

# 不同粒径电路板塑料颗粒流化特性

王铭华, 郭庆杰, 刘宝勇

[中国石油大学(华东)化学化工学院, 山东 东营 257061]

**摘要:** 在内径 56 mm、高 1600 mm 的冷态流化床实验装置上研究了不同粒径电路板塑料颗粒的流化特性, 获得了粒径和颗粒类型对塑料颗粒流化特性的影响规律. 实验结果表明, 电路板塑料颗粒为 Geldart A 类颗粒时, 粘性力大, 塌落特性明显, 流化性能较差, 具有拟 C 类颗粒的流化特性; 电路板塑料颗粒为 B 类颗粒时, 塌落特征不明显, 并且随着粒径的增大, 最小流化速度也增大. 通过比较不同公式对最小流化速度的计算结果发现, B 类颗粒用 Ergun 公式得到的结果比其他公式更接近实验结果, b, c 和 d 颗粒的理论最小流化速度分别为实验结果的 94.5%、114%和 91.8%, A 类颗粒用 3 种公式得到的结果与实验结果均相差很大, 需要进一步考虑粘性颗粒的受力情况, 建立力平衡模型.

**关键词:** 电路板塑料颗粒; 最小流化速度; 粒径; 粘性颗粒; 模型

**中图分类号:** TQ051.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-606X(2008)02-0224-06

## 1 前言

随着电子工业和信息高科技产业迅猛发展, 电子电器设备的更新换代周期不断缩短, 废旧电子产品的数量与日俱增<sup>[1]</sup>. 印刷线路板是各类电子产品的重要组成部分, 组分复杂, 含有塑料、难熔氧化物和金属等, 具有数量多、危害大、潜在价值高等特点<sup>[2]</sup>. 因此电子废弃物的无害化和资源化处理成为资源与环境领域的重要研究方向.

在分离粉碎的电路板混合物<sup>[3]</sup>和热解塑料颗粒的众多技术中, 气固流化床具有无害化、资源化和处理能力强等显著优点. 因此, 研究电路板中塑料颗粒的流化特性非常重要. 预测不同颗粒的最小流化速度有大量的经验公式, 但由于塑料颗粒不规则、粒径分布宽和细颗粒之间的范德华力大导致最小流化速度计算误差明显, 而且针对电路板塑料颗粒的流化研究很少. 而对于其他的非球形颗粒, Abdullah 等<sup>[4]</sup>对生物质的粒径、堆积密度和空隙率与流化特性的关系进行了系统的研究, 发现颗粒的流化特性主要受堆积密度和空隙率影响. 朱锡锋等<sup>[5]</sup>通过对现有单组分颗粒最小流化速度公式进行修正, 获得了可以预测生物质与砂子双组分混合物料最小流化速度的计算公式.

本工作开展了不同粒径的电路板塑料颗粒在鼓泡流化床内的流化特性实验研究, 得到了最小流化速度的计算公式, 进而为利用流态化技术分离和热解电路板塑料提供基础数据和依据.

## 2 实验

### 2.1 物料特性

实验原料为废旧物回收市场中的废弃印刷电路板, 电路板塑料颗粒通过颚式破碎机和超微粉碎机二级粉碎得到. 电路板塑料颗粒(形状极不规则, 带有明显的棱角, 且粒径分布宽)流化体系与规则颗粒的常规流化体系具有明显的差异. 为了系统研究不同粒径的电路板塑料颗粒的流化特性, 用标准筛将电路板塑料颗粒分为 4 个粒级, 如图 1 所示, 具体分组如表 1 所示.

### 2.2 实验装置

实验装置如图 2 所示, 主要由流化床、流量计和测试系统构成. 采用罗茨鼓风机对流化床供气, 气源为常温常压下的空气, 根据实验所需气流流量分别用 LZB-4, LZB-10, LZB-15 及 LZB-25 型玻璃转子流量计计量.

流化床床体由玻璃制成, 内径 56 mm, 高 1600 mm. 气体分布板为钢制多孔板, 开孔率为 0.47%, 在分布板上铺了 3 层孔径为 74  $\mu\text{m}$  的不锈钢丝网, 使气体均布. 测压孔位于分布板上方 10 mm 处. 颗粒的流化行为通过索尼数码相机(Sony, DCR-Pc1000E)拍摄, 将拍摄过程导入计算机, 使用软件对录像进行 0.0357 s 离散处理.

