响，并提出了流态化颗粒的双极带电 (bipolar charging) 理论，对实验现象做出了合理解释，为有效控制和减少静电对流化床行为的不利影响提供了理论依据。最后，基于气固流化床静电压的轴向分布特点，提出了一种检测料位高度的新方法，可以实现流化床中静电压和料位的双重监控。

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采集系统组成。流化床为  $\phi 150$  mm 的有机玻璃床，分布板采用孔径为 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，测点位置见表 1，其中探头位置指的是分布板以上高度，且每个测点处的探头均伸入床层 10 mm，图 1 中只给出了一个测点。

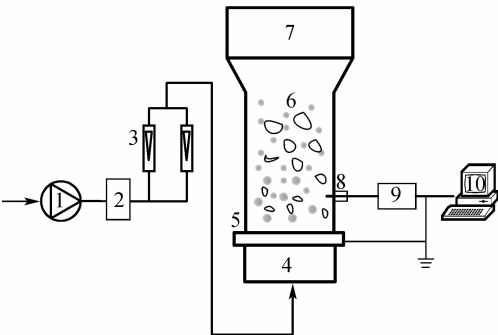


图 1 实验装置示意图

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

表 1 测点位置

Table 1 Heights of eight measurement points above distributor

| No. | Probe height/mm |
|-----|-----------------|
| 1   | 80              |
| 2   | 160             |
| 3   | 245             |
| 4   | 380             |
| 5   | 515             |
| 6   | 650             |
| 7   | 780             |
| 8   | 910             |

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。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。

实验所用物料为线性低密度聚乙烯颗粒（LLDPE，中国石化股份有限公司天津分公司生产），其熔融指数和密度分别为  $2.0 \text{ g} \cdot (\text{10 min})^{-1}$  和  $920 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，相对介电常数为 2.3，平均粒径为 0.833 mm，粒径分布见表 2。

表 2 聚乙烯颗粒的粒度分布

Table 2 Particle size distribution of LLDPE particles

| $d_p/\text{mm}$ | Mass fraction/% |
|-----------------|-----------------|
| 1.700           | 3.7             |
| 1.275           | 38.5            |
| 0.780           | 19.3            |
| 0.568           | 9.0             |
| 0.438           | 10.1            |
| 0.350           | 12.4            |
| 0.185           | 7.0             |

## 1.2 实验方法

每次实验开始前，首先将聚乙烯颗粒放在干净器皿中，置于  $70^\circ\text{C}$  下的真空干燥箱中 24 h，随后在真空条件下冷却 12 h，备用。

颗粒流化过程中，静电荷生成的同时存在着电荷的耗散，当这两个过程达到动态平衡时，床内静电电压也达到稳态值。当电荷生成速率大于电荷逸散速率时，床层电压随着时间的延长呈现出指数增加的趋势（图 2），反之则指数减少。实验中观察到的电压变化是电荷生成与电荷耗散两个过程的加合作用<sup>[8]</sup>，即

$$\frac{dU}{dt} = k_g(U_{\max} - U) - k_d U \quad (1)$$

式中  $U_{\max}$  表示没有电荷耗散的情况下流化床内能达到的最大静电电压，V； $k_g$  为电荷生成速率常数， $\text{s}^{-1}$ ； $k_d$  为电荷耗散速率常数， $\text{s}^{-1}$ 。

假定  $t=0$  时， $U=0$ ； $t=t$  时， $U=U$ ，则式（1）积分后得到

$$U = U_s[1 - \exp(-Kt)] \quad (2)$$

其中

$$U_s = \frac{k_g}{k_g + k_d} U_{\max} \quad (3)$$

$$K = k_g + k_d \quad (4)$$

$U_s$  为经过一段时间后流化床可达到的稳定电压值，即稳态电压。每次实验的  $U_s$  和  $K$  值可以通过实验数据拟合得到，图 2 为计算稳态静电电压的一个实例。在静床高为 300 mm，流化气速为  $0.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，对表 2 所示的聚乙烯颗粒进行流化时，拟合所得  $U_s = -1603 \text{ V} < 0$ ， $K = 0.03917 > 0$ ，说明在这种情况下流化床中颗粒带电总量为负，静电电压绝对值呈现指数增加的趋势。

