

狭缝式矩形喷动床中多粒度颗粒体系的最小喷动速度

王宝群, 罗保林

(中国科学院化工冶金研究所, 北京 100080)

摘要: 在 150 mm×50 mm×1100 mm 的矩形喷动床中, 采用宽度为 2, 4, 6 mm 的 3 种狭缝式气体分布板, 研究了单一粒度组成和多粒度组成玻璃珠的最小喷动速度. 实验证明, 矩形喷动床的最小喷动速度与物料的粒度和组成有关. 给出了最小喷动速度与颗粒粒径和粒度组成的关联式, 作出了多粒度组成颗粒体系最小喷动速度的相图.

关键词: 多粒度颗粒; 狭缝式矩形喷动床; 最小喷动速度

中图分类号: TQ051.1⁺5 文献标识码: A 文章编号: 1009-606X(2001)02-0113-04

1 前言

随着喷动床技术的发展和应用领域的扩大, 出现了许多新型的喷动床^[1], 喷动床所能处理的物料也不仅限于谷物等粒径较大、形状较均匀的颗粒. 粒径小于 1 mm 的颗粒也可以在某些喷动床中实现喷动^[2, 3]. 矩形喷动床同柱锥喷动床相比, 既降低了最小喷动速度和最大喷动压降, 提高了最大喷动床高, 又具有简单灵活的几何结构, 便于制造. 矩形喷动床还具有气固接触效率好、传热效率高的优点, 常用作谷物和糊状物等热敏物质的良好干燥器^[4]和造粒及片剂表面包覆^[5]. 用喷动床处理多粒度混合体系已见于许多工业过程, 如煤的燃烧和气化、废物处理、包覆、造粒等^[6, 7], 混合颗粒的粒径分布与组成对矩形喷动床流动特性、操作稳定性、操作效率等具有重要影响, 但有关这方面的研究却少有报道.

2 实验

实验装置如图 1. 有机玻璃制的矩形喷动床宽 150 mm, 厚 50 mm, 高 1 100 mm, 底锥角为 60°. 气体进入床层采用单条栅型狭缝式分布板, 狭缝长度与床厚相同, 宽度分别为 2, 4 和 6 mm, 狭缝居于床中央. 分布板下面放置筛网以阻止颗粒下落. 喷动空气由下部进气管引入气室. 风速和床层压降是实验主要测量的量. 风速用 2 个并联的转子流量计测量; 测压点位于气室壁面的一侧, 压力信号由压力传感器(1151 型)采集并经由 A/D 转换板(IPC5442)输入微机, 由计算机进行数据处理. 本实验所用物料为玻璃珠, 物料特性与粒度组成如表 1 所示.

表 1 实验物料特性与粒度组成

Table 1 Properties and composition of experimental material

Solid particles	Particle diameter			Particle density ρ_s (kg/m ³)
	d_p (mm)			
Single size mixture	1	1.5	2	2 760
Two-size mixture	1+1.5	1+2	1.5+2	
Three-size mixture	1+1.5+2			

