

doi:10.3969/j.issn.1671-9492.2022.02.010

菱镁矿粉体颗粒摩擦荷电试验与仿真研究

高海, 王志强, 苏美璇, 李国锋

(大连理工大学 电气工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为了对粉体颗粒摩擦荷电过程进行数值模拟, 以菱镁矿粉体颗粒为研究对象, 利用离散元模型和电荷转移模型对粉体颗粒运动过程和摩擦荷电过程分别进行理论建模。在 EDEM 仿真软件中建立了适用于粉体颗粒摩擦荷电仿真的计算模块, 并应用该模块进行菱镁矿粉体摩擦荷电仿真分析, 考察给料量和滑槽倾斜角度对摩擦荷质比的影响, 同时利用振动槽摩擦荷电装置进行菱镁矿粉体颗粒摩擦荷电对比试验研究。结果表明, 菱镁矿粉体摩擦荷质比随给料量的增加而减小, 随滑槽倾斜角度的增大而减小。试验结果得到了与仿真结果相似的变化趋势, 验证了所建粉体颗粒摩擦荷电数值模型的准确性。研究结果对更精确粉体颗粒摩擦荷电模型的建立和粉体颗粒摩擦带电的进一步应用具有重要意义。

关键词: 摩擦荷电; 菱镁矿粉体; 离散元模型; 电荷转移模型

中图分类号: O572

文献标志码: A

文章编号: 1671-9492(2022)02-0073-08

Experiment and Simulation Study on Magnesite Powder Particle Friction Charging

GAO Hai, WANG Zhiqiang, SU Meixuan, LI Guofeng

(School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology,

Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: In order to numerically simulate the friction charging process of powder particles, the magnesite powder particles is taken as the research object, the discrete element model and the charge transfer model are used to model the movement process of the powder particles and the friction charging process respectively. A calculation module suitable for friction charging simulation of powder particles is established in the EDEM simulation software, and the module is used to perform friction charging simulation analysis of magnesite powder, and to investigate the charge-to-mass ratio at different feed rate and chute inclination. At the same time, the friction charging device of vibrating trough is used to carry out comparative experimental research on friction charging of magnesite powder particles. The results show that the frictional charge-to-mass ratio of magnesite powder decreases with the increase of the feed rate, and decreases with the increase of the inclination angle of the chute. The test results have a similar trend to the simulation results, which verifies the accuracy of the numerical model of powder particle friction charging. Research results are of great significance for the establishment of a more accurate powder particle friction charging model and the further application of powder particle friction charging.

Key words: contact electrification; magnesite powder; discrete element model; charge transfer model

当两种不同的材料相互接触时, 电荷会从一种材料转移到另外一种材料, 这种现象称为接触带电^[1-2]。接触带电在粉体加工和处理过程中很常见, 粉体颗粒在接触过程中荷电, 进而会影响粉体颗粒的动力学行为, 既有有利的影响, 如摩擦电选、静电

喷涂等, 也有不利的影响, 粉体颗粒会黏附在输送管壁上, 甚至会发生爆炸^[3-5]。粉体颗粒的荷电特性已经在选矿领域得到了广泛的应用, 典型的应用是摩擦电选, 其中矿物颗粒摩擦荷电是摩擦电选技术的基础, 荷电后的颗粒在高压分选电场中的运动轨迹

收稿日期: 2021-02-19

基金项目: 辽宁省中央引导地方科技发展专项资金项目(2020JH6/10500020); 国家自然科学基金资助项目(51607023)

作者简介: 高海(1997-), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要从事静电理论及其应用研究。

通信作者: 李国锋(1968-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 博士, 教授, 主要从事电工理论与新技术研究。