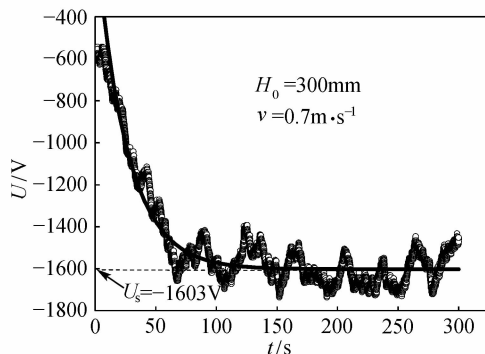


图 2 稳态静电电压的计算 ( $H_e = 160 \text{ mm}$ )

Fig. 2 Calculation of steady-state potential

( $H_e = 160 \text{ mm}$ )

以下研究中获得的静电电压值均为各实验条件下的稳态静电电压，即通过在床层不同高度上设置采样点测得静电电压随时间的变化曲线，由式（2）拟合得到该采样点的稳态静电电压值  $U_s$ ，继而获得静电电压沿床高的轴向分布曲线。

## 2 流态化颗粒的双极带电理论

在沙尘暴<sup>[9-10]</sup>、龙卷风<sup>[9-11]</sup>以及火山爆发<sup>[12]</sup>等自然现象以及工业上各种粉体处理<sup>[13-17]</sup>中的摩擦带电现象中，均发现大小颗粒在发生接触带电时所带电荷极性相反。这种因粒径不同而导致颗粒在接触过程中带不同极性电荷的现象，称为颗粒的“双极带电”。双极带电的发生与物料种类没有直接关系，对于绝缘体颗粒，无论是同种物料还是异种物料，也无论颗粒总体带电量为正还是为负，这种现象都有可能出现。本文针对气固流化床中颗粒流态化特性，结合绝缘体颗粒的双极带电现象，提出了流态化颗粒的双极带电理论，包括流态化颗粒的双极带电机理和颗粒粒度分布与静电荷分布之间的关系。

导致颗粒在流化过程中发生双极带电的因素主要有以下4个。

(1) 大小颗粒的有效功函数不同。聚合物的有效功函数指的是将聚合物颗粒中的电荷载体(电子或离子)移出其表面所需的最小能量。颗粒直径不同,电荷载体迁移出颗粒表面所需能量不同,功函数不同。一般来说,颗粒的功函数与粒径呈反比<sup>[18]</sup>,故小颗粒中电荷载体向表面的迁移比大颗粒困难。根据电荷载流子的不同类型(电子、阳离子或阴离子),大小颗粒分别带上相反极性的电荷。若载流子为电子或阴离子,则大颗粒带正电,小颗粒带负电<sup>[13-17]</sup>;若载流子为阳离子,则小颗粒带正电,大颗粒带负电<sup>[13]</sup>。

(2) 大小颗粒的微观结构不同。在流化床聚合反应器中,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  $\mu\text{m}$ )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、表面粗糙程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。

(3) 大小颗粒对介质的选择性吸附能力不同。由于小颗粒的比表面积比大颗粒大得多,其表面更容易吸附直径更小的污染物和添加剂。聚合物生产过程中气体进料中的杂质更容易吸附于细颗粒的表面,并改变其表面的物理/化学结构,形成不同类型的电荷载体,造成大小颗粒表面性质的不同,进而影响它们的功函数和带电极性。

(4) 大小颗粒的表面能不同。一种材料的表面能乃是将两表面分离至无穷远所做的功。对于同种物质,其表面能随尺寸增加而减小,这使得大小颗粒的表面能不同,对电荷的束缚力不同,从而有效功函数也就不同。

当然引起双极带电的原因不止以上4种,还可能存在其他的一些解释。

在颗粒的流化过程中,床层表面即料位处由于气泡的破裂,不断将颗粒抛向上部空间。同时由于在离开床面向上运动时受到重力、曳力和颗粒间的相互碰撞等阻力,大部分粗颗粒将返回床层,只有少量细颗粒仍随气流向上运动。在这部分空间中,气相变成连续相,颗粒则成为分散相,称为流化床的自由空间或稀相区。相反在料位以下,气体以分