### 2.3 实验方法

分别选择不同粒径的电路板塑料颗粒, 量取相同体积(125~150 g)加入流化床中. 实验开始时, 开启空气压缩机, 逐步增加风量, 达到充分流化后, 同时记录整个床层的压降. 根据压降-流化速度关系曲线确定整个床

层的最小流化速度. 进行物料塌落实验时, 先通入空气使床层处于充分流化状态, 然后关闭气流, 用数码摄像

机拍摄整个塌落过程, 得到床高与时间的关系.

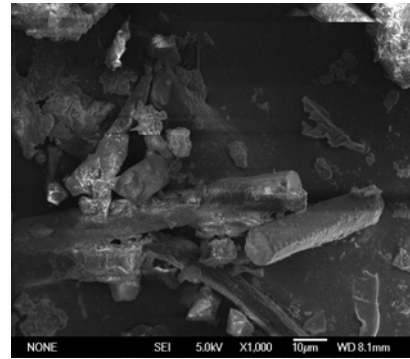
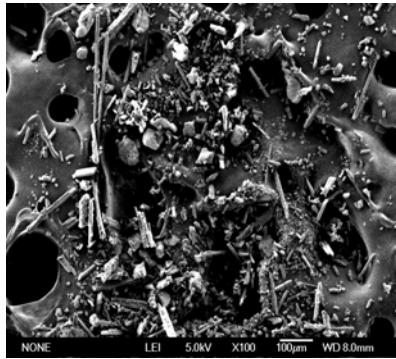
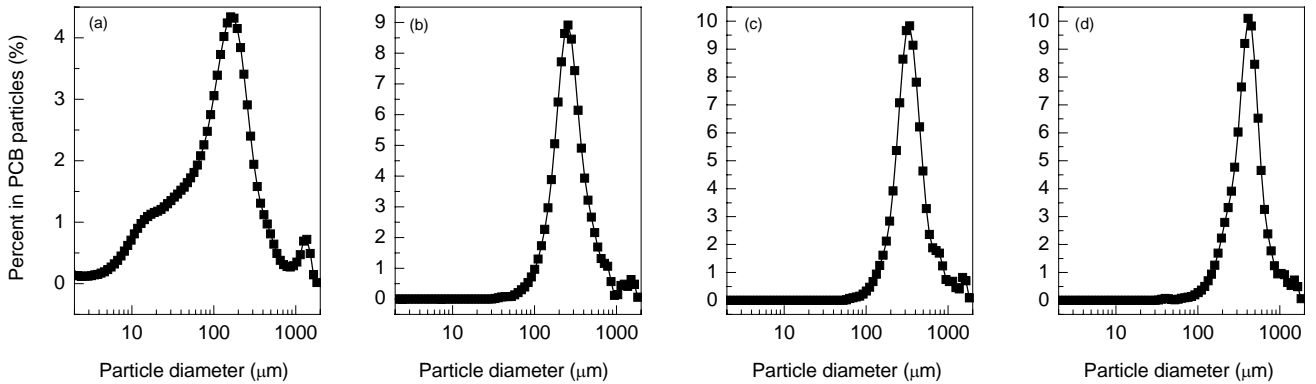


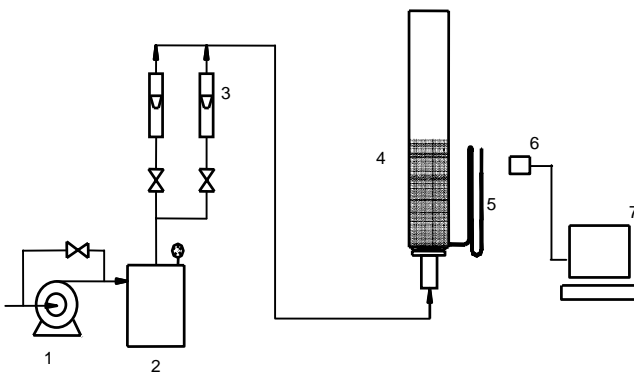
图 1 电路板塑料颗粒粒径分布图和电镜照片

Fig.1 SEM photographs and diameter distributions of scrap printed circuit boards particles