不同而实现快速分离,摩擦电选技术具有工艺简单、成本低廉、不产生废水的特点,相比其他物理、化学选矿方法具有较强的适应性^[6-7]。

近年来,已有诸多关于粉体颗粒摩擦荷电性质的研究^[8-14]。在粉体颗粒摩擦荷电试验方面,彭真等^[8]对钛铁矿与长石、石英、云母脉石矿物组成的混合物料进行摩擦电选试验,结果表明,物料的分选效率随着分选电压、给料速度和风量的增大均呈先增大后减小的趋势。郭艳华等^[9]以磷灰石和石英纯矿物作为研究对象,进行了气流带动矿粒摩擦荷电的试验研究,探究给矿压力、给矿速度、温度、矿物粒度及荷电器内衬材料对矿物荷电的影响。在粉体颗粒接触带电过程的数值模拟方面,WATANO等^[10-11]假设颗粒在每次碰撞过程中转移的电荷与法向碰撞速度有关,分析了气力输送过程中的接触带电。HOGUE等^[12-13]假设摩擦电荷是接触时间的函数条件下,进行了摩擦荷电的仿真计算。PEI等^[14]利用离散元模型对不规则颗粒的接触带电过程进行建模,研究了颗粒形状对接触带电的影响。虽然国内外许多学者已经对摩擦荷电的应用和摩擦荷电机理、数值模拟等方面进行了大量研究,但是目前仍然缺少对粉体颗粒摩擦荷电过程中荷电效果评价和荷电量模拟预测的有效方法。

为了对粉体颗粒摩擦荷电过程进行仿真模拟,本文将离散元模型与电荷转移模型结合,从理论上分析了粉体颗粒摩擦荷电的机理和影响粉体颗粒摩擦荷电的因素,对菱镁矿粉体颗粒摩擦带电过程进行数值模拟研究,并且利用振动槽摩擦荷电装置进行摩擦荷电试验研究,考察给料量和滑槽倾斜角度对菱镁矿粉体荷质比的影响,将试验结果与仿真结果对比,进一步验证所建粉体颗粒摩擦荷电数值模型的准确性。研究结果可以为粉体颗粒摩擦荷电过程更精确的仿真分析提供借鉴意义。

1 试验装置及方法

1.1 试验装置

本文搭建的荷质比测量系统如图1所示,由加料系统、摩擦荷电系统和电荷测量系统构成,加料系统由漏斗组成,试验前将一定量的物料堆积在滑槽顶部;摩擦荷电系统由滑槽、振动电机、绝缘支架组成,给滑槽施加振动,物料颗粒沿滑槽滑落,物料颗粒在与滑槽接触摩擦过程中荷电;电荷测量系统由法拉第筒和6.5位分辨率数字万用表(Tektronix DMM 4050)组成,法拉第筒由不锈钢材料制成,每

次试验结束后对法拉第筒内的物料进行称重,计算出物料颗粒的荷质比。

试验所用滑槽材料为铝,长度为1 m,宽度为4.5 cm,滑槽角度可以调节为15°、20°、30°、45°、60°;振动电机的输入电压连续可调范围为0~18 V,通过调节输入电压便可以调节滑槽的振幅;试验前,为了保证试验数据的准确性,法拉第筒的外筒要可靠接地,防止内筒内粉体颗粒产生的电场受到外部环境影响。试验过程中温度为15~25℃,湿度为25%~40%。影响颗粒摩擦荷电量的因素有:给料量、滑槽倾角、滑槽长度及振幅、颗粒在滑槽上的接触时间。

考虑到空气湿度对试验结果准确性的影响,试验前先将物料放于烘箱在100℃下干燥至质量不再发生变化,同时为了避免试验操作的偶然性,每组试验重复5次并取平均值作为最终的试验结果。每次试验结束后,用脱脂棉球对滑槽和法拉第筒清理干净,一方面是为了除去表面残留的粉体颗粒,另一方面是消除壁面积累的电荷。

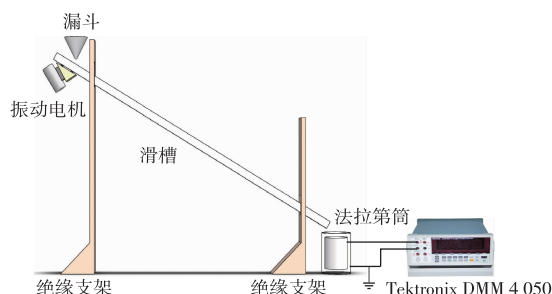


图1 荷质比测量系统

Fig. 1 Charge-to-mass ratio measurement system

1.2 试验原料

试验原料为菱镁矿石粉,来自辽宁大石桥市,通过100目的标准筛筛分确定其粒径为0.15 mm,为了分析其中可能含有的伴生矿物,采用X射线衍射仪分析其物相组成。本次试验测试采用的仪器为日本理学(Rigaku)公司生产的D/MAX-2400型X射线衍射分析仪,X射线衍射分析测试条件:Cu靶,K α 辐射;X射线管电压:40 kV;X射线管电流:100 mA。扫描方式:连续扫描;扫描速度:15°/min;扫描范围:5~80°,得到的X射线衍射图谱如图2所示。通过物相检索,确定其主要成为MgCO₃,含有微量的CaMg(CO₃)₂。

