

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.02.001

喷动床最小喷动速度的计算颗粒 流体力学数值模拟

金海安¹, 王东祥^{1,2}, 俞建峰^{1,2}

(1. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122;
2. 江南大学 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘要:为了进一步研究喷动床的操作参数和结构参数对最小喷动速度 U_{ms} 的影响,以及建立最小喷动速度的预测关联式,课题组建立了二维喷动床数理模型,床的高度为 800 mm、宽度为 200 mm 和厚度为 20 mm,喷动气入口底部是夹角为 60° 的 V 形结构。采用计算颗粒流体力学(CPFD)方法模拟计算了 5 种颗粒在 3 种喷口宽度和在不同静止床高时最小喷动速度变化情况。结果表明:喷动床的结构参数和操作参数对最小喷动速度有着极大的影响,最小喷动速度随着静止床高和颗粒粒径增大而增大,而随着喷口宽度的增大而减小;综合所有数据进行多因素影响回归,得到了新的最小喷动速度预测关联式。研究结果对于喷动床实际操作条件的确定和工艺设计提供了借鉴。

关键词:二维喷动床;计算颗粒流体力学;预测关联式;最小喷动速度

中图分类号:TQ051 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2020)02-0001-07

Simulation of Minimum Spouting Velocity of Spouted Bed Using Computational Particle Fluid Dynamics Method

JIN Haian¹, WANG Dongxiang^{1,2}, YU Jianfeng^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;
2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment & Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: For the further study of the effect of the operating parameters and structural parameters of the spouted bed on the minimum spouting velocity (U_{ms}) and the establishment of a reliable predictive correlation of minimum spouting velocity, a two-dimensional numerical model of a spouted bed with a height of 800 mm, a width of 200 mm, a thickness of 20 mm and a cone angle of 60° was proposed. The computational particle fluid dynamics (CPFD) method was used to simulate the variation of the minimum spouting velocity of 5 particles at 3 nozzle widths and at different static bed heights. The results show that the structure parameters and operation parameters of spouting bed have great influence on the minimum spouting velocity, the minimum spout velocity increases with the increase of the height of the static bed and the particle size, while decreases with the increase of the width of the nozzle. Multivariate regression was performed based on all the simulation data and the minimum spout velocity prediction model was derived. The conclusions would provide a guidance and reference in the determination of practical operating conditions and process design of spouted bed.

Keywords: two-dimensional spouted bed; CPFD (computational particle fluid dynamics); predictive correlation formula; minimum spouting velocity

收稿日期:2019-10-08;修回日期:2019-12-27

基金项目:国家自然科学基金(51606086);中国博士后科学基金(2017M621624)。

第一作者简介:金海安(1995),男,安徽芜湖人,硕士研究生,主要从事气固两相流动及数值模拟研究。E-mail:jnha0628@163.com

喷动床具有结构简单, 床内气固接触和颗粒混合特性良好等优点, 已广泛应用于食品、化工、能源和轻工等领域^[1-5]。喷动床有着特定的操作条件, 当喷口表观气速达到最小表观喷动速度(以下均称最小喷动速度), 气体才可以突破床层形成喷动。最小喷动速度对喷动床的工艺设计与优化具有重要意义。Mathur 等^[6]提出的粗颗粒最小喷动速度经验关联式应用最为广泛。Monazam 等^[7]测量了普通平底喷动床的最小喷动速度, 并基于 Mathur-Gishler 方程, 建立了新的最小喷动速度关联式。任立波等^[8]耦合 CFD-DEM 算法, 研究了锥形喷动床内的气固流动行为, 获得了稳定流态化阶段颗粒的时均速度分布规律。Duarte 等^[9]采用了双欧拉模型对锥型喷动床内的流体动力学特性进行了研究, 其最小喷动速度模拟结果与文献试验值吻合较好。近些年, 通过 CPFD 方法对颗粒相进行双重处理, 节省了大量计算成本和时间, 特别适合于复杂的多相流系统气固流动行为的模拟研究, 在工业级流化装置模拟中逐渐成为主流^[10-12]。课题组基于 CPFD 方法, 建立二维锥形喷动床数值模型, 数值模拟不同结构参数和操作参数床内的气固流动特性; 分析喷口宽度、喷动气速以及颗粒特性对气固流动结构和最小喷动速度的影响, 建立二维锥形喷动床最小喷动速度预测模型。

