

静电分散中粉体荷电规律的数值模拟

雷玉明^{a,b}, 张蓉^{a,b}, 殷鹏飞^{a,b}, 胡建昌^{a,b}

(西北工业大学 a. 理学院; b. 空间应用物理与化学教育部重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要: 基于建立适合 Fluent 软件求解的颗粒荷电数学模型, 利用离散相模型对荷电器中碳酸钙粉体颗粒的荷电规律进行模拟, 分析颗粒粒径、荷电电压 2 个因素对颗粒荷质比的影响, 并对模拟结果进行实验验证。结果表明, 实验结果与仿真结果较为接近。

关键词: 静电分散; 粉体; 数值模拟

中图分类号: TF122 文献标志码: A

文章编号: 1008-5548(2013)03-0006-04

Numerical Simulation on Charging Law of Particles in Electrostatic Dispersion

LEI Yuming^{a,b}, ZHANG Rong^{a,b},
YIN Pengfei^{a,b}, HU Jianchang^{a,b}

(a. School of Natural and Applied Sciences; b. Key Laboratory of Space Applied Physics and Chemistry, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Based on theoretical model of charging process suitable to be solved by Fluent software, charging process of calcium carbonate powders was simulated using the dispersed phase model. The effect of original size of particles and charging voltage on charge-to-mass ratio was achieved and discussed. The theoretical simulation was verified by experimental study. The results show that the simulated results are close to experimental values.

Key words: electrostatic dispersion; powder; numerical simulation

静电分散技术通过给颗粒荷上同极性电荷, 利用荷电颗粒之间的静电斥力阻止颗粒间的相互团聚, 使其处于完全、均匀分散状态。目前国外尚无相关技术研究的文献报道, 国内任俊^[1]、徐政^[2]、李桂春^[3]、李雪莹^[4]等分别对碳酸钙、滑石粉、煤粉、钡铁氧体磁粉进行了静电分散研究。研究结果表明, 静电分散是比较理想的分散方法, 其关键技术是对粉体的荷电, 而粉体的荷电过

程是一个多因素控制的复杂过程, 只有对这一过程有充分、深入的认识, 才可能突破静电分散的关键环节, 使这一技术应用于实际工程。

随着计算机技术的快速发展, 计算机模拟已成为一种重要的研究手段, 它能够提供实验研究不能提供的信息量^[5], 充分反映几何形状、物理环境对实验结果的影响。目前刘伟军^[6]等采用 Fluent 软件成功实现了线筒型荷电器内荷电颗粒的运动轨迹情况。本文中对静电场中的气-固两相流进行模拟, 分析静电场中不同参数对粉体颗粒荷电规律的影响。

1 数值模拟

1.1 数学模型

颗粒荷电数学模型涉及如下方程: 气体质量与动量守恒方程、颗粒质量与动量守恒方程、颗粒荷电方程、电场与电荷守恒方程。荷电器内部存在流场、电场和颗粒动力场 3 种场量。模型流程如图 1 所示。

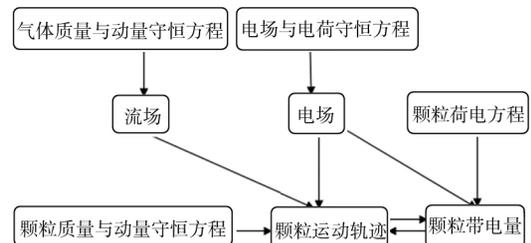


图 1 颗粒荷电数学模型流程图

Fig. 1 Flow chart of charging process mathematics model

1.1.1 流场

随着气流流过荷电器时, 粉体颗粒悬浮在气体中的运动可采用质量守恒方程和动量守恒方程来描述。气体连续性方程为

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0, \quad (1)$$

气体动量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv) = -\frac{\partial p}{\partial x} + 2\frac{\partial}{\partial x}(\mu_t \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}[\mu_t(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})]; \quad (2)$$

收稿日期: 2012-11-06, 修回日期: 2012-12-04。

基金项目: 国家自然科学基金项目, 编号: 51074129。

第一作者简介: 雷玉明(1985—), 男, 硕士研究生, 研究方向为静电分散中微米粉体的荷电规律。电话: 13389230419, 029-88213591, E-mail: leiyumingcfan@163.com。