2 数学模型

2.1 离散元模型

离散元方法(Discrete Element Method, DEM)

$$\Delta q = kC\Delta V = kC\left(\frac{V_i - V_j}{e}\right) - V' \quad (7)$$

$$C = \frac{\epsilon_0 \Delta S}{d} \quad (8)$$

式(7)、(8)中, k 是充电常数^[19-20,22], 与颗粒形状有关, 由于本文将颗粒形状考虑为球形, 所以取为 1×10^{-6} ; ΔS 是接触面积变化量, m^2 ; C 是接触形成的等效电容, F ; d 是颗粒与壁面之间接触带电的临界距离, nm ; 与颗粒形状和表面粗糙度有关, 一般取 250 nm ^[1,25]。由于电荷转移过程短暂, 并且试验矿物材料为非导体, 电荷耗散过程很缓慢, 所以本文没有考虑电荷耗散的影响。

由式(7)、(8)可知, 该摩擦荷电模型考虑了接触面积和材料的功函数等特性, 并且每次接触时的电荷转移量与接触材料之间的功函数之差、接触面积变化量成线性关系。

2.3 摩擦带电计算模块

为了实现对粉体颗粒摩擦带电过程的仿真分析, 在 EDEM 软件中, 本文基于颗粒离散元模型和电荷转移模型并且利用应用程序编程接口 (Application Programming Interface, API), 建立了适用于粉体颗粒摩擦带电仿真的计算模块, 计算流程如图 5 所示。

具体来说, 计算流程为:

1) 仿真参数设置。具体包括本征参数(泊松比、弹性模量、密度)和接触参数(弹性碰撞恢复系数、静摩擦系数、滚动摩擦系数)设置, 仿真开始。

2) EDEM 主程序循环。采用 Hertz-Mindlin 模型进行接触力的计算, 利用牛顿第二定律更新颗粒位置。

3) 更新颗粒位置后, 进行接触类型的判断。如果为颗粒与壁面之间接触, 那么根据式(4)计算接触面积, 否则返回步骤 2)。

4) 接触面积增加量的计算。通过比较相邻时间步的接触面积值, 如果当前时间步的接触面积大于上一时间步的接触面积, 计算接触面积增加量, 否则颗粒电荷量保持不变。

5) 电荷转移量的计算。在得到相邻时间步的接触面积增加量后, 根据式(7)、(8)计算电荷转移量, 更新当前时间颗粒电荷量。

6) 判断是否达到仿真时间。如果达到仿真时间, 计算结束, 否则返回步骤 2)。

通过以上叙述, 可以总结出该摩擦带电计算模块适用于以下条件: 电荷在功函数不同的材料之间转移; 电荷均匀分布在颗粒表面; 忽略电荷耗散的影响。

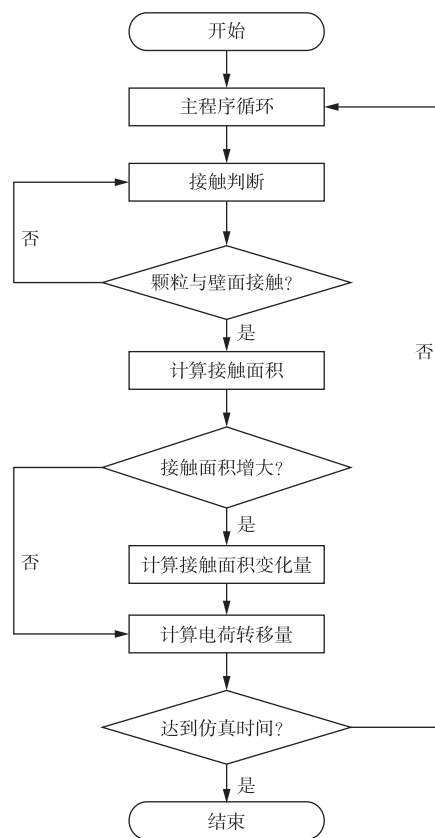


图 5 接触带电模型流程

Fig. 5 Flowsheet of contact electrification model

3 结果和分析

3.1 仿真研究

为了验证 2.3 小节中所述摩擦带电计算模块的准确性, 利用 EDEM 软件进行了菱镁矿粉体颗粒与铝滑槽摩擦带电的仿真分析, 分析给料量和滑槽倾斜角度对颗粒摩擦荷质比的影响。首先, 假设粉体颗粒为球形颗粒, 将一定质量的球形颗粒堆积在滑槽顶部, 然后颗粒释放, 沿滑槽滑落, 颗粒在与滑槽接触摩擦过程中荷电, 最后统计颗粒电荷量, 所建仿真模型如图 6 所示。颗粒与滑槽的物理性质参数及颗粒与颗粒、颗粒与滑槽之间接触参数设置如表 1 所示, 其中接触参数由堆积角虚拟试验标定^[26-28]。