1 CPFD 方法

CPFD 结合了欧拉和拉格朗日方法的优点, 将颗粒相既视为连续介质, 也视为离散单元, 按欧拉方法以流体网格上的应力梯度代替颗粒应力梯度, 再插值到离散颗粒体上, 并对颗粒相的其他属性使用拉格朗日法进行计算。CPFD 将多个具有相同的物质属性、物理运动及化学变化的真实颗粒打包成一个计算粒子^[13], 计算速度快, 并且可以保证全局和局部物质运输守恒, 可以更为快速准确地模拟复杂多相流系统的气固流动行为。

1.1 控制方程

对于气相, 采用 Navier-Stokes 方程计算, 湍流模型选择大涡模型(LES), 流体连续性方程和动量方程如下^[14]:

$$\frac{\partial \theta_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\theta_f u_f) = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\theta_f u_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\theta_f u_f u_f) = -\frac{1}{\rho_f} \nabla p - \frac{1}{\rho_f} F + \theta_f g. \quad (2)$$

式中: u_f 为流体速度, m/s; θ_f 为流体体积分分数; ρ_f 为流体密度, kg/m³; p 为流体压强, Pa; F 为流体与颗粒相间

单位体积的动量交换率; g 为重力加速度, m/s²。

对于颗粒相, 假设每个颗粒的质量在时间上是恒定的(颗粒之间或流体之间没有质量传递), 但颗粒可具有一系列尺寸和密度, 通过求解颗粒分布函数 $\Phi(x_p, u_p, \rho_p, \Omega_p, t)$ 的输运方程来描述颗粒相的运动。其中 x_p 为粒子位置; u_p 为粒子速度, m/s; ρ_p 为粒子密度, kg/m³; Ω_p 为粒子体积, m³。输送方程和颗粒的加速度^[15]为:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\Phi u_p) + \nabla u_p \cdot (\Phi A) = 0; \quad (3)$$

$$A = D_p(u_f - u_p) - \frac{1}{\rho_p} \nabla p + g - \frac{1}{\theta_p \rho_p} \nabla \tau_p. \quad (4)$$

式中: A 是计算粒子加速度, m/s²; θ_p 是颗粒体积分分数; τ_p 是颗粒的法向应力, Pa; D_p 是曳力系数。

1.2 颗粒碰撞模型

CPFD 中将多个真实颗粒处理成一个计算颗粒, 对于真实颗粒间的碰撞无法逐一进行计算, 通过引入碰撞模型来表征真实颗粒间的碰撞, 将流体网格中的应力梯度插值到相应位置的颗粒上进行计算。颗粒碰撞时法向应力 τ_p ^[16] 为

$$\tau_p = \frac{P_s \theta_p^\beta}{\max[\theta_{cp} - \theta_p, \varepsilon(1 - \theta_p)]}. \quad (5)$$

式中: P_s 为常数, Pa; θ_{cp} 为颗粒堆积时的体积分分数; β 为常数, 推荐值 2~5; ε 取值为 10^{-7} 。

1.3 曳力模型

多相流中气固间的相互作用力通过曳力模型表征, 常用的有 Wen-Yu 模型^[17]、Ergun 模型^[18]和 Gidaspow 模型^[19]等, 其中 Wen-Yu 模型适用于稀相颗粒流, Ergun 模型更多的适用于密相区域, Gidaspow 模型结合了 Wen-Yu 和 Ergun 2 个模型的特点, 其适用的浓度范围更为宽泛。喷动床内气固流动呈现稀相和密相混合状态, 课题组选择 Gidaspow 模型计算曳力系数 D_p :

$$D_p = D_1, \quad \theta_p < 0.75\theta_{cp}; \quad (6)$$

$$D_p = (D_2 - D_1) \left(\frac{\theta_p - 0.75\theta_{cp}}{0.85\theta_{cp} - 0.75\theta_{cp}} \right) + D_1, \quad 0.75\theta_{cp} < \theta_p < 0.85\theta_{cp}; \quad (7)$$