表 1 电路板塑料颗粒的主要性质

Table 1 Properties of scrap printed circuit boards particles

Fraction	$d_p$ ( $\mu\text{m}$ )	$\rho_{bl}$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$\rho_p$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Particle type
a	123	525	2765	Geldart A
b	275	450	1612	Geldart B
c	354	558	1738	Geldart B
d	423	516	1385	Geldart B



- 1. Compressor    2. Desiccator    3. Rotameter    4. Fluidized bed
- 5. Manometer    6. Sony vidicon    7. Computer

图 2 实验装置

Fig.2 Schematic diagram of the experimental apparatus

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 不同粒径颗粒床层的塌落

图 3(a)是粒径为 123  $\mu\text{m}$ 、质量为 150 g 电路板塑料颗粒的床层塌落曲线. 流化时有一定的膨胀高度, 床层塌落呈现出明显的线性脱气阶段和浓相压缩阶段. 在不同的流速下, 床层从开始塌落到静止需要 6~8 s 左右, 呈现出随初始流速增大床层塌落时间略有增大的趋势.

对塌落曲线进行数学处理, 可以求得单位时间床层料面的下降高度, 即塌落速率. 图 3(b)反映了塌落速率随时间的变化关系. 从图可以看出, 颗粒的床层塌落呈现明显的两阶段特征: 恒速沉降阶段和减速压实阶段. 电路板塑料颗粒的流化是鼓泡流化, 其塌落过程初期为气泡溢出阶段, 塌落速率受塌落前床层内空隙率的影响.

塌落速率不随床高和时间发生变化, 此阶段称为恒速沉降阶段. 恒速沉降阶段终点的床高为  $H_c$ , 时间为  $t_c$ . 在本实验条件范围内, 恒速沉降一般在 2~3 s 内完成. 塌落前的流化气速大, 床层空隙率大, 则恒速沉降段的塌落速率也大. 根据悬浮体系的颗粒沉降理论, 沉降速度

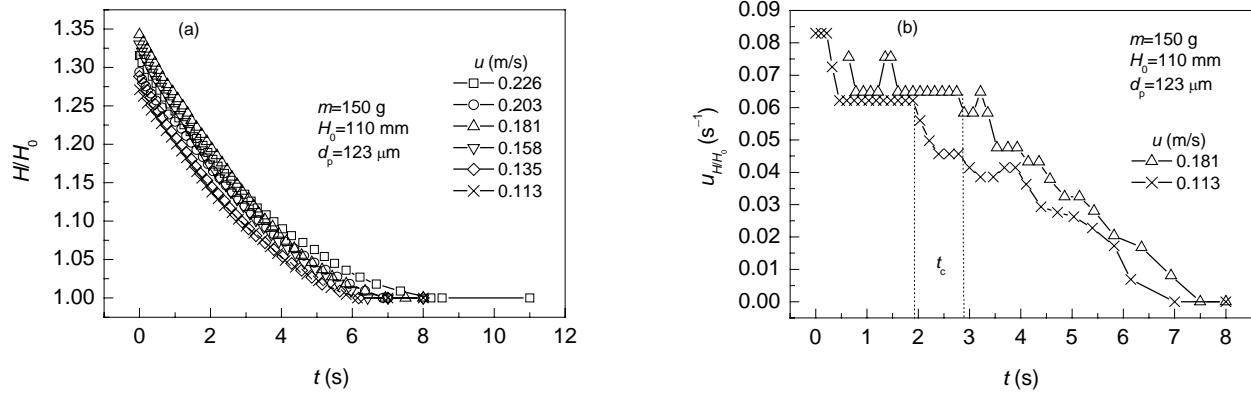


图3 床层塌落高度和速度曲线  
Fig.3 Fluidized bed heights and velocity collapsing curves

与悬浮体的浓度密切相关。相同的固含率和相同的表观气体速度使在两种过程中该区域内的气-固流动机制相同，即颗粒与气体之间的相对速度不变<sup>[6]</sup>。

减速压实阶段为颗粒之间气体的溢出过程。在本实验条件范围内，减速沉降一般在4~6 s内完成。由于颗粒之间结构疏松，当彼此接触承受重力作用时，颗粒会发生弹性形变，使颗粒之间的残余气体充分排出。当床层料面不再继续下落时，全床呈自然堆积状态，此时的床层料高为静止床高，床层密度为颗粒堆积密度。