3.1.1 给料量对颗粒荷质比的影响

给料量影响颗粒荷质比。为了探究不同给料量对颗粒荷质比的影响, 当滑槽倾斜角度为 20° , 给料量分别为 0.3 、 0.5 、 0.8 、 1.0 、 1.2 g 时进行仿真分析, 得到的不同给料量时的颗粒荷质比随时间变化关系如图 7 所示。由图 7 可知, 在同一时刻, 颗粒荷质比随给料量的增加而减小; 颗粒荷质比变化率随给料量的增加而减小; 此外, 随着时间的增加, 颗粒荷质

比逐渐增加,但是颗粒荷电速率逐渐减小,这与公式(7)表示的转移电荷量随颗粒带电量的增加而减小的关系一致,并且颗粒荷质比随时间变化,最终达到最大值。

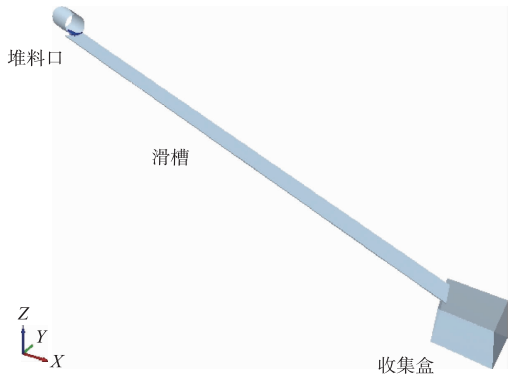


图 6 仿真模型

Fig. 6 Simulation model

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

仿真参数	数值
菱镁矿颗粒泊松比	0.36
菱镁矿颗粒密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	3 010
菱镁矿颗粒弹性模量/GPa	11.35
菱镁矿颗粒功函数/eV	6.25
铝滑槽泊松比	0.33
铝滑槽密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 700
铝滑槽弹性模量/GPa	71.7
铝滑槽功函数/eV	4.33
菱镁矿与菱镁矿碰撞恢复因数	0.1
菱镁矿与菱镁矿静摩擦因数	0.6
菱镁矿与菱镁矿滚动摩擦因数	0.1
菱镁矿与铝滑槽碰撞恢复因数	0.3
菱镁矿与铝滑槽静摩擦因数	0.2
菱镁矿与铝滑槽滚动摩擦因数	0.1

为了进一步探究给料量对颗粒荷质比的影响,当滑槽倾斜角度为 20° 时,仿真得到不同给料量时颗粒最终荷质比结果如图 8 所示。由图 8 可以看出,菱镁矿粉体颗粒与铝滑槽接触摩擦时带负电,这符合摩擦带电序列的规律,并且荷质比随给料量的增加而减小。这是因为只有在滑槽底部的颗粒才会与滑槽接触摩擦,而堆积在上部的颗粒与滑槽之间的接触不充分,从而荷电不均匀,随着给料量的增加,颗粒荷电不均匀性增强;另一方面,随着给料量的增加,颗粒与滑槽的有效接触面积减小,由式(7)、(8)可知,摩擦荷电量与接触面积有关,摩擦荷电量随着接触面积的减小而减少。