$$D_p = D_2, \quad 0.85\theta_p < \theta_p. \quad (8)$$

式中: D_1 和 D_2 分别为 Wen-Yu 模型和 Ergun 模型的曳力系数。

2 模型参数

2.1 数值模型

如图 1(a) 所示, 喷动床床高为 800 mm, 床体宽度

为 200 mm,厚度 20 mm。喷动气入口底部是夹角为 60° 的 V 形结构,入口厚度为 20 mm。模拟中入口厚度不变,入口宽度分别调整为 20,15 和 10 mm 以改变喷动气的进口尺寸。采用笛卡尔网格生成方法进行网格划分,如图 1(b)所示。如果在网格中形成非常小的切割单元不能在模型中包含相关数量的计算粒子,则必须被移除或与附近较大的单元合并来维持模型稳定性。研究采用的颗粒直径为 1.3 ~ 3.2 mm,床体宽度是床体厚度的 10 倍,床体厚度大于粒径的 5 倍,满足二维喷动床条件^[20],其呈现出的流动特性能较真实反应实际的气固流动。

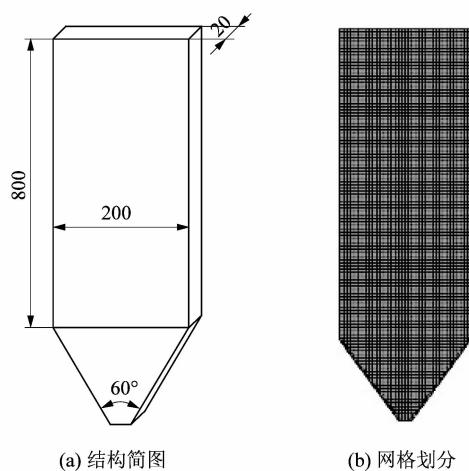


图 1 结构简图和网格划分

Figure 1 Structure diagram and meshing

采用网格数量为 10 000,15 000 和 20 000 进行网

格无关性验证以检验合理的网格数量范围。从表 1 中可以看出,当网格数量超过 15 000 后,床体高度为 50,100 和 200 mm 处压力监测点的数值不再出现明显改变,即可保证计算结果的可靠性。为了更准确地模拟喷动床内颗粒的流动形态,底部锥形区域的网格进行了加密,有效网格数量为 16 251。

表 1 网格无关性验证

Table 1 Grid independence verification

网格数量	压力/Pa		
	H = 50 mm 时	H = 100 mm 时	H = 200 mm 时
10 000	102 479	102 138	101 398
15 000	102 388	102 079	101 366
20 000	102 376	102 068	101 357

2.2 模拟参数

以空气作为入射气体,所选固体物料为绿豆、小米和 3 种不同直径的玻璃珠,颗粒参数如表 2 所示。表 3 所示为模拟时相关参数的设置情况。采用升速法结合压降曲线得到最小喷动速度并对颗粒不同流动形态进行观察。

表 2 颗粒物性参数

Table 2 Physical parameters of the particle

颗粒种类	直径 d_p /mm	密度 ρ_p /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	体积分数 $\theta_{cp}/\%$
绿豆	3.2	1 640	58
小米	1.6	1 330	60
玻璃珠 1	1.3	2 600	62
玻璃珠 2	1.8	2 600	61
玻璃珠 3	2.3	2 600	60

表 3 模拟参数

Table 3 Simulation parameters

气体密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	气体黏度 $\times 10^{-5}$ / ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	网格 数目	网格尺 寸/mm	最大动量恢 复系数/%	法向动量恢 复系数/%	切向动量恢 复系数/%	初始气体 压力/Pa	初始进口 压力/Pa	初始出口 压力/Pa	时间步 长/s
1.17	1.85	16 251	5	40	35	99	101 325	101 325	101 325	0.000 1

3 结果与讨论

3.1 实验验证

根据 Liu 等^[21]的实验数据对初始床高分别为 50,75 和 100 mm 的二维喷动床最小喷动速度进行模拟计算,填料为直径 2 mm,密度 $2\,380\text{ kg/m}^3$ 的玻璃珠,通过逐渐增加喷动气速引起的床层压降变化和具体床层流动形态来确定最小喷动速度。图 2 为表观气速 $U_s = 1.58\text{ m/s}$ 时稳定喷动状态下二维喷动床的实验和模拟对照图,从图中可以看出两者在喷动结构上有着高度一致性。环隙区颗粒不断流入喷动区,最终在喷动区出口形成喷泉。模拟结果中喷泉区中颗粒相对较少