图4是3种不同粒径的电路板颗粒床层塌落曲线，流化时有一定的膨胀高度，床层塌落会呈现类似 Geldart B类颗粒的塌落特征，没有明显的线性脱气阶段和浓相压缩阶段，塌落过程迅速。床层从开始塌落到静止不动仅需要0.15 s左右，与自由落体运动相似。大颗粒之间的空隙较大，没有小颗粒的疏松结构，滞气性能较差，气体迅速从颗粒之间溢出。

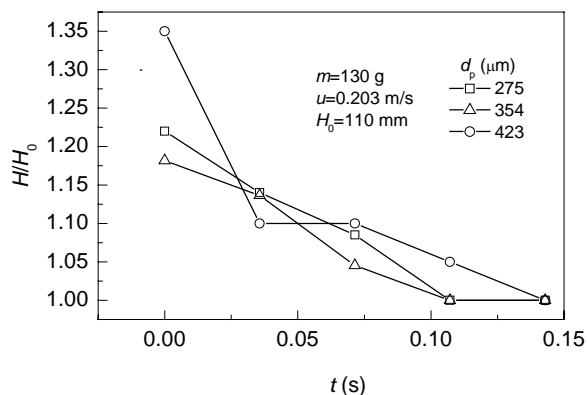


图4 床层塌落高度曲线  
Fig.4 Fluidized bed height collapsing curves

B类颗粒的塌落过程一般分为气泡溢出段和浓相压缩段，但B类电路板塑料颗粒的滞气性能很差，塌落

过程迅速，没有明显的恒速沉降阶段和减速压实阶段；而A类的电路板塑料颗粒由于形状极为不规则，且颗粒间粘性力较大，具有拟C类颗粒的流化特性，两塌落阶段的划分并不明显，只有在塌落速率曲线中才有明显的区分。

### 3.2 不同粒径颗粒的流化实验

局部流化是指颗粒在完全流化前由固定床到流化床之间的过渡阶段(速度约在0.02~0.09 m/s)，局部流化速度则是颗粒由固定床转为局部流化时的流化速度，通过对实验过程进行跟踪摄像得到。最小流化速度是流化床由非稳定流化到稳定流化转变时的气速，对应曲线中压降由增大到平稳时的转变气速。图5中的横向虚线为理论压降，即取压口以上物料的质量与流化床横截面积之比。实验结果显示，整个床层的压降-流化速度曲线上固定床与流态化床之间存在明显的过渡阶段(0.025~0.11 m/s)。

用粒径123 μm的电路板塑料颗粒作为床料进行实验，得到的压降-流速曲线如图5(a)所示。可以看出，由于电路板颗粒形状极不规则，且颗粒间粘性力较大，A类电路板塑料颗粒a具有拟C类颗粒的流化特性；在流速超过0.147 m/s后，流化床已经完全流化，床层压降不随流速的变化而变化，曲线基本保持水平，表明电路板塑料颗粒已完全处于流化状态。观察实验过程可以看出，随着流速的减小，曲线出现明显的转折，压降开始随流速的减小而明显减小，当流速达到0.091 m/s时，床层出现沟流，此时压降变化更大。由于细粉体透气性很差，床层压降随气速减小而迅速减小。此后，压降在较宽的气速范围(0.045~0.091 m/s)内变化很小，表明沟流在较宽的范围内稳定存在。同时，床层的理论压降(488 Pa)大于实际压降(421 Pa)。流化过程与其他C类颗粒相似，经历了活塞流、沟流和鼓泡流化。