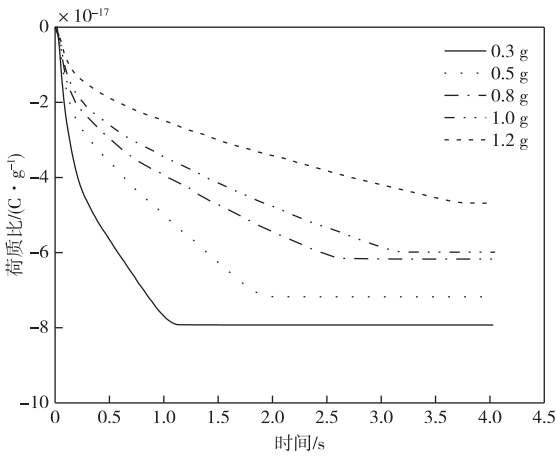


图 7 不同给料量时的颗粒荷质比

Fig. 7 Particle charge-to-mass ratio at different feed ratio

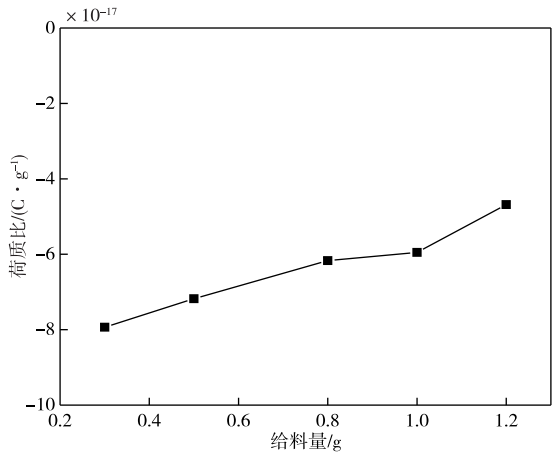


图 8 给料量对摩擦荷质比的影响

Fig. 8 Effect of feeding rate on friction charge-mass ratio

3.1.2 滑槽倾斜角度对颗粒荷质比的影响

滑槽倾斜角度影响颗粒荷质比。为了探究不同滑槽倾斜角度对颗粒荷质比的影响,当给料量为 0.5 g,选取滑槽倾斜角度分别为 15° 、 20° 、 30° 、 45° 、 60° 进行仿真分析,得到的不同滑槽倾斜角度时的颗粒荷质比随时间变化关系如图 9 所示。由图 9 可知,滑槽倾斜角度越大时,颗粒荷质比越容易达到饱和,这是因为滑槽倾斜角度越大,在同一时间,颗粒运动速度越大,接触摩擦产生的能量也越多,摩擦荷电量具有随摩擦过程中产生的能量增加而增加的倾向,从而有利于电荷的积累。此外,随着时间的增加,颗粒荷电速率逐渐减小,这与公式(7)表示的转移电荷量随颗粒带电量的增加而减小的关系一致,并且颗粒荷质比随时间变化,最终达到最大值。

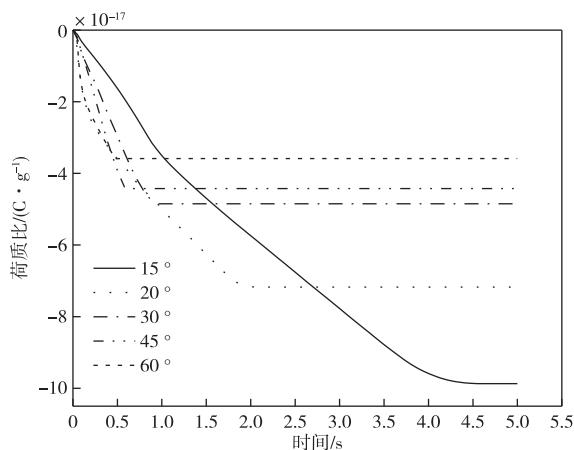


图9 不同滑槽倾斜角度时的颗粒荷质比

Fig. 9 Particle charge-to-mass ratio at different chute inclination angles

为了进一步探究滑槽倾斜角度对颗粒荷质比的影响,当给料量为0.5 g时,仿真得到不同滑槽倾斜角度时颗粒最终荷质比结果如图10所示。由图10可以看出,菱镁矿粉体颗粒与铝滑槽接触摩擦的荷质比随滑槽倾斜角度的增大而减小,这是因为当滑槽倾斜角度增大时,颗粒在滑槽上面的滑动速度增大,导致接触时间减少,虽然摩擦荷电量具有随摩擦过程中产生的能量增加而增加的倾向,但是此时由于接触时间减少,荷电不充分,颗粒荷质比因此减小。