的主要原因是 CPFD 方法是将多个真实颗粒“打包”成一个计算颗粒进行计算。

图 3 为颗粒密度为 $2\,380\text{ kg/m}^3$ 、直径为 2.0 mm 时随着喷动气速逐渐增大二维喷动床内最大床层压降的变化情况。从图中可以看出,在不同初始床高的条件下,最大床层压降变化有着相同的趋势:初始喷动气速较低时,最大床层压降随着表观喷动气速增加而增加,但颗粒由于重力和摩擦力的原因处于静止状态,此时为固定床阶段。在曲线达到最高点时,此时气体对颗粒产生的曳力恰好平衡颗粒上升的阻力,继续增大喷动气速,颗粒开始缓慢向上运动,床内产生内部射

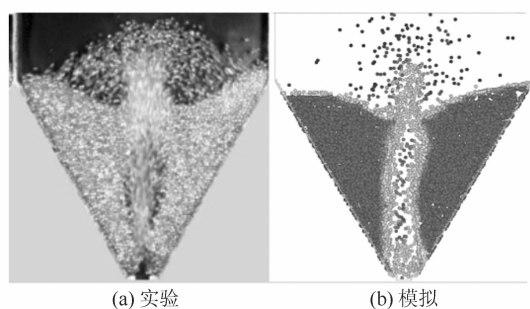


图 2 实验和模拟的流动结构对照图

Figure 2 Experimental and simulation results of flow structures

流,导致更多气体可以从颗粒间的空隙逸出床层,最大床层压降开始下降。当气流突破床层形成喷动区后,最大床层压降会迅速减小至某一定值附近波动,所以最大床层压降发生突降时对应的喷动风速即为最小喷动速度。结合最大床层压降与表观风速的关系图,得到 $U_1 = 0.90 \text{ m/s}$ 、 $U_2 = 0.72 \text{ m/s}$ 和 $U_3 = 0.54 \text{ m/s}$,略小于文献中实验得到的最小表观喷动风速数据($U'_1 = 0.91 \text{ m/s}$ 、 $U'_2 = 0.73 \text{ m/s}$ 和 $U'_3 = 0.55 \text{ m/s}$)。误差主要来源于实验操作时物料填充高度偏差和气体携带的动能损失,但误差仍在允许的范围内。由上述验证结果可知,采用 CPFD 方法对二维喷动床进行数值模拟时有较高的准确性和可行性,进一步研究了最小喷动速度与操作参数和结构参数之间的关系。

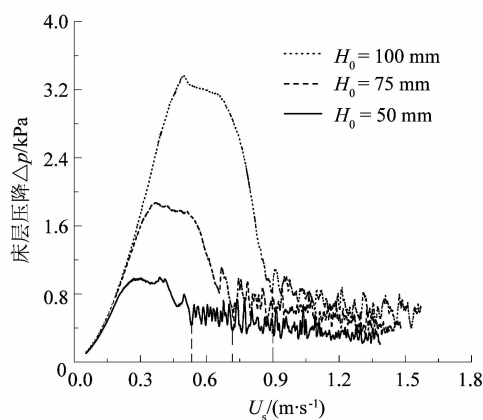


图 3 最大床层压降与风速的关系

Figure 3 Relationship between maximum bed pressure drop and gas velocity

3.2 喷动结构

图 4 为 $U_s = 2.3U_{ms}$ 时喷动过程的模拟情况。 $t = 0.0 \text{ s}$ 时,向喷动床内通入高速气体来推动物料上升; $t = 0.2 \text{ s}$ 时,床层中部形成一段大气泡状空腔,尺寸接近床层截面积,类似腾涌射流流动结构。主要原因是

风速突然增大,推动物料整体上升,床层表面高度明显升高,气体需要运动距离增大,向四周渗透的气体增加,造成空腔范围增大。气体继续上升至突破床层后将携带的颗粒向四周抛洒,逐渐形成稳定的喷动区和喷泉区。可以看到环隙区颗粒缓慢向下运动至底部后被卷吸入喷动区随着入口高速气流上升,进行新的循环。

图 5 是喷动风速逐渐增大时床内流动结构的变化。当喷动风速小于最小喷动风速时,气体无法穿透床层,颗粒只能在床层内部形成射流区内进行循环。区别于图 4 中 $t = 0.2 \text{ s}$ 时产生的大气泡,图 5 中 $U_s = 0.8U_{ms}$ 时形成的内部射流区较窄,在内部射流区顶端形成气泡继续上升并不断聚拢至床层表面破裂。随着喷动风速继续增加,气流突破床层后并形成喷泉。从图中可以明显看出喷泉的高度随着喷动风速增加而增加,当气体速度足够大时,大量颗粒被吹起布满整个床体,没有明显喷泉区界线,喷动床开始向气力输送床转变。