图 5(b), 5(c)和 5(d)是电路板大颗粒的压降-流速曲线图, 根据 Geldart 颗粒分类法, 属于 B 类颗粒. 流化过程中, 大颗粒经历了固定床和鼓泡流化床两个阶段. 可以看出, 在流速分别超过 0.068, 0.091 和 0.124 m/s 后, 床层开始流化. 此时, 床层存在局部沟流和节涌. 当流速超过 0.091, 0.124 和 0.158 m/s 后, 流化床已经完全流

化, 床层界面和压降波动变化增大, 床层流化过程出现明显的节涌, 开始出现稀相和密相. 电路板塑料大颗粒的理论压降则小于最小流化速度对应的压降. 这是由于大颗粒的形状不规则, 球形度较低, 导致颗粒之间的摩擦力随着气速的增大而增大. 同时, 随着气速的增大, 床层内的气泡尺寸显著增大.

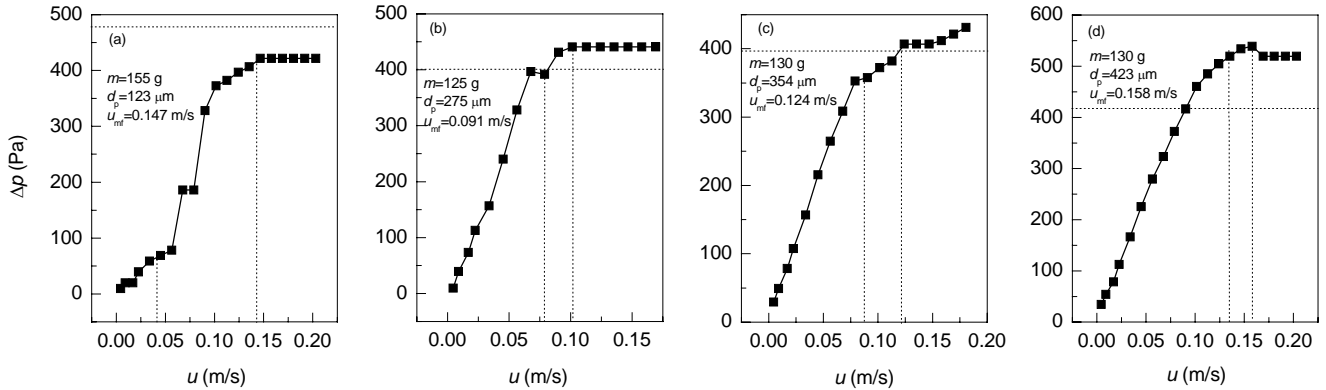


图 5 电路板塑料颗粒压降-流化速度曲线  
Fig.5 Fluidization curves of scrap printed circuit boards particles

### 3.3 最小流化速度的计算

在流化过程中, 电路板颗粒经历了局部流化、开始鼓泡到完全流化. 完全流化时流化床压降不再随气速的增加而增大, 整个床层呈现出流体的性质, 此时对应的流速为最小流化速度. 4 种不同粒径的电路板塑料颗粒的最小流化速度范围为 0.091~0.158 m/s.

Macdonald<sup>[7]</sup>修正了 Ergun 方程<sup>[8]</sup>, 提出固定床压降的综合关系式. 在固定床操作范围内, 由于颗粒之间没有相对运动, 随着流速的增加, 流体通过固定床的阻力将不断增加, 床层压降也将不断增加, 当床层压降等于单位床层截面积上的颗粒重力时, 流化床就开始流化.

$$\frac{1.75}{\psi \varepsilon_{mf}^3} Re_{mf}^2 + 150 \frac{1 - \varepsilon_{mf}}{\psi^2 \varepsilon_{mf}^3} Re_{mf} - Ar = 0. \quad (1)$$