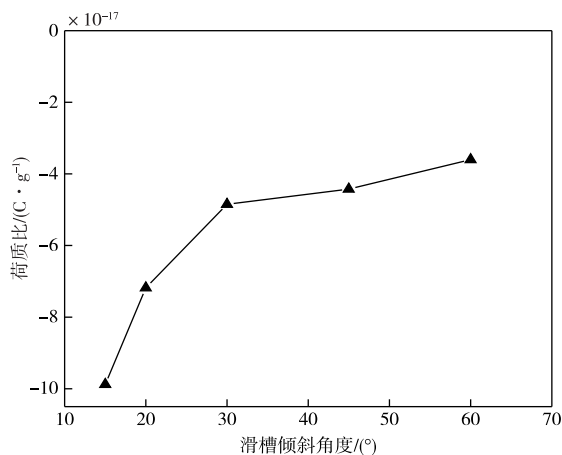


图10 滑槽倾斜角度对摩擦荷质比的影响

Fig. 10 Effect of slide inclination angle on friction charge-mass ratio

3.2 试验研究

根据1.1小节中的试验方案,以图1所示的试验装置,菱镁矿粉体颗粒为试验原料进行摩擦荷电试验研究,探究给料量和滑槽倾斜角度对颗粒摩擦荷质比的影响,将最终得到的试验结果与仿真结果进

行对比,进一步验证所建颗粒摩擦带电模型的准确性。

3.2.1 给料量对颗粒荷质比的影响

为了验证本文所建颗粒摩擦荷电模型的准确性,当滑槽倾斜角度为20°,给料量分别为0.3、0.5、0.8、1.0、1.2 g时,比较试验和仿真所得颗粒荷质比结果的不同。图11为不同给料量时,颗粒荷质比仿真结果与试验结果对比图,由图11可以看出,颗粒荷质比试验结果与仿真结果变化趋势一致,即颗粒荷质比随给料量增加而减小,在数值上也能够较好的吻合,其中当给料量为0.5 g时,吻合一致性最好,在给料量为0.3 g时偏差较大,偏差比例为16.1%,试验结果略小于仿真结果。通过在不同给料量下最终颗粒荷质比试验结果与仿真结果的对比,验证了所建颗粒摩擦荷电数值模型的准确性。

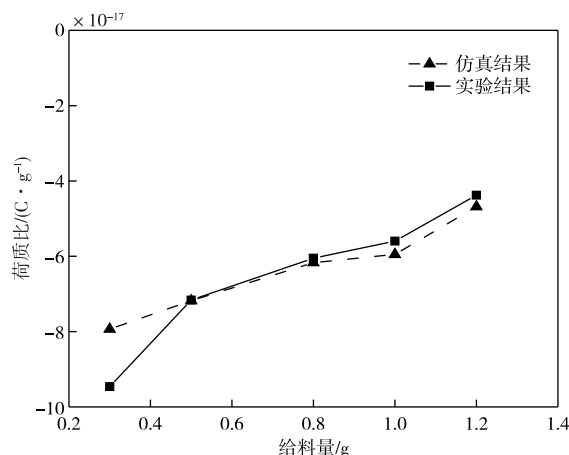


图11 给料量不同时荷质比仿真与试验结果对比

Fig. 11 Comparison of simulation and experimental results of charge-mass ratio at different feeding rates

3.2.2 滑槽倾斜角度对颗粒荷质比的影响

当给料量为0.5 g,滑槽倾斜角度分别为15°、20°、30°、45°、60°时,比较试验和仿真所得颗粒荷质比结果的不同。图12为不同滑槽倾斜角度时,颗粒荷质比试验结果与仿真结果对比。由图12可以看出,颗粒荷质比仿真结果与试验结果变化趋势一致,即颗粒荷质比随滑槽倾斜角度的增大而减小,在数值上也能够较好地吻合,其中当滑槽倾斜角度为20°时,吻合一致性最好,当滑槽倾斜角度为15°时偏差较大,偏差比例为26.3%,仿真结果略大于试验结果。通过在不同滑槽倾斜角度下颗粒最终荷质比试验结果与仿真结果的对比,验证了所建颗粒摩擦荷电数值模型的准确性。

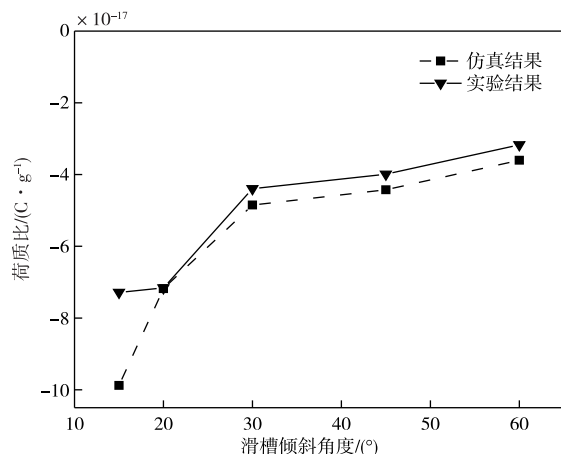


图 12 滑槽倾斜角度不同时荷质比仿真与试验结果对比

Fig. 12 Comparison of simulation and test results of charge-mass ratio at different chute inclination angle