3.3 最小喷动速度的影响因素

3.3.1 初始床高的影响

图 6 为喷口宽度为 20 mm 的条件下,初始床高和床宽的比值与最小喷动速度的关系。从图中可以看出在喷口宽度和床宽不变的条件下,不同填充材料的最小喷动速度都随着初始床高的增加而增加,并且在初始床高超过锥形床高度后,两者呈现出良好的正比关系。产生这种现象的原因主要有 2 个:一是因为初始床高的增加即初始填充物料的增多,气体在上升过程中需要吹起更多的颗粒,导致阻力增大,就需要更高的风速来克服阻力产生喷动;二是初始床高的增加使气体需要上升的距离变长,更多的气体在突破床层的过程中由喷动区向四周环隙区逸散,导致需要更多气体来产生喷动,使最小喷动速度增大。

3.3.2 颗粒直径的影响

图 7 为颗粒直径与最小喷动速度的关系,在喷口宽度为 20 mm 的条件下,选用了 1.3 、 1.8 和 2.3 mm 的 3 种直径的玻璃珠作为填充物料。从图中可以看出最小喷动速度随着颗粒直径的增大而迅速增大。主要原因是由于同种密度的材料,颗粒直径增大,颗粒的表面积和体积比减小,导致相同质量的颗粒喷动所需气体的速度增加^[22]。随着颗粒直径的增大,颗粒的终端速度相应增大也是最小喷动速度增大的一个原因。结合图 6 初始床高与最小喷动速度的关系可以看出同样的比例系数下颗粒粒径对最小喷动速度的影响远大于初始床高的影响。