通信作者: 张蓉(1963—), 女, 博士, 教授, 研究方向为功能材料的制备及应用。电话: 029-88431664, E-mail: xbw101@nwpu.edu.cn。

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho uu) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv) = -\frac{\partial p}{\partial y} + 2\frac{\partial}{\partial y}(\mu_t \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial x}[\mu_t(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})], \quad (3)$$

式中: ρ 为空气密度, kg/m^3 ; u, v 分别为空气在 x 方向和 y 方向的速度矢量, m/s ; μ_t 为湍流黏性系数, $\text{kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。

1.1.2 电场

荷电器内的电场由 2 部分组成: 外加电场和空间电荷形成的电场, 即可用描述电场分布特性的电势泊松方程和电流连续方程分别表示:

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho_e}{\epsilon_0}, \quad (4)$$

$$\nabla \varphi \cdot \nabla \rho = \frac{\rho_e^2}{\epsilon_0}, \quad (5)$$

其中

$$J = \rho K E,$$

式中: ∇^2 为拉普拉斯算子; ∇ 为梯度算子; J 为电流密度矢量, A ; ρ_e 为空间电荷密度, C/m^3 ; E 为电场强度矢量, V/m ; K_i 为离子的迁移率, $\text{m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$; φ 为空间电势, V ; ϵ_0 为空气介电常数, F/m , 取值为 $8.85 \times 10^{-12} F/\text{m}$ 。

1.1.3 颗粒荷电方程

粉体荷电以电场荷电^[7]为主, 方程为

$$q_p = \left(1 + 2\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1}\right) 4\pi r_p^2 \epsilon_0 E \frac{1}{t + \tau}, \quad (6)$$

式中: q_p 为颗粒的荷电量, C ; ϵ_r 为颗粒相对介电常数; r_p 为颗粒半径, m ; t 为实际荷电时间, s ; τ 为荷电时间常数。

1.1.4 静电力

外电场与颗粒所带的电荷相互作用而产生的力称为静电力, 或电场力、库仑力等, 记为 F_E , 方程为

$$F_E = q_p E. \quad (7)$$

1.1.5 重力

颗粒质量

$$m = \rho_p V_p = \frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho_p. \quad (8)$$

重力

$$F_G = mg = \rho_p V_p g = \frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho_p g, \quad (9)$$

式中: V_p 为粒子体积, m^3 ; d_p 为颗粒粒径, m ; ρ_p 为颗粒密度, kg/m^3 。

1.1.6 颗粒动力场

为了分析粉体颗粒的运动轨迹, 考虑电场力、黏性阻力以及重力 3 种主要的颗粒受力, 建立颗粒的运动方程为

$$m \frac{du_p}{dt} = F_D + F_G + F_E \quad (10)$$

式中: F_D 为颗粒所受空气阻力, N ; u_p 为颗粒速度, m/s ; F_E 为电场力, N 。

1.2 网格的生成

荷电器采用分区域的方法划分网格, 计算网格如图 2 所示。由于电极的曲率半径较大, 所以对荷电器电极附近进行局部加密, 并对入口进行细网格加密, 而对出口和衬底电极进行均匀处理, 网格类型为四面体, 网格总数约为 93 万。