4 结论

本文利用离散元模型和电荷转移模型对粉体颗粒摩擦带电过程进行数值建模,建立了适用于粉体颗粒摩擦带电仿真的计算模块,并应用该模块进行菱镁矿粉体颗粒摩擦带电仿真分析,同时利用振动槽摩擦荷电试验装置进行对比试验研究,考察了给料量和滑槽倾斜角度对颗粒荷质比的影响,得到以下结论:

1)菱镁矿粉体颗粒与铝滑槽摩擦荷电后带负电,荷质比随给料量的增加而减小,随滑槽倾斜角度的增加而减小。

2)在相同的条件下,试验结果与仿真结果具有相同的变化趋势,即菱镁矿粉体颗粒荷质比随给料量的增加而减小,随滑槽倾斜角度的增大而减小,并且在数值上也具有较好的吻合性,验证了所建粉体颗粒摩擦带电模型的准确性。

3)由于仿真条件没有考虑空气温度、湿度的影响,且把粉体颗粒视为完美的球形颗粒,导致试验结果与仿真结果之间存在一定偏差,但是试验研究和仿真研究相互结合的方法仍然是定量理解粉体颗粒摩擦带电过程的有效方法。

参考文献

[1] NAIK S, SARKAR S, GUPTA V, et al. A combined experimental and numerical approach to explore tribocharging of pharmaceutical excipients in a hopper chute assembly [J]. International Journal of Pharmaceutics, 2015, 491(1/2): 58-68.

[2] PEI C, WU C, ENGLAND D, et al. Numerical analysis

of contact electrification using DEM-CFD[J]. Powder Technology, 2013, 248: 34-43.

[3] YAO J, ZHOU F, ZHAO Y L. Charge generation and electrostatic equilibrium for single granules during sliding[J]. China Particuology, 2016, 29(6): 126-134.

[4] NAIK S, MUKHERJEE R, CHAUDHURI B. Triboelectrification: A review of experimental and mechanistic modeling approaches with a special focus on pharmaceutical powders [J]. International Journal of Pharmaceutics, 2016, 510(1): 375-385.

[5] IRELAND P M. Triboelectrification of particulate flows on surfaces; Part I-Experiments [J]. Powder Technology, 2010, 198(2): 189-198.

[6] 赵小路, 王海锋, 李焱, 等. 低品位菱镁矿摩擦电选提纯的试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(1): 9-14.

ZHAO Xiaolu, WANG Haifeng, LI Yao, et al. Experimental study on triboelectric separation and purification of low-grade magnesite [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(1): 9-14.

[7] 郭健, 董克增, 黄正梁, 等. 煤中伴生矿物的摩擦荷电特性[J]. 化工学报, 2014, 65(10): 3776-3782.

GUO Jian, DONG Kezeng, HUANG Zhengliang, et al. Frictional charging characteristics of associated minerals in coal[J]. Journal of Chemical Industry, 2014, 65(10): 3776-3782.

[8] 彭真, 杨兴, 王海锋, 等. 钛铁矿摩擦静电分选研究[J]. 金属矿山, 2018, 47(2): 80-84.

PENG Zhen, YANG Xing, WANG Haifeng, et al. Study on friction electrostatic separation of ilmenite[J]. Metal Mine, 2018, 47(2): 80-84.

[9] 郭艳华, 戴惠新, 杨鑫龙, 等. 气流带动磷矿摩擦荷电的机理研究[J]. 非金属矿, 2013, 36(5): 46-49.

GUO Yanhua, DAI Huixin, YANG Xinlong, et al. Study on the mechanism of phosphate rock friction charging driven by airflow[J]. Non-Metallic Mines, 2013, 36(5): 46-49.

[10] WATANO S, SAITO S, SUZUKI T. Numerical simulation of electrostatic charge in powder pneumatic conveying process[J]. Powder Technology, 2003, 135-136: 112-117.

[11] WATANO S. Mechanism and control of electrification in pneumatic conveying of powders [J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(7): 2271-2278.