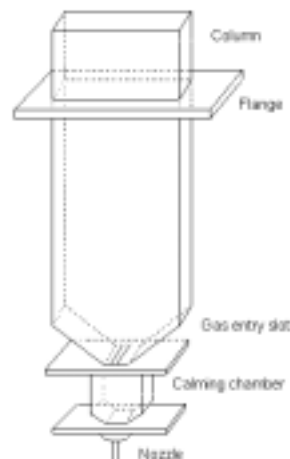


图 1 狭缝式矩形喷动床
Fig.1 Slot-rectangular spouted bed

3 实验结果和讨论

3.1 床层压降-气速曲线

单一粒径体系、二组份和三组份混合粒径颗粒体系在矩形喷动床中的床层压降-气速曲线如图 2 所示. 不同粒度组成的混合颗粒体系的最小喷动速度 U_{ms} 和最大喷动压降 $(\Delta P)_{max}$ 不同. 混合颗粒在流化时, 由于颗粒的大小或密度不同, 颗粒将随着流体流速的增加先后流化起来, 因此其起始流化速度有两个值, 分别称为开始流化速度和完全流化速度, 故而混合颗粒体系在流化床中极易发生分级现象. 而由图 2 则可以看出, 混合颗粒的最小喷动速度只有一个值, 实验中也并没有看到混合物体系出现明显分级现象, 这表明混合颗粒体系在喷动床中的混合效果比流化床好, 说明喷动床在处理混合粒径物料时可以实现更为均匀的混合.

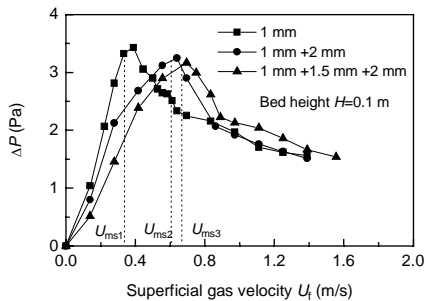


图 2 喷动床床层压降-表观气速曲线
Fig.2 Curve of superficial gas velocity vs. pressure drop for multisize particles in a slot-rectangular spouted bed

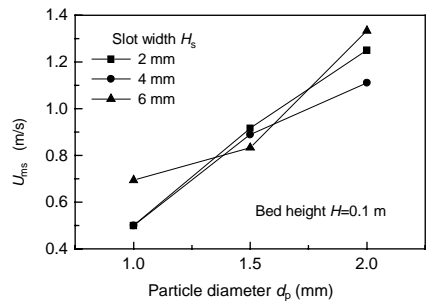


图 3 最小喷动速度随颗粒粒径的变化
Fig.3 Effect of particle diameter on minimum spouting velocity

3.2 单一粒径体系的最小喷动速度

图 3 表明单一粒径体系的最小喷动速度随颗粒粒径的增加而增加. 本实验所用的颗粒都属于 Geldart 分类的 D 类粒子. 气体分布板狭缝宽度的影响在本研究中不十分明显.

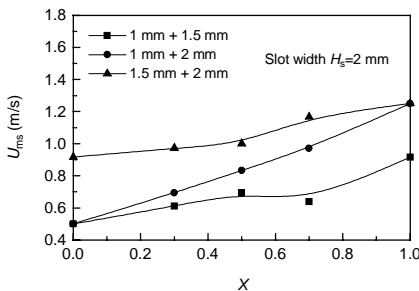


图 4 粒度组成对最小喷动速度的影响
Fig.4 Effect of particle size and composition on minimum spouting velocity

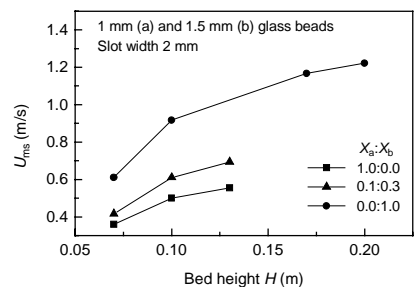


图 5 静止床高对最小喷动速度的影响
Fig.5 Effect of bed height on minimum spouting velocity

3.3 二组份体系的最小喷动速度

在物料静止床高和气体入口狭缝尺寸不变的情况下, 二组份混合物的最小喷动速度与混合物中各组份的粒径大小和混合物粒度组成的关系如图 4 所示, 图中横坐标 X 表示混合物中大颗粒组份的质量分数. 结果表明, 两种粒径颗粒组成的混合物, 其最小喷动速度随混合物中大颗粒组份