散的气泡形式存在,颗粒则作为连续介质,为密相空间。由于流化床对颗粒的离析作用,使得多分散性的聚合物颗粒在流化床的轴向上形成一定的粒度分布,主要表现为进入稀相空间的颗粒大部分是细粉,而大颗粒多集中在密相空间特别是床层底部。由于颗粒的双极带电特性,流化床中的粒度分布决定了其中的静电荷分布,即稀相空间中静电压与细粉所带电荷极性相同,而大颗粒的电荷极性决定了床层下部的电压符号。

### 3 流化床中的静电分布

#### 3.1 气速对静电分布的影响

为了考察表观气速对流化床中静电压及其分布的影响,常温常压下,固定静床高为300 mm,在不同气速下对聚乙烯颗粒分别进行了流态化实验,所得静电压分布如图3所示。

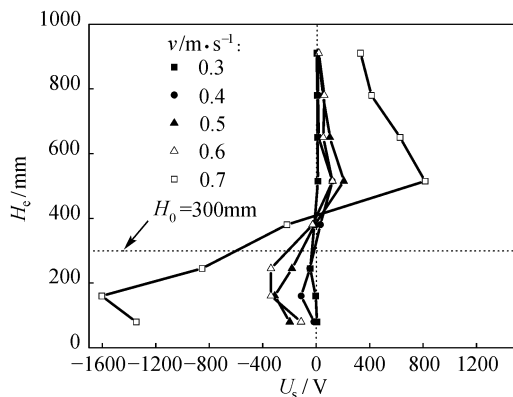


图3 表观气速对静电压分布的影响

Fig. 3 Effect of superficial gas velocity on axial profile of static potential in fluidized bed

从图3中可以看出,随着气速的增加,各测点处的静电压均相应增大。其原因主要是气速的增大加剧了床内的湍动程度,使得颗粒间及颗粒与壁面间的碰撞频率及碰撞能量均变大,静电生成速率增大,床内累积静电压相应升高。同时,在同一气速下,由于床内不同高度处颗粒粒径分布、气泡大小以及床层空隙率不同,床内的静电场呈现出非均匀电场的特性。除0.3  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时因为信号太小,各点静电压信号区分不明显之外,其他气速下各测点处静电压数值各不相同,且在距离分布板400 mm高度(目测料位)附近,静电压发生了极性的反转,从而使得静电压在流化床轴向上呈“Z”形分布。随气速增大静电压极性的转变位置亦逐渐升高,且改变后的正静电压随气速增加而增大,静电

压的“Z”形分布越来越明显。

根据流态化颗粒的双极带电理论,可以对上述实验现象做出合理解释。首先从床层下部电压为负,而上部电压为正的实验现象中,可以推断出较粗颗粒带负电,而细颗粒则带正电。这说明在本文的实验条件下,聚乙烯颗粒中的电荷载流子为阳离子,这些阳离子主要可能来源于颗粒中残留的催化剂和颗粒表面吸附的极性杂质。由于颗粒的有效功函数与直径呈反比,较大颗粒中的阳离子更容易迁移出来,从而使得接触后的大颗粒带负电,小颗粒带正电。然而当气速太低时( $v < 0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),一方面床内的湍动不够剧烈,静电生成速率与逸散速率相差不多,因此床内静电积累量很少,静电压很低;另一方面此气速不足以使细颗粒达到其扬析速度,流化床中不存在明显的稀密相界面,因此在小于  $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的气速下观察不到静电压极性的明显改变。而当气速增大至使床层均匀鼓泡流化且有较多细粉到达料位之上,形成明显稀密相界面后,电压极性便相应地在分界面处发生了改变。随着气速的加大,料位随之升高,电压极性发生改变的位置也相应升高。同时提高气速使颗粒扬析量和射出速度均升高,稀相空间中的细颗粒浓度增加,此处正静电压也相应增加,由电荷守恒原理,密相空间中剩下的负电荷相应增多亦即负电压升高。随着距离料位的轴向高度的增大,空间中细颗粒浓度逐渐降低,静电压也逐渐减小直至接近于零。