[12] HOGUE M D, CALLE C I, WEITZMAN P S, et al. Calculating the trajectories of triboelectrically charged particles using Discrete Element Modeling (DEM)[J]. Journal of Electrostatics, 2008, 66(1/2): 32-38.

- [13] HOGUE M D, CALLE C I, CURRY D R, et al. Discrete Element Modeling (DEM) of triboelectrically charged particles; Revised experiments [J]. Journal of Electrostatics, 2009, 67(4): 691-694.
- [14] PEI C, WU C, ADAMS M. Numerical analysis of contact electrification of non-spherical particles in a rotating drum [J]. Powder Technology, 2015, 285: 110-122.
- [15] PEI C, WU C, ADAMS M, et al. Contact electrification and charge distribution on elongated particles in a vibrating container [J]. Chemical Engineering Science, 2015, 125: 238-247.
- [16] PEI C, WU C, ADAMS M. DEM-CFD analysis of contact electrification and electrostatic interactions during fluidization [J]. Powder Technology, 2016, 304: 208-217.
- [17] MINDLIN R D, DERESIEWICZ H. Elastic spheres in contact under varying oblique forces [J]. Journal of Applied Mechanics Transactions of the ASME, 1953, 20(3): 327-344.
- [18] LAURENTIE J C, TRAORE P, DASCALESCU L. Discrete element modeling of triboelectric charging of insulating materials in vibrated granular beds [J]. Journal of Electrostatics, 2013, 71(6): 951-957.
- [19] MATSUSAKA S, MARUYAMA H, MATSUYAMA T, et al. Triboelectric charging of powders; A review [J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(22): 5781-5807.
- [20] MATSUSAKA S, GHADIRI M, MASUDA H. Electrification of an elastic sphere by repeated impacts on a metal plate [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2000, 33(18): 2311-2319.
- [21] 朱利, 郑会志, 张冬雪, 等. 蒙皮材料静电起电理论分析及试验验证 [J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2778-2782.
- ZHU Li, ZHENG Huizhi, ZHANG Dongxue, et al. Theoretical analysis and experimental verification of electrostatic charging of skin materials [J]. High Voltage Technology, 2014, 40(9): 2778-2782.
- [22] HU J W, GU P F, ZHOU Q, et al. Experimental and modeling study on mechanisms of sliding and rolling electrification [J]. Powder Technology, 2018, 340: 484-494.
- [23] 安振连, 陈清如, 章新喜. 粉体碰撞带电机理的探讨 [J]. 中国矿业大学学报, 1997, 26(2): 71-74.
- AN Zhenlian, CHEN Qingru, ZHANG Xinxi. Discussion on the electrical mechanism of powder collision belt [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1997, 26(2): 71-74.
- [24] 杜照恒, 刘尚合, 魏明, 等. 飞行器静电起电与放电模型及仿真分析 [J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2806-2812.
- DU Zhaozheng, LIU Shanghe, WEI Ming, et al. Aircraft electrostatic electrification and discharge model and simulation analysis [J]. High Voltage Technology, 2014, 40(9): 2806-2812.
- [25] NAIK S, SARKAR S, HANCOCK B, et al. An experimental and numerical modeling study of tribocharging in pharmaceutical granular mixtures [J]. Powder Technology, 2016, 297: 211-219.
- [26] 武涛, 黄伟凤, 陈学深, 等. 考虑颗粒间黏结力的黏性土壤离散元模型参数标定 [J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(3): 93-98.
- WU TAO, HUANG Weifeng, CHEN Xueshen, et al. Calibration of discrete element model parameters of cohesive soil considering interparticle cohesion [J]. Journal of South China Agricultural University, 2017, 38(3): 93-98.
- [27] 刘凡一, 张舰, 李博, 等. 基于堆积试验的小麦离散元参数分析及标定 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 247-253.
- LIU Fanyi, ZHANG Jian, LI Bo, et al. Analysis and calibration of wheat discrete element parameters based on stacking experiment [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(12): 247-253.
- [28] 胡永会. 基于 FEM、CFD 与 DEM 动态耦合模型的磁选全过程仿真浅析 [J]. 有色金属(选矿部分), 2016(1): 73-77, 87.
- HU Yonghui. Analysis on simulation of magnetic separation process using dynamic coupled FEM, CFD and DEM model [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2016(1): 73-77, 87.

(本文编辑 刘水红)