Ergun 公式提出了一个更方便简单的表达式

$$Re_{mf} = (C_1^2 + C_2 Ar)^{0.5} - C_1, \quad (2)$$

其中

$$C_1 = 42.857 \frac{1 - \varepsilon_{mf}}{\psi} = 42.857 \frac{B}{A}, \quad (3)$$

$$C_2 = \frac{\psi \varepsilon_{mf}^3}{1.75} = \frac{1}{1.75A}. \quad (4)$$

床层的  $\varepsilon_{mf}$  通过下式得到:

$$\varepsilon_{mf} = 1 - \frac{m}{\rho_p S H_{mf}}, \quad (5)$$

其中颗粒密度  $\rho_p$  由排水法得到. 最小流化速度和最小流化状态下雷诺数之间的关系如下:

$$Re_{mf} = d_p u_{mf} \rho / \mu. \quad (6)$$

根据式(2)~(6),  $\psi$ 和  $\varepsilon_{mf}$  影响最小流化速度. 公式的参数见表 2, 其中自然堆积状态下具有同一粒径的颗粒的球形度  $\psi$  根据 Hartman 等<sup>[9]</sup>给出的球形度和空隙率之间的关系得到.

表 2 计算最小流化速度参数

Table 2 Calculation of minimum fluidization velocity parameters				
Parameter	a	b	c	d
$\varepsilon_{mf}$	0.81	0.72	0.68	0.63
$\psi$	0.3	0.39	0.45	0.51
A	7.92	7.11	6.92	6.07
B	5.78	5.2	5.01	3.72
$C_1$	31.28	31.36	31.04	26.27
$C_2$	0.072	0.08	0.083	0.094

Note: a denotes the particles of 123  $\mu\text{m}$  in diameter, b the particles of 275  $\mu\text{m}$  in diameter, c the particles of 354  $\mu\text{m}$  in diameter, and d the particles of 423  $\mu\text{m}$  in diameter.

球形度  $\psi$  则可以根据空隙率和球形度的关联图得到. 床层内部的空隙率与颗粒的形状和粒径分布有很大的关系. 同时, 对于有相似几何结构且间隙相似的单分散颗粒体系, 球形度  $\psi$  可以确定床层的空隙率. 但是这些条件并不能保持一致. 球形颗粒 ( $\psi=1$ ) 对应的  $\varepsilon_{mf}=0.40\sim$

0.42, 由于电路板塑料颗粒的形状不规则, 电路板塑料颗粒的 $\epsilon_{mf}=0.63\sim 0.81$ .

通过式(2)~(6)得到理论最小流化速度. 其中, Pillai-Rao 公式的表达式为

$$u_{mf} = \frac{7.01 \times 10^{-4} d_p^2 (\rho_p - \rho_f) g}{\mu}, \quad (7)$$

适用范围是 $d_p=58\sim 1100 \mu\text{m}$ , 固体材料为钢、铝粉、沙和聚苯乙烯,  $Re_{mf}<20$ .

Thonglimp 公式的表达式为

$$Re_{mf} = 7.54 \times 10^{-4} (GaM_v)^{0.98}, \quad (8)$$

适用范围是 $d_p=110\sim 2120 \mu\text{m}$ ,  $Re_{mf}<30$ .

图6分别描述了根据各种模型计算得到的理论最小流化速度与粒径之间的关系. 理论最小流化速度都随着粒径的增大而增大. Ergun 和 Pillai-Rao 公式<sup>[10]</sup>得到的理论最小流化速度是根据固定床中气速和压降之间的关系修正系数后得到, 受使用框架的限制. 而 Thonglimp 公式<sup>[10]</sup>是纯经验公式, 必须注意其适用范围. 在图6中, 电路板塑料颗粒 a 由3种公式得到的理论最小流化速度相近, 但与实验相差很大. 这是由于电路板塑料颗粒 a 虽然属于 A 类颗粒, 但具有拟 C 类颗粒的流化特性. 以上3种公式的主要理论基础为: 当向上运动的流体对颗粒产生的曳力等于重力时, 床层开始流化. 没有考虑颗粒之间的粘性力, 导致理论最小流化速度过小, 与实际不符. 对于电路板塑料颗粒 b, c 和 d, Ergun 公式得到的理论最小流化速度与实验最接近, 大于 Pillai-Rao 和 Thonglimp 公式的计算结果, 这是由于 Ergun 公式包含颗粒的球形度, 而 Pillai-Rao 和 Thonglimp 公式仅考虑颗粒的密度和粒径, 不能完全反映出颗粒在流体中的流化特性.