### 3.2 静床高对静电分布的影响

为进一步考察并验证上面提出的静电压极性发生反转的原因,固定表观流化气速在  $0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,通过改变静床高实现料位改变的效果,在该气速下,不同静床高的 LLDPE 颗粒在流化床中均呈现鼓泡流化或湍流流化,存在较明显的床层表面,实验结果如图 4 所示。由图可知,不同静床高下的静电场都是非均匀的,且静电压极性在稀密相界面附近发生了改变。随着静床高增加,电压极性改变位置明显升高,各个实验条件下的稀相空间中均为正静电压,而料位之下的密相中则存在负静电场。由于只是改变了静床高,其他条件保持恒定,本实验中的颗粒带电机理与改变气速时相同,这进一步验证了流化颗粒的双极带电理论。

### 3.3 颗粒粒径对静电分布的影响

对表 2 中具有宽粒径分布的聚乙烯颗粒进行了筛分,得到了粒径为  $1.275 \sim 1.700 \text{ mm}$  (颗粒

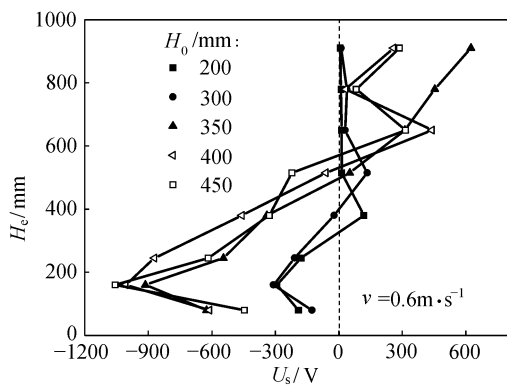


图 4 静床高对静电压分布的影响

Fig. 4 Effect of static bed level on axial profiles of static potential in fluidized bed

P1)、 $0.780 \sim 1.275 \text{ mm}$  (颗粒 P2)、 $0.438 \sim 0.568 \text{ mm}$  (颗粒 P3)、 $0.350 \sim 0.438 \text{ mm}$  (颗粒 P4)、 $0.185 \sim 0.350 \text{ mm}$  (颗粒 P5) 5 种粒径分布更窄的颗粒,并在固定静床高( $H_0 = 300 \text{ mm}$ )和流化气速( $v = 0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )的情况下对其分别进行了实验,考察了粒径对流化床中静电压及其分布的影响。

在图 5 中可以看到,尽管颗粒的粒径分布更窄,但除了最粗的颗粒 P1 和最细的颗粒 P5 产生静电压较低且未发生极性改变外,另外 3 种颗粒同样在料位附近发生了静电压极性的改变。这主要是由于聚乙烯大颗粒 P1 是在聚合过程中得到充分长大形成的,这样的颗粒相互之间性质相似度高,其中极性催化剂颗粒被层层包裹在内部,且颗粒越大,对周围介质中的杂质的吸附能力越弱,从而使得粗颗粒表面吸附的极性杂质较少,在两次接触过程中电荷迁移量较少,表现为静电压较低;同时,颗粒 P1 在流化时,床层料位以上几乎没有颗粒的扬析,自由空间中细颗粒含量几乎为零,也就无法测得其产生的静电压。而对于颗粒 P5 来说,尽管颗粒中催化剂残余量最高且吸附极性杂质能力最强,比其余 4 种颗粒更易产生静电,但由于极性物质的存在降低了其表面电阻率,静电荷的耗散速率增大,因此静电荷积累量反而较颗粒 P2、P3 和 P4 降低;且由于粒径太小,在  $0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的流化气速下,已接近快速流化状态,床层表面消失,颗粒呈聚集体被成群带出,颗粒之间的接触机会和接触强度均相应较低,因此颗粒总体带电量极少,也未能观察到静电压的极性改变现象。

实验中可以观察到,颗粒 P2、P3 和 P4 的流

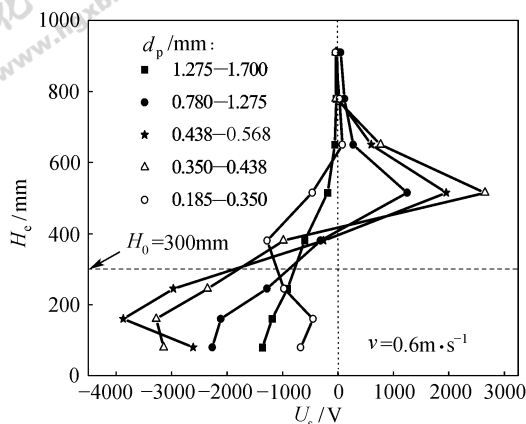


图5 颗粒粒径对静电压分布的影响

Fig. 5 Effect of particle size on axial profiles of static potential in fluidized bed