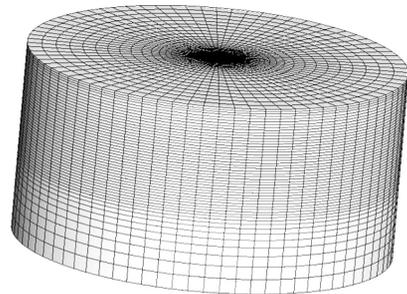


图 2 荷电器的计算网格

Fig. 2 Computational grid of charged appliance

1.3 模型简化条件

1) 荷电颗粒简化为稀疏气-固两相流, 荷电颗粒粒径均一。

2) 颗粒荷电后形成的电场不影响附近颗粒形成的电场, 忽略离子扩散率的影响, 离子迁移率保持恒定不变。

1.4 计算方法及边界条件

荷电器采用建模软件 Gambit 建模, 它的模型采用 Fluent 12.0 软件中的离散相模型进行模拟^[8-9], 时间步长为 $5 \times 10^{-5} \text{ s}$, 整个模拟区域为空气流动区域, 空气流动采用 Viscous Model 中的 $k-\epsilon$ 模型, 采用 SIMPLE 算法对控制容积进行数值求解。模拟计算荷电器中的气-固两相流时, 在重力、静电力、拖曳力等的联合作用下, 进入荷电器的空气和粉体颗粒混合物向衬底电极运动。计算对象为碳酸钙粉体, 它是一种无臭、无味的白色粉末, 在空气中可以稳定存在, 有轻微的吸潮能力。物性参数及边界条件的设定如表 1、2 所示。

表 1 物性参数的设定

Tab. 1 Setting of physical properties parameters

颗粒密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	空气密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	空气动力黏度 $\mu/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$	正离子迁移率 $K_i/(\text{m}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$	相对介电常数 ϵ_r
3 000	1.225	1.789×10^{-5}	1.45×10^{-4}	8

表 2 边界条件的设定

Tab. 2 Setting of boundary conditions

	压强/MPa	电势 V/kV	颗粒相
入口	0.3		逃逸
出口	0		逃逸
电晕电极	0	30, 40, 50, 60	
衬底电极	0	0	擒获

2 实验方法

静电分散实验装置如图 3 所示。碳酸钙粉体在干燥、高速压缩气流的作用下,由进粉口喷入荷电区内,与此同时,放电电极在一定的高压下电晕放电,碳酸钙粉体通过放电区域时与电荷漂移区的正离子碰撞荷上正电荷,在库仑排斥力的作用下,使碳酸钙粉体实现静电分散。最终得到的分散粉体利用 VC98 型数字万用表及 FA2400N 型精密电子天平分别测量粉体所带的荷电量和质量,通过计算粉体颗粒的荷电量及质量的比值,得到荷质比。

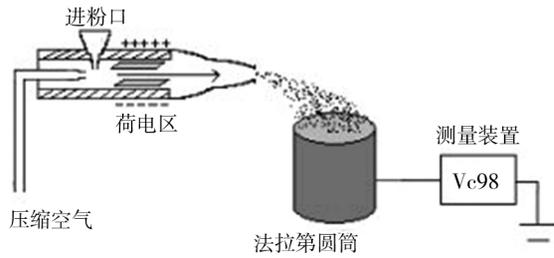


图 3 静电分散装置

Fig. 3 Schematic diagram of electrostatic dispersion

实验用粉料为工业碳酸钙粉体。实验时,环境温度 26 °C,环境湿度为 45%,先将碳酸钙粉体放入真空干燥烘箱中干燥 36 h,温度为 120 °C;然后将干燥后的碳酸钙粉体通过进粉口加入静电分散装置进行分散。参数如下:荷电电压为 10~80 kV,气流压强为 0.3 MPa,粒径为 50~200 μm。

3 结果与讨论

3.1 荷电电压对颗粒荷质比的影响

图 4 所示为荷电电压对颗粒荷质比影响的仿真与实验结果。由图可知,当荷电电压小于 50 kV 时,对于实验值和仿真值,颗粒荷质比都是一个单调增函数,并且两者处于同一量级,说明对实验模型的选择、

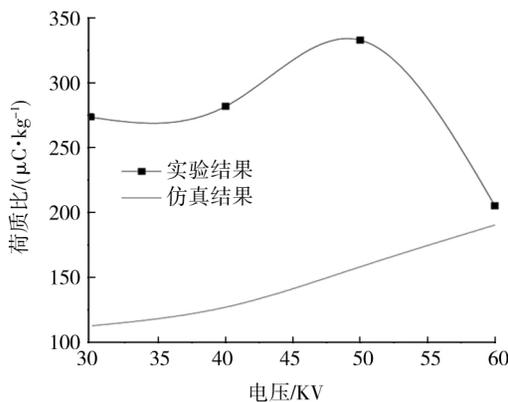


图 4 荷电电压对颗粒荷质比的影响

Fig. 4 Effect of charging voltage on charge-to-mass ratio of particles

简化具有合理性;但是当荷电电压为 50 kV 时,实验值达到最大,当电压继续增大时,颗粒荷质比迅速减小。有研究认为,其减小原因是当电压超过一定限度时,电晕放电会开始向流注放电转化,使得粉体的实际荷电量减小;而仿真结果的分析根据泊松方程来得到电场,并没有考虑到流注放电问题。