由图6可知, 理论最小流化速度和局部最小流化速度随着粒径的增大而增大, 而实验测到的最小流化速度则随着粒径的增大表现为先减小后增大. 电路板塑料颗粒 a 的形状不规则, 最窄处仅为二十几微米, 颗粒间的粘性力较大, 传统意义上的公式不能准确计算出最小流化速度, 计算得到的最小流化速度远小于实验数据, 仅为实验的 27.2%, 但与局部流化速度比较接近. 电路板塑料颗粒 b, c 和 d 属于 B 类颗粒, 在实验条件下更符合公式, 理论最小流化速度和局部最小流化速度及实验数据相似, 并且 b, c 和 d 颗粒的理论最小流化速度分别为实验的 94.5%, 114%和 91.8%. 颗粒 a 的粘性力较大, 与颗粒 b, c 和 d 相比, 颗粒 a 的局部最小流化速度与计算接近, 沟流在一定流速范围内稳定存在.

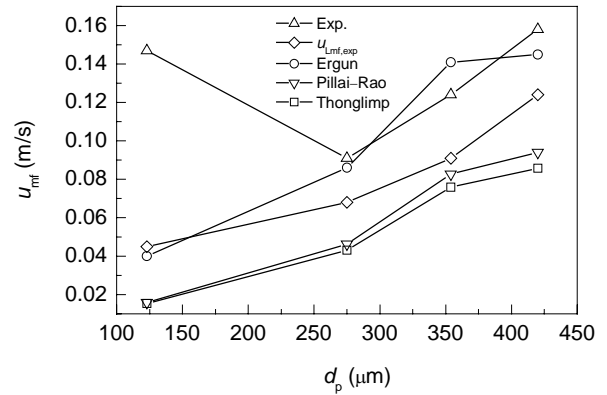


图6 不同公式下的电路板塑料颗粒粒径-流化速度曲线  
Fig.6 Plot of minimum fluidization velocity vs. average sizes for scrap printed circuit boards particles under different calculations

## 4 结论

电路板塑料颗粒形状不规则, 呈长条状和扁平状, 且粒径分布很宽, 通过空隙率和球形度之间的关系, 可以得到球形度在 0.3~0.5 之间.

电路板塑料颗粒的粒径影响流化性能, 颗粒 a 属于 Geldart A 类颗粒, 但由于形状极不规则, 且颗粒间粘性力较大, 具有拟 C 类颗粒的流化特性, 塌落时间较长, 具有良好的滞气性能, 最小流化速度较大. 颗粒 b, c 和 d 属于 B 类颗粒, 塌落迅速, 塌落过程迅速, 没有明显的恒速沉降阶段和减速压实阶段, 并且随着粒径的增大, 最小流化速度也增大.

在3种公式的计算中, Ergun 公式得到的理论最小流化速度最符合实验中的最小流化速度. 对于 B 类颗粒, Ergun 公式得到的结果比其他公式更接近实验结果, b, c 和 d 颗粒的理论最小流化速度分别为实验结果的 94.5%, 114%和 91.8%, 对于 A 类颗粒, Ergun, Pillai-Rao 和 Thonglimp 公式的计算结果与实验结果相差很大, 分别为 27%, 10.2%和 10.2%, 原因在于未考虑颗粒之间的粘性力, 导致理论最小流化速度过小, 与实际不符. 因此对于颗粒 a, 需要针对流化床中粘性颗粒的受力情况, 建立力平衡模型, 并据此模型对 Ergun 公式进行修正, 计算出粘性颗粒在流化床中的最小流化速度.

### 符号表:

$Ar$	阿基米德数 [ $Ar=d_p^3\rho(\rho_p-\rho_f)g/\mu^2$ ]
$A, B, C_1, C_2$	常数
$d_p$	颗粒平均直径 ( $\mu\text{m}$ )
$Ga$	伽利略数 ( $Ga=d_p^3\rho_f^2g/\mu^2$ )
$H$	床高 (m)
$H_0$	静止床高 (m)
$H_c$	恒速沉降终点床高 (m)
$H_{mf}$	最小流化速度下的床层高度 (m)
$m$	流化床内物料总质量 (kg)
$M_v$	密度比 [ $M_v=(\rho_p-\rho_f)/\rho_f$ ]