化状况与混合粒径颗粒相似, 均呈现为鼓泡流化或接近湍流流化, 存在较明显的两相界面, 因此这3种颗粒的轴向静电压分布与混合粒径颗粒类似, 在料位之上均呈现极性反转的“Z”形分布, 且静电电压绝对值随粒径减小而相应增加(图5)。

上述现象表明, 不同粒径分布的聚乙烯颗粒由于表面状态、所含催化剂残余量和对杂质吸附能力等性质的不同, 造成其功函数有一定差异, 因此即使是颗粒粒径分布较窄的同种物料, 在不断碰撞摩擦过程中同样能产生高静电和双极带电现象。

#### 4 料位高度的检测

由第3节中对流化床中静电压分布特征的研究可知, 无论流化风速、静床高和颗粒粒径如何改变, 只要床中存在较明显的稀密相分界面(即料位), 静电压都会在料位附近发生极性的改变。实验同时发现, 静电压测点与实际料位距离越近, 测得静电电压的绝对值越趋于零, 其中料位下方测得的静电电压值稍偏负, 反之则稍偏正。原因可能是由于大量气泡在密相床层表面爆破, 将此处颗粒抛向稀相空间, 导致了料位上下的小范围内颗粒浓度很低即电荷量很少, 且下方的净电荷为负而上方为正。将稀密相分界面处破裂气泡的中心位置定义为料位高度, 因为气泡内颗粒浓度可认为近似为0, 且料位位于稀密相空间正负两个电场的交界处, 不同方向的电力线在此处刚好相互抵消, 可以推测料位处的静电电压为0。

根据流化床中静电压的轴向分布特点与料位高度之间的关联(图6和图7), 提出了一种检测鼓

泡和湍流流化床料位高度的新方法, 具体步骤如下:

① 定义第*i*个测点和第*i*+1个测点间的静电电压比例函数 $\xi(i, i+1)$

$$\xi(i, i+1) = \frac{U_s(i)}{U_s(i+1)} \quad (5)$$

② 当 $\xi < 0$ 时, 即认为料位位于第*i*个测点和第*i*+1个测点之间;

③ 假定料位处静电电压为0, 则可由式(6)进一步精确确定料位高度

$$H_l = H(i) + \Delta H(i, i+1) \frac{|U_s(i)|}{|U_s(i)| + |U_s(i+1)|} \quad (6)$$

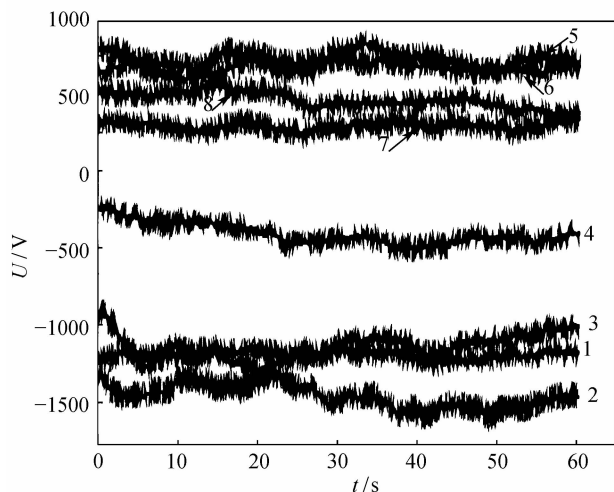


图6 不同测点处静电电压的实时数据

Fig. 6 Real time static potential at different measurement points (LLDPE,  $H_0 = 300$  mm,  $v = 0.7$  m·s<sup>-1</sup>, 1—8 in graph are serial number of measurement points in Table 1)

由上述方法对实验中发生静电电压极性改变的各个情形下的料位高度进行了预测, 预测结果与实测结果的比较见图8~图10。图中结果显示, 料位高度预测值与实测值吻合较好, 其中最大相对误差为4.08%, 平均相对误差仅为2.02%, 具有较高精度, 符合工业生产中的要求。该方法能替代现有对人体具有致命伤害的 $\gamma$ 射线, 或者可以与其他料位检测方法相互补充, 从而弥补流化床中料位计检测精度不高的缺点, 维持流化床流化质量的稳定, 确保流化床在最佳流化高度下进行操作, 并获得最高产量。