3.2 颗粒粒径对颗粒荷质比的影响

图 5 所示为颗粒粒径对荷质比影响的仿真与实验结果。由图可知,实验结果与仿真结果的趋势都是颗粒荷质比随着颗粒粒径的增大而减小,且处于同一量级。根据颗粒饱和荷电理论,颗粒粒径的 2 次方与荷电量成正比,而颗粒粒径的 3 次方与质量成正比,因此,大颗粒的荷质比小于小颗粒的,即颗粒粒径与荷质比成反比。

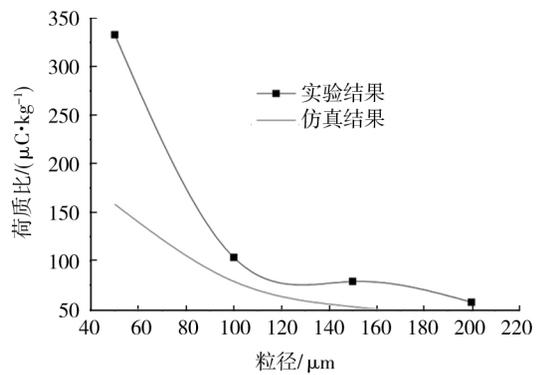


图 5 颗粒粒径对颗粒荷质比的影响

Fig. 5 Effect of particle size on charge-to-mass ratio of particles

由以上分析可知,仿真结果与实验结果接近,但还有一些数据不能很好地吻合,原因主要有以下几个方面:

- 1)几何模型的建立是通过实际实验仪器简化得到的,模型参数的设定还不够准确。
- 2)实验用粉体并不是均一粒径的球形颗粒。
- 3)忽略了荷电颗粒所引起的电场。
- 4)未考虑到流注放电。

4 结论

基于所建立的数学模型,利用 Fluent 软件中的离散相模型模拟荷电器中粉体颗粒荷电过程,对主要模拟结果的实验验证表明,实验结果与仿真结果较为接近。

1)当荷电电压小于 50 kV 时,对于实验值和仿真值,颗粒荷质比都是一个单调增函数,并且两者处于同一量级。

2)实验结果与仿真结果的趋势都是颗粒荷质比随着颗粒粒径的增大而减小,且处在同一量级。

(下转第 13 页)

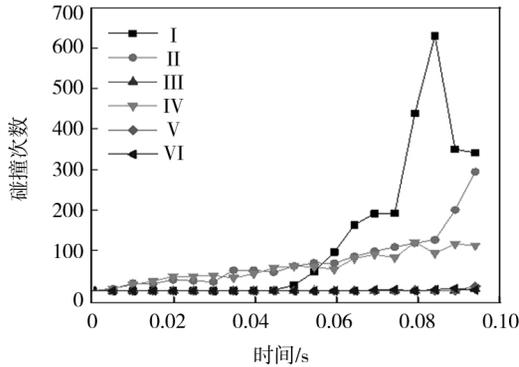


图6 颗粒与壁面碰撞次数随着时间的分布

Fig. 6 Distribution of collision number along time

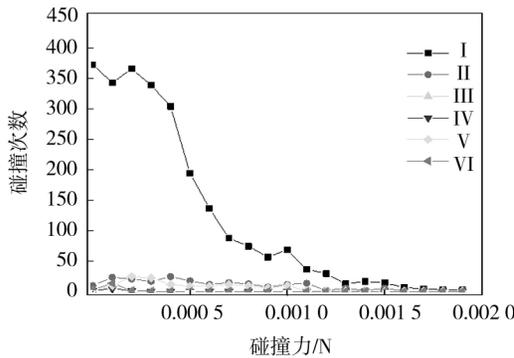


图7 颗粒与壁面碰撞次数随着碰撞力的分布

Fig. 7 Distribution of collision number along impact

得到如下结论:

1)从气相流场特性分析,随着中心管开孔面积的增大,气相流场轴向速度无明显变化,径向移动速度减小,压力减小;中心管开孔面积与进口面积比值约为0.8~1.12,模拟过程中最优比值为0.96。

