

# 振动流化床中双组份颗粒分离特性

靳海波<sup>1</sup>, 张济宇<sup>2</sup>, 张碧江<sup>2</sup>

(1. 北京石油化工学院化工系, 北京 102600; 2. 中国科学院山西煤炭化学研究所, 山西 太原 030001)

**摘要:**在圆柱形振动流化床中,对13种体系进行了双组份颗粒分离特性的研究。通过分析上部与下部沉积组份的浓度,采用Williams的分离系数作为目标值,考察了振动参数及操作参数对分离特性的影响。根据实验结果,采用Zhang-Peng分离判别系数与振动强度的综合来判定分离体系。

**关键词:**振动流化床;双组份混合物;颗粒分离;分离判别系数;振动强度

中图分类号:TQ051.8 文献标识码:A 文章编号:1009-606X(2001)04-0347-04

## 1 前言

振动流化床具有分离效率高、系统简单、节省费用等优点,已被广泛地应用于选矿、选煤及固体废弃物处理等分离过程<sup>[1,2]</sup>。就分离双组份体系而言,目前采用的床层形式基本为振动床,即无气源的振动流化床。这种操作过程与有气源的振动流化床分离操作有着根本性的差别。到目前为止,尚未见到有关振动流化床双组份颗粒分离的有关文献。为此,本文选择不同的双组份体系,较详细地研究了振动条件、流化气速及操作参数对分离效率的影响,以寻找合适的操作参数,为振动流化床的操作与设计提供参考依据。

## 2 实验

### 2.1 实验设备

本文的实验设备见文献[3]。

### 2.2 实验条件

根据Zhang等<sup>[4]</sup>所提出的不等密度的分离判别系数( $R_{\rho d} = \rho_j d_j \varphi_j / \rho_i d_i \varphi_i$ ),即 $R_{\rho d} > 2$ 为分离体系, $R_{\rho d} < 2$ 为混合体系,选用分离体系和混合体系进行振动流化床双组份的分离与混合实验。实验过程采用砂子、玻璃珠、硅胶等物料,在两种床层高度、不同浓度条件下进行双组份颗粒的混合与分离实验。具体条件见表1和2。

表1 物性参数

Table 1 Physical properties of materials

Properties	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$d_p$ (mm)	$u_{mf}$ (m/s)	$\varphi$	Properties	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$d_p$ (mm)	$u_{mf}$ (m/s)	$\varphi$
Sand 1 (S1)	2 560	0.16	0.036	0.72	Sel gel 1 (SG1)	1 365	1.33	0.58	0.92
Sand 2 (S2)	2 560	0.30	0.12	0.75	Sel gel 2 (SG2)	1 375	3.24	0.76	0.94
Sand 3 (S3)	2 541	0.72	0.24	0.71	Sel gel 3 (SG3)	1 370	4.50	1.12	0.96
Iron powder 1 (IP1)	4 657	0.17	0.043	0.55	Millet (M)	1 330	1.64	0.52	0.90
Iron powder 2 (IP2)	4 657	0.32	0.12	0.45	Red bean (RB)	1 318	4.50	1.23	0.88
Glass beads 1 (GB1)	2 660	0.94	0.53	0.96	Green bead (GNB)	1 360	3.64	1.07	0.87
Glass beads 2 (GB2)	2 660	2.20	1.12	0.94	Resin (R)	1 474	0.72	0.24	0.93