$\Delta p$	床层压降 (Pa)
$Re_{mf}$	最小流化速度下的雷诺数
$S$	流化床截面积 ( $m^2$ )
$t_c$	恒速沉降时间 (s)
$T$	绝对温度 (K)
$u$	流体速度 (m/s)
$u_{H/H_0}$	$H/H_0$ 下的沉降速度 ( $s^{-1}$ )
$u_{Lmf}$	局部最小流化速度 (m/s)
$u_{mf}$	最小流化速度 (m/s)
$\varepsilon$	空隙率
$\varepsilon_{mf}$	最小流化速度下床层空隙率
$\mu$	流体的动力粘度 (Pa·s)
$\rho_{bl}$	堆积密度 ( $kg/m^3$ )
$\rho_f$	流体密度 ( $kg/m^3$ )
$\rho_p$	颗粒密度 ( $kg/m^3$ )
$\psi$	球形度

## 参考文献:

- [1] Lee C H, Chang S L, Wang K M, et al. Management of Scrap Computer Recycling in Taiwan [J]. *J. Hazard. Mater.*, 2000, 73(3): 209–220.
- [2] Veit H M, Bernardes A M, Ferreira J Z, et al. Recovery of Copper from Printed Circuit Boards Scraps by Mechanical Processing and Electrometallurgy [J]. *J. Hazard. Mater.*, 2006, 137(3): 1704–1709.
- [3] Liu Y Z, Zhang J Y, Zhang B J. Separation of a Binary Particle Mixture in a Vibrating Fluidized Bed of Dense Medium [J]. *Powder Technol.*, 1998, 100(1): 41–45.
- [4] Abdullah M Z, Husain Z, Yin Pong S L. Analysis of Cold Flow Fluidization Test Results for Various Biomass Fuels [J]. *Biomass Bioenergy*, 2003, 24(6): 487–494.
- [5] 朱锡锋, 陆强, 郑冀鲁. 木粉和稻壳流化特性 [J]. *太阳能学报*, 2006, 27(4): 345–348.
- [6] 王垚, 金涌, 魏飞. 纳米级  $SiO_2$  颗粒流化床的塌落行为 [J]. *化工学报*, 2001, 52(11): 958–961.
- [7] Macdonald I F, El-Sayed M S, Dullien F A L, et al. Flow through Porous Media—The Ergun Equation Revised [J]. *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 1979, 18(3): 199–208.
- [8] Ergun S. Fluid Flow through Packed Columns [J]. *Chem. Eng. Prog.*, 1952, 48(2): 89–94.
- [9] Hartman M, Pohořelý M, Trnka O. Fluidization of Dried Wastewater Sludge [J]. *Powder Technol.*, 2007, 178(3): 415–422.
- [10] 金涌, 祝京旭, 汪展文, 等. 流态化工程原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001. 23.

## Fluidization Characteristics of Scrap Printed Circuit Boards Particles with Different Average Sizes

WANG Ming-hua, GUO Qing-jie, LIU Bao-yong

(College of Chemistry and Chemical Engineering, China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061, China)

**Abstract:** The experiments were carried out in a fluidized bed of 56 mm in diameter and 1 600 mm in height to determine the fluidization characteristics of four types of scrap printed circuit board particles with different average sizes. The results show that the fluidization characteristics of scrap printed circuit board particles depend on the average size and type of particles. The scrap printed circuit boards particles, belonging to Geldart A group with strong viscous force, whose fluidization was similar to fluidization of Geldart C, was difficult to fluidize. Whereas, the scrap printed circuit board particles belonging to Geldart B can be fluidized smoothly. Based on the experimental data and the analysis of acting forces, the minimum fluidization velocity is calculated by three correlations. It was found that the minimum fluidization velocities calculated by Ergun Equation approached 94.5%, 114% and 91.8% of the experimental minimum fluidization velocities for the b, c and d particles of Geldart B group. For the scrap printed circuit board particles belonging to Geldart A group, a model of force balance about cohesive particles should be developed to evaluate fluidization characteristics with cohesive particles.

**Key words:** scrap printed circuit boards particles; minimum fluidization velocity; particle size; cohesive particles; model