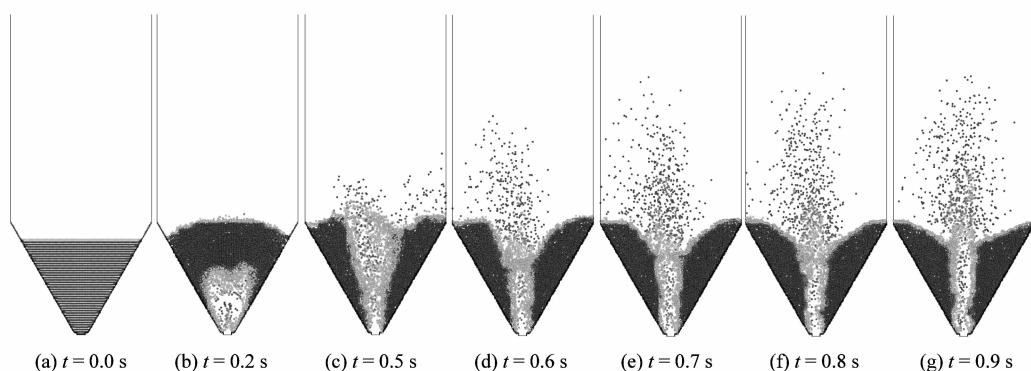


图4 喷动发展过程

Figure 4 Development of spout

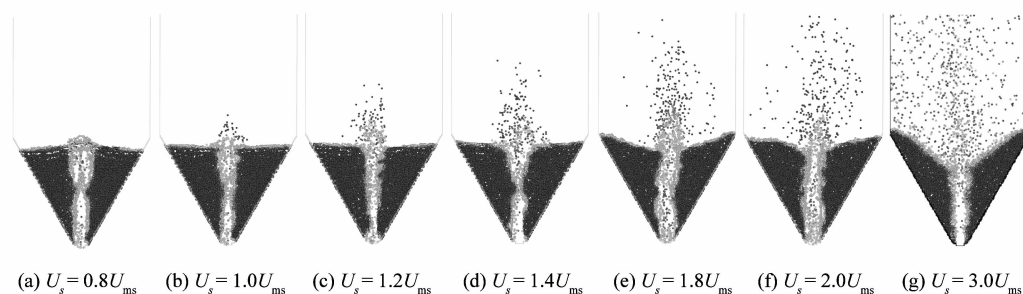


图5 不同喷动气速下的流动结构

Figure 5 Flow patterns at various spouting gas velocity

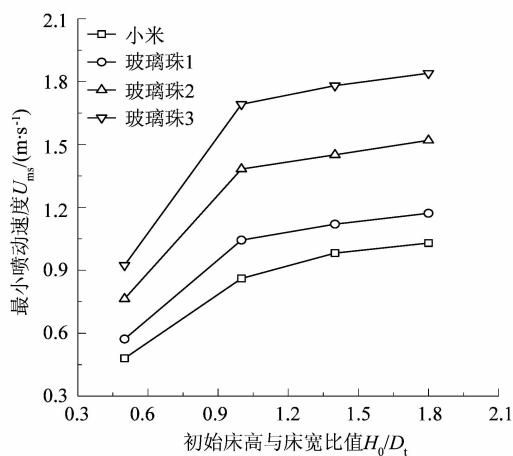


图6 初始床高和床宽的比值与最小喷动速度的关系

Figure 6 Relationship between ratio of initial bed height to bed width and minimum spouting velocity

3.3.3 喷口宽度的影响

图8为喷口宽度与最小喷动速度的关系。在 H_0/D_t 为1.4的条件下,喷口宽度为10,15和20 mm时,3种填充物料的最小喷动速度变化呈现出相同趋势。从图中可以看出随着喷口宽度增大,最小喷动速度逐渐

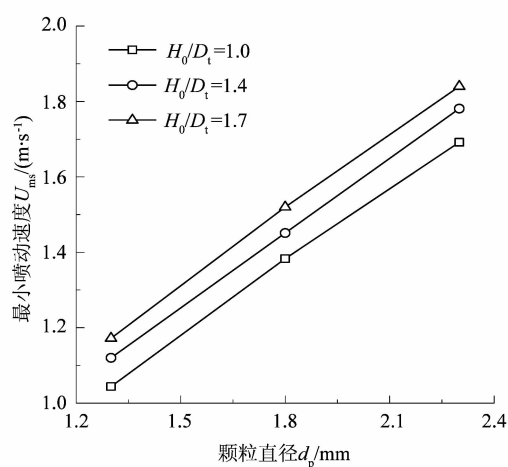


图7 颗粒直径与最小喷动速度的关系

Figure 7 Relationship between particle diameter and minimum spouting velocity

增大。一方面是随着喷口宽度的增加,喷动区的平均宽度也逐渐增大,气体在上升过程中会卷吸更多的颗粒,需要更高的气速来克服其产生的阻力。另一方面,由于喷口宽度的增加,气体向环隙区的扩散量也在增加,导致气体携带的动能损失增大,需要更多的气体来弥补动能损失,导致最小喷动速度增大。

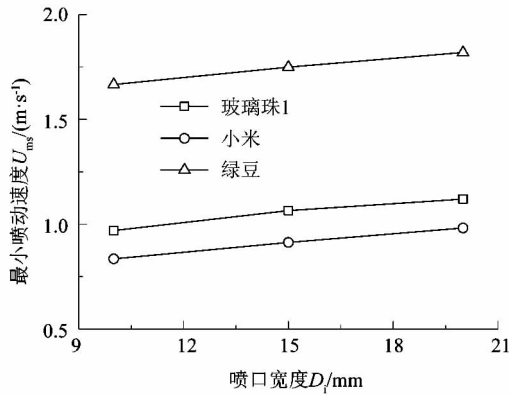


图8 喷嘴宽度与最小喷动速度的关系

Figure 8 Relationship between nozzle size and minimum spouting velocity

通过上述分析得到最小喷动速度受到初始床高、颗粒直径、颗粒密度和喷嘴宽度等影响。根据唐凤翔等^{[23], [24]}^[54]对最小喷动速度关联式的研究,可以写成下面的参数群形式:

$$U_{ms} = a(2gH_0)^{0.5} \left(\frac{H_0}{D_t}\right)^b \left(\frac{d_p}{D_t}\right)^c \left(\frac{D_i}{D_t}\right)^d \left(\frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f}\right)^e. \quad (9)$$