收稿日期:2001-01-09, 修回日期:2001-03-31

作者简介:靳海波(1969-),男,吉林安图县人,博士,副教授,化学工艺专业。

表 2 实验条件和结果

Table 2 The experimental operating conditions and results

No.	Binary system	Bed height $H_0$ (mm)	$u/u_{mf}$	Vibration amplitude $a$ (mm)	Vibration frequency $f$ (Hz)	Concentration of jetsam $x_0$	$R_{pd}$	Results <sup>1)</sup> $S_{v,j}$
1	S1 + S3	100	1.1,2.1,3.1	0.75	0,10,15,20,25	0.26,0.50	3.66	0.52,0.60,0.45,0.18,0.43
2	S2 + S3	100	1.0,1.5,2.0	0.75	0,10,15,20,25	0.26	1.11	0.42,0.49,0.29,0.21,0.22
3	S1 + IP1	100	1.0,1.5,2.0	0.75	0,10,15,20,25	0.22,0.43	1.82	0.04,0.07,0.11,0.15,0.14
4	SG1 + GB2	100	1.2	0.75,1.55	0,10,15,20,25,30,35	0.25,0.50	2.59	1.0,1.0,1.0,0.98,1.0,1.0, 0.87
5	SG2 + GB2	100	1.1,1.2	0.75	0,10,15,20,25,30,35	0.20	1.11	0.25,0.47,0.33,0.40,0.32,0.29,0.18
6	GB1 + GNB	100, 200	1.0,1.4	0.75	0,10,15,20,25,30,35	0.29,0.50	1.88	0.16,0.29,0.12,0.14,0.05,0.11
7	SG1+SG2	100, 200	1.2	0.75	0,10,15,20,25,30	0.23,0.45	2.44	0.96,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0
8	GB1+GB2	100, 150	1.0,1.1,1.2	0.75	0,10,15,20,25,30,35	0.25,0.50	1.92	0.74,0.52,0.65,0.72,0.44,0.38
9	M + GNB	100	1.1,1.2,1.3	0.75	0,10,15,20,25,30,35	0.25,0.50	2.74	0.98,0.84,0.98,0.78,0.82,0.70,0.63
10	GB2 + GNB	100, 200	1.2	0.75	0,10,15,20,25,30,35	0.19,0.35	1.02	0.31,0.34,0.25,0.32,0.27,0.29,0.22
11	R + GB2	100	1.1	0.75,1.55	0,10,15,20,25,30	0.19	5.41	0.47,1.0,0.92,0.92,0.88, 0.87
12	SG1 + RB	100	1.2	0.75,1.55	0,10,15,20,25,30	0.33	3.12	0.78,0.95,0.88,0.46,0.79,0.74
13	SG1 + GNB	100	1.0,1.3,1.6,1.9	0.75,1.55,2.00,2.50	0,10,15,20,25,30	0.16	2.65	0.80,0.95,0.98,0.78,0.82,0.70,0.63

Note: 1) The exp. results of various vibration frequencies were obtained at  $a=0.74$  mm,  $H_0=100$  mm, and the min. values of  $u/u_{mf}$  and  $x_0$ .

2.3 分选系数的确定和数据处理

为了能确切地表示出振动流化床中双组份混合物的分离/混合程度，将 Williams 的分选系数<sup>[5]</sup>引入到振动流化床双组份颗粒体系：

$$S_{v,j} = \frac{x_{j,b} - x_{j,t}}{x_{j,b} + x_{j,t}} \quad (x_0 \leq 50\%) ,$$

由上式可知，当  $S_{v,j} = 0$  时表示颗粒在床层中完全混合；当  $S_{v,j} = 1$  时表示颗粒在床层中完全分离；当  $S_{v,j} < 0$  时表示颗粒在床层中的分离出现逆转现象，即浮升组份作为沉积组份分离，或沉积组份作为浮升组份而富集于床层上部。

在不同操作条件下，测量颗粒的轴向浓度分布，采用梯形面积积分方法计算出  $x_{j,b}$  和  $x_{j,t}$ ，从而求得  $S_{v,j}$ ，为了提高测量和计算的准确性，每一个条件下重复两次，最后取其平均值。

3 结果与讨论

3.1 轴向浓度分布

振动流化床在振动条件下的轴向浓度分布如图 1 所示。可以看出，振动的引入在小振动强度 ( $K=a\omega^2/g$ ) 条件下利于颗粒的分离，随着振动强度的增大，分离的趋势越来越不明显，更有利于颗粒的混合。

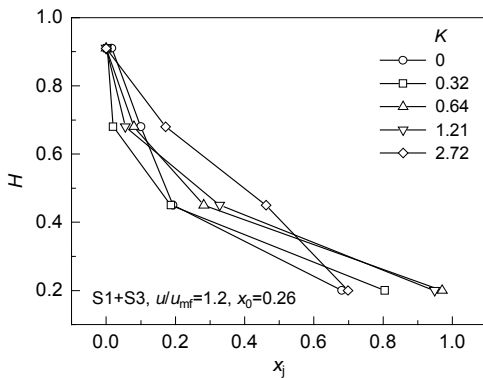


图 1 双组份颗粒的轴向浓度分布  
Fig.1 Axial concentration profiles of a binary system

3.2 影响因素

在振动条件下诸多因素影响颗粒的分离，由实验结果可以得出，振幅的增大有利于颗粒的混合，并且得出在小振幅  $a=0.75\sim 2.00$  mm、振动强度  $K=0\sim 2.0$  时分离效率达到最高；并且随着气速的增大，分离系数很快地降低，这是因为高气速加大了床层的扰动程度，利于颗粒的混合；同时随床高的增加颗粒体系分离效率略有增加，但床高的增加，意味着增加了颗粒的沉积与浮升的分离时间，且振动能量的传递也随着减弱，所以应选择适合的床高进行实验。本文根据实验条件与影响因素选择操作范围在  $H_0=100\sim 200$  mm 之间。

### 3.3 分离区域

在双组份体系中,已有判据用来区分分离体系或混合体系,但这些都是用于普通流化床的,而振动流化床尚未见到有关的文献报道.根据大量的实验,选择  $R_{pd}=1.0\sim 5.5$ , 等密度和非等密度, 气速  $u/u_{mf,m}=1.0\sim 1.2$  的操作范围.以  $S_{v,j}=0.5$  为分界线,当  $S_{v,j}>0.5$  时为分离体系,当  $S_{v,j}<0.5$  时为混合体系,如图 2 所示,在  $K<1$  时,体系的混合与分离基本类似于普通流化床,而在  $K\geq 1$  时,  $R_{pd}$  增大才有利于颗粒的分离,可以得出:  $K<1$  时,  $R_{pd}>2$  为分离体系;  $K\geq 1$  时,  $R_{pd}K^{-0.5}>2$  为分离体系.

上述分离判据是在  $R_{pd}=1.0\sim 5.5$ ,  $K=0\sim 5.0$  的操作条件下得出的.

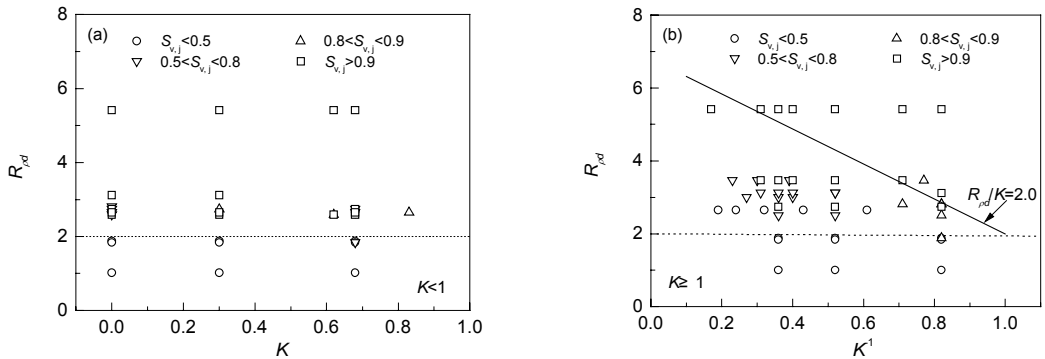


图 2 分离的操作区域

Fig.2 Operating region of separation in a vibrating fluidized bed

## 4 结论

本文采用 13 种双组份颗粒体系,在振动流化床中较详细地研究了颗粒的分离特性,得出了一些有意义的结果:

(1) 考察了颗粒的轴向浓度分布,得出振动参数、气速与床高均影响颗粒的分离.研究表明,小振动强度利于颗粒的分离,而大振动强度强化颗粒的混合.由实验得出在小振幅  $a=0.75\sim 2.00$  mm、振动强度  $K=0\sim 2.0$  时颗粒分离的趋势是最大的.

(2) 根据大量的实验数据,在  $R_{pd}=1.0\sim 5.5$ ,  $K=0\sim 5.0$  范围内,得出振动条件下双组份颗粒混合与分离的操作判据:  $K<1$  时,颗粒的分离体系与普通流化床的情况相同;  $K\geq 1$  时,分离判别系数与振动强度应满足  $R_{pd}K^{-0.5}>2$ ,双组份颗粒才为分离体系.本研究为振动流化床实验与设计提供了参考依据.

符号表:

$a$	振幅 (mm)	$K$	振动强度 ( $a\omega^2/g$ , 无因次)	下标
$C_s$	分离系数	$R_{pd}$	分离判别系数	0 初始状态
$d_p$	颗粒粒径 (mm)	$S_{v,j}$	分离系数	b 床层下半部分
$f$	振动频率 (Hz)	$u$	气速 (m/s)	f 浮升组份
$g$	重力加速度 ( $m/s^2$ )	$x_j$	沉积组份的质量数	j 沉积组份
$H$	无因次床高 ( $h/H_0$ )	$\varphi$	形状系数	m 混合物
$H_0$	静止床高 (mm)	$\rho_s$	颗粒密度 ( $kg/m^3$ )	mf 最小流化状态
$h$	距分布板的高度 (mm)	$\omega$	振动角频率 ( $2\pi f$ , Hz)	t 床层上半部分

## 参考文献：

- [1] 陈清如, 王亭杰. 振动流化床分选细粒煤的理论研究 [J]. 煤炭学报, 1993, 18(6): 35-41.
- [2] ZHANG J Y, LIU Y Z, CHEN R Y, et al. Utilization and Separation of Waste Coke-Slag Mixtures [A]. Greenfield P F, et al. Proceeding of the Asia-Pacific Conferences Sustainable Energy and Environmental Technology [C]. Singapore: World Scientific Publishing Company, 1996. 501-509.
- [3] 靳海波, 张锴, 张济宇, 等. 振动重介质流化床细粒焦渣混合物的分选 [J]. 化工冶金, 1999, 20(2): 150-154.
- [4] ZHANG J Y, PENG H. Prediction of the Minimum Fluidization Velocity of Binary Particles Mixtures [A]. Fluidization VIII [C]. France: Tours, 1995. 797-799.
- [5] Williams J C. The Segregation of Particular Material [J]. Powder Technology, 1976, 15: 245-251.

## Separation Characteristics of Binary Particulate Systems in a Vibrating Fluidized Bed

JIN Hai-bo<sup>1</sup>, ZHANG Ji-yu<sup>2</sup>, ZHANG Bi-jiang<sup>2</sup>*(1. Department of Chemical Engineering, Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102600, China;**2. Institute of Coal Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Taiyuan, Shanxi 030001, China)*

**Abstract:** Separation characteristics of 13 kinds of binary mixtures were investigated in a vibrating fluidized bed. A separation index, which was given by Williams through comparing the jetsam concentration in the upper and lower layers, was suggested. According to the effects of vibrating parameters and operating conditions on the separation index, the optimum vibrating parameters were obtained. From experimental results, the criterion of demarcating mixing/separation regions, which was defined by Zhang et al, was modified.

**Key words:** vibrating fluidized bed; binary system; particle separation; separation index; vibration intensity