粉体料仓在填充过程中的行为与气固鼓泡/湍流流态化类似, 同样存在由大颗粒组成的密相空间和主要包含细颗粒的稀相空间, Inculet等<sup>[17]</sup>在向

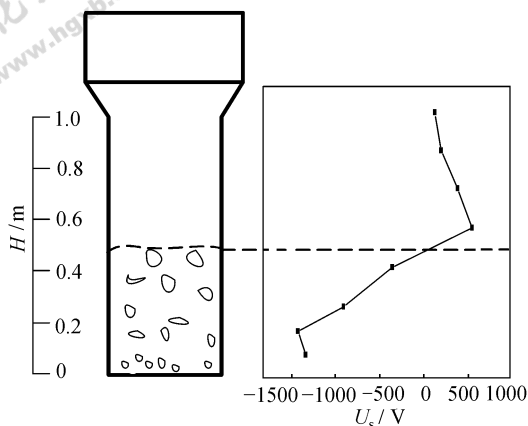


图 7 流化床中静电电压的轴向分布与料位高度的对照图

Fig. 7 Static potential axial distribution in fluidized bed and bed level (LLDPE,  $H_0 = 300$  mm,  $v = 0.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

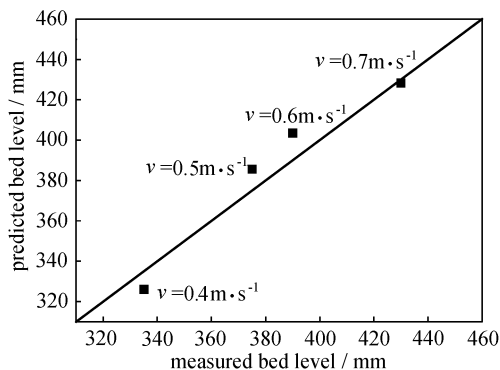


图 8 不同气速下料位预测结果与实测值的比较

Fig. 8 Comparison of predicted and measured bed levels with different superficial gas velocities

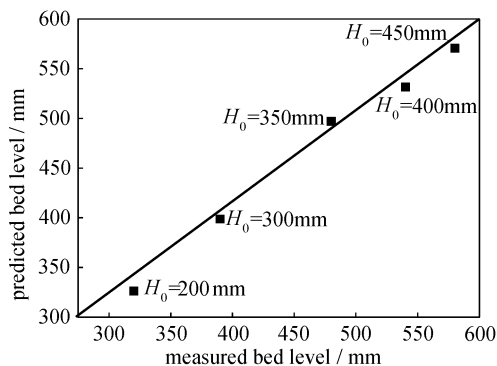


图 9 不同静床高下料位预测结果与实测值的比较

Fig. 9 Comparison of predicted and measured bed levels with different static bed levels

料仓中填充颗粒的动态过程中,也发现了下部电场与上部区域电场极性相反的现象,料位处电场强度为零,且零电场面随着料位的升高而升高,而填满

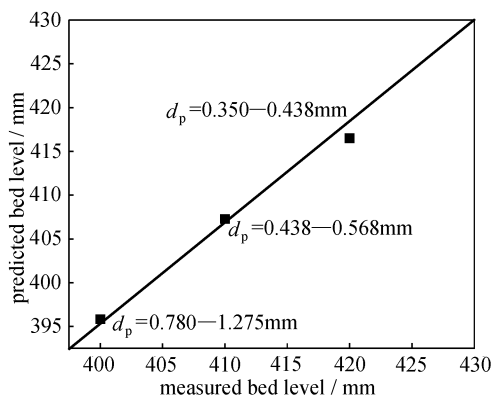


图 10 不同粒径分布颗粒流化时料位预测结果与实测值的比较

Fig. 10 Comparison of predicted and measured bed levels with different particle size distribution

后的料仓只对外呈现出一种极性的电压。因此静电电压在料位附近发生极性改变的现象可能并不只是气固流化床的固有特征,在其他处理多分散性粉体的工艺过程或场合中,比如粉体料仓的填充、粉体分离、粉体干燥等,只要存在明显的稀密相分界面,均有可能发生这种由于颗粒的双极带电引起的电压极性反转现象。因此,经过进一步深入研究,本文提出的料位检测方法有望推广至其他具有较明显稀密相分界面的粉体动态处理过程。