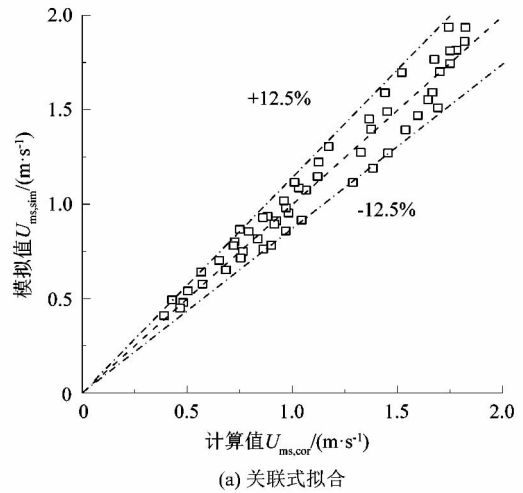
结合不同操作条件下的模拟结果进行多元线性回归分析,确定系数 $a \sim e$, 得到最小喷动速度关联式为

$$U_{ms} = 0.799 (2gH_0)^{0.5} \left(\frac{H_0}{D_t}\right)^{0.168} \left(\frac{d_p}{D_t}\right)^{0.806} \left(\frac{D_i}{D_t}\right)^{0.226} \left(\frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f}\right)^{0.524}. \quad (10)$$

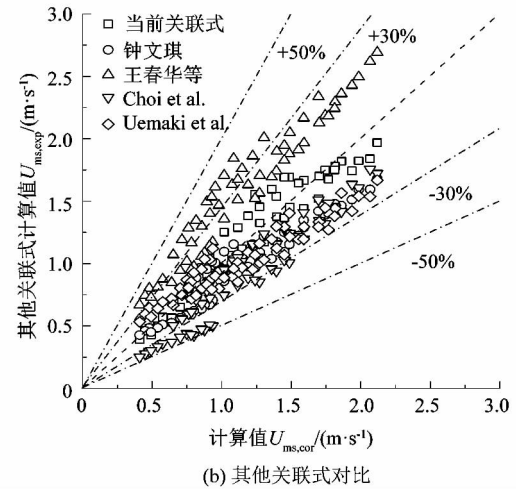
图9(a)将最小喷动速度关联式的计算值与模拟值进行比较,从图中可以看出计算值与模拟值具有很高的吻合性;相关系数为0.98,标准误差为9.8%,吻合较好,相对误差在12.5%以内,该关联式对此类喷动床最小喷动速度的预测具有较高的准确性。图9(b)中将得到的最小喷动速度的关联式与其他学者的关联式进行对比,从图中可以发现在相同的条件下,所有关联式的预测值呈现相同趋势;相对误差大部分控制在30%以内,与Uemaki和Wang等^[25-26]得到关联式预测值非常吻合,说明研究得到的关联式对于最小喷动速度的预测具有一定的可靠性。Zhong^[24]^[52]的关联式中考虑了流化气的影响,而Choi等^[27]填充颗粒的粒径比差异较大,喷动床床体并非二维结构,导致了与关联式的预测值误差较大。

4 结论

课题组采用CPFD方法建立了二维喷动床数理模型,对最小喷动速度和气固流动结构进行数值模拟,考



(a) 关联式拟合



(b) 其他关联式对比

图9 最小喷动速度关联式的拟合与对比

Figure 9 Fitting and contrast of minimum spouting velocity correlation

虑了操作参数和结构参数的改变对最小喷动速度和流动结构转变的影响,并通过对比文献实验数据验证了模型准确性,得到如下结论:

1) 随着喷动气速增加,床内将逐步呈现内部射流、鼓泡射流、喷动、稳定喷动和气力输送等流动结构,稳定喷动流动结构的发生需要喷动气速维持在一定范围内。

2) 最小喷动速度随着初始床高、颗粒粒径和喷嘴宽度增大而增大,通过增大喷动速度可克服颗粒产生的阻力和弥补气体携带动能损失;相对于喷嘴宽度,静止床高和颗粒直径对最小喷动速度影响较为显著。

3) 研究得到的二维锥形喷动床最小喷动速度关联式与已有二维经验关联式吻合较好,能够准确预测二维喷动床最小喷动速度,对于三维喷动床则存在一定误差。

参考文献:

- [1] 张少峰,赵卷,张占锋,等. 喷动床技术在烟气脱硫中的应用及最新进展[J]. 化工进展,2004,23(2):162-167.
- [2] 刘鹏. 紫薯颗粒的微波喷动干燥特性及工艺研究[D]. 无锡:江南大学,2012:1-25.
- [3] 麦锡源. 核燃料包覆喷动床气固流动特性模拟研究[D]. 上海:中国科学院研究生院(上海应用物理研究所),2015:1-9.
- [4] JINDARAT W, SUNGSOONTORN S, RATTANADECHO P. Analysis of energy consumption in a combined microwave-hot air spouted bed drying of biomaterial: coffee beans [J]. *Experimental Heat Transfer*, 2015, 28(2):107-124.
- [5] CORTAZAR M, LOPEZ G, ALVAREZ J, et al. Behaviour of primary catalysts in the biomass steam gasification in a fountain confined spouted bed [J]. *Fuel*, 2019, 253:1446-1456.
- [6] MATHUR K B, GISHLER P E. A technique for contacting gases with coarse solid particles [J]. *AIChE Journal*, 1955, 1(2):157-164.
- [7] MONAZAM E R, BREAUULT R W, WEBER J, et al. Minimum spouting velocity of flat-base spouted fluid bed [J]. *Particology*, 2018, 36:27-36.
- [8] 任立波,韩吉田. 基于CFD-DEM耦合并行算法的锥形喷动床内离散颗粒数值模拟[J]. 东南大学学报(自然科学版),2014,44(5):993-998.
- [9] DUARTE C R, OLAZAR M, MURATA V V, et al. Numerical simulation and experimental study of fluid-particle flows in a spouted bed [J]. *Powder Technology*, 2009, 188(3):195-205.
- [10] 张立栋,王子嘉,李少华,等. 导向管直径对喷动床流动特性影响的计算颗粒流体力学数值模拟[J]. 化工进展,2018,37(1):14-22.
- [11] 谢俊,金保昇,钟文琪. 基于MP-PIC模型的流化床煤气化过程三维数值模拟[J]. 工程热物理学报,2012,33(6):981-984.
- [12] WANG Qinggong, YANG Hairui, WANG Peining, et al. Application of CPFD method in the simulation of a circulating fluidized bed with a loop seal, part I: determination of modeling parameters [J]. *Powder Technology*, 2014, 253:814-821.
- [13] SNIDER D M, CLARK S M, OROURKE P J. Eulerian - Lagrangian method for three-dimensional thermal reacting flow with application to coal gasifiers [J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, 66(6):1285-1295.
- [14] SNIDER D M. Three fundamental granular flow experiments and CPFD predictions [J]. *Powder Technology*, 2007, 176(1):36-46.
- [15] 孙子文,陈岱琳,钟文琪,等. 快速流化床颗粒团聚特征的MP-PIC数值模拟[J]. 化工学报,2018,69(8):3443-3451.
- [16] 陈岱琳. 快速流化床颗粒团聚规律的试验与数值模拟研究[D]. 南京:东南大学,2017:56-79.
- [17] WEN C Y, YU Y H. A generalized method for predicting the minimum fluidization velocity [J]. *AIChE Journal*, 1966, 12:610-612.
- [18] BEETSTRA R, VAN DER HOEF M A, KUIPERS J A M. Drag force of intermediate Reynolds number flow past mono- and bidisperse arrays of spheres [J]. *AIChE Journal*, 2007, 53(2):489-501.
- [19] GIDASPOW D. *Multiphase flow and fluidization* [M]. Boston Academic Press, 1994.
- [20] ORPE A V, KHAKHAR D V. Scaling relations for granular flow in quasi-two-dimensional rotating cylinders [J]. *Physical Review E (Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics)*, 2001, 64:031302.
- [21] LIU Guanying, LI Shuiqing, ZHAO Xianglong, et al. Experimental studies of particle flow dynamics in a two-dimensional spouted bed [J]. *Chemical Engineering Science*, 2008, 63(4):1131-1141.
- [22] NAGARKATTI A, CHATTERJEE A. Pressure and flow characteristics of a gas-phase spout-fluid bed and minimum spout-fluid condition [J]. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1974, 52(2):129-288.
- [23] 唐凤翔,张济宇. 喷动流化床最小喷动流化速度的多因素影响与关联[J]. 化工学报,2004,55(7):1083-1091.
- [24] 钟文琪. 喷动流化床流体动力学特性及放大规律研究[D]. 南京:东南大学,2007:50-54.
- [25] UEMAKI O, YAMADA R, KUGO M. Particle segregation in a spouted bed of binary mixtures of particles [J]. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1983, 61(3):303-307.
- [26] 王春华,仲兆平,李睿,等. 喷动流化床最小喷动流化速度智能拟合[J]. 中国电机工程学报,2010,30(17):17-21.
- [27] CHOI M, MEISEN A. Hydrodynamics of shallow, conical spouted beds [J]. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1992, 70(5):916-924.