2)在开孔面积相同的情况下,计算过程中通过增大1倍的两端开孔面积,有效减缓了中心管两端速度集中很大的端效应。

3)通过颗粒运动特性分析,在颗粒性质与操作条件相同的情况下,增大开孔面积能减少碰撞次数,减

小碰撞力,防止贴壁现象和颗粒破碎。

综合考虑气相流场和颗粒运动特性,保证中心管开孔面积与进口面积比值为0.8~1.12的同时,使两端的开孔面积分布大于中段开孔面积,能够优化气相流场和颗粒运动规律。

参考文献 (References):

- [1] 徐志刚,陈青如,吴勇强,等. 径向流动反应器流体力学特性研究进展[J]. 化肥设计, 2005, 43(2): 12-16.
- [2] 孙守峰,蓝兴英,马素娟,等. 催化重整固定床径向反应器结构的优化研究[J]. 高校化学工程学报, 2008, 22(2): 252-258.
- [3] MU Zuze, WANG Jinfu, WANG Tiefeng, et al. Optimum design of radial flow moving-bed reactors based on a mathematical hydrodynamic model[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2003, 42(5): 409-417.
- [4] BARYSHEVA L V, BORISOVA E S, KHANAIEV V M, et al. Motion of particles through the fixed bed in a gas-solid-solid down flow reactor[J]. Chemical Engineering Journal, 2003, 91(2/3): 219-225.
- [5] 王金福,景山,王铁锋,等. 径向移动床反应器流场特性及其数学模拟[J]. 高校化学工程学报, 1999, 13(5): 435-440.
- [6] HSIAU S S, SMID J, TSAI S A. Flow of filter granules in moving granular beds with louvers and sublouvers[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2008, 47(12): 2084-2097.
- [7] 卢洲,刘雪东,潘兵. 基于CFD-DEM方法的柱状颗粒在弯管中输送过程的数值模拟[J]. 中国粉体技术, 2011, 17(5): 69-73
- [8] EPPINGER T, SEIDLER K, KRAUME M. DEM-CFD simulations of fixed bed reactors with small tube to particle diameter ratios[J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 166(1): 324-331.
- [9] FENG Y Q, YU A B. An analysis of the chaotic motion of particles of different sizes in a gas fluidized bed[J]. Particology, 2008, 6(6): 549-556.
- [10] YE Mao, WANG Junwu, van der HOEF M A, et al. Two-fluid modeling of Geldart A particles in gas-fluidized beds[J]. Particology, 2008, 6(6): 540-548.
- [11] 潘兵,刘雪东,刘文明,等. 基于离散元法的催化剂密相装填过程数值模拟[J]. 中国粉体技术, 2011, 17(6): 36-41.

(上接第8页)

致谢:感谢西北工业大学研究生创业种子基金项目(编号:z2012151)对本研究的大力支持!

参考文献 (References):

- [1] 任俊,卢寿慈,沈健,等. 超细颗粒的静电抗团聚分散[J]. 科学通报, 2000, 45(21): 2289-2292.
- [2] 徐政,卢寿慈. 荷电量对超细粉体静电分散及其分散效果影响[J]. 中国粉体技术, 2004, 10(增刊1): 227-231.
- [3] 李桂春,纪守峰. 超细煤粉的静电分散研究[J]. 中国粉体技术, 2007, 13(1): 23-25.
- [4] 李雪莹,张蓉,刘骞,等. 钕铁氧体磁粉的静电分散[J]. 磁性材料及

器件, 2009, 40(3): 41-45.

- [5] 袁颖. 水雾静电格栅除尘过程的计算机模拟研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2005: 28-35.
- [6] 刘伟军,陈拴柱,张书华. 荷电器内煤粉荷电颗粒运动轨迹仿真[J]. 煤炭转化, 2009, 32(3): 60-64.
- [7] YE Q, DOMNICK J. On the simulation of space charge in electrostatic powder coating with a corona spray gun[J]. Powder Technology, 2003, 135/136: 250-260.
- [8] 王福军. 计算流体力学分析CFD软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 21-22, 119-126.
- [9] 王瑞金,张凯,王刚. Fluent技术基础与应用实例[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 205-228.