## 5 结 论

利用自行开发的静电电压在线测量系统,对聚乙烯气固流化床中静电电压分布特点进行了研究,发现床内的静电场为一非均匀电场,静电电压沿床层轴向呈“Z”形分布,且在床层稀密相分界面附近会发生极性的改变。提高流化气速和静床高,稀密相分界面升高,极性改变位置随之升高。对不同粒径的聚乙烯颗粒进行流化时,发现若存在较清晰的稀密相分界面,则极性改变现象明显,反之观察不到静电电压极性的反转。在此基础上,提出了流态化颗粒的双极带电理论,并对上述现象进行了合理解释。

基于流化床中静电电压轴向分布的特点,提出了一种确定流化床料位高度的新方法。实验结果表明,该方法计算得到的料位高度值与实测值之间的最大相对误差为 4.08%,平均相对误差为 2.02%,具有较高精度。该方法能替代现有对人体具有致命伤害的  $\gamma$  射线,或可作为其他料位检测方法的补充,同时还可实现床内静电电压和料位高度的双重监控。经过进一步深入研究,本文提出的料位检测方

法有望推广至其他具有较明显稀密相分界面的粉体动态处理过程, 包括具有一定分散度的其他种类粉体的气固流化、粉体料仓的填充以及粉体颗粒的分离等。

### 符 号 说 明

$d_p$ ——颗粒粒径, mm

$H_0$ ,  $H_e$ ,  $H_t$ ——分别表示静床高、测点高度和料位高度, mm

$H(i)$ ——第  $i$  个测点的高度, mm

$\Delta H(i, i+1)$ ——第  $i$  个和第  $i+1$  个测点间的距离, mm

$K$ ——电荷累积速率常数,  $s^{-1}$

$t$ ——时间, s

$U$ ——静电电压, V

$U_s(i)$ ——第  $i$  个测点处的稳态静电电压, V

$v$ ——表观流化气速,  $m \cdot s^{-1}$

### References

- [1] Ciborowski 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] Wolny A, Kazmierczak W. The influence of static electrification on dynamics and rheology of fluidized bed. *Chemical Engineering Science*, 1993, **48** (20): 3529-3534
- [4] 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
- [5] Fujino M, Ogata S, Shinohara H. The electric potential distribution profile in a naturally charged fluidized bed and its effects. *International Chemical Engineering*, 1985, **25** (1): 149-159
- [6] Fulks B D, Sawin S P, Aikman C D, Jenkins J M. Process for reducing sheeting during polymerization of alpha-olefins; US, 4876320. 1989-10-24
- [7] Goode M G, Williams C C, Hussein F D, McNeil T J, Lee K H. Static control in olefin polymerization; US, 6111034. 2000-08-29
- [8] Rojo V, Guardiola J, Vian A. A capacitor model to interpret the electric behavior of fluidized beds; influence of apparatus geometry. *Chemical Engineering Science*, 1986, **41** (8): 2171-2181
- [9] Stow C D. Atmospheric electricity. *Reports on Progress in Physics*, 1969, **32**: 1-67
- [10] Melnik O, Parrot M. Electrostatic discharge in Martian dust storms. *Journal of Geophysics Research*, 1998, **103** (A12): 29107-29118
- [11] Farrell W M, Delory G T, Cummer S A, Marshall J R. A simple electrodynamic model of a dust devil. *Geophysical Research Letters*, 2003, **30** (20): 2050-2060
- [12] Toshiro Miura, Takehiro Koyaguchi, Yoshikazu Tanaka. Measurements of electric charge distribution in volcanic plumes at Sakurajima Volcano. *Bulletin of Volcanology*, 2002, **64** (2): 75-93
- [13] Ali F S, Ali M A, Ali R A, Incullet I I. Minority charge separation in falling particles with bipolar charge. *Journal of Electrostatics*, 1998, **45** (2): 139-155
- [14] Trigwell S, Grable N, Yurteri C U, 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] Gallo C F, Lama W L. Classical electrostatic description of the work function and ionization energy of insulators. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1976, **1A-12**: 7-11