所占比例的增加而增加；而且，混合物中颗粒粒径越大，其最小喷动速度也越大。显然，这与单组份体系最小喷动速度随颗粒粒径的变化趋势是一致的。二组份混合体系的最小喷动速度介于大颗粒组份和小颗粒组份的最小喷动速度之间。静止床高对最小喷动速度的影响示于图 5。不同粒径和粒度组成的颗粒体系的最小喷动速度都随静止床高的增加而增加，在床层高度小于 0.1 m 时，最小喷动速度与静止床高呈正比；床高超过 0.1 m 后，最小喷动速度随床高的增加速度变小，近似呈指数小于 1 的趋势变化。指数的具体值与床型、气体入口尺寸和颗粒粒径有关。在静止床高超过最大喷动床高时，将不能形成喷动床。

3.4 最小喷动速度的经验关联式

影响喷动床最小喷动速度 U_{ms} 的主要因素可表示成下面的函数关系：

$$U_{ms}=f(D_c, H, H_s, \rho_f, \rho_s, X_i, d_{pi}, g),$$

其中 X_i 是混合颗粒体系中 i 组分颗粒在整个体系中所占的质量分数，它可以表征混合颗粒体系的粒度组成， D_c 为当量床径， ρ_f 为流体密度。采用因次分析的方法将最小喷动速度整理成幂函数形式并利用 STATIST 软件对混合颗粒体系在不同床高和狭缝宽度下的 108 组实验数据进行拟合，得到本文的最小喷动速度的实验关联式为

$$U_{ms} = 0.25 \left(\frac{H}{D_c} \right)^{0.16} \left(\frac{H_s}{D_c} \right)^{-0.018} \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right)^{0.57} \sqrt{2gH} \prod_{i=1}^n \left(\frac{d_{pi}}{D_c} \right)^{0.98 X_i} \quad (n = 3).$$

公式适用范围： $H = 0.06 \sim 0.25$ m， $H_s = 2 \sim 6$ mm。最小喷动速度的实验值与计算值的相对误差绝大部分在 17% 之内。

3.5 三组份体系的最小喷动速度

三组份颗粒混合物体系的最小喷动速度与混合物粒度组成的关系采用如图 6 所示的三维相图表示。图 6 中的空间曲面是用最小喷动速度的实验关联式拟合出来的曲面。空间曲面与 XY, XZ, YZ 面的交线分别表示不同粒径组成的二组份混合颗粒体系的 U_{ms} 随粒度分布与组成变化的曲线，空间曲面与 X, Y, Z 轴的交点代表 3 种单一粒径颗粒体系的 U_{ms} 。图 6 表明，三组份混合颗粒体系的 U_{ms} 介于该混合体系中最大粒径组份和最小粒径组份的 U_{ms} 之间，其值随混合体系中最大颗粒所占比例的增加而增加。

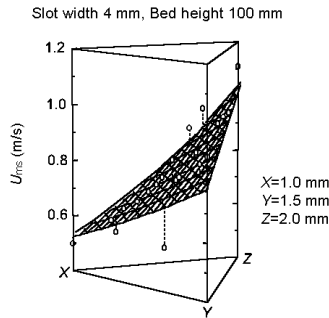


图 6 粒度组成对三组分混合体系最小喷动速度的影响
Fig.6 Effect of particle size and composition on U_{ms} for three-component particle mixtures

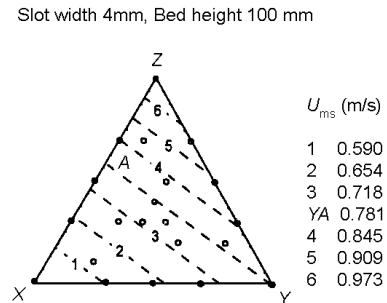


图 7 三组份体系 U_{ms} 的等速度图
Fig.7 Contour map of minimum spouting velocity for three-component particle mixture

图 7 是三组份混合体系最小喷动速度的平面三角形等速度图, 3 个顶点 X, Y, Z 点代表 3 个单一粒径的颗粒体系. XY, XZ, YZ 线上的点表示双粒径混合物体系的组成. 三角形内的点表示三元混合体系的组成. 平面三角形内的曲线表示最小喷动速度的等速度线, 它是一系列的空间平面与图 6 中的最小喷动速度空间曲面的交线在 XYZ 三角形平面上的投影线, 位于同一条等速度线上的点都具有相等的最小喷动速度. 图 7 所示的等速度线的斜率相等. 在相同的床高下, 比较不同狭缝宽度下最小喷动速度的等速度图发现, U_{ms} 的斜率受狭缝宽度的影响非常小. 进一步分析可知, 在一定床高下, U_{ms} 等速度线的斜率与组成混合物的颗粒粒径有关. 在等速度图中 YA 线以下的区域, 3 种颗粒以任何粒度组成构成的混合体系的最小喷动速度都小于 1.5 mm 的单一粒径颗粒体系的最小喷动速度. 图 7 表明, 通过适当的配比可使不同粒度分布与组成的体系达到相同的最小喷动速度.

4 结论

矩形喷动床的最小喷动速度与颗粒物料的粒径和粒度组成都有关系. 单一粒径体系的最小喷动速度随颗粒粒径的增加而增加. 混合粒径体系的最小喷动速度随床高及体系中大颗粒组分质量分数的增加而增加, 而且组成混合颗粒体系的颗粒粒径越大, 体系的最小喷动速度也越大. 而当构成混合颗粒体系的颗粒粒径相差较大时, 体系的粒度组成对最小喷动速度的影响较明显; 粒径相差较小时, 这种影响则较弱.

基于实验结果, 采用因次分析的方法得到了本实验条件下的最小喷动速度的关联式, 关联式与实验数据拟合较好, 计算值与实验值的相对误差绝大部分在 17% 之内.

参考文献:

- [1] Epstein N, Grace J R. Handbook of Particulate Science and Technology [M]. New York: van Nostrand Reinhold. Edited. Otten L, Fayed M, 1997. 532-567.
- [2] 毛元夫, 颜涌捷. 喷动流化床的最小喷动流化速度和床层压降 [J]. 化工冶金, 1999, 20(2): 136-139.
- [3] 徐健, 王诗凝, 魏伟胜, 等. 细颗粒喷动床的喷动特性研究 [J]. 化工冶金, 1999, 20(增刊): 166-173.
- [4] Romankov P G, Rashkovskaya N B. Drying in a Suspended State, 2nd ed [M]. Russian Leningrad: Chem. Publ. House, 1968.
- [5] Rocha S C S, Taranto O P, Ayub G E. Aerodynamics and Heat Transfer During Coating of Tablets in Two-dimensional Spouted Bed [J]. Can. J. Chem. Eng., 1995, 73: 308-312.
- [6] Mathur K B, Epstein N. Spouted Beds [M]. New York: Academic Press, 1974. 260.
- [7] 《化学工程手册》编辑委员会. 《化学工程手册》— 流态化 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1987. 186-189.

Minimum Spouting Velocity of Multi-component Particle Mixtures in a Slot-rectangular Spouted Bed

WANG Bao-qun, LUO Bao-lin

(Inst. Chem. Metall., Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The minimum spouting velocity of multi-size glass bead mixtures was investigated in a rectangular-slot spouted bed with slot air entry, the width of which varies from 2 mm to 6 mm. The experimental results of single and multi-size particle mixtures show that the minimum spouting velocity of multi-size particles is related with particles diameter and size distribution in the particle mixture. In the present work, the maps of minimum spouting velocity for multi-size particle mixture were obtained, and the empirical relation for minimum velocity U_{ms} was determined to be

$$U_{ms} = 0.25 \left(\frac{H}{D_C} \right)^{0.16} \left(\frac{H_S}{D_C} \right)^{-0.018} \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right)^{0.57} \sqrt{2gH} \prod_{i=1}^n \left(\frac{d_{pi}}{D_C} \right)^{0.98 X_i} \quad (n = 3).$$

Key words: slot-rectangular spouted bed; multi-size particles; minimum